



# ตำราวิชาการระบบโทรคมนาคม

พ.ศ. ๒๕๖๒

โดย

กองสื่อสารโทรคมนาคม กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ

กองทัพอากาศ

ดอนเมือง

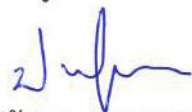
กรุงเทพมหานคร


## คำนำ


ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านระบบโทรคมนาคม มีการพัฒนาไปอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการที่จะส่งข้อมูลอัตราเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือและมีความคล่องตัวในการใช้งาน ระบบโทรคมนาคมที่ใช้กันอยู่มี ๓ ประเภทหลัก ได้แก่ ระบบสื่อสารผ่านไมโครเวฟ ดาวเทียม และเส้นใยแก้วนำแสง การเลือกใช้สื่อแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของภูมิประเทศและการประยุกต์การใช้งาน


ตำราวิชาการระบบโทรคมนาคม รวบรวมและเรียบเรียงขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นตำราในการสอบคัดเลือกนายทหารสัญญาบัตร เหล่าทหารสื่อสาร จำพวกทหารสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์และเพื่อให้ผู้อ่านได้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบโทรคมนาคมรวมถึงใช้เป็นตำราประกอบการเรียนการสอนในวิชาการระบบโทรคมนาคม

ผู้เขียนและรวบรวมตำราเล่มนี้ ขอขอบคุณข้าราชการทุกท่านที่จัดทำและเจ้าของบทความเกี่ยวกับระบบโทรคมนาคม กองโทรคมนาคม ฯ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับการรวบรวมจากผู้รู้และผู้ทำงานด้านโทรคมนาคมในตำราเล่มนี้ คงเป็นประโยชน์ต่อท่านผู้อ่านไม่มากนักน้อยหากมีข้อผิดพลาดบกพร่องประการใดในตำราเล่มนี้ ผู้เขียนต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นาวาอากาศโท   
(ปรัชญา พลายเวช)

นาวาอากาศโท   
(นิรุทธ์ ศุภสาร)

นาวาอากาศเอก   
(กิตติ ฉันทวุฒิ)  
คณะผู้จัดทำ

นาวาอากาศเอก   
(ธานี สินรวาชีวะ)  
ผอ.กสท.สอ.ทอ.  
ประธานที่ปรึกษา

# สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ ๑ พื้นฐานระบบโทรคมนาคม(Basic Telecommunications)	๑
๑. กล่าวนำ	๑
๒. การสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunications)	๒
๒.๑ องค์ประกอบและหน้าที่ของระบบโทรคมนาคม	๓
๒.๒ หน้าที่ของระบบโทรคมนาคม	๕
๓. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่น	๕
๓.๑ เสียงพูด ( Speech or Voice signal)	๖
๓.๒ รูปคลื่น(waveform)	๖
๓.๓ Bandpass และ bandwidth	๘
๓.๔ ระดับสัญญาณในวงจรโทรคมนาคม	๘
๓.๕ คำจำกัดความเกี่ยวกับระบบสื่อสารสัญญาณ (transmission terminology)	๑๐
๓.๖ การใช้งานวงจรเสียงสำหรับการส่งข้อมูลดิจิทัล (Transmission of digital data over voice - grade circuits)	๑๘
๓.๗ จากระบบ Analog มาเป็นระบบ Digital	๒๙
๔. ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ทอ.	๓๐
๔.๑ ความเชื่อถือได้ (Reliability)	๓๐
๔.๒ ความปลอดภัยในการสื่อสาร (Security)	๓๑
๔.๓ ความอ่อนตัว (Flexibility)	๓๑
๔.๔ สามารถบริหารจัดการ และควบคุมดูแลจากส่วนกลาง (Manageability)	๓๑
บทที่ ๒ ระบบไมโครเวฟ (Microwave System)	๓๔
๑. องค์ประกอบของชุดวิทยุไมโครเวฟ	๓๔
๑.๑ เครื่องส่ง	๓๔
๑.๒ ภาคนผลิตความถี่วิทยุ (Oscillator)	๓๕
๑.๓ Modulator	๓๕
๑.๔ เครื่องรับ (Receiver Equipment)	๓๕
๑.๕ สายอากาศ (Antenna)	๓๕

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
๒. การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟ	๓๖
๒.๑ การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุทั่ว ๆ ไป	๓๖
๒.๒ คลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกจากสายอากาศเครื่องส่ง	๓๗
๒.๓ ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ	๓๘
๒.๔ สิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อ การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ และแก้กันอย่างไร	๓๘
๒.๕ สายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟ	๕๑
๒.๖ โครงสร้างของสายอากาศแบบต่างๆ ที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ	๕๖
๓. ระบบการสื่อสารย่านไมโครเวฟ (Microwave Communication System)	๖๓
๓.๑ การวางระบบไมโครเวฟ	๖๔
๓.๒ คลื่นวิทยุ	๖๔
๓.๓ คุณลักษณะของเครื่องมือที่จะนำไปติดตั้ง	๖๔
๓.๔ ขั้นตอนในการวางแผนเพื่อวางระบบไมโครเวฟ	๗๘
บทที่ ๓ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite Communication System)	๙๒
๑. ดาวเทียมแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ ๕ ประเภท ดังนี้	๙๒
๑.๑ ดาวเทียมระหว่างประเทศ (International Communication Satellite)	๙๒
๑.๒ ดาวเทียมภายในประเทศหรือภูมิภาค (Domestic and regional Satellite)	๙๒
๑.๓ ดาวเทียมทางทหาร (Military Communication Satellite)	๙๓
๑.๔ ดาวเทียมสำหรับการส่งโทรทัศน์และความมุ่งหมายพิเศษ (Broadcast and Special purpose satellite)	๙๓
๑.๕ ดาวเทียมเพื่อการทดลอง (Experimental Satellite)	๙๓
๒. วงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit) สามารถแบ่งได้ดังนี้	๙๓
๒.๑ การแบ่งดาวเทียมแบ่งตามเส้นแบ่งวงโคจร	๙๓
๒.๒ การแบ่งตามรูปร่างลักษณะวงโคจร	๙๓
๒.๓ การแบ่งตามความสูงของวงโคจร	๙๓
๓. ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม	๙๕
๓.๑ ความถี่ย่าน VHF	๙๖
๓.๒ ความถี่ย่าน L-Band	๙๖
๓.๓ ความถี่ย่าน C-Band Up-link 5.850-6.425 GHz, Down-link 3.625-4.2 GHz	๙๖
๓.๔ ความถี่ย่าน X-Band Up-link 7.90-8.40 GHz, Down-link 7.25-7.75 GHz	๙๖
๓.๕ ความถี่ย่าน Ku-Band Up-link 14.0-14.5 GHz, Down-link 10.95-12.75 GHz	๙๖
๓.๖ ความถี่ย่าน Ka-Band ย่านความถี่ 30/20 GHz	๙๖

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
๔. องค์ประกอบระบบสื่อสารดาวเทียม (Satellite System)	๙๗
๔.๑ ดาวเทียม (Satellite)	๙๗
๔.๒ ส่วนประกอบหลักของดาวเทียม	๙๘
๔.๓ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (Satellite Earth Station)	๑๐๓
๕. การทำงานของดาวเทียม	๑๑๒
๕.๑ จานสายอากาศ (Antenna Dish)	๑๑๓
๕.๒ สถานีภาคพื้น (Earth Station)	๑๑๕
๖. ลักษณะทั่วไปของสถานีดาวเทียม	๑๑๖
๖.๑ อุปกรณ์เชื่อมต่อรับช่องสื่อสาร (Interface Unit)	๑๑๖
๗. เทคนิคการเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access Technique)	๑๒๒
๗.๑ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA )	๑๒๒
๗.๒ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA)	๑๒๓
๗.๓ การเข้าถึงหลายทางแบบสุ่ม (Random Multiple Access : RMA) หรือแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA)	๑๒๖
๘. สัญญาณการรบกวนในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (Interference)	๑๓๓
๙. ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมของ ทอ.	๑๓๖
๙.๑ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมหลัก MFTDMA (Multi Frequency Time Division Multiple Access)	๑๓๗
๙.๒ ชุดสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ SCPC (Fly Away)	๑๓๙
บทที่ ๔ ระบบสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Communication System)	๑๔๓
๑. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแสงและการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง	๑๔๕
๑.๑ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง	๑๔๕
๒. คุณสมบัติของแสง	๑๔๖
๒.๑ การหักเหของแสง และมุมหักเหของแสง	๑๔๗
๓. เส้นทางของแสงในสายไฟเบอร์ออปติก	๑๔๙
๓.๑ คุณลักษณะในการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง	๑๕๐
๓.๒ โครงสร้าง (ส่วนประกอบ) ของเส้นใยนำแสง	๑๕๗
๓.๓ อุปกรณ์รับแสง	๑๖๕
๓.๔ องค์ประกอบระบบพื้นฐาน	๑๗๕
๓.๕ องค์ประกอบของระบบสื่อสารทางแสง	๑๗๘
๓.๖ เครื่องมือทดสอบทางด้านสื่อสารใยแก้วนำแสง	๒๑๓

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ ๕ การสื่อสารข้อมูลและเครือข่าย (Data Communication and Network)	๒๕๔
๑. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารข้อมูล	๒๕๔
๑.๑ องค์ประกอบพื้นฐานในการสื่อสารข้อมูล	๒๕๔
๑.๒ การสื่อสารข้อมูลทางคอมพิวเตอร์	๒๕๕
๑.๓ ชนิดของการสื่อสาร	๒๕๕
๑.๔ สื่อกลางการสื่อสาร (Transmission media)	๒๕๖
๑.๕ อุปกรณ์สำหรับการสื่อสาร	๒๖๓
๒. ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Computer Network)	๒๖๔
๒.๑ รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบเครือข่าย (Network topology)	๒๖๖
๒.๒ องค์ประกอบของระบบเครือข่ายและการเชื่อมโยงระบบเครือข่าย (Internetworking)	๒๖๘
๒.๓ ประเภทของเครือข่าย	๒๗๗
๓. เครือข่ายสื่อสารข้อมูล ทอ.	๓๑๗
๓.๑ เครือข่ายสารสนเทศด้านการยุทธ (CIS: Combat Information System)	๓๑๗
๓.๒ ระบบการประชุมทางไกลผ่านวิดีโอ (VTC: Video-Tele Conference)	๓๑๗
๓.๓ เครือข่ายสารสนเทศด้านการสนับสนุน (SIS: Support Information System)	๓๑๘
บรรณานุกรม	๗

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ ๑-๑ ตารางแสดงการทดสอบ Bit Error Rate Test	๒๒
ตารางที่ ๑-๒ แสดงคุณสมบัติโดยประมาณของ guided medium จำนวน ๓ ชนิด	๒๕
ตารางที่ ๒-๑ ความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศแบบ Parabolic	๕๔
ตารางที่ ๓-๑ แสดงข้อมูลดาวเทียมไทยคม ๖ (ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคอาจมีการเปลี่ยนแปลง)	๑๔๑
ตารางที่ ๔-๑ ตารางแสดงค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางต่างๆ	๑๔๘
ตารางที่ ๔-๒ ค่าการสูญเสียเปรียบเทียบกับออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์	๑๗๑
ตารางที่ ๔-๓ ตารางแสดงลำดับฮาร์มอนิก	๒๑๔
ตารางที่ ๔-๓ แสดงรายละเอียดของ Ethernet แต่ละชนิด	๒๗๙

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ ๑-๑ แสดงการทำงานของระบบโทรคมนาคม	๒
ภาพที่ ๑-๒ ( ก ) แบบจำลองทั่วไป	๔
ภาพที่ ๑-๓ ( ข ) ตัวอย่างที่ใช้งานจริงในระบบการสื่อสารข้อมูล	๔
ภาพที่ ๑-๔ แบบจำลองของระบบการสื่อสารโทรคมนาคม	๔
ภาพที่ ๑-๕ รูปแสดง ตัวอย่างของคลื่น	๕
ภาพที่ ๑-๖ รูปแสดง ตัวแปรที่สำคัญของคลื่น	๖
ภาพที่ ๑-๗ รูปแสดงหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงและ รูปคลื่นอย่างง่าย	๖
ภาพที่ ๑-๘ แสดงการกำเนิด AC. Waveform อย่างง่าย	๘
ภาพที่ ๑-๙ รูปแสดง หลักการของ point-to-point และ multipoint	๑๑
ภาพที่ ๑-๑๐ สัญญาณ Analog	๑๓
ภาพที่ ๑-๑๑ สัญญาณ digital	๑๓
ภาพที่ ๑-๑๒ หลักการทำงานของ Repeater และ Regenerator	๑๔
ภาพที่ ๑-๑๓ แสดงผลการรบกวนแบบต่างๆ ที่มีต่อสัญญาณ	๑๗
ภาพที่ ๑-๑๔ attenuation distortion ตาม ITU-T M.1020	๑๙
ภาพที่ ๑-๑๕ delay distortion ตาม ITU-T M.1020	๑๙
ภาพที่ ๑-๑๖ FIG A-1/ M.1020	๒๑
ภาพที่ ๑-๑๗ หลักการของอุปกรณ์ hybrid	๒๓
ภาพที่ ๑-๑๘ echo suppressor; (a) หลักการ; (b) Block diagram	๒๓
ภาพที่ ๑-๑๙ Block diagram แสดงการทำงานของ echo canceller	๒๔
ภาพที่ ๑-๒๐ characteristic of guided media	๒๕
ภาพที่ ๒-๑ แสดงรูปแบบเบื้องต้นของการสื่อสารระบบไมโครเวฟ	๓๔
ภาพที่ ๒-๒ แสดงโครงสร้างของ Parabolic Reflector	๓๕
ภาพที่ ๒-๓ แสดง Line of Forces ในการแพร่กระจายคลื่น	๓๖
ภาพที่ ๒-๔ แสดง Ground Reflection	๓๙
ภาพที่ ๒-๕ แสดง Phase reversal due to a reflection	๔๐
ภาพที่ ๒-๖ แสดง Fresnel Zone	๔๐
ภาพที่ ๒-๗ แสดง First Fresnel zone radius (6.175 GHz.)	๔๑
ภาพที่ ๒-๘ แสดง Multiplying factor to convert Fresnel zone radius calculated for 6.175 GHz.	๔๒
ภาพที่ ๒-๙ แสดง Typical profile plot showing first fresnel zone for 100 MHz and 10 GHz.	๔๓
ภาพที่ ๒-๑๐ แสดง Effect of path clearance on radio path propagation	๔๔



## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๒-๑๑ แสดง Effect of path clearance on radio path propagation	๔๕
ภาพที่ ๒-๑๒ แสดง Estimated atmospheric absorption	๔๖
ภาพที่ ๒-๑๓ แสดง Refraction of a microwave beam	๔๗
ภาพที่ ๒-๑๔ แสดง transmission distance increased by refraction	๔๗
ภาพที่ ๒-๑๕ แสดง Effective earth profile for several k-factor showing relative obstacle clearance	๔๘
ภาพที่ ๒-๑๖ (a) Microwave beam bending for difference k-factors (b) Antenna oriented for maximum path length for various k-factor	๔๙
ภาพที่ ๒-๑๗ แสดง Microwave beam trapped in a duct	๕๐
ภาพที่ ๒-๑๘ แสดง Front feed paraboroid antenna	๕๒
ภาพที่ ๒-๑๙ แสดง Radiation pattern isotropic antenna	๕๒
ภาพที่ ๒-๒๐ แสดง Variation of antenna Gain with Frequency	๕๓
ภาพที่ ๒-๒๑ แสดง Radiation pattern for a microwave antenna	๕๔
ภาพที่ ๒-๒๒ แสดง Approximate Antenna Gain and Bandwidth	๕๕
ภาพที่ ๒-๒๓ แสดง โครงสร้างสายอากาศแบบสลีต	๕๖
ภาพที่ ๒-๒๔ แสดง โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์น	๕๖
ภาพที่ ๒-๒๕ แสดง สายอากาศแบบพาราโบลา	๕๗
ภาพที่ ๒-๒๖ แสดง สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลอยด์	๕๘
ภาพที่ ๒-๒๗ แสดง สายอากาศแบบฮอร์นรีเฟรกเตอร์	๕๘
ภาพที่ ๒-๒๘ แสดง สายอากาศแบบแคสซีเมกรอน	๕๙
ภาพที่ ๒-๒๙ แสดง ลักษณะของ WAVEGUIDE	๖๐
ภาพที่ ๒-๓๐ แสดง การใส่ Probe Coupling ใน WAVEGUIDE	๖๐
ภาพที่ ๒-๓๑ แสดง การใส่ Loop Coupling ใน WAVEGUIDE	๖๐
ภาพที่ ๒-๓๒ แสดง WAVEGUIDE Coupled to a Reflector	๖๑
ภาพที่ ๒-๓๓ แสดง การเชื่อมต่อ WAVEGUIDE เข้ากับ Meter	๖๒
ภาพที่ ๒-๓๔ แสดง การใส่ Dummy Load เข้ากับ WAVEGUIDE	๖๒
ภาพที่ ๒-๓๕ แสดง รูปแบบเบื้องต้นของการสื่อสารไมโครเวฟ	๖๓
ภาพที่ ๒-๓๖ แสดง First Fresnel Zone	๖๔
ภาพที่ ๒-๓๗ แสดง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง	๖๕
ภาพที่ ๒-๓๘ แสดง Free Space Loss ระหว่างสายอากาศแบบ Isotropic	๖๖
ภาพที่ ๒-๓๙ แสดง Free Space Loss ต่อความถี่และระยะทาง	๖๗
ภาพที่ ๒-๔๐ แสดง การกระจายคลื่นของ Isotropic Antenna	๖๗
ภาพที่ ๒-๔๑ แสดง การตั้งขั้ววิทยุไมโครเวฟในที่สูงและต่ำ	๗๐

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๒-๔๒ แสดง Ellipsoid ของ First Fresnel Zone	๗๐
ภาพที่ ๒-๔๓ แสดง ระดับสัญญาณอันอาจจะเกิดจากการสะท้อน	๗๑
ภาพที่ ๒-๔๔ แสดง การเกิด Obstruction	๗๒
ภาพที่ ๒-๔๕ แสดง แนวทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในลักษณะ Line Of Sight	๗๒
ภาพที่ ๒-๔๖ แสดง a) inverse bending, substandard conditions b) positive bending, superstandard condition	๗๓
ภาพที่ ๒-๔๗ แสดง Mechanics multipath fading	๗๔
ภาพที่ ๒-๔๘ แสดง ส่วนประกอบของระบบ Space Diversity	๗๖
ภาพที่ ๒-๔๙ แสดง ส่วนประกอบของระบบ Frequency Diversity	๗๗
ภาพที่ ๒-๕๐ แสดง การเลือกเส้นทางไมโครเวฟ	๘๑
ภาพที่ ๒-๕๑ แสดง การทำจุดจากภาพแผนที่ ภาพสัญญาณด้านข้าง	๘๒
ภาพที่ ๒-๕๒ แสดง การนำเอาระดับความสูงที่ได้มา Plot ลงในกระดาษ	๘๓
ภาพที่ ๒-๕๓ แสดง การทำภาพสัญญาณด้านข้างบนกระดาษกราฟเส้นตรง	๘๗
ภาพที่ ๒-๕๔ แสดง ค่า Watt เป็น dBm และการหาค่าเกินสายอากาศ	๘๙
ภาพที่ ๒-๕๕ แสดง ค่าการสูญเสียในอากาศ	๙๐
ภาพที่ ๒-๕๖ แสดง ค่าการเปลี่ยนค่าระหว่างความถี่เป็น dBm และแสดงค่าความเชื่อถือได้	๙๑
ภาพที่ ๓-๑ แสดงดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้าจากแนวความคิดของ อาร์เธอร์ ซี.คลาร์ก (Arthur C. Clarke)	๙๒
ภาพที่ ๓-๒ แสดงถึงวงโคจรของดาวเทียม	๙๔
ภาพที่ ๓-๓ แสดงส่วนประกอบต่างๆของดาวเทียม	๙๙
ภาพที่ ๓-๔ แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนดาวเทียม	๑๐๒
ภาพที่ ๓-๕ แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนดาวเทียม	๑๐๓
ภาพที่ ๓-๖ Block Diagram ของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินโดยทั่วไป	๑๐๔
ภาพที่ ๓-๗ Block Diagram ของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินโดยทั่วไป	๑๐๔
ภาพที่ ๓-๘ การแผ่กำลังงานของสัญญาณจากงานสายอากาศ ที่แสดง Beam สัญญาณหลัก	๑๐๖
ภาพที่ ๓-๙ การแผ่กำลังงานของสัญญาณจากงานสายอากาศที่ แสดง Beam Main lobe And Sidelobe	๑๐๗
ภาพที่ ๓-๑๐ แสดงงานสายอากาศสำหรับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน	๑๐๗
ภาพที่ ๓-๑๑ แสดงการสะท้อนสัญญาณผ่าน Reflector	๑๐๘
ภาพที่ ๓-๑๒ แสดงโครงสร้างของ Antenna Feed	๑๐๘
ภาพที่ ๓-๑๓ แสดงการ Modulation แบบ BPSK	๑๑๑

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๓-๑๔ แสดงการทำงานของดาวเทียม	๑๑๒
ภาพที่ ๓-๑๕ แสดง Beamwidth ของ Antenna Gain	๑๑๔
ภาพที่ ๓-๑๖ แสดง Block Diagram การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคพื้นของดาวเทียม	๑๑๖
ภาพที่ ๓-๑๗ แสดง Block Diagram ของ MODEM	๑๑๗
ภาพที่ ๓-๑๘ แสดง Block Diagram การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคพื้นของดาวเทียมทั้งระบบ	๑๑๗
ภาพที่ ๓-๑๙ แสดงวงจร Up-Converter ภาคส่ง	๑๑๘
ภาพที่ ๓-๒๐ แสดง Block Diagram การทำงานของ HPA	๑๑๙
ภาพที่ ๓-๒๑ แสดงมุมที่ใช้ในการปรับจานสายอากาศของดาวเทียม	๑๒๐
ภาพที่ ๓-๒๒ แสดงทิศทางของการวัดมุมในการปรับจานสายอากาศ	๑๒๐
ภาพที่ ๓-๒๓ แสดงการใช้ช่องการสื่อสารร่วมกันโดยใช้เทคนิค FDMA	๑๒๒
ภาพที่ ๓-๒๔ แสดงลักษณะของสัญญาณแบบ FDMA	๑๒๓
ภาพที่ ๓-๒๕ แสดงการใช้ช่องการสื่อสารร่วมกันโดยใช้เทคนิค TDMA	๑๒๔
ภาพที่ ๓-๒๖ แสดงลักษณะของสัญญาณแบบ TDMA	๑๒๕
ภาพที่ ๓-๒๗ แสดงลักษณะของสัญญาณแบบ CDMA	๑๒๗
ภาพที่ ๓-๒๘ แสดงเทคโนโลยี SCPC	๑๒๘
ภาพที่ ๓-๒๙ แสดงเทคโนโลยี TDMA	๑๒๙
ภาพที่ ๓-๓๐ แสดงเทคโนโลยี MFTDMA	๑๓๐
ภาพที่ ๓-๓๑ แสดงเครือข่าย VSAT ที่ใช้เทคนิคการเข้าถึงแบบ MFTDMA	๑๓๐
ภาพที่ ๓-๓๒ แสดงลักษณะสัญญาณของการโพลาริเซชันแบบต่างๆ	๑๓๑
ภาพที่ ๓-๓๓ แสดงการแบ่งช่องสัญญาณตามชนิดของการโพลาริเซชัน	๑๓๒
ภาพที่ ๓-๓๔ แสดงระยะทางระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้น	๑๓๓
ภาพที่ ๓-๓๕ แสดงสถานีดาวเทียมแม่ข่าย (HUB)	๑๓๖
ภาพที่ ๓-๓๖ แสดงการเชื่อมต่อสื่อสารดาวเทียมแบบ MFTDMA	๑๓๘
ภาพที่ ๓-๓๗ แสดงอุปกรณ์ ODU VSAT สื่อสารดาวเทียมแบบ MFTDMA	๑๓๘
ภาพที่ ๓-๓๘ แสดงการเชื่อมต่อสื่อสารดาวเทียมแบบ SCPC	๑๓๙
ภาพที่ ๓-๓๙ แสดงอุปกรณ์ ODU ย่านความถี่ Ku Band	๑๔๐
ภาพที่ ๓-๔๐ แสดงอุปกรณ์ดาวเทียมที่ใช้งานแบบ SCPC	๑๔๐
ภาพที่ ๓-๔๑ แสดงย่านความถี่ใช้งาน C Band กับ Ku Band	๑๔๑
ภาพที่ ๓-๔๒ แสดงองค์ประกอบ Nano Satellite หรือ CubeSat	๑๔๒
ภาพที่ ๔-๑ แสดงหลักการสื่อสารไฟเบอร์ออฟติก	๑๔๔
ภาพที่ ๔-๒ แสงเดินทางเป็นเส้นตรง	๑๔๖
ภาพที่ ๔-๓ การหักเหของแสง	๑๔๗
ภาพที่ ๔-๔ มุมหักเหของแสง	๑๔๗
ภาพที่ ๔-๕ มุมสะท้อนของแสง	๑๔๗

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๔-๖ หลักการของแสง	๑๕๙
ภาพที่ ๔-๗ เส้นทางของแสงในสายไฟเบอร์ออฟติก	๑๕๙
ภาพที่ ๔-๘ การสูญเสียทั้งหมดในเส้นใยนำแสง	๑๕๒
ภาพที่ ๔-๙ การกระจายการกระจายแสงแบบเรย์เลห์	๑๕๒
ภาพที่ ๔-๑๐ การสูญเสียแสงที่เกิดจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง	๑๕๓
ภาพที่ ๔-๑๑ การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง	๑๕๔
ภาพที่ ๔-๑๒ การขยายกว้างออกเนื่องจากโครงสร้าง	๑๕๕
ภาพที่ ๔-๑๓ การเกิดการขยายกว้างออกของสัญญาณดิจิทัล	๑๕๖
ภาพที่ ๔-๑๔ การจัดและคุณสมบัติ baseband frequency	๑๕๗
ภาพที่ ๔-๑๕ โครงสร้างของเส้นใยนำแสง	๑๕๗
ภาพที่ ๔-๑๖ Multi Mode optic fiber (MM fiber)	๑๕๙
ภาพที่ ๔-๑๗ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยนำแสงชนิดมัลติโมดสเต็ปอินเด็กซ์	๑๖๐
ภาพที่ ๔-๑๘ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยนำแสงชนิดมัลติโมดเกรดเดดอินเด็กซ์	๑๖๑
ภาพที่ ๔-๑๙ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยนำแสงชนิดซิงเกิลโมดเดี่ยว	๑๖๓
ภาพที่ ๔-๒๐ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยนำแสงชนิด PCS แบบมัลติโมดสเต็ปอินเด็กซ์	๑๖๔
ภาพที่ ๔-๒๑ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยนำแสงพลาสติกทั้งหมด	๑๖๕
ภาพที่ ๔-๒๒ ดีพลีชั่นโซน	๑๖๖
ภาพที่ ๔-๒๓ ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	๑๖๗
ภาพที่ ๔-๒๔ หลักการทำงานการรับแสง และระดับพลังงานของฟิโนโตไดโอด	๑๖๘
ภาพที่ ๔-๒๕ หลักการการรับแสง และระดับพลังงานของอวาลานซ์โฟโตไดโอด	๑๖๙
ภาพที่ ๔-๒๖ หัวต่อชนิดเอสเอ็มเอ	๑๗๒
ภาพที่ ๔-๒๗ หัวต่อชนิดไบโคเนค	๑๗๓
ภาพที่ ๔-๒๘ หัวต่อชนิดเอสที	๑๗๔
ภาพที่ ๔-๒๙ หัวต่อชนิดเอฟซี	๑๗๔
ภาพที่ ๔-๓๐ หัวต่อชนิดเอสซี	๑๗๕
ภาพที่ ๔-๓๑ องค์ประกอบกายภาพสายไฟเบอร์ออฟติก	๑๗๖
ภาพที่ ๔-๓๒ แสดงตัวอย่างของระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง	๑๗๖
ภาพที่ ๔-๓๓ แสดงการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่	๑๗๗
ภาพที่ ๔-๓๔ แสดงการทวนสัญญาณ	๑๗๗
ภาพที่ ๔-๓๕ แสดงการมัลติเพล็กซ์ทางแสง	๑๗๘
ภาพที่ ๔-๓๖ แสดงลักษณะของไดโอดเลเซอร์	๑๗๙
ภาพที่ ๔-๓๗ แสดงความสัมพันธ์ของกำลังและแสงในการมอดูเลต LED	๑๗๙
ภาพที่ ๔-๓๘ แสดงวงจรใช้กับมอดูเลตแบบแอนะล็อกกับ LED	๑๘๐
ภาพที่ ๔-๓๙ แสดงวงจรมอดูเลต LED แบบดิจิทัล	๑๘๐

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๔-๔๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วไดโอดเลเซอร์และกำลัง แอ้าต์พุท	๑๘๑
ภาพที่ ๔-๔๑ ลักษณะของแอ้าต์พุทของไดโอดเลเซอร์กับกระแสขณะที่ยุณหภูมิไม่คงที่	๑๘๑
ภาพที่ ๔-๔๒ วงจรขั้วไดโอดเลเซอร์ (Q คือ ทรานซิสเตอร์ W คือ ความต้านทานปรับค่าได้)	๑๘๒
ภาพที่ ๔-๔๓ แสดงการมอดูเลตไดโอดเลเซอร์แบบแอนะล็อก	๑๘๒
ภาพที่ ๔-๔๔ จงจรสำหรับการมอดูเลตไดโอดเลเซอร์แบบดิจิทัล	๑๘๓
ภาพที่ ๔-๔๕ แสดงลักษณะกำลังของแอ้าต์พุทของไดโอดเลเซอร์	๑๘๓
ภาพที่ ๔-๔๖ สัญญาณคลื่นพาห์	๑๘๔
ภาพที่ ๔-๔๗ สัญญาณมอดูเลต	๑๘๔
ภาพที่ ๔-๔๘ สัญญาณมอดูเลตเชิงความถี่	๑๘๔
ภาพที่ ๔-๔๙ สัญญาณแอนะล็อก	๑๘๔
ภาพที่ ๔-๕๐ สัญญาณดิจิทัล	๑๘๔
ภาพที่ ๔-๕๑ แสดงระบบสื่อสารแบบ AM	๑๘๕
ภาพที่ ๔-๕๒ แสดงวงจรของเครื่องรับสัญญาณแสง	๑๘๕
ภาพที่ ๔-๕๓ แสดงคุณสมบัติของพินไดโอดในรูปของกำลัง (uW) แรงดัน (Volts) และกระแส (mA)	๑๘๖
ภาพที่ ๔-๕๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแอ้าต์พุทกับกำลังแสงเมื่อ $RL = 1$ และการตอบสนองเป็น 0.5 A/W	๑๘๖
ภาพที่ ๔-๕๕ แสดงวงจจของตัวเก็บประจุ	๑๘๗
ภาพที่ ๔-๕๖ แสดงวงจร FET	๑๘๗
ภาพที่ ๔-๕๗ แสดงวงจรการเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน	๑๘๘
ภาพที่ ๔-๕๘ แสดงระบบสื่อสารทางแสง	๑๘๙
ภาพที่ ๔-๕๙ แสดงกำลังของแสงกับระยะทาง	๑๙๐
ภาพที่ ๔-๖๐ แสดงการวางระบบสื่อสารสำหรับการคำนวณงบประมาณกำลัง ซึ่งประกอบด้วยส่วนของการสูญเสียจากการคัปปลิงและการเชื่อมต่อ	๑๙๑
ภาพที่ ๔-๖๑ แสดงลักษณะต่างๆ ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง	๑๙๖
ภาพที่ ๔-๖๒ แสดงการสร้างใยแก้วนำแสงชนิดเออร์เบียมโดปหรือเจือสารเออร์เบียม ซึ่งมีขึ้นตอนจาก (ก) - (ง)	๑๙๗
ภาพที่ ๔-๖๓ ลักษณะของระดับพลังงานของเออร์เบียม	๑๙๘
ภาพที่ ๔-๖๔ การใช้งานใยแก้วนำแสงขยายสัญญาณ	๑๙๙
ภาพที่ ๔-๖๕ รูปที่แสดงโครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDF	๒๐๓
ภาพที่ ๔-๖๖ รูปแสดงระบบสื่อสารดิจิทัลด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้ EDFA ระยะทาง 9000 km	๒๐๓
ภาพที่ ๔-๖๗ รูปแสดงรูปสัญญาณดิจิทัลขนาด 5 Gb/s และ Eye Diagrams	๒๐๔

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๔-๖๘ โครงสร้างพื้นฐานการเชื่อมโยงของระบบ DWDM	๒๐๖
ภาพที่ ๔-๖๙ HUAWEI OSN 8800 T 16	๒๐๖
ภาพที่ ๔-๗๐ HUAWEI OSN 8800 CABINET	๒๐๗
ภาพที่ ๔-๗๑ CONNECTOR แบบต่างๆ	๒๐๙
ภาพที่ ๔-๗๒ Block diagraph DWDM ST2 Management	๒๑๐
ภาพที่ ๔-๗๓ Block diagraph DWDM HSC1 Management	๒๑๑
ภาพที่ ๔-๗๔ สัญญาณไชนไนโดเมนความถี่ และในโดเมนเวลา	๒๑๔
ภาพที่ ๔-๗๕ แสดงคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบ ของคลื่นหลายๆ ฮาร์มอนิกและแอมพลิจูดต่าง ๆ กัน	๒๑๕
ภาพที่ ๔-๗๖ แสดงคลังวงจรกรองสัญญาณ	๒๑๖
ภาพที่ ๔-๗๗ แสดงคลังวงจรกรองที่ใช้คอมพิวเตอร์	๒๑๗
ภาพที่ ๔-๗๘ แสดงการวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่	๒๑๘
ภาพที่ ๔-๗๙ (ก) แสดงคลื่นรูปไซน์ที่ผิดเพี้ยนไปมาก (ข) สเปกตรัมของความถี่ซึ่งประกอบด้วยหลายฮาร์มอนิกส์	๒๑๗
ภาพที่ ๔-๘๐ แสดงลักษณะของสเปกตรัม	๒๑๙
ภาพที่ ๔-๘๑ แสดงกราฟแสดงกราฟระหว่าง $j_n(\beta)$ กับ $\beta$	๒๒๐
ภาพที่ ๔-๘๒ แสดงพัลส์ของแสงที่เดินทางไปและกลับภายในสายสัญญาณ	๒๒๔
ภาพที่ ๔-๘๓ (ก) หลักการ TDR สำหรับ Coaxial Cable และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดสัญญาณที่สะท้อนกลับ (แกนตั้ง และระยะทาง แกนนอน)	๒๒๖
ภาพที่ ๔-๘๔ แสดงเวลาต่างๆ ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ และ ลักษณะของ scattering objects ภายในเส้นใยนำแสงและทิศทางของ scattering light และ back scattering light	๒๒๗
ภาพที่ ๔-๘๕ การสะท้อนกลับของแสงที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางแก้วกับอากาศ	๒๒๘
ภาพที่ ๔-๘๖ โครงสร้างของ OTDR	๒๒๙
ภาพที่ ๔-๘๗ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงสะท้อนกลับตามความเส้นใยนำแสงกับเวลา รวมถึงสาเหตุของการเกิดแสงสะท้อนกลับ	๒๒๙
ภาพที่ ๔-๘๘ แสดงการเดินทางสะท้อนกลับของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากการ กระเจิงกลับแบบเรย์ลี และการสะท้อนแบบเฟรสเนล	๒๓๑
ภาพที่ ๔-๘๙ แสดงการกระเจิงกลับของแสง	๒๓๒
ภาพที่ ๔-๙๐ แสดง Fiber Signature แบบง่าย ๆ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสง ที่สะท้อนกลับกับระยะทาง	๒๓๓
ภาพที่ ๔-๙๑ แสดง Fiber Signature ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพบนเส้นใยนำแสงที่แตกต่างกัน ตลอดเส้น	๒๓๕
ภาพที่ ๔-๙๒ แสดงรูปแบบการตรวจวัดบนหน้าจอไอ ที ดี อาร์	๒๔๑

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๔-๙๓ แสดงโครงสร้างทั่วไปของระบบแสงเครื่องโอ ที ดี อาร์	๒๔๓
ภาพที่ ๔-๙๔ แสดงการมาตราส่วนบนหน้าจอโอ ที ดี อาร์	๒๔๕
ภาพที่ ๕-๑ องค์ประกอบการสื่อสาร	๒๕๔
ภาพที่ ๕-๒ แสดงสัญญาณแบบดิจิทัล	๒๕๕
ภาพที่ ๕-๓ แสดงสัญญาณแบบอนาล็อก	๒๕๕
ภาพที่ ๕-๔ แสดงการสื่อสารข้อมูลทิศทางเดียว	๒๕๖
ภาพที่ ๕-๕ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน	๒๕๖
ภาพที่ ๕-๖ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางพร้อมกัน	๒๕๖
ภาพที่ ๕-๗ สาย Twisted	๒๕๗
ภาพที่ ๕-๘ UTP (Unshielded Twisted Pair)	๒๕๘
ภาพที่ ๕-๙ สายคู่ที่เกลียวหุ้มฉนวน (Shielded Twisted Pair)	๒๕๘
ภาพที่ ๕-๑๐ สายโคแอกเชียล	๒๕๙
ภาพที่ ๕-๑๑ โยแก้วนำแสง	๒๖๐
ภาพที่ ๕-๑๒ ระบบคลื่นไมโครเวฟ	๒๖๑
ภาพที่ ๕-๑๓ ระบบดาวเทียม	๒๖๒
ภาพที่ ๕-๑๔ โมเดลมาตรฐาน OSI	๒๖๕
ภาพที่ ๕-๑๕ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาว	๒๖๗
ภาพที่ ๕-๑๖ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบบัส	๒๖๗
ภาพที่ ๕-๑๗ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบวงแหวน	๒๖๘
ภาพที่ ๕-๑๘ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบผสม	๒๖๘
ภาพที่ ๕-๑๙ แสดงหลักการทำงานของ Repeater	๒๖๙
ภาพที่ ๕-๒๐ พื้นที่ตั้งโครงข่ายและจุดเชื่อมต่อต่างๆ ภายในเครือข่าย CIS	๓๑๘
ภาพที่ ๕-๒๑ แสดงพื้นที่ตั้งโครงข่ายและจุดเชื่อมต่อต่างๆ ภายในเครือข่าย SIS	๓๒๐

## บทที่ ๑

# พื้นฐานระบบโทรคมนาคม (Basic Telecommunications)

### ๑. กล่าวนำ

เทคโนโลยีโทรคมนาคมมีแนวโน้มว่าจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะการนำอุปกรณ์ระบบดิจิทัลมาใช้งาน ระบบโทรคมนาคมมีแนวโน้มว่าจะรวมกับระบบคอมพิวเตอร์ในที่สุด พัฒนาการโทรคมนาคมกำลังก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้นและยิ่งขึ้น องค์กรระหว่างประเทศที่มีหน้าที่กำหนดมาตรฐานอุปกรณ์ในระบบโทรคมนาคมประสบปัญหาเป็นอย่างมากในการติดตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีดังกล่าว ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีโทรคมนาคมในปัจจุบัน คุณลักษณะของระบบโทรคมนาคม การใช้งานและอุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคมระบบดิจิทัลเพื่อมุ่งที่จะชี้ให้เห็นแนวโน้มพัฒนาการของระบบโทรคมนาคมทำให้มองเห็นภาพรวมของระบบโทรคมนาคมในอนาคต

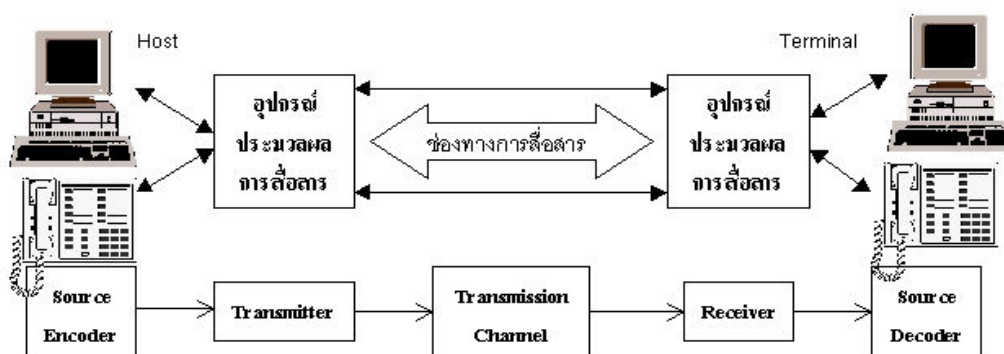
ระบบโทรคมนาคมเป็นเครือข่ายสื่อสารหลักที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระยะไกล ในขณะที่เทคโนโลยีทั้งด้านสื่อสารและคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมาก เทคโนโลยีโทรคมนาคมจึงต้องพร้อมที่จะรองรับการเชื่อมต่อใช้งานของอุปกรณ์ปลายทางที่เปลี่ยนแปลงไปให้ได้ โชคดีที่องค์กรระหว่างประเทศที่มีหน้าที่กำหนดมาตรฐานอุปกรณ์ในระบบโทรคมนาคมประสบความสำเร็จในการกำหนดมาตรฐานขึ้นใช้งาน ทั้งมาตรฐานการรวมสัญญาณและมาตรฐานในการเชื่อมต่อใช้งานกับอุปกรณ์ปลายทาง ทำให้อุปกรณ์ปลายทางไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือสื่อสารหรือคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่จะถูกกำหนดมาตรฐานการเชื่อมต่อกับระบบโทรคมนาคมไว้ตรงตามที่สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) กำหนด อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในการสื่อสารรวมทั้งในส่วนของโทรคมนาคมยังมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เช่น การสื่อสารแบบไร้สาย การออกแบบให้อุปกรณ์รวมสัญญาณสื่อสารโทรคมนาคมทำหน้าที่ Switching โดยอัตโนมัติ เป็นต้น มีความจำเป็นเป็นอย่างมากที่บุคลากรในสายสื่อสารโทรคมนาคมจะต้องติดตามความก้าวหน้าและการเปลี่ยนแปลงให้ทันเทคโนโลยีดังกล่าว ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีโทรคมนาคมพื้นฐานในปัจจุบัน คุณลักษณะของระบบโทรคมนาคมหลัก การใช้งานและอุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคมระบบดิจิทัลเพื่อมุ่งที่จะชี้ให้เห็นแนวโน้มพัฒนาการของระบบโทรคมนาคมทำให้มองเห็นภาพรวมของระบบโทรคมนาคมในอนาคต

### ๒. การสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunications)

คำว่า “Tele” เป็นรากศัพท์ที่มาจากภาษากรีก หมายความว่า “ไกล” หรือ “อยู่ไกลออกไป” ดังนั้นคำว่า Telecommunications สามารถให้ความหมายอย่างกว้างๆ ตามรูปศัพท์ได้ว่า หมายถึงการสื่อสารไปยังผู้รับปลายทางที่อยู่ไกลออกไป ดังนั้น คำว่า Telecommunications นี้ สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ International Telecommunications Union : ITU ได้ให้คำจำกัดความว่า “Telecommunications” หมายถึงการส่งข่าวสารทุกรูปแบบไม่ว่าจะเป็นเสียงพูด ตัวอักษร สัญลักษณ์



ภาพถ่าย Graphics ภาพเคลื่อนไหว (Video) ฯลฯ ไปยังปลายทาง โดยอาศัยสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ว่ารูปแบบใดและไม่จำกัดว่าจะไปใช้สื่อชนิดใด (เช่นระบบวิทยุ คู่สายทองแดง หรือ Optical Fiber ฯลฯ) ช่องทางที่ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารในระบบการสื่อสารโทรคมนาคมนั้น นิยมเรียกกันว่า ช่องสัญญาณในการสื่อสาร (Communication Channel) และจุดประสงค์อันเป็นพื้นฐานของการสื่อสารโทรคมนาคมทุกรูปแบบรวมทั้งระบบการสื่อสารข้อมูลก็คือ การแลกเปลี่ยนข่าวสารและสารสนเทศ (Message Of Information) ต้นทางและปลายทาง เช่นการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่าง Data Terminal ๒ ชุด โดยการใช้สัญญาณไฟฟ้า หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบต่างๆในการส่ง Message หรือ Information ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองชุดนั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งข่าวสารในระบบการสื่อสารข้อมูล ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า Data Terminal Device นั้น ส่วนมากแล้วก็คือเครื่องคอมพิวเตอร์ประเภทต่างๆ



ภาพที่ ๑-๑ แสดงการทำงานของระบบโทรคมนาคม

ตามรูปแสดงถึงการสื่อสารข้อมูลที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์สองชุด โดยที่ชุดหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ส่ง (Transmitter) ขณะที่อีกเครื่องหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้รับ (Receiver) ที่ด้านส่ง (Transmitting Station) ข่าวสารที่ต้องการจะส่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยอุปกรณ์ที่เหมาะสมและส่งสัญญาณไฟฟ้านั้นผ่านสื่อหรือตัวกลาง (Medium) ไปยังด้านรับ ที่ด้านรับ (Receiving Station) จะทำการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้านั้นกลับมาเป็นข่าวสาร (Message Of Information) ที่ถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง และเพื่อให้เกิดการติดต่อสื่อสารหรือเกิดการเชื่อมโยงเพื่อการสื่อสาร (Communication Link) ขึ้นระหว่าง Transmitter และ Receiver เราจำเป็นต้องมีช่องสัญญาณสื่อสาร (Communication Channel) และนำช่องสัญญาณสื่อสารนั้นมาใช้งาน ช่องสัญญาณสื่อสารโดยความเป็นจริงแล้วก็คือตัวกลาง (Medium) ที่จะทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูล ในบางครั้งเรานิยมเรียกช่องสัญญาณสื่อสารอย่างย่อๆว่า “Link” ช่องสัญญาณสื่อสารหรือ “Link” นี้สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทเช่น สายกระจาย (Open Wire), คู่สายตีเกลียว (Twisted Pair Cable) สายแกนร่วม (Coaxial Cable), ใยแก้วนำแสง (Fiber Optics), และ Microwave เป็นต้น

## ๒.๑ องค์ประกอบและหน้าที่ของระบบโทรคมนาคม ดังต่อไปนี้

### ๒.๑.๑ ต้นกำเนิดข่าวสาร (Source Of Information )

ส่วนนี้เป็นส่วนแรกในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม เป็นแหล่งที่มาของข่าวสารต่างๆ ที่ผู้ส่งต้องการที่จะส่งไปยังผู้รับที่ปลายทาง ตัวอย่างในระบบโทรศัพท์หรือระบบวิทยุกระจายเสียง ส่วนนี้ก็คือเสียงพูดของผู้พูดที่ต้นทาง ซึ่งจะถูกไมโครโฟนเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เหมาะสม และส่งเข้าไปในระบบ หรือในกรณีระบบการสื่อสารข้อมูล (Data Communication) ส่วนนี้อาจจะเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์หรือ Data Terminal ประเภทต่างๆ

### ๒.๑.๒ เครื่องส่ง (Transmitter)

เครื่องส่งหรือตัวส่งนี้ทำหน้าที่ในการแปลงหรือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แทนข่าวสารจากต้นกำเนิดข่าวสาร ให้เป็นสัญญาณหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมในการส่งต่อไปยังปลายทาง เช่น ระบบโทรศัพท์ตัวเครื่องโทรศัพท์จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แทนเสียงพูด ให้เป็นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมและส่งต่อไปยังปลายทาง หรือในระบบวิทยุกระจายเสียงส่วนนี้ได้แก่ เครื่องส่งวิทยุ สำหรับในระบบการสื่อสารข้อมูล ส่วนนี้จะเป็น Modem หรืออุปกรณ์อื่นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากคอมพิวเตอร์หรือ Data Terminal เพื่อให้เป็นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมในการผ่านระบบสื่อสารสัญญาณ (Transmissions) ไปยังปลายทาง

### ๒.๑.๓ ระบบการส่งผ่านสัญญาณ (Transmissions)

เมื่อเครื่องส่งได้เปลี่ยนหรือแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แทนข่าวสารต่างๆ ให้เป็นสัญญาณหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมแล้ว สัญญาณก็จะถูกส่งผ่านระบบระบบการส่งผ่านสัญญาณ เพื่อส่งต่อไปยังเครื่องรับและผู้รับที่ปลายทาง ดังนั้นระบบการส่งผ่านสัญญาณจึงถือได้ว่านับเป็นส่วนที่สำคัญและจำเป็นมากในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม เนื่องจากหากปราศจากระบบการส่งผ่านสัญญาณหรือมีระบบการส่งผ่านสัญญาณที่คุณภาพไม่ดีแล้ว ระบบการสื่อสารโทรคมนาคมที่มีประสิทธิภาพก็ไม่สามารถจะเกิดขึ้นได้

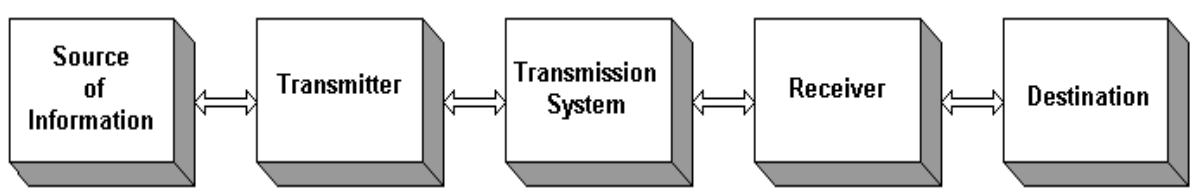
### ๒.๑.๔ เครื่องรับ (Receiver)

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำการแปลงหรือเปลี่ยนสัญญาณหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ถูกส่งผ่านระบบการส่งผ่านสัญญาณจากต้นทาง เพื่อให้กลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แทนข่าวสารที่ถูกส่งมาจากต้นทาง ทั้งนี้เพื่อส่งให้อุปกรณ์ปลายทางทำการแปลงหรือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้านั้น ให้กลับมาเป็นข่าวสารที่ผู้รับสามารถเข้าใจความหมายได้ ในระบบโทรศัพท์ส่วนนี้ก็คือตัวเครื่องรับเครื่องโทรศัพท์ ที่ทำการเปลี่ยนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้นั้น ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการส่งต่อให้หูฟัง หรือในระบบวิทยุกระจายเสียงส่วนนี้ก็คือเครื่องรับวิทยุที่จะแยกสัญญาณเสียง

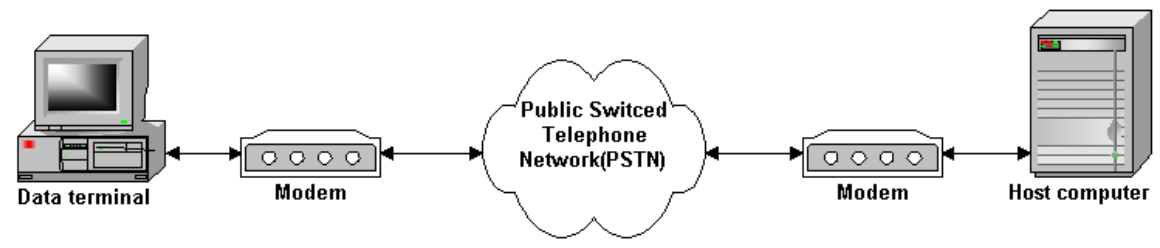
นอกจากคลื่นวิทยุเพื่อส่งต่อให้ลำโพง สำหรับระบบการสื่อสารข้อมูลส่วนนี้จะเป็น Modem หรือ อุปกรณ์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับมานั้น ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ข้อมูล ในรูปแบบที่ถูกต้อง และเหมาะสมสำหรับการส่งต่อให้เครื่องคอมพิวเตอร์หรือ Data Terminal

### ๒.๑.๕ อุปกรณ์ปลายทางและผู้รับที่ปลายทาง (Destination)

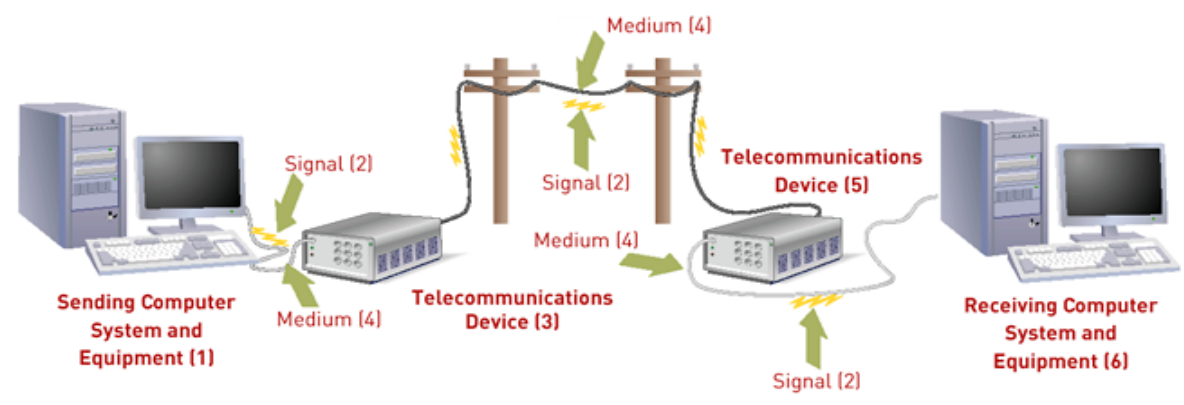
เป็นส่วนสุดท้ายในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม เช่นในระบบโทรศัพท์ ก็คือหูฟัง ที่จะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นเสียงพูดที่เหมือนต้นทาง และผู้รับที่ปลายทางก็คือผู้ใช้โทรศัพท์ที่ ปลายทาง ในระบบวิทยุกระจาย ยเสียงส่วนนี้ คือลำโพงและผู้รับฟังการรายการวิทยุกระจายเสียงนั้น ส่วนระบบการสื่อสารข้อมูลนั้น ในส่วนนี้ได้แก่เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือ Data Terminal ประเภทต่าง ๆ



ภาพที่ ๑-๒ ( ก ) แบบจำลองทั่วไป



ภาพที่ ๑-๓ ( ข ) ตัวอย่างที่ใช้งานจริงในระบบการสื่อสารข้อมูล



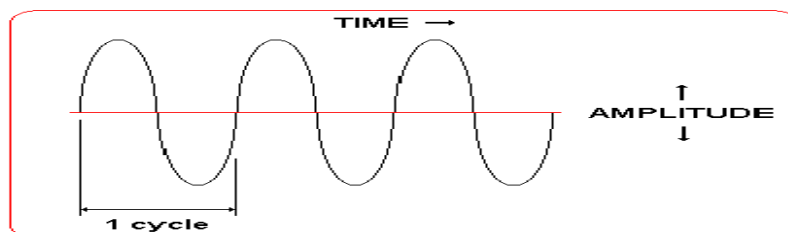
ภาพที่ ๑-๔ แบบจำลองของระบบการสื่อสารโทรคมนาคม

## ๒.๒ หน้าที่ของระบบโทรคมนาคม

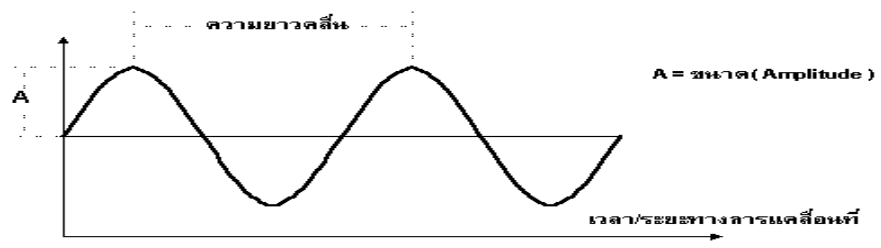
ทำหน้าที่ในการส่งและรับข้อมูลระหว่างจุดสองจุด ได้แก่ ผู้ส่งข่าวสาร (Sender) และ ผู้รับข่าวสาร (Receiver) จะดำเนินการจัดการลำเลียงข้อมูลผ่านเส้นทางที่มีประสิทธิภาพที่สุด จัดการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่จะส่งและรับเข้ามา สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลให้ทั้งสองฝ่ายสามารถเข้าใจได้ตรงกัน ส่วนใหญ่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวจัดการ ในระบบโทรคมนาคมส่วนใหญ่ใช้อุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลข่าวสารต่างชนิด ต่างยี่ห้อกัน แต่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้เพราะใช้ชุดคำสั่งมาตรฐานชุดเดียวกัน กฎเกณฑ์มาตรฐานในการสื่อสารนี้เราเรียกว่า “โพรโตคอล (Protocol)” อุปกรณ์แต่ละชนิดในเครือข่ายเดียวกันต้องใช้โพรโตคอลอย่างเดียวกัน จึงจะสามารถสื่อสารถึงกันและกันได้ หน้าที่พื้นฐานของโพรโตคอล คือ การทำความเข้าใจกับอุปกรณ์ตัวอื่นที่อยู่ในเส้นทางการถ่ายทอดข้อมูล การตกลงเงื่อนไขในการรับส่งข้อมูล การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล การแก้ไขปัญหาข้อมูลที่เกิดการผิดพลาดในขณะที่ส่งออกไปและการแก้ปัญหาคาการสื่อสารขัดข้องที่อาจเกิดขึ้น โพรโตคอลที่รู้จักกันมาก ได้แก่ โพรโตคอลในระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น Internet Protocol, TCP/IP, IP Address ที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้

### ๓. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่น

คลื่น (Wave) เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ (Physical Phenomenon) อย่างหนึ่ง ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่หรือการเดินทาง (Propagation) ออกไปจากต้นกำเนิด โดยที่ปรากฏการณ์อันเป็นต้นกำเนิดของคลื่นมิได้เคลื่อนที่ไปแต่อย่างใด เช่นการโยนหินลงในน้ำจะทำให้เกิดการกระเพื่อม โดยที่การกระเพื่อมของน้ำจะเกิดเฉพาะจุดที่โยนหินลงไปเท่านั้นแต่มันจะเกิดคลื่นน้ำเคลื่อนที่ออกไปโดยรอบตราบที่น้ำยังเกิดการกระเพื่อมอยู่ แต่คลื่นเมื่อเคลื่อนที่ไกลออกไปจากจุดกำเนิดมากๆ แล้วมันก็จะค่อยๆ จางลงจนหายไปที่สุดแม้ว่าที่จุดกำเนิดยังก่อให้เกิดคลื่นขึ้นก็ตาม คลื่นสามารถแบ่งได้เป็น ๒ ชนิดคือ คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) และคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) คลื่นตามยาวหมายถึงคลื่นที่ทิศทางการเคลื่อนที่ จะไปตามแนวการกำเนิดคลื่น และคลื่นตามขวาง หมายถึงคลื่นที่ทิศทางการเคลื่อนที่จะตั้งฉากกับแนวกำเนิดคลื่น คลื่นเสียงเป็นตัวอย่างของคลื่นตามยาว คลื่นน้ำคือตัวอย่างของคลื่นตามขวาง



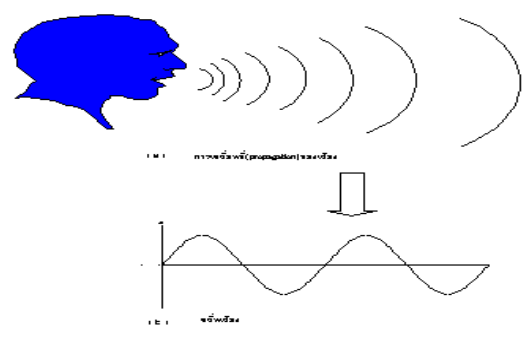
ภาพที่ ๑-๕ รูปแสดง ตัวอย่างของคลื่น



ภาพที่ ๑-๖ รูปแสดง ตัวแปรที่สำคัญของคลื่น

**๓.๑ เสียงพูด ( Speech Or Voice Signal)**

เสียงพูด (Speech) ของคนเรานั้นเป็นรูปแบบของคลื่นเสียง (Sound Wave) ซึ่งเป็นรูปแบบของสัญญาณที่ต่อเนื่องหรือสัญญาณ Analog ที่เคลื่อนที่ไปในอากาศซึ่งบุคคลที่อยู่ใกล้เคียงจะสามารถรับฟังหรือได้เสียงของผู้พูดในรูปแบบของ Analog Form



ภาพที่ ๑-๗ รูปแสดงหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงและรูปคลื่นอย่างง่าย

**๓.๒ รูปคลื่น (Waveform)**

ในกรณีที่ผู้พูดและผู้ฟังอยู่ห่างจากกันแต่มีช่องสัญญาณสื่อสาร (Communication Link หรือ Communication Channel) เพื่อการติดต่อระหว่างบุคคลทั้งสองเช่นการใช้โทรศัพท์ ซึ่งจะเปลี่ยนเสียงพูดให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งไปตามช่องสัญญาณโทรศัพท์ วิธีการอย่างง่ายในการกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าสำหรับการสื่อสารด้วยเสียงพูด (Voice Communications) ก็คือ Sine Wave เมื่อคนเราพูด เข้าไปในปากพูดของเครื่องโทรศัพท์นั้น รูปคลื่นของคลื่นเสียง (Voice Waveform) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับ (Alternating Current) ขึ้นในวงจรโทรศัพท์ ซึ่งกระแสดังกล่าวจะไหลสลับขั้วไปตามจังหวะของการพูด อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวและสามารถแสดงรูปคลื่นได้ดังนี้ รูปแบบของสัญญาณ Sine Wave เริ่มต้นจากการที่สัญญาณที่ระดับขนาด (Amplitude) ศูนย์ เริ่มเปลี่ยนเป็นบวก (Positive) โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับขนาดจะเป็นไปในอัตราที่ลดต่ำลง (Decreasing Rate) ในช่วงระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งมันเปลี่ยนไปจนถึงจุดสูงที่สุดที่เราเรียกว่าจุดยอด (Peak) ของคลื่น มันก็จะเริ่มต้นการลดขนาดลงไปยังศูนย์อีกครั้ง และเมื่อลดลงจนกระทั่งถึงศูนย์แล้ว มันก็จะเปลี่ยนขนาดไปในทิศทางที่เป็นเครื่องหมายลบ (Negative) เมื่อถึงจุดต่ำสุดแล้ว มันก็เปลี่ยนไป

ในทิศทางที่มีขนาดเพิ่มขึ้นจนกลับมายังศูนย์อีกครั้ง และจะเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกอีกครั้ง ซึ่งจะสลับสับเปลี่ยนไปมาเป็นรอบๆ โดยที่แต่ละรอบเราเรียกว่า “Cycle” สามารถแสดงหลักการของ รูปคลื่น Sine Wave โดยการใช้การหมุนโลหะตัวนำ (Loop Conductor) ภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดกระแสไฟฟ้าสลับขึ้นในโลหะตัวนำนั้น โดยที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับมุม ของตัวนำโลหะที่ตัดกับสนามแม่เหล็ก โดยเมื่อเริ่มต้นการหมุน (มุมที่ตัดกันระหว่างตัวนำโลหะกับ สนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $0^\circ$ ) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $q$  โวลต์ และจะเริ่มเป็นบวก เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเป็นบวกสูงที่สุดเมื่อโลหะตัวนำนั้นหมุนไปได้เป็นมุม  $90^\circ$  (ตัวนำโลหะนั้นหมุนไปได้ ๑ ใน ๔ รอบ) และจากนั้นแรงดันที่ได้จะเริ่มลดขนาดลงจนกลับเป็น  $0$  โวลต์อีกครั้งหนึ่ง และเมื่อ โลหะตัวนำนั้นหมุนต่อไปจนทำมุมกับสนามแม่เหล็กเท่ากับ  $180^\circ$  (โลหะตัวนำนั้นหมุนไปได้ครึ่งรอบ) และเมื่อโลหะตัวนำหมุนต่อไป แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเริ่มเป็นลบและจะเป็นลบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จน เมื่อโลหะตัวนำนั้นหมุนไปจนทำมุมกับสนามแม่เหล็กเท่ากับ  $270^\circ$  (หมุนไปได้ ๓ ใน ๔ รอบ) แรงดัน ที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำที่สุด (เป็นลบมากที่สุด) และเมื่อโลหะตัวนำหมุนต่อไปแรงดันที่เกิดขึ้นจะเริ่มเพิ่ม ขนาดขึ้น จนกระทั่งโลหะตัวนำนั้นทำมุมกับสนามแม่เหล็กเท่ากับ  $360^\circ$  (หรือกลับมาที่  $0^\circ$  อีกครั้ง หนึ่ง) นั่นคือเมื่อโลหะตัวนำนั้นหมุนไปได้ครบ ๑ รอบ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะกลับมาเป็น  $0$  โวลต์อีก ครั้ง จากนั้นหากโลหะตัวนำนั้นหมุนต่อไปแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะเริ่มเป็นบวกเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง เป็นบวกสูงที่สุดและจะกลับลดขนาดลงจนกระทั่งเป็นลบและจะเป็นเช่นนี้สลับกันไปตลอดเวลาที่ โลหะนั้นยังคงหมุนอยู่ เราสามารถแสดงข้อมูลและรูปแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ Loop Conductor ในสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

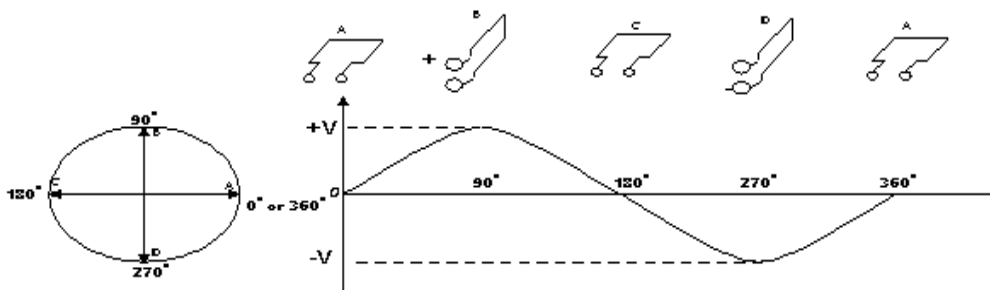
$$A : 0^\circ = 0 \text{ รอบ} = 0 \text{ โวลต์}$$

$$B : 90^\circ = 1/4 \text{ รอบ} = + V \text{ โวลต์}$$

$$C : 180^\circ = 1/2 \text{ รอบ} = 0 \text{ โวลต์}$$

$$D : 270^\circ = 3/4 \text{ รอบ} = - V \text{ โวลต์}$$

$$A : 0^\circ (360^\circ) = 1 \text{ รอบ} = 0 \text{ โวลต์}$$



ภาพที่ ๑-๘ แสดงการกำเนิด AC. Waveform อย่างง่าย

### ๓.๓ Bandpass และ Bandwidth

โดยทั่วไปแล้วหูของคนเรานั้นไม่สามารถได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz หรือความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ได้ ดังนั้นช่วงความถี่ที่ถือว่าเป็น High Bandpass สำหรับหูของคนเรานั้นคือ 20,000 Hz และ Low Bandpass คือ 20 Hz ในกรณีที่ทราบค่า High Bandpass และ Low Bandpass สามารถคำนวณหาช่วงกว้างของความถี่ (Bandwidth) ได้ดังนี้  $\text{Bandwidth} = \text{High Bandpass} - \text{Low Bandpass}$

ในกรณีหูของคนเรานั้น Bandwidth จะมีค่าเท่ากับ 20,000 Hz ลบกับ 20 Hz ซึ่งเท่ากับ 19,980 Hz แต่โดยความเป็นจริงแล้วพลังงานส่วนใหญ่ของคลื่นที่เกิดจากเสียงพูดของมนุษย์จะอยู่ระหว่าง 300 Hz ถึง 3,400 Hz ดังนั้น Bandwidth ของช่องสัญญาณโทรศัพท์คือ 3,100 Hz

### ๓.๔ ระดับสัญญาณในวงจรโทรคมนาคม

ในวงจรโทรคมนาคมนั้นมีการนำอุปกรณ์หลากหลายประเภทมาใช้งาน อุปกรณ์บางชนิดก็ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณ อุปกรณ์บางชนิดก็ทำหน้าที่ลดระดับสัญญาณ ดังนั้นเราจึงต้องทำความเข้าใจในสิ่งต่อไปนี้เสียก่อน

#### ๓.๔.๑ การลดทอนของระดับสัญญาณ

หมายถึงการที่สัญญาณที่มีอยู่เดิมถูกทำให้น้อยลงหรือลดลงไม่ว่าด้วยสาเหตุใดก็ตาม เช่น สัญญาณเดิมมีกำลังงานอยู่ 5 MW แต่เมื่อผ่าน Network ชุดหนึ่งแล้ว กำลังงานลดลงเหลือเพียง 2 MW หมายถึงกำลังงานได้ลดลงหรือสูญเสียไป 3 MW (5 – 2 MW) การลดทอนของสัญญาณเกิดได้หลายสาเหตุ บางครั้งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของอุปกรณ์โทรคมนาคมเอง เช่นตัวกลางหรือคู่สายต่างๆ จะเกิดลดทอนสัญญาณเมื่อระยะทางไกลขึ้น เป็นต้น หรืออาจเกิดจากความไม่ตั้งใจ เช่นการต่ออุปกรณ์หรือ Network ร่วมกันโดยที่ Impedance ไม่ Match กันเป็นต้นในระบบการสื่อสารโทรคมนาคมนั้น ประกอบด้วย Equipment ต่างๆ มากมาย บางชนิดก็ทำหน้าที่ในการเพิ่มหรือขยายสัญญาณ บางชนิดก็ทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณทำให้เกิดมี Gain หรือ Loss ขึ้นในระบบ ดังได้กล่าวแล้วว่าระบบการสื่อสารโทรคมนาคมนั้นประกอบด้วย Equipment

จำนวนมาก อีกทั้งในบางครั้งยังมีสัญญาณอื่นๆ เช่น Signalling , Noise ฯลฯ รวมเข้ามาในระบบด้วย ทำให้การวินิจฉัยว่าจุดเป็น Gain หรือ Loss และมี Gain หรือ Loss เท่าใด ทำได้ไม่สะดวกรวดเร็วเท่าที่ควร จึงได้มีการกำหนดหน่วยการวัด ที่เรียกว่า Decibel ขึ้นเพื่อช่วยในการวินิจฉัยวงจรโดยที่

$$\text{dB} = 10 \text{ Log}(P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) \dots \dots \dots (๑.๔)$$

ค่า dB นี้หากออกมาเป็นค่าลบแสดงว่า  $P_{\text{out}}$  น้อยกว่า  $P_{\text{in}}$  หรือเป็นกรณีที่เกิดการ Loss ขึ้นในวงจร โดยที่ Overall Gain หมายถึง Gain ทั้งหมดในวงจรหรือในระบบ เมื่อได้หัก Loss ต่างๆออกไปจนหมดแล้ว (Net Gain) Overall Loss หมายถึง Loss ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในวงจรหรือในระบบ เมื่อได้หักค่า Gain ต่างๆออกหมดแล้ว (Net Loss) การกำหนดหน่วย Decibel ขึ้นมานี้ นับว่าสะดวกเนื่องจากการคำนวณ Gain หรือ Loss

เมื่อทราบค่า dB นั้นทำได้โดยการนำตัวเลขที่มีอยู่มาบวกหรือลบกัน ไม่ต้องคำนวณด้วยการคูณหรือหารให้ยุ่งยากซับซ้อนแต่อย่างใดในการบอกค่า Gain หรือ Loss นี้ ในบางประเทศนิยมใช้เป็น Neper ซึ่ง Neper มีความสัมพันธ์กับ Decibel ดังต่อไปนี้

$$1 \text{ Np} = 2 \text{ Ln}(\text{Bel}) = 20 \text{ Log Decibel} \cong 8.686 \text{ dB}$$

$$1 \text{ Bel} = 0.5 \text{ ln}(10 \text{ NP}) \cong 1.151 \text{ NP หรือ}$$

$$1 \text{ dB} \cong 0.1151 \text{ NP}$$

### ๓.๔.๒ Power Level

Power Level นี้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ในการวัดกำลังงานในรูปแบบของ Decibel ในระบบ Transmission ทั่วไปนั้น Impedance ของระบบเท่ากับ 600 Ohms และ ค่าของ Power Level เป็นดังนี้

$$\text{Power Level (dB)} = 10 \text{ Log}( P / P_{\text{ref}}) \dots \dots \dots (๑.๕)$$

ในทางโทรคมนาคมเรากำหนดให้  $P_{\text{ref}}$  มีค่าเท่ากับ 1 MW และเรียกหน่วยที่คำนวณเทียบกับกำลังงาน 1 MW นี้ว่า dBm ดังนั้นจุดใดที่วัด Level ได้ 0 dBm จุดนั้นจะมีกำลังงานเท่ากับ 1 MW เสมอ

$$\text{Power Level (dBm)} = 10 \text{ Log}( P / 1\text{MW}) \dots \dots \dots (๑.๖)$$



### ๓.๔.๓ Relative Level (dBr )

ค่า dBr นี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคม เพื่อให้  
ง่ายและสะดวกต่อการคำนวณหรือวินิจฉัยวงจร โดยที่ค่า dBr ในแต่ละจุดเป็นค่าเมื่อเทียบกับ จุดที่  
เป็นจุดอ้างอิง (Reference Point ) ซึ่งจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 0 dBr

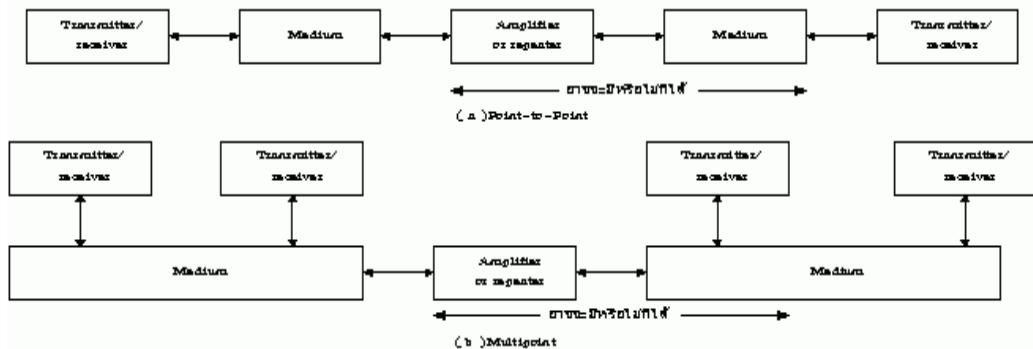
### ๓.๔.๔ dBmo

ค่านี้เป็นค่าที่ถูกกำหนดเพื่อการวัดหรือคำนวณค่า Power Level ณ จุดทำงาน  
เช่นการที่ผู้รับแจ้งกลับมาว่า สัญญาณที่ส่งไปนั้น High กว่าปกติ 2 dBmo ซึ่งหมายถึงว่าสัญญาณที่  
ส่งไปนั้นแรงกว่าที่ใช้งานอยู่ตามปกติ 2 dB โดยปกติแล้วระบบสื่อสารที่ใช้งานผ่านระบบการเชื่อมโยง  
ด้วยวิทยุเช่น เช่นระบบไมโครเวฟ จะมี Gain 23 และ Maximum Power ที่สามารถป้อนที่ Input  
ของ Link ได้ก็คือ - 16 dBm หากระบบเป็นปกติแล้วด้านรับจะต้องรับได้ + 7 dBm สำหรับการใ้  
งานด้านการสื่อสารข้อมูลนั้น ในการทดสอบวงจรให้ทดสอบที่ระดับต่ำกว่า Maximum 10 dB ดังนั้น  
จึงทดสอบที่ - 26 dBm สำหรับด้านส่ง และด้านรับจะต้องรับได้ - 3 dBm แต่ในขณะที่ใช้งานตามปกติ  
จะต้องลด level อีก 3 dBmo ดังนั้นที่ด้านส่งจะต้องส่ง - 29 dBm และด้านรับควรรับได้ - 6 dBm

## ๓.๕ คำจำกัดความเกี่ยวกับระบบสื่อสารสัญญาณ (Transmission Terminology)

การส่งผ่านข้อมูล (Data Transmission) หมายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องส่ง  
(Transmitter) และเครื่องรับ (Receiver) โดยการทำให้ข้อมูลเคลื่อนที่ผ่านไปบนตัวกลาง (Transmission  
Medium) ซึ่งเราอาจจะแยกตัวกลางออกได้เป็นสองประเภทคือ Guide Medium และ Unguided  
Medium แต่ถึงอย่างไรก็ตามการสื่อสารผ่านตัวกลางทั้งสองประเภทนี้ ก็เป็นรูปแบบของการใช้คลื่น  
แม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Wave) เช่นเดียวกันคำจำกัดความที่สำคัญเกี่ยวกับระบบสื่อสารสัญญาณ  
(Transmission Terminology) มีดังนี้ Guided Medium นั้นหมายถึงคลื่นถูก Guide ให้วิ่งไปตาม  
Physical Path ที่ถูกวางระหว่างจุดสองจุดอย่างเป็นรูปธรรม เช่นการใช้คู่สายตีเกลียว (Twisted Pair  
Cable), การใช้ Coaxial Cable, หรือการใช้ใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) Unguided Medium  
หมายความว่า การเคลื่อนที่ของคลื่นไปบนตัวกลาง ซึ่งไม่เป็นรูปธรรมชัดเจน เช่นการใช้ระบบวิทยุ  
ส่งผ่านไปในอากาศหรือสุญญากาศ เราจะพบว่าเราไม่ได้ Guided เพื่อให้คลื่นเคลื่อนที่ไปแต่อย่างใด  
Unguided Medium นี้บางครั้งเรียกว่าระบบการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communications)  
Direct Link จะถูกนำมาใช้ในความหมายที่สัญญาณวิ่งผ่าน Transmission Path ที่ต่อระหว่างเครื่องส่ง  
และเครื่องรับโดยตรง โดยปราศจากอุปกรณ์อื่นคั่นระหว่างกลางนอกจากเครื่องขยายสัญญาณ  
(Amplifier) หรือสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) ทั้งนี้เพื่อใช้การขยายสัญญาณให้แรงขึ้นเท่านั้น  
Point-To-Point Link หมายถึง Guided Or Unguided Medium ที่ประการแรก เป็น Direct Link  
และประการที่สอง มีอุปกรณ์รับ-ส่งเพียงสองชุดเท่านั้นที่ใช้ Transmission Path นั้นร่วมกัน หากมี  
อุปกรณ์รับ-ส่งมากกว่าสองชุดที่ใช้งาน Transmission Path ร่วมกันจะเรียกว่า Multipoint หรือ

Multiplex Communications สำหรับ Transmission นั้นอาจจะเป็น Simplex, Half Duplex (HDX), หรือ Full Duplex(FDX) ก็ได้ขึ้นความต้องการในการใช้งาน กรณี Simplex จะเป็นการสื่อสารทิศทางเดียวโดยแยกฝ่ายส่งและฝ่ายรับอย่างเด็ดขาด กรณี HDX เป็นการสื่อสารสองทิศทางแต่ขณะที่ส่งก็จะรับไม่ได้ หรือขณะที่รับก็จะส่งไม่ได้เช่นเดียวกัน กรณี FDX เป็นการสื่อสารสองทิศทางเต็มรูปแบบ



ภาพที่ ๑-๙ รูปแสดง หลักการของ Point-To-Point และ Multipoint

สำหรับ Transmission นั้นอาจจะเป็น Simplex, Half Duplex(HDX), หรือ Full Duplex(FDX) ก็ได้ขึ้นความต้องการในการใช้งาน กรณี Simplex จะเป็นการสื่อสารทิศทางเดียวโดยแยกฝ่ายส่งและฝ่ายรับอย่างเด็ดขาด กรณี HDX เป็นการสื่อสารสองทิศทางแต่ขณะที่ส่งก็จะรับไม่ได้ หรือขณะที่รับก็จะส่งไม่ได้เช่นเดียวกัน กรณี FDX เป็นการสื่อสารสองทิศทางเต็มรูปแบบ

### ๓.๕.๑ องค์ประกอบที่สำคัญของการส่งข้อมูล

การในการส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั้น มันจะมีความเกี่ยวพันใกล้ชิดกับพื้นฐานหรือธรรมชาติของข้อมูล ในความเป็นจริงแล้วการส่งข้อมูลก็คือ การทำให้สัญญาณ (Signal) ที่ถูกนำมาใช้แทนข้อมูลเคลื่อนที่ (Propagating) ผ่านไปยังปลายทาง ดังนั้นในการส่งข้อมูลนั้นสิ่งที่เราจะต้องเกี่ยวข้องโดยพื้นฐานแล้วจะมีด้วยกันสามส่วนคือ ข้อมูล (Data), การเคลื่อนที่ไปของสัญญาณ (Signalling), การส่งผ่านสัญญาณ (Transmission)

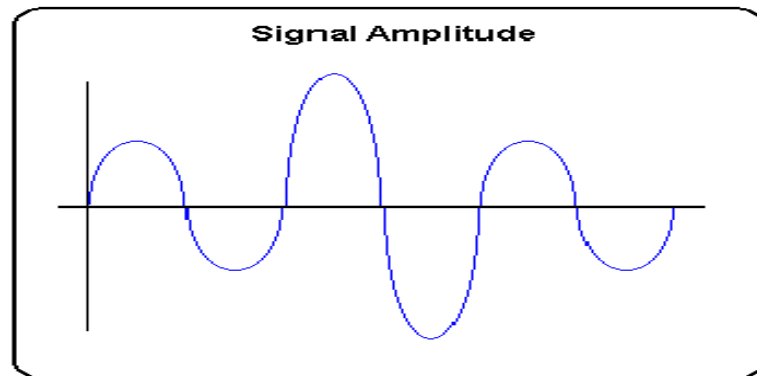
#### ๓.๕.๑.๑ ข้อมูล (Data)

ข้อมูลนั้นมีทั้งข้อมูลแบบอนาล็อก (Analogue) และข้อมูลที่เป็นแบบดิจิทัล (Digital) สำหรับข้อมูลแบบอนาล็อกนั้นหมายถึงข้อมูลที่มีขนาดของมันมีความต่อเนื่อง (Continuous) ในช่วงเวลา (Time Interval) ช่วงหนึ่ง ซึ่งข้อมูลแบบอนาล็อกนี้ โดยทั่วไปแล้วใช้อุปกรณ์ประเภท Sensor หรือ Transducer ในตรวจจับและแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น

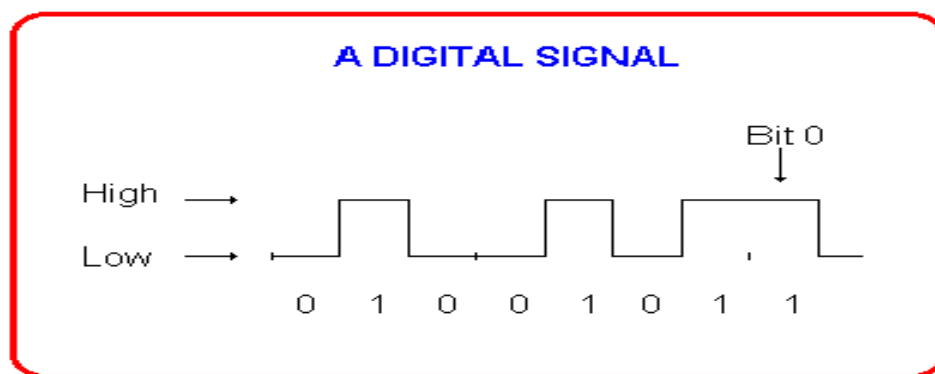
การใช้ไมโครโฟนในการเปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณ ไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับข้อมูลแบบดิจิทัลนั้น ข้อมูลจะไม่มีค่าต่อเนื่องเมื่อเทียบกับเวลา (Discrete Value) ตัวอย่างของข้อมูลแบบอนาลอกที่มักพบเห็นได้เสมอในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม ได้แก่ เสียงพูด (Audio) หรือ Acoustic Data ซึ่งจะมาในรูปของคลื่นเสียง ซึ่งมนุษย์สามารถรับรู้และเข้าใจได้โดยตรง โดยปกติแล้วเสียงพูดของมนุษย์มีความถี่อยู่ระหว่าง 20 – 20,000 Hz (20 Hz - 20 kHz) แต่โดยความเป็นจริงแล้ว พลังงานส่วนใหญ่ของเสียงพูดมักจะกระจายอยู่ในย่านความถี่ต่ำ ตัวอย่างของข้อมูลแบบดิจิทัลที่มักพบได้เสมอ ได้แก่ Text หรือ Character Strings ข้อมูลประเภทนี้ไม่สามารถบันทึกลงในสื่อบันทึกหรือส่งผ่านไประบบการสื่อสารได้โดยตรง เช่นระบบที่ออกแบบไว้สำหรับ Binary Data เราจะต้องทำการเข้ารหัสเพื่อให้ Text หรือ Character Strings เหล่านั้น เปลี่ยนเป็น Binary Data เสียก่อนแล้วจึงเปลี่ยน Binary Data นั้นให้เป็น Digital Signal แล้วจึงส่ง Digital Signal นั้นเข้าไปในระบบ Transmission ในสมัยเริ่มแรกได้แก่รหัสโทรเลข (Morse Code) ในยุคการสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันรหัสที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดได้แก่ ASCII (American Standard Code For Information Interchange)

### ๓.๕.๑.๒ การเคลื่อนที่ไปของสัญญาณ (Signalling)

ในที่นี้หมายถึงการเคลื่อนที่ไป (Propagation) ของสัญญาณ (Signal) ในตัวกลาง ที่เหมาะสม ในระบบการสื่อสารนั้น ข้อมูลจะถูกส่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยการใช้สัญญาณไฟฟ้าแทนข้อมูลนั้น เนื่องจากข้อมูลมีทั้งรูปแบบอนาลอก และรูปแบบดิจิทัล ดังนั้นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ก็จะมีอยู่สองแบบรูปแบบด้วยคือ รูปแบบ Analogue Signal และรูปแบบ Digital Signal Analog Signal เป็นสัญญาณที่การเปลี่ยนระดับขนาดของสัญญาณเป็นไปอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับเวลาที่ผ่านไป (Continuous Time Signal) ตัวอย่างของสัญญาณแบบ Analogue เช่น เสียงพูดของมนุษย์ เสียงดนตรีหรือภาพเคลื่อนไหว เป็นต้น สัญญาณแบบ Analogue นี้ เราสามารถใช้อุปกรณ์ Sensor ที่เหมาะสมในการจับสัญญาณและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น เสียงพูดของมนุษย์นั้น เราสามารถใช้ไมโครโฟนในการเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือภาพเคลื่อนไหวเราสามารถใช้อุปกรณ์ Charge Couple Device (CCD) จับภาพแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณภาพ (Video Signal) สัญญาณแบบ Analogue เป็นสัญญาณที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และโดยที่สัญญาณรบกวนต่างๆ ส่วนใหญ่แล้วก็เป็นสัญญาณ Analogue แทบทั้งสิ้น ดังนั้นการใช้สัญญาณ Analogue จึงเกิดการรบกวนได้ง่าย Digital Signal เป็นสัญญาณที่การเปลี่ยนระดับขนาดของสัญญาณเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่องเมื่อเทียบกับเวลาที่ผ่านไป (Discrete Time Signal) ตัวอย่างของสัญญาณ Digital ได้แก่ สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Signal) และสัญญาณที่ส่งออกมาจาก Port สื่อสารของ Computer ชนิดต่างๆ เป็นต้น เราจะพบว่าระดับของสัญญาณ Digital มีเพียง ๒ ระดับ เช่น Voltage Pulse ที่มี Amplitude คงที่ ระดับที่เป็นบวกอาจจะใช้แทนที่ Binary 1 และระดับที่เป็นลบใช้แทนที่ Binary 0 เป็นต้น สัญญาณ Digital โดยทั่วไปแล้วเป็นสัญญาณที่ไม่มีตามธรรมชาติ ดังนั้นการรบกวนจึง เกิดขึ้นได้ยากกว่าสัญญาณ Analogue



ภาพที่ ๑-๑๐ สัญญาณ Analog



ภาพที่ ๑-๑๑ สัญญาณ Digital

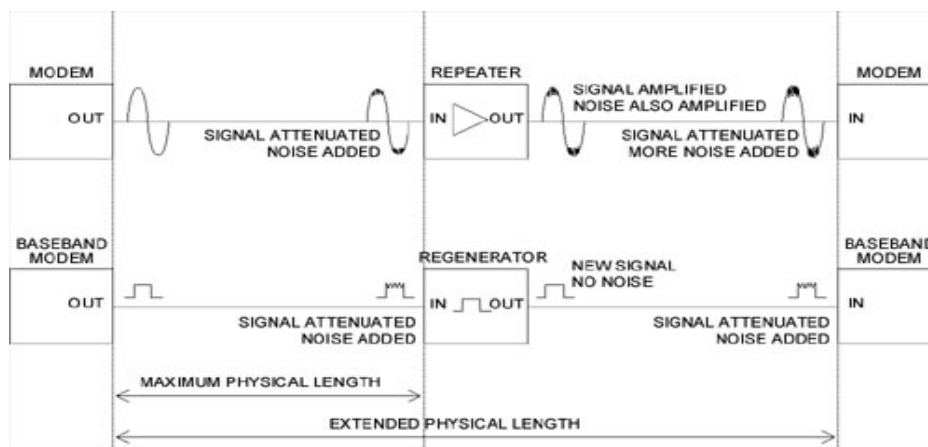
### ๓.๕.๑.๓ การส่งผ่านสัญญาณ (Transmission)

ในระบบการสื่อสารนั้น การติดต่อระหว่างต้นทางและปลายทาง จะมีประสิทธิภาพดีเพียงใด ขึ้นอยู่กับระบบการส่งผ่านสัญญาณเป็นสำคัญ หากระบบการส่งผ่านสัญญาณทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพปราศจากข้อผิดพลาด ระบบการสื่อสารย่อมจะมีประสิทธิภาพตามไปด้วย ระบบการส่งผ่านสัญญาณนั้นรวมถึงตัวกลางประเภทต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการติดต่อสื่อสารด้วย เนื่องจากข้อมูลและสัญญาณมีทั้งแบบที่เป็นอนาลอกและดิจิทัล ดังนั้นระบบการส่งผ่านสัญญาณจึงมีทั้ง Analogue Transmission System และ Digital Transmission System

Analogue Transmission System เป็นการส่งสัญญาณ Analogue ออกไปยังปลายทางโดยไม่คำนึงถึงว่าสัญญาณนั้นถูกนำมาใช้แทนที่ข้อมูลแบบ Analogue (เช่น เสียงพูดหรือภาพเคลื่อนไหว) หรือถูกนำมาใช้แทนที่ข้อมูลแบบ Digital (เช่น Binary Data) ซึ่งหากเป็นข้อมูลแบบ Digital Size=5> จะต้องเปลี่ยนรูปสัญญาณ ให้เป็น Analogue เสียก่อน เช่นการใช้ Modem เมื่อ Analogue Signal นั้นถูกส่งออกไปไกลๆ สัญญาณก็จะมีกำลังอ่อนลงเนื่องจากเกิดการสูญเสีย (Attenuation) ในระบบ และเพื่อให้ส่งไปได้ในระยะทางที่ไกลขึ้นจึงจำเป็นต้องเพิ่ม อุปกรณ์ Repeater เข้าไปในลักษณะนำมาต่อแบบ Cascaded กับระบบ หน้าที่ของอุปกรณ์ Repeater คือ

การขยายสัญญาณให้มีกำลังแรงขึ้น ระยะทางยิ่งไกลมากขึ้นเท่าใดจำนวน Repeater ที่ถูกนำมาต่อ Cascaded เข้ากับระบบก็ยังมีจำนวนมากขึ้นเท่านั้น แต่การขยายสัญญาณนั้นก็เป็นการขยายสัญญาณรบกวน (Noise) ไปในขณะเดียวกัน ดังนั้นระยะทางที่ไกลออกมากขึ้นเท่าใด ความผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณที่ปลายทางได้รับก็จะมากขึ้นตามไปด้วย หากเป็นกรณีของ Analogue Data การเกิด Distortion ขึ้นบ้างนั้นก็อาจจะถือได้มีผลเพียงเล็กน้อยไม่สลักสำคัญอะไรมากนัก แต่ในกรณีที่ เป็น Digital Data แล้วหากเกิด Distortion ขึ้นก็อาจจะเป็นผลให้อุปกรณ์รับสัญญาณที่ปลายทางตีความหมายผิดพลาด และเป็นสาเหตุให้เกิด Error ขึ้นได้

Digital Transmission System เป็นการส่งสัญญาณ Digital ไปใน Transmission Medium โดยที่สัญญาณนั้นอาจจะแทน Analogue หรือ Digital Data ก็ได้ ในกรณีที่ เป็น Digital Data ก็สามารถส่งสัญญาณผ่าน Transmission Medium ไปโดยตรง แต่ถ้าเป็น Analog Data ก็จะต้องเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณ Digital เสียก่อนเช่นเสียงพูดจะต้องเป็นถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Pulse Coded Modulation (PCM) เสียก่อน สัญญาณ Digital เมื่อถูกส่งไปในตัวกลางมันก็จะเกิดการสูญเสียของสัญญาณเนื่องจาก Attenuation เช่นเดียวกัน และเพื่อให้ส่งไปได้ในระยะทางที่ไกลขึ้นก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งต่อไปจะผ่าน Regenerative Repeater เสียก่อน โดยที่ Regenerative Repeater นั้นเมื่อรับสัญญาณ เข้ามามันจะสร้างสัญญาณชุดใหม่ ซึ่งเป็นสัญญาณ Digital ที่ปราศจาก ความผิดเพี้ยนและมีขนาดเท่ากับขณะส่งออกจากต้นทาง และส่งสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นั้นต่อไปยังปลายทาง เมื่อถึงปลายทางสัญญาณที่ได้รับจะมีความผิดเพี้ยนต่ำมากแม้ว่าข้อมูลนั้นจะเป็นข้อมูลแบบ Analogue ก็ตามทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของ Regenerative Repeater เป็นการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ มิใช่เป็นการขยายสัญญาณเหมือนกับการใช้ Amplifier ทำให้ไม่มีการสะสมสัญญาณรบกวนเพิ่มเข้ามา



ภาพที่ ๑-๑๒ หลักการทำงานของ Repeater และ Regenerator

แนวโน้มของการส่งสัญญาณนั้นจะพัฒนาเข้าสู่ระบบดิจิทัล มาก

ขึ้นทั้งนี้เนื่องจาก

๑. พัฒนาการของเทคโนโลยีด้าน Digital ทำให้เกิดวงจรรวมที่ใช้งานทางด้าน Digital ขนาดใหญ่เช่น LSI และ VLSI เป็นจำนวนมากทำให้ราคาของอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานในระบบงานทาง digital มีราคาถูกแต่มีขนาดเล็กลง ในขณะที่อุปกรณ์ทางด้าน Analog นั้นพัฒนาไปได้ช้ากว่ามาก
๒. ข้อมูลที่ได้ที่ปลายทางถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลที่ส่งจากต้นทางมากกว่า (Data Integrity) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ Regenerative Repeater แทนการใช้ Amplifier ทำให้ผลการรบกวนของ Noise และสิ่งที่ทำให้คุณภาพของสัญญาณเสียไป (Transmission Impairment) อื่นๆ นั้น สะสมเข้ามากับตัวสัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปในระยะไกลขึ้นกว่าระบบ Analog Transmission
๓. เป็นระบบที่ทำให้เกิด Capacity Utilization เนื่องจากเป็นการประหยัดหากทำให้สร้างระบบเชื่อมโยงที่มี Bandwidth กว้างมากๆ รวมถึงช่องสัญญาณดาวเทียม และ Optical Fiber ในการ Multiplex ที่ Order สูงๆนั้นต้องการให้ได้ช่องสัญญาณมากที่สุด ในขณะที่ Bandwidth มีจำกัด Time Division Multiplex Technique ที่นำมาใช้งานกับระบบ Digital ทำได้ดีกว่า Frequency Division Multiplex Technique ที่ใช้งานกับระบบ Analog
๔. การรักษาความลับ (Security) ของข้อมูลทำได้สะดวก ทำให้วงจรรหัสมีความเป็น Privacy มากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากการใช้วิธีการที่เรียกว่า Encryption Technique นั้นสามารถทำได้กับข้อมูลแบบ Digital หรือข้อมูลแบบ Analog ที่ได้รับการเปลี่ยนเป็น Digital แล้วเท่านั้น
๕. การเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณทั้งหมดให้อยู่เป็น Digital Form ทำให้เกิดความประหยัดและสามารถส่งสัญญาณทั้งหลายไปรวมกันไม่ว่าจะเป็น Voice, Video และ Digital Data

### ๓.๕.๑.๔ Transmission Impairment

Transmission Impairment หมายถึงสิ่งที่ทำให้เกิดความบกพร่องในการส่งสัญญาณหรือทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับจากระบบ Transmission มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร ประกอบด้วย ๓ สิ่งใหญ่ๆ คือ

- Attenuation & Attenuation distortion (Amplitude distortion)
- Delay & Delay distortion
- Noise

การส่งสัญญาณไปในระยะไกลนั้นกำลังงานของสัญญาณย่อมต่ำลงเนื่องจากเกิดการลดทอน (Attenuation) ขึ้น การลดทอนของสัญญาณนี้จะแปรผันโดยตรงกับความถี่คือโดยทั่วไปแล้ว ความถี่สูงจะเกิดการลดทอนของสัญญาณมากกว่าความถี่ต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นกับตัวกลางที่ใช้ในการส่งสัญญาณอีกด้วย ใน Transmission ที่ดีนั้นการลดทอนของสัญญาณควร

จะเท่าๆกันหรือใกล้เคียงกัน ค่าการลดทอนของสัญญาณที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละความถี่เรียกว่า Attenuation Distortion

การวัดค่า Attenuation Distortion นั้นเป็นวัดแบบ Relative คือวัดเปรียบเทียบกับ Reference Frequency ค่าหนึ่งเช่น 800 Hz แต่ในปัจจุบันนี้ทาง ITU-T ได้กำหนดให้ใช้ความถี่ 1,020 Hz ตามข้อกำหนด M.1020 ( ITU-T M.1020 )ข้อกำหนด M.1020 นั้นจะกล่าวถึงในส่วนของการส่ง Digital Data ผ่านวงจรเสียงต่อไป (ตามมาตรฐาน Bell ของสหรัฐอเมริกา นั้น ใช้ความถี่อ้างอิง 1,004 Hz )

### (๑) Delay Distortion

ในการส่งสัญญาณใดๆไปใน Transmission จะมีใช้มีเพียงความถี่เดียวเท่านั้นที่ถูกส่งไปความถี่เหล่านั้นจะเคลื่อนที่ไปใน Transmission Path ด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันทำให้ส่วนประกอบของสัญญาณที่ความถี่แตกต่างกันไปถึงปลายทางในเวลาที่แตกต่างกันด้วย การวัดค่า Delay Distortion เป็นการวัดเมื่อเทียบกับ Reference Frequency ค่าหนึ่ง ITU-T M.1020 กำหนดให้ใช้ 1,800 Hz

### (๒) Noise

คือการรบกวนประเภทต่างๆ จัดเป็น Transmission Impairment ประเภทหนึ่ง แต่เป็นประเภท Random Impairment ซึ่งการเกิดขึ้นจะไม่แน่นอนสามารถแยกได้หลายรูปแบบดังนี้

#### (๒.๑) White Noise (Thermal Noise,

#### Background Noise)

เกิดจากความปั่นป่วนของอิเล็กตรอนในตัวนำ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดโดยมีค่าสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการสั่นเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายไปทุกย่านความถี่เท่าๆกันตามความสัมพันธ์

$$N_o = KT \quad \text{เมื่อ}$$

$$N_o = \text{Noise Power Density (Watts/Hz)}$$

$$K = \text{ค่าคงที่ของ Boltzmann} = 1.3803 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$T = \text{อุณหภูมิเป็น Kelvin}$$

และเนื่องจาก White Noise ถือเสมือนว่าเป็นอิสระไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้น Noise ที่ปรากฏใน Bandwidth W Hz ใดๆมีค่าเท่ากับ

$$N = KTW \text{ Watts (1.7.1)}$$

### (๒.๒) Intermodulation Noise

เกิดจากการป้อนสัญญาณตั้งแต่ ๒ ความถี่ขึ้นไปเข้าไปใน Transmission Media เดียวกัน และเมื่อ ๒ ความถี่ใดๆ Mix เข้ากัน อาจจะทำให้เกิดผลบวก หรือผลต่าง ที่ไปตรงกับความถี่อื่นทำให้เกิดการรบกวนขึ้น โดยทั่วไปมักจะเกิดจากอุปกรณ์ประเภท Non - Linear Devices

### (๒.๓) Impulse Noise

เป็นการรบกวนที่เกิดในช่วงเวลาสั้นมาก (Pulse Width ไม่เกิน 4 mS) แต่มีผลกับ Data Transmission มากเนื่องจากมีค่า Peak Power สูง

### (๓) Gain Hit และ Phase Hit

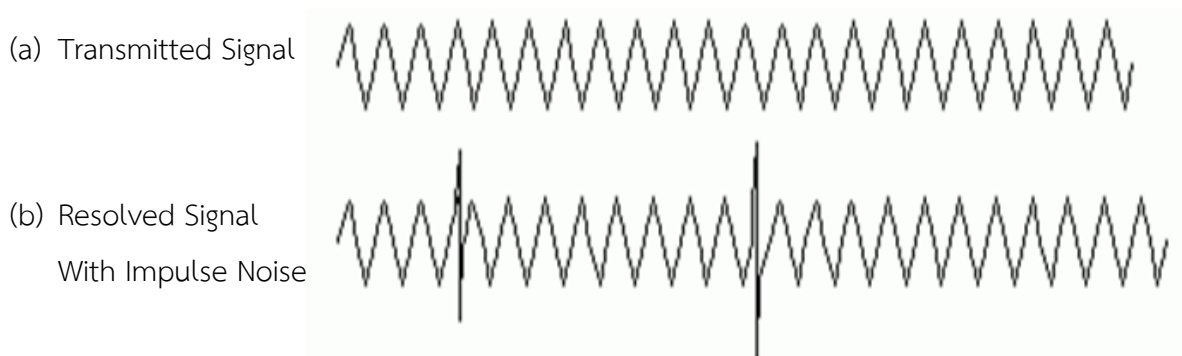
เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของ Level และ Phase ไปจากจุดที่ใช้งานตามปกติ แต่การเกิดจะไม่รวดเร็วเท่ากับ Impulse Noise มีผลทำให้เกิด Error ในการส่งข้อมูล

### (๔) Drop Out

คือการที่สัญญาณที่รับมาได้มีค่าลดต่ำกว่าระดับที่ใช้งานปกติ 12 dB เป็นเวลาดั้งแต่ 4 mS ขึ้นไป มีผลทำให้ระดับของสัญญาณอาจจะอยู่ในระดับใกล้เคียงกับ Background Noise ทำให้ Signal - To - Noise Ratio ( S/N ) มีค่าลดต่ำลงและอาจจะเกิดการรบกวนจาก Impulse Noise ได้ง่าย

### (๕) Phase Jitter

คือการที่ Phase ของสัญญาณทางด้านรับ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมา เมื่อเทียบกับ Phase ของสัญญาณเดียวกันนั้น ณ.จุดที่ส่ง



ภาพที่ ๑-๑๓ แสดงผลการรบกวนแบบต่างๆ ที่มีต่อสัญญาณ



### ๓.๖ การใช้งานวงจรเสียงสำหรับการส่งข้อมูลดิจิทัล (Transmission Of Digital Data Over Voice - Grade Circuits)

ในการส่งข้อมูลดิจิทัลผ่านทางวงจรเสียงนั้น ก็คือการส่งข้อมูลใช้โมเด็มในการแปลงข้อมูลที่เป็นแบบ Digital ให้เป็นสัญญาณ Analog และมี Bandwidth อยู่ในช่วง Voice Band คือระหว่าง 300 – 3,400 Hz แล้วส่งผ่านวงจรเสียงไปยังปลายทาง วงจรเสียงดังกล่าวอาจจะเป็นวงจรโทรศัพท์ที่ใช้งานผ่าน

ชุมสายโทรศัพท์ (Public Switched Telephone Network : PSTN) ที่เรานิยมเรียกว่าการใช้งานแบบ 2 - Wire Dial Up หรืออาจจะเป็นวงจรที่เช่าใช้โดยเฉพาะ (Leased Circuit) ก็ได้ แต่ในกรณีนี้จะเน้นที่ 4 - Wire Leased Circuit เป็นส่วนใหญ่ ในการนำวงจรเสียงมาใช้งานสำหรับการส่งข้อมูลนั้นมีส่วนที่ต้องพิจารณาดังนี้

#### ๓.๖.๑ Transmission Level Point (TLP) สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU : International Telecommunication Union)

ได้กำหนดไว้ใน Recommendation ITU-T V.2 ว่า การส่งสัญญาณผ่านคู่สายโทรศัพท์ห้ามใช้กำลังส่งเกินกว่า 0 dBm (1 MW) และสำหรับการส่งผ่านไปในระบบ Transmission เช่น ระบบ ไมโครเวฟ เคเบิลใต้น้ำ หรือระบบดาวเทียม ให้ส่งที่ระดับ -13 dBmo ค่า dbmo นี้เป็นการกำหนดขึ้นเพื่อสะดวกในการติดต่อประสานงานโดยเฉพาะกับหน่วยงานในต่างประเทศ ทั้งนี้จากระบบ Transmission ที่ใช้การเชื่อมโยงภายในของแต่ละประเทศไม่จำเป็นต้องมีอัตราขยายสัญญาณ 23 dB เสมอไป ในการส่งสัญญาณนั้นเรามักกล่าวถึงคำว่า Transmission Level Point (TLP) เพื่อกำหนดว่า ระดับสัญญาณที่จะใช้ส่งเป็นเท่าใด และระดับสัญญาณสูงสุดจะต้องไม่เกินกว่า Zero dB Transmission Level Point (OTLP) และโดยทั่วไปเรามักจะกำหนดคำว่า dBmo เพื่อแสดงระดับของสัญญาณเป็น dBm เมื่อเทียบกับ OTLP

Transmission Level Point เป็น อัตราส่วน (ในหน่วย dB) ของกำลังงานของสัญญาณที่จุดนั้นเมื่อเทียบกำลังงานของสัญญาณเดียวกันนั้นที่จุดอ้างอิง กรณีนี้ตำราบางเล่มอาจจะเรียกว่า Relative Level (dBr) โดยที่  $TLP (dB) + dBmo = dBm$  (1.8)

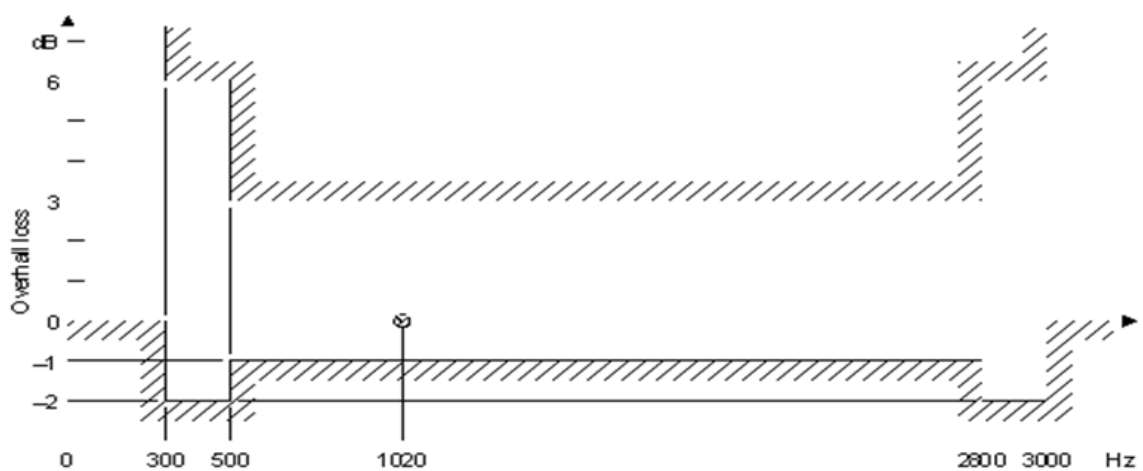
โดยปกติแล้วที่ OTLP นั้นทางด้าน Sending End จะมี Power Level = - 16 dBm ซึ่งเป็นระดับสัญญาณที่สูงที่สุดที่ยอมให้มีได้(ตามปกติทางด้านรับจะรับได้ +7 dBm ซึ่งเรานิยมเรียกว่า 0 dBmo) ดังนั้นการส่งที่ -13 dBmo จึงมีค่าเท่ากับ -29 dBm วัดก่อนที่จะส่งเข้าไปในช่องสัญญาณทางด้านส่ง และ -6 dBm เมื่อวัดที่ช่องสัญญาณทางด้านรับ

### ๓.๖.๒ ระดับสัญญาณเมื่อวัดที่ผู้เช่าใช้งาน

ITU ได้กำหนดไว้ใน REC. ITU-T M.1020 ว่าไม่ควรต่ำกว่า -13 dBr หมายถึง เมื่อวัด ณ ที่ทำการของลูกค้าผู้เช่าใช้งานแล้วจะต้องไม่ควรต่ำกว่าเมื่อวัดที่ต้นทางลงไปเกินกว่า 13 dB เช่น ณ ที่ทำการของ กสท. ( ต้นทาง ) ส่งออกไปยังผู้เช่าวัดได้ 0 dBm ที่ผู้เช่าก็ไม่ควรรับได้ต่ำกว่า -15 dBm ซึ่งหมายถึงในสายเคเบิลคู่ใดก็ตามหากต้องการนำมาใช้ในการส่ง Data แล้ว ไม่ควรมี Loss เกินกว่า 13 dB

### ๓.๖.๓ Attenuation Distortion

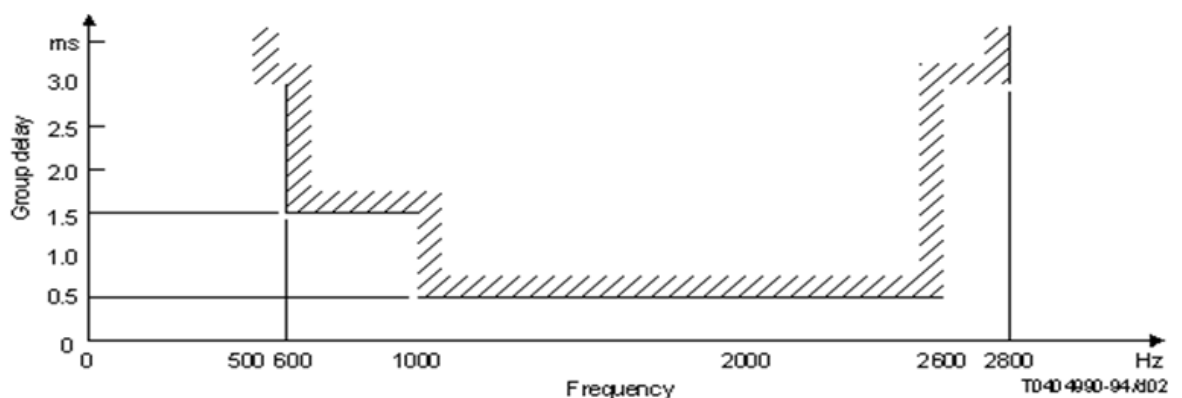
ต้องเป็นตามที่กำหนดมาใน figure 1/M.1020 (ITU-T M.1020) ดังรูป



ภาพที่ ๑-๑๔ Attenuation Distortion ตาม ITU-T M.1020

### ๓.๖.๔ Delay Distortion

เป็นไปตามที่กำหนดไว้ใน Figure 2/M.1020 (ITU-T M.1020)



ภาพที่ ๑-๑๕ Delay Distortion ตาม ITU-T M.1020

### ๓.๖.๕ Impulse Noise

คือการรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งในเวลาสั้นๆไม่เกิน 4 MS การวัด Impulse นั้น ให้ทำการวัดที่ระดับ -21 dBmo ในเวลา 15 นาทีจะต้องไม่เกิดขึ้นเกิน 18 ครั้ง โดยเครื่องที่นำมาใช้ การ Count จำนวน Impulse Noise ที่เกิดขึ้นจะต้องมี Dead Time ไม่เกิน 125 US

### ๓.๖.๖ Phase Jitter

ยอมให้เกิดขึ้นปกติไม่ควรเกิน  $10^{\circ}$  Peak – To – Peak แต่หากจำเป็นก็ยอมผ่อนผันให้ได้ถึง  $15^{\circ}$  Peak – To – Peak (M.1020)

### ๓.๖.๗ Phase Hit & Gain Hits (Amplitude Hits), Short Interruption

#### (Drop Out) และ Other Variation

Phase Hits ได้กำหนดไว้ใน REC.M.1060 ได้เสนอว่า Phase Hits วัดที่ Threshold  $\pm 15^{\circ}$  จะต้องไม่เกิดขึ้นเกินกว่า 10 ครั้ง ในเวลา 15 นาที ทั้งนี้เครื่องมือวัดจะต้อง Comply ตามที่กำหนดไว้ใน ITU-T Recommendation 0.95

Short Interruptions (Drop Out) ในระบบสื่อสารสัญญาณ เมื่อวัดที่ Threshold - 10 dB จากระดับสัญญาณปกติ และ Dead Time ถูก Set ไว้ที่ 125 ms เมื่อใช้เครื่องมือวัดที่ Comply ตาม ITU-T Recommendation ๐.๖๑ หรือ ๐.๖๒ หรือทั้งสอง จะต้องไม่เกิด Short Interruptions ในระบบสื่อสารสัญญาณ (Transmission) ในช่วงเวลา (Duration) 3 ms - 1 min ในช่วงเวลาการวัดต่อเนื่อง ๑๕ นาที แต่ถ้าเกิด Short Interruption ขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวแล้วจะต้องขยายเวลาการวัดต่อไปอีก ๓๐ นาที โดยที่ ในช่วง ๓๐ นาทีนี้ จะเกิด Short Interruptions ได้ไม่เกิน ๑ ครั้ง (ITU-T M.1060)

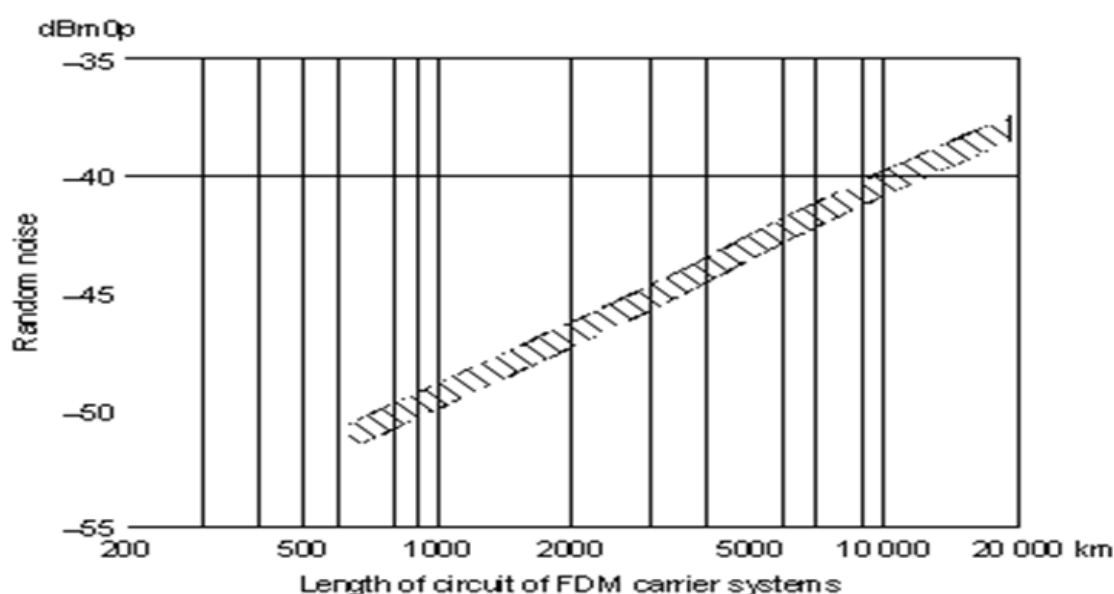
Gain Hits (Amplitude Hits) ได้กำหนดไว้ใน ITU-T M.1020 ว่า การเปลี่ยนของระดับของสัญญาณไปจากจุดที่ใช้งานอยู่ตามปกติไม่เกินกว่า  $\pm 2$  dB ยอมให้เกิดขึ้นไม่เกิน ๑๐ ครั้งในเวลา ๑๕ นาทีและได้กำหนดไว้ใน Q.29 - Q.33 สำหรับเรื่องการรบกวนในระบบชุมสายโทรศัพท์ว่า Gain Hit ณ ระดับแตกต่างไปจากระดับสัญญาณที่ใช้งานตามปกติ (ใน ITU-T ใช้คำว่า Threshold)+12 dB จะเกิดขึ้นเกินกว่า ๒ ครั้งในเวลา ๑๕ นาทีไม่ได้ นอกจากนี้ ITU-T Recommendation M.1020 (ฉบับปี ๑๙๙๔) ได้กำหนดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงด้าน Amplitude (Loss) อื่น (Other Variation) จะต้องเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ทั้งนี้ไม่ควรเกินกว่า  $\pm 4$  dB คำว่า Gain Hits และ Drop Out นั้น แตกต่างเพียงช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นเท่านั้น Gain Hits นั้น คือการเปลี่ยนไปของระดับสัญญาณในช่วงเวลาที่ไม่เกิน 4 ms แต่ Drop Out คือการลดลงของสัญญาณเกินกว่าระดับที่ตั้งไว้ยาวนานเกินกว่า 4 ms Gain Hits นั้นแม้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆไม่เกิน 4 ms เหมือนกับกรณีของ Impulse Noise แต่ผลการรบกวนของ Impulse Noise จะรุนแรงมากกว่า

### ๓.๖.๘ Frequency Error

ได้กำหนดไว้ใน ITU-T M.1020 ว่า ต้องไม่เกิน  $\pm 5$  Hz

### ๓.๖.๙ Single Frequency Interference

ในช่วง 300 - 3,400 Hz นั้น จะต้องต่ำกว่า ระดับ Circuit Noise ตาม Figure A-1/M.1020 (ITU-T M.1020) ไม่น้อยกว่า 3 dB



ภาพที่ ๑-๑๖ FIG A-1/ M.1020

### ๓.๖.๑๐ Total Distortion (Including Quantizing Distortion)

กำหนดไว้ใน ITU-T M.1020 ว่า จะต้องจะต้องไม่ทำให้ S/N ต่ำกว่า 28 dB เมื่อทำการทดสอบด้วย Sine Wave ที่ระดับ  $-10$  dBm<sub>0</sub>

### ๓.๖.๑๑ Harmonic and Intermodulation Distortion

เมื่อทำการทดสอบที่ด้านส่งด้วยความถี่ 700 Hz ที่ระดับ  $-13$  dBm ทางด้านรับจะต้องรับระดับสัญญาณของ Harmonic แต่ละตัวได้ต่ำกว่าสัญญาณที่ Fundamental Frequency อย่างน้อย 25 dB เมื่อได้ทำการวัดผลของ Intermodulation Distortion Product โดยการใช้เครื่องมือที่ Comply ตาม Recommendation O.42 ที่ A Four-Frequency Signal of The Total Level  $-13$  dBm<sub>0</sub> โดยที่ Product ลำดับที่สองและสาม เมื่อวัดที่ด้านรับจะต้องวัดได้เกินกว่า 25 and 26 dB เมื่อเทียบกับระดับสัญญาณของ Four-Frequency Signal ที่รับได้ ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าดังกล่าวยังอยู่ระหว่างการศึกษเพิ่มเติม

### ๓.๖.๑๒ Random Circuit Noise

เมื่อวัด Psophometric Noise Power ในวงจรขณะเมื่อระดับสัญญาณในวงจร เป็นปกติ จะต้องมียังค่าไม่เกิน - 38 dB mop ที่ระยะทาง 10,000 Km หรือไกลกว่านั้น สำหรับระยะทางที่ต่ำกว่า 10,000 Km ลงมา ให้เป็นไปตาม Figure A-1/M.1020

### ๓.๖.๑๓ Crosstalk

Crosstalk Attenuation ที่จุดใกล้ (At The Near End) คือระหว่างทิศทางการส่งไป (Forward Transmission Direction) และส่งกลับ (Reverse Transmission Direction) ของวงจร Leased Circuit ไม่ควรต่ำกว่า 43 dB. และ Crosstalk Attenuation ระหว่าง วงจรข้างเคียง (คือระหว่าง วงจร Leased Circuits ด้วยกัน And ระหว่าง A Leased และวงจรโทรศัพท์ ไตๆทุกประเภท ) ไม่ควรต่ำกว่า 58 dB.

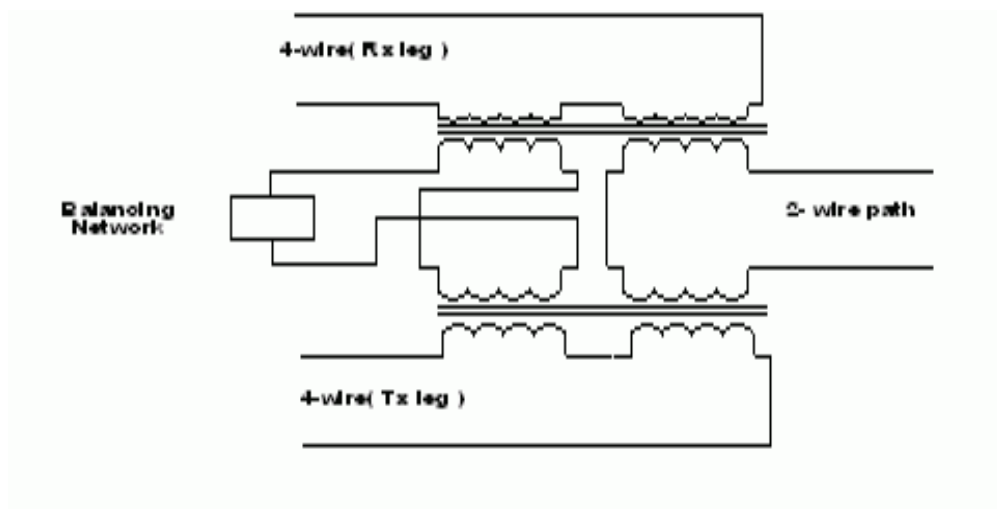
### ๓.๖.๑๔ Power Source Interferences

เมื่อสัญญาณ Sine Wave ถูกส่งผ่านวงจร ที่ระดับ 0 dBm<sub>0</sub> อุปกรณ์หรือวงจรข้างเคียง ไม่ควรรับ Level ได้แรงเกินกว่า -45 dBm<sub>0</sub> เมื่อทำการทดสอบตาม มาตรฐาน ITU-T M.1020, M.1060 จบเรียบร้อยแล้วจะต้องทำการทดสอบ Bit Error Rate Test เรียกว่าทำ BERT และมีผลดังนี้

Speed (bps)	จำนวน error bit ที่เกิดขึ้นในทุกๆ ๑๐ นาที
๑๒๐๐	๗.๒
๒๔๐๐	๑๔.๔
๔๘๐๐	๒๘.๘
๗๒๐๐	๔๓.๒
๙๖๐๐	๕๗.๖
๑๑๒๐๐	๖๗.๒
๑๔๔๐๐	๘๖.๔
๑๙๒๐๐	๑๑๕.๒

ตารางที่ ๑-๑ ตารางแสดงการทดสอบ Bit Error Rate Test

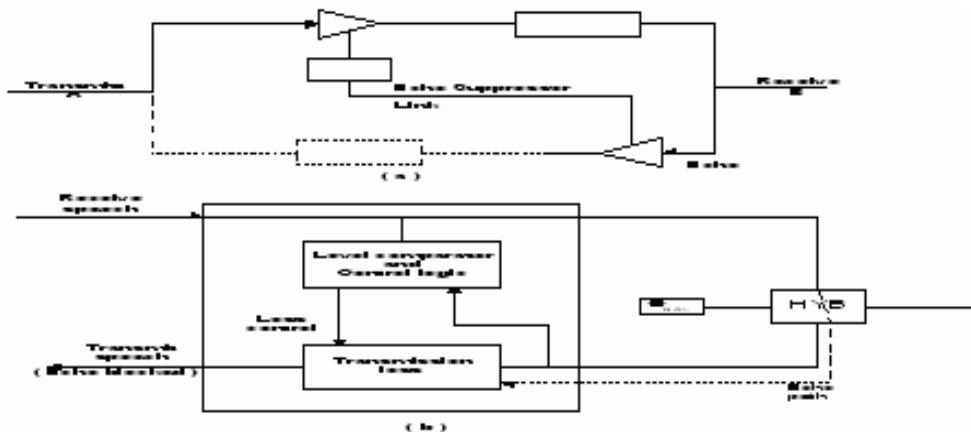
สำหรับการใช้วงจรแบบ 2 - wire นั้นจะต้องคำนึงถึงการใช้อุปกรณ์ Hybrid ที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนระหว่าง 2 - Wire / 4 - Wire ด้วย



ภาพที่ ๑-๑๗ หลักการของอุปกรณ์ Hybrid

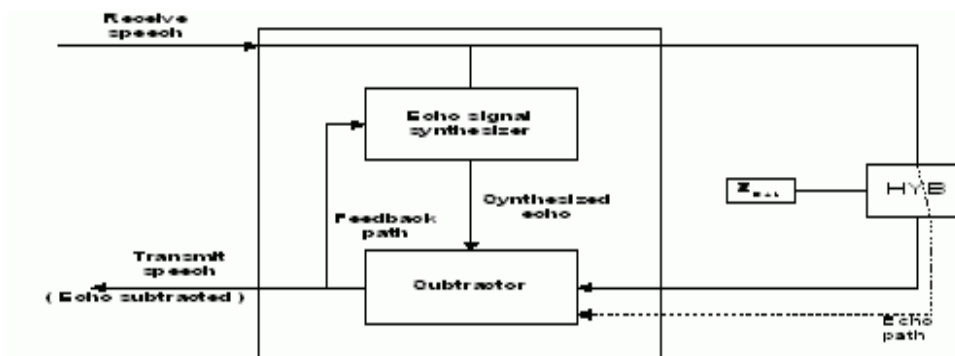
เมื่อนำ Hybrid มาใช้งานสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ Echo และ Return Loss Echo เป็นปัญหาการสะท้อนกลับของสัญญาณระหว่างด้าน 2 - Wire ไปยัง 4 - Wire เนื่องจากการปรับ Balancing Network ในอุปกรณ์ Hybrid ทำให้ไม่ตีพ้อทำให้เกิดการ Unbalance ขึ้นถ้าเกิด Echo ขึ้นจะมีผลเสียอย่างมากต่อการส่ง Data มีผลทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ดีเท่าที่ควรเนื่องจากจะมี Error สูงการแก้ไขปัญหาก็เกี่ยวกับ Echo นั้นทำได้ ๒ วิธีด้วยกัน ได้แก่

๑. นำอุปกรณ์ Echo Suppressor มาใส่ไว้ที่ด้าน 4 - Wire ก่อนที่ต่อผ่าน Hybrid ออกไปยัง 2 - Wire หลักการของ Echo Suppressor คือ เมื่อมีการเกิด Echo ขึ้นสัญญาณที่ Echo กลับมาจะถูก Echo Suppressor กดลงไปมากกว่า 50 dB ทำให้ไม่เกิดการรบกวนเกิดขึ้นในระหว่างด้านรับกับด้านส่ง วิธีการนี้ใช้ได้ดีในกรณีที่เป็นการใช้งานแบบ Half Duplex คือในขณะเวลาใดเวลาหนึ่งมีการส่งอยู่ด้านเดียวเท่านั้น ส่วนอีกด้านหนึ่งอยู่สภาวะ Idle ถ้านำมาใช้งานในกรณีที่เป็นการทำงานแบบ Full Duplex แล้ว จำเป็นต้อง Disable ไม่ให้ Echo Suppressor ทำงาน



ภาพที่ ๑-๑๘ Echo Suppressor; (a) หลักการ; (b) Block Diagram

๒. Echo Canceller อาศัยหลักการทาง Signal Processing ในสร้างสัญญาณ Echo จำลองจากสัญญาณที่รับมาได้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ Echo กลับมาจริงๆสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบ (Subtractor) แล้วนี้จะผ่านไปให้ Adaptive Clipper เพื่อทำการกำจัดสัญญาณ Echo ที่อาจจะเหลือค้างอยู่ให้หมดไป หลักการนี้ปัจจุบันได้รับการนำมาใช้งานกับ Modem ตามข้อกำหนดมาตรฐาน CCITT V.32 และ V.32 bis ซึ่งสามารถทำงานได้ที่ Bitrate สูงสุด 9600 และ 14400 bps ตามลำดับ สำหรับการใช้งานแบบ 2 - Wire Leased or Dial Lines



ภาพที่ ๑-๑๙ Block Diagram แสดงการทำงานของ Echo Canceller

### ๓.๖.๑๕ Return Loss

ค่าของ Return Loss จะเป็นตัวบ่งถึงประสิทธิภาพในการ Balancing ของอุปกรณ์ Hybrid ที่ถูกนำมาใช้งาน ค่าของ Return Loss คือ การเปรียบเทียบระดับสัญญาณทางด้านส่ง (A) กับสัญญาณที่เกิดการ Echo กลับมาทางด้านรับ (B) โดย

$$\text{Return Loss}(R_L) = 20 \text{ Log}[(A + B)/(A - B)] \text{ dB (1.10)}$$

ค่าของ Return Loss ยิ่งมากเท่าใดแสดงว่าการปรับ Balance ของอุปกรณ์ Hybrid ชุดนั้นทำได้ดีมากเท่านั้น โดยปกติแล้ว Return Loss ไม่ควรจะต่ำกว่า 42 dB ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 800 - 2,300 Hz สำหรับการใช้งานที่ Impedance ๖๐๐ โอห์ม

### ๓.๖.๑๖ Transmission Media

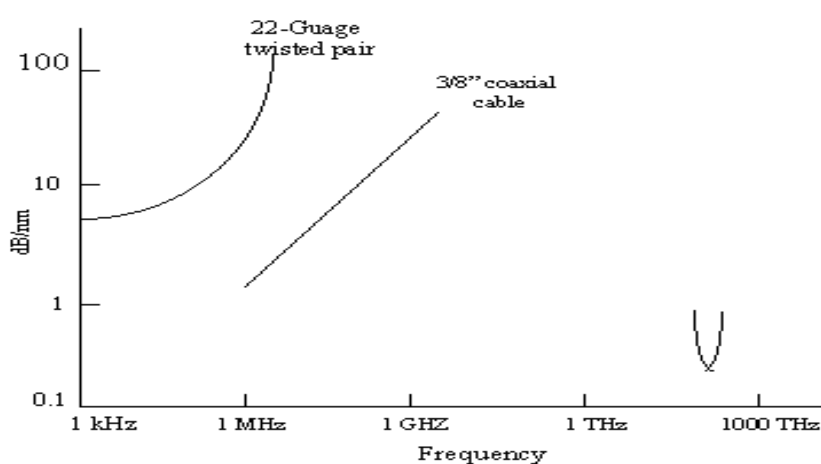
Transmission Media คือส่วนทางกายภาพที่ถูกนำมาใช้ในการส่งผ่านข่าวสารระหว่างสองจุด หรือระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ โดยทั่วไปแล้วข่าวจะต้องถูกแปลงรูปให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือสัญญาณ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมในการส่งผ่านไปในตัวกลางชนิดนั้นๆ เสียก่อน เช่นต้องแปลงเป็นแสงหากถูกส่งผ่านไปใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) เป็นต้น หากจะแบ่งประเภทของตัวกลางอย่างกว้างแล้ว สามารถแบ่งได้ดังนี้ Guided Media และ Unguided Media

กรณี Guided Media คือการใช้ Physical Media เช่นสายตีเกลียวและเคเบิลประเภทต่างๆในการเชื่อมโยงสัญญาณโดยตรงแทนการใช้อากาศหรือสัญญาณภาคในการเชื่อมโยงสัญญาณ ดังเช่นกรณีที่เป็น Unguided Media โดยทั่วไปแล้วการใช้ Guided Media ที่นิยมนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารมีดังนี้ Twisted Pair, Coaxial Cable และ Optical Fiber

ในการพิจารณาว่าสายชนิดใดเหมาะสมในการนำมาใช้งานนั้น ต้องคำนึงถึงความเร็วในการรับส่งข้อมูลและระยะทาง (ระยะห่างระหว่างจุดที่จะนำสายนั้นไปใช้งาน) กรณี Guided Media นี้ คุณสมบัติของตัวกลางเอง (เช่นการลดทอนของสัญญาณ) เป็นสำคัญในการกำหนดขอบเขตของนำไปใช้งาน แสดงคุณสมบัติได้ตามตารางที่ ๑-๒ และรูปที่ ๑-๒๐ แสดงการลดทอนของสัญญาณใน Cable ประเภทต่าง ๆ

Transmission Medium	Total Data Rate	Bandwidth	Repeater Spacing
Twisted pair	4 Mbps	250 MHz	2 - 10 Km.
Coaxial cable	500 Mbps	350 MHz	1 - 10 Km.
Optical Fiber	2 Gbps	2 GHz	10 - 100 Km.

ตารางที่ ๑-๒ แสดงคุณสมบัติโดยประมาณของ Guided Medium จำนวน ๓ ชนิด



ภาพที่ ๑-๒๐ Characteristic Of Guided Media



กรณี Unguided Media นั้นก็คือการเชื่อมโยงโดยระบบวิทยุแบบต่างๆ ในกรณีนี้ Spectrum ของแถบความถี่ของสัญญาณที่ถูกสร้างโดยสายอากาศด้านส่งนั้น เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณลักษณะของการส่งผ่านสัญญาณว่าจะดีเพียงใดและจะกำหนดทิศทางในการส่งสัญญาณได้อย่างไร โดยทั่วไปแล้วย่านความถี่ที่สูงกว่าจะมีให้แถบความถี่ในการใช้งานที่กว้างกว่า และสามารถกำหนดทิศทางได้ง่ายกว่าขอยกตัวอย่างเช่นการนำความถี่ย่าน Microwave (2 - 40 GHz) มาใช้งาน ในย่านความถี่ดังกล่าวนี้เราสามารถกำหนดทิศทางได้ง่าย โดยการใช้ งานสายอากาศที่เหมาะสมในการ Beam ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นการนำระบบ Microwave มาใช้งานจึงเหมาะสำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point - To - Point Communications) แต่สำหรับการใช้งานในย่าน 30 MHz ถึง 1GHz เป็นคลื่นวิทยุนี้การ Beam ให้ คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งนั้นทำได้ยาก เนื่องจากความยาวคลื่นที่ยาวกว่าย่าน Microwave ทำให้ต้องใช้งานสายอากาศขนาดใหญ่กว่ามากดังนั้นการใช้สายแบบกระจายคลื่นเป็นบริเวณกว้าง (Omnidirectional) จึงเหมาะสมกว่าและความถี่ในย่านนี้ก็เหมาะสำหรับ Broadcast Applications สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (The International Telecommunications Union) ได้กำหนดย่านการใช้งานความถี่วิทยุไว้

ระบบโทรคมนาคมมีจุดมุ่งหมายในการให้การสื่อสารทางเสียง รูปภาพ และข้อมูลที่มีคุณภาพสูงไม่ว่าระยะทางจะอยู่ห่างกันแค่ ๑ กิโลเมตรหรือ ๑๐,๐๐๐ กิโลเมตรก็ตาม ระยะทางดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสื่อ (Media) ที่ใช้ เริ่มจากการติดต่อภายในอาคารเดียวกันจะใช้สายโทรศัพท์ หรือคอมพิวเตอร์ที่ต่อใช้งานเชื่อมกันอยู่ภายในอาคารเดียวกันจะใช้ระบบ LAN (Local Area Network) ต่อเชื่อมกันโดยใช้สายโทรศัพท์ สาย Coaxial Cable หรือสายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) การติดต่อภายในอาคารกระทำผ่านชุมสายโทรศัพท์ภายในที่เรียกว่า PBX (Private Branch Exchange )

เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเป็นการติดต่อกับอาคารอื่นหรือขยายไปถึงการติดต่อระหว่างหมู่บ้าน ตำบลหรือเมืองมักจะเป็นการใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์ท้องถิ่นซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสายทองแดงไปยังชุมสายโทรศัพท์ (Switching Exchange หรือ Central Office ( CO )) การเชื่อมต่อระหว่างชุมสายโทรศัพท์กับผู้ใช้งาน เรียกว่า Local Loop ผู้ใช้งานซึ่งก็คือลูกค้าของบริการโทรศัพท์ จึงมักถูกเรียกว่า Subscriber กรณีที่ผู้ใช้งานอยู่ใกล้กันจะสามารถใช้งานชุมสายโทรศัพท์เดียวกันแต่ในกรณีที่ต้องติดต่อกันข้ามชุมสายจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อชุมสายโทรศัพท์เข้าด้วยกัน ขั้นตอนนี้เองที่เทคโนโลยีโทรคมนาคมเข้ามามีบทบาทสำคัญ การเลือกเทคโนโลยีโทรคมนาคมมีผลต่อค่าใช้จ่ายรวมของระบบเป็นอย่างมาก ในยุคแรกสื่อที่ใช้ในการเชื่อมตอดังกล่าวมีเพียงสายทองแดง สายโทรศัพท์หนึ่งคู่ต่อการเชื่อมต่อหนึ่งครั้ง การเชื่อมต่อชุมสายโทรศัพท์เข้าด้วยกันต้องใช้สายจำนวนเป็นร้อยเป็นพันคู่สาย เทคนิค Multiplexing ถูกใช้เพื่อให้สามารถรับ-ส่งสัญญาณโทรศัพท์จำนวนหลายคู่สายผ่าน

สายทองแดงเส้นเดียว ปัจจุบันมีแนวโน้มว่าเส้นใยแก้วนำแสงหรือสาย Coaxial จะเข้ามาทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อ Local Loop ดังกล่าว นอกจากนี้โทรศัพท์เคลื่อนที่ก็มีบทบาทในการเชื่อมต่อ Local Loop เช่นกัน

โทรศัพท์ทางไกลเช่นการติดต่อข้ามจังหวัดมีสื่อโทรคมนาคมที่สำคัญ ๓ รูปแบบได้แก่ วิทยุไมโครเวฟ สายใยแก้วนำแสงและวิทยุสื่อสารผ่านดาวเทียม วิทยุไมโครเวฟและวิทยุสื่อสารผ่านดาวเทียมได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานจนอยู่ในระดับที่ค่อนข้างจะเข้าที่แล้ว ในขณะที่เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสงยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และอยู่ในระดับที่มีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามพัฒนาการของการสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสงในช่วงสิบปีที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ค่อนข้างจะชัดเจนว่าจะกลายเป็นสื่อโทรคมนาคมหลักในอนาคต นักวิชาการหลายคนเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสงกับเทคโนโลยีการสื่อสารระบบไมโครเวฟว่าเหมือนกับผลกระทบจากการค้นพบทรานซิสเตอร์ที่มีต่อวงการอิเล็กทรอนิกส์

เทคโนโลยีสื่อสารผ่านดาวเทียม มีจุดเด่นหลายประการ ได้แก่ความสามารถในการกระจายสัญญาณ (Broadcast) เช่น สัญญาณโทรทัศน์ สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ทั้งหมดในเวลาเดียวกัน จุดเด่นอีกประการได้แก่ค่าใช้จ่ายสำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียมไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องการให้ติดต่อกันรวมทั้งไม่มีผลกระทบจากสภาพภูมิประเทศเหมือนกับสื่อโทรคมนาคมแบบอื่นเช่น การติดตั้งระบบไมโครเวฟต้องพิจารณาถึงตำแหน่งในลักษณะที่มองเห็นกันได้ (Line Of Sight) หรือการใช้สายใยแก้วนำแสงต้องพิจารณาพื้นที่ที่จะวางสายใยแก้วนำแสง สภาพภูมิประเทศบางอย่างเหมาะสมกับการใช้งานการสื่อสารผ่านดาวเทียมมาก เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นเทคโนโลยีเดียวกับระบบไมโครเวฟเป็นส่วนใหญ่ การสื่อสารผ่านดาวเทียมใช้ย่านความถี่ไมโครเวฟ จุดแตกต่างเป็นเพียงที่อุปกรณ์ของระบบ เนื่องจากการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีระยะห่างถึง ๓๖,๐๐๐ กิโลเมตร จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงมากและเครื่องรับที่มี Noise ต่ำมาก ยิ่งกว่านั้นขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์สื่อสารบนดาวเทียมต้องมีขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบาที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการยิงดาวเทียม เทคโนโลยีสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ได้รับการสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ได้แก่ระบบ VSAT (Very Small Aperture Antenna) ระบบนี้ลดขนาดของจานสายอากาศลูกข่ายให้เล็กลงมากเหลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า ๑ เมตรจนถึง ๔ เมตร ขนาดดังกล่าวนี้ว่าเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาด ๓๐ เมตรของจานสายอากาศที่ออกแบบใช้งานในยุคแรกๆ ประมาณปี ๑๙๗๐ ขนาดของจานสายอากาศที่เล็กลงทำให้วงการธุรกิจสามารถใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมได้เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ลดลงและสามารถติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารผ่านดาวเทียมบนหลังคาอาคารของตัวเองหรือบนพื้นที่เล็กๆได้

ปัญหาสำคัญของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมได้แก่ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณ (Propagation Delay) สัญญาณใช้เวลาเดินทางประมาณ ๐.๒๕ วินาทีจากสถานีภาคพื้นไปยังดาวเทียมและกลับมายังสถานีภาคพื้นอีกแห่งหนึ่ง เวลาที่ล่าช้าดังกล่าวทำให้เกิดปัญหาเสียงก้อง (Echo) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แต่ในกรณีติดต่อข้ามทวีปซึ่งต้องติดต่อผ่านดาวเทียมสองดวงเวลาดังกล่าวจะเพิ่มเป็นถึงประมาณครึ่งวินาทีซึ่งเป็นเวลานานพอที่จะทำให้ผู้ใช้ต้องพูดในลักษณะที่ผิดไปจากปกติ อย่างไรก็ตามความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณดังกล่าวไม่เป็นอุปสรรคต่อการรับ-ส่งข้อมูลตลอดจนการรับ-ส่ง FAX การให้ดาวเทียมถ่ายทอดสัญญาณกันโดยตรงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ จำนวนสถานีถ่ายทอดลดลงแต่ต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงขึ้น อนาคตของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นหัวข้อที่อยู่ในระหว่างการโต้เถียงเป็นอย่างมาก ผู้เขียนเชื่อว่าการสื่อสารผ่านดาวเทียมในอนาคตจะถูกใช้งานเป็นหลักในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์และกิจการกระจายเสียง ตลอดจนการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่มีสภาพภูมิประเทศไม่อำนวยต่อการใช้งานสื่อโทรคมนาคมประเภทอื่น

นอกเหนือจากดาวเทียมสื่อสารที่อยู่ในวงจรร Geostationary แล้ว มีโครงการสื่อสารที่มุ่งจะใช้งานดาวเทียมวงจรรต่ำสร้างเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก หนึ่งในโครงการได้แก่โครงการ Iridium ของบริษัท Motorola ใช้งบประมาณมากกว่าสองพันห้าร้อยล้านเหรียญสหรัฐ โครงการนี้จะส่งดาวเทียมจำนวน ๖๖ ดวงในวงจรรสูงประมาณ ๗๐๐ กิโลเมตรให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดบนโลก การใช้ดาวเทียมวงจรรต่ำดังกล่าวทำให้ไม่มีความล่าช้าในการส่งสัญญาณและยังทำให้สามารถใช้งานอุปกรณ์เครื่องรับ-ส่งสัญญาณที่มีขนาดเล็กมากได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานดาวเทียมวงจรรต่ำทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมากดาวเทียมในโครงการ Iridium คาดว่า จะมีอายุการใช้งานประมาณ ๕-๗ ปีในขณะที่ดาวเทียมสื่อสารวงจรร Geostationary ในปัจจุบันมีอายุการใช้งานนานถึง ๑๒ ปี

ราคาของอุปกรณ์สื่อสารเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดของเทคโนโลยีสื่อสารไม่ว่าอุปกรณ์สื่อสารจะให้ประโยชน์ได้มากเท่าไรก็ตามแต่ถ้าราคาสูงเกินไปอุปกรณ์ดังกล่าวก็จะถูกใช้งานในขอบเขตที่จำกัด การที่เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมีราคาถูกลงในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้นทำให้มีการใช้งานแพร่หลายมากขึ้นแต่ก็ไม่ได้หมายความว่า การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงจะมาทดแทนระบบไมโครเวฟที่มีใช้งานทั่วไปในปัจจุบันทั้งหมดได้ทันทีเมื่อมีความต้องการช่องทางการสื่อสารมากขึ้นก็สามารถติดตั้งระบบเส้นใยแก้วนำแสงใช้งานคู่ไปกับระบบไมโครเวฟได้

ระบบไมโครเวฟติดต่อระหว่างจุดต่อจุดโดยใช้คลื่นวิทยุในขณะที่ระบบเส้นใยแก้วนำแสงต้องวางสายใยแก้วนำแสงเชื่อมต่อสองจุด จากคุณลักษณะดังกล่าวทำให้สองระบบนี้มีข้อแตกต่างที่ชัดเจนหลายประการในพื้นที่ภูเขาสามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดสัญญาณบนยอดเขาต่างๆ ได้ในขณะที่จะประสบอุปสรรคเป็นอย่างมากในการวางสายใยแก้วนำแสงผ่านหุบเขา ป่าทึบและแม่น้ำ

ลำธารต่างๆ ในทำนองเดียวกันการตั้งสถานีถ่ายทอดสัญญาณไมโครเวฟระหว่างเกาะที่อยู่ไม่ไกลกันมากจะกระทำได้สะดวกและใช้ค่าใช้จ่ายน้อยกว่า การใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงใต้น้ำต้องคำนึงถึงความเสี่ยงของทะเลด้วย ในแง่ของความปลอดภัยการป้องกันสถานีถ่ายทอดไมโครเวฟย่อมกระทำได้ง่ายกว่า การป้องกันสายใยแก้วนำแสงทั้งเส้น สำหรับการติดตั้งใช้งานในเมืองเส้นใยแก้วนำแสงจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าระบบไมโครเวฟเนื่องจากสามารถติดตั้งแทนสายเคเบิลเดิมได้และจะไม่มีอุปสรรคจากการบดบังของอาคารสูงที่ก่อสร้างขึ้นภายหลัง สายใยแก้วนำแสงไม่ใช่สายโลหะทำให้ไม่มีผลกระทบจากน้ำหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากคุณสมบัติข้อนี้ทำให้สายใยแก้วนำแสงมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในบริเวณที่มีการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากตลอดจนบริเวณที่อันตรายจากการลัดวงจรไฟฟ้าที่อาจจะทำให้ระเบิดได้เช่นในโรงงาน เคมีภัณฑ์ หรือโรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น

การเลือกใช้ระบบโทรคมนาคมว่าจะเป็นเส้นใยแก้วนำแสงหรือไมโครเวฟไม่สามารถกำหนดกฎเกณฑ์ที่ชัดเจนได้ ปัจจัยสำคัญได้แก่งบประมาณ การทำนายถึงแนวโน้มของเทคโนโลยีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญเช่นกันเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีจะเป็นตัวกำหนดราคาอุปกรณ์และอุปกรณ์ที่จัดหาได้ในตลาด ตัวอย่างเช่นปัจจุบันระบบไมโครเวฟมีความเหมาะสมในการใช้งานเป็น Spur Route ไปยังหมู่บ้านเล็กๆ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าแต่ในขณะเดียวกันราคาของระบบเส้นใยแก้วนำแสงก็ลดลงอย่างรวดเร็วและจะกลายเป็นสิ่งที่เหมาะสมกว่าถ้าราคาถูกกว่าหรือราคาใกล้เคียงกันแต่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าระบบไมโครเวฟสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายกว่าระบบเส้นใยแก้วนำแสงและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่ามาก

ระบบโทรคมนาคมที่มีคุณภาพสูงและประหยัดเป็นระบบที่ทุกคนต้องการอย่างไรก็ตามคุณภาพและค่าใช้จ่ายเป็นสิ่งที่สวนทางกัน การพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมจำเป็นต้องพิจารณาถึงรายละเอียดทางเทคนิครวมทั้งการทำนายทิศทางในอนาคตของเทคโนโลยีโทรคมนาคมซึ่งสามารถกระทำได้ในระดับหนึ่งด้วยการติดตามอย่างใกล้ชิดต่อผลการวิจัยและพัฒนา

### ๓.๗ จากระบบ Analog มาเป็นระบบ Digital

ระบบสื่อสารโทรคมนาคมกำลังเปลี่ยนแปลงจากระบบอนาล็อกมาเป็นระบบดิจิทัลเนื่องจากข้อดีหลายประการได้แก่

#### ๓.๗.๑ ทิศทางของเทคโนโลยีทำให้ตั้งแต่อุปกรณ์ปลายทาง

เช่น โทรศัพท์ FAX เครื่องคอมพิวเตอร์ TV สามารถรับ-ส่งสัญญาณดิจิทัล อุปกรณ์โทรคมนาคมจึงไม่จำเป็นต้องแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นดิจิทัลอีก ส่งผลให้เกิดระบบ ISDN (Integrated Services Digital Network) ที่สมบูรณ์ได้

### ๓.๗.๒ สามารถใช้งานความถี่วิทยุได้สูงขึ้น

ย่านความถี่ 10 Ghz ขึ้นไปไม่เหมาะสมกับระบบบนอากาศเพราะสัญญาณจะจางลงเนื่องจากฝนหรือหมอก (Fading) ในขณะที่ระบบดิจิทัลต้องการความแรงของสัญญาณเพียงแค่นี้เกินค่า Threshold ของระบบก็จะได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพเท่ากัน

### ๓.๗.๓ คุณภาพระบบดิจิทัล แพบจะไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างจุดที่ติดต่อกัน

๓.๗.๔ การใช้งาน IC อย่างแพร่หลาย ทำให้ระบบดิจิทัลมีราคาถูกลงและไม่ต้องทำการ Alignment ที่ยุ่งยาก

๓.๗.๕ ระบบดิจิทัลซ่อมบำรุงง่ายกว่า ตัดสินใจจากได้หรือไม่ได้เท่านั้น (Go - No Go)

### ๓.๗.๖ การเชื่อมต่อระบบดิจิทัลทำให้ได้ประโยชน์สูงสุด

สามารถเชื่อมต่อระบบไมโครเวฟ ระบบใยแก้วนำแสงเข้ากับชุมสายดิจิทัล ในขณะที่ระบบโทรคมนาคมแบบอนาล็อกวัดคุณภาพสัญญาณโดยค่า S/N ( Signal to Noise Ratio ) ระบบดิจิทัลจะวัดด้วยค่า BER ( Bit Error Rate )

## ๔. ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ทอ.

### ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาออกแบบระบบสื่อสารโทรคมนาคม

กองทัพอากาศได้ปรับแนวทางการพัฒนาระบบสื่อสารโทรคมนาคมสมัยใหม่โดยการบูรณาการระบบสื่อสารโทรคมนาคมของกองทัพอากาศเพื่อให้มีช่องสื่อสารที่เพียงพอ มีเครือข่ายสำรองและเชื่อมต่อกับโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคมภายนอก เพื่อรองรับการพัฒนาของกองทัพอากาศยุค IT โดยได้พิจารณาถึงปัจจัยสำคัญในการพิจารณาออกแบบระบบสื่อสารโทรคมนาคม ดังต่อไปนี้

#### ๔.๑ ความเชื่อถือได้ (Reliability)

เครือข่ายโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ ให้ความสำคัญต่อความเชื่อถือได้ของข่ายการสื่อสารเป็นอันดับแรก ความเชื่อถือได้ ในที่นี้หมายถึงการที่สามารถใช้งานติดต่อสื่อสารได้ตลอดเวลา แม้กระทั่งในยามสงคราม รวมถึงขีดความสามารถในการอยู่รอดของเครือข่ายด้วย ยกตัวอย่างเช่น เครือข่ายโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ ที่ใช้งานในการรับ-ส่งข้อมูล จากเรดาร์ ไปยังศูนย์ยุทธการทางอากาศ ตามโครงการป้องกันทางอากาศอัตโนมัติ กรณีที่เครือข่ายขัดข้องเพียงในช่วงเวลาไม่กี่นาทีก็มีความสำคัญต่อการป้องกันทางอากาศเป็นอย่างยิ่ง การที่จะประสบความสำเร็จตามหลักนิยมในการใช้กำลังทางอากาศ คือ “รวมการควบคุม แยกการปฏิบัติ” กองทัพ อากาศต้องมีเครือข่ายสื่อสารที่มีความเชื่อถือได้สูง

## ๔.๒ ความปลอดภัยในการสื่อสาร (Security)

การออกแบบระบบสื่อสารจะต้องพิจารณาเป็นเครือข่ายปิด (Private Network) หรือ ต้องใช้งานอุปกรณ์ในการเข้ารหัส (Encryptor) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสัญญาณสู่ระบบภายนอก นอกจากนี้จะต้องมีระบบการเฝ้าระวัง และ ตรวจจับผู้บุกรุกเครือข่าย (Intruder Detection System) ด้วย

## ๔.๓ ความอ่อนตัว (Flexibility)

ระบบโทรคมนาคมที่ดีจะต้องสามารถรองรับภารกิจได้หลายรูปแบบ โดยทำการออกแบบให้เครือข่ายมีทิศทางติดต่อได้หลายทาง และ มีความอ่อนตัวในการจัดรูปแบบเครือข่าย เป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ และ ความอยู่รอดของระบบ

## ๔.๔ สามารถบริหารจัดการ และควบคุมดูแลจากส่วนกลาง (Manageability)

ในปัจจุบันระบบโทรคมนาคมสมัยใหม่ จะประกอบด้วยระบบบริหารจัดการเครือข่าย (Network Management System) ที่มีประสิทธิภาพ กล่าวคือ เครือข่ายโทรคมนาคมและอุปกรณ์สื่อสาร ต้องมีศูนย์กลางในการบริหารเครือข่ายที่สามารถจัดการ ควบคุม และ ดูแลการปฏิบัติงาน ตลอดจนสามารถจะตรวจสอบและวิเคราะห์หาสาเหตุข้อขัดข้องของเครือข่ายและอุปกรณ์สื่อสารได้อย่างรวดเร็ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และการซ่อมบำรุง

### ๔.๔.๑ ความสามารถในการใช้งานร่วมกันได้ (Interoperability)

ความสามารถในการทำงานร่วมกันได้ของอุปกรณ์จากผู้ผลิต (Interoperability) ในการออกแบบเลือกใช้งานอุปกรณ์สื่อสาร จำเป็นต้องเลือกแบบที่มีความเป็นมาตรฐาน สอดคล้องกับมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU-T) เพื่อการใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์ที่เรามีใช้งานอยู่ในปัจจุบันได้

### ๔.๔.๒ ความสามารถขยายเพิ่มเติม (Expandability)

เพื่อรองรับการขยายตัวของเครือข่าย ต้องมีแผนแม่บทเครือข่ายโทรคมนาคม กองทัพอากาศ สำหรับใช้ในการออกแบบ และ ควรมีการพิจารณาออกแบบโดยรวม ต้องคำนึงถึงขีดความสามารถในการรองรับการขยายตัวของ เทคโนโลยีการสื่อสาร ทั้งในด้านชุดอุปกรณ์และรูปแบบการใช้งานในอนาคต ตลอดจนพิจารณาใช้งานข่ายโทรคมนาคมเหล่านี้ที่อื่น หรือของหน่วยงานของภาคเอกชนประกอบด้วย

### ๔.๔.๓ ความคุ้มค่าในการใช้งาน (Cost Consideration)

การออกแบบใช้งานเครือข่ายสื่อสารให้คุ้มค่า ต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบ (Operating Cost) ในระยะยาวเนื่องจากอุปกรณ์โทรคมนาคม

มีอายุการใช้งานยาวนาน เช่นวิทยุโทรคมนาคมไมโครเวฟ มีอายุการใช้งาน ๑๕ ปี สายเคเบิลใยแก้วนำแสง ๒๐ ปี ทั้งนี้เพื่อให้ได้เครือข่ายโทรคมนาคมที่มีคุณภาพ มีความเชื่อถือได้ และ มีความปลอดภัยในการใช้งานอยู่เสมอ

#### ๔.๔.๔ การส่งกำลังและการซ่อมบำรุง (Operability and Maintainability)

การส่งกำลังและการซ่อมบำรุง ต้องมีความคุ้มค่าในระยะยาว ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ ไม่สิ้นเปลืองมากในการส่งกำลังหรือการปฏิบัติงาน เช่น ใช้บุคลากรในการปฏิบัติงานน้อย เป็นต้น

#### ๔.๔.๕ การมีเครือข่ายสำรอง (Backup Network)

นอกจากต้องจัดให้มีเครือข่ายโทรคมนาคมหลักแล้ว กองทัพอากาศจำเป็นต้องมีเครือข่ายสำรอง และสามารถปรับเปลี่ยนใช้ เส้นทางการรับ-ส่งสัญญาณ ในเครือข่ายหลักและสำรองได้โดยอัตโนมัติ กล่าวคือ ในกรณีที่มีเครือข่ายขัดข้อง ต้องสามารถปรับให้สัญญาณเดินทางไปที่ทิศทางหนึ่งได้ เพื่อให้สามารถดำรงข่ายสื่อสารโทรคมนาคมได้ตลอด ๒๔ ชั่วโมง เป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ให้มากที่สุด

ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ทอ. ประกอบด้วยชุมสายโทรศัพท์ วิทยุโทรคมนาคม และอุปกรณ์ปลายทางต่าง ๆ ใช้สนับสนุนข่ายสื่อสารต่าง ๆ ของ ทอ. ได้ทั้งการสื่อสารทางเสียง การสื่อสารด้วยรูปภาพและการสื่อสารข้อมูล - การสื่อสารทางเสียง ได้แก่ การให้บริการโทรศัพท์เชื่อมต่อผู้ใช้งานผ่านชุมสายโทรศัพท์ทั้งในที่ตั้งคอนเมืองซึ่งใช้ชุมสาย โทรศัพท์ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบ MD-110 เลขหมาย ๕ ตัว กับผู้ใช้งานในหน่วยนอกที่ตั้งคอนเมือง การเชื่อมต่อสัญญาณวิทยุติดต่อกจากพื้นที่หนึ่งไปยังพื้นที่ที่ห่างไกล เช่น เชื่อมต่อสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุพื้นดินสู่อากาศเข้าด้วยกันทำให้อากาศยานสามารถติดต่อได้จากทุกแห่งเหนือพื้นที่ประเทศไทยเชื่อมต่อสัญญาณเสียงของวิทยุติดต่อกจากสถานีแม่ข่ายผ่านระบบโทรคมนาคมไปยังสถานีแม่ข่ายในอีกพื้นที่หนึ่งทำให้สามารถใช้งานวิทยุติดต่อกสื่อสารกันได้ครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างขวางขึ้น

- การสื่อสารด้วยรูปภาพ ได้แก่การสนับสนุนการรับ-ส่งภาพไปยังระยะไกล เช่น การประชุมวิดิทัศน์ (Video Conference) การถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ การรับ-ส่งภาพถ่ายทางอากาศ เป็นต้น

- การสื่อสารข้อมูล ได้แก่ สนับสนุนการเชื่อมต่อเครือข่ายสื่อสารข้อมูลระยะไกล กองทัพอากาศ ( RTAF WAN ; Royal Thai Air Force Wide Area Network ) การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมทั้งการรับ-ส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ การใช้งานเครื่องโทรสำเนา (FAX) เครื่องโทรพิมพ์ต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์ในระบบควบคุมการส่งกำลังบำรุงอัตโนมัติ (ALMS) การใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ในการรับส่งข้อมูลข่าวสารการบินในเครือข่ายของศูนย์บริการการบินที่มีการเชื่อมต่อใช้งานกับเครือข่ายของบริษัทวิทยุการบิน การใช้ประโยชน์ข้อมูลข่าวอากาศ

จาก Super Computer ของกรมอุตุนิยมวิทยา การส่งข้อมูลเรดาร์จาก สร. ต่าง ๆ ไปยังคอมพิวเตอร์ที่ ศยอ.ฝคปอ.ศปก.ทอ. ในระบบป้องกันทางอากาศอัตโนมัติเป็นต้น

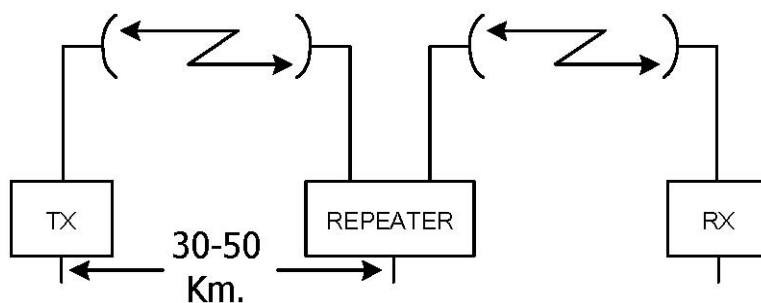
วิทยุโทรคมนาคม ที่ใช้เป็นหลักในปัจจุบัน ได้แก่ วิทยุโทรคมนาคมดิจิทัล ไมโครเวฟ Nera แบบ Evolution ของ Nera ประเทศนอร์เวย์ นอกจากนี้ ทอ. ใช้งานวิทยุโทรคมนาคมผ่านดาวเทียม โดยจัดเครือข่ายเป็น ๒ ลักษณะได้แก่ สถานีประจำที่ ประกอบด้วยตอนเมือง กองบิน ๗ กองบิน ๕๖ กองบิน ๔๑ และ สร.สมุย สถานีเคลื่อนที่ (Mobile) มีสถานีแม่ข่ายที่ตอนเมือง ปัจจุบันมีลูกข่ายจำนวน ๕ ชุด ใช้งานชั่วคราวสนับสนุนฝูงบิน ๔๖๖ (นาน) ๑ ชุด ที่เหลือใช้งานสนับสนุนภารกิจทางยุทธการต่างๆ เช่นการฝึกใช้กำลังทางอากาศ การฝึกร่วมผสม เป็นต้น สำหรับอุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคมผ่านเส้นใยแก้วนำแสงนั้น ทอ. มีใช้งานอยู่ระหว่างกองโทรคมนาคม กองสื่อสารโทรคมนาคม กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ ไปยัง สททค.บ้านพรุ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา แสงในเส้นทางหลักฝังวางตามแนวทางรถไฟจากตอนเมืองถึงสถานีรถไฟบ้านพรุ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เชื่อมต่อจากทุ่งโพธิ์ไปยัง SSOC ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่กองบิน ๗ และใช้ระบบไมโครเวฟในเส้นทางย่อย ได้แก่จากทุ่งโพธิ์ จ.สุราษฎร์ธานีไปยัง สร.สมุย และ จากศิริรัฐนิคมไปยัง สร.ภูเก็ต ( เขาไม้เท้าสิบสอง ) จากบ้านพรุไปยังกองบิน ๕๖ และ สร.หาดใหญ่ ( เขาวังชิง ) ใช้การสื่อสารดาวเทียมเชื่อมต่อไปยัง ศสอต. ๔ นครศรีธรรมราช สำหรับข่ายสื่อสารสำรองของระบบโทรคมนาคมใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยมีสถานีสื่อสารผ่านดาวเทียมตั้งอยู่ที่ ตอนเมือง กองบิน ๗ สร.สมุย กองบิน ๕๖ และ สร.ภูเก็ต



## บทที่ ๒

### ระบบไมโครเวฟ (Microwave System)

ระบบไมโครเวฟ (Microwave System) กลไกของการสื่อสารและรับสัญญาณของไมโครเวฟใช้งาน สะท้อนรูปพลาสมาโบล่าเป็นระบบที่ใช้วิธีส่งสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุเป็นทอดๆ จากสถานี หนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง (หนึ่ง Hop มีจานสายอากาศหนึ่งคู่ห่างกัน) และสัญญาณของไมโครเวฟจะ เดินทางเป็นเส้นตรง คุณลักษณะของระบบไมโครเวฟที่เรียกว่า “ระยะห่างที่มองเห็น (Line-of-Sight)” ดังนั้นสถานีจะต้องพยายามอยู่ในที่สูงๆ สถานีหนึ่งๆ จะ ครอบคลุมพื้นที่ที่รับสัญญาณได้ ๓๐-๕๐ กิโลเมตร ความเร็วในการส่งข้อมูล 200 - 300 Mbps ระยะทาง 20 - 30 mile และยิ่งขึ้นอยู่กับความสูงของเสาสัญญาณด้วย อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าถ้าเราสามารถมองเห็นจุดปลายทางแล้วจะหมายความว่า สามารถติดตั้งใช้งานระบบไมโครเวฟได้เสมอไป สภาพของชั้นบรรยากาศและผลกระทบจากภูมิประเทศ แวดล้อมมีผลต่อการติดตั้งใช้งานระบบไมโครเวฟเป็นอย่างมาก จุดบางจุดอาจจะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่ไม่สามารถติดตั้งใช้งานระบบไมโครเวฟได้ ดังนั้นถ้าหากมีความจำเป็น ที่จะต้องติดต่อระยะไกลกว่านี้ จะต้องมีสถานีถ่ายทอด ก่อนติดตั้งจะต้องทำ Path Profile อย่างละเอียด เพื่อจะได้ผลการติดต่ออย่าง สมบูรณ์ เพื่อให้เข้าใจรายละเอียดในการทำงานระบบไมโครเวฟ ขอกล่าวหลักการทำงานในเบื้องต้น



ภาพที่ ๒-๑ แสดงรูปแบบเบื้องต้นของการสื่อสารระบบไมโครเวฟ

#### ๑. องค์ประกอบของชุดวิทยุไมโครเวฟ

##### ๑.๑ เครื่องส่ง

ปกติเครื่องส่งจะมีกำลังออกอากาศตั้งแต่ ๒๕๐ มิลลิวัตต์ ถึง ๑๐ วัตต์ หรืออาจสูงกว่านี้ เล็กน้อยสัญญาณที่ออกจากเครื่องส่ง จะส่งผ่าน Transmission Line อันได้แก่ Wave Guide, Coaxial Cable หรือ Surface Wave Transmission Line (SWTL or G Line) ไปยัง สายอากาศ ซึ่งปกติ จะเป็นแบบ Parabolic Reflector เพื่อที่จะให้ ลำคลื่น (Beam) ของสัญญาณแคบและส่งตรงไปยัง สายอากาศ ของเครื่องรับ

## ๑.๒ ภาคผลิตความถี่วิทยุ (Oscillator)

ใช้ทั้งแบบ Reflex Klystron Local Oscillator หรือแบบ Crystal Controlled Oscillator แบบหลังนี้ใช้ในเครื่องมือสมัยใหม่ ซึ่งส่วนใหญ่เรียกว่า แบบ Frequency Synthesizers

## ๑.๓ Modulator

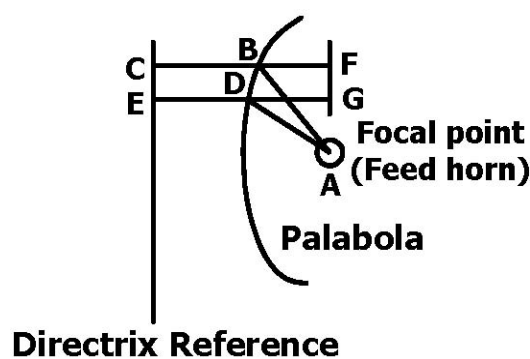
เป็นแบบ FM ภาค Mod และภาค Power Output จะใช้หลอด TWT (Travelling Wave Tube) หรือหลอด Klystron ที่มีกำลังต่ำ ๆ ทั้งนี้ไม่ต้องการกำลังออกอากาศมากนัก

## ๑.๔ เครื่องรับ (Receiver Equipment)

เครื่องรับจะต้องไวต่อการรับสัญญาณ และมีเสียงรบกวนน้อย (Highly Sensitive, Low Noise Receiver) สัญญาณ (Input Signal) จะเข้าที่ Parabolic Antenna ผ่าน Transmission Line อาจเป็น Wave Guide, Coaxial Cable หรือ SWTL เข้าสู่ Multicavity Preselector ซึ่งจะต้องเป็นแบบ High Q Filter ให้เฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้นผ่านได้ สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยัง Pre - Amplifier ปกติจะใช้ Cascode Amplifier หรือ Tunnel Diode Amplifier ซึ่งจะให้ Receiver noise Figure ต่ำมาก (ปกติประมาณ 6 - 16 dB)

## ๑.๕ สายอากาศ (Antenna)

เนื่องจากคุณสมบัติของความถี่ย่านไมโครเวฟ มีลักษณะคล้ายแสง ดังนั้น Parabolic Reflector จึงเหมาะสำหรับเป็นสายอากาศของชุดวิทยุไมโครเวฟ Parabolic Reflector ทำหน้าที่คล้ายกับแผ่นสะท้อนของไฟฉาย คือจะรวม พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ของไมโครเวฟให้เป็นลำ (Beam) และส่งออกไปคล้าย ๆ กับลำแสงที่ออกจากไฟฉายหรือ Spotlight การรับเข้าก็เช่นกัน เมื่อสัญญาณรับกระทบกับสายอากาศมันก็จะสะท้อนเข้ามารวมที่ จุดโฟกัส หรือ Feed Horn

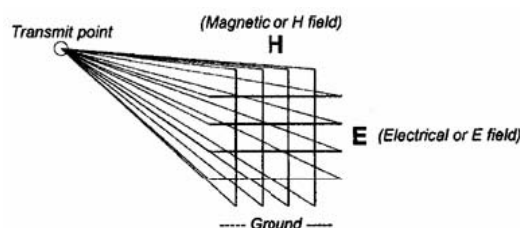


ภาพที่ ๒-๒ แสดงโครงสร้างของ Parabolic Reflector

## ๒. การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟ

### ๒.๑ การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุทั่ว ๆ ไป

คลื่นวิทยุที่ส่งเป็นพลังงานออกไปนั้น ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Fields) ซึ่งจะเห็นได้ว่า พลังงานทั้งสองอย่างนี้จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน การที่จะดูว่าคลื่นวิทยุเป็น Polarization อะไร (Vertical หรือ Horizontal) ให้ดูทิศทางของเส้นแรงสนามไฟฟ้า (Electric Field หรือ เรียกย่อ ๆ ว่า “E” Filed) ถ้าหาก “E” Filed ตั้งฉากกับโลก Wave นั้นจะเป็นแบบ Vertically Polarized ถ้าหาก “E” Filed ขนานกับโลก คลื่นนั้นก็จะ เป็นแบบ Horizontally Polarized



ภาพที่ ๒-๓ แสดง Line of Forces ในการแพร่กระจายคลื่น

การส่งและการรับส่งที่สถานีเดียวกันหรือ Terminal เดียวกัน ปกติจะส่งหรือรับต่าง Polarized กัน เช่น ถ้าการส่งเป็นแบบ Vertical การรับก็จะรับแบบ Horizontal การกระทำเช่นนี้ เรียกว่า Polarized Diversity แต่ละระบบไมโครเวฟจะสังเกตเห็นว่า มี Feed Horn อยู่อันเดียว ฉะนั้น TX และ RX ที่สถานีเดียวกันจึงต้องมีลักษณะขั้ว (Polarity) เดียวกัน

คลื่นวิทยุจะเกิดการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) และการเบี่ยงเบน (Diffraction) เสมือนแสงหรือความร้อน เมื่อคลื่นส่งออกไปแล้วกระทบหรือผ่านเข้าไปในตัวกลาง (Medium) ที่มีลักษณะแตกต่างกัน

#### ๒.๑.๑ Reflection

การสะท้อนของคลื่นจากตัวกลาง (Medium) ที่ต่อต้านคลื่นนั้น คลื่นจะไม่สะท้อน เป็นจุด แต่จะสะท้อนเป็นพื้นที่ ขนาดของพื้นที่ที่ต้องการสำหรับการสะท้อน นั้น ขึ้นอยู่กับ ความยาวคลื่นและมุมตกกระทบ (Angle of Incidence)

#### ๒.๑.๒ Refraction

การหักเหของคลื่น คลื่นวิทยุจะหักเห เมื่อผ่านจากตัวกลาง (Medium) หนึ่ง ไปยังตัวกลาง (Medium) อีกตัวหนึ่ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเร็วที่ผ่าน ตัวกลาง (Medium) นั้น แตกต่างกัน จึงเป็นเหตุการหักเห (Bending) การหักเหขึ้นอยู่กับดัชนีหักเห Refractive Index

### ๒.๑.๓ Diffraction

คลื่นวิทยุเมื่อผ่านขอบของวัตถุ จะเกิดการเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงหรือ Line of Sight ไปยังสถานีรับที่อยู่ต่ำกว่าหรืออ้อมด้านข้างวัตถุนั้นไปยังสถานีรับได้

### ๒.๒ คลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกจากสายอากาศเครื่องส่ง

จะเคลื่อนที่ไปยังสายอากาศเครื่องรับได้ ๓ ลักษณะ คือ คลื่นดิน (Ground Wave) คลื่นสะท้อน (Reflected Tropospheric Wave) และ คลื่นฟ้า (Sky Wave)

#### ๒.๒.๑ Ground Wave

เป็นส่วนหนึ่งของพลังงานทั้งหมดที่ส่งออกไป ซึ่งส่วนนี้ก็จะถูกแพร่กระจายออกไปจากสายอากาศในมุมต่ำ และเป็นผลโดยตรงของสภาพพื้นดิน Ground Wave พิจารณาได้เป็น ๒ ลักษณะ คือ

Surface Wave จะเป็น Earth Guided กล่าวคือ เดินไปตามพื้นผิวของโลก และจะต้อง อยู่ในลักษณะของ Vertical Polarized เท่านั้น ขณะเคลื่อนที่จะเก็บประจุ (Charge) ซึ่งเกิดจากผิวของโลกไปด้วย ทำให้เกิดกระแสแต่พื้นผิวของโลกมีความต้านทาน (Resistance) ต่อการไหลของกระแส จำทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน (Energy is Dissipated) ถูกดูดซึม (Absorb) ส่วนที่ติดกับพื้นดินก็ จะหมดไป ส่วนที่จะอยู่บนผิวดินก็จะเดินทางต่อไป การลดทอนกำลังของ Surface Wave อันเนื่องมาจากการดูดซึมขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นผิวและความถี่ สภาพที่ให้ผลดีที่สุดก็คือเหนือพื้นผิวที่เป็นทะเลและที่แย่ที่สุดคือบริเวณที่เป็นป่าที่บั้นเอง Surface Wave ไม่สามารถใช้สำหรับ ย่านความถี่ไมโครเวฟได้ เนื่องจากมันจะถูกดูดซึมหรือลดทอนกำลังอย่างมาก ในระยะ ๑-๒ เมตร เท่านั้นจากจุดส่ง

Space Wave เมื่อตั้งสายอากาศให้สูงขึ้น คลื่นที่แพร่กระจายออกไปนั้นนอกจากมี Surface Wave แล้ว ยังมี Space Wave อีกด้วย Space Wave มี ๒ ลักษณะ คือ Direct Wave (Line of Sight คือคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง) และ Ground Reflected Wave (คลื่นที่สะท้อนจากผิวพื้น)

Space Wave เป็นวิธีการส่งคลื่นไมโครเวฟ ที่ใช้กำลังส่งและงบประมาณน้อยที่สุด คือ วิธีนี้จะส่งคลื่นในแนวตรงระหว่างจุดส่งและจุดรับ โดยพยายามให้มีการสะท้อนอันอาจเกิดขึ้นได้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้เพราะต้องการการรับส่งเป็นไปด้วยดี ระดับสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับอย่างน้อยที่สุด ต้องเท่ากับระดับต่ำสุด ที่เครื่องรับสามารถทำงานได้ระดับสัญญาณนี้เรียกว่า “Threshold Level” ถ้าระดับสัญญาณเข้าเครื่องรับต่ำกว่า Threshold Level แล้ว เครื่องรับจะตัดสัญญาณที่รับได้ทันที ซึ่งโดยปกติแล้วระดับของสัญญาณที่เข้ามาที่เครื่องรับ จะสูงกว่า Threshold Level นี้มาก (สูงกว่า 20 dB) ซึ่งระยะที่ระดับสัญญาณที่เครื่องรับสูงกว่า Threshold Level นี้เราเรียกว่า ระยะ Margin

#### ๒.๒.๒ Reflected Tropospheric Wave

คลื่นนี้จะหักเหกลับมายังโลก เนื่องจากความปั่นป่วนของบรรยากาศชั้น Troposphere

### ๒.๒.๓ Sky Wave

คลื่นจะพุ่งตรงขึ้นไปถึงบรรยากาศชั้น Ionosphere แล้วหักเหกลับมายังโลก สามารถใช้กับการสื่อสารย่านไมโครเวฟได้ แต่พลังที่ส่งออกจะต้องมีพลังงานสูงมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง แต่เหมาะที่จะใช้กับข่ายไมโครเวฟที่ต้องการระยะทางไกล ๆ

### ๒.๓ ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ จะมีการแพร่กระจายในลักษณะเป็นเส้นตรง (Line of Sight) เคลื่อนที่ในบรรยากาศ ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง มีคุณสมบัติเหมือนกับแสงหลายประการ เช่น

- เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในบรรยากาศ
- ไม่สามารถผ่านตัวกลางทึบแสงได้ เช่น ดึก ต้นไม้ ภูเขา หรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ
- หักเหได้ไม่สามารถผ่านตัวกลาง หรือบรรยากาศที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน
- สะท้อนได้ในพื้นผิวเรียบ เช่น ตัวตึก แผ่นโลหะ ผิวต้ำ หรือพื้นผิวโลก
- เบี่ยงเบนได้เมื่อผ่านมุมหรือขอบของตัวกลางทึบแสง แต่ผลอันนี้เกิดขึ้นได้น้อยมาก

ในย่านความถี่ 6-8 GHz

การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟในลักษณะเป็นเส้นตรงในการติดต่อกันระหว่าง สองสถานี คือ ระยะที่เป็นเส้นตรงในทางระดับ ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ระยะนี้จะขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศทั้งสองและความโค้งของโลก (Curvature) ตามปกติคลื่นส่ง จะส่งได้ไกลไม่เกินขอบฟ้า (Radio Horizon) แต่ตามความเป็นจริงคลื่นจะส่งได้ไกลกว่าขอบฟ้าเล็กน้อย (Beyond Horizon) ระยะที่เกินไปนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก Refraction ในชั้นบรรยากาศ การ Refraction จะขึ้นอยู่กับ Refractive Index และ Refractive Index จะลดลง เมื่อความสูงของบรรยากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity) แรกดกด (Pressure) และอุณหภูมิ (Temperature) เปลี่ยนแปลงเมื่อ Radio Wave ผ่านจาก Region of High Density ไปยัง Region of Low Density มันก็จะโค้งหักเหลงไปยังโลก การหักเหหรือการโค้งกลับของ Radio Wave นี้ไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอากาศ ดังได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม เถลไถลในการ Plot ให้ถือว่า Radio Wave นั้นเป็นเส้นตรง เหตุที่ Plot Radio Wave เป็นเส้นตรงได้เนื่องจากเราให้รัศมีของโลกเป็น ๕๒๘๐ ไมล์ ใหญ่กว่าความเป็นจริง (รัศมีโลก=๓๕๖๐ ไมล์) หรือเท่ากับ  $\frac{4}{3}$  หรือ ๑.๓๓ ของรัศมีโลกจริง (๓๕๖๐ x ๑.๓๓ = ๕๒๘๐) การที่ให้รัศมีโลกเพิ่มขึ้นนี้ จึงใช้ Factor 4/3 ฉะนั้น การทำ Profile จึงต้องใช้ “4/3 Earth Profile Paper” Factor อาจเปลี่ยนเป็น ๑.๑ ในเขตหนาวและ ๑.๖ ในเขตพื้นที่แห้งแล้ง แต่ปกติที่ใช้กันโดยเฉลี่ยในทุกเขต คือใช้ Factor 4/3

### ๒.๔ สิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อ การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ และแก้กันอย่างไร

มีทั้งสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ทั้งที่เกิดขึ้นเองจากธรรมชาติ ได้แก่ สภาพทางภูมิประเทศและสภาพทางอุตุนิยมสภาพทางภูมิประเทศได้แก่ ป่า ภูเขา น้ำทะเล สิ่งก่อสร้าง เช่น ตึก บ้าน หอสูง และสภาพทางอุตุนิยม ได้แก่ หมอก ลม ฝน ความชื้น อุณหภูมิ พายุ และเกิดจากมนุษย์ทำขึ้น (Man

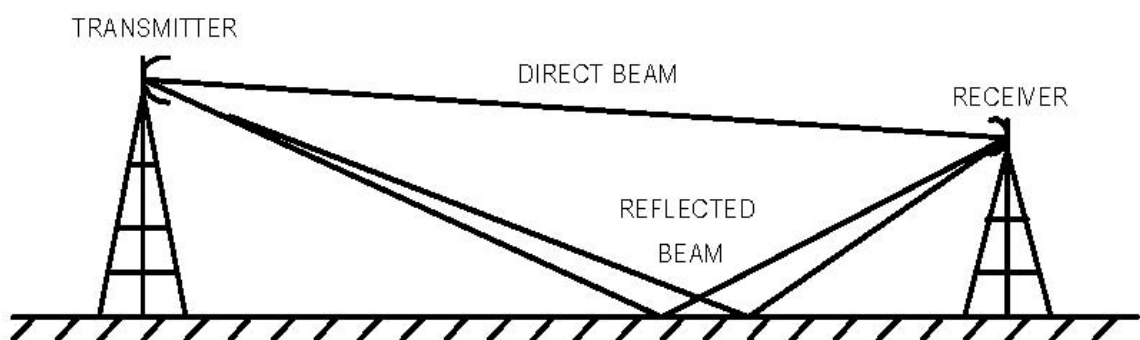
Made) ได้แก่ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม โรงงานซ่อมสร้างไฟฟ้าแรงสูง จากระถยนต์ หรือ เครื่องจักร จากเครื่องบินคลื่นวิทยุ จากที่อื่นที่กระทำโดยตั้งใจ และไม่ตั้งใจ ฯลฯ

### ๒.๔.๑ ผลกระทบอันเกิดจากสภาพทางภูมิประเทศ

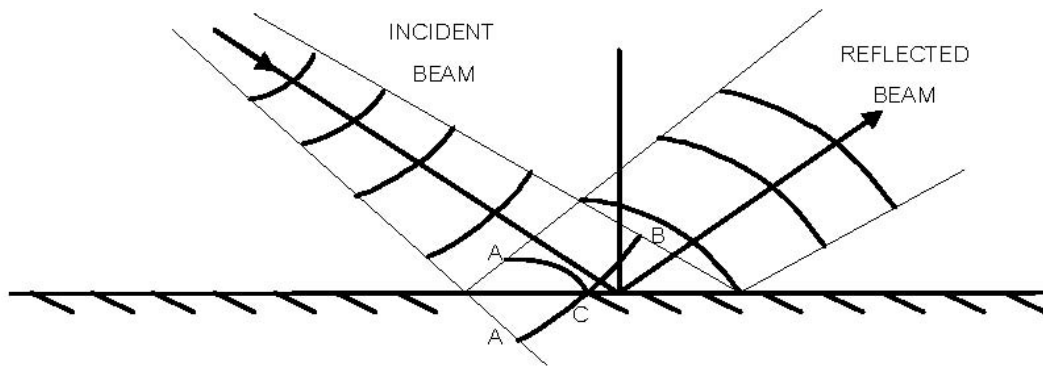
การเดินทางของพลังงานคลื่นวิทยุจะได้รับผลกระทบกระเทือนอันเนื่อง จากสิ่งกีดขวางที่อยู่ในทางเดินตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ส่วนโค้งของโลก (Effective Curvature) มีผลอย่างมากในการกำหนดระยะการติดต่อสื่อสารว่าจะมากน้อยเพียงใด ก่อนหน้านี้เราได้เคยพิจารณา กรณีพื้นโลกเป็นผิวเรียบ แต่สิ่งกีดขวางเช่น หิน ต้นไม้ อาคารสิ่งก่อสร้างต่างก็มีผลต่อการเดินทางของคลื่นวิทยุด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเพิ่มเติม รูปร่างและเนื้อวัสดุของสิ่งที่กีดขวางจะต้องนำมาพิจารณา เมื่อทำการสำรวจเส้นทางรวมถึงวัตถุที่อยู่ใกล้เส้นทางเดินตรงของคลื่นวิทยุก็ก่อให้เกิดปัญหาด้วย ถึงแม้ว่าจะ มิได้กีดขวางเส้นทางเดินโดยตรงก็ตาม

#### ๒.๔.๑.๑ Reflection

ลำคลื่นวิทยุเทียบได้กับลำแสงจากไฟฉาย ถึงแม้จะมีความกว้างเพียง ๑๐ หรือ ๒๐ ที่จุด Half Power (3 dB down) ก็ยังมีพื้นที่ที่มีพลังงานวิทยุแผ่เป็นบริเวณกว้างที่ระยะทาง ๔๐ กิโลเมตรจากเครื่องส่ง ในทางภูมิศาสตร์แสดงให้เห็นว่าจุด Half Power ที่มีความกว้างของลำคลื่น ๒๐ จะแผ่กว้างเป็นพื้นที่วงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ๑.๔ กิโลเมตร หรือ ๐.๗ กิโลเมตร ที่ขนาดของลำคลื่นกว้างเพียง ๑๐ นั่นก็หมายความว่าพลังงาน ส่วนหนึ่งสามารถสะท้อนจากพื้นดิน (ภาพที่ ๒-๔) หรือวัตถุใด ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงได้ทั้ง ๒ ด้านของเส้นตรง (ภาพที่ ๒-๕) ที่สายอากาศเครื่องรับ พลังงานคลื่นวิทยุที่เดินทางมาถึงมีทั้งจากทางเส้นตรงและทางเส้นทางการสะท้อน ถ้าคลื่นทั้ง ๒ มี Phase ตรงกันจะทำให้ระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงขึ้นแต่ถ้าคลื่นทั้งสองต่าง Phase กัน ก็จะเกิดการหักล้างและเกิดการจางหายของสัญญาณ การต่าง Phase นี้จะอยู่ระหว่าง ๐ องศา ถึง ๑๘๐ องศา ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิวและมุมที่ตกกระทบ



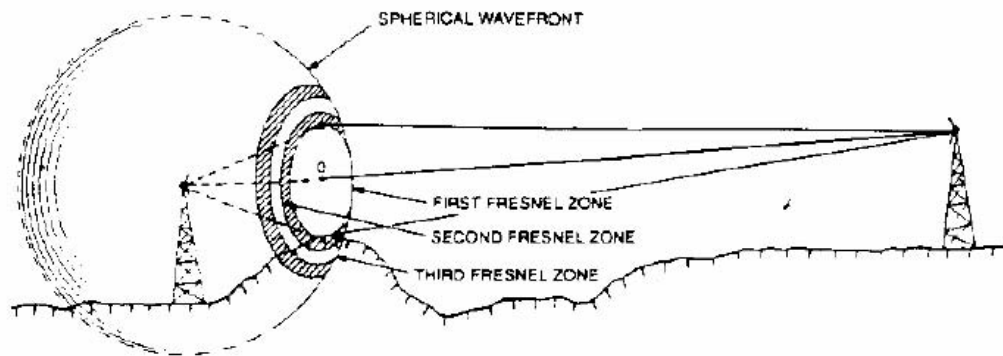
ภาพที่ ๒-๔ แสดง Ground Reflection



ภาพที่ ๒-๕ แสดง Phase Reversal Due To A Reflection

๒.๔.๑.๒ Fresnel Zone

พลังงานคลื่นวิทยุไมโครเวฟที่เดินทางถึงสายอากาศด้านรับต่าง Phase กับคลื่นวิทยุที่เดินทางเป็นเส้นตรง  $๑๘๐$  องศา ( $\lambda/2$ ) จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตที่เรียกว่า First Fresnel Zone ที่ความถี่หนึ่งความถี่ใดทุกจุดตามระยะทางระหว่าง ๒ สถานีสามารถจะเป็นจุดที่สะท้อนคลื่นวิทยุทำให้มีความยาวคลื่นที่แตกต่างจากคลื่นที่เดินทางเป็นเส้นตรง  $1/2\lambda$  ( $๑๘๐$  องศา) พอร์มกันเกิดเป็นรูปร่างที่กำหนดขอบเขต First Fresnel Zone ตลอดเส้นทาง ในทำนองเดียวกัน Second และ Third Fresnel Zone ก็จะเป็น ตัวกำหนดขอบเขตทุกจุดบนเส้นทางที่คลื่นวิทยุสามารถสะท้อนทำให้เกิดความยาวคลื่น  $2/2\lambda$  และ  $3/2\lambda$  ตามลำดับ



ภาพที่ ๒-๖ แสดง Fresnel Zone

ขอบเขตที่ประกอบด้วยจุดต่างๆ ที่ให้ผลรวมของคลื่นที่มีความยาวคลื่น  $๒๑/๒$  และ  $๓๑/๒$  แตกต่าง จากคลื่นที่เดินทางเป็นเส้นตรงตามลำดับ ดังนั้นที่จุดใด ๆ ในเส้นทางเดินก็จะมีรูปทรงกลมหลายรูป ซ้อนกันอยู่โดยมีเส้นทางตรงอยู่ที่ศูนย์กลางแทนขอบเขตของ Fresnel Zone ทั้งหมด (ภาพที่ ๒-๖)

$F_n$  คือระยะทาง (มีหน่วยเป็นเมตร) จากเส้นทางเดินเป็นเส้นตรง (Line of Sight Path) ถึงขอบของ Fresnel Zone ที่  $n$  หาได้จากสูตร

$$F_n = 17.3 \sqrt{\frac{nd_1d_2}{fd}}$$

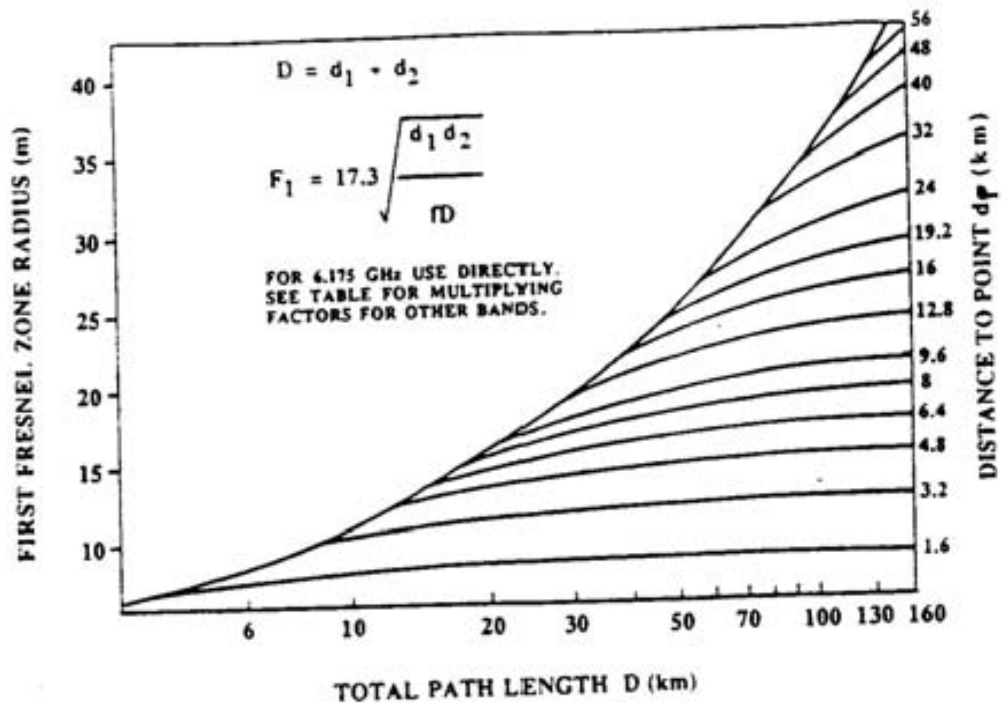
$D_1$  = ระยะทางจากปลายทางด้านหนึ่งถึงจุดที่มีการสะท้อนคลื่น (กม.)

$D_2$  = ระยะทางจากปลายทางอีกด้านหนึ่งถึงจุดที่มีการสะท้อนคลื่น (กม.)

$D = d_1 + d_2$

$f$  = ความถี่ (GHz.)

$n$  = หมายเลขของ Fresnel Zone (1st, 2nd)



ภาพที่ ๒-๗ แสดง First Fresnel Zone Radius (6.175 GHz.)



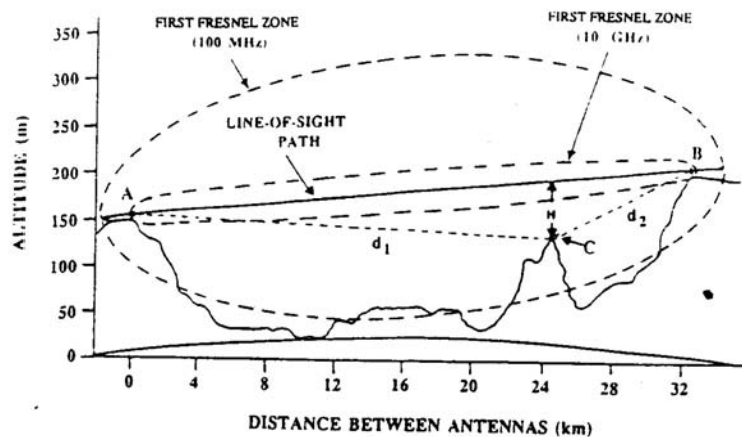
BAND GHz.	CENTER Frequency	MULTIPLY By
1.850-1.990	1.920	1.793
1.990-2.110	2.050	1.735
2.110-2.130 2.160-2.180	2.145	1.697
2.130-2.150 2.180-2.200	2.165	1.688
2.450-2.500	2.475	1.580
3.700-4.200	3.950	1.250
4.400-5.000	4.700	1.146
5.925-6.425	6.175	1.000
6.575-6.875	6.725	0.9582
6.875-7.125	7.000	0.9392
7.125-8.400	7.437 7.750	0.9112 0.8926
10.700-11.700	11.200	0.7425
12.200-12.700	12.450	0.7045
12.700-12.950	12.825	0.6939
12.700-13.250	12.975	0.6899

ภาพที่ ๒-๘ แสดง Multiplying Factor To Convert Fresnel Zone Radius Calculated for 6.175 GHz.

ภาพที่ ๒-๗ เป็นกราฟที่ได้จากการคำนวณตามสูตร สามารถหารัศมีตามจุดต่างๆ ในเส้นทางทั้งหมดได้ กราฟนี้เขียนมาจากความถี่ 6.175 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้กันมากในการติดต่อสื่อสารย่านความถี่ไมโครเวฟ รูปที่ ๓-๖b คือตารางที่ใช้สำหรับเปลี่ยนค่ารัศมี First Fresnel Zone ที่คำนวณที่ความถี่ 6.175 GHz เป็นค่าต่างๆ สำหรับความถี่อื่น ๆ ตัวอย่างเช่น คู่สถานีหนึ่งที่มีระยะการติดต่อ ๔๐ กม. จะมีรัศมีของ First Fresnel Zone ประมาณ ๑๒ เมตร ที่ระยะทาง ๓.๒ กม. ห่างจากปลายทางด้านใดด้านหนึ่งเมื่อใช้ความถี่ 6.175 GHz และรัศมีจะเพิ่มเป็น ๒๑ เมตร ที่ระยะทาง ๑๒.๘ กม. รัศมีของ Fresnel Zone เหล่านี้ มีความสำคัญเมื่อมีสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ ยอดเขาอยู่ในเส้นทางคลื่นวิทยุไมโครเวฟและอยู่ในรัศมีของ First Fresnel Zone ในการคำนวณหารัศมีของ Fresnel Zone ที่อยู่ในลำดับที่สูงขึ้นไป เมื่อรัศมีของ First Fresnel Zone แล้ว หาได้จากสูตร

$$F_n = F_1 \sqrt{n}$$

ในการออกแบบเส้นทางการติดต่อสื่อสารมีความจำเป็นที่ต้องทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งกีดขวางทั้งหมดที่อยู่ในเขตของเส้นทางเดินระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับและวาดรูปสิ่งกีดขวางลงใน Profile (ในรูปที่ ๓-๗) แสดงให้เห็นเส้น First Fresnel Zone ที่พล็อตมาจากความถี่ 100 MHz และ 10 GHz (สังเกตุดูจะเห็นเส้นรูปวงรีกำหนดขอบเขตของโซน) ในรูปแสดงว่าขนาดของโซนเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ รัศมีของ First Fresnel Zone ที่กึ่งกลางของระยะทางในกรณีนี้เท่ากับประมาณ ๑๗ เมตร ที่ความถี่ 10 GHz และจะเท่ากับ ๑๗๐ เมตรที่ความถี่ 100 MHz จุด C เป็น ยอดเขาที่อยู่นอก First Fresnel Zone ของความถี่ 10 GHz แต่จะอยู่ภายใน First Fresnel Zone ของความถี่ต่ำลงมา



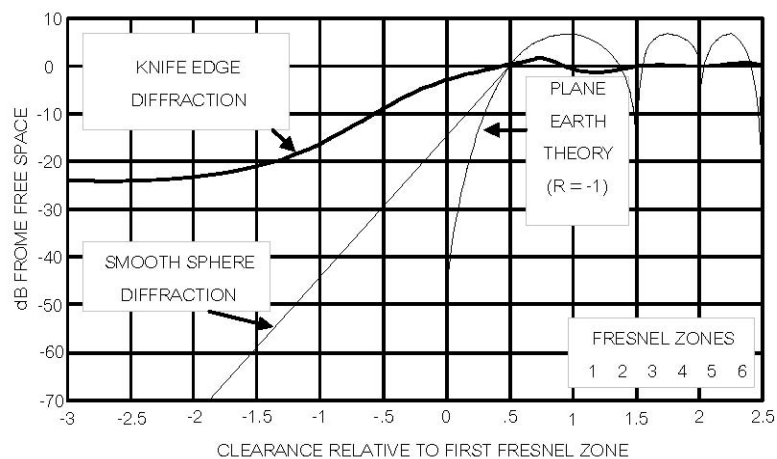
ภาพที่ ๒-๙ แสดง Typical Profile Plot Showing First Fresnel Zone For 100 MHz and 10 GHz.

เนื่องจากการสะท้อนคลื่นวิทยุเนื่องจากสิ่งกีดขวางใน First Fresnel Zone สามารถทำให้เกิด Phase Shift ๑๘๐ องศา ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่สายอากาศเครื่องรับหักล้างกันก่อให้เกิดผลเสียอย่างร้ายแรง จากประสบการณ์ในการออกแบบเส้นทางการสื่อสาร (Hop Design) แสดงว่า เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่อการติดต่อสื่อสารที่มีสาเหตุจากสิ่งกีดขวาง ในเส้นทางการติดต่อสื่อสารจะต้องมีช่องว่าง (Clearance) จากสิ่งกีดขวาง อย่างน้อย ๐.๖ เท่า รัศมี First Fresnel Zone โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงกว่านี้ ให้ใช้กับสิ่งกีดขวางด้านข้าง เช่นเดียวกับ ด้านล่างของเส้นทาง (Ground Reflections) ด้วย

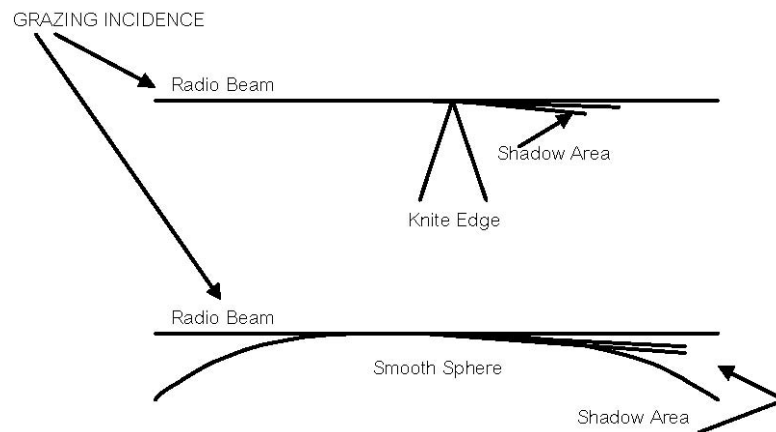
### ๒.๔.๑.๓ Diffraction

ส่วนใหญ่ในเส้นทางเดินของคลื่นวิทยุจะมีช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางที่เรียกว่า Knife-Edge Diffraction ในเส้นทางนี้ประกอบด้วยสิ่งกีดขวางในภูมิประเทศที่เป็นยอดเขาที่ปกคลุมด้วยพุ่มไม้หรือต้นไม้ Diffraction คือคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อ

ลำคลื่นวิทยุผ่านสิ่งกีดขวางในลักษณะ Grazing Incidence (เพียงแต่แตะสิ่งกีดขวาง) พลังงานของคลื่นวิทยุจะกระจายหายไปจำนวนหนึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของสิ่งกีดขวางและความถี่ของคลื่นวิทยุ Shadow Loss คือ คำนิยามที่ใช้อธิบายความสูญเสียในพื้นที่หลังสิ่งกีดขวาง ความสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ ความถี่สูงคลื่นเดินทางตามเส้นตรงของ Line of Sight จะไม่ Diffract ในพื้นที่ส่วนเงาหลังสิ่งกีดขวาง แต่ความถี่ที่ต่ำกว่า Diffraction เกิดขึ้นมากกว่า ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากกว่า เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่อยู่ในส่วนเงา ถ้าติดตั้งสายอากาศระหว่างช่วง (Hop) ของการติดต่อสื่อสารไว้ต่ำ เมื่อเทียบกับช่องว่างของ Fresnel Zone (Fresnel Zone Clearance) ก็จะมีมุมตกกระทบที่เป็นมุมแคบเกิดกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ใกล้เส้นทาง Line of Sight และจะเกิด Shadow Loss (หรือ Diffraction Loss) ที่มีสาเหตุมาจาก Grazing Incidence รูปที่ ๓-๘ แสดงความสูญเสียเมื่อเทียบกับค่าของ Free Space Loss คาดไว้ ๒ กรณี คือ ๑) เหนือพื้นราบที่เป็นส่วนโค้งของโลก ๒) Knife-Edge กรณีที่มีความสูญเสียพลังงานมากคือกรณีแรกซึ่งอาจจะสูงถึง 15 dB ขึ้นอยู่กับความห่างระหว่างเส้นทางเดินของคลื่นวิทยุและพื้นดิน ความสูญเสียมีไม่เล็กน้อย เส้นทางเดินของคลื่นวิทยุส่วนมากจะมีการสะท้อนเกิดขึ้นที่จุด ๆ หนึ่ง หรือหลายจุดตามเส้นทางเดินที่ระยะทางต่าง ๆ ความสูงของสายอากาศจะต้องเพียงพอเพื่อป้องกันคลื่นสะท้อนที่จะทำให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ และจะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ เมื่อเส้นทางเดินของคลื่นวิทยุผ่านพื้นที่ที่เป็นน้ำและทะเลทราย



ภาพที่ ๒-๑๐ แสดง Effect Of Path Clearance On Radio Path Propagation



ภาพที่ ๒-๑๑ แสดง Effect Of Path Clearance On Radio Path Propagation

จากภาพที่ ๒-๑๑ แสดงรูปที่เกิดจากการพล็อตช่วงการติดต่อสื่อสารหนึ่งที่มีค่า K-Factor เท่ากับ  $\frac{4}{3}$  โดยใช้คอมพิวเตอร์ และได้รวมเอาส่วนหนึ่งของรัศมี Fresnel Zone ไว้ในการคำนวณด้วย ในรูปจะเห็นได้ว่าที่แต่ละด้านของช่วงการติดต่อสื่อสารจะต้องใช้สายอากาศที่มีความสูง ๘๕ เมตรเพื่อให้เกิดช่องว่างระหว่างลำคลื่นวิทยุกับยอดเขาที่ระยะ ๑๐ กิโลเมตร และกับยอดไม้ที่ระยะทาง ๒๗ กิโลเมตร คำถามก็คือเพียงพอหรือไม่ คำตอบ คือเพียงพอหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงบรรยากาศที่รุนแรงมากนัก ในกรณีเช่นนี้จะเป็นประโยชน์มากหากจะพล็อตสภาพเมื่อ K-Factor เท่ากับ ๒ ซ้อนลงในรูปเดียวกันนี้ เพื่อจะดูว่าช่องว่างจากสิ่งกีดขวางยังเพียงพอหรือไม่ หากเกิดการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศต่อความสูงของสายอากาศที่ติดตั้งไว้สำหรับ  $K = \frac{4}{3}$  จะเห็นได้ว่าไม่เพียงพอ ดังนั้นจะต้องเพิ่มความสูงของสายอากาศที่ด้านใดด้านหนึ่งขึ้นหรือทั้ง ๒ ด้าน เพื่อให้มีช่องว่าง (Clearance) มากขึ้นในกรณีบรรยากาศเปลี่ยนแปลง ปัญหาที่คือในความเป็นจริงจะยุ่งยากมากกว่านี้ เพราะภาพที่ ๒-๑๑ พิจารณาเฉพาะสภาพบรรยากาศเดียวเพื่อเป็นประมาณการเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม กราฟนี้ก็เป็นจุดเริ่มต้นในการออกแบบที่ดีซึ่งจะมีการปรับปรุงแก้ไขให้ได้ผลดีที่สุดแต่ละสถานการณ์

## ๒.๔.๒ ผลกระทบอันเกิดจากสภาพทางอุตุนิยม

### ๒.๔.๒.๑ Absorption

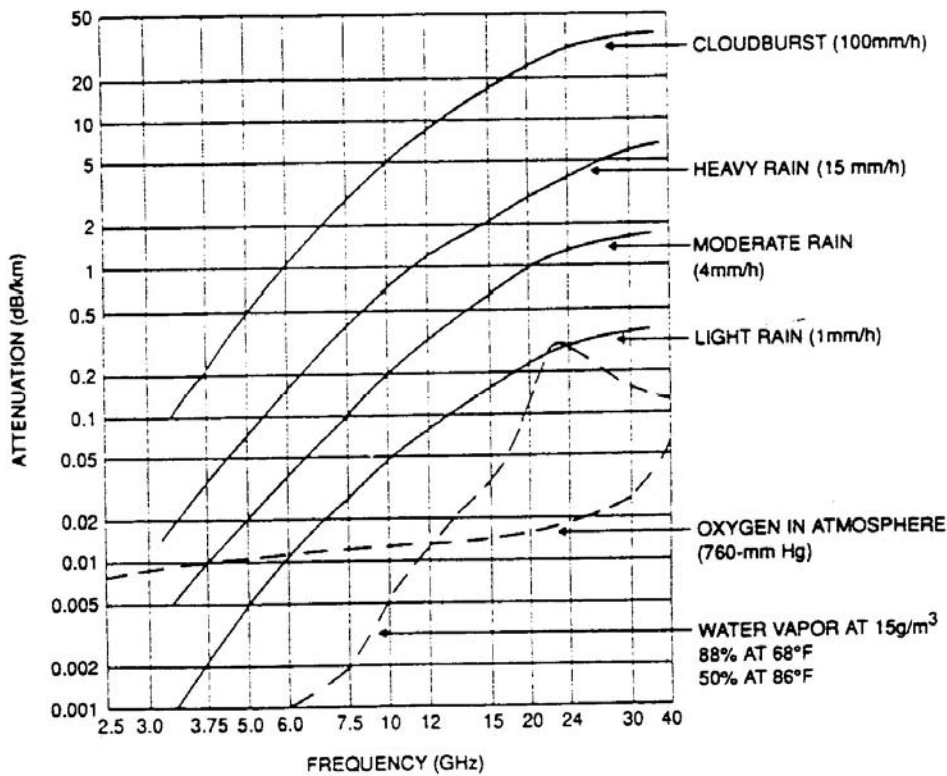
การเดินทางใน Free Space ที่แท้จริงจะเกิดขึ้นเฉพาะในบางส่วนของ การสื่อสารผ่านดาวเทียมเท่านั้น แต่การติดต่อสื่อสารบนพื้นโลกคลื่นวิทยุต้องเดินทางผ่านบรรยากาศ (Atmosphere) ก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศจะดูดซับ (Absorb) พลังงานวิทยุส่วนหนึ่งประมาณ 0.01 dB/กิโลเมตร ที่ความถี่ 2 GHz และเพิ่มขึ้นเป็น 0.02 dB/กิโลเมตร ที่ความถี่ 26 GHz

ฝนก็มีส่วนสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นวิทยุไมโครเวฟ พลังงานวิทยุถูกลดทอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าในบรรยากาศที่คลื่นวิทยุเดินทางผ่านมีปริมาณน้ำมากที่ความถี่ 6 GHz การลดทอนเนื่องจากน้ำในอากาศ เท่ากับ 0.01 dB/กิโลเมตร ถ้าไอน้ำเปลี่ยนเป็นหมอกหรือฝนตกพริ้ว ๆ การลดทอนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.01 dB/กิโลเมตร ถ้าฝนตกหนักมากจะทำให้การลดทอนเพิ่มขึ้นสูงถึง ๑

dB/กิโลเมตร สำหรับช่วงการติดต่อสื่อสารที่มีระยะทาง ๔๐ กิโลเมตร การลดทอนอาจสูงถึง 40 dB และทำให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพของการติดต่อสื่อสาร แต่อย่างไรก็ตามปกติฝนที่ตกหนักจะไม่ครอบคลุมระยะทางถึง ๔๐ กิโลเมตร ดังนั้นการลดทอนก็ไม่สูงถึง 40 dB ด้วย จึงพอสรุปได้ว่าฝนมิได้ก่อให้เกิดปัญหาหลักในการลดทอนพลังงานของคลื่นวิทยุที่มีความถี่ต่ำกว่า 6 GHz ถึงแม้ว่าอาจจะทำให้คุณภาพของการติดต่อสื่อสารลดลงบ้างในเขตพื้นที่ที่มีฝนตกหนักอยู่เป็นประจำ

ที่ความถี่สูงขึ้นโดยเฉพาะสูงเกิน 10 GHz ฝนจะก่อให้เกิดปัญหาที่ร้ายแรงต่อการติดต่อสื่อสาร ได้ เช่นที่ความถี่ 12 GHz การลดทอนอาจสูงถึง 10 dB / กิโลเมตร และฝนที่ตกหนักอาจจะทำให้การติดต่อสื่อสารหยุดลงชั่วคราว ในสถานการณ์ที่ต้องการการติดต่อสื่อสารที่มีความแน่นอนสูงอาจจะต้องลดระยะการติดต่อสื่อสารลงหรือใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่ต่ำลง

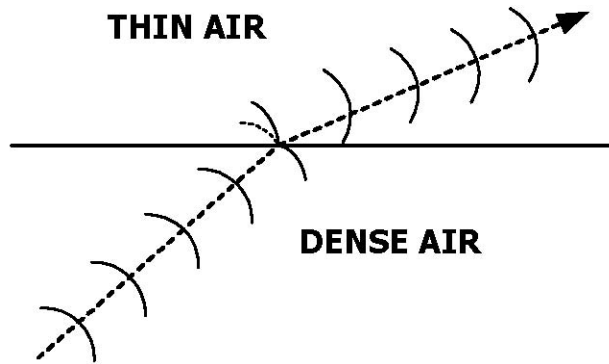
๒.๔.๒.๒ Refraction



ภาพที่ ๒-๑๒ แสดง Estimated Atmospheric Absorption

นอกจากชั้นบรรยากาศมีผลต่อการลดทอนคลื่นวิทยุแล้ว การหักเหของคลื่นวิทยุก็ทำให้เกิดปัญหาด้วยเช่นกัน การหักเหของคลื่นวิทยุทำให้คลื่นวิทยุไม่โคจรเวเปียงเบนไปจากเส้น Line of Sight ที่เป็นเส้นตรง และก่อให้เกิดปัญหาที่ร้ายแรงต่อการติดต่อสื่อสารถึงขนาดที่ทำให้การติดต่อสื่อสาร ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ เวลาอาจเป็นเศษส่วนของวินาทีจนถึงหลายชั่วโมง

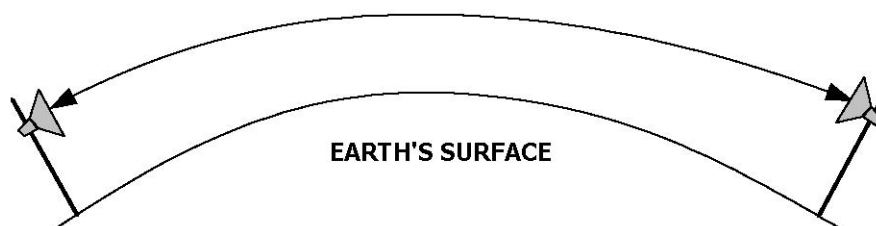
การหักเหของคลื่นวิทยุจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของบรรยากาศ เช่นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความชื้นที่ความสูงในระดับต่างๆเหนือพื้นโลก ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อความเร็วของคลื่นวิทยุไมโครเวฟที่เดินทางผ่านบรรยากาศด้วย



ภาพที่ ๒-๑๓ แสดง Refraction Of A Microwave Beam

ในภาพที่ ๒-๑๓ แสดงความเร็วในส่วนของ Wave Front ที่สูงขึ้นในอากาศที่เบาบาง ทำให้คลื่นวิทยุเดินทางเป็นเส้นโค้ง เราสามารถเปรียบเทียบได้กับการหักเหของลำแสงจากไฟฉายที่กระทบพื้นน้ำ การหักเหของคลื่นวิทยุในลักษณะนี้ทำให้การเดินทางของคลื่นวิทยุโค้งลงสู่พื้นโลกและทำให้คลื่นวิทยุเดินทางได้ไกลกว่าการเดินทางเป็นเส้นตรง โดยกระดกสายอากาศขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ ๒-๑๓) เท่ากับเป็นการเพิ่มรัศมีที่เป็นส่วน โค้งของโลก โดยเฉลี่ยแล้วสภาพของบรรยากาศจะทำให้เกิดการเดินทางของคลื่นวิทยุมีรัศมีที่เป็นเส้นโค้งมีระยะทางประมาณ ๑.๓๓ เท่าของรัศมีของโลกที่แท้จริง (True Earth Radius) ในทางปฏิบัติจะได้ระยะทางเพิ่มขึ้นอีกประมาณ ๑๕ % ของเส้นทาง Line of Sight และใช้กระดาษ Profile ที่ได้แก้ไขให้รัศมีของเส้นโค้งเท่ากับ  $\frac{4}{3}$  ของรัศมีที่เป็นส่วนโค้งของโลกเพื่อให้การ Plot คลื่นวิทยุไมโครเวฟเห็นเป็นเส้นตรง การเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งที่เกิดการหักเหของคลื่นวิทยุสามารถแทนได้ด้วย K-Factor ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่าง Effective Earth Radius กับ True Earth Radius

$$k = \text{Effective Earth Radius} / \text{True Earth Radius}$$



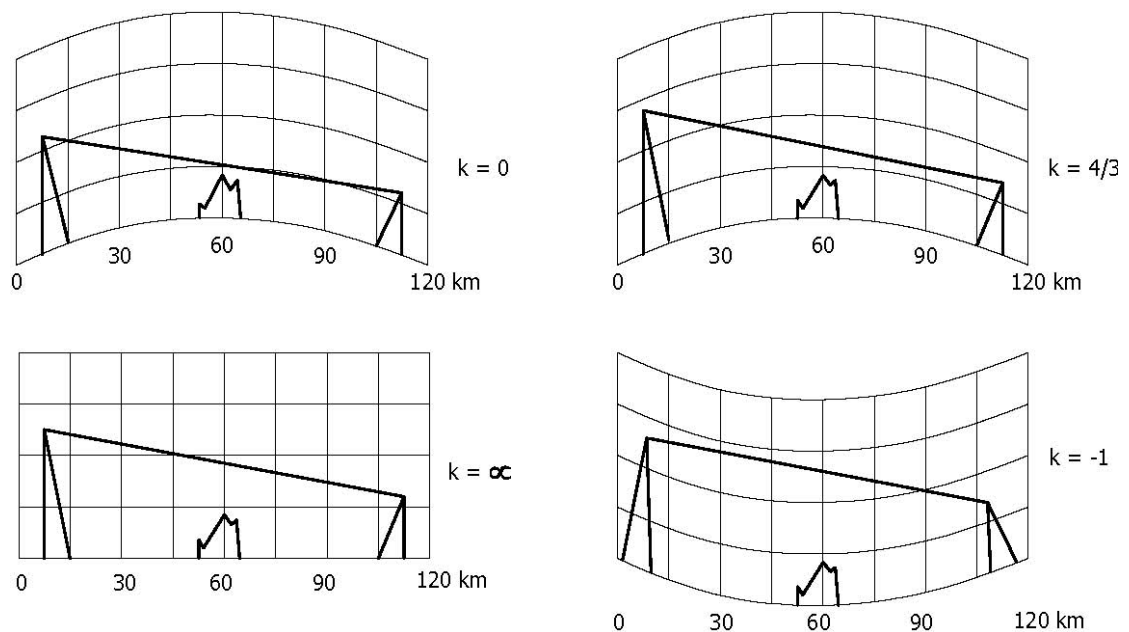
ภาพที่ ๒-๑๔ แสดง Transmission Distance Increased By Refraction

Effective Earth Radius มีใช้รัศมีของเส้นล่ำคลื่นไมโครเวฟ แต่เป็นเส้นรัศมีของพื้นโลกที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับสภาพบรรยากาศที่กำหนด เพื่อให้สามารถลากเส้นล่ำคลื่นไมโครเวฟเป็นเส้นตรงได้

เพื่อให้เห็นคำจำกัดความของ Effective Earth Radius ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากสูตร

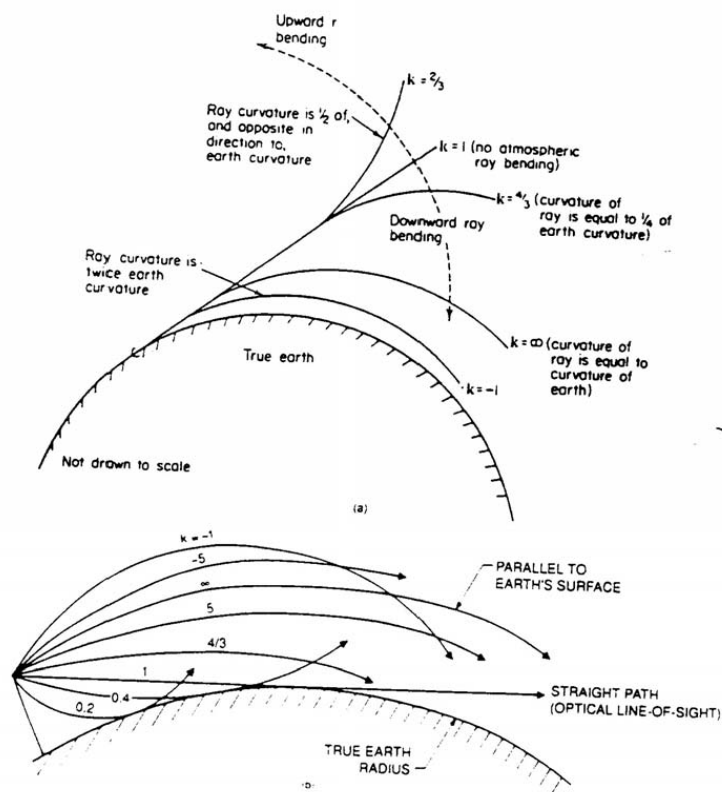
$$k = \frac{1}{1 + (4dn / dh)}$$

ถึงแม้ค่ามาตรฐานของ K เท่ากับ ๔/๓ แต่การเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศเกิดขึ้นได้ทุกวันและชั่วโมงขึ้นอยู่กับที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลมีผลกระทบสะท้อนต่อการติดต่อสื่อสารอย่างมาก โดยทั่วไปค่า K จะสูงกว่า ๔/๓ ในเขตที่มีอากาศอบอุ่นและน้อยกว่า ๔/๓ ในเขตที่มีอากาศหนาว โดยรวมจะอยู่ระหว่าง ๑.๑ และ ๑.๖ ขึ้นอยู่กับเส้นละติจูดและฤดูกาล



ภาพที่ ๒-๑๕ แสดง Effective Earth Profile For Several K-Factor Showing Relative Obstacle Clearance

นอกจากนั้นค่า K อาจจะน้อยกว่า ๑ จนถึง  $\infty$  หรืออาจจะเป็นค่าลบ เช่น เมื่อเกิดอุณหภูมิผกผัน (Temperature Inversion) ชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิลดลงจะกัก (Trap) ชั้นบรรยากาศที่มีอากาศเย็นกว่าไว้ ค่า K-Factor จะน้อยกว่า ๐ อีกสถานการณ์หนึ่ง เช่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิจากพื้นโลกสู่ความสูงหลายร้อยเมตรอาจทำให้ค่า  $K = \infty$  ในกรณีหลังนี้จะทำให้คลื่นไมโครเวฟมีรัศมีเท่ากับส่วนโค้งของโลก ถ้าสภาพเช่นนี้เกิดขึ้นกับพื้นโลกเป็นระยะทางรอบโลก คลื่นวิทยุอาจจะเดินทางข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกได้โดยใช้สถานีเพียงคู่เดียว แต่สถานการณ์เช่นนี้ไม่มีทางเกิดขึ้นจริง ระดับสัญญาณที่รับได้ก็จะต่ำเกินไปที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ถ้าลำคลื่นเดินทางเป็นเส้นโค้งมากกว่าค่า  $K = \infty$  ก็จะได้ค่า K - Factor ที่เป็นลบ



ภาพที่ ๒-๑๖

(a) Microwave Beam Bending For Difference K-Factors

(b) Antenna Oriented For Maximum Path Length For Various K-Factor

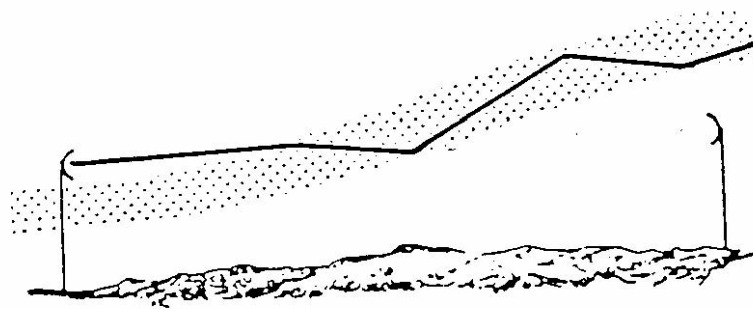
ในภาพที่ ๒-๑๕ แสดงค่า K -Factor ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ การเดินทางของคลื่นวิทยุ ภาพที่ ๒-๑๖ แสดงลำคลื่นไมโครเวฟเดินทางเป็นเส้นตรงในขณะที่ส่วนโค้งของโลกเปลี่ยนแปลง ผลก็คือทำให้ช่องว่าง (Clearance) ของทางเดินแคบลงหรือกว้างขึ้นแล้วแต่ ค่า K - Factor ภาพที่ ๒-๑๖ (a) แสดงสภาพที่เกิดขึ้นกับส่วนโค้งของโลกที่เป็นจริง และลำคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งขึ้น



เป็นมุม ๙๐ องศาที่พื้นโลกสามารถเดินทางเป็นเส้นโค้งได้อย่างไรขึ้นอยู่กับค่า K-Factor ภาพที่ ๒-๑๖ (b) แสดงระยะทางอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามค่า K-Factor ต่างๆ กัน สังเกตดูจะเห็นได้ว่าสายอากาศจะมีมุมที่ต่างกันที่แต่ละค่า K-Factor เพื่อให้ได้ระยะทางไกลสุด นั้นหมายความว่าถ้า ระหว่างสถานี (Hop) ถูกออกแบบสำหรับค่า  $K = ๔/๓$  และติดตั้งสายอากาศไว้สำหรับค่า  $K = ๔/๓$  ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนทำให้ค่า K เปลี่ยนเป็น  $๒/๓$  ลำคลื่นวิทยุจะเดินทางเป็นเส้นโค้งขึ้น พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปจากการรับเนื่องจาก Major Lobe ของลำคลื่นวิทยุเบี่ยงเบนออกไปจากสายอากาศทางด้านรับ หรือในทำนองเดียวกันถ้าค่า K เปลี่ยนเป็น ๒ ก็จะทำให้การรับสัญญาณไม่สามารถรับได้สูงสุด เช่นเดียวกันในกรณีนี้ลำคลื่นวิทยุจะโค้งลงสู่พื้นโลก เนื่องจากสายอากาศถูกตั้งไว้ที่  $K = ๔/๓$

### ๒.๔.๒.๓ Ducting

ชั้นบรรยากาศสามารถก่อดั้วเสมือนเป็นท่อที่กั้นมิให้ลำคลื่นวิทยุเดินทางออกภายนอกได้เรียกว่า Duct เป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาในการติดต่อสื่อสารอย่างร้ายแรงได้ สาเหตุที่ทำให้เกิด Ducting คือชั้นบรรยากาศที่อยู่ในระดับต่ำแต่มีความหนาแน่นมาก ส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณเหนือพื้นน้ำ หรือในพื้นที่ที่อากาศมีอุณหภูมิหรือความชื้นเป็นปกติภาคกลับ (Inversion) เกิดขึ้น ภาพที่ ๒-๑๗ แสดงลำคลื่นวิทยุถูกดักอยู่ใน Duct เมื่อคลื่นวิทยุเริ่มเข้าในท่อและเดินทางถึงจุดที่ติดต่อกันระหว่างชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันเกิดมุมวิกฤติ (Critical Angle) ถึงจุดทำให้เกิดการสะท้อนภายในท่อ ผลที่ตามมา คือ ลำคลื่นวิทยุจะสะท้อนกลับไปมาขณะที่เดินทางไปในท่อ สายอากาศด้านรับจะรับสัญญาณไม่ได้



ภาพที่ ๒-๑๗ แสดง Microwave Beam Trapped In A Duct

### ๒.๔.๓ ผลกระทบอันเนื่องมาจากมนุษย์ทำขึ้น

ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรม หรือ โรงไฟฟ้า หรือโรงงานซ่อมสร้าง ต่างๆ เหล่านี้ สิ่งแรกที่โรงงานเหล่านี้คายออกมาคือคลื่นความร้อน Heat Wave และวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโรงงานนั้น ส่วนใหญ่เป็นโลหะเมื่อเครื่องจักรทำงานก็จะแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเป็น Electromagnetic Wave ด้วย ฉะนั้นหากเราไปตั้งสถานีวิทยุใกล้กับโรงงานที่กล่าวนี้ จะทำให้เกิดการรบกวนได้ เมื่อตั้ง

ใกล้สนามบิน เครื่องบินบินผ่าน Beam ของคลื่นวิทยุ ทำให้เกิด Reflection เครื่องรับก็จะรับไม่ได้ ในช่วงที่เครื่องบินบินผ่าน หรือรับได้ก็ไม่ดีคลื่นวิทยุจากที่อื่นซึ่งมีความถี่ที่ใกล้เคียงกับเราก็รบกวนกันได้ เป็นการรบกวนโดยไม่ได้ตั้งใจ และที่ตั้งใจรบกวน ได้แก่การ Jamming

### ๒.๔.๔ ผลกระทบอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ

ลูกอุกกาบาตเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในบรรยากาศของโลกจะทำให้บรรยากาศแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นวิทยุ ทำให้ตำบลของคลื่นวิทยุผิดไปจากเดิม แสงออโรรา เกิดจาก Charge Particles ที่พุ่งออกมาจากดวงอาทิตย์ลงมาในบรรยากาศ ทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน ทำให้เกิดการสะท้อนคลื่น เช่นเดียวกับลูกอุกกาบาต

### ๒.๔.๕ การแก้ไข

๒.๔.๕.๑ พยายามหลีกเลี่ยงภูมิประเทศ สิ่งที่เป็นอุปสรรคต่าง ๆ ต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ถ้าหากหลีกเลี่ยงไม่ได้จะต้องใช้วิธีอื่น เช่น ยกสายอากาศให้สูงขึ้น เป็นต้น

๒.๔.๕.๒ ตั้งให้ห่างจากโรงงาน โรงไฟฟ้า ถนน ที่มีการจราจรหนาแน่น ทางขึ้นลงของ เครื่องบิน

๒.๔.๕.๓ จัดสรรความถี่ให้พอเหมาะและศึกษาความถี่วิทยุที่มีอยู่แล้วในบริเวณนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการรบกวนกัน

๒.๔.๕.๔ แก้ไขทางเทคนิค เช่น เพิ่มความถี่ ลดความถี่ จัดให้มี Ground ที่ดี และมี การใช้ Diversity Technics

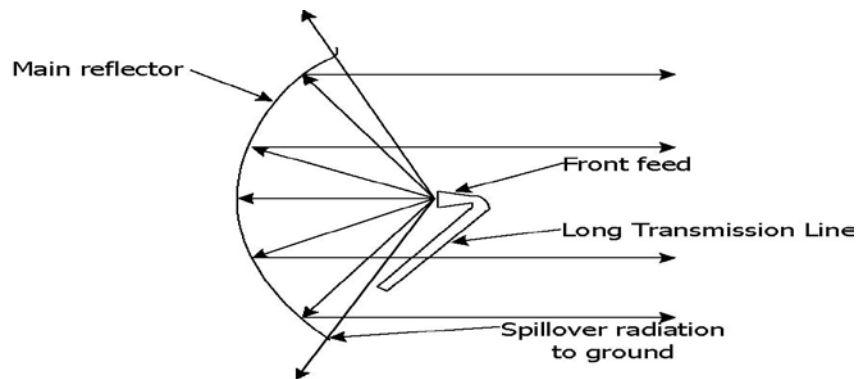
## ๒.๕ สายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟ

### ๒.๕.๑ สายอากาศ

สายอากาศที่ใช้ส่งคลื่นวิทยุไมโครเวฟมีหลายรูปแบบในระบบโทรคมนาคม ส่วนมากใช้สายอากาศแบบ Parabolic เนื่องจากบังคับให้คลื่นวิทยุเดินทางในทิศทางเดียวได้สูง (Highly Directional) และพลังงานคลื่นวิทยุไมโครเวฟถูกรวม (Focus) ให้เป็นลำคลื่นที่แคบมากโดยสายอากาศทางส่งเล็งตรงไปยังสายอากาศเครื่องรับซึ่งจะรวมพลังงานที่รับได้คล้ายเทเลสโคป

### ๒.๕.๒ Antenna Gain

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของสายอากาศคือ Gain เป็นมาตรสำหรับใช้วัดความสามารถของสายอากาศในการส่งคลื่นวิทยุไปในทิศทางที่ต้องการ และใช้วัด Directionality ด้วย สายอากาศที่แพร่กระจายพลังงานเท่ากันทุกทิศทางเรียกว่า Omni Directional หรือ Isotropic การติดต่อสื่อสารในระบบ โทรคมนาคมแบบจุดต่อจุดต้องการสายอากาศที่มี Directionality สูงหรืออีกนัยหนึ่งก็คือสายอากาศแบบ



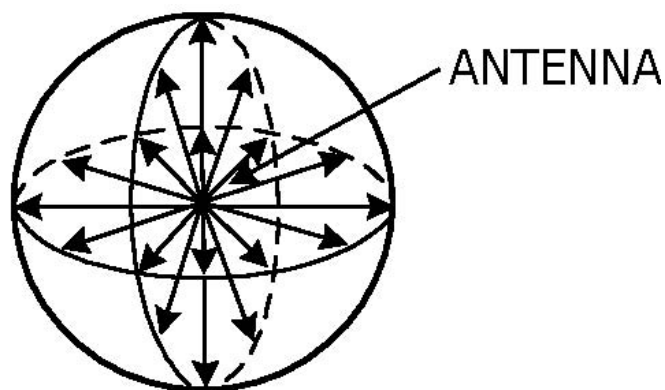
ภาพที่ ๒-๑๘ แสดง Front Feed Paraboloid Antenna

Isotropic ไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน Gain ของสายอากาศอธิบายขนาดของพลังงานที่แพร่กระจายออกรอบทิศทางถูกบังคับให้เป็นคล้ายลำแสง ถ้ายิ่งแคบสายอากาศนั้นก็ยังมี Directionality สูงและหมายถึง Gain ก็สูงขึ้นด้วย สายอากาศแบบ Isotropic มี Gain เท่ากับ ๑ (หรือ 0 dB) สำหรับสายอากาศแบบ Parabolic ก็เชื่อว่าจะมีประสิทธิภาพเต็ม ๑๐๐ % เนื่องจากพลังงานส่วนหนึ่งล้นออกมาที่ขอบจาน (Spillover) สายอากาศที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ ขณะนี้มีประสิทธิภาพประมาณ ๕๐-๗๐ % Gain ของสายอากาศที่มีประสิทธิภาพ ๕๐ % หาได้จากสูตรนี้

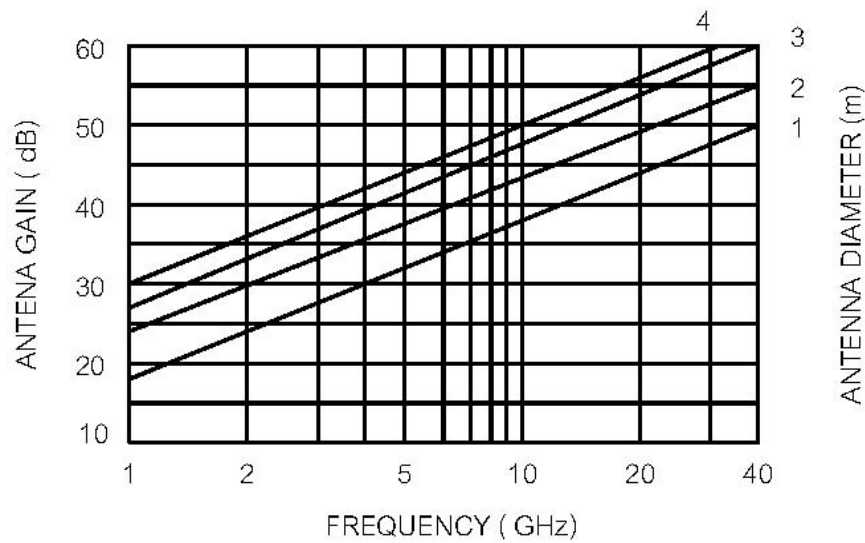
$$\text{Gain (G)} = 10 \text{ Log}_{10} (7.4 \text{ Df})$$

D = ขนาดของจานสายอากาศ (เมตร)

f = ความถี่ (GHz.)



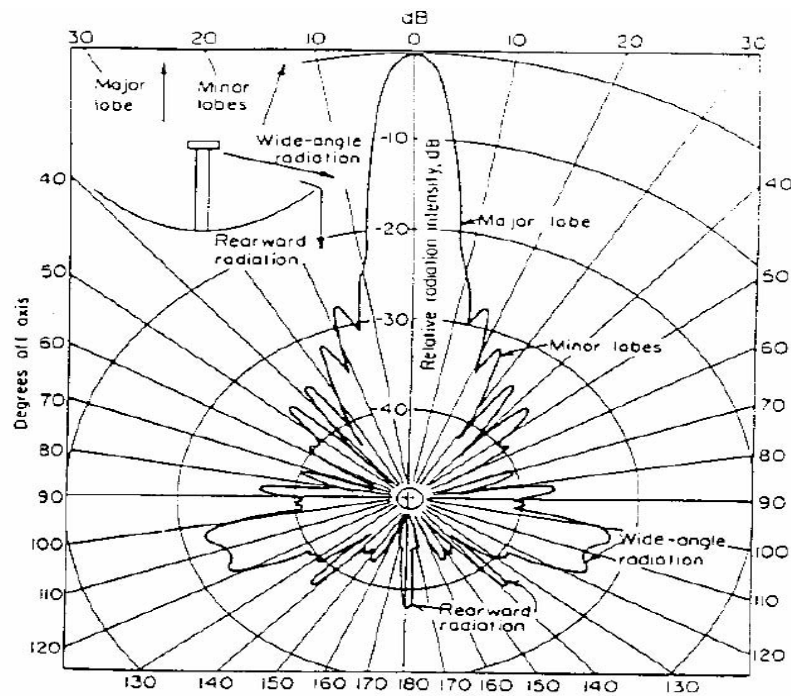
ภาพที่ ๒-๑๙ แสดง Radiation Pattern Isotropic Antenna



ภาพที่ ๒-๒๐ แสดง Variation Of Antenna Gain With Frequency

เส้นกราฟใน ภาพที่ ๒-๒๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศ ความถี่และ Gain สำหรับสายอากาศที่มีประสิทธิภาพ ๕๐ % จากสูตร Gain จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่หรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศเพิ่มขึ้น รูปที่ ๓-๑๙ แสดงลักษณะของคลื่นวิทยุไมโครเวฟที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศแบบ Parabolic ระดับของพลังงานที่แพร่กระจายออกมาถูกวัดโดยรอบ ๓๐ องศา พลังงานที่ถูกส่ง ออกมามากที่สุดอยู่ในทิศทางที่เรียกว่า Boresight ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ Boresight นี้แทนด้วย 0 dB ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดอื่นก็จะเทียบกับจุดสูงสุดนั้น สังเกตดูจะเห็น Major Lobe (Main Beam) แคบมาก ส่วนการแพร่กระจายที่ Side Lobe และ Back Lobe จะต่ำกว่าที่ Major Lobe ไม่น้อยกว่า 25 dB การแพร่กระจายคลื่นในอุดมคติ จะมีอยู่เฉพาะใน Major Lobe เท่านั้น แต่ความไม่สมบูรณ์ในการรวมแสง และ ความไม่ราบเรียบของพื้นผิวจานทำให้เกิด Side Lobe

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสายอากาศคือ Front To Back Ratio ซึ่งจำกัดความคือ อัตราส่วนของ Gain สูงสุดในทิศทางด้านหน้ากับ Gain ในทิศทางด้านหลัง (Back Lobe) ในรูป แสดงสายอากาศที่ถูกออกแบบมาไม่ดีเพราะมีอัตราส่วน Front To Back Ratio เพียง 32 dB เท่านั้นการแพร่กระจายในทิศทางด้านหลังนี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด Noise และ Interference ได้ สัญญาณที่แพร่กระจายในทิศทางด้านหลังของสายอากาศอาจสะท้อนกับพื้นดินและเดินทางถึงเครื่องรับได้ทำให้เกิด Noise ที่ไม่ต้องการ ประการที่ ๒ คือ สถานีวิทยุถ่ายทอด (Repeater) ที่ใช้ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันระหว่างสัญญาณที่ส่งออกไปและรับเข้ามา มีการส่งถ่ายเข้าหากันได้ระหว่างสายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ เนื่องจากปกติแล้วกำลังส่งออกอากาศของเครื่องส่ง จะสูงกว่าสัญญาณที่รับเข้ามาไม่น้อยกว่า 60 dB ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าจะต้องมีการแยกสายอากาศออกจากกัน (อาจจะด้วยระยะทาง หรือ Polarization) เพื่อป้องกันการ Interference



ภาพที่ ๒-๒๑ แสดง Radiation Pattern For A Microwave Antenna

### ๒.๕.๓ Beamwidth

ความกว้างของลำคลื่นก็เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของสายอากาศ ความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศแบบ Parabolic หาได้จากสูตร

$$\phi = \frac{23.7}{fD}$$

$\phi$  = ความกว้างของลำคลื่นที่จุด Half power point ( 3 dB down )

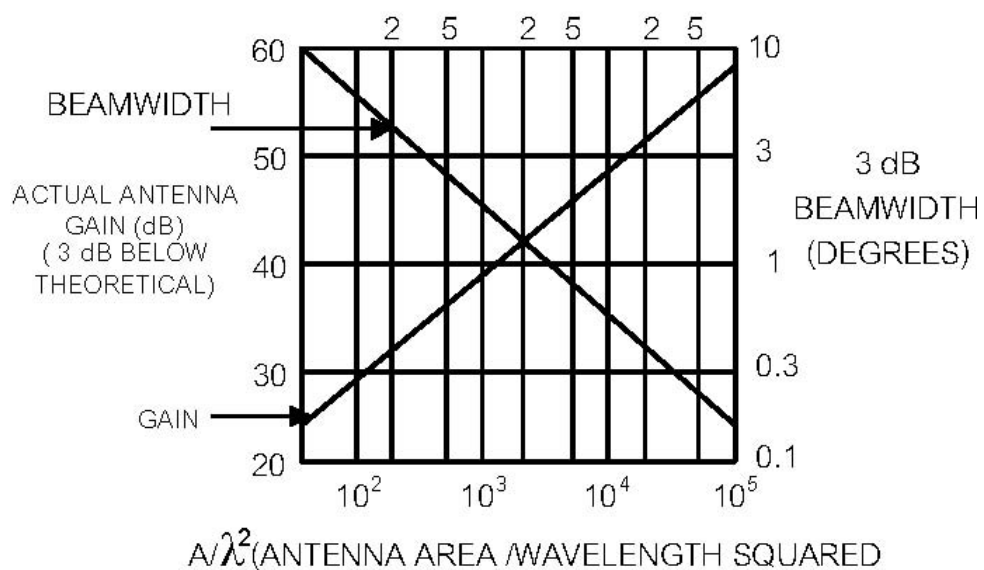
f = ความถี่ (GHz)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจานสายอากาศ (เมตร)

ANTENNA	$A/\lambda^2$		
	4 GHz	6 GHz	11 GHz
10 ft (3.05 m) PARABOLOID	$1.3 \times 10^3$	$2.9 \times 10^3$	$9.8 \times 10^3$
8 ft (2.44 m) PARABOLOID	$8.3 \times 10^2$	$1.9 \times 10^3$	$5.6 \times 10^3$
4 ft (1.22 m) PARABOLOID	$2.1 \times 10^2$	$4.1 \times 10^2$	$1.6 \times 10^3$
8 ft (SQUARE)	$1.1 \times 10^3$	$2.4 \times 10^3$	$8.0 \times 10^3$

ตารางที่ ๒-๑ ความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศแบบ Parabolic

ภาพที่ ๒-๒๒ แสดง Gain และ Beamwidth ของสายอากาศต่อพื้นที่งานสายอากาศ Parabolic ทหารด้วย Square ของ Wavelength ซึ่งจะทำให้การพล็อตเป็นเส้นตรง สังเกตดูจะเห็นว่า Beamwidth ของสายอากาศขนาด ๓ เมตร แคบมาก (น้อยกว่า ๒ องศา) ที่ความถี่ในย่าน 4-6 GHz ถ้างานสายอากาศใหญ่ขึ้น Beamwidth จะแคบลงอีก การรบกวนจากแหล่งอื่นภายนอกและสายอากาศข้างเคียงจะลดลงถ้าใช้สายอากาศที่มีลำคลื่นแคบ



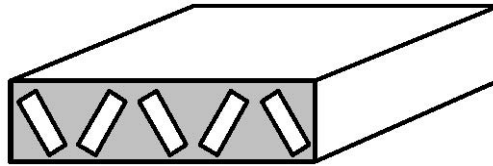
ภาพที่ ๒-๒๒ แสดง Approximate Antenna Gain and Bandwidth

## ๒.๖ โครงสร้างของสายอากาศแบบต่างๆ ที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ

เนื่องจากการส่งกำลังคลื่นจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศจะใช้ท่อนำคลื่นเป็นหลัก ดังนั้นสายอากาศที่สร้างขึ้นจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่นหรือ มีลักษณะใกล้เคียงกับท่อนำคลื่นมาก สายอากาศแบบช่องเปิดที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น แบ่งออกอย่างกว้าง ๆ ได้ ๓ แบบ คือ แบบสลีต แบบฮอร์น และ แบบจานสะท้อน

### ๒.๖.๑ สายอากาศแบบสลีต

จากรูปเป็นโครงสร้างของสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) มีลักษณะเป็นการตัดช่องบนผนังของช่องนำคลื่น ให้เป็นรูแคบๆ ซึ่งจะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่กระจายออกสู่บรรยากาศภายนอกได้ แต่เนื่องจากการเจาะช่องเพียงช่องเดียวนั้น จะทำให้คลื่นสามารถทะลุผ่านไปได้น้อย และจำทำให้อัตราขยายของสายอากาศมีค่าลดต่ำลง ดังนั้นในการใช้งานจริง ๆ เราจึงมักจะเจาะช่องสลีตหลาย ๆ ช่อง



ภาพที่ ๒-๒๓ แสดง โครงสร้างสายอากาศแบบสลีต

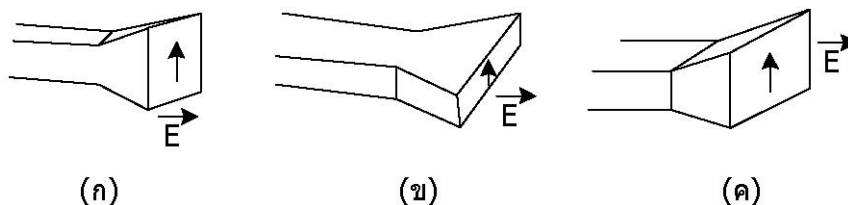
### ๒.๖.๒ สายอากาศแบบฮอร์น

จากรูปเป็นโครงสร้างของสายอากาศแบบฮอร์น ซึ่งอาศัยการลุ่ปลายของท่อนำคลื่น เพื่อให้มีพื้นที่การกระจายคลื่นมากขึ้นเพื่อให้มีอัตราการขยายสูงขึ้น การขยายขนาดของปากฮอร์น สามารถทำได้ ๓ แบบด้วยกันคือ

การขยายในระนาบของสนามไฟฟ้าตามรูป (ก)

การขยายในระนาบของสนามแม่เหล็ก (ข)

การขยายทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก (ค)



ภาพที่ ๒-๒๔ แสดง โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์น

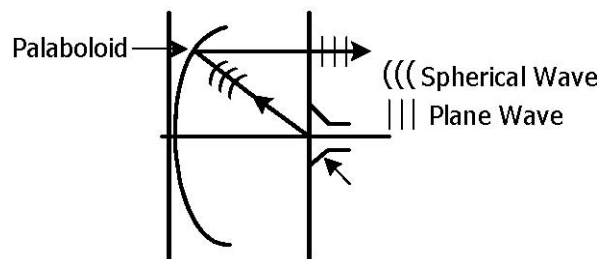
ในแบบที่หนึ่งและสองนั้นเรามักจะเรียกว่า “ฮอร์นรูปพัด” (Sectoral Horn) ส่วนในแบบที่สามนั้นเรียกว่า “ฮอร์นรูปปิรามิด” (Pyramidal Horn)

### ๒.๖.๓ สายอากาศแบบใช้งานสะท้อน

ซึ่งมีหลายแบบด้วยกัน ในแต่ละแบบนี้นี้อาจจะใช้จานสะท้อนเพียงจานเดียว หรือ จะใช้จานสะท้อนสองอันก็ได้ สามารถแบ่งได้เป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

### ๒.๖.๔ สายอากาศแบบพาราโบลา (Paraboloid Antenna)

สายอากาศแบบพาราโบลา มีโครงสร้างเป็นทรงกลม จานสะท้อนเป็นแบบพาราโบลา และมีตัวสะท้อนขั้นต้น (Primary Radiator) วางอยู่ตำแหน่ง ณ จุดโฟกัสของจานพาราโบลา คลื่นที่ออกจากตัวกระจายคลื่นขั้นต้นจะเป็นทรงกลม (Spherical Wave) และเมื่อลำคลื่นสะท้อนที่ผิวของจานจะทำให้คลื่นระนาบ (Plane Wave) ออกมาที่ช่องเปิดของจาน พาราโบลาจึงเท่ากับเป็นการขยายพื้นที่ของจานกระจายคลื่น สายอากาศแบบนี้มีใช้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการ สื่อสาร ไมโครเวฟพื้นดิน หรือใช้รับสัญญาณดาวเทียม ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายและมีอัตราการขยายสูง สำหรับตัวกระจายคลื่นขั้นต้นนั้น ถ้าเป็น ความถี่ย่านไมโครเวฟนั้นก็จะใช้พีดีฮอร์นรูปต่าง ๆ แต่ถ้าเป็น ความถี่ในระดับที่ต่ำกว่า 1 GHz ลงมาจะใช้เป็น สายอากาศแบบยาเกิตโพลแทน

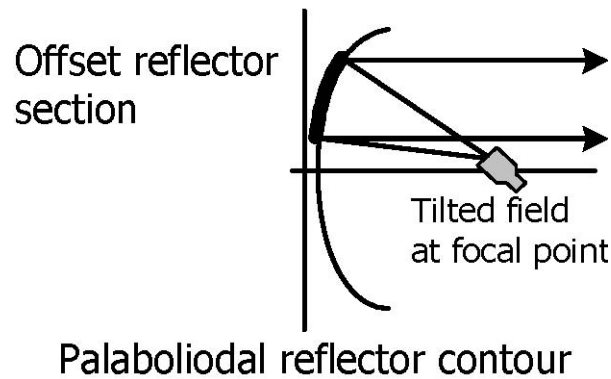


ภาพที่ ๒-๒๕ แสดง สายอากาศแบบพาราโบลา

### ๒.๖.๕ สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลา

สายอากาศแบบนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสายอากาศแบบพาราโบลา แต่ตัวกระจายคลื่นขั้นต้น จะไม่อยู่ตรงกลางของจานสะท้อน และจะอยู่นอกบริเวณทางผ่านของคลื่นจากจานสะท้อน ในโครงสร้างของสายอากาศแบบนี้ คลื่นทรงกลมจากตัวกระจายคลื่นขั้นต้น เมื่อสะท้อนที่จานสะท้อนแล้วจะเปลี่ยนเป็นคลื่นระนาบ สายอากาศแบบนี้มีข้อดีตรงที่พื้นที่จะมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง เพราะไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของสายอากาศไปปิดบังเส้นทางการผ่านของลำคลื่นแต่มีข้อเสียตรงที่ค่าของ Cross Polarization ในทิศทางที่ไม่ใช่ด้านหน้ามีระดับสูง สายอากาศแบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นสายอากาศของสถานีภาคพื้นดินของสถานีดาวเทียม ซึ่งความถี่ที่ใช้อยู่ในย่าน X แบนด์ขึ้นไป เช่น ใช้เป็นสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์จากดาวเทียมโดยตรงสำหรับบ้านเรือนทั่วไป

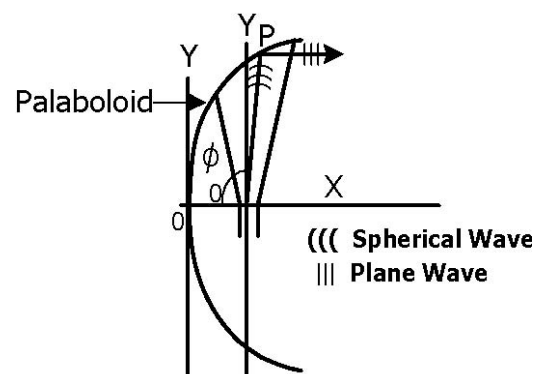




ภาพที่ ๒-๒๖ แสดง สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลอยด์

### ๒.๖.๖ สายอากาศแบบฮอร์นรีเฟรคเตอร์

สายอากาศแบบนี้เป็นสายอากาศแบบออฟเซตชนิดหนึ่ง จากสายอากาศแบบนี้จะให้ระดับของ Polarization ในแนวตั้งฉากที่ไม่ใช่ด้านหน้ามีระดับสูง แต่ก็มีข้อดีคือระดับของไฮดโรลอคอนข้างต่ำซึ่งส่วนมากจะใช้ในการสื่อสารไมโครเวฟภาคพื้นดินและสถานีภาคพื้นดินของการสื่อสารดาวเทียม

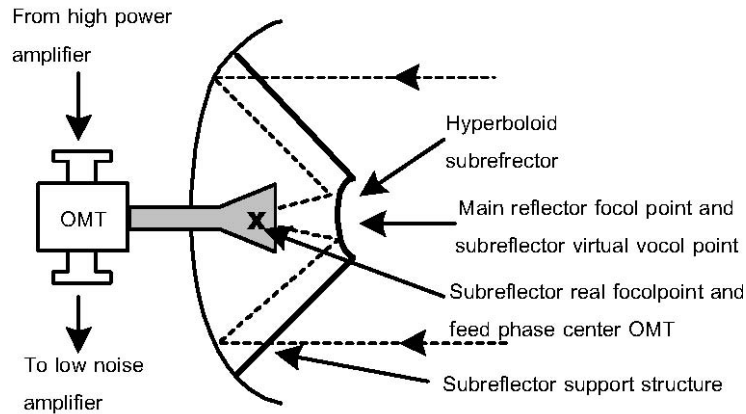


ภาพที่ ๒-๒๗ แสดง สายอากาศแบบฮอร์นรีเฟรคเตอร์

### ๒.๖.๗ สายอากาศแบบแคสซีเกรน (Cassegrain Antenna)

โครงสร้างของสายอากาศแบบนี้ จะมีงานสะท้อน ๒ อัน โดยที่งานสะท้อนหลักจะเป็นรูปพาราโบลอยด์ และงานสะท้อนรองจะเป็นรูปไฮเพอร์โบลอยด์ ลำคลื่นทรงกลมที่ออกจากฟีดฮอร์น เมื่อสะท้อนจากงาน สะท้อนรองจะยังคงเป็นรูปคลื่นทรงกลมอยู่ ฉะนั้นเมื่อลำคลื่นสะท้อนจากงานสะท้อนหลัก จะทำให้ได้คลื่นระนาบออกมาสายอากาศแบบนี้ถูกออกแบบออกมาทำให้

สามารถที่จะวางอุปกรณ์รับส่ง คลื่นไวที่ด้านหลังของจานสะท้อนหลักได้จึงทำให้เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางของในสายอากาศสถานี ภาคพื้นดินดาวเทียม



ภาพที่ ๒-๒๘ แสดง สายอากาศแบบแคสเซ็กเกรน

### ๒.๖.๘ สายอากาศแบบเกรโกเรียน (Gregorian)

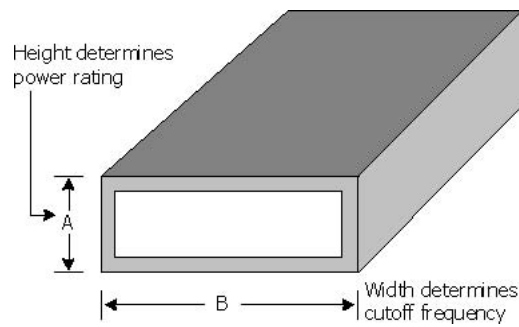
สายอากาศแบบนี้มีโครงสร้างคล้ายกับสายอากาศแบบแคสเซ็กเกรน คือมีจานสะท้อน ๒ อัน จาน สะท้อนหลักเป็นแบบพาราโบลอยด์และจานสะท้อนรองเป็นผิวโค้งรูปวงรี (Ellipsoid) สายอากาศแบบนี้มีลักษณะพิเศษเหมือนกับสายอากาศแบบแคสเซ็กเกรนแต่มีโครงสร้างที่ยู้งยากกว่าจึงไม่เป็นที่นิยม เท่าใดนัก

### ๒.๖.๙ สายส่งกำลัง (WAVEGUIDE)

ปกติสายส่งกำลังจะมีการสูญเสียกำลังเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความถี่ที่ป้อนให้แก่มันสูงขึ้นและโดยเฉพาะกับความถี่ย่านไมโครเวฟด้วยแล้ว ก็ยิ่งจะมีการสูญเสียกำลังเพิ่มสูงขึ้นมากจนยากต่อการที่จะนำสายส่งกำลังแบบธรรมดามาใช้งานได้ นี่ก็คือเหตุผลที่ทำให้ต้องมีการค้นคิดสายส่งกำลังชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อให้เป็นตัวนำกำลังงานไมโครเวฟจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งขึ้น สายส่งกำลังแบบนี้เรียกว่า WAVEGUIDE สายส่งกำลังชนิดนี้จะมีการสูญเสียกำลังสำหรับความถี่ไมโครเวฟน้อยกว่าสายส่งกำลังแบบธรรมดา มาก โดยทั่วไปแล้วสายส่ง กำลังแบบธรรมดาจะเป็นตัวนำกำลังงาน (Energy) แต่สำหรับความถี่ไมโครเวฟนั้นจะมีความยาวคลื่นที่สั้นมากเราจึงมักพูดว่า Wave แทนคำว่า Energy (ศักย์และกระแส) เพราะฉะนั้นเราจึงเรียกตัวนำสัญญาณอันนี้ว่า “WAVEGUIDE”

WAVEGUIDE อาจจะมีลักษณะเป็นท่อกลมหรือท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ข้างในกลวงมีขนาดเฉพาะโครงสร้าง ในทางไฟฟ้าแล้วจะมีความกว้าง (Width) ขนาดที่ใหญ่กว่า  $\lambda/2$  เล็กน้อยและความสูง (Height) จะมีความสูงน้อยกว่า  $\lambda/4$  เล็กน้อย ความสูงจะเป็นตัวกำหนดจำนวนอัตรากำลังที่จะป้อนให้ WAVEGUIDE

ความกว้างจะเป็นตัวกำหนดจุดตัดความถี่ (Cutoff Frequency) ต่ำสุด



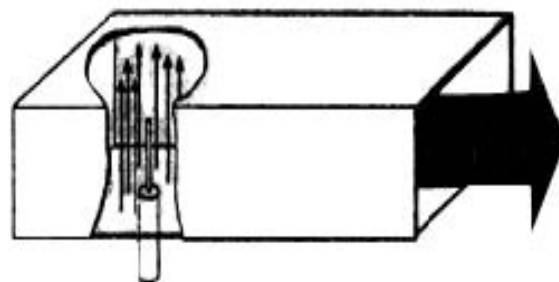
ภาพที่ ๒-๒๙ แสดง ลักษณะของ WAVEGUIDE

จากรูปความสูง จะเป็นตัวกำหนดขนาดของกำลังที่เราสามารถจะป้อนให้แก่ WAVEGUIDE ได้ โดยปราศจากการ Arcing ยิ่งความถี่สูงขึ้นมากเท่าใด เราก็สามารถป้อนกำลังให้ WAVEGUIDE ได้มากขึ้นเท่านั้น

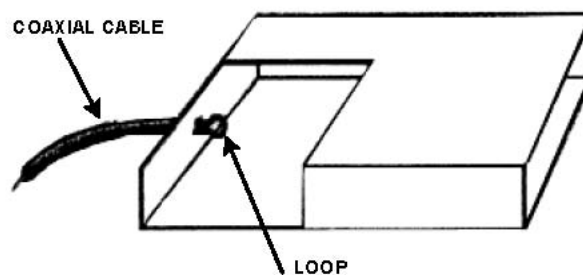
ความกว้างของ WAVEGUIDE จะเป็นตัวกำหนดความถี่ต่ำสุดที่เราสามารถจะป้อนให้มันได้ กล่าวคือ ความยาวคลื่น (Wavelength) ของความถี่ต่ำสุดจะมีค่าเป็นสองเท่าของความกว้างของ WAVEGUIDE

การถ่ายทอดกำลังงานให้แก่ WAVEGUIDE มีหลายวิธี บางวิธีที่จะกล่าวถึงก็คือการใช้ Probe หรือการใช้ Loop

การใช้ Probe Coupling ก็คือการใส่ Probe เข้าไปใน WAVEGUIDE ณ จุดกึ่งกลางของความกว้างโดยมีระยะห่างจากส่วนปลายเท่ากับ  $\lambda/4$  การใส่ Probe เข้าที่จุดนี้ก็เพราะเป็นจุดที่จะให้ E Field สูงสุดรวมทั้ง H Field ตลอดผนังความยาวก็จะมีค่าสูงสุดด้วย



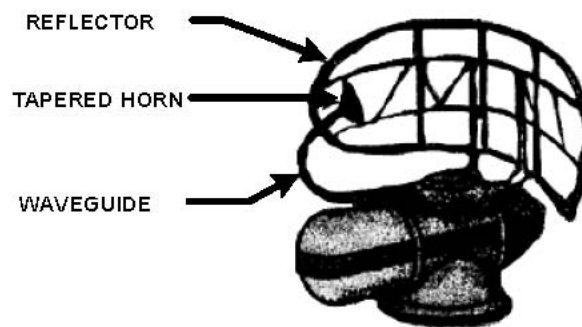
ภาพที่ ๒-๓๐ แสดง การใส่ Probe Coupling ใน WAVEGUIDE



ภาพที่ ๒-๓๑ แสดง การใส่ Loop Coupling ใน WAVEGUIDE

สำหรับการใช้ Loop Coupling ก็คงคล้ายคลึงกันจะแตกต่างกันก็วิธีการเท่านั้น การถ่ายทอดกำลังงานออกจาก WAVEGUIDE จะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับว่า WAVEGUIDE นั้นจะถ่ายทอดให้กับเครื่องมือชนิดใด ตัวอย่างเครื่องมือบางอย่างได้แก่ สายอากาศ (Antenna) เครื่องมือทดสอบ (Test Equipment) และ Dummy Load

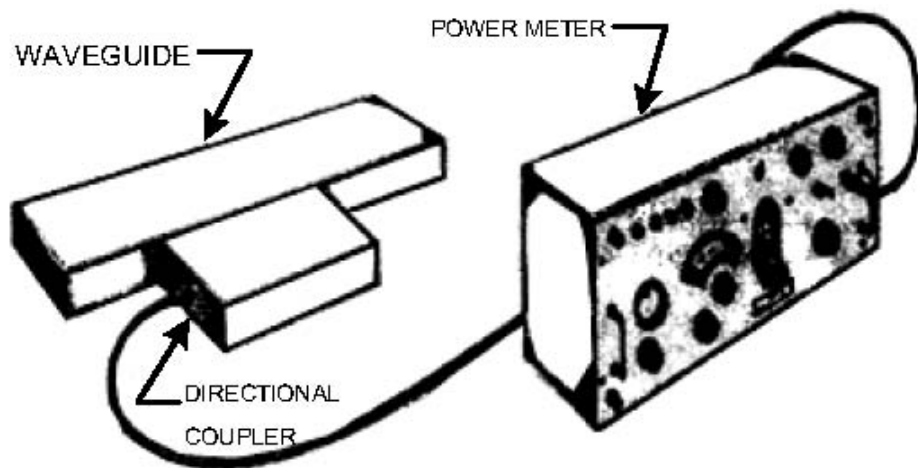
ปกติแล้วจะเป็นการถ่ายทอดกำลังงาน RF ให้แก่สายอากาศเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ก็โดยการป้อนกำลังให้แก่ Reflector โดยเหตุที่ Reflector นับว่าเป็นส่วนสำคัญของสายอากาศ ทั้งนี้ก็เพราะมันทำหน้าที่บังคับกำลังงาน RF ให้เข้าสู่บรรยากาศ จากรูปแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่กำลังงาน RF ถูกป้อนออกจาก WAVEGUIDE ผ่านอากาศให้แก่ Reflector โดยการใช้ Horn



ภาพที่ ๒-๓๒ แสดง WAVEGUIDE Coupled to a Reflector

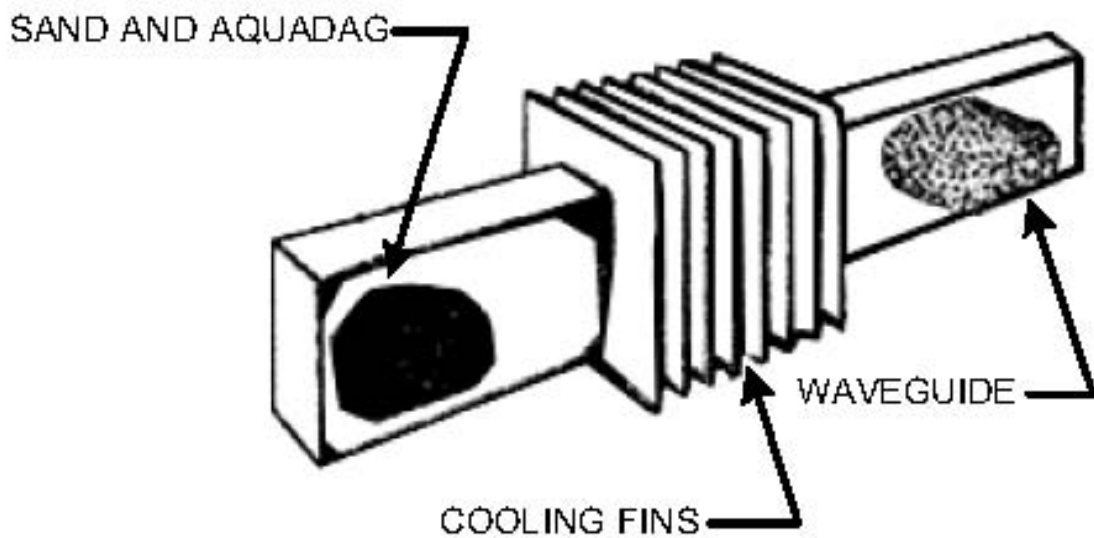
Horn Coupling จากรูปจะเห็นได้ว่า WAVEGUIDE จะมีส่วนปลายเป็นรูป Horn จุดประสงค์ก็คือ ความต้องการ Z- Matching นั้นเอง เพราะเมื่อส่วนปลายของ WAVEGUIDE ขยายกว้างขึ้น ค่า Z ของมันก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น Horn ก็จะทำหน้าที่ Match ค่า Z ของ WAVEGUIDE ที่ต่ำกว่าเข้ากับค่า Z ของอากาศที่สูงกว่านั่นเอง

การป้อนสัญญาณออกจาก WAVEGUIDE ให้กับเครื่องมือทดสอบ กระทำเมื่อเราต้องทำการตรวจสอบภาค RF ของชุดอุปกรณ์ ทั้งนี้โดยการใช้ Directional Coupler สุ่มเอาบางส่วนของสัญญาณจาก WAVEGUIDE ไปให้มิเตอร์ตรวจวัดกำลังงานตามรูป



ภาพที่ ๒-๓๓ แสดง การเชื่อมต่อ WAVEGUIDE เข้ากับ Meter

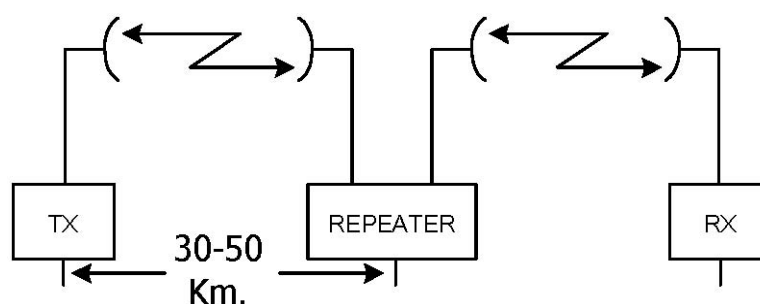
สำหรับการป้อนสัญญาณออกจาก WAVEGUIDE ให้กับ Dummy Load กระทำเมื่อตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ที่ทำงานเต็มที่แต่ไม่มีการออกอากาศ หน้าที่ของ Dummy Load ก็คือการดูดซับเอากำลังงาน RF เอาไว้ที่ตัวมันแทนการออกอากาศไป Dummy Load ที่ใช้กับชุดอุปกรณ์ติดต่อสื่อสารมักจะใช้ Resister หลอดไฟ หรือเพาเวอร์มิเตอร์



ภาพที่ ๒-๓๔ แสดง การใส่ Dummy Load เข้ากับ WAVEGUIDE

### ๓. ระบบการสื่อสารย่านไมโครเวฟ (Microwave Communication System)

ระบบสื่อสารไมโครเวฟนั้นโดยปกติแล้วจะประกอบไปด้วยสถานีต้นทางและสถานีปลายทาง หรือเรียก อีกอย่างหนึ่งว่า (Terminal Station) ในระบบ FM ซึ่งจะมองเห็นกันในระดับสายตา ซึ่งเรียกว่า Line of Sight System แต่การสื่อสารระบบไมโครเวฟนั้นถูกจำกัดไว้ที่ระยะทางที่ไม่ไกลเท่า ไฉนนัก แต่ถ้าหากต้องการเพิ่มระยะทางของการสื่อสารระบบไมโครเวฟให้ไกลออกไปนั้น เราก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสถานีถ่ายทอดกลางทางขึ้นมา (Repeater Station) แต่ทั้งนี้ต้องยึดระบบ Line of Sight เป็นหลัก และอีกระบบหนึ่งของการสื่อสารไมโครเวฟ คือการสื่อสารดาวเทียม ซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อการสื่อสารของนา ๆ ชาติ ที่ปัจจุบันนี้กำลังเป็นที่นิยมกันอย่างมาก

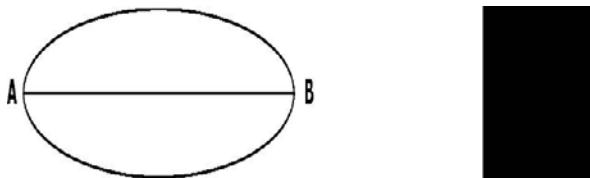


ภาพที่ ๒-๓๕ แสดง รูปแบบเบื้องต้นของการสื่อสารไมโครเวฟ

จากรูปเป็นส่วนประกอบเบื้องต้นของการสื่อสารระบบไมโครเวฟ ซึ่งเรียกว่า Multi Section Radio Relay ที่ใช้เส้นทาง Line of Sight ซึ่งประกอบไปด้วย Terminal Station ๒ สถานีคือ TX Station และ RX Station และอาจจะมีสถานีถ่ายทอดกลางทาง Repeater อีกจำนวนหนึ่งซึ่งอยู่ห่างจาก Terminal Station เป็นระยะทางประมาณ ๓๐-๕๐ กม. เรียกว่า ๑ ช่วง (HOP) ในงานของระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟนั้น ต้องการความเชื่อถือได้สูง เพราะข้อมูลที่เราส่งไปนั้นอาจจะรวมไปถึงข้อมูลที่เป็น Data ซึ่งต้องการความเชื่อถือได้ของระบบสูงมาก ดังนั้นเพื่อความแน่ใจว่าข้อมูลที่เราส่งไปนั้นจะไม่เกิดการสูญหายและข้อมูลนั้นสามารถเดินทางไปถึงสถานีปลายทางครบถ้วนสมบูรณ์ ดังนั้นเราต้องมีการประเมินค่าของการสูญเสียกำลังงาน (Power Loss) ในระบบ ซึ่งในแต่ละระบบจะมี Transmission Loss (การสูญเสียในการส่ง) สูงสุดอยู่ค่าหนึ่งที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ ซึ่งถ้าหากค่า Transmission Loss มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมให้เกิดขึ้นได้แล้ว จะมีผลทำให้คุณภาพในการสื่อสารของระบบลดลง Transmission Loss นี้เป็นผลมาจากองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น การสะท้อนกลับของคลื่น (Reflection) การจางหาย (Fading) การหักเหของคลื่นในชั้นบรรยากาศ (Refraction) และการสะท้อนไปมาของคลื่นตามผิวโลก (Diffraction)

หลักการเบื้องต้นในการประเมินค่าของการสูญเสียในการส่งคลื่นวิทยุย่านไมโครเวฟคือการสูญเสียที่คาดว่าจะเกิดที่ Free Space (บริเวณที่ไม่มีวัตถุอะไรที่จะดูดหรือสะท้อนกำลังของวิทยุเลย) ใน First Fresnel Zone คือ บริเวณที่อยู่ภายในผิวโค้งวงผิวดที่ระยะทางของคลื่นจากจุด A ไปยังจุด B

ที่ผ่านจุดต่าง ๆ บนผิวโค้งและมีความยาวเกินกว่าเส้นตรง AB อยู่  $\frac{1}{2}$  หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เฟรสเนลโซนอันดับที่ ๑”



ภาพที่ ๒-๓๖ แสดง First Fresnel Zone

การสื่อสารไมโครเวฟที่แน่นอนนั้นจำเป็นต้องไม่มีอะไรมาขัดขวางในแนวการมองเห็นระหว่าง ๒ สถานี (TX กับ RX หรือ Terminal กับ Repeater) นอกจากนี้แล้วต้องมีที่ว่างสำหรับ ใน First Fresnel Zone ถ้าหากว่าอยู่ภายใต้สภาพที่กล่าวมาแล้ว สัญญาณจะมีกำลังเกือบจะเท่ากับค่าของกำลังงานใน Free Space ยกเว้นกรณีที่อาจจะมีผลมาจากการสะท้อนจากพื้นดิน และผลจากชั้นบรรยากาศในการใช้งาน การสื่อสารไมโครเวฟแบบ Line of Sight ที่ใช้งานกันจริง ๆ นั้น สัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าค่าของสัญญาณใน Free Space เพราะว่าได้รับผลการกระทบจากหลาย ๆ อย่าง เช่น Atmosphere Antenna Diffraction และ Obstruction Loss ซึ่งสาเหตุเหล่านี้เกิดขึ้น นอกเหนือจากการอ่อนกำลังของสัญญาณใน Free Space ทั้งสิ้น และส่วนที่เรียบของผิวน้ำ ก็สามารถสะท้อนสัญญาณอันดับที่ ๒ (Second Signal) ไปยังสายอากาศของเครื่องรับได้ และถ้าหากสัญญาณอันดับที่ ๒ นี้ เดินทางไปถึงสายอากาศของเครื่องรับแบบต่างเฟสกับ Direct Signal จะทำให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณทั้งสองนั้นคือระดับของสัญญาณที่รับได้จะต่ำลงไป

### ๓.๑ การวางระบบไมโครเวฟ

ข้อมูลเบื้องต้น ก่อนที่จะนำไปสู่ตัวเรื่อง จะได้กล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องที่ควรรู้และเข้าใจก่อน ดังนี้

#### ๓.๒ คลื่นวิทยุ

คุณลักษณะ การเคลื่อนที่ สิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่ทำให้มีผลกระทบต่อ การแพร่กระจายคลื่น

#### ๓.๓ คุณลักษณะของเครื่องมือที่จะนำไปติดตั้ง

ย่านความถี่ กำลังออกอากาศ ความสูงของสายอากาศ ความไวในการรับสัญญาณของเครื่องรับ ฯลฯ การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง ในการส่งคลื่นแบบ Space Wave นี้ มีการสูญเสียพลังงานระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง แบ่งออกได้กว้าง ๆ ๒ ประการคือ

##### ๓.๓.๑ การสูญเสียพลังงานในส่วนประกอบ (Component Loss)

ที่ต่อระหว่างตัวเครื่องกับสายอากาศซึ่งประกอบ ด้วย Wave Guide, RF Filter, Load Isolator, Circulator ซึ่งรวมกันเรียกว่า “Antenna Feeder Loss (AL)”

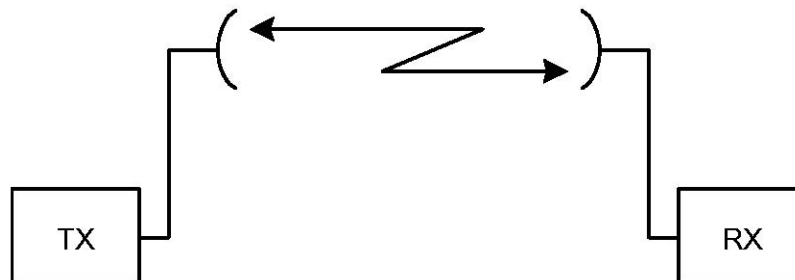
### ๓.๓.๒ การสูญเสียพลังงานในบรรยากาศระหว่างจุดส่งกับจุดรับ (Atmospheric)

ซึ่งประกอบด้วย Free Space Loss (AO), Obstruction Loss (AZ) และ Fading Loss (AF) ซึ่งทั้งหมดนี้เรารวมเรียกว่า “Path Loss หรือ Propagation Loss”

ค่าพลังงานที่สูญเสียไปทั้งหมดนั้น เราสามารถที่จะหามาได้ เช่น Antenna Feeder Loss ซึ่งได้จากข้อมูลที่ได้มาจากบริษัทผู้สร้าง ส่วน Path Loss นั้นจะหาได้จากการคำนวณหรือการทดลอง ซึ่งค่า Path Loss นั้นในแต่ละแห่งจะมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากภูมิประเทศและบรรยากาศที่ไม่เหมือนกัน พลังงานที่สูญเสียไปในบรรยากาศ ตั้งแต่จุดออกของพลังงานคือ Feeder เครื่องส่งไปจนกระทั่งถึงจุดรับ คือ Feeder เครื่องรับ เรารวมเรียกว่า Radio Loss หรือ Transmission Loss ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Transmission Loss} &= \text{Path Loss} - \text{Antenna Gain} \\ &= (\text{AO} + \text{AZ} + \text{AF}) - (\text{G}_1 + \text{G}_2) \end{aligned}$$

เมื่อ  $G_1$  และ  $G_2$  เป็น Gain ของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ



ภาพที่ ๒-๓๗ แสดง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง

พลังงานคลื่นวิทยุเป็นพลังงานในรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเดินทางผ่านอวกาศ (สุญญากาศ) จะมีลักษณะคล้ายกับการเดินทางของแสง ชั้นบรรยากาศและสภาพภูมิประเทศมีผลต่อการสูญเสียพลังงานของคลื่นวิทยุ ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะการสูญเสียที่เกิดจาก Free Space ก่อน

#### ๓.๓.๒.๑ Free Space Loss

คือพลังงานที่สูญเสียไปในการเดินทางระหว่างสอง Isotropic Antenna ใน Free Space ในขณะที่ยังไม่มีอิทธิพลของชั้นบรรยากาศและภูมิประเทศเข้ามาเกี่ยวข้อง

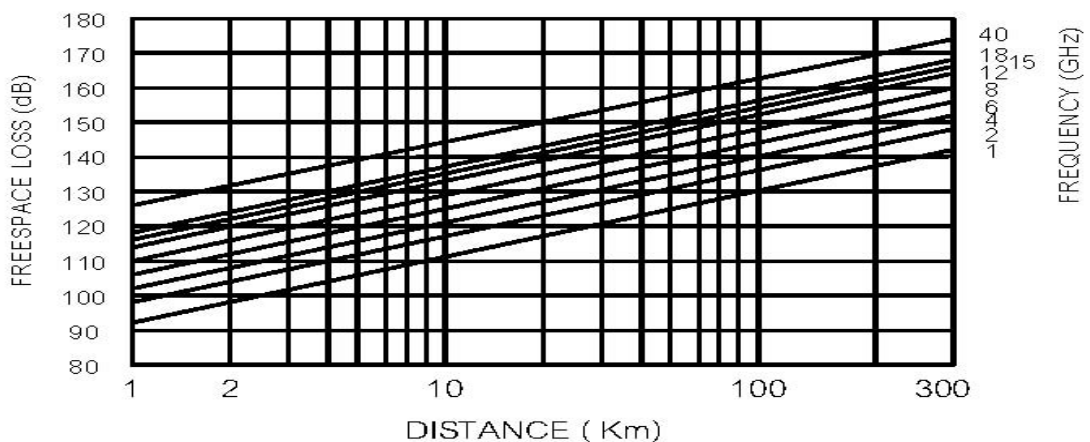


### ๓.๓.๒.๒ Isotropic Antenna

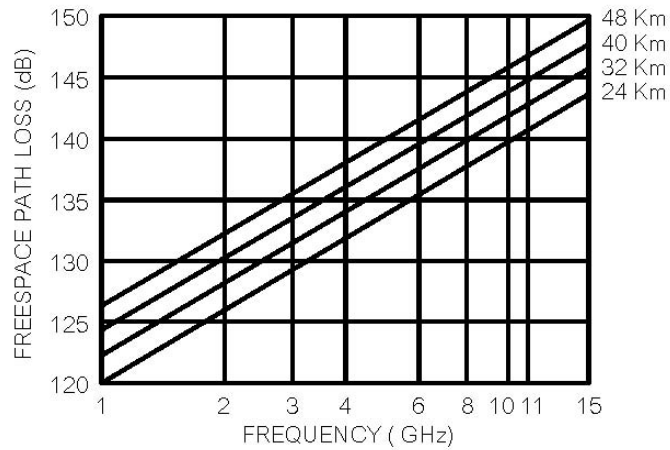
คือ สายอากาศที่มีพลังงานแพร่กระจายออกจากแหล่งเดียวกันเท่ากันทุกทิศทาง เรียกว่า Omni Directional ใช้เป็นทฤษฎีการคำนวณ แต่ในความเป็นจริง Isotropic Antenna เป็นสายอากาศที่ขาดประสิทธิภาพเนื่องจากมีความสูญเสียเปล่าของพลังงานที่กระจายออกรอบทิศทาง ในทางปฏิบัติเราต้องการสายอากาศที่มีการบังคับให้คลื่นวิทยุเดินทางในทิศทางเดียว (Directional) ยิ่งลำคลื่นเล็กเท่าใดก็ยิ่งได้ทิศทางที่แคบลง และได้ Gain สูงขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงพลังงานคลื่นวิทยุที่ออกมาจาก Isotropic Antenna และแพร่กระจายออกทุกทิศทางไปยังพื้นที่ที่มีระยะทางเพิ่มขึ้น เราสามารถเปรียบเทียบได้กับพื้นที่หน้าตัดของลูกโป่งที่ถูกเป่าให้พองเต็มที่ พลังงานจะสูญเสียเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่พื้นที่หน้าเครื่อง (Wave Front) แผ่กว้างขึ้น และสายอากาศทางด้านรับจะรับพลังงานคลื่นวิทยุได้เพียงส่วนน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด เราสามารถคำนวณหาค่าของ Free space loss ได้จากสูตร

$$F_s = 92.4 + 20 \text{ Log}_{10} F + 20 \text{ Log}_{10} D$$

( ถ้า d มีหน่วยเป็น ไมล์ ให้เปลี่ยน ๙๒.๔ เป็น ๙๖.๖ ) จากสูตรนี้สามารถแสดงเป็นกราฟได้ตามรูป แสดงถึงการพล็อต Free Space Loss ที่ระยะต่าง ๆ กัน เช่น ความถี่ 2 GHz ระยะทางประมาณ ๔๘ กิโลเมตร จะมี Free Space Loss เท่ากับ 132 dB ในขณะที่ความถี่ 12 GHz ที่ระยะทางเดียวกันจะมี Free Space Loss เท่ากับ 148 dB แสดงให้เห็นว่าพลังงานจะถูกลดทอน (Attenuate) เป็น จำนวนมาก ถ้าที่สายอากาศทางส่งมีกำลังออกอากาศ 1 Watt ที่สายอากาศทางด้านรับ จะรับ Power ได้เพียง 10-13 Watt เท่านั้น ตัวเลขนี้ได้จากกรณีที่ใช้ Isotropic Antenna ทั้ง ๒ ด้านที่เครื่องส่งและเครื่องรับ แต่ในการสื่อสารที่ใช้ความถี่ไมโครเวฟ สายอากาศแบบ Directional Antenna ที่มี Gain สูงประมาณ 40 dB พลังงานที่รับได้จะถูกชดเชยให้สูงขึ้นได้ถึง 10-5 Watt ในรูปที่ ๓-๔๐ แสดงกราฟที่ได้จากการ พล็อต Free Space Loss ที่เพิ่มขึ้นตามระยะทางของแต่ละความถี่



ภาพที่ ๒-๓๘ แสดง Free Space Loss ระหว่างสายอากาศแบบ Isotropic



ภาพที่ ๒-๓๙ แสดง Free Space Loss ต่อความถี่และระยะทาง

การที่จะใช้สูตรนี้ได้มันต้องแน่ใจว่าระหว่างสายอากาศส่งและรับจะต้องไม่มีอะไรขวางกันเป็น Free Space จริง ๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วอาจมีสิ่งกีดขวางได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องอยู่ในเงื่อนไขดังต่อไปนี้

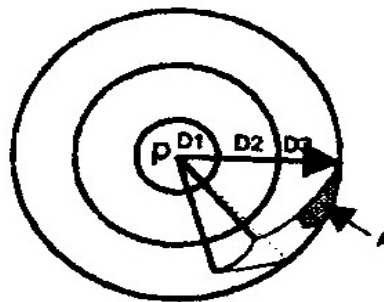
๑ ไม่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่บังคลื่นในระดับสายตา เช่น ภูเขา ตึก ฯลฯ ถ้าหากเป็นเสาขนาดเล็กระยะไกลก็ไม่มีปัญหาอะไร

๒ จะต้องไม่มี Alternate Transmission Path อันเนื่องมาจากการ Refracted

๓ ชั้นบรรยากาศจะต้องมี Index of Refracted คงที่เพื่อไม่ให้คลื่นความถี่ที่ใช้เกิดการโค้งงอหรือหักเห

๔ ชั้นบรรยากาศจะต้องไม่ Absorb Energy ของคลื่นวิทยุที่ใช้

(หมายเหตุ ข้อ ๒, ๓, ๔ นั้นหมายถึง สภาพของบรรยากาศจะต้องเป็นปกติคือ ไม่นำการ Refract หรือการ Absorb ที่เกินสภาพที่แท้จริงมาคิด ) เพื่อความเข้าใจในเรื่อง Free Space Loss จึงขออธิบายจากรูปที่แสดงไว้ Antenna ที่แสดงไว้ในรูปนั้นเป็นแบบ Isotropic Antenna หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Unipole



ภาพที่ ๒-๔๐ แสดง การกระจายคลื่นของ Isotropic Antenna

คุณลักษณะของ Isotropic Antenna คือ สามารถแพร่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุได้เท่ากันในทุกทิศทาง เป็น Antenna ที่สมมติขึ้น เพื่อใช้เป็น Reference ในการหา Antenna Gain เท่านั้น เพราะตามความเป็นจริง แล้วไม่มี Antenna ชนิดใดที่แพร่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุด้วยความเข้มของสัญญาณที่เท่ากันในทุกทิศทาง

จากรูป P เป็นจุดศูนย์กลาง D เป็นระยะทาง A เป็นพื้นที่ จากรูปทรงกลมจะเห็นว่า เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น พื้นที่ก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่เพิ่มขึ้นคลื่นก็กระจายมากขึ้น เพื่อให้เต็มพื้นที่นั้น ฉะนั้นความเข้มของสัญญาณก็ อ่อนลง คือ ลักษณะของ Loss นั่นเอง หรือพูดอีกอย่างหนึ่งก็คือ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น การแพร่กระจายคลื่นจะ ผ่านอากาศที่มีปริมาตรมากขึ้น ฉะนั้น Loss จึงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

ตัวอย่าง ในการคำนวณ Free Space Loss จากระยะทางระหว่างสองสถานี 160 Km ความถี่ 1,000 MHz

$$\text{จากสูตร} \quad AO = 32.44 + 20 \text{ Log } F + 20 \text{ Log } D$$

$$\text{จากโจทย์} \quad D = 160 \text{ Km, } F = 1000 \text{ MHz}$$

$$\text{แทนค่า} \quad AO = 32.44 + 20 \text{ Log } 160 + 20 \text{ Log } 1000$$

$$(\text{Log } 160 = 2.2, \text{ Log } 1000 = 3)$$

$$AO = 32.44 (20 \times 2.2) + (20 \times 3)$$

$$= 32.44 + 44 + 60$$

$$= 136.44 \quad \text{เพราะฉะนั้น } AO = 136.44 \text{ dB}$$

นั่นหมายความว่า Output จากสายอากาศของเครื่องรับจะต่ำถึง 136.44 dB จาก Power Input ของสายอากาศของเครื่องส่ง เนื่องจากสาเหตุ Free Space Loss เพียงอย่างเดียว Free Space Loss ที่คำนวณได้นี้เป็น Basic Loss ทัว ๆ ไป ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการคำนวณประเภท Line of Sight แต่ถ้าหากเป็นวิทยุระบบอื่น เช่น หากที่ใช้ Ground Wave, Sky Wave หรือระบบ Tropo จะมี Loss เนื่องจากสาเหตุอื่นเพิ่มเข้ามาด้วย

สำหรับระบบ Microwave นั้น ตลอดเส้นทางระหว่างสถานีส่งและสถานีรับจะต้องเป็น Free Space จริง ๆ จึงจะไม่มี Loss ฉะนั้นเพื่อให้เป็นลักษณะของ Free Space จึงจำเป็นต้องยกระดับขึ้นเพื่อให้ First Fresnel Zone พื้นสิ่งกีดขวาง ถ้ามีความจำเป็นจริง ๆ จะยอมให้มีสิ่งกีดขวางยื่นเข้าไปใน First Fresnel Zone ได้ ปกติแล้ว จะใช้ 0.6 First Fresnel Zone สำหรับ 4/3 Earth Profile Paper สิ่งที่ต้องระวังคือ สิ่งกีดขวางตามเส้นทางของ Transmission Path จะต้องไม่สูงหรือยื่นเข้าไปในรูป วงรี (Ellipsoid Formed) ซึ่งเราเรียกว่าเป็น First Fresnel Zone เกินกว่าที่กำหนดตามที่กล่าวข้างต้น (สูตรนี้ใช้เฉพาะระบบ Analog เท่านั้น ถ้าเป็นระบบ Digital) จะไม่ยอมให้มีสิ่งกีดขวางยื่นเข้าไปได้เลย คือจะต้องยก First Fresnel Zone ให้พื้นสิ่งกีดขวางทั้งหมด อย่างไรก็ตามการที่จะรู้ว่า ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่าง Path Transmission จะมีขนาดเท่าใดนั้น มีสูตรคำนวณดังนี้

$$Fr = 2,280 \sqrt{\frac{D_1 \times D_2}{F (D_1 + D_2)}}$$

โดยที่ Fr เป็นรัศมี Fresnel Zone หน่วยเป็นฟุต

D1 เป็นระยะทางจากสถานีไปถึงสิ่งกีดขวาง หน่วยเป็นไมล์

D2 เป็นระยะทางจากสิ่งกีดขวาง ไปถึงสถานีปลายทาง หน่วยเป็นไมล์

F เป็นความถี่ใช้งาน หน่วยเป็น MHz

หรือ

$$Fr = \sqrt{\lambda \frac{(D_1 \times D_2)}{D_3}}$$

โดยที่ Fr เป็นรัศมี Fresnel Zone หน่วยเป็นฟุต

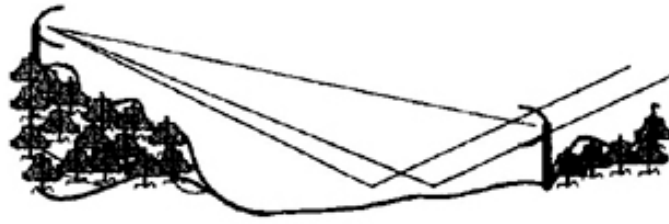
D1 เป็นระยะทางจากสถานีส่งถึงสิ่งกีดขวาง หน่วยเป็นเมตร

D2 เป็นระยะทางจากสิ่งกีดขวางถึงสถานีรับ หน่วยเป็นเมตร

D3 เป็นระยะทางระหว่างสถานีส่งถึงสถานีรับ

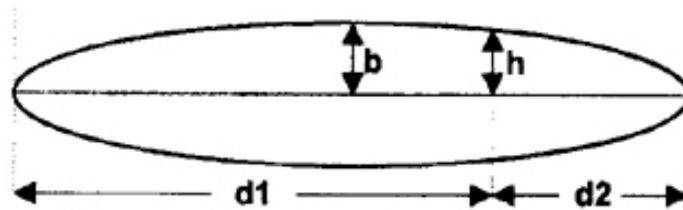
$\lambda$  เป็นความยาวคลื่น หน่วยเป็น เมตร

การติดต่อสื่อสารในทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไป จะใช้ First Fresnel Zone เพราะรับสัญญาณในการติดต่อได้ดีที่สุด แต่ถ้าหากสัญญาณที่ออกไปมีความสูง (หมายถึง สูงจากพื้นดิน) มากเกินไป คือเกินกว่า First Fresnel Zone ก็จะทำให้เกิด Earth Reflected Signal เนื่องจากระยะทางเดินของสัญญาณไม่เท่ากัน สัญญาณรับได้ที่เครื่องรับจะต่างเฟสกัน เป็นเหตุให้รับสัญญาณได้ชัดและจางหายเป็นช่วง ๆ หรือบางครั้งรับไม่ได้เลย จากการทดลองและการปฏิบัตินั้นเป็นที่ยอมรับกันว่าการใช้ First Fresnel Zone นั้นดีที่สุด เพราะถ้าเรายกสายอากาศให้สูงมากก็จะเกิดการต่างเฟสของสัญญาณดังที่กล่าวมาแล้ว คำถามอาจมีว่า ระหว่างภูเขาสูงสองลูก ซึ่งเราจำเป็นต้องตั้งสถานีนี้ระยะจากพื้นดินจะต้องสูงกว่า First Fresnel Zone จะทำอย่างไร คำตอบก็คือ จะต้องตั้งสถานีระหว่างภูเขานั้นเสียก่อน ดังแสดงไว้ในรูปเป็นลักษณะของระบบ High Low Microwave System



ภาพที่ ๒-๔๑ แสดง การตั้งขั้ววิทยุไมโครเวฟในที่สูงและต่ำ  
 เส้นทางบางแห่งอุณหภูมิของบรรยากาศเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และรวดเร็วมากเช่น เหนือ  
 พื้นน้ำ หรือบริเวณเรียบชายฝั่งเมื่อเป็นเช่นนี้ สัญญาณจะเกิดการหักเห การที่จะให้รับสัญญาณได้ดี  
 จะต้องใช้ Diversity System

หมายเหตุ การหา Fresnel Zone



ภาพที่ ๒-๔๒ แสดง Ellipsoid ของ First Fresnel Zone  
 จากรูปเราสามารถหาความสูงของวงรี (Ellipsoid) ได้ ณ ระยะต่าง ๆ อีกวิธีหนึ่ง จากสูตรคือ

$$h = 72.1 \times \sqrt{\frac{D_1 \times D_2}{F \times D}}$$

หรือ

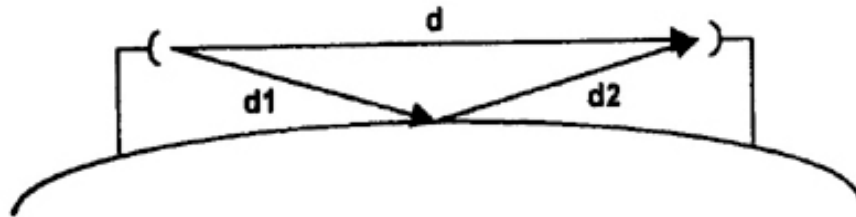
$$h = 547.66 \times \sqrt{\frac{D_1 \times D_2}{F \times D}}$$

โดยที่ F = GHz

D1, D2, D = ไมล์

### ๓.๓.๓ Ground Reflection Obstruction และผลกระทบ

ในกรณีส่งคลื่นแบบ Space Wave นี้ ค่า Loss ที่เกิดขึ้นนอกจาก Free Space Loss แล้ว ยังมี Loss จากอย่างอื่นอีก เช่น เนื่องจากการสะท้อนและการหักเหของคลื่นระหว่างเส้นทางนั้น ๆ ถ้า Line of Sight ระหว่างสายอากาศไม่มีสิ่งกีดขวางเลย การสะท้อนจะเกิดขึ้นได้บนผิวเรียบ ผิวน้ำหรือผิวน้ำราบ ดังนั้นสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจะมี ๒ ทางด้วยกันคือ ทางตรง และ ทางสะท้อน



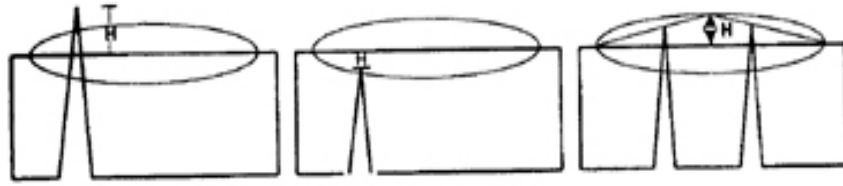
ภาพที่ ๒-๔๓ แสดง ระดับสัญญาณอันอาจเกิดจากการสะท้อน

จากรูปแสดงการรับสัญญาณอันอาจเกิดขึ้นได้จากการสะท้อน คลื่นที่ได้จากการสะท้อน นี้ จะมี Phase ต่างกันกับคลื่นในแนวตรง ซึ่งจะประกอบด้วย ๑๘๐ องศา Phase Shift รวมกันได้ ๓๖๐ องศา คลื่นทั้งสองที่เดินทางถึงเครื่องรับพร้อมกันจะเสริมกัน แต่ถ้าหากผลรวมได้ ๓๖๐ องศา + ๑๘๐ องศา คลื่นทั้งสองจะหักล้างกัน

สำหรับ Obstruction และผลกระทบของมันนั้น มีข้อพิจารณาคือ ในการสร้างข่ายไมโครเวฟ ซึ่งสัญญาณมีการแพร่กระจายไปในบรรยากาศนั้นจะต้องคำนึงถึง Fresnel Zone เป็นหลักโดยเฉพาะ First Zone ส่วนมากจะให้ First Zone สัมผัสกับพื้นผิวดินหรือป่าไม้พอดิ เพื่อให้ได้ค่าระดับสัญญาณสูงสุด และเพื่อตัด Zone อื่น ๆ ออกไป อย่างไรก็ตามในบางแห่งสภาพภูมิประเทศจะสูง ๆ ต่ำ ๆ ไม่สามารถจะรับและส่งสัญญาณเต็ม First Fresnel Zone ได้ จึงต้องยอมให้มีการบังสัญญาณบางส่วน ของ Zone บ้าง สัญญาณที่ได้รับจึงต่ำลง นั่นก็คือเกิดการ Loss เพิ่มขึ้นเรียกว่า Obstruction Loss ซึ่งนอกจาก Obstruction Loss จะขึ้นอยู่กับพื้นที่แล้วยังขึ้นอยู่กับชั้นบรรยากาศชั่วขณะอีกด้วย ค่าที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ใน First Fresnel Zone จะต้อง มี Path Clearance สูงกว่า ๖๐ % ขึ้นไป สิ่งกีดขวางต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิด Obstruction Loss แบ่งออกกว้าง ๆ ได้ ๒ อย่าง คือ

สิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ เช่น ต้นไม้ ตึก หรือสิ่งก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ สิ่งกีดขวางที่เป็นยอดแหลม เช่น ยอดเขา

ค่า Loss ที่เกิดขึ้นกรณีจากสิ่งกีดขวางเหล่านี้ จะมีค่ามากหรือน้อยนั้น จะขึ้นอยู่กับความสูงของสิ่งกีดขวางที่ เข้า มาบัง First Fresnel Zone และระยะที่ใช้งานด้วย ซึ่งค่า Loss ที่เกิดขึ้นจาก Obstruction นี้ สามารถจะหาได้จากการใช้กราฟ Nomogram



ภาพที่ ๒-๔๔ แสดง การเกิด Obstruction

### ๓.๓.๔ Atmosphere and Their Refract

จากการที่กล่าวมาเป็นการเคลื่อนที่ในสภาพที่ไม่มีสิ่งใดมาทำให้แนวทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปจากแนวเส้นตรง คือคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่สมบูรณ์ มีค่า Refraction Index คงที่ตลอด และไม่มีสิ่งใดมาดูดกลืนพลังงานไป แต่ในทางปฏิบัติแล้ว บรรยากาศที่มาห่อหุ้มโลกจะมีความหนาแน่นไม่เท่ากันทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิความชื้น และความกดอากาศจะแตกต่างกันในแต่ละสถานี ทำให้ค่า Refractive Index ไม่คงที่ โดยเฉพาะตามความสูงจากพื้นโลกโดยทั่วไปแล้ว ความหนาแน่นของบรรยากาศจะค่อย ๆ ลดลงตามความสูงจากพื้นโลก ทำให้แนวทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เกิดการหักเหตามระยะทาง ผลที่ได้ก็คือ ถ้าคลื่นจะเป็นเส้นโค้งไปตามแนวโค้งของพื้นโลก จากจุดส่งไปยังจุดรับ



ภาพที่ ๒-๔๕ แสดง แนวทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในลักษณะ Line of Sight

จากที่กล่าวมา Refractive Index ในแต่ละแห่งอาจจะไม่เท่ากัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิความชื้น อนุภาคน้ำและความกดอากาศ ซึ่งค่าเหล่านี้ อาจจะไม่เท่ากันตามความสูงจากพื้นโลกแต่ในบรรยากาศ มาตรฐานทั่วไป จะกำหนดให้ค่า Refractive Index  $(k) = 4/3$

### ๓.๓.๕ การจางหาย

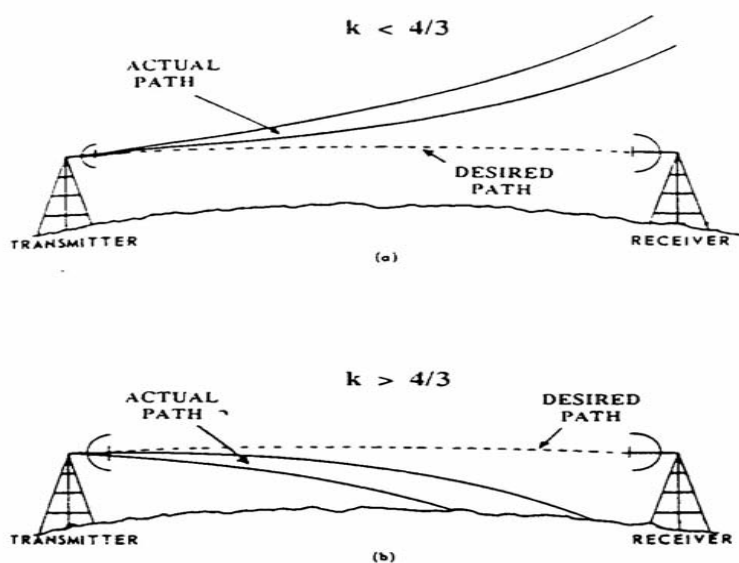
การจางหาย (Fading) ของคลื่นวิทยุที่สำคัญมี ๒ แบบคือ Flat Fading และ Frequency selective Fading การจางหายทั้ง ๒ แบบ ไม่มีแบบใดเลยที่สามารถพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำว่าจะเกิดขึ้นเมื่อใด เนื่องจากแต่ละแบบต่างก็เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ เช่นเดียวกันประสบการณ์แสดงให้เห็นว่าสภาพภูมิอากาศ (Climate) และภูมิประเทศมีส่วนมากกว่าปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดการจางหายของคลื่นวิทยุ และในกรณีการจางหายของคลื่นวิทยุจะต้องใช้สถิติ

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือต้องใช้ทฤษฎีความเป็นไปได้เพื่อหาว่าภายใน ๑ ปี การจางหายของคลื่นวิทยุ ทำให้การติดต่อสื่อสารขัดข้องเป็นจำนวนกี่เปอร์เซ็นต์ ในบางพื้นที่จำนวนเปอร์เซ็นต์นี้อาจจะสูงเกินกว่าที่จะยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามอาจยังมีเทคนิคที่สามารถแก้ไขมิให้ขาดการติดต่อสื่อสารจากการจางหายของคลื่นวิทยุได้

### ๓.๓.๖ Flat Fading

ตามที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้วว่า Ducting และ Rain Attenuation ทำให้เกิด Flat Fading เนื่องจากการโค้งงอของลำคลื่น ลำคลื่นของวิทยุที่ได้รับอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง Refractive Index (Dielectric Constant) ของอากาศเมื่อค่า  $k = \epsilon/\epsilon_0$  ที่บรรยากาศมีสภาพเป็น Standard เครื่องรับ จะรับสัญญาณที่ถูกส่งจากเครื่องส่งได้เต็มที่ ต่อมาเมื่อดัชนีการหักเหของบรรยากาศได้เปลี่ยนแปลง เป็นอย่างอื่นนอกเหนือจาก Standard ลำคลื่นจะโค้งขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับค่า K-Factor เมื่อค่า  $k$  น้อยกว่า  $\epsilon/\epsilon_0$  ที่เรียกว่า Subrefractive หรือ Substandard จะทำให้ลำคลื่นโค้งขึ้น และเมื่อค่า  $k$  มากกว่า  $\epsilon/\epsilon_0$  ที่เรียกว่า Superrefractive หรือ Superstandard ก็จะทำให้ลำคลื่นโค้งลง การโค้งทั้ง ๒ แบบของลำคลื่นวิทยุเป็นสาเหตุทำให้ความรุนแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำลงจนถึงจุดที่ทำการติดต่อสื่อสารต้องชะงักลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความมากน้อยในการโค้งงอของลำคลื่น แต่ส่วนใหญ่ที่มักเกิดคือ การโค้งขึ้น ของลำคลื่นวิทยุเหนือสายอากาศ

เมื่อคลื่นวิทยุโค้งลงหากลำคลื่นไม่โค้งมากนักพลังงานบางส่วนจากลำคลื่นสามารถสะท้อนจาก สิ่งกีดขวางและไปรบกวนกับพลังงานที่เดินทางเป็นเส้นตรง การ Fading นี้ก็จะกลายเป็น Frequency Selective ในทำนองเดียวกันถ้าคลื่นวิทยุโค้งขึ้นและไม่มีพลังงานอื่นใดเดินทางถึงสายอากาศเครื่องรับนอกเหนือจากพลังงานที่เดินทางเป็นเส้นตรง เนื่องจากคลื่นวิทยุได้โค้งออกจากเครื่องรับ การจางหายของเครื่องรับจะเป็น Flat Fading

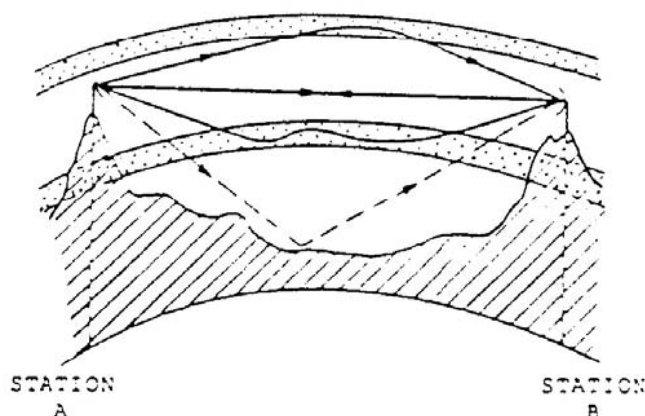


ภาพที่ ๒-๔๖ แสดง A) Inverse Bending, Substandard Conditions  
B) Positive Bending, Superstandard Condition



### ๓.๓.๗ Frequency Selective Fading

Atmospheric Multipath Fading เมื่อชั้นบรรยากาศที่แบ่งออกเป็นชั้น ๆ มีความหนาแน่นแตกต่างกันอาจเกิด Ducting ได้ ถ้าส่วนประกอบของชั้นบรรยากาศไม่สามารถหักคลื่นวิทยุให้อยู่ในท่อได้แต่กลับหักเหลงคลื่นวิทยุก็สามารถส่งถึงสายอากาศเครื่องรับได้โดยทางอื่น นอกจากทางที่เป็นเส้นตรง การเดินทางหลายเส้น ทางแล้วมาบรรจบกันที่สายอากาศเครื่องรับเช่นนี้ ก่อให้เกิดการจางหายของคลื่นวิทยุได้ เนื่องจากโอกาสที่คลื่น ๒ คลื่นจะมี Phase เดียวกันนั้นค่อนข้างยาก ถ้าคลื่นทั้งสองถึงสายอากาศโดยมี Phase ที่แตกต่างกันสิ้นเชิง (๑๘๐ องศา) ก็อาจทำให้พลังงานที่รับได้ตกลงต่ำกว่า 30 dB หรือมากกว่าเป็นระยะเวลาหลายวินาทีได้



ภาพที่ ๒-๔๗ แสดง Mechanics Multipath Fading

### ๓.๓.๘ Ground Reflection Multipath Fading

การสะท้อนจากพื้นดินอาจก่อให้เกิดการรับสัญญาณจากหลายเส้นทาง (Multipath) และทำให้เกิดการจางหายได้ถ้าช่วงคลื่นที่รับได้ต่าง Phase กัน ถ้าการสะท้อนคลื่นจากพื้นดิน และจากเส้นทางอื่นจากชั้นบรรยากาศเกิดขึ้นพร้อมกัน การจางหายอาจมากถึง 40 dB ถ้าไม่หาทางป้องกันไว้ การติดต่อสื่อสารก็จะขาดลงได้ Multipath Fading ก็คือ Frequency Selective ที่มีการหักล้างกันของ Phase เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นเดินทางถึงสายอากาศเครื่องรับมีช่วงคลื่นต่างกัน ๑/๒ ช่วงคลื่น และเพราะว่าขนาดของคลื่นช่วงคลื่นแตกต่างกันอย่างมากระหว่างความถี่ 1 ถึง 12 GHz ดังนั้นสภาพการจางหายที่เกิดขึ้นที่ความถี่หนึ่งอาจจะไม่เกิดที่อีกความถี่หนึ่ง

### ๓.๓.๙ Factor Affecting Multipath Fading (ปัจจัยที่กระทบกระเทือนต่อ Multipath Fading)

จากประสบการณ์พบว่าในเส้นทางการติดต่อสื่อสารในช่วงที่ระยะทางของ Hop เกิน ๔๐ กิโลเมตร ที่ความถี่สูงเกิน 890 MHz จะได้รับผลของ Multipath Fading ที่เกิดจากชั้นบรรยากาศจะเกิดขึ้นมาในช่วงฤดูร้อน โดยเฉพาะเมื่ออากาศร้อนและลมสงบ และเกิดบ่อยครั้งเมื่อภายหลังดวงอาทิตย์ตกดินและหลังดวงอาทิตย์ขึ้นไม่นาน ในช่วงระหว่างกลางวันกระแสมร้อนจะ

กระทบกับบรรยากาศทำให้ไม่สามารถก่อตัว เป็นชั้น ๆ ได้ จึงไม่มีปัญหาต่อการจางหายของคลื่นวิทยุ ในบางพื้นที่แต่ละปีจะมีระยะเวลาที่แน่นอนที่สภาพบรรยากาศก่อให้เกิด Multipath Fading ทุกวัน กล่าวโดยรวม Frequency Selective Fading คือ Fading ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว “Fast Fading” ช่วงที่เกิด Fade 20 dB โดยเฉลี่ยคือ ๔๐ วินาที และ 40 dB โดยเฉลี่ย ๔ วินาทีต่อวัน ถ้าช่วงการติดต่อสื่อสารมีระยะทางไกลขึ้น โอกาสที่คลื่นวิทยุจะเดินทางหลายเส้นทางสู่สายอากาศเครื่องรับก็จะ มีมากขึ้น สำหรับช่วงการติดต่อสื่อสารในทะเลทราย หรือเหนือพื้นน้ำ จำเป็นต้องลดระยะทางของช่วง การติดต่อสื่อสารลงเหลือ ๓๕ กิโลเมตร หรือน้อยกว่าเพื่อหลีกเลี่ยง Multipath Fading ที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้น

### ๓.๓.๑๐ การแก้ไขการจางหายของสัญญาณ

เมื่อมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้น ทำให้ระดับของสัญญาณที่เข้าเครื่องรับ ลดลงและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาที่มีสัญญาณรบกวนมากขึ้น บางครั้งอาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลย การ จางหายของสัญญาณส่วนมากจะเป็นแบบ Multipath Fading ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและไม่สามารถ แก้ไขได้ หลักการแก้ไข สามารถกระทำได้โดยการพยายามทำให้ระดับของสัญญาณที่เครื่องรับสูงก่อน ซึ่งจะช่วยให้เครื่องรับสามารถทำงานได้ตลอดเวลา ซึ่งสามารถกระทำดังต่อไปนี้

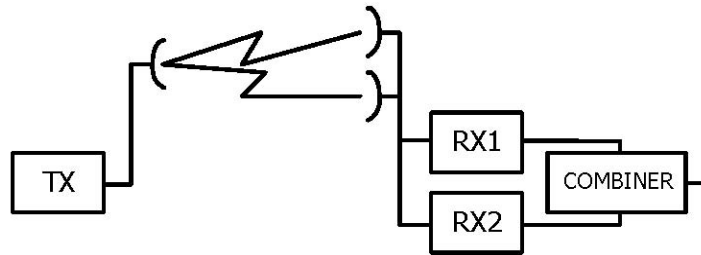
- เพิ่มกำลังเครื่องส่งให้สูงขึ้น
- ลด Transmission Line ลง
- เพิ่มแกนของสายอากาศขึ้น
- ลดระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่งลง
- Diversity Transmission

การแก้ไขโดยการเพิ่มกำลังของเครื่องส่งนั้น จะต้องใช้เครื่องส่งที่มีกำลังส่ง สูงมาก เช่น ถ้าต้องการแก้ไขการจางหายขนาด 20 dB กำลังของเครื่องส่งจะต้องสูงขึ้นถึง 100 Watt (ถ้า ปกติในเวลาที่ไม่มีการจางหาย เครื่องส่งมีขนาด 1 Watt) การรับสัญญาณจึงเหมือนเดิมการเพิ่ม พลังงานที่สูงมาก ๆ เช่นนี้จะทำให้สัญญาณไปรบกวนข่ายงาน Microwave อื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงได้ ในทำนองเดียวกันการเพิ่มแกนของสายอากาศก็มีผล เช่นเดียวกับการเพิ่มกำลังของเครื่องส่ง ส่วนการลด ระยะทางระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่งนั้นสามารถกระทำได้ถ้ามีสถานที่เหมาะสมในทางปฏิบัติแล้วการ เอาชนะ ต่อการจางหายของสัญญาณ Microwave นิยมใช้แบบ Diversity ซึ่งมีอยู่ ๒ ชนิด (สำหรับการ ใช้งานแบบจุดต่อจุด) Space Diversity และ Frequency Diversity

#### ๓.๓.๑๑ Space Diversity

ใช้ประโยชน์จากหลักความจริงที่ว่า การจางหายของสัญญาณจะไม่เกิดขึ้น พร้อมกันในเส้นทางการเคลื่อนที่สองเส้นทางของช่วงเดียวกัน ในระบบนี้สัญญาณจากเครื่องส่งหนึ่ง คลื่นตรงไปเข้าสายอากาศของเครื่องรับสองอัน ซึ่งติดตั้งห่างกันในแนวตั้ง (Vertical Separation) สัญญาณที่รับได้ทั้งสองนี้จะป้อนเข้า Combine ซึ่งจะทำหน้าที่เลือกสัญญาณที่มีคุณภาพดีกว่า มี Noise ต่ำ ส่วนสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนมากจะถูกตัดทิ้งไป วิธีนี้มีข้อดีในการประหยัดความถี่ ไมโครเวฟที่ใช้งานเนื่องจากใช้ความถี่ส่งออกอากาศเพียงความถี่เดียว คุณประโยชน์ที่ดีที่สุดของระบบ

นี่ก็คือ สามารถแก้ไขการจางหายของสัญญาณอันเกิดจาก Multipath ซึ่งสาเหตุจากเส้นทางหนึ่งของคลื่นเกิดการสะท้อนโดยตรงบนพื้นเรียบ เช่น น้ำ ดึก หรือ พื้นโลก

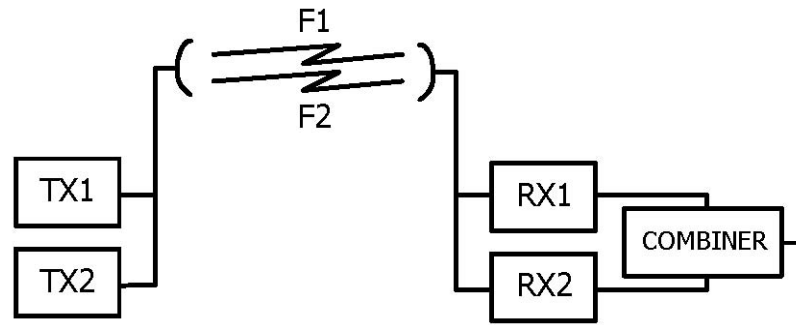


ภาพที่ ๒-๔๘ แสดง ส่วนประกอบของระบบ Space Diversity

อุปสรรคที่สำคัญในระบบ Space Diversity ก็คือ ราคาของระบบ เนื่องจากการรับสัญญาณแยกกันในแนวตั้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มจานสายอากาศและเวฟไกด์เข้าไปอีก ถ้าใช้สายอากาศเพียงเสาเดียว มันจะต้องมีความมั่นคงแข็งแรงกว่าการใช้จานสายอากาศอันเดียว และจำเป็นจะต้องเพิ่มระยะของความสูงขึ้นไปอีกเพื่อติดตั้งจานสายอากาศทั้งสองให้ห่างกันพอที่จะรับสัญญาณได้ดีเท่ากับระบบ Frequency Diversity การแยกเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมันอาจจะเกิดหรือไม่เกิดการจางหายพร้อม ๆ กันก็ได้ การแยกสายอากาศในแนวตั้งให้กว้างมากขึ้น (เสาก็ต้องสูงขึ้นด้วย) การเกิดการจางหาย ของสัญญาณทั้งสองพร้อมกันจะมีได้น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ถึงแม้ว่าจะใช้เครื่องส่งเพียงเครื่องเดียว แต่ก็ต้องใช้เครื่องรับถึงสองเครื่อง

### ๓.๓.๑๒ Frequency Diversity

ในทางปฏิบัติการหักเหหรือการสะท้อนของสัญญาณไมโครเวฟ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณถึงแม้จะมีความถี่ต่างกันมาก ๆ แต่การหักเหจะมีได้เท่า ๆ กัน ภายใต้สภาพการส่งที่เหมือนกัน ดังนั้นสัญญาณไมโครเวฟหลาย ๆ ความถี่ก็จะหักเหและแตกแยกออกเป็นหลาย ๆ ส่วนในสภาพที่เหมือนกันทุกประการ ถ้าใช้สายอากาศส่งเพียงคู่เดียวสัญญาณเหล่านี้จะเคลื่อนที่ในเส้นทางเดียวตลอด บางคนอาจจะคิดว่าสัญญาณทั้งหมดที่เคลื่อนที่ในเส้นทางเดียวกันนั้น เมื่อเกิดเฟสหักล้างกัน ก็จะทำให้เหมือนกัน และจะเกิดการจางหาย พร้อม ๆ กัน ซึ่งเป็นความเข้าใจที่ผิด สัญญาณไมโครเวฟที่มีความถี่ต่างกัน การจางหายก็จะมีส่วนเกี่ยวกัน ถ้ามันเคลื่อนที่ในเส้นทางเดียวกันยิ่งความถี่ต่าง ๆ กันมากเท่าไร โอกาสที่สัญญาณทั้งสองจะเกิดการจางหายพร้อม ๆ กัน ก็ยิ่งน้อยลง แต่ถ้าความถี่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน การจางหายพร้อม ๆ กัน จะเกิดขึ้นได้ง่าย



ภาพที่ ๒-๔๙ แสดง ส่วนประกอบของระบบ Frequency Diversity

เหตุผลของการป้องกันการจางหายโดยการเลือกใช้หลาย ๆ ความถี่ ก็คือ สัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน จะมีความยาวคลื่นต่างกัน สัญญาณความถี่ X เมื่อมาถึงจุดรับอาจจะมีบางส่วนเกิดการต่างเฟสขึ้นชั่วขณะหนึ่ง แต่สัญญาณ Y (มีช่วงคลื่นความยาวกว่า) ซึ่งเคลื่อนที่ในเส้นทางเดียวกันเวลาเดียวกัน จะไม่เกิดต่างเฟสในชั่วขณะนั้น ๆ ก็คือเมื่อความถี่หนึ่งเกิดการจางหายอีกความถี่หนึ่งก็จะยังคงมีความแรงของสัญญาณใกล้เคียงกับปกติ ในระบบ Frequency Diversity นี้เหมือนกับระบบ Space Diversity คือการใช้ Combine เป็นตัวเลือกสัญญาณที่ดี และตัดสัญญาณที่เกิดการจางหายออกไป

สรุปการจางหาย (Fading) การจางหายจะเกิดขึ้นต่อเส้นทางเหนือผิวน้ำมากกว่าเส้นทางที่ส่งผ่านไปใต้อุณหภูมิประเทศที่ขรุขระ ในเส้นทางที่ส่งผ่านพื้นผิวน้ำเรียบ เช่น ในทะเลทราย บางครั้งก็จะทำให้เกิดการจางหายขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีพืชพันธุ์ไม้อยู่เพียงเล็กน้อย ก็จำเป็นต้องนำมาพิจารณาป้องกันด้วย การจางหายในเขตร้อนจะมีค่ารุนแรงมากกว่าในเขตหนาว การผสมผสานกันเป็นอย่างดีของ Turbulent Atmosphere จะมีผลของการจางหายน้อยกว่าบรรยากาศที่สงบนิ่ง หมอกเหนือพื้นดิน ก็อาจจะเป็นสาเหตุที่ ก่อให้เกิดสภาพการรับสัญญาณที่ไม่ดีขึ้นได้ การจางหายที่เกิดขึ้นในเดือนของฤดูร้อน จะมีความรุนแรงมาก กว่าที่จางหายที่เกิดขึ้นในเดือนของฤดูหนาว การจางหายที่รุนแรง โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา ตอนเช้า (๒๓.๐๐-๐๔.๐๐) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงเดือนของฤดูร้อน

การจางหายที่รุนแรงมาก ๆ สามารถจะถูกทำให้ลดน้อยลงได้ ก็โดยการใช้ 0.6 Fresnel Zone (สำหรับ ๔/๓) Clearance หรือ 0.3 Fresnel Zone (สำหรับ ๒/๓) การทำให้ระยะ Clearance มากเกินไป เกินกว่า ๓ เท่าของค่าที่จำเป็นสำหรับ First Fresnel Zone Clearance ก็มักจะทำให้เกิดการจางหายเพิ่มขึ้นรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเส้นทางที่ผ่านผิวน้ำ การจางหายที่รุนแรงจะทวีความสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ระยะทางของแต่ละช่วง (HOP) เพิ่มขึ้น

## ๓.๔ ขั้นตอนในการวางแผนเพื่อวางระบบไมโครเวฟ

### ๓.๔.๑ การเตรียมการ

#### ๓.๔.๑.๑ การหาข้อมูล

เมื่อจัดตั้งสถานีวิทยุระบบไมโครเวฟระหว่างหน่วยทหารสองหน่วย ในการวางแผนขั้นต้นจะต้องหาแผนที่ขนาดมาตราส่วน ๑:๕๐,๐๐๐ เพื่อสำรวจคร่าว ๆ ซึ่งจะได้ข้อมูล (โดยประมาณ) คือ

- ระยะทาง
- มุมภาค (AZIMUTH)
- ความสูง (ELEVATION) ของแต่ละสถานีจากระดับน้ำทะเล
- ลักษณะภูมิประเทศและสภาพทางอุตุนิยมวิทยาตลอดเส้นทาง

จากข้อมูลทำให้เราทราบว่า ระยะทางระหว่างสองสถานีเกิน ๕๐ กม. หรือไม่ถ้าเกินจำเป็นจะต้องมีสถานีถ่ายทอดหรือไม่หรือไม่เกินแต่เราไม่สามารถจะเรียงตรงได้เนื่องจาก มีภูเขาสูงบังระหว่างทาง จะต้องพยายามหลีกเลี่ยงหรือพยายามตั้งในที่สูง เมื่อไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จำเป็นต้องมีสถานีถ่ายทอด จะต้องพิจารณาตั้งสถานีถ่ายทอดไว้ที่ใดบ้าง ในการทำ Profile จะต้องได้แผนที่ทันสมัยขนาดมาตราส่วน ๑:๕๐,๐๐๐

### ๓.๔.๒ การพิจารณาเลือกที่ตั้งสถานี

#### ๓.๔.๒.๑ จากสภาพภูมิประเทศ

- จะต้องมียี่พื้นที่กว้างขวางพอสำหรับตั้งเครื่องมือสื่อสาร มีสิ่งอำนวยความสะดวกและจัดให้มีพื้นที่รักษาความปลอดภัย
- พื้นที่ที่มีลักษณะเป็นเนินสูงหรือเป็นที่สูงกว่าบริเวณใกล้เคียง นอกจากป้องกันน้ำท่วมได้แล้วยังให้ผลดีในการติดต่อสื่อสารอีกด้วย
- ไม่ควรห่างจากถนนสายหลักมากนัก เพราะจะได้สะดวกในการส่งกำลังบำรุงและไม่ต้อง เสียค่าใช้จ่ายสูงในการทำถนนแยกเข้า
- เป็นพื้นที่ที่ห่างไกลจากชุมชน โรงงานที่ใช้เครื่องจักรพอสมควร
- ต้องไม่มีต้นไม้ใหญ่ ไฟแรงสูง สนามบิน สิ่งก่อสร้าง บังด้านหน้าของงานสายอากาศในระยะใกล้

#### ๓.๔.๒.๒ ทางเทคนิค มีข้อแนะนำดังนี้

- เสียงรบกวนเกิดจากอุณหภูมิ Thermal Noise และเสียงรบกวนจาก Intermodulation
- การสะท้อนของคลื่นจากพื้นดิน

- การโค้งหรือการหักเหของเส้นทางไมโครเวฟ
- บริเวณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง
- ระยะทางของช่วงสถานีและจำนวนช่วงสถานี
- Noise Burst อันเนื่องมาจากการจางหายอย่างมากของสัญญาณ

นอกจากแต่ละหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบต่างๆ อีกมากทั้งกับกำลังส่งของเครื่องส่ง Gain ของงานสายอากาศ เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในเครื่องรับเอง งานที่ต้องทำในการเลือกที่ตั้งสถานีไมโครเวฟซึ่งเป็นระบบ Line of Sight บางครั้งจำเป็นต้องเลือกสถานที่ตั้งสถานีถ่ายทอดด้วย ในการที่มีสถานีถ่ายทอดหลาย ๆ แห่งซึ่งแต่ละแห่งที่อยู่ใกล้กันจะต้องสามารถมองเห็นกันได้ด้วยสายตา การเลือกสถานีนี้ เราจะต้องพิจารณาให้ได้คุณภาพในการส่งสัญญาณให้เป็นที่น่าพอใจ ประหยัด ก่อสร้างง่าย อย่างไรก็ตามเราจะต้องพิจารณาให้ได้ผลของการส่งที่ดีเป็นหลักก่อนที่จะพิจารณาถึง ส่วนประกอบอื่น ๆ ข้อพิจารณา อีกประการหนึ่ง ก็คือ การเลือกใช้ย่านความถี่ในการสื่อสารไมโครเวฟควรจะต้องคำนึงถึงส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- ปริมาณความต้องการใช้ (Traffic Demand)
- คุณภาพที่ผู้ใช้ต้องการ
- ความรู้พื้นฐานในการสร้างระบบไมโครเวฟ

### ๓.๔.๓ TRAFFIC DEMAND

คือ จำนวน Channel ของโทรศัพท์ซึ่งพิจารณาตามชนิดของข่ายวงจรที่ใช้ ย่านความถี่ที่ใช้ต้องกำหนดตามแต่ละประเภทงาน ซึ่งเป็นไปตามข้อตกลงเกี่ยวกับการใช้ความถี่ต่าง ๆ ปัจจุบันย่านความถี่ที่ใช้กัน เกือบทั่วโลกใช้ย่านความถี่ตั้งแต่ 6 GHz ใช้สำหรับระบบที่มีปริมาณมากกว่า 1000 Channel ขึ้นไป ย่าน 4 GHz ใช้สำหรับการส่งที่น้อยกว่า 1000 Channel หรือสำหรับใช้ส่งสัญญาณทีวีสี ย่านความถี่ที่ใช้กันหลาย ๆ ประเทศในปัจจุบันมีดังต่อไปนี้

- การส่งสัญญาณโทรศัพท์ระยะไกล ใช้ย่านความถี่ 4GHz และ 6 GHz
  - การส่งสัญญาณโทรศัพท์ระยะใกล้ ๆ ใช้ย่านความถี่ 2 GHz, 11 GHz และ 15 GHz
  - การส่งสัญญาณโทรทัศน์ ใช้ย่านความถี่ 4 GHz 5 GHz และ 11 GHz
- ความถี่ทั้งสามที่ใช้ในการส่งระยะใกล้ ๆ มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นต่างกันไปต่าง ๆ ก็คือ ระบบ 11 GHz และ 15 GHz มีความสามารถในการส่งสัญญาณได้จำนวนมากกว่าระบบ 2 GHz แต่อย่างไรก็ตามค่า Attenuation เนื่องจากฝนตกหรือหิมะนั้น ในระบบ 2 GHz จะมีผลน้อยกว่าระบบ 11 GHz และ 15 GHz ดังนั้นถ้าเราต้องการส่งในระยะทางไกล ระบบ 2 GHz จึงดีกว่าระบบอื่นๆ เพราะในระยะทางไกล ๆ การจางหายของสัญญาณจะเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และโอกาสที่จะมีฝนตกหนักจะมีมากด้วย โดยปกติแล้ว การถ่ายทอดสัญญาณไปยังที่ไกล ๆ โดยใช้ระบบไมโครเวฟที่มีความถี่ 4 GHz และ 6 GHz นั้น จะต้องออกแบบสร้างให้เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อบังคับของ CCIR อย่างไรก็ตามการออกแบบสร้างระบบการถ่ายทอดสัญญาณในระยะใกล้ ๆ โดยใช้ความถี่

2 GHz หรือ 11 GHz นั้น จะเน้นหนักในเรื่องการประหยัดและอาจมีเสียงรบกวนมากกว่าที่ CCIR ได้กำหนดเอาไว้บ้าง

### ๓.๔.๔ การเลือกเส้นทางไมโครเวฟ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่างานที่สำคัญในการเลือกสถานที่ตั้งสถานีคือ การเลือกตำแหน่งที่จะติดตั้งสถานีและสถานีถ่ายทอด ดังนั้นเราจึงต้องหาจุดตำแหน่งและเส้นทางที่เราต้องการให้เหมาะสมบนแผนที่เสียก่อน ในการกำหนดเส้นทางและที่ตั้งบนแผนที่นี้ จะต้องเป็นแผนที่ที่ทันสมัยมาตราส่วน ๑:๕๐๐๐๐ สถานีที่ตั้งและสถานีถ่ายทอดที่กำหนดบนแผนที่แต่ละจุดจะต้องมองเห็นกันและกัน (Line of Sight) ค่าต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องเขียนลงในการวางแผนเส้นทางไมโครเวฟมีดังนี้

- ระยะทางระหว่างช่วงสถานีหนึ่ง ๆ
- จำนวนช่วงสถานีทั้งหมด
- การโค้งและการแยกเส้นทางไมโครเวฟ
- การผ่านข้ามของสัญญาณ
- แผนภูมิของเส้นทางไมโครเวฟ
- การป้องกันไม่ให้สัญญาณไมโครเวฟไปรบกวนดาวเทียม

เมื่อแผนภูมิที่เราวางแผนเส้นทางตามที่เราต้องการบนแผนที่ได้แล้ว เราควรจะต้องเลือกจุดที่ทำการติดตั้งสถานีและสถานีถ่ายทอด เพื่อจะรักษาระยะทางของแต่ละช่วงสถานีให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ในกรณีนี้ ควรจะหลีกเลี่ยงระยะทางที่ไกลเกินช่วงมาตรฐาน

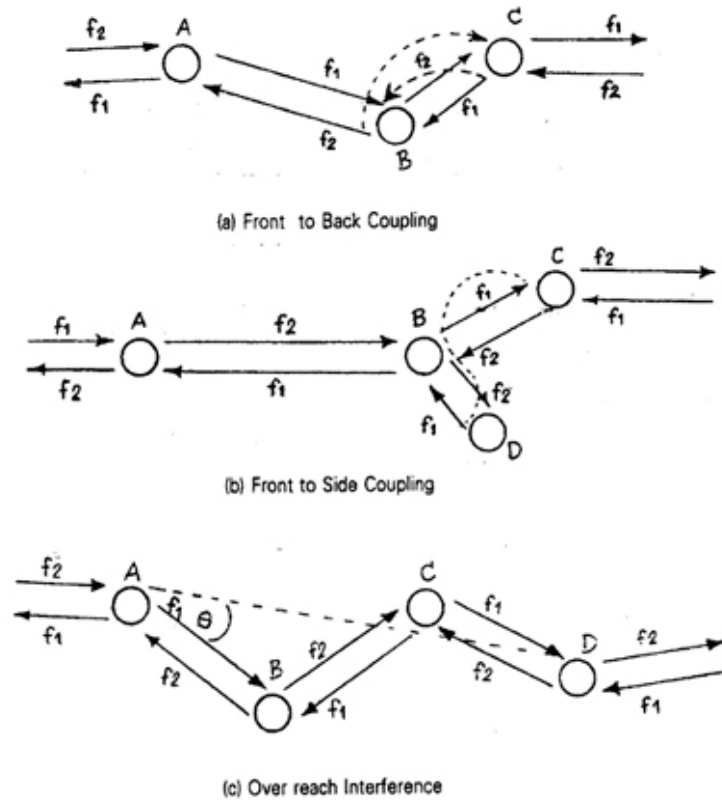
เนื่องจากการสื่อสารระบบไมโครเวฟนั้นส่วนมากจะใช้วิธีแบ่งความถี่สองความถี่สลับกันไปในการรับส่ง (Two Frequency Repetition) และวิธีการใช้ความถี่สองความถี่ที่ซ้ำ ๆ กันนี้ สถานีถ่ายทอดแต่ละสถานีจะรับสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันจากทั้งสองทิศทาง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเกิดการรบกวนกันได้ของความถี่ต่างๆ ถ้าหากการแยกทิศทางของ Front To Back ของจานสายอากาศไม่ดีพอ

เมื่อความแตกต่างของระยะทางการถ่ายทอดระหว่างเส้นทางเดินของสัญญาณทั้งสองนั้นไกลเกินไปจะทำให้ได้รับกำลังของสัญญาณที่ไม่ต้องการค่าสูงขึ้นมาอีก เมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณที่ต้องการ ในกรณีนี้จะเกิดการรบกวนอย่างมาก เมื่อมุมระหว่างเส้นทางของสัญญาณแต่ละทิศทางนั้นแคบ การรบกวนซึ่งกันและกันก็จะเกิดขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก จานสายอากาศมีทิศทาง Front to Side ไม่ดีพอ

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการรบกวนดังที่กล่าวมาแล้ว จะต้องพิจารณาถึงหัวข้อต่อไปนี้

- ทำการส่งให้มีขั้วต่างกัน (Cross Polarization)
- กำหนดให้มีช่วงของสัญญาณเป็นช่วง ๆ
- มีช่วงปรับระดับของสัญญาณ (Span Equalization)
- มีย่านความถี่ของอีกระบบหนึ่ง สำหรับวงจรย่อยที่แยกออกไป

ในการส่งสัญญาณแบบสองความถี่สลับกันไปในั้น ที่สถานีถ่ายทอดไม่เพียงแต่รับสัญญาณที่ต้องการจากสถานีทางด้านหนึ่งเท่านั้น แต่ยังสามารถรับสัญญาณที่ไม่ต้องการซึ่งข้ามเลย (Over Reach) มาจากสถานีตัวที่สามซึ่งถัดไปในเส้นทางที่มีมุมไม่กว้างพอกับทางด้านรับ ดังแสดงในรูปที่ ๑-๕๑



ภาพที่ ๒-๕๐ แสดง การเลือกเส้นทางไมโครเวฟ

การรบกวนข้ามเลยนี้ สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการจัดแนวทิศทางของการรับส่งให้หักเหไปมา นั่นคือ มุมที่รวมอยู่ระหว่างเส้นทางเดินของสัญญาณโดยตรงกับเส้นทางเดินสัญญาณที่ข้ามเลยหรือเลื่อมข้ามจะต้องแยกออกจากกัน ด้วยมุมที่กว้างพอ นอกจากนี้ยังต้องเลือกที่ตั้งที่มีการก้ำกั้วเส้นทางเดินทางของสัญญาณข้ามเลย ในลักษณะที่เหมาะสมก็จะเป็นวิธีการที่แก้ไขการรบกวนนี้ได้

### ๓.๔.๕ ข้อยืนยันการใช้ Line of Sight

เพื่อที่จะเป็นการสนับสนุนการวางแผน การหาตำแหน่งที่ตั้งของสถานีและสถานีถ่ายทอดภายใต้เงื่อนไขที่ว่าค่า K มีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพบรรยากาศ ค่า Clearance จะต้องถูกกำหนดดังนี้คือ

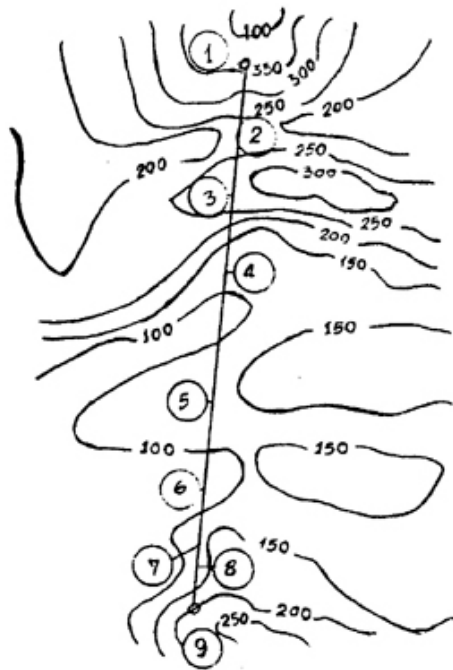
- First Fresnel Zone ทั้งหมดจะต้องปราศจากค่า Loss อันเนื่องมาจากการ
- ภายในเขต ๒ ใน ๓ ของรัศมีของ First Fresnel Zone หรืออาจจะมากกว่านั้น จะต้องไม่ถูกบังโดยสิ่งกีดขวางในระหว่างสถานีส่งและรับ



ถ้าหากว่าเงื่อนไขทั้งสองข้อที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นไปตามข้อกำหนดและถูกต้องแล้ว ตำแหน่งการเลือกที่ตั้งสถานีและสถานีถ่ายทอดที่เลือกไว้ก็จะสามารถส่งสัญญาณไมโครเวฟในลักษณะ Line of Sight ได้โดยมี ค่าระดับของสัญญาณและ Clearance เป็นที่น่าพอใจ

### ๓.๔.๖ Path Profile

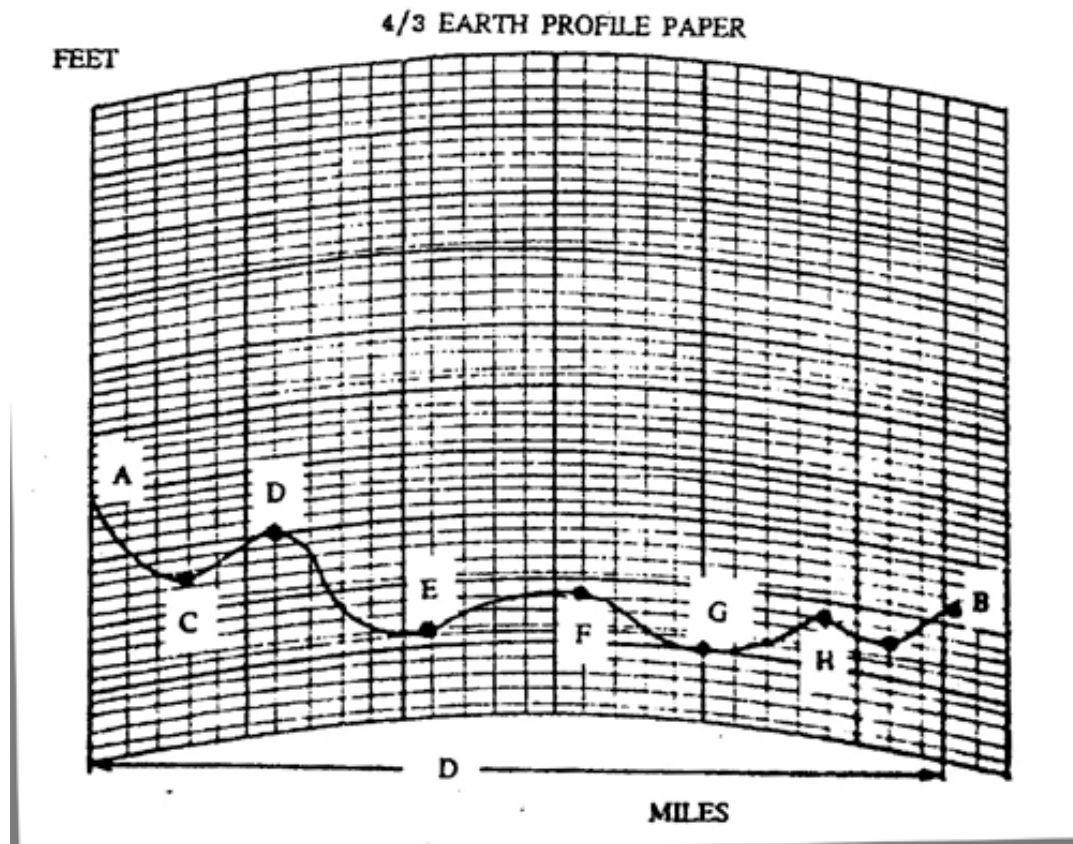
การ Plot Profile ลงบนแผ่นกระดาษ Profile ดำเนินการดังนี้  
ลากเส้นตรงระหว่าง ๒ สถานี (A และ B) ลงชั้นความสูงโดยให้จุดเริ่มต้น เป็น ๐ ไมล์ (ฉะนั้นที่สถานี A จะเป็น ๐ ไมล์ ที่สถานี B หรือปลายทางจะเป็นระยะสุดท้ายของระหว่าง ๒ สถานี (ในที่นี้คือ ๒๘ ไมล์) ไต่ไปตาม เส้นทางจุดจุดโดสูงและต่ำ และระยะทางเท่าไร จากจุด ๐ แล้วลงระยะทางและชั้นความสูงไว้ ตามตาราง (ดูภาพ ๑-๕๑)



POINT	MILE	ELEVATION	TREES	TOTAL ELEVATION
1	0	380	20	400
2	3	240		240
3	6	280		280
4	11	100		100
5	16	135	25	160
6	20	60		60
7	24	160		160
8	26	140		140
9	28	220		220

ภาพที่ ๒-๕๑ แสดง การทำจุดจากภาพแผนที่ ภาพสันฐานด้านข้าง

จากรูปนำมา Port ลงในกระดาษ Profile (ตามภาพที่ ๒-๕๒) โดยกำหนดให้ R เป็นจุดกึ่งกลางระหว่าง ๒ สถานี และเป็นจุดอ้างอิงระยะทางที่กำหนดในรูปเป็นระยะทางและความสูงจากจุดอ้างอิงเมื่อ Plot เสร็จแล้วให้ลากเส้นทึบและเส้นทึบที่ลากใหม่นี้ จะเป็นเส้น Line of Sight จริง



ภาพที่ ๒-๕๒ แสดง การนำเอาระดับความสูงที่ได้มา Plot ลงในกระดาษ

### ๓.๔.๗ การสำรวจภูมิประเทศจริง

ในการสำรวจภูมิประเทศจริง ตามที่กำหนดไว้บนแผนที่นั้น สิ่งที่จะต้องเตรียมและนำไปคือ

- ยานพาหนะที่สามารถวิ่งในภูมิประเทศได้พอสมควร (พร้อมเชื้อเพลิงอะไหล่ด้วย)

- แผนที่ทันสมัย มาตรฐาน ๑ : ๕๐,๐๐๐ ของบริเวณที่ต้องการสำรวจ

- เข็มทิศ วิทยุ อวูธกระสุน มีดเดินป่า เทปวัดระยะ ไฟฉาย ฯลฯ

- อาหารแห้ง น้ำดื่ม เครื่องพักผ่อน อาจจะต้องค้างคืนในป่า โดยเฉพาะการ

สำรวจเพื่อตั้งสถานีถ่ายทอด

- คนนำทาง หรือ ผู้ที่คุ้นเคยกับบริเวณนั้น รวมทั้งลูกหาบ

- ข้อมูลทั่วไปที่ควรทราบ

- ช่วยวิทยุอื่นบริเวณใกล้เคียงรวมทั้งความถี่

- ลักษณะภูมิประเทศ อันได้แก่ อุณหภูมิ ลม ฝน หมอก

- ลักษณะสิ่งแวดล้อม ป่าทึบ ป่าโปร่ง ทุ่งหญ้า ป่าไผ่
- แหล่งน้ำ
- ทางเข้า-ออก
- ที่พัก
- ความเป็นอยู่ของชาวบ้าน และเผ่าพันธุ์
- สัตว์ป่า

### ๓.๔.๘ การออกแบบระบบไมโครเวฟลิงค์บนภาคพื้นดิน

เนื่องจากไมโครเวฟที่ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในระบบการสื่อสารบนภาคพื้นดิน ในระบบสื่อสารดาวเทียม และในระบบเรดาร์ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการคำนวณระบบไมโครเวฟ โดยกล่าวถึงประเด็นสำคัญในการออกแบบและคำนวณระบบโดยจะเน้นที่ระบบไมโครเวฟที่ใช้บนพื้นดิน

### ๓.๔.๙ หลักการทั่วไปในการออกแบบระบบไมโครเวฟ

หลักการในการออกแบบนั้นโดยหลักการพื้นฐานแล้วจะเหมือนกับระบบสื่อสาร ในย่านความถี่อื่น ๆ คือ พารามิเตอร์หลัก ๆ ของ ระบบจะได้แก่ EIRP ของสถานีส่ง การสูญเสียกำลัง สัญญาณระหว่างทางและกำลังสัญญาณที่เครื่องรับต้องการในการออกแบบระบบนั้นถ้าพารามิเตอร์ เหล่านี้สามารถเลือกได้อย่างอิสระ การออกแบบระบบที่ดีก็คือ การเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องส่ง สถานี และความสูงของการติดตั้งสายอากาศ และการเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องรับให้สามารถทำงานได้ตามต้องการ โดยมีต้นทุนของระบบต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณีทั่วไป เรามักไม่สามารถเลือกพารามิเตอร์ใน ส่วนที่เหลือให้เหมาะสมต่อไป พารามิเตอร์หลัก ที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อทำการพิจารณารายละเอียด ต่อไปก็จะทำให้เข้าใจได้ว่าพารามิเตอร์แต่ละอย่างจะมีผลกระทบต่อต้นทุนของระบบอย่างไร ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของพารามิเตอร์หลัก ๆ ดังนี้

#### ๓.๔.๙.๑ EIRP

ของสถานีส่งเนื่องจากพารามิเตอร์นี้เป็นผลคูณของเอาต์พุตของ เครื่องส่ง และอัตราการขยายของระบบสายอากาศเพราะฉะนั้นเราสามารถเพิ่ม EIRP ได้ โดยการเพิ่ม เอาต์พุตของเครื่องส่ง หรือเพิ่มอัตราการขยายของระบบสายอากาศการเพิ่มค่าทั้งสองนี้จะทำให้ต้นทุน เพิ่มขึ้นทั้งคู่ แต่ไม่สามารถสรุปได้ตายตัวว่า การเพิ่มค่าด้านไหนจะทำให้ต้นทุนเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า นอกจากนั้นการเพิ่มค่าทั้งสองนี้ก็มีขีดจำกัดทั้งคู่ กล่าว คือ เอาต์พุตของเครื่องส่งนั้นเมื่อใช้เทคโนโลยี ของสารกึ่งตัวนำ ก็จะทำให้เอาต์พุตอยู่ในช่วง MW ถึง W ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มอัตราการขยายของ ระบบสายอากาศสูงขึ้นซึ่งหมายถึง ก็ต้องเพิ่มขนาดของสาย อากาศให้ใหญ่ขึ้น ก็จะทำให้ต้นทุนของ ระบบสายอากาศสูงขึ้น การสูงขึ้นของต้นทุนของระบบสายอากาศนั้นนอกจากเป็น ผลมาจากขนาด ของสายอากาศแล้ว ยังมาจากส่วนที่เป็น โครงสร้างที่ใช้ยึดตัวสายอากาศด้วย เพราะงานสาย อากาศ ที่ใหญ่ขึ้นจะต้องต้านกำลังลมสูง จึงต้องมีโครงสร้างการยึดที่แข็งแรง

### ๓.๔.๙.๒ การสูญเสียกำลังงานระหว่างทาง

พารามิเตอร์นี้จะต้องขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีส่งและสถานีรับและขึ้นอยู่กับ การส่งผ่านของคลื่นด้วยในกรณีที่สามารถเลือกสถานที่ตั้งได้ก็จะพยายามเลือกสถานที่ตั้งที่ผลกระทบจากดิฟแฟรคชั่นและการสะท้อนจากผิวโลกมีน้อย ในกรณีที่ไม่สามารถเลือกที่ตั้งได้อย่างอิสระ ก็จะต้องพิจารณาความสูงของงานสายอากาศที่เหมาะสม โดยทั่วไปการเลือกสถานที่ตั้งที่อยู่สูง เช่น อยู่บนเนินเขาหรือบนยอดเขานั้นไม่มีทางขึ้นก็จะต้องมีต้นทุนในการสร้างถนนและการขนส่งที่แพงขึ้น

### ๓.๔.๙.๓ กำลังสัญญาณที่เครื่องรับต้องการ

เครื่องรับโดยทั่วไปจะมีค่าความไวที่ค่า ๆ หนึ่ง เมื่อระดับสัญญาณต่ำกว่าค่าความไวเครื่องรับก็จะ Detect สัญญาณได้ไม่แน่นอน กล่าวคือในระบบ Analog FM คุณภาพของสัญญาณที่ Detect ได้ จะถูกระบุในรูปของ SNR ( Signal to Noise Ratio) ในกรณีของระบบ Digital นั้น คุณภาพของสัญญาณที่ Detect ได้นั้นก็ถูกระบุในรูปของอัตราการผิดพลาดของข้อมูล (Bit Error Rate or BER) ความไวของเครื่องรับนั้นโดยทั่วไปจะพิจารณาในรูปกำลังของสัญญาณคลื่นพาห์ต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio) เมื่อความไวของเครื่องรับถูกกำหนดมาให้ ก็จะต้องทำการกำหนดอัตราการขยายของสายอากาศ ให้สามารถรับกำลังคลื่นเท่าที่ต้องการเข้ามา กำลังคลื่นที่รับเข้ามาได้นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Flux Density) ที่ตำแหน่งของสายอากาศรับ และพื้นที่ของประสิทธิภาพสายอากาศรับและ Flux Density จะขึ้นอยู่กับ EIRP ของสถานีส่ง และการสูญเสียกำลังของสัญญาณระหว่างทาง จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์หลัก ๆ ทั้งสามนี้มีความสัมพันธ์กันหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้า EIRP ของสถานีส่งมีค่าต่ำก็จะส่งไม่ได้ไกล เพราะจะถูกจำกัดความไวของเครื่องรับ หรือถ้าระยะทางที่ทำการส่งไกลมาก จนส่วนโค้งของโลกมาบังเส้นทางของคลื่น ก็จะต้องส่งด้วย EIRP ที่สูงมากในขณะที่สถานีรับก็ต้องการสายอากาศขนาดใหญ่เพื่อให้อาจรับกำลังเข้ามาได้สูง การใช้งานในลักษณะข้างต้นจึงไม่สู้มีใช้กันมาก โดยทั่วไประยะทางที่เหมาะสมนั้นมักจะอยู่ในช่วง 30-50 Km และจะส่งในแบบของระยะสายตา อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีสันเขามาบังคลื่น โดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ก็จำเป็นต้องใช้การส่งแบบที่คำนึงถึงปรากฏการณ์ Diffraction และในระบบนั้นจะต้องผ่านการทำ Path Profile เพื่อหาความเชื่อถือได้ของระบบเสียก่อน

### ๓.๔.๑๐ การคำนวณเพื่อหาความเชื่อถือได้ของระบบ

#### ๓.๔.๑๐.๑ กรรมวิธีต่อไปนี้ ช่วยในการคำนวณหาความเชื่อถือได้ของระบบ Microwave (Reliability)

การหาค่าที่เป็นตัวเลือกทางคณิตศาสตร์จะได้จากการ Plot หรือจากกราฟ หรือจาก Nomograms จำไว้ว่าอย่างหนึ่ง ว่าค่าที่ได้ออกมานั้นเป็นค่าโดยประมาณเพื่อทราบความเป็นไปได้ของระบบว่าจะสนองตอบตามแผนที่เรากำหนดไว้ได้หรือไม่ ในระบบเดียวกัน

ควรวาดไว้หลาย ๆ เส้นทาง ทั้งนี้เพื่อนำมาเปรียบเทียบทั้งในด้านความแน่นอน ความปลอดภัย และความประหยัด

### ๓.๔.๑๐.๒ วิธีทำ

ขั้นตอนที่จะทำต่อไปนี้เป็นกรคำนวณหาค่าตัวเลข เพื่อกรอกลงใน Work Sheet สมมติว่าได้ Plot ใน Profile ตามตัวอย่างที่ให้แล้ว โจทย์กำหนดให้ใช้ชุดวิทยุปลายทาง AN/GRC-67 ติดตั้งระหว่างสถานี A และสถานี B ห่างกัน ๒๘ ไมล์ ให้คำนวณหาความเชื่อถือได้ของระบบโดยกรอกแบบฟอร์มตามหัวข้อต่อไปนี้

- Circuit Path Length ระยะทางจากสถานี A กับสถานี B มีหน่วยเป็นไมล์ (๒๕ ไมล์ ประมาณ ๔๕ กม.)

- Operating Frequency ความถี่ใช้มีหน่วยเป็น GHz ในที่นี้ใช้ 5 GHz

- Antenna Size ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศชนิด Parabolic มีหน่วยเป็นฟุต ในที่นี้ ๔.๕ ฟุต

- Transmitter Power Power Output ของเครื่องส่งมีหน่วยเป็น Watt (1 Watt)

- Receiver Bandwidth Band Pass ของเครื่องรับมีหน่วยเป็น KHz หรือบางเครื่องอาจ

- เปลี่ยนแปลงไปตาม Input Requirement (หมายความว่าถ้าจำนวนช่องการสื่อสารเพิ่มขึ้น Bandwidth ก็ต้องเพิ่ม ต้องดูจาก Technical Manual ในที่นี้ใช้ 960 KHz สำหรับ ๔๘ ช่องการสื่อสาร)

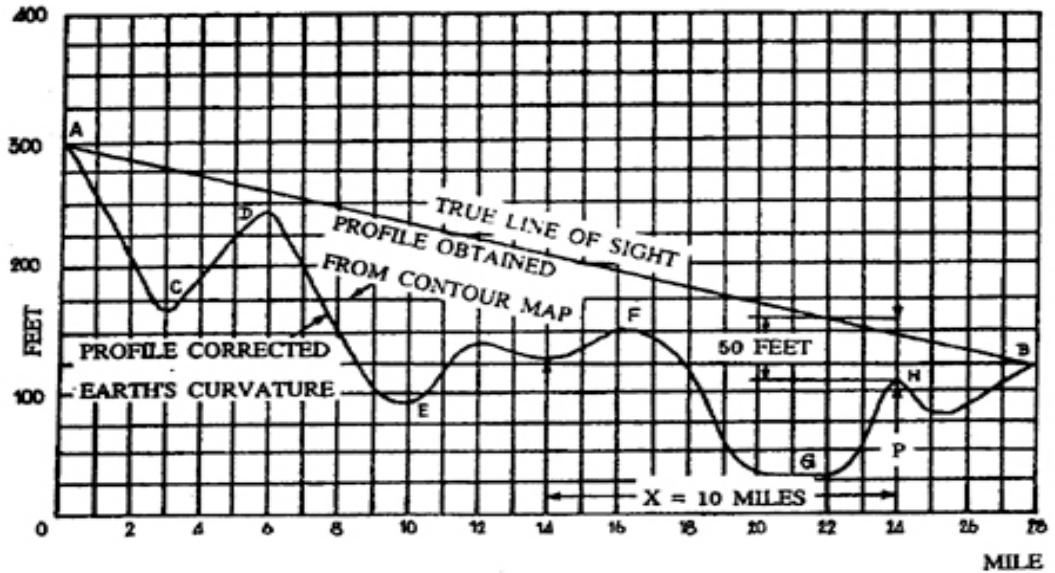
- Radius of The First Fresnel Zone รัศมีของรูปวงรี (Ellipsoid) มีหน่วยเป็นฟุต

- สำหรับ First Fresnel Zone จุดที่สำคัญที่สุดคือจุดที่คาดว่าสิ่งกีดขวางจะยื่นเข้าไปในรูปทรงรีของคลื่น

คำนวณโดยใช้สูตร

$$Fr = 2,280 \sqrt{\frac{D_1 \times D_2}{F(D_1 + D_2)}}$$

ในขั้นต้นเราอาจจะไม่รู้ว่าจุดใดเป็นจุดที่ Critical Point ฉะนั้นการคำนวณต้องทำมากกว่า ๑ จุด เพื่อจะหาจุดที่สูงที่สุด (ดูตามรูป ๑-๕๔) ตามรูปจะเห็นว่าที่จุด D, F และ M จุดใดจุดหนึ่งจะเป็นจุด Critical Point (Critical Point) ไม่จำเป็นต้องอยู่กึ่งกลาง ของระยะทางเสมอไป



ภาพที่ ๒-๕๓ แสดง การทำภาพสัณฐานด้านข้างบนกระดาดกราฟเส้นตรง

ที่จุด D  $FR = 2280 (6 \times 6) / 500 (28) = 70$  ฟุต

ที่จุด F  $FR = 2280 (16 \times 16) / 500 (28) = 84.4$  ฟุต

ที่จุด H  $FR = 2280 (24 \times 4) / 500 (28) = 60$  ฟุต

กำหนดให้ ต้นไม้สูงโดยเฉลี่ย ๒๕ เมตร (๘๒ ฟุต) เสออากาศสูง ๕๐ เมตร (๑๖๔ ฟุต) สถานี A สูง ๓๐๐ ฟุต ที่สถานี B สูง ๑๒๕ ฟุต พิจารณาที่สถานี A จะเห็นว่า ถ้าจะให้ First Fresnel Zone ที่จุด D พื้นต้นไม้ A จะต้องตั้งเสาสูงเท่ากับความสูงของต้นไม้บวกกับความสูงของรัศมี ให้ First Fresnel Zone ซึ่งเท่ากับ  $82 + 70 = 152$  ฟุต แต่เรามีเสาสูง ๑๖๔ ฟุต (๕๐ เมตร) จึงไม่มีปัญหา

ที่สถานี B นั้นไม่มีปัญหาอะไร เพราะจุด H นั้นมี ให้ First Fresnel Zone เพียง ๖๐ ฟุต เมื่อยกเสออากาศสูงเลยอดไม้ก็ทำให้ ให้ First Fresnel Zone ที่จุด H และจุด F พันสิ่งกีดขวางแล้ว

- Transmitter Power จากรูป ที่ Power 1 Watt ได้ 3.6 dBm (ถ้าหากเกินตารางจะ ต้องใช้สูตร)

- Antenna Gain จากรูป ลากเส้นจากความถี่ 5000 MHz ไปยัง Refractor Diameter ๔.๕ ฟุต จะได้ Antenna Gain 34 dB แต่เนื่องจาก ANT มี ๒ ข้าง จึงคูณด้วย ๒ จึงเท่ากับ  $34 \times 2 = 68$  dB

- สูตรคำนวณ Antenna Gain สำหรับจานแบบ Parabolic

$$G = 20 \text{ Log } D + 20 \text{ Log } F + 7.5$$

D = Diameter ของจานเป็นฟุต

F = ความถี่ที่ใช้เป็น GHz

- Transmission Line Loss ได้จาก Technical Manual หรือจาก Manufacturers Manual หรือจากค่าต่อไปนี้ Wave Guide Rigid or Semirigid

Elliptical 0.5 dB / 100 Ft

Flexxible 2.0 dB / 100 Ft

SWTLZG-Line 1.0 dB / 100 Ft

ในที่นี้ให้เป็น SWTL (T-Line) ข้างละ 200 ฟุต เท่ากับ 4 dB

- Total Effective Transmitted Power คือผลบวกตั้งแต่ (๗) ถึง (๙)  
= ๓๐ + ๖๘ - ๔ = ๙๔

- Basic Propagation Loss จากรูป ที่ระยะ ๖๘ ไมล์ ความถี่ 5 GHz ได้ 139 dB

- Predicted Median Signal Level เป็นการคาดคะเน Signal Strength ที่เครื่องรับ โดยการเอา (๑๑) ไปลบจาก (๑๐) จะได้ = 94 - 139 = -45 dBm (ค่าจะออกมาเป็นลบนั้นหมายถึงเครื่องรับ รับได้เป็น MWatt )

- Receiver Noise Figure พิจารณาเป็น Loss ได้จาก Technical Manual 8 dB

- Noise In If Pass Band ถ้าหาก Bandwidth เพิ่มขึ้น Noise ก็เพิ่มขึ้น คำนวณได้จากรูป ที่ Bandwidth 960 KHz ได้ -114 dBm (หรือที่ Technical Manual)

- IF S/N For Threshold สำหรับ FM ได้ 10 dB

- Required Signal Level For Threshold จาก Technical Manual -113 dB

- ฉะนั้น Threshold จากการคำนวณจะต้องได้ไม่ต่ำกว่า -133 dB ระบบจึงจะใช้ได้

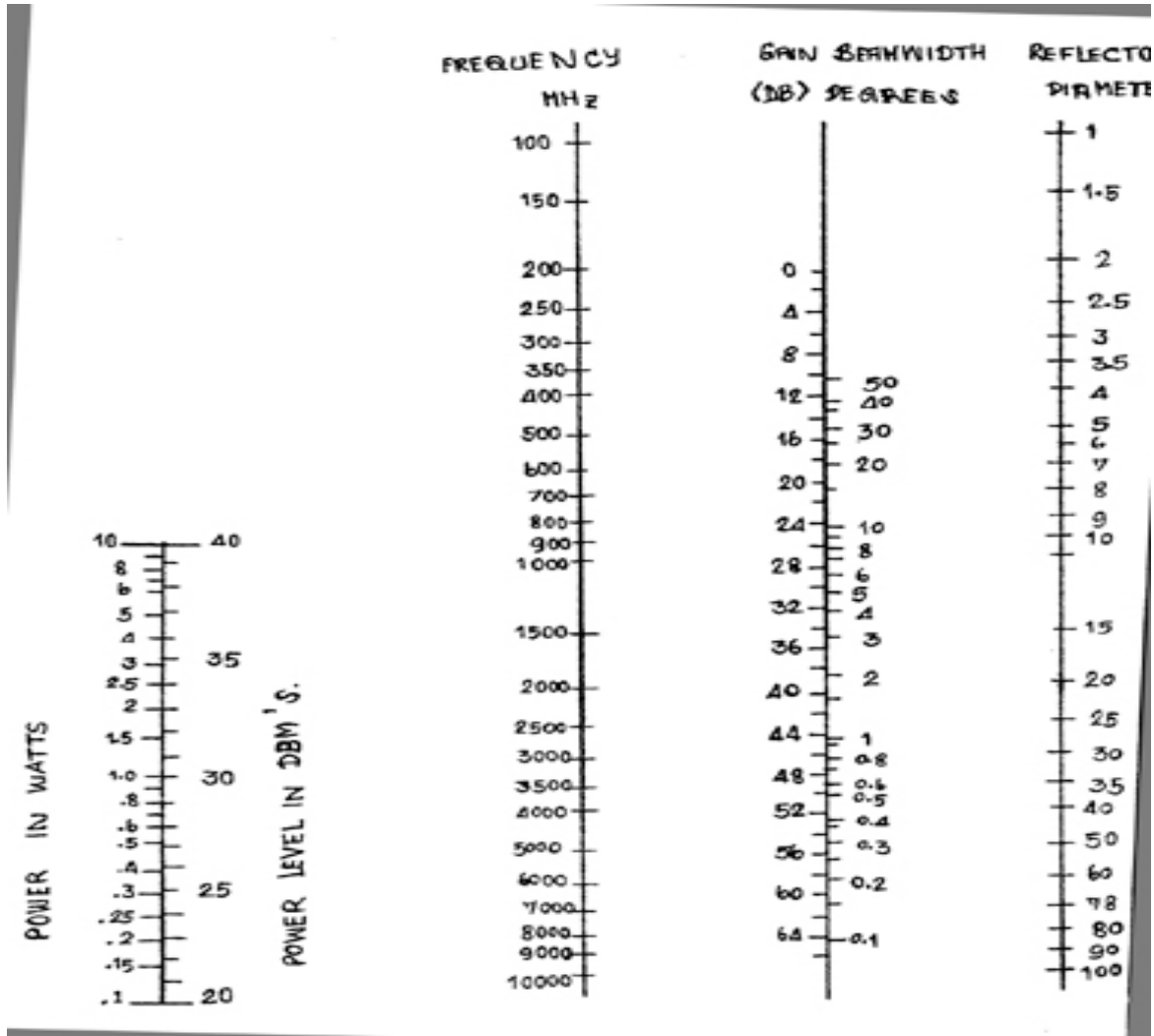
จากการคำนวณ = -144 + 8 + 10 = -96 dB

- Fade Margin ผลต่างของรายการ (๑๒) กับ (๑๖) = -96 - -45 = -51

- Circuit Reliability จากรูป จะเห็นได้ว่า Fade Margin 51 จะได้เกินกว่า ๙๙.๙๙ %

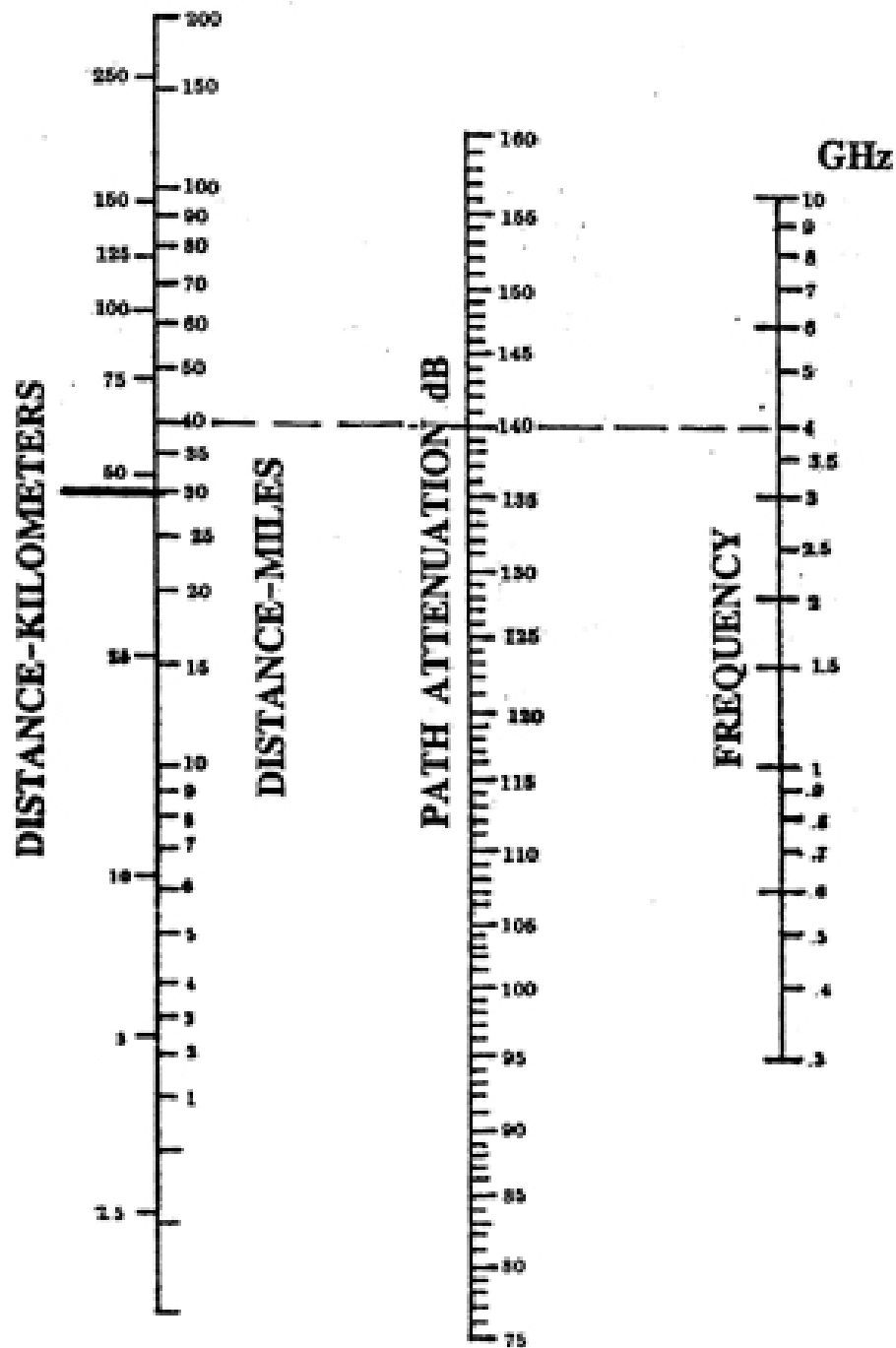
**หมายเหตุ** ถ้าเป็น Dual Diversity เพิ่มเป็น 3 dB Quad Diversity เพิ่มอีก 6 dB

Standard of Reliability ที่ต้องการของระบบไมโครเวฟ ขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งาน นั่นคือ เมื่อใช้เป็น Voice อย่างเดียวต้องมี Reliability ไม่น้อยกว่า ๙๘.๐๐ % โทรพิมพ์ ต้องไม่น้อยกว่า ๙๙.๙๐ % และ Data ต้องไม่ น้อยกว่า ๙๙.๙๙ %



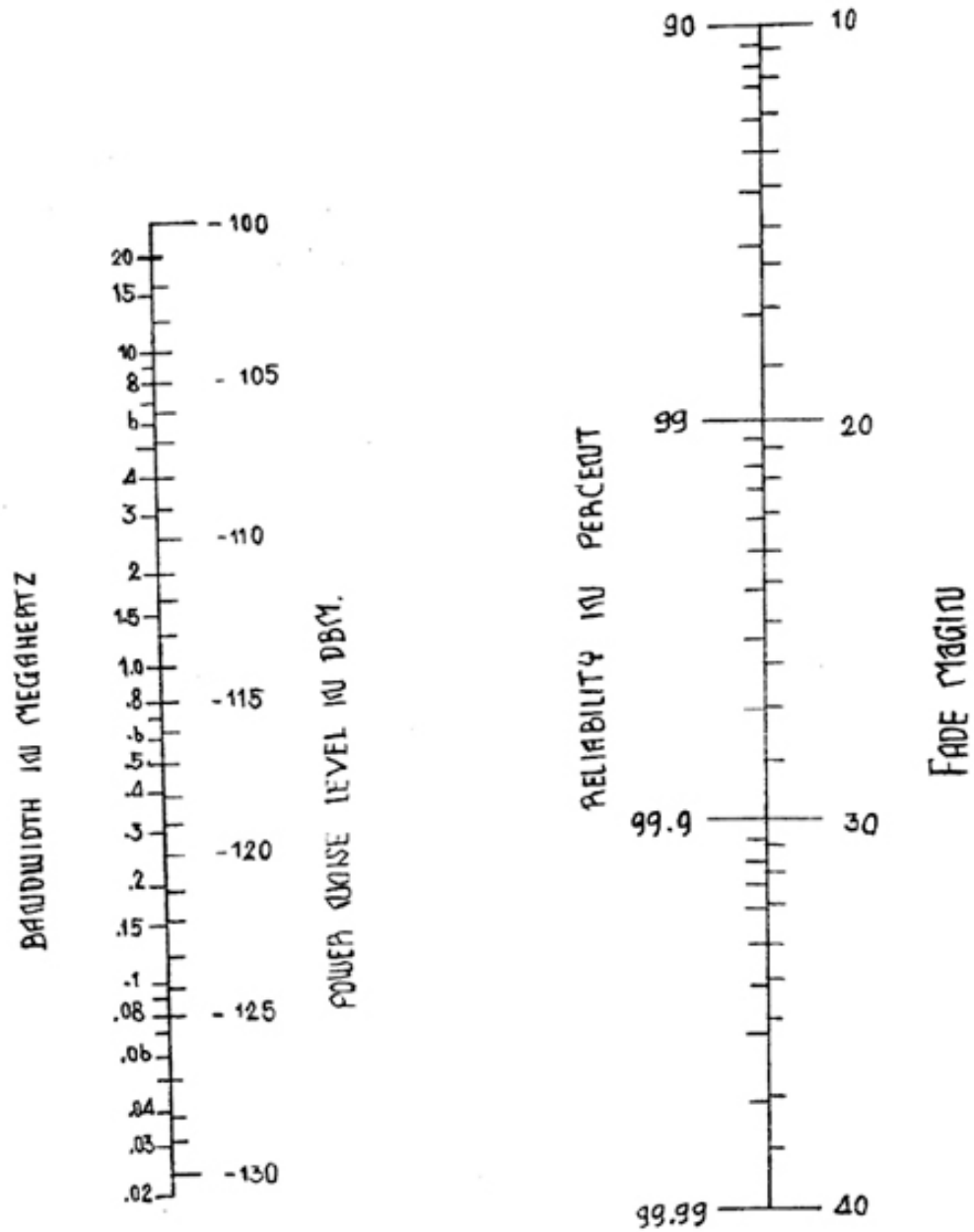
ภาพที่ ๒-๕๔ แสดง ค่า Watt เป็น dBm และการหาค่าเกณฑ์อากาศ





Path attenuation for free space propagation between isotropic antennas

ภาพที่ ๒-๕๕ แสดง ค่าการสูญเสียในอากาศ



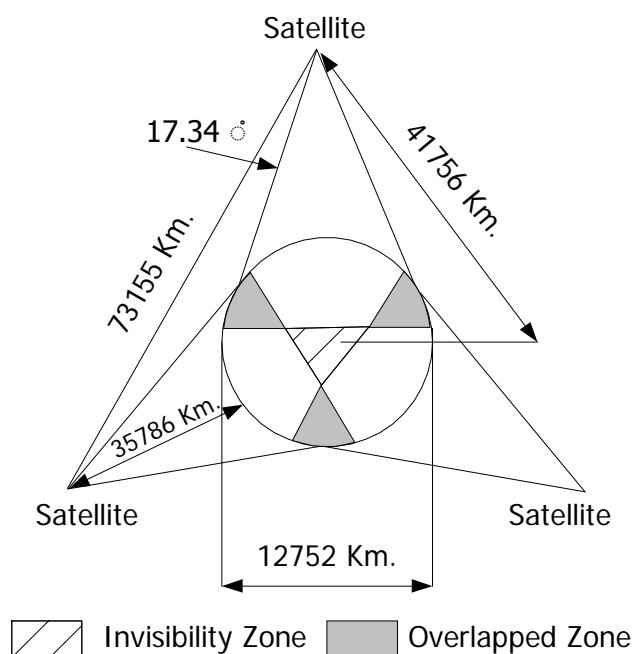
ภาพที่ ๒-๕๖ แสดง ค่าการเปลี่ยนค่าระหว่างความถี่เป็น dBm และแสดง ค่าความเชื่อถือได้

# บทที่ ๓

## ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

### (Satellite Communication System)

ดาวเทียมสื่อสารมีต้นกำเนิดมาจากความคิดของนักเขียนนิยายวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ อาร์เธอร์ ซี. คลาร์ก (Arthur C. Clarke) ซึ่งเขียนบทความเรื่อง “Extra Terrestrial Relays” ลงใน นิตยสาร Wireless World เมื่อ พฤษภาคม ค.ศ. ๑๙๔๕ โดย อาร์เธอร์ ซี. คลาร์ก ได้เสนอแนวความคิด ในการติดต่อสื่อสารรอบโลก โดยใช้สถานีถ่ายทอดสัญญาณในอวกาศที่ความสูงระยะประมาณ ๔๒,๐๐๐ กิโลเมตร จากจุดศูนย์กลางโลก โดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วที่โลกหมุนรอบตัวเอง ๑ รอบ และใช้ เพียง ๓ สถานีก็จะครอบคลุมพื้นที่รอบโลกทั้งหมด ซึ่งตรงกับหลักการของดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า (GEO Stationary Orbit) ในเวลาต่อมา



ภาพที่ ๓-๑ แสดงดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้าจากแนวความคิดของ อาร์เธอร์ ซี. คลาร์ก (Arthur C. Clarke)

#### ๑. ดาวเทียมแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ ๕ ประเภท ดังนี้

##### ๑.๑ ดาวเทียมระหว่างประเทศ (International Communication Satellite)

เป็นดาวเทียมที่ใช้ในกิจการโทรคมนาคมระหว่างประเทศ เช่น ดาวเทียม INTELSAT

##### ๑.๒ ดาวเทียมภายในประเทศหรือภูมิภาค (Domestic and regional Satellite)

เป็นดาวเทียมที่ใช้ภายในแต่ละประเทศหรือภายในกลุ่มประเทศใกล้เคียงในภูมิภาคเดียวกัน เช่น ดาวเทียม PALAPA ของอินโดนีเซีย ASIASAT ของฮ่องกง THAICOM ของไทย เป็นต้น

### ๑.๓ ดาวเทียมทางทหาร (Military Communication Satellite)

เป็นดาวเทียมเพื่อใช้ในทางทหารโดยเฉพาะปกติใช้ย่านความถี่ X-Band (8/7 GHz) เช่น ดาวเทียม DSCS (Defense Satellite Communication System) ของสหรัฐอเมริกาที่ใช้ในการสื่อสารทางทหารทั่วโลก เป็นต้น

### ๑.๔ ดาวเทียมสำหรับการส่งโทรทัศน์และความมุ่งหมายพิเศษ (Broadcast and Special Purpose Satellite)

เป็นดาวเทียมที่ออกแบบมาใช้ทั้งภายในประเทศและภูมิภาค เพื่อส่งสัญญาณโทรทัศน์กำลังสูงมายังจานสายอากาศรับสัญญาณขนาดเล็กของผู้ชมจำนวนมาก นิยมใช้ย่านความถี่ Ku-Band ส่วนดาวเทียมที่ใช้ในความมุ่งหมายพิเศษ เช่น Marisat หรือ Inmarsat ในปัจจุบันใช้ในการนำทาง (Navigation) ติดต่อกับยานพาหนะเคลื่อนที่ทางบก ทางเรือ และทางเครื่องบิน ดาวเทียม Navstar Gps เพื่อกำหนดตำแหน่ง

### ๑.๕ ดาวเทียมเพื่อการทดลอง (Experimental Satellite)

เป็นดาวเทียมที่ใช้ในการทดลองต่างๆ

## ๒. วงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit) สามารถแบ่งได้ดังนี้

### ๒.๑ การแบ่งดาวเทียมแบ่งตามเส้นแบ่งวงโคจร

ดาวเทียมแบ่งตามเส้นทางวงโคจรได้ ๓ แบบ คือ วงโคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตร (Equatorial Orbit) วงโคจรเอียง (Inclined Orbit) ทำมุมกับเส้นศูนย์สูตรและวงโคจรขั้วโลก (Polar Orbit) ตามแนวขั้วโลกเหนือใต้

### ๒.๒ การแบ่งตามรูปร่างลักษณะวงโคจร

การแบ่งประเภทตามรูปร่างลักษณะวงโคจร แบ่งได้เป็น ๒ ลักษณะ คือ วงโคจรวงกลม (Circular Orbit) ซึ่งระยะความสูงจากพื้นโลกใกล้เคียงกันโดยตลอด และวงโคจรรี (Elliptical Orbit) ซึ่งความสูงจากพื้นโลกต่างกันมากโดยระยะห่างจากโลกมากที่สุด เรียก Apogee และระยะห่างจากโลกใกล้สุดเรียก Perigee

### ๒.๓ การแบ่งตามความสูงของวงโคจร

แบ่งประเภทตามความสูงของวงโคจร ได้ ๓ แบบดังนี้

#### ๒.๓.๑ วงโคจรแบบค้างฟ้า (Geostationary Orbit) หรือ GEO

วงโคจรประเภทนี้ดาวเทียมจะลอยอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร ห่างจากพื้นผิวโลกประมาณ ๓๕,๗๘๖ กิโลเมตร มีรอบวงโคจรประมาณ ๒๔ ชั่วโมงต่อรอบ ทำให้เสมือนลอยนิ่งอยู่เหนือ

พื้นเส้นศูนย์ ๓ จุดใดจุดหนึ่ง ประมาณ ๙๐% ของดาวเทียมสื่อสารจะใช้วงโคจรแบบนี้ เช่น ดาวเทียมไทยคม ดาวเทียมอินเทลเซท (INTELSAT) เป็นต้น

ตำแหน่ง - ดาวเทียมค้างฟ้าเสมือนลอยอยู่นิ่งเหนือเส้นศูนย์สูตรตลอดเวลา การบอกตำแหน่งของดาวเทียมจึงบอกด้วยตำแหน่งของ Longitude ที่ดาวเทียมตั้งอยู่ เช่น ดาวเทียมไทยคม 1A อยู่ที่ตำแหน่ง 120°E ดาวเทียมไทยคม 2 78.5°E ดาวเทียม INTELSAT ๗ มี ๖ ดวง อยู่ที่ตำแหน่ง 177°W, 174°W, 53°W, 35.5°W, 16°W, 1°W ตามลำดับ เป็นต้น ตำแหน่งของดาวเทียม GEO แต่ละดวงจะไม่เหมือนกันยกเว้นดวงที่เป็นดาวเทียมสำรอง และตามข้อบังคับระหว่างประเทศ ดาวเทียมแต่ละดวงจะต้องอยู่ห่างกันไม่น้อยกว่า ๒°

Delay - เนื่องจากดาวเทียม GEO อยู่ไกลจากพื้นผิวโลกและดังนั้นไกลจากสถานีภาคพื้นมาก ถ้าคำนวณโดยประมาณๆ ระยะห่างเท่ากับ 36,000 km สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าแสงคือ  $3 \times 10^8$  m/s ดังนั้นสัญญาณจะ ใช้เวลาในการเดินทางไปและกลับจากดาวเทียม (1 hop) ประมาณ 240 ms (Millisecond) ซึ่งค่อนข้างช้ามากในแง่การสื่อสารและเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิด Echo

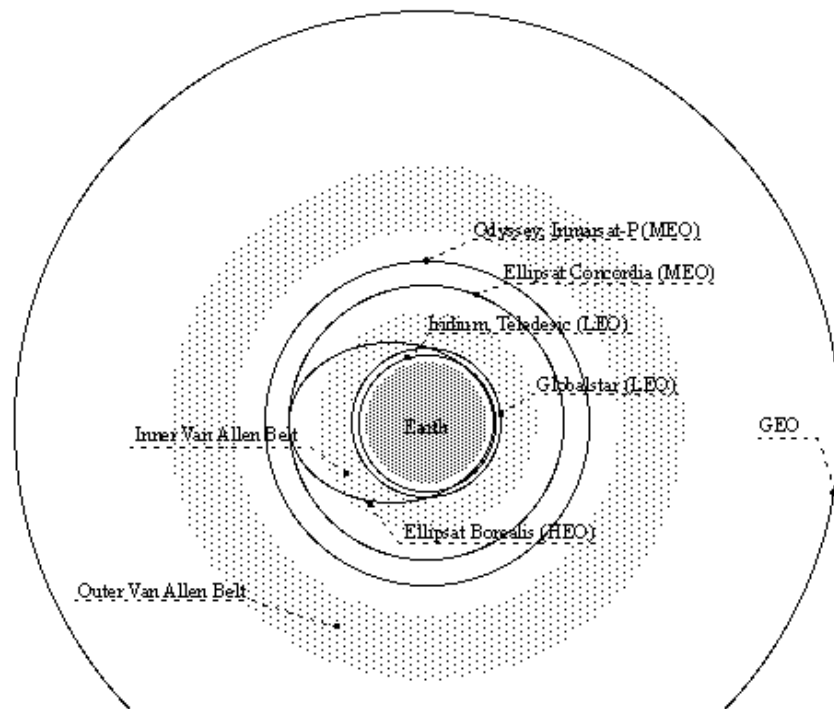


Figure 1.1 Orbital altitudes for Big LEOs and GEO. © Tor E. Wisloff

Figure is to scale (except for the ellipse shape of the Ellipsat Borealis orbit). The Van Allen belts are shown stylised in light grey.

ภาพที่ ๓-๒ แสดงถึงวงโคจรของดาวเทียม

นอกจากดาวเทียมจะเคลื่อนที่ตามวงโคจรแล้ว ดาวเทียมยังเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวในแนววงโคจรของมันเองอีกด้วยเนื่องจากแรงดึงดูดที่ไม่แน่นอนของโลก และแรงดึงดูดจากดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ โดยผู้ควบคุมดาวเทียมจะควบคุมให้ดาวเทียมอยู่ใน Window ขนาด  $\pm 0.10$  จากจุดกึ่งกลางของตำแหน่งดาวเทียมที่ต้องการ

### ๒.๓.๒ วงโคจรระดับกลาง (Medium Earth Orbit) หรือ MEO

ดาวเทียมจะโคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตรหรือโคจรทำมุมกับเส้นศูนย์สูตรที่ความสูงประมาณ ๑๐,๐๐๐ กิโลเมตร เช่น กลุ่มดาวเทียม ICO

### ๒.๓.๓ วงโคจรระดับต่ำ (Low Earth Orbit) หรือ LEO

ดาวเทียมจะโคจรทำมุมกับเส้นศูนย์สูตรประมาณ  $60^{\circ}$  -  $80^{\circ}$  ที่ความสูงประมาณ ๑,๐๐๐ กิโลเมตร เช่น กลุ่มดาวเทียม IREDIUM ดาวเทียมตรวจอากาศ ดาวเทียมถ่ายภาพ เป็นต้น

### ๒.๓.๔ ประเภทของการให้บริการดาวเทียม

ITU (International Telecommunication Union) ได้กำหนดรูปแบบการให้บริการดาวเทียมเป็น ๒ แบบ ได้แก่

#### ๒.๓.๔.๑ ดาวเทียมสำหรับผู้ให้บริการประจำที่ (Fixed Satellite

Service: FSS)

ได้แก่ สถานีภาคพื้นดิน ที่งานดาวเทียมติดตั้งประจำที่ สามารถพบเห็นได้ในกิจการทั่วไป ดาวเทียมหลักที่ให้บริการแบบนี้ เช่น INTELSAT, EUTELSAT, THAICOM เป็นต้น

#### ๒.๓.๕ ดาวเทียมสำหรับผู้ให้บริการเคลื่อนที่ (Mobile Satellite

Service: MSS)

ได้แก่ดาวเทียมที่ใช้สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินติดตั้งอยู่บนยานพาหนะบนบก เรียกดาวเทียม LMS (Land Mobile Satellite), ติดตั้งอยู่บนเครื่องบินเรียกดาวเทียม AMS (Airborne Mobile Satellite) หรือติดตั้งบนเรือดาวเทียมที่ให้บริการแบบนี้เช่น INMARSAT เป็นต้น

## ๓. ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ปัจจัยในการเลือกใช้ความถี่สำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียมประกอบด้วย การลดทอนสัญญาณ Attenuation เมื่อผ่านละอองและไอน้ำ (เมฆ ฝน หิมะ), การขยายสัญญาณ, ขีดความสามารถในการ

รองรับช่องสื่อสาร เป็นต้น สัญญาณที่ส่งไปหาดาวเทียมเรียกว่า Up-link สัญญาณจากดาวเทียมลงมา  
ยังพื้นผิวโลกเรียกว่า Down-link ความถี่ของ Up-link จะมากกว่า Down-link

### ๓.๑ ความถี่ย่าน VHF

สายอากาศมีขนาดเล็ก สภาพอากาศไม่มีผลต่อการสื่อสารแต่รองรับช่องสื่อสารได้น้อยมาก  
ใช้ในการควบคุมดาวเทียม ดาวเทียม ทดลองและดาวเทียมสมัครเล่น

### ๓.๒ ความถี่ย่าน L-Band

ช่วงความถี่ประมาณ 2/1 GHz งานสายอากาศมีขนาดเล็ก ใช้สำหรับสถานีรับ-ส่งสัญญาณ  
เคลื่อนที่ (Mobile Terminal) รับส่งสัญญาณได้ระดับ 10 kbps ประมาณ ๑๐ กว่าช่องสัญญาณ

### ๓.๓ ความถี่ย่าน C-Band Up-Link 5.850-6.425 GHz, Down-Link 3.625-4.2 GHz

เป็นย่านความถี่ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน สำหรับสถานีรับ-ส่งสัญญาณแบบประจำที่ สภาพ  
อากาศมีผลต่อสัญญาณบ้าง สามารถรองรับช่องสื่อสารได้ถึงระดับ 50 Mbps

### ๓.๔ ความถี่ย่าน X-Band Up-Link 7.90-8.40 GHz, Down-Link 7.25-7.75 GHz

สำหรับกิจการด้านทหารและรัฐบาลโดยเฉพาะ สภาพอากาศมีผลต่อสัญญาณบ้างเล็กน้อย  
สามารถรองรับช่องสื่อสารได้ในระดับ 50 Mbps สำหรับสถานีประจำที่

### ๓.๕ ความถี่ย่าน Ku-Band Up-Link 14.0 - 14.5 GHz, Down-Link 10.95 - 12.75 GHz

เริ่มมีการใช้มากในปัจจุบันและใช้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดาวเทียมสื่อสารรุ่นใหม่ทุกดวงจะมีย่าน  
Ku-Band สภาพอากาศมีผลต่อสัญญาณมากต้องมีอุปกรณ์ปรับกำลังขยายของสัญญาณเพื่อรักษาคุณภาพ  
ของสัญญาณ สามารถรองรับช่องสื่อสารได้ในระดับ 100 Mbps เหมาะสำหรับการส่งสัญญาณแบบ  
Broadcast เช่น สัญญาณโทรทัศน์ งานสายอากาศมีกำลังขยายสูง

### ๓.๖ ความถี่ย่าน Ka-Band ย่านความถี่ 30/20 GHz

อยู่ในระหว่างการทดลองใช้งาน สภาพอากาศมีผลต่อคุณภาพของสัญญาณมาก เหมาะ  
สำหรับการรับ-ส่งสัญญาณระหว่างดาวเทียม สามารถรองรับระดับสัญญาณได้เป็น 100 Mbps คาดว่า  
จะเริ่มใช้งานได้ในปีประมาณ ๕ ปี

ซึ่งปัญหาที่พบเกี่ยวกับวงโคจรดาวเทียมนั้นเกิดจาก ในปัจจุบันมีดาวเทียมเป็นจำนวนมาก  
ในอวกาศ ทำให้ ตำแหน่งอาจทับซ้อนกันโดยเฉพาะดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า ดังนั้น ITU จึงกำหนดให้

ดาวเทียมประเภทนี้มีตำแหน่งในวงโคจรให้ห่างกันอย่างน้อย ๒ องศา เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนกัน สำหรับประเทศไทยได้ถูกกำหนดให้อยู่ใกล้กับจีน

นอกจากนี้ ITU ได้จัดสรรและควบคุมการใช้ความถี่ในกิจการต่างๆ ทั้งในประเทศ และระหว่างประเทศ เพื่อไม่ให้เกิดการซับซ้อนและรบกวนกัน ความถี่ที่ใช้กับดาวเทียมจะใช้หลักการเรียกชื่อคล้ายกับที่ใช้ในเรดาร์และไมโครเวฟ แต่ความถี่ใช้งานอาจแตกต่างกันบ้างตามภารกิจและวิธีการใช้ความถี่ เช่น L-Band, C-Band, Ku-Band, X-Band, Ka-Band เป็นต้น ความถี่ที่นิยมใช้กันมากคือย่าน C-band สัญญาณย่านขาขึ้น (Uplink) ใช้ย่านความถี่ 6 GHz และสัญญาณขาลง (Downlink) ใช้ย่านความถี่ 4 GHz จึงนิยมเรียกว่า 6/4 GHz ความถี่ C-Band นี้อาจรบกวนกับการสื่อสารผ่านคลื่นไมโครเวฟบนภาคพื้นดินได้ง่าย อีกความถี่ที่ใช้งานมากคือ Ku-Band ใช้ความถี่ขาขึ้น 12 - 14 GHz และความถี่ขาลง 11 - 12 GHz โดยประมาณซึ่งนิยมใช้ในกิจการส่งสัญญาณโทรทัศน์โดยตรง (Direct Broadcast System: DBS) แต่มีข้อเสียหลักคือ สัญญาณจะถูกลดทอนกำลังจากเมฆฝนค่อนข้างมาก ความถี่ย่าน X-Band (8/7 GHz) ใช้ในกิจการทหารส่วนความถี่ย่าน Ka-Band (40/20 GHz) มีแนวโน้มจะนำมาใช้มากในอนาคตเพื่อแก้ปัญหาความแออัดของความถี่ใช้งาน เช่น โครงการ IP-Star ของบริษัทไทยคม สำหรับความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth) การใช้งานปกติ C-Band กว้าง 500 MHz โดยทั่วไปแบ่งได้ ๑๒ ช่องสัญญาณ (Transponder) กว้างช่องละ 40 MHz ซึ่งเพียงพอในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ได้ ๑ ช่อง หรือส่งสัญญาณเสียงอนาล็อกได้ ๑๕๐๐ ช่องการสื่อสาร หรือสัญญาณโทรทัศน์ข้อมูลขนาด ๑๐ - ๕๐ เมกกะบิต (Megabit) ได้ ความกว้างของแบนด์อาจกว้างขึ้นได้ถึง 1 GHz หรือ 2 GHz เช่นในย่านความถี่ EHF (Ka-Band) ที่จะนำมาใช้ในอนาคต

#### ๔. องค์ประกอบระบบสื่อสารดาวเทียม (Satellite System)

ในระบบการสื่อสารดาวเทียมจะมีองค์ประกอบหลัก ๓ ส่วน คือ ดาวเทียมอยู่ในอวกาศ, ระบบควบคุมและสั่งการ และสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน โดยมีการทำงานง่ายๆ ดังนี้ สถานีภาคพื้นดินจะส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) กำลังส่งสูงผ่านจานสายอากาศไปยังจานสายอากาศไปยังจานสายอากาศและเครื่องบนดาวเทียม ทำการขยายสัญญาณ แปลงความถี่แล้วขยายให้กำลังสูงส่งผ่านจานสายอากาศเป็นสัญญาณขาลง (Downlink) มายังจานสายอากาศเข้าภาครับสถานีภาคพื้นดิน สถานีรับจะทำการขยายสัญญาณแล้วดำเนินการวิธีนำข้อมูลต่างๆ ไปใช้งาน

##### ๔.๑ ดาวเทียม (Satellite)

ดาวเทียมมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ระบบควบคุมตำแหน่งและวงโคจร, ระบบติดตามและสั่งการดาวเทียม (TT&C), ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า, ระบบสื่อสารของดาวเทียมและระบบสายอากาศดาวเทียม



### ๔.๑.๑ ระบบควบคุมตำแหน่งและวงโคจรดาวเทียม

ปกติจะประกอบด้วยมอเตอร์จรวดที่คอยทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนวงโคจรดาวเทียมให้อยู่ในวงโคจรที่ถูกต้อง ไม่ให้เกิดการคลาดเคลื่อนของ Beam มายังตำแหน่งบนพื้นโลกอย่างถูกต้อง ระบบการควบคุมตำแหน่งอาจใช้ตัวดาวเทียมหมุน ที่เรียกว่า Spinners หรือใช้ Momentum Wheels ช่วยวิธีหลังนี้นิยมใช้ในปัจจุบัน เพราะทำให้ลดขนาดแผงโซลาร์เซลล์ลงได้ถึง ๑/๓ เท่า ส่วนระบบควบคุมวงโคจรนั้นเราใช้ Gas Jet ควบคุมวงโคจรให้อยู่ในระนาบเส้นศูนย์สูตร

### ๔.๑.๒ ระบบติดตามและสั่งการดาวเทียม (Telemetry, Tracking and Command :TT&C)

ระบบนี้มีทั้งส่วนที่อยู่บนดาวเทียมและบนพื้นดินทำงานสัมพันธ์กัน โดย Telemetry จะส่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับ (Sensor) สัญญาณควบคุมต่างๆ บนดาวเทียม แล้วส่งกลับมายังสถานีภาคพื้นดิน ระบบ Tracking บนภาคพื้นดินจะติดตามดาวเทียมและรับสัญญาณจากระบบ Telemetry ส่งให้ระบบ Command นำเอาสัญญาณไปประมวลในระบบคอมพิวเตอร์ เป็นสัญญาณสั่งการส่งไปยังดาวเทียม เพื่อปรับแก้ไขตำแหน่งวงโคจรและระบบควบคุมต่างๆ ในตัวดาวเทียมให้ถูกต้อง

### ๔.๑.๓ ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

ดาวเทียมทุกแบบได้รับพลังงานมาจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cells) เพื่อนำไปใช้ในระบบสื่อสารของดาวเทียมโดยเฉพาะภาคส่งพลังงานที่เหลือจะนำไปใช้ในส่วนอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า Housekeeping เพื่อสนับสนุนดาวเทียมให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

### ๔.๑.๔ ระบบสื่อสารดาวเทียม (Payload)

เป็นส่วนประกอบหลักของดาวเทียมสื่อสารระบบอื่นเป็นเพียงส่วนสนับสนุน ระบบนี้จะประกอบด้วยจานสายอากาศที่คอยรับส่งสัญญาณแบนด์กว้าง, ภาครับ-ส่ง และขยายกำลังของสัญญาณ ที่เรียกว่า Transponder ซึ่งเป็นหน่วยรับ-ส่งสัญญาณแต่ละช่องในตัวดาวเทียม

### ๔.๑.๕ ระบบสายอากาศ

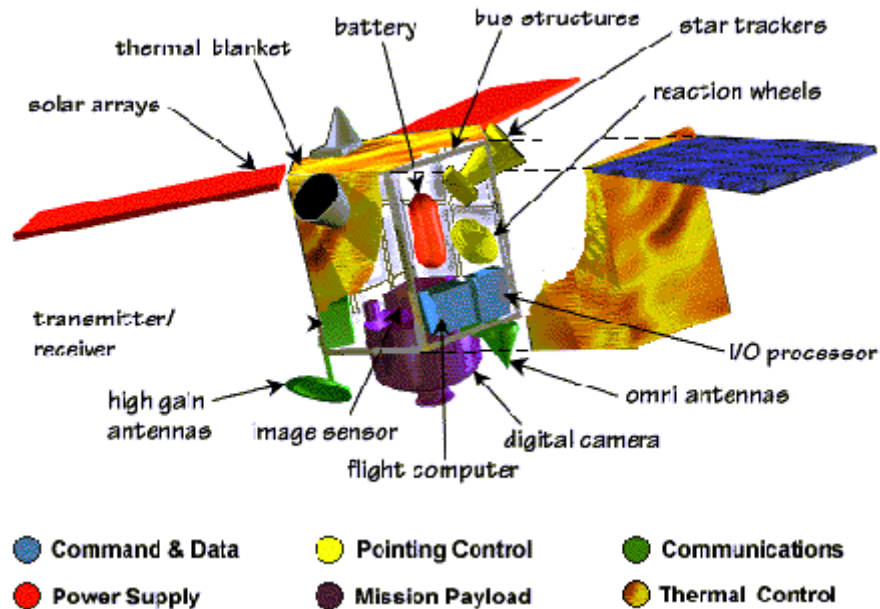
ระบบนี้อาจถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของระบบสื่อสารดาวเทียมโดยแยกออกมาจาก ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ปัจจุบันดาวเทียมมีระบบจานสายอากาศที่ซับซ้อนเพื่อให้สามารถแยก ลำคลื่น (beam) ส่งมาครอบคลุมพื้นโลกในรูปแบบต่างๆ ได้ตามต้องการ

## ๔.๒ ส่วนประกอบหลักของดาวเทียม

ส่วนประกอบหลักของดาวเทียม มี ๒ ส่วน คือ Bus และ Payload ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### ๔.๒.๑ BUS

หมายถึง ส่วนประกอบที่จำเป็นของดาวเทียมที่จะต้องมีเพื่อให้ดาวเทียมทำงานได้ในอวกาศจะประกอบด้วยระบบต่าง ๆ รวม ๖ ระบบ ได้แก่



ภาพที่ ๓-๓ แสดงส่วนประกอบต่างๆของดาวเทียม

#### ๔.๒.๑.๑ ระบบโครงสร้าง หรือ ตัวถังของดาวเทียม (Structure)

- วัสดุทำด้วยสารประกอบของอลูมิเนียมและแมกนีเซียม รวมทั้ง Carbon Fibers สามารถป้องกัน การกระจายของรังสีและการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าในอวกาศที่เรียกว่า พลาสมา (Plasma) ไม่ให้เข้าไปทำความเสียหายกับระบบภายในดาวเทียม ตัวถังของดาวเทียมยังมี ระบบกันความร้อนเพื่อไม่ให้อุณหภูมิ ภายในดาวเทียมสูงหรือต่ำจนเกินกว่าจะทำงานได้

- แหล่งพลังงานความร้อนสูงสุดที่ส่งมายังดาวเทียมคือจากดวงอาทิตย์โดยตรงมีพลังงานสูงถึง ๑๓๕๘ วัตต์ต่อตารางเมตร และจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนพื้นโลกไปยัง ดาวเทียมมีพลังงานรองลงมา ประมาณ ๓๐ เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์โดยตรง

- ตัวถังมีน้ำหนักประมาณร้อยละ ๖ ของน้ำหนักดาวเทียมทั้งหมด

#### ๔.๒.๑.๒ ระบบพลังงาน (Power)

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือโซลาเซลล์ (Solar cell) เป็นแหล่งพลังงานหลัก (Primary Source) ติดตั้งบริเวณผิวด้านนอกของตัวดาวเทียม หรือเป็นแผงยื่นออกมาจากตัว

ดาวเทียม (ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ดาวเทียม) แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้ขับเคลื่อนระบบ ภายในดาวเทียมเซลล์แสงอาทิตย์เดิมนิยมทำจากผลึก Silicon แต่ในปัจจุบันเริ่มเปลี่ยนมาใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากผลึกแกเลียมอะเซไน (GaAs) ที่ให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ได้สูงขึ้นมากจากเดิมประมาณ ๑๖ เปอร์เซ็นต์เป็น ๒๔ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะทำให้ขนาดแผงโซลาร์เซลล์ลดลงโดยให้พลังงานไฟฟ้าเท่าเดิม

- Battery : เป็นแหล่งเก็บพลังงานสำรอง (Secondary Source) ใช้ในกรณี Solar cell ไม่ทำงานเนื่องจากโลกหรือดวงจันทร์บังแสงอาทิตย์ หรือที่เรียกว่า การเกิดคราส (Eclipse) การเกิดคราส มีสาเหตุจากโลกบังแสงอาทิตย์ ดาวเทียมที่อยู่ในวงโคจรค้างฟ้าจะพบการเกิดคราสชนิดนี้ปีละ ๒ ช่วง คือช่วง ประมาณวันที่ ๒๑ มีนาคม ที่เรียกว่า Spring Equinox หรือ Vernal Equinox และ ๒๓ กันยายน ที่เรียกว่า Autumn Equinox ของทุกปี โดยจะเกิดประมาณ ๒๒ วัน ก่อนและหลังวันดังกล่าว หรือประมาณปีละ ๙๐ วัน และการเกิดแต่ละครั้งเป็นเวลาสูงสุดประมาณ ๗๒ นาที ดาวเทียมที่อยู่ในวงโคจรต่ำ (LEO) จะพบการเกิดคราสแบบนี้วันละประมาณ ๑๔-๑๕ ครั้ง และเวลาสูงสุดที่เกิดคราสนี้ขึ้นกับความสูงของวงโคจรดาวเทียม เช่นที่ความสูง ๕๕๐ กิโลเมตรจะมีเวลาคราสสูงสุด ๓๖ นาทีการเกิดคราสเนื่องจากดวงจันทร์ โดยเฉลี่ยดาวเทียมในวงโคจรค้างฟ้าจะเข้าสู่บริเวณเงามืดจากดวงจันทร์ สูงสุดไม่เกิน ๔ ครั้ง ในบางปีอาจไม่เกิดขึ้นเลยก็ได้ และแต่ละครั้งอาจเป็นเวลานานถึง ๒ ชั่วโมง แต่บางดวงอาจเข้าสู่บริเวณคราสสูงกว่า ๒๐ ครั้งต่อปีก็ได้ ดาวเทียมในวงโคจรต่ำได้รับผลของการเกิดคราสจากดวงจันทร์ น้อยเนื่องจากการโคจรรอบโลกที่บ่อยครั้งกว่า ดังนั้นจึงต้องมีแบตเตอรี่จ่ายไฟสำรองขณะเกิดคราส ดาวเทียมค้างฟ้าส่วนใหญ่ใช้แบตเตอรี่ NiH (Nikel Hydrogen 1.15 v/cell) และดาวเทียมวงโคจรต่ำ มักใช้แบตเตอรี่ NiCd (Nikel Cadmium) สำหรับกระสวยอวกาศจะใช้แบตเตอรี่แบบนอก Fuel Cell ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนมาทำปฏิกิริยากันจากให้พลังงานไฟฟ้าแล้ว ยังให้น้ำที่ดื่มได้ออกมาด้วย

#### ๔.๒.๑.๓ ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control)

ขณะดาวเทียมทำงานจะเกิดความร้อนในระบบ รวมทั้งได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ จึงต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิเพื่อกระจายความร้อน (ควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ ๑๐ ถึง ๔๕ องศาเซลเซียส ขณะทำงาน -๓๐ ถึง +๕๕ องศาเซลเซียส ขณะเตรียมการอุ่นเครื่อง)

#### ๔.๒.๑.๔ ระบบอุปกรณ์ขับเคลื่อนดาวเทียมในวงโคจร (In-Orbit Propulsion Equipment)

- ใช้ขับเคลื่อนเปลี่ยนแปลงวงโคจร และรักษาตำแหน่งของดาวเทียม พลังขับเคลื่อนมีแหล่งกำเนิดจาก ๓ หลักการ แบบแรกคือ ใช้ก๊าซเช่นไนโตรเจนอัดบรรจุถังไว้ซึ่งก๊าซ เมื่อเป็นของเหลวจะมีอุณหภูมิต่ำจึงเรียกว่าเป็นแบบ Cold Gas หรือเรียกอีกแบบว่าเป็นตัวขับเคลื่อน

เชื้อเพลิงเดี่ยว (Mono-Propellant Thrusters) เมื่อต้องการใช้งานก็จะเปิดวาล์ว ทำให้ก๊าซพุ่งออกมาเป็นแรงขับเคลื่อน แบบที่สองเรียกว่า Bi-Propellant Thrusters ใช้หลักการทางเคมี ซึ่งอาศัยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหลายชนิดรวมกัน และแบบที่สามใช้หลักการการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวเร่งขับเคลื่อน ประจุไฟฟ้าให้เกิดแรงขับเคลื่อน

- การรักษาตำแหน่งของดาวเทียม จะใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนระดับต่ำ (Low Power Thruster) ๒ - ๓ มิลลินิวตันถึง ๒ - ๓ นิวตัน

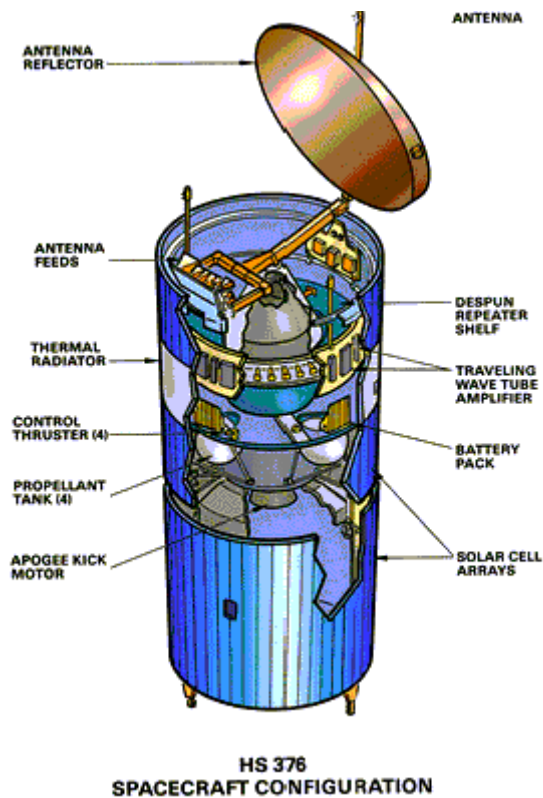
- การเปลี่ยนแปลงหรือย้ายวงโคจรจะใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนระดับกลางและระดับสูง (Medium and High Power Thruster) (๑๐๐ - ๑๐,๐๐๐ นิวตัน) โดยอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกทั่วไปว่า Kick Motor เป็นตัวผลักดัน

- ปริมาณเชื้อเพลิงหรือก๊าซที่บรรจุในดาวเทียม คือ ตัวกำหนดอายุการใช้งานของดาวเทียม (ปกติดาวเทียมมีอายุใช้งานประมาณ ๑๐ - ๑๕ ปี)

#### ๔.๒.๑.๕ ระบบรักษาสมดุลดาวเทียม (Stabilization and Altitude Control)

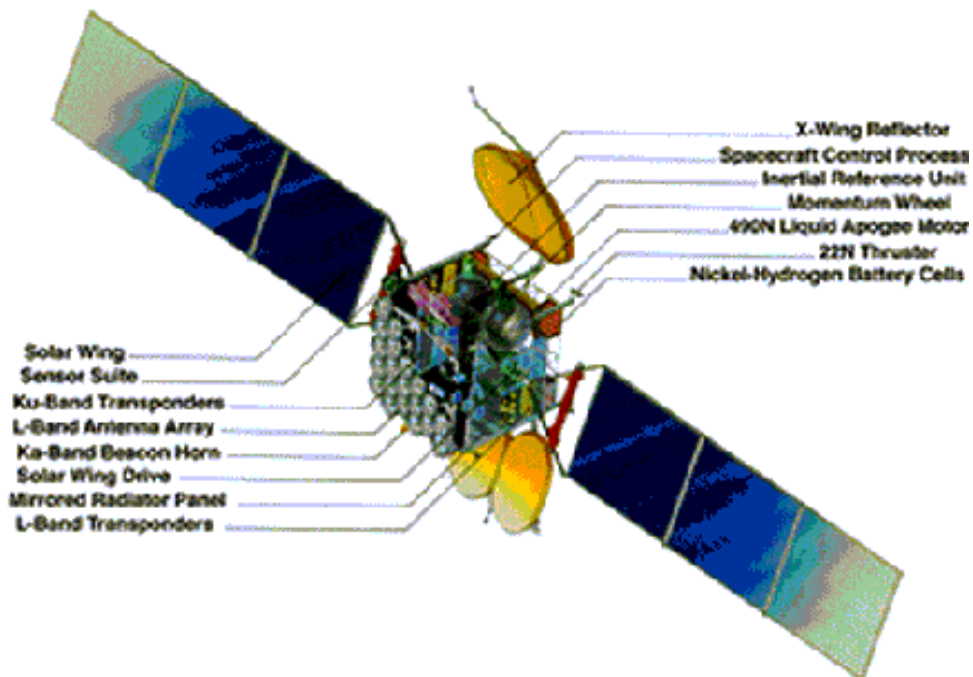
ดาวเทียมโดยทั่วไปจะมีการทรงตัวให้อยู่ในสภาพสมดุล โดยอาศัยระบบการรักษาสมดุลอยู่ ๒ ลักษณะ คือ

- ระบบรักษาสมดุลโดยการหมุน (Spin Stabilization) ดาวเทียมประเภทนี้ถูกออกแบบเป็นรูปทรงกระบอก หมุนรอบแกนของตัวดาวเทียมด้วยอัตราเร็วคงที่ ขณะเดียวกันมอเตอร์จะหมุนชุดฐานสายอากาศในตัวดาวเทียมไปในทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของตัวดาวเทียมในความเร็วที่เท่ากัน ส่งผลให้ดาวเทียมสมดุลและโคจรรอบโลกโดยสามารถรักษาตำแหน่งดาวเทียมให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการด้วย ตัวอย่างดาวเทียมระบบ Spin Stabilization ได้แก่ Thaicom-1A, Thaicom-2 และ Palapa-B4 เป็นต้น



ภาพที่ ๓-๔ แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนดาวเทียม

- ระบบรักษาสมดุลโดยใช้ระบบสามแกน (Three Axis Stabilization หรือ Body Stabilization) นอกจากมีการใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเพื่อรักษาสมดุลของดาวเทียมแล้วยังมีการใช้อุปกรณ์ที่สร้างแรงเพื่อให้ดาวเทียมสมดุลไว้ได้คือ "วงล้อโมเมนตัม" (Momentum Wheels) ซึ่งภายในประกอบ ด้วยมอเตอร์ ๓ ตัวหมุนตั้งฉากกัน การที่จะให้มอเตอร์ตัวใดหมุนเพื่อรักษาสมดุลในแนวแกนใดจะอาศัยการตรวจสอบทิศทางที่ดาวเทียมวางตัวอยู่เสียก่อนอุปกรณ์ตรวจสอบ การวางตัวนี้ เรียกว่าเซนเซอร์ (Sensor) ได้แก่ตัววัดทิศทางและความเร่งสนามแม่เหล็กโลก ตัววัดแสงอินฟราเรดที่ตรวจจับแสงอินฟราเรดที่สะท้อน จากโลก เนื่องจากดาวเทียมที่ใช้การรักษาสมดุลแบบนี้ไม่ต้องอาศัยการหมุนทั้งตัวดาวเทียม จึงทำให้สามารถ ติดตั้ง แผงรับแสงอาทิตย์ยื่นออกมาเช่น Thaicom-3 ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น



ภาพที่ ๓-๕ แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนดาวเทียม

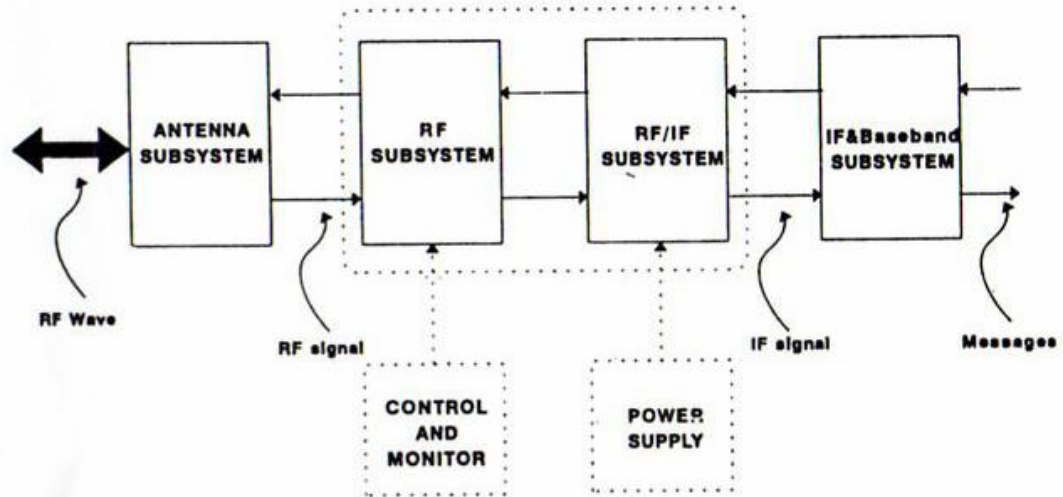
#### ๔.๒.๑.๖ ระบบติดตามและควบคุม (Tracking Telemetry and Command TT&C)

ระบบดังกล่าวทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมจากสถานีภาคพื้นดิน เพื่อเปลี่ยนแปลงการทำงานของอุปกรณ์ (Mode of Operation) รวมทั้งส่งผลข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการทำงานของดาวเทียมและการทำงานของ อุปกรณ์กลับไปยังสถานีภาคพื้นดิน ตลอดจนวัดระยะทางระหว่างภาคพื้นกับตัวดาวเทียม และความเร็ว เพื่อกำหนดตำแหน่งที่อยู่ของดาวเทียม

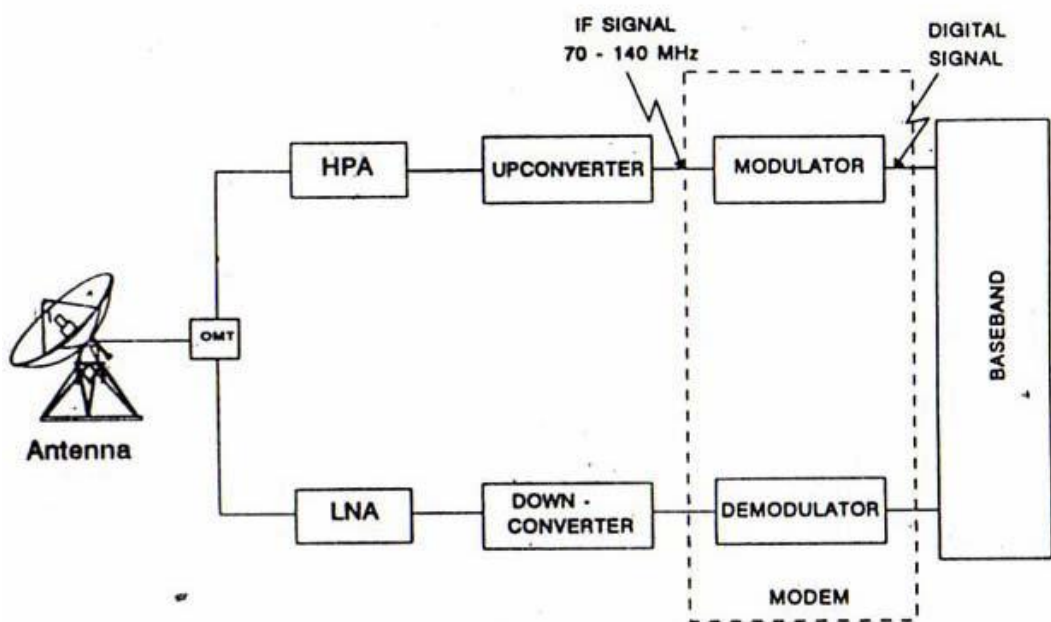
#### ๔.๓ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (Satellite Earth Station)

จะอธิบายถึงส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียมอีกส่วนหนึ่งได้แก่ ภาคพื้นดิน (Ground Segment) โดยจะอธิบายถึงส่วนประกอบ ที่สำคัญของสถานีภาคพื้นดิน สำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียมซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของจานสายอากาศ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ความถี่วิทยุที่สำคัญ ที่ทำหน้าที่ติดต่อกับดาวเทียมและเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานเช่นระบบสื่อสารข้อมูล เครือข่ายคอมพิวเตอร์ระบบโทรศัพท์ หรือระบบถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ เป็นต้น

## MAJOR SUBSYSTEM of EARTH STATION



ภาพที่ ๓-๖ Block Diagram ของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินโดยทั่วไป



Basic element of a small satellite earth station

ภาพที่ ๓-๗ Block Diagram ของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินโดยทั่วไป

## ๔.๓.๑ โครงสร้างของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน แบ่งได้เป็น ๔ ส่วน

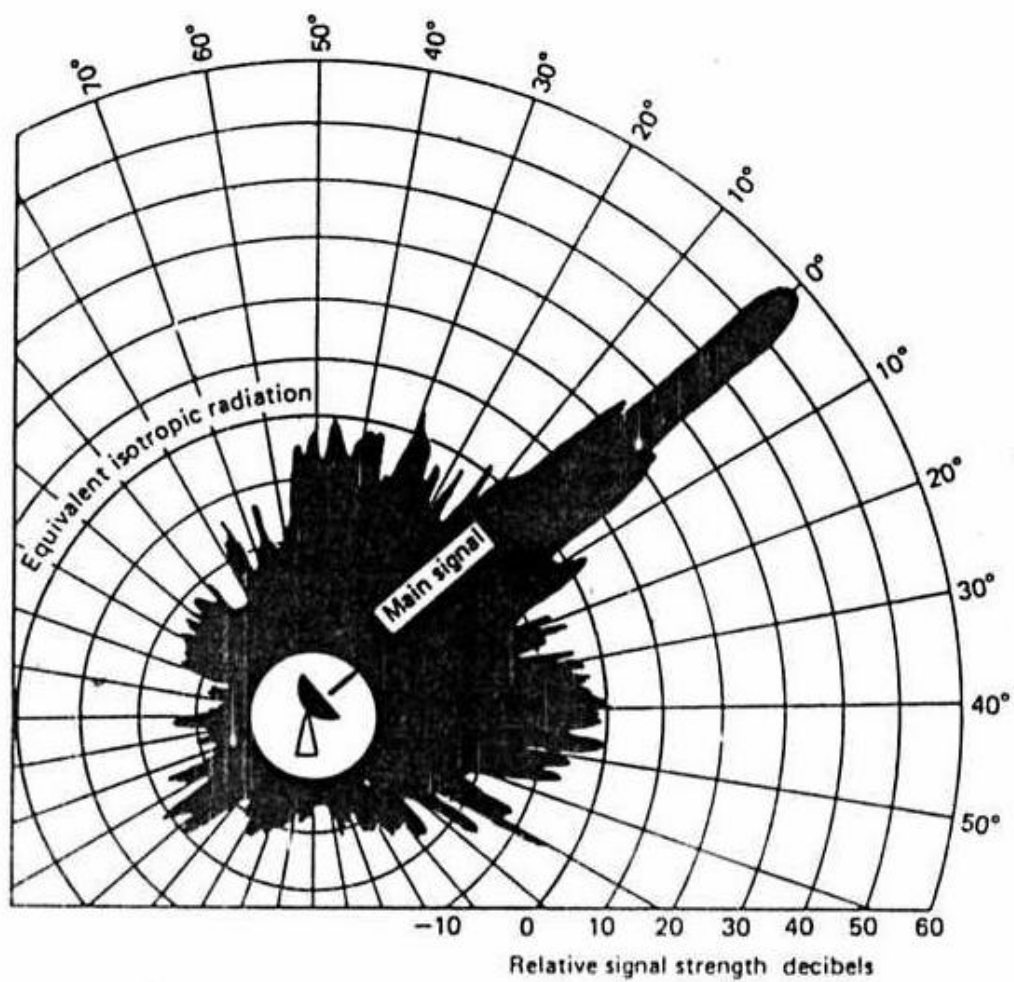
หลักๆ คือ

### ๔.๓.๑.๑ อุปกรณ์จานสายอากาศ (Antenna Subsystem)

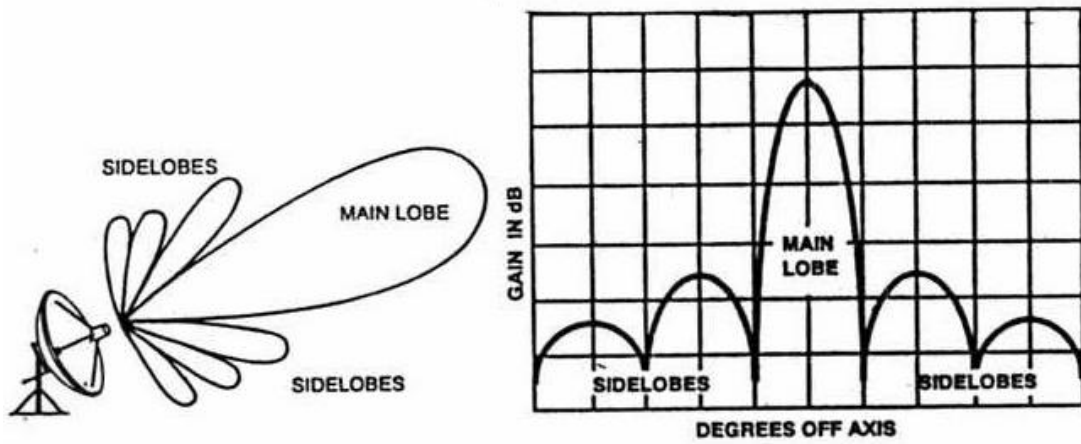
จานสายอากาศซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นส่วนสำคัญ สำหรับการรับส่งสัญญาณอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณที่ส่งขึ้นดาวเทียมต้องถูกส่งขึ้นไปเป็นลำที่แคบตรงไปยังตำแหน่งตัวดาวเทียมได้ถูกต้อง จานสายอากาศต้องมีความสามารถรับ-ส่งสัญญาณจากดาวเทียมได้พลังงานที่สูงพอสำหรับการใช้งานในภาครับด้วย จานสายอากาศนี้จะต้องถูกออกแบบให้มีสัญญาณรบกวนต่ำและต้องมีสัญญาณที่แผ่ออกด้านข้างของจาน (Side Lobe) ต่ำเพื่อไม่ให้รบกวนดาวเทียมดวงที่อยู่ใกล้กัน

จานสายอากาศ (Antenna) ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นสัญญาณขาขึ้นไปยังดาวเทียมและทำหน้าที่รับคลื่นสัญญาณขาลงมาเข้าเครื่องรับจานสายอากาศที่ดีต้องมีคุณสมบัติอัตราขยายกำลังสูง, ลำคลื่น (Beamwidth) แคบ, ลำคลื่นข้าง (Sidelobe) ต่ำ, ค่า Noise Temperature ต่ำ และมีความเที่ยงตรงสูงสามารถปรับทิศทางไปยังตำแหน่งดาวเทียมได้ตามต้องการ ปกตินิยมใช้สายอากาศแบบพาราโบลิกเป็นตัวสะท้อนสัญญาณ (Reflector) เพื่อให้รวมลำคลื่นได้แคบขนาดของจานสายอากาศโดยทั่วไปขึ้นกับความถี่ใช้งานความถี่ยิ่งสูงขนาดจานสายอากาศยิ่งเล็ก เช่น จานสายอากาศย่านความถี่ Ku-Band จะเล็กกว่าย่านความถี่ C-Band นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราขยายกำลัง (Gain) ของสายอากาศ ถ้าต้องการอัตราขยายกำลังขยายสูง จานสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถติดตามตำแหน่งดาวเทียมได้แม่นยำ จะต้องมีระบบควบคุมการหันของจานสายอากาศ ทั้งทางมุมกวาด (Azimuth) และทางมุมก้ม-เงย (Elevation) อย่างดี ค่า G/T หรือ Gain ต่อ Thermal Noise จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของจานสายอากาศ





ภาพที่ ๓-๘ การแผ่กำลังงานของสัญญาณจากจานสายอากาศที่แสดง Beam สัญญาณหลัก



*Antenna sidelobes*

ภาพที่ ๓-๙ การแผ่กำลังงานของสัญญาณจากจานสายอากาศที่แสดง  
Beam Main Lobe And Sidelobe

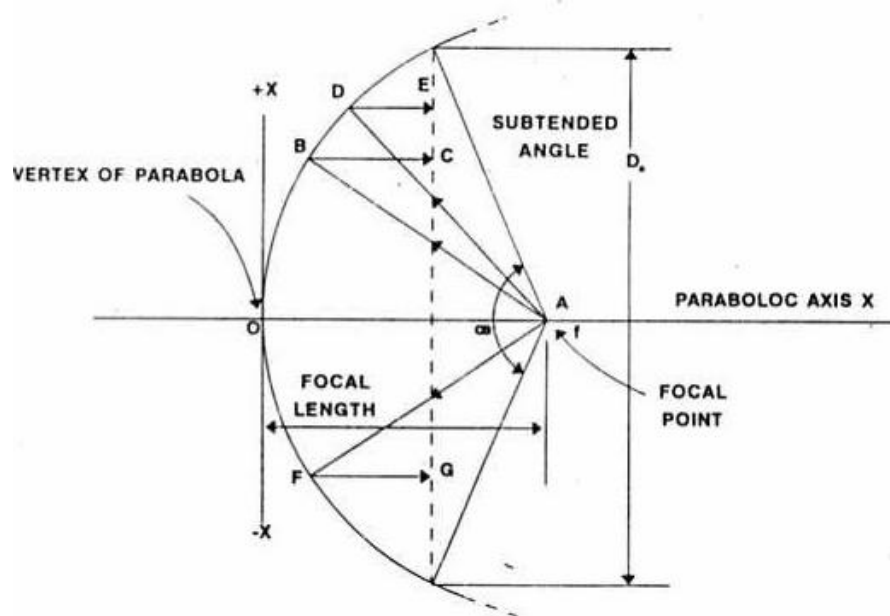
แม้ว่าดาวเทียมจะเคลื่อนสำหรับจานสายอากาศขนาดใหญ่ ควรจะมีเครื่องมือในการติดตามการเคลื่อนที่ของดาวเทียม (Tracking System) เนื่องจากปกติดาวเทียมจะมี เคลื่อนที่ไปมาตลอดเวลาซึ่งถ้าจานสายอากาศขนาดใหญ่มีลำสัญญาณแคบและคมมาก จะมีผลต่อการ รับ-ส่งสัญญาณไปเล็กน้อย



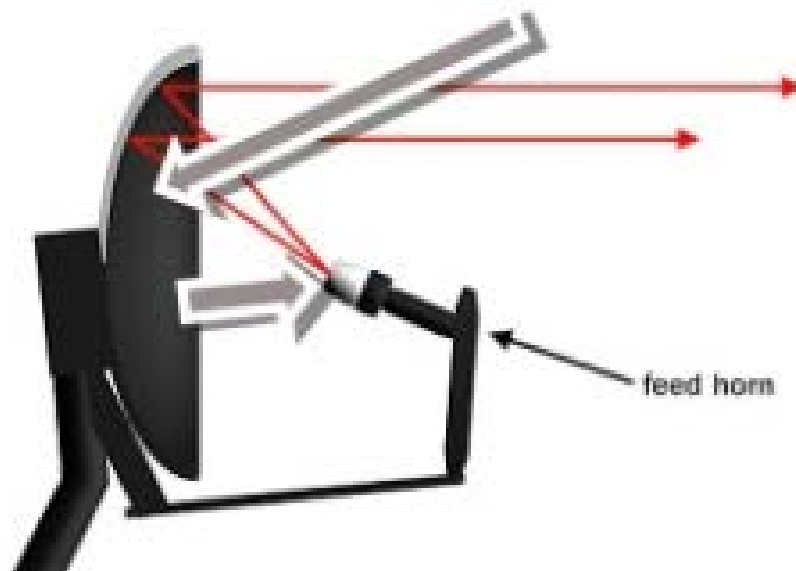
ภาพที่ ๓-๑๐ แสดงจานสายอากาศสำหรับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน

ลักษณะทั่วไป ของจานสายอากาศที่แสดงในรูป ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ ๓ ส่วนคือ

- แผ่นสะท้อนคลื่น (Reflector) มีลักษณะเป็น Parabolic ซึ่งจะทำหน้าที่สะท้อนคลื่นที่รับได้รวมเข้าไว้ที่จุดโฟกัสในด้านรับ และทำหน้าที่สะท้อนคลื่นที่ส่งออกจากจุดโฟกัสเป็นลำออกไปยังดาวเทียม



ภาพที่ ๓-๑๑ แสดงการสะท้อนสัญญาณผ่าน Reflector



ภาพที่ ๓-๑๒ แสดงโครงสร้างของ Antenna Feed

- อุปกรณ์รับและป้อนสัญญาณ (Antenna Feed) เป็นอุปกรณ์ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งจุดโฟกัส ของจานสายอากาศ ซึ่งทำหน้าที่กระจายคลื่นที่มาจากเครื่องส่งไปยังแผ่นสะท้อนคลื่นและรับคลื่น ที่สะท้อนมาจาก แผ่นสะท้อนคลื่นเข้าภายในตัว Feed ซึ่งภายใน Feed Horn จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า OMT

(Orthogonal Mode Transducer) ซึ่งทำหน้าที่แยกคลื่นด้านรับและด้านส่งออกจากกัน เพื่อป้องกันมิให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณในด้านส่ง และสัญญาณในด้านรับจะมี Polarization ที่ต่างกัน เช่น ในการส่งสัญญาณ Linear Polarization สัญญาณจะถูกส่งขึ้นตัวดาวเทียม โดยใช้ Horizontal Polarization และรับสัญญาณจากดาวเทียมในลักษณะ Vertical Polarization สำหรับกรณีที่เรากำลังใช้งานช่องสัญญาณดาวเทียม (Transponder) แบบ Vertical Polarization เป็นต้น

### ๔.๓.๑.๒ ภาคอุปกรณ์สัญญาณวิทยุ (Radio Frequency RF

#### Subsystem)

การสื่อสารผ่านดาวเทียมทำได้โดยใช้คลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่าง ๆ เช่น ย่านความถี่ C-Band ใช้สัญญาณที่มีความถี่ 6/4 GHz เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ต้องสามารถใช้งานได้ ในย่านความถี่นั้นๆ เป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ในภาคนี้ จะทำหน้าที่รับส่งสัญญาณความถี่วิทยุที่ใช้งานเป็น

- Low Noise Amplifier (LNA) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณที่รับจากดาวเทียม ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะมีกำลังงานเมื่อรับได้ที่งานต่ำมาก ดังนั้นสัญญาณดังกล่าวต้องได้รับการขยายกำลังขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังภาครับอื่นต่อไป เครื่องขยายในส่วนนี้ต้องมีสัญญาณรบกวนต่ำสามารถขยายส่วนที่เป็นสัญญาณอย่างแท้จริงและตัดส่วนที่เป็นคลื่นรบกวนออกไป ชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้สร้าง Low Noise Amplifier ใน ปัจจุบันคือ GaAs FET Transister ซึ่งสามารถขยายสัญญาณในย่านความถี่ C-Band 3.7-4.2 GHz หรือความถี่ย่าน Ku-Band ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Low Noise Amplifier เป็นส่วนประกอบที่มีผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่สถานีภาคพื้นดิน โดยทั่วไป Low Noise Amplifier จะมีประสิทธิภาพในการรับดีกว่าการพัฒนาประสิทธิภาพของจานสายอากาศและเทคนิคของ Feed ทำให้จานสายอากาศมีอัตราการขยายสัญญาณสูงขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีค่าที่ต่ำมากสามารถใช้งานได้สภาวะแวดล้อมปกติโดยไม่ต้องมีการให้ความเย็นแก่ตัวอุปกรณ์ LNA เป็นพิเศษสำหรับสถานีภาคพื้นดินโดยทั่วไปจะติดตั้ง LNA ที่ตัว Feed โดยตรงบนสายอากาศ

- High Power Amplifier (HPA) เครื่องขยายสัญญาณกำลังสูง สำหรับสถานีภาคพื้นดิน เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ขยายสัญญาณวิทยุย่านความถี่ที่ดาวเทียมใช้งานเพื่อส่งขึ้นไปยังดาวเทียม เครื่องขยายสัญญาณชนิดนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกันตัวอย่าง เช่น

TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier) ซึ่งใช้หลักการของการถ่ายเทพลังงานที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นภายในหลอดสุญญากาศชนิดพิเศษ (TWT) โดยสัญญาณที่ถูกขยายนั้นถูกส่งผ่านเข้าไปยังหลอด TWT โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Helix ชุดขยายสัญญาณชนิดนี้จะใช้งานกับสถานีภาคพื้นดินทั่วไป ที่มีกำลังส่งระหว่าง 50 - 500 Watts

Klystron Amplifier เป็นเครื่องขยายกำลังสูง เช่นเดียวกับ TWTA แต่ให้กำลังอัตราการขยายสูงกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ให้ความกว้างแถบคลื่นความถี่ได้แคบกว่าเหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงความถี่เช่น สถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ เป็นต้น เครื่องขยายชนิดนี้มีกำลังส่ง 1 - 3 kWatts

Solid State Power Amplifier (SSPA) เป็นเครื่องขยายชนิดที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด GaAs FET Transistor ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการขยายที่สูงกว่า TWTA มาก แต่มีข้อเสียที่ไม่สามารถสร้างให้มีกำลังสูงๆ ได้นิยมนำมาใช้กับสถานีภาคพื้นดินขนาดเล็กอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ภาคขยายกำลังโดยหลอด Klystron จะให้กำลังขยายค่อนข้างสูง แต่ค่อนข้างยุ่งยากในการใช้งาน แบบ Solid State ที่เรียกว่า SSPA (Solid State Power Amplifier) ให้กำลังขยายไม่สูงนักแต่สะดวกในการใช้งาน ส่วนภาคขยายปานกลางและมีใช้งานมากพอสมควร

#### ๔.๓.๑.๓ ภาคอุปกรณ์แปลงสัญญาณวิทยุ (RF/IF Subsystem)

ประกอบด้วยอุปกรณ์ ๒ ส่วนด้วยกัน คือ

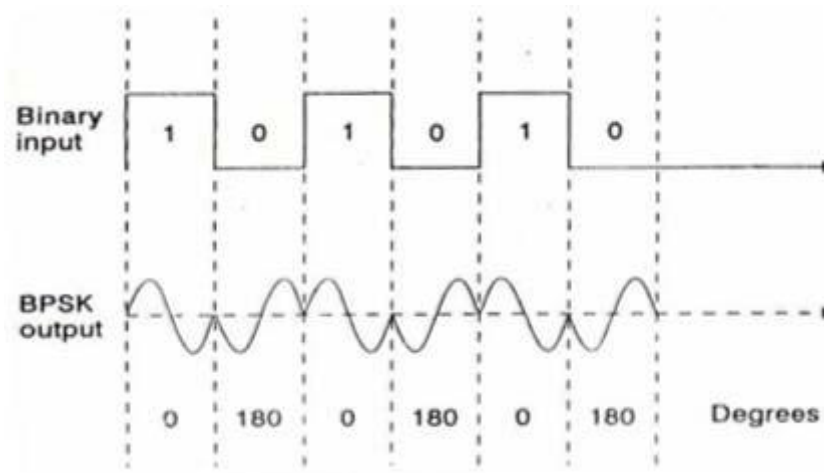
- UP Converter ที่หน้าที่ภาคแปลงความถี่ขาขึ้น ทำหน้าที่แปลงความถี่ IF ให้เป็นความถี่ RF ก่อนส่งอากาศ โดยแปลงความถี่ย่าน IF (70/140 MHz) ซึ่งรับจาก Satellite Modem ให้เป็นความถี่ย่านที่ใช้งานกับระบบดาวเทียมต่าง ๆ เช่นให้เป็นความถี่ C-Band (5925-6425 MHz) สำหรับดาวเทียมย่าน C-Band จากนั้นสัญญาณที่ได้รับการแปลงความถี่แล้วจะถูกส่งต่อไปให้ภาคขยายสัญญาณย่านความถี่สูงเพื่อ ส่งสัญญาณไปยังตัวดาวเทียมต่อไป

- Down Converter ทำหน้าที่แปลงความถี่ของสัญญาณที่ได้รับได้จาก Low Noise Amplifier (LNA) ซึ่งเป็นย่านความถี่ของดาวเทียม เช่นย่าน C-Band (3700-4200 MHz) ไปเป็น ความถี่ย่าน IF (70/140 MHz) เพื่อส่งต่อไปแก่ภาค Demod ของ Satellite Modem ต่อไป

#### ๔.๓.๑.๔ อุปกรณ์ MODEM (Modulation/Demodulation)

ส่วนประกอบของสถานีภาคพื้นดิน Modulation/Demodulation ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่ต้องการส่งผ่านระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมให้อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นวิทยุ Modulation เพื่อส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังดาวเทียมและในทางกลับกันก็ทำการแปลงสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีข้อมูลผสมอยู่ให้ได้เป็นข้อมูลออกมา Demodulation เพื่อนำไปใช้งานต่อไป สำหรับสถานีดาวเทียมในปัจจุบันจะทำงานโดยรับข้อมูลที่เป็นดิจิทัล (Digital) ที่เราเรียกว่าสัญญาณ Baseband ข้อมูลข่าวสารที่ผู้ใช้ต้องการส่งผ่านสถานีดาวเทียมระบบดิจิทัลนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นข้อมูลดิจิทัล เช่น สัญญาณเสียงระบบโทรศัพท์หรือเสียงสำหรับสถานีวิทยุ สัญญาณภาพ เป็นต้นการที่จะนำสัญญาณ Baseband ซึ่งอยู่ในรูปของ Digital มาส่งระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมจะต้องทำการผสมคลื่นพาหะ (Carrier) เพื่อให้อยู่ในรูปสัญญาณวิทยุ Analog ก่อน จึงส่งผ่านไปในภาค UP/Down Converter และภาคขยายสัญญาณเพื่อส่งไปยังดาวเทียมต่อไป ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นนิยมใช้วิธีการมอดูเลต Phase Modulation หรือ Phase Shift Keying (PSK) สัญญาณที่ส่งเข้าเพื่อทำการมอดูเลต จะเป็น Binary และ Output มีการจำกัดจำนวน Phase ของสัญญาณด้วยการ Modulation แบบ PSK ที่นิยมใช้ในการสื่อสารดาวเทียมในปัจจุบันมี ๒ แบบคือ

- Binary Phase Shift Keying (BPSK) หมายถึง การแปลงข้อมูลให้เป็นสัญญาณวิทยุ โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นพาห่ที่มีความเป็นไปได้ของ ๒ เฟส นั่นคือผลของเฟส ๑ จะเทียบได้กับบิต ๑ และเฟสที่เหลือเทียบได้กับบิต ๐ ดังนั้นเฟสของสัญญาณที่ได้ จะกลับกันอยู่ ๑๘๐ หรือเราจะเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า Phase Reversal Keying (PRK)



ภาพที่ ๓-๑๓ แสดงการ Modulation แบบ BPSK

จากรูปที่ ๓-๑๓ เป็นการเทียบเฟสกับเวลา ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสเปกตรัมที่ได้จากการมอดูเลตจะเหมือนกับสัญญาณ Double-sideband Suppressed Carrier ซึ่งความถี่ด้านสูงและด้านต่ำจะแยกจากความถี่คลื่นพาห่ เป็น จำนวนเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราความเร็วต่อบิต (Bit) ดังนั้นความต้องการ (Bandwidth) สูงสุดที่ออกจาก Modulator จะเท่ากับอัตราความเร็ว Input bit Rate

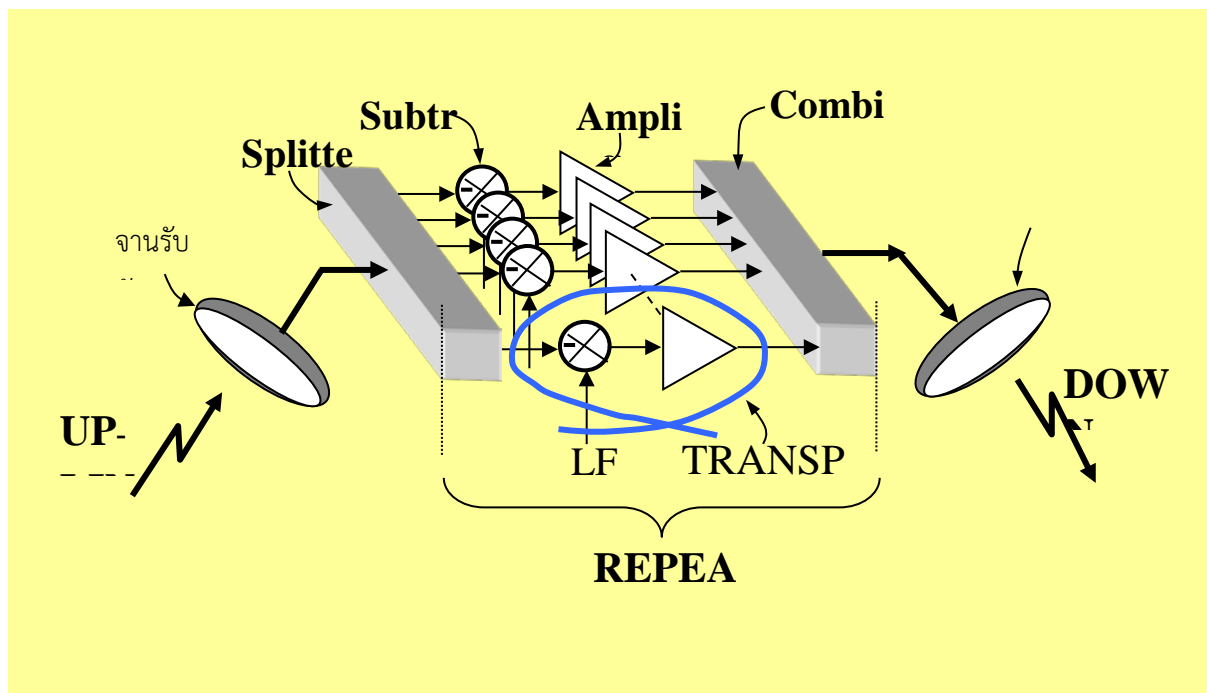
- Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) QPSK เป็นการ Encode แบบ M-ary Encoding Technique ดังนั้น QPSK คือ กระบวนการเข้าข้อมูลบิตต่อครั้ง และสร้าง ๑ ใน ๔ ที่เป็นไปได้ของสถานะเฟสสำหรับคลื่นพาห่คือทุก ๆ ๒ บิต ที่ผ่านเข้าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคลื่นพาห่ที่ออกจาก Modulation ๑ ครั้ง (อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ Output จะเป็นครึ่งหนึ่งของ Input) ในการใช้งานจริง Satellite Modem ส่วนใหญ่จะรวม BPSK และ QPSK ไว้ด้วยกันซึ่งการ Modulate แบบ BPSK จะใช้ Bandwidth บนช่อง Transponder ที่มากกว่าใช้วิธีการมอดูเลตแบบ QPSK แต่จะใช้กำลังงาน (Power) บน Transponder ที่น้อยกว่าดังนั้นเราสามารถที่จะเลือกใช้การ มอดูเลตแบบใดแบบหนึ่งที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ ด้วยการออกแบบสถานีดาวเทียมที่เหมาะสมตัวอย่างเช่น วงจรสื่อสารดาวเทียมที่มีความเร็วของข้อมูลที่ 64 kbps ถ้าใช้การมอดูเลตแบบ BPSK จะใช้ Bandwidth บน Transponder 200 kHz แต่ถ้าจะใช้การมอดูเลตแบบ QPSK จะใช้ Bandwidth เพียง 100 kHz เป็นต้น

## ๕. การทำงานของดาวเทียม

การทำงานของดาวเทียมสื่อสารแบ่งออกเป็น ๔ ขั้นตอนด้วยกัน คือ รับสัญญาณ แปลงสัญญาณลงขยายสัญญาณและส่งสัญญาณกลับลงมายังพื้นผิวโลก

การรับ-ส่งสัญญาณ งานสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณจะเป็นงานสายอากาศเดียวกัน ในภาครับงานสายอากาศจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณก่อนที่จะส่งต่อไปยังส่วนที่เรียกว่า Repeater และในภาคส่งงานสายอากาศจะรับสัญญาณต่อมาจาก Repeater แล้วขยายสัญญาณก่อนที่จะส่งลงมายังพื้นผิวโลกต่อไป รายละเอียดเพิ่มเติมการทำงานของงานสายอากาศดูในหัวข้อ งานสายอากาศ (Antenna)

ถึงแม้ว่าการทำงานทั่วไปของงานสายอากาศจะเหมือนกัน แต่โดยปกติแล้วงานสายอากาศของดาวเทียมสื่อสารมักจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Beam-Forming ในการกำหนดสัญญาณให้มีพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในลักษณะที่ต้องการเพื่อให้การใช้พลังงานในการส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพมากที่สุด



ภาพที่ ๓-๑๔ แสดงการทำงานของดาวเทียม

Transponder หลังจากที่ได้รับสัญญาณถูกขยายโดยงานสายอากาศแล้ว สัญญาณก็จะถูกส่งต่อมายัง Repeater ซึ่งอุปกรณ์ Repeater ประกอบด้วย Splitter, Transponder, และ Combiner

**Repeater** สัญญาณที่เข้าใน Repeater ก่อนอื่นจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามความถี่โดยอุปกรณ์ Splitter หลังจากนั้นสัญญาณแต่ละส่วนก็จะถูกส่งเข้าไปยัง Transponder โดย Transponder

แต่ละตัวจะรับผิดชอบความถี่ในช่วงที่ถูกกำหนดไว้แล้ว เช่น Transponder ตัวที่ ๑ รับผิดชอบความถี่ตั้งแต่ 5250 - 5286 MHz, Transponder ตัวที่ ๒ รับผิดชอบความถี่ตั้งแต่ 5288 - 5324 MHz เป็นต้น สัญญาณที่ออกมาจาก Transponder แต่ละตัวจะถูกนำมารวมกันอีกครั้งโดย Combiner ก่อนจะส่งไปยังจานสายอากาศและถูกส่งลงมายังพื้นผิวโลกต่อไป ในอุปกรณ์ Repeater แต่ละชุดจะประกอบด้วย Transponder หลายตัว และในดาวเทียมดวงหนึ่งๆอาจจะมี Repeater มากกว่า ๑ ชุด เช่น ดาวเทียมไทยคม ๓ มี Repeater สำหรับ C-Band “Global Beam” ๑ ชุด ประกอบด้วย Transponder ๔ ตัว มี Repeater สำหรับ C-Band “Regional Beam” ๑ ชุดประกอบด้วย Transponder ๒๔ ตัว และมี Repeater สำหรับ Ku-Band ๑๒ ชุด เป็นต้น

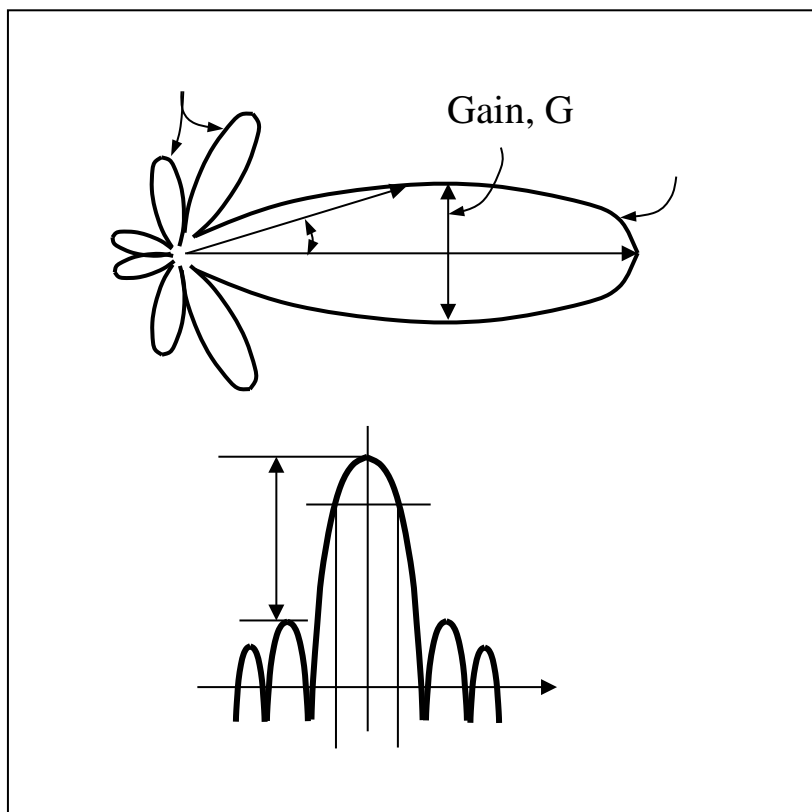
**Transponder** – Transponder ตัวหนึ่งๆ จะรับผิดชอบช่วง Bandwidth ที่แน่นอน โดยปกติ Transponder ย่าน C-Band รุ่นเก่าจะรองรับความกว้าง Bandwidth ขนาด 24 MHz รุ่นใหม่ๆจะรองรับได้ 36 MHz ส่วน Ku-Band Transponder จะรองรับความกว้าง Bandwidth 56 MHz เป็นต้น เมื่อสัญญาณ Up-link เข้ามาใน Transponder ก่อนอื่นจะถูกลดความถี่ลงโดยนำไปลบกับความถี่ Local Frequency (LF) ในย่าน C-Band LF จะคงที่เท่ากับ 2225 MHz ใน Ku-Band ค่า LF จะเปลี่ยนไปในแต่ละ Transponder การลดความถี่ของสัญญาณก็เพื่อไม่ให้สัญญาณ Up-link และ Down-link กวนกันและเพื่อให้ประสิทธิภาพในการขยายสัญญาณดีขึ้น จากนั้นสัญญาณที่ถูกลดความถี่แล้วจะถูกขยายโดย RF Amplifier กำลังขยายของ RF Amplifier จะอยู่ที่ประมาณ 30 - 50 dB

### ๕.๑ จานสายอากาศ (Antenna Dish)

คุณลักษณะต่างๆ ของจานสายอากาศต่อไปนี้ เหมือนกันทั้งการรับและการส่งสัญญาณ ลักษณะกำลังขยายของจานสายอากาศ (Antenna Pattern) ของจานสายอากาศแบบ Parabolic ทุกประเภทจะมีลักษณะคล้ายกันไม่ว่าจะเป็นจานสายอากาศของสถานีภาคพื้นหรือจานสายอากาศของดาวเทียมในอวกาศ แต่อาจแตกต่างกันบ้างขึ้นอยู่กับขนาดของจานสายอากาศ ประเภทของวัสดุที่ใช้ ตำแหน่งและประเภทของ Feeder เป็นต้น

Antenna Beamwidth ความกว้าง Beamwidth ของจานสายอากาศจะแปรผกผันกับขนาดของจานสายอากาศและความถี่ที่ใช้ โดยมากจะถือว่าจุดที่ค่ากำลังขยายของจานสายอากาศลดลงข้างละ 3 dB เป็น Antenna Beamwidth เรียกว่า 3 dB Beamwidth, 3 dB





ภาพที่ ๓-๑๕ แสดง Beamwidth ของ Antenna Gain

$$\theta_{3dB} = 70(\lambda/D) \text{ degrees หรือ } = 70(c/fD)$$

$\lambda$  = ความยาวคลื่น ของสัญญาณ (m)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสายอากาศ (m)

เช่น จานสายอากาศขนาด ๗.๒ เมตร ส่งสัญญาณย่าน C-band ที่ความถี่ประมาณ 6.0 GHz จะได้

$\theta_{3dB}$  เท่ากับ  $0.49^\circ$  ถ้าใช้จานสายอากาศขนาด ๔.๕ เมตรจะได้  $\theta_{3dB} = 0.78^\circ$  เป็นต้น เพราะฉะนั้น จานสายอากาศขนาดใหญ่ๆ ๒๐ เมตรขึ้นไปและใช้ความถี่สูงๆ จึงจำเป็นต้องมี Motor Drive สำหรับติดตามการเคลื่อนที่ (Drift) ของดาวเทียมอยู่ตลอดเวลาขณะนั้น ดาวเทียมอาจจะหลุดจากการมองเห็นของจานสายอากาศไปได้

#### กำลังขยายของจานสายอากาศ

กำลังขยายของจานสายอากาศแปรผันตรงกับขนาดจานสายอากาศและความถี่ที่ใช้ คือ ยิ่งจานสายอากาศขนาดใหญ่ขึ้นกำลังขยายก็มากขึ้น และยังความถี่สูงกำลังขยายก็เพิ่มขึ้นด้วย

กำลังขยายของจานสายอากาศที่ 'Bore-Side',  $G_{max}$

$$G_{max} = \eta_a (\pi D / \lambda)^2 = \eta_a (\pi D f / c)^2$$

$$G_{max}(dBi) = 10 \log[\eta_a (\pi D / \lambda)^2] = 10 \log[\eta_a (\pi D f / c)^2]$$

$\eta_a$  ค่าประสิทธิภาพของจานสายอากาศ (Antenna Efficiency) โดยปกติ  $\eta_a$  จะประมาณ ๐.๖

ถ้าจานสายอากาศชี้เป้าหมายไม่ตรงกับ Bore-Side ก็จะทำให้เกิด Pointing Loss ขึ้นโดยค่ากำลังขยายของจานสายอากาศจะลดลงโดย

$$G(\theta)(dBi) = G_{max}(dBi) - 12(\theta / \theta_{3dB})^2$$

$\theta$  คือมุมที่จานสายอากาศเบี่ยงเบนไป  $0 < \theta < \theta_{3dB}/2$

## ๕.๒ สถานีภาคพื้น (Earth Station)

สถานีภาคพื้นอาจจะเป็นแบบทั้งรับและส่งสัญญาณ หรือแบบรับสัญญาณอย่างเดียว โดยมากการแบ่งประเภทของสถานีภาคพื้นแบ่งตามขนาดของจานสายอากาศและประเภทของการใช้งาน

**สถานีขนาดใหญ่** มีขนาดจานสายอากาศตั้งแต่ ๑๐ เมตรขึ้นไป Bandwidth ของสัญญาณเป็นระดับ  $>10$  MHz หรือส่งสัญญาณ Bit Rate ระดับ 20 Mbps ขึ้นไป โดยมากจะเป็น Gateway สำหรับการสื่อสารระหว่างประเทศ จานสายอากาศจะต้องมี Motor Drive สำหรับหมุนจาน

**สถานีขนาดกลาง** ขนาดจานสายอากาศตั้งแต่ ๔.๕ เมตร ไปจนถึง ๑๐ เมตร การส่งสัญญาณอยู่ในระดับ Mbps จานสายอากาศอาจจะมีหรือไม่มี Motor Drive ก็ได้

**สถานีขนาดเล็ก** ขนาดของจานสายอากาศตั้งแต่ ๑.๒ เมตร จนถึง ๓.๘ เมตร การส่งสัญญาณอยู่ในระดับ 100 kbps จานสายอากาศไม่จำเป็นต้องมี Motor Drive

**VSAT (Very Small Aperture Terminal)** ขนาดของจานสายอากาศต่ำกว่า ๑.๒ เมตร เป็นสถานีประจำที่ โดยมากใช้ในธุรกิจขนาดเล็ก และอาจจะเป็นสถานีรับสัญญาณอย่างเดียวกก็ได้ มีราคาไม่แพงนักและรับส่งสัญญาณในระดับ 10 kbps

**สถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station)** อาจจะเป็นสถานีรับส่งสัญญาณแบบติดตั้งบนรถหรือเรือ หรือเป็นแบบมือถือหรือกระเป๋าหิ้ว ใช้งานความถี่ L-Band เป็นหลัก จานสายอากาศมีขนาดเล็กมีความยาวไม่เกิน ๑ ฟุต หรือเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน ๐.๕ เมตร กำลังเริ่มเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

## ๖. ลักษณะทั่วไปของสถานีดาวเทียม

สถานีรับส่งสัญญาณดาวเทียมโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่อไปนี้

### ๖.๑ อุปกรณ์เชื่อมต่อรับช่องสื่อสาร (Interface Unit)

คืออุปกรณ์สำหรับรองรับช่องสื่อสารที่จะส่งผ่านดาวเทียม เช่น การ์ดรองรับช่องโทรศัพท์ อุปกรณ์ Multiplexer เป็นต้น อุปกรณ์แปลงสัญญาณของช่องสื่อสารให้เป็นสัญญาณดาวเทียมความถี่ IF และกลับกัน หน้าที่หลักของอุปกรณ์คือ Modulate และ Demodulate สัญญาณ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ IF ให้เป็นสัญญาณ RF และกลับกัน ชื่อเรียกโดยทั่วไปคือ Up-down Converter

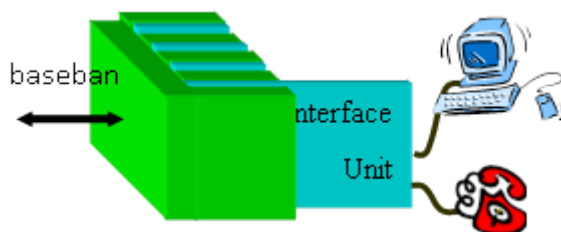
**High Power Amplifier** อาจจะเป็นแบบ Solid State Power Amplifier (SSPA) หรือแบบ Travelling Wave Tube Amplifier (TWTA)

ระบบงานสายอากาศ ประกอบด้วยงานสะท้อนสัญญาณ, Feeder, ขาตั้งงาน, Low Noise Amplifier, Dehydrator, อุปกรณ์ Motor Drive สำหรับหมุนงานสายอากาศ เป็นต้น

อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น อุปกรณ์ควบคุมการรับ-ส่งสัญญาณแบบ DAMA, อุปกรณ์ควบคุมระบบการทำงานของสถานี, อุปกรณ์สัญญาณนาฬิกา เป็นต้น

ภาคส่ง

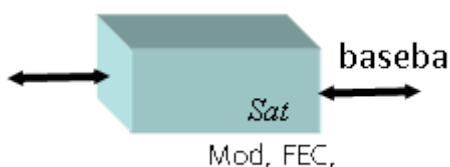
**Interface Unit & Multiplexer** – สัญญาณโทรศัพท์และสัญญาณข้อมูลที่จะส่งขึ้นดาวเทียมจะออก-เข้าออกสถานีผ่านอุปกรณ์ Interface Unit ซึ่งอาจจะเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ Multiplexer ถ้าใช้อุปกรณ์ Multiplexer ช่องสัญญาณต่างๆจะถูกนำมารวมกันเป็นกระแสสัญญาณเดี่ยวก่อนที่จะส่งไป Modulated ถ้าไม่แต่ละช่องสัญญาณจะถูก Modulated แยกกันต่างหาก ในการรับสัญญาณอุปกรณ์ Multiplexer และ อุปกรณ์ Interface Unit จะทำหน้าที่ในทางกลับกันด้วยคือ Demultiplex และส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ปลายทาง



ภาพที่ ๓-๑๖ แสดง Block Diagram การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคพื้นของดาวเทียม

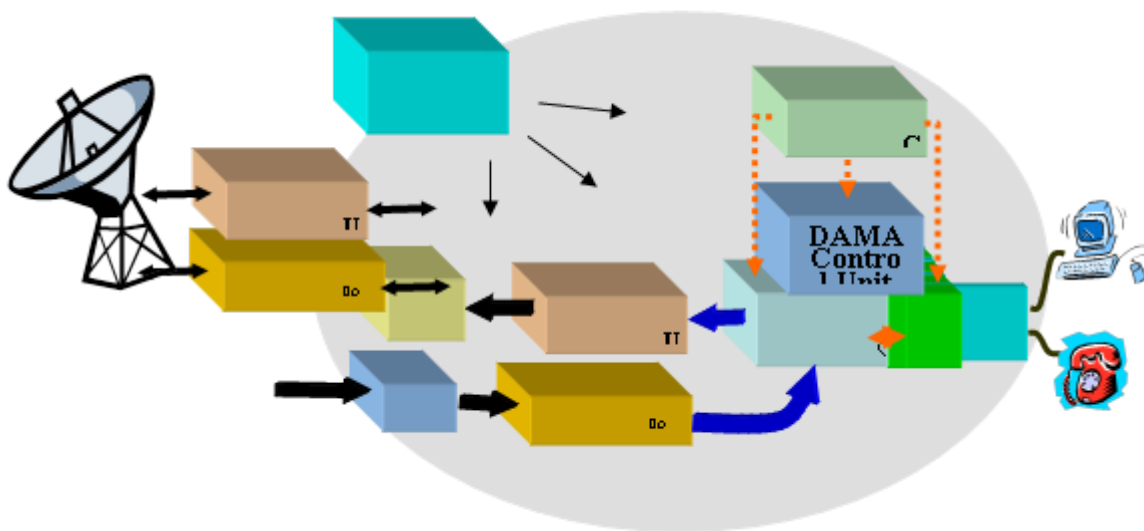
**Satellite MODEM** - หน้าที่หลักของอุปกรณ์ Satellite Modem แปลงสัญญาณ Baseband ให้เป็นสัญญาณดาวเทียมระดับ IF ที่ความถี่ 70 MHz (หรือ 140 MHz) ด้วยการ Modulation

รูปแบบการ Modulation จะเป็นแบบ FM หรือ PM สำหรับสัญญาณอนาล็อกและ PSK สำหรับสัญญาณดิจิทัล



ภาพที่ ๓-๑๗ แสดง Block Diagram ของ MODEM

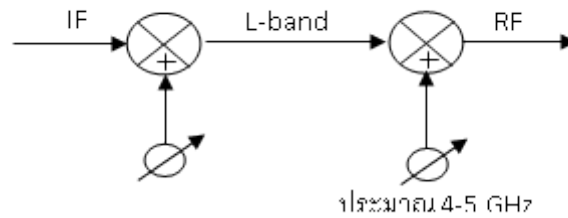
นอกจากนี้ ในสัญญาณ Digital จะมีการใส่ FEC Code, การ Scramble สัญญาณด้วย เป็นอย่างน้อย เช่นเดียวกับอุปกรณ์ Interface Unit / Multiplexer อุปกรณ์ Satellite Modem ก็จะทำหน้าที่ในทางกลับกันสำหรับภาครับด้วย อุปกรณ์สัญญาณอนาล็อกรุ่นเก่าๆ อุปกรณ์ Interface Unit และ Modem อาจจะเป็นอุปกรณ์เดียวกันอย่างเช่นอุปกรณ์ FM Modem ของระบบ SCPC ยี่ห้อ NEC เป็นต้น และสัญญาณอนาล็อกจะไม่มีอุปกรณ์ Multiplexer แต่จะส่งสัญญาณออกไป ๑ ช่องสัญญาณต่อ ๑ ความถี่ หรือที่เรียกว่า Single Channel Per Carrier (SCPC)



ภาพที่ ๓-๑๘ แสดง Block Diagram การเชื่อมอุปกรณ์ภาคพื้นของดาวเทียมทั้งระบบ

**Up/Down-Converter** – อุปกรณ์ Up-Converter ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ IF จาก Satellite Modem ให้เป็นสัญญาณ RF ซึ่งเป็นสัญญาณความถี่ที่ส่งขึ้นดาวเทียม (ระดับ GHz) และอุปกรณ์ Down-Converter ก็ทำหน้าที่กลับกันคือแปลงสัญญาณจากความถี่ IF อุปกรณ์ทั้งสอง

อาจจะอยู่ในกล่องเดียวกันและเรียกรวมกันว่า Up/Down-Converter หลักการแปลงสัญญาณ IF/RF ของ Up/Down-Converter –



ภาพที่ ๓-๑๙ แสดงวงจร Up-Converter ภาคส่ง

จากสัญญาณ IF เป็น RF จะผ่านการแปลง (Converted) ๒ ครั้ง ครั้งแรกแปลงให้เป็นสัญญาณ L-band ก่อน จากนั้นจึงแปลงให้เป็นสัญญาณ RF การแปลงกลับจาก RF เป็น IF ก็เช่นกัน

ในการ Up/Down-Converter เราจะตั้งสัญญาณ RF ที่เราต้องการโดยต้องคำนึงถึงหลักต่อไปนี้

- ความถี่ IF ที่ 70 MHz จะถูกแปลงได้เป็นความถี่ RF (ทั้ง Up และ Down-Link) ที่ตั้งไว้ใน Up/Down-Converter
- ความถี่ IF อื่นๆ เมื่อถูกแปลงเป็นความถี่ RF จะได้เท่ากับ (IF อื่นๆ - 70) + (ความถี่ RF ของ IF 70 MHz)

ตัวอย่างเช่น ตั้งสัญญาณ Up-Converter ไว้ที่ความถี่ 6,028 MHz สัญญาณ Down-Converter จะต้องเท่ากับ  $(6028 - 2225) = 3,803$  MHz ดังนั้น IF ที่ 70 MHz  $\rightarrow$  RF Up-Link 6028 MHz และ Down-Link 3802 MHz  $\rightarrow$  70 MHz

เพราะฉะนั้นสัญญาณ IF อื่นๆ เช่น 67.8 MHz  $\rightarrow$  up 6025.8 , down 3799.8  $\rightarrow$  67.8 MHz, สัญญาณ IF 73.1 MHz  $\rightarrow$  up 6031.1 MHz, down 3806.1 MHz เป็นต้น

การเลือกความถี่ Up และ Down-Link ควรจะตั้งไว้ที่ความถี่กึ่งกลางของช่วงสัญญาณที่ใช้งานเพื่อให้สัญญาณ IF ครอบคลุมช่วงที่เราใช้งานทั้งหมด โดยปกติทั่วไประยะของความถี่ IF จะ  $\pm 18$  MHz จาก 70 MHz

**High Power Amplifier** – ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ RF ให้มีกำลังมากพอที่จะขึ้นเพื่อพร้อมที่จะส่งผ่านจานสายอากาศส่งขึ้นดาวเทียม สัญญาณ RF ที่ออกมาจาก Up-Converter จะแค่ไม่มีมลิวัดต์ และจะถูกขยายโดย HPA ให้อยู่ในระดับ ๑ วัตต์ หรือมากกว่า



ภาพที่ ๓-๒๐ แสดง Block Diagram การทำงานของ HPA

HPA ที่ใช้ในท้องตลาดมีอยู่สองประเภทคือ แบบ Solid State Power Amplifier (SSPA) และแบบ Travelling Wave Tube Amplifier (TWTA)

- แบบ TWTA หรือแบบหลอดเป็นแบบที่มีมานานแล้วใช้หลอด Electrode ในการขยายสัญญาณ ข้อดีคือ สามารถส่งที่กำลังวัตต์สูงๆได้ เกิน ๑๐๐ วัตต์ ขึ้นไปจนถึง ๑๐๐๐ กว่าวัตต์ ข้อเสียมีหลายประการ เช่น ต้องมีการ Warm-up หลอดสัญญาณ, ราคาแพง, มี Harmonic มาก, output back-off สูง (6 dB) แต่อย่างไรก็ตาม TWTA ก็ยังเหมาะสมสำหรับใช้กับสถานีที่ต้องการกำลังส่งสูงๆ มีให้เลือกในท้องตลาดตั้งแต่ 50W, 125W, 250W, 500W, และ 1000W ขึ้นไป

- แบบ SSPA เหมาะสำหรับสถานีที่ต้องการกำลังส่งต่ำ 50W ลงไป เช่น 50W, 40W, 20W, 5W, และ 2W ไม่ต้องการการ Warm-Up มี Harmonic น้อย และต้องการ Back-Off ต่ำ (3 dB) เป็นต้นการใช้งาน HPA ระดับของ Output จะต้องน้อยกว่าระดับ Power Back-Off ของ HPA โดยทั่วไปถ้าส่ง Carrier เดียว Back-Off ประมาณ 3 dB และ 2 carrier ขึ้นไป Back-Off ไม่ควรต่ำกว่า 4 dB และถ้าเป็นแบบ TWTA ค่า Back-Off จะเพิ่มเป็น ๒ เท่า เช่น SSPA 20W 3 dB Back-Off เท่ากับครึ่งหนึ่งคือ 10W

### ค่า EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power)

คือค่าระดับของสัญญาณที่ออกจากรังกลางงานสายอากาศ ได้จากค่า Maximum Gain ของงานสายอากาศ (In dB) + กำลังส่งจาก HPA (In dB)

$$\text{Maximum gain ของงานสายอากาศ (In dB)} = 10 \log [\eta_a (\pi D f/c)^2]$$

เช่น งานสายอากาศขนาด ๔.๕ เมตร ความถี่ย่าน C-Band 6000MHz

$$G_{max} = 10 \log [0.6 (\pi \times 4.5 \times 6000 \times 10^6 / 3 \times 10^8)^2]$$

$$= 46.8 \text{ dB}$$

ใช้ SSPA ขนาด 20W ดังนั้นกำลังขยายสูงสุด

$$= 10 \log (20) - 3 \text{ dB}$$

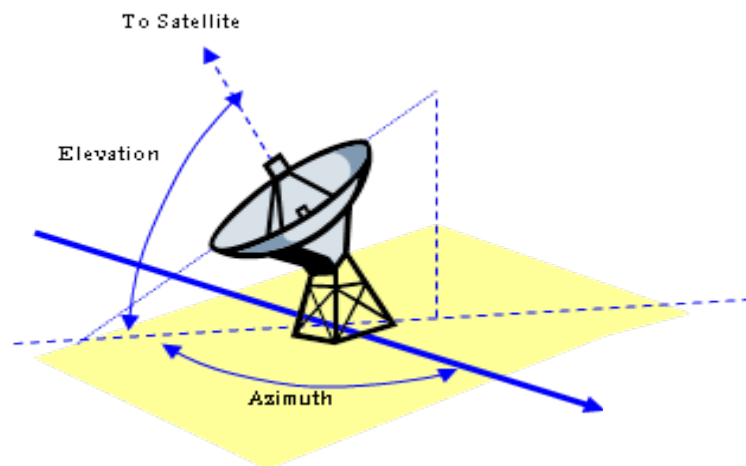
$$= 10.0 \text{ dB}$$

เพราะฉะนั้น Maximum EIRP =  $46.8 + 10.0 = 46.8$  dB

ค่า EIRP นี้เป็นค่าที่ใช้ในการคิดคำนวณกำลังส่งจริงของแต่ละ Carrier

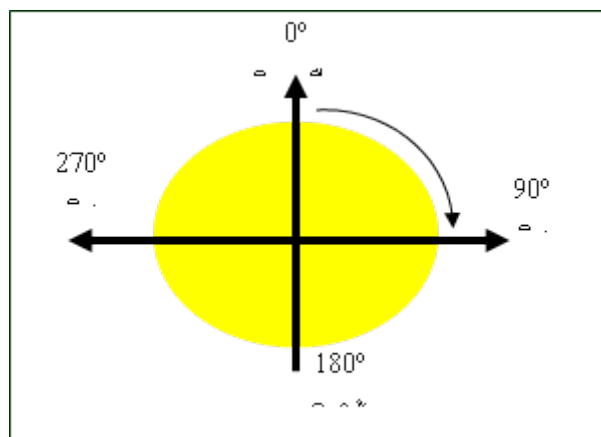
### การคำนวณทิศทาง การหันจานสายอากาศ

ทิศทางในการหันจานสายอากาศขึ้นอยู่กับปัจจัย ๒ ประการคือตำแหน่งของดาวเทียมที่ใช้งานกับตำแหน่งที่ตั้งของสถานีดาวเทียม



ภาพที่ ๓-๒๑ แสดงมุมที่ใช้ในการปรับจานสายอากาศของดาวเทียม

ทิศทางในการหันแนวระนาบเรียกว่าแนว Azimuth ส่วนทิศทางในแนวตั้งเรียกว่า Elevation ในแนว Azimuth ทิศเหนือคือ  $0^{\circ}$ , ทิศตะวันออก  $90^{\circ}$ , ทิศใต้  $180^{\circ}$ , ทิศตะวันตก  $270^{\circ}$ , แนว Elevation แนวตั้งคือ  $90^{\circ}$  และแนวระนาบคือ  $0^{\circ}$



ภาพที่ ๓-๒๒ แสดงทิศทางของการวัดมุมในการปรับจานสายอากาศ

การคำนวณหาแนว Azimuth

ถ้าดาวเทียมอยู่ทางทิศตะวันตกของสถานีฯ

$$AL = 360^\circ - \arccos[-\tan(B) \cdot \tan(Lat)]$$

ถ้าดาวเทียมอยู่ทางทิศตะวันออกของสถานีฯ

$$AL = \arccos[-\tan(B) \cdot \tan(Lat)]$$

การคำนวณหาแนว Elevation

$$EL = \arctan\left\{\frac{\sin(B) - 0.1526}{\cos(B)}\right\}$$

โดย

$\Delta L$  = Longitude ของสถานี (La) – Longitude ของดาวเทียม (Ls)

$$B = \arcsin[\cos(Lat) \cdot \cos(\Delta L)] \text{ (deg.)}$$

Lat = Latitude ของสถานี

ตัวอย่างเช่น ดาวเทียมไทยคม ๒ อยู่ที่ตำแหน่ง  $78.5^\circ E$  สถานีดาวเทียมดอนเมืองตั้งอยู่ ณ ตำแหน่ง  $100.5^\circ E, 13.0^\circ N$

$$\Delta L = 100.5^\circ - 78.5^\circ = 22.0^\circ$$

$$B = \arcsin[\cos(13) \cdot \cos(22)] = 64.6^\circ$$

$$\therefore AL = 360 - \arccos[-\tan(64.6) \cdot \tan(13)] = 240.9^\circ$$

$$\text{และ } EL = \arctan\{\sin(64.6) - 0.1526 / \cos(64.6)\} = 60.3^\circ \text{ เป็นต้น}$$



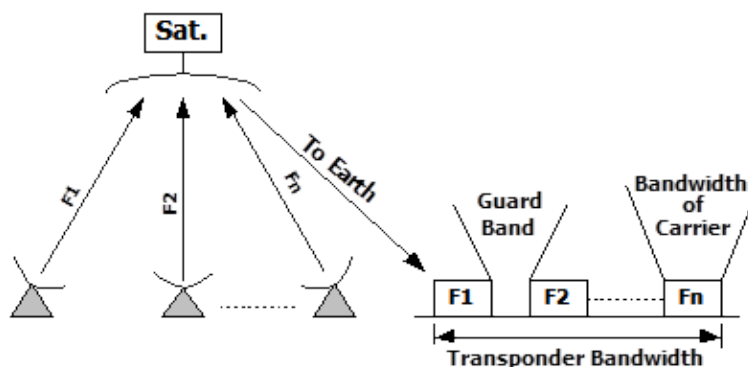
## ๗. เทคนิคการเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access Technique)

เนื่องจากทรัพยากรด้านดาวเทียมเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น จำนวนดาวเทียมในวงโคจรค้างฟ้าที่มีอยู่ ๓๖๐ องศา ห่างกัน ๒ องศาเป็นอย่างน้อย จึงมีดาวเทียมเพียงประมาณ ๑๘๐ ดวงเท่านั้น นอกจากนี้ การเข้าใช้ช่องสัญญาณบนทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ที่ใช้งานในดาวเทียมแต่ละดวงก็มีจำกัด แม้จะใช้หลักการความถี่ซ้ำเข้าช่วยแล้ว จึงต้องพัฒนาเทคนิคการเข้าถึงหลายทางเพื่อให้สามารถเข้าไปใช้งานช่องดาวเทียมได้อย่างเต็มที่ และให้ผู้ใช้เข้าใช้ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ดาวเทียมเดียวกันพร้อมกันได้มากมายโดยไม่รบกวนกันปัจจุบันมีเทคนิคที่นิยมใช้กันอยู่ ๓ แบบ คือ

### ๗.๑ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA )

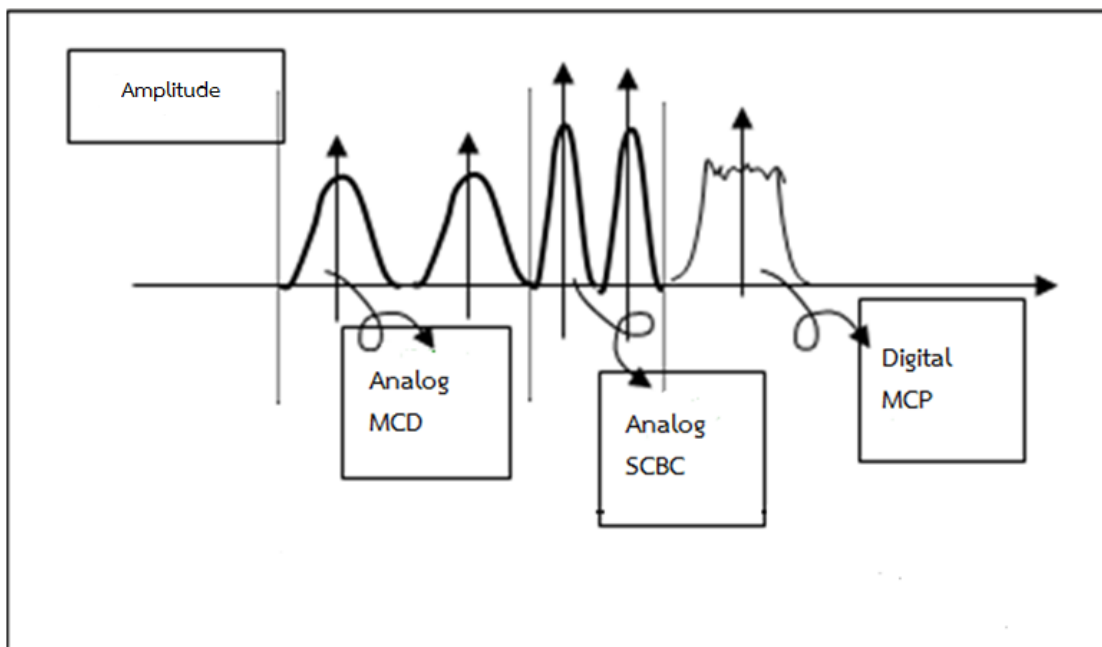
ผู้ใช้แต่ละรายจะได้รับการจัดสรรช่องความถี่มาให้แม้ช่องความถี่ว่างไม่มีผู้ใช้งาน ผู้อื่นก็ไม่สามารถเข้ามาใช้งานได้ซึ่งเป็นข้อจำกัดประการหนึ่ง แต่ก็มีใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากหลักการง่ายคือ สถานีภาคพื้นดินที่อยู่ในข่ายสื่อสารดาวเทียมจะทำการส่งคลื่นพาห်หนึ่งคลื่น หรือ หลายคลื่น ความถี่ในทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ใดทรานสปอนเดอร์ (Transponder) หนึ่งคลื่นพาห်แต่ละคลื่นจะประกอบด้วยแถบความถี่ที่มีความกว้างตามที่กำหนดในกิจการนั้นๆ เช่น ใช้ความกว้างของแบนด์ 36 kHz สำหรับการส่งแบบ SCPC (Single Carrier Per Channel) หรือกว้าง 30 MHz สำหรับการส่งสัญญาณโทรทัศน์

ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) บนดาวเทียมจะรับสัญญาณ แล้วขยายและแปลงความถี่สัญญาณนั้นส่งกลับมายังสถานีภาคพื้นโลกสถานีภาคพื้นดินที่อยู่ภายใต้พื้นที่ที่สัญญาณครอบคลุมจะเลือกรับเฉพาะคลื่นพาห်ที่นำข่าวสารมาถึงตนเท่านั้น ปัญหาสำคัญสำหรับการเข้าถึงแบบ FDMA คือ การเกิด Intermodulation ภายใน เนื่องจากต้องใช้กำลังขยายสูงสุดเกิดเป็นคลื่นที่ไม่ต้องการไปรบกวนสถานีภาคพื้นดินปกติ FDMA ที่ใช้หลักๆมีระบบ SCPC (Single Carrier Per Channel) และ MCPC (Multiple Carrier Per Channel)



ภาพที่ ๓-๒๓ แสดงการใช้ช่องสื่อสารร่วมกันโดยใช้เทคนิค FDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access) สัญญาณแต่ละสัญญาณจะรับ-ส่งด้วยความถี่ที่ต่างกันในสัญญาณแต่ละสัญญาณ อาจจะประกอบด้วยช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวหรือหลายช่องรวมกันก็ได้



ภาพที่ ๓-๒๔ แสดงลักษณะของสัญญาณแบบ FDMA

คลื่นสัญญาณ FDMA ยังแบ่งออกได้เป็น ๓ ลักษณะ

Analog SCPC (Single Channel Per Carrier) – หนึ่งช่องสื่อสารต่อหนึ่งคลื่นสัญญาณ

Analog MCPC (Multiple Channel Per Carrier) - หลายช่องในหนึ่งคลื่นสัญญาณ

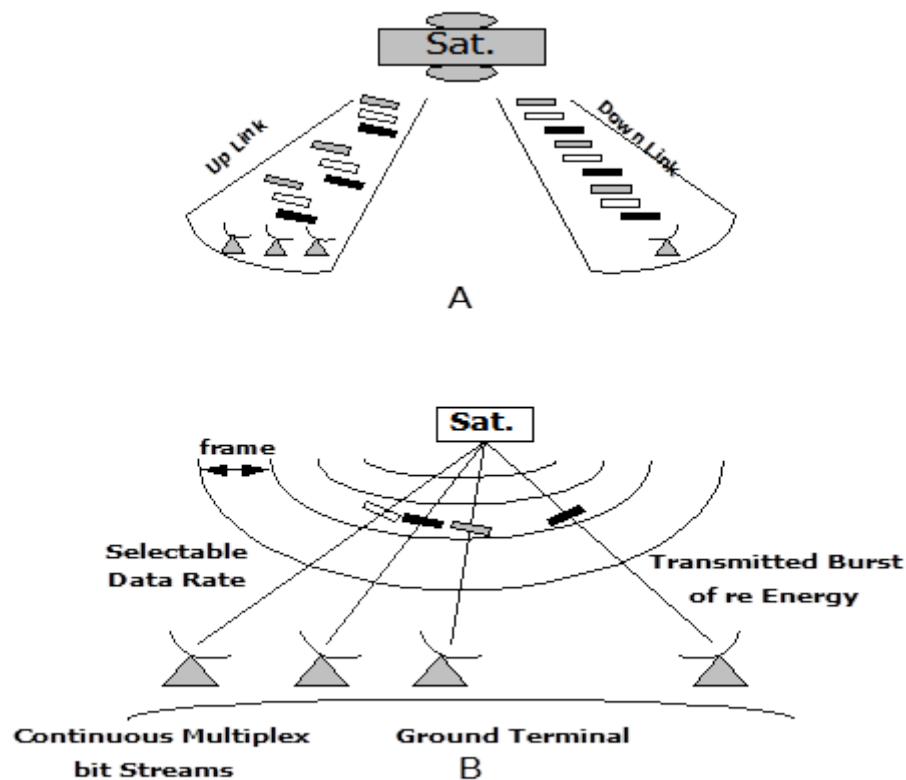
Digital MCPC ส่งสัญญาณดิจิทัลหลายช่องภายในหนึ่งคลื่นสัญญาณ

## ๗.๒ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA)

ผู้ใช้จำนวนมากสามารถใช้ช่องสัญญาณความถี่ร่วมกันได้แต่จะส่งข้อมูลเฉพาะช่วงเวลาที่ได้รับอนุญาตมาให้เท่านั้นวิธีการ คือ ทุกสถานีในข่ายการสื่อสารดาวเทียมจะใช้เวลาที่เฉพาะร่วมกัน ในการส่งสัญญาณแบบต่างๆผ่าน ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ใด ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) หนึ่ง ทุกสถานีที่ใช้ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ร่วมกันจะสื่อสารกันได้เฉพาะช่วงเวลาที่กำหนดให้เท่านั้นหรือ อาจเรียกได้ว่าเป็นการแบ่ง Time Slot มาให้ ดังนั้นแต่ละสถานีจึงต้องมีการเข้าจังหวะ (Synchronization) กันเป็นอย่างดีเพื่อให้ข้อมูลไปถึง ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ไม่ช้าเวลากันโดยจะมีการเว้นช่องว่างเวลาตามที่กำหนด ทำให้ทุกสถานีภาคพื้นดินสามารถใช้แถบคลื่น

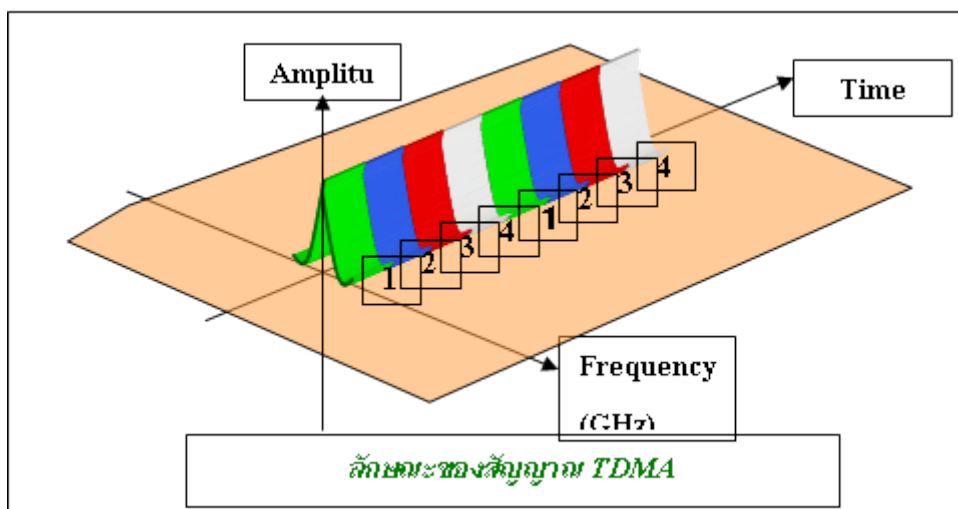
ความถี่และกำลังขยาย ในทรานสปอนเดอร์ (Transponder) นั้นได้อย่างเต็มที่เนื่องจากทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ขยายสัญญาณครั้งละสถานีจึงไม่เกิดการ Intermodulation

TDMA เป็นการเข้าถึงที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบดิจิทัลที่มีสถานีใช้งานร่วมกันจำนวนมาก และสามารถใช้กำลังสูงสุดได้แต่ข้อเสียประการสำคัญคือ การเข้าจังหวะ (Synchronization) ต้องมีการเวลา (Timing) อย่างแม่นยำและเที่ยงตรง ประสิทธิภาพจึงถูกลดทอนไปจากการส่งสัญญาณเข้าจังหวะนี้ จึงเหมาะสำหรับการสื่อสารขนาดใหญ่



ภาพที่ ๓-๒๕ แสดงการใช้ช่องการสื่อสารร่วมกันโดยใช้เทคนิค TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access) ทุกสถานีในระบบจะส่งสัญญาณที่ความถี่เดียวกันแต่จะส่งที่เวลาต่างกัน เวลาในการรับ-ส่งสัญญาณและวงรอบในการรับ-ส่งสัญญาณ อยู่ในระดับ 10 ms (Millisecond) โดยในแต่ละวงรอบแต่ละสถานีจะผลัดกันส่งสัญญาณ ซึ่งการส่งสัญญาณอาจจะเรียงตามลำดับที่กำหนดไว้หรือส่งสัญญาณตามความต้องการโดยไม่ต้องเรียงตามลำดับสถานีก็ได้



ภาพที่ ๓-๒๖ แสดงลักษณะของสัญญาณแบบ TDMA

เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบ FDMA กับระบบ TDMA

#### ระบบ TDMA

- ไม่ต้องใช้อุปกรณ์มาก อุปกรณ์ชุดเดียวสามารถรับ-ส่ง ไปยังทุกสถานีในระบบ
- ใช้ bandwidth ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) น้อย
- ต้องการสัญญาณนาฬิกาในการ Synchronous การรับส่งสัญญาณ
- เมื่อเกิดสัญญาณรบกวนอาจจะส่งผลให้ ระบบล่มทั้งระบบ เพราะสัญญาณรบกวน จะกวนการส่งสัญญาณของทุกสถานี
- สถานีทุกสถานีในระบบต้องมีกำลังส่งและขนาดจานใกล้เคียงกัน เพราะระดับของสัญญาณ ของทุกสถานีในระบบเมื่อส่งถึงดาวเทียมควรจะเท่ากัน และโดยมากระบบ TDMA ต้องส่งสัญญาณที่ระดับความเร็วสูงๆ ประมาณ 512 kbps ขึ้นไปทำให้ทุกสถานีต้องมีขนาดของจานสายอากาศมากกว่า ๓.๘ เมตรขึ้นไป ทำให้มีราคาแพง
- ระบบมีราคาแพง และไม่เป็นมาตรฐานแต่ละผู้ผลิตต่างพัฒนาระบบของตนเอง ทำให้เกิดปัญหาในการจัดซื้ออะไหล่และซ่อมบำรุง

#### ระบบ FDMA

- ต้องใช้อุปกรณ์มาก เช่น อุปกรณ์ Satellite Modem, Multiplex อุปกรณ์ ๑ ชุด รับ-ส่ง ไปยังสถานีในระบบได้ครั้งละสถานีเดียว
- ประสิทธิภาพในการใช้ Bandwidth แค่ประมาณ ๔๐% - ๖๐% เพราะมีคลื่นสัญญาณมากจึงต้องมี Guard-Band มากและก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) มากตามขึ้นมาด้วย

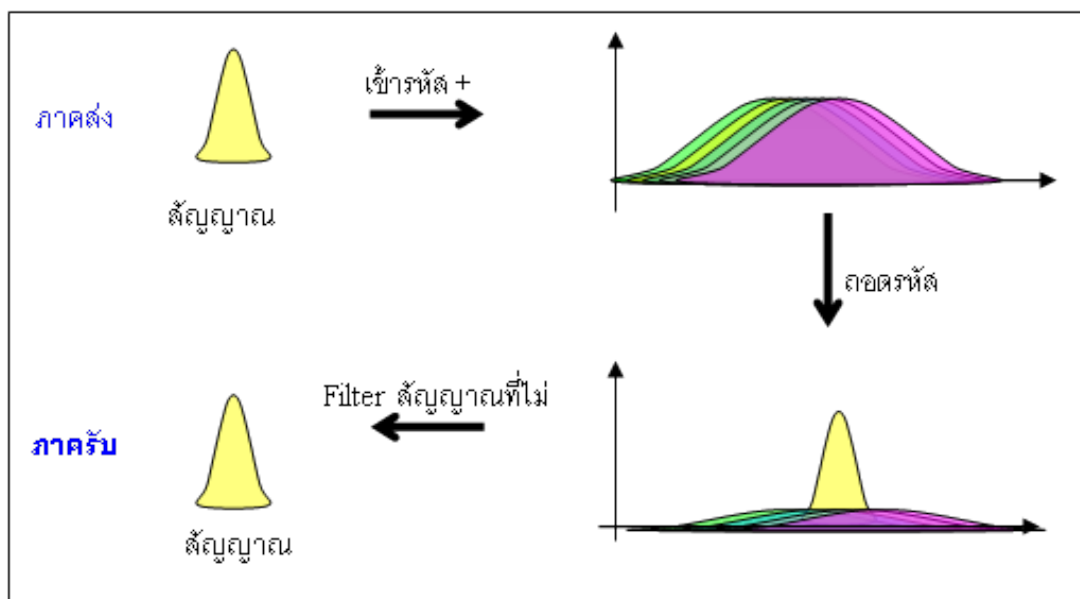
- ไม่ต้องการสัญญาณนาฬิกาสำหรับการ Synchronous การรับ-ส่งสัญญาณ (แต่อาจต้องการสัญญาณนาฬิกาที่ไม่ละเอียดสำหรับการ Sync สัญญาณ Digital)
- เมื่อเกิดสัญญาณรบกวนอาจจะส่งผลให้ คลื่นสัญญาณความถี่ที่ถูกรบกวนล้มได้ แต่ไม่ล้มทั้งระบบ ยกเว้นรบกวนสัญญาณควบคุมในกรณีใช้ระบบ DAMA
- สถานีทุกสถานีในระบบต้องมีกำลังส่งและขนาดจานไม่จำเป็นต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยขนาดของกำลังส่งและจานสายอากาศจะขึ้นอยู่กับความเร็วของสัญญาณที่ต้องการรับ-ส่ง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับย่านความถี่ที่ใช้งานด้วย
- ระบบมีราคาถูกกว่าระบบ TDMA แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนสถานีในระบบและการออกแบบด้วย สัญญาณที่ใช้งานค่อนข้างเป็นมาตรฐานเพราะฉะนั้นสามารถใช้งานทดแทนได้ในบางส่วน เช่น Satellite Modem เป็นต้น แต่โดยมากอุปกรณ์ควบคุมระบบ เช่น DAMA Controller ยังคงยังไม่เป็นมาตรฐาน

### ๗.๓ การเข้าถึงหลายทางแบบสุ่ม (Random Multiple Access : RMA) หรือแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA)

สถานีภาคพื้นดินใช้ความถี่ร่วมกันและจะส่งเวลาใดก็ได้โดยใช้ช่องสัญญาณร่วมกันหลายสถานีโดยผู้รับสามารถแยกแยะข้อมูลที่ส่งมาถึงตนได้ เนื่องจากมีรหัส (Code) เป็นของตนเอง วิธีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ Spread Spectrum Multiple Access : SSMA วิธีนี้ผู้ใช้แต่ละรายจะถูกกำหนดให้ใช้ Code Sequence ไม่ซ้ำกัน ซึ่งเมื่อปรุ่กคลื่นกับคลื่นพาห้ไปพร้อมกับข้อมูลดิจิทัลแล้วส่งไปในช่องสัญญาณที่ผู้ใช้ทุกรายใช้ร่วมกัน การที่ Multiple Access : TDMA มีความยาวมากและ Code Symbols Data Symbols มีค่าสูงมีผลทำให้ความกว้างของแถบคลื่นสัญญาณที่ใช้ขยายกว้างขึ้นจึงเรียกว่า การแผ่ขยายแถบคลื่นความถี่ (Spread Spectrum ) อัตราส่วนระหว่างความกว้างของแบนด์ของสัญญาณที่ส่งออกไป (Transmitted Signal Bandwidth) ต่อความกว้างของแบนด์ของข่าวสาร (Message Signal Bandwidth) เราเรียก GP ซึ่ง GP จะเป็นตัวบ่งบอกอัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain) ของระบบ SSMA - CDMA ด้วยเหตุที่ผู้ใช้แต่ละรายจะถูกระบุ Code Sequence โดยวิธีสุ่มจึงเรียกว่า การเข้าถึงหลายทางแบบสุ่ม (RMA) (ทักษิณ ทักษิณา ๒๕๓๕, ๙ - ๑๓)

#### CDMA (Code Division Multiple Access)

แต่ละสัญญาณจะถูกส่งที่ความถี่เดียวกันและสามารถส่งในเวลาเดียวกันได้ เนื่องจากแต่ละสัญญาณจะถูกเข้ารหัสสัญญาณก่อนส่งออกไป ซึ่งรหัสของแต่ละสัญญาณจะไม่เหมือนกัน ในฝั่งรับเครื่องรับสัญญาณก็จะทำการถอดรหัสเฉพาะสัญญาณที่ต้องการเท่านั้น ส่วนสัญญาณอื่นที่ใช้ความถี่เดียวกันแต่ไม่ต้องการก็จะไม่ถูกถอดรหัสและถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) และถูกรอง (Filtered) ทิ้งไป



ภาพที่ ๓-๒๗ แสดงลักษณะของสัญญาณแบบ CDMA

นอกจากเทคนิคการเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access) ยังมีแบบแผนการแบ่งมอบ (Assignment Schemes) ที่นำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการเข้าถึงหลายทางอีก ๒ แบบ ที่นิยมกันแพร่หลายคือ แบบแบ่งมอบล่วงหน้า (Pre Assignment) และการแบ่งมอบตามความต้องการ (Demand Assignment)

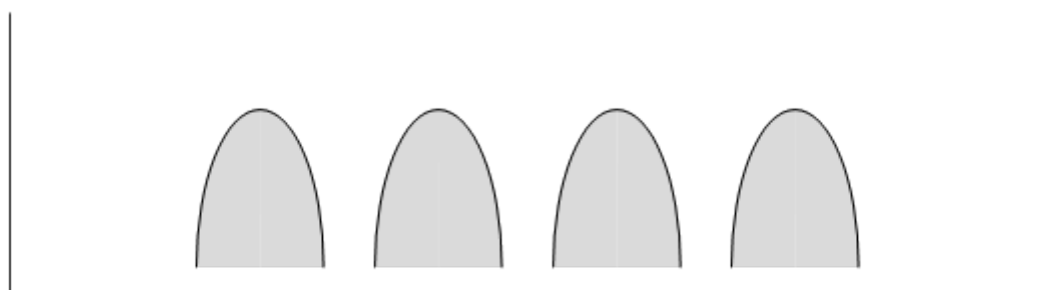
**PAMA (Pre-assigned Multiple Access) การแบ่งมอบล่วงหน้า (Pre Assignment)** นำมาใช้กันมากในการส่งสัญญาณเสียง โดยมีหลักการเบื้องต้นว่าจะจัดสรรความถี่หรือช่วงเวลาให้กับสถานีคู่ใดคู่หนึ่ง เพื่อใช้ในการติดต่อกันไม่ว่าจะมีการส่งข่าวสารหรือไม่ ช่วงเวลาหรือความถี่นั้นจะสงวนไว้ สถานีอื่นไม่สามารถนำไปใช้งานได้กล่าวคือ แต่ละสถานีจะได้รับช่องสัญญาณที่กำหนดไว้แน่นอน ไม่ว่าจะมีความถี่ (สำหรับ FDMA) หรือช่วงเวลา (สำหรับ TDMA) ถึงแม้ว่าสถานีนั้นจะไม่ได้ใช้ช่องสัญญาณนั้นแต่สถานีอื่นก็ไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณนั้นได้จะมีประโยชน์ในข่ายการเก็บข้อมูลคอมพิวเตอร์ที่มีการเรียกเก็บข้อมูลสม่ำเสมอระหว่างสถานีต่างๆเป็นระบบการแบ่งมอบที่ง่าย แต่ข้อเสียคือ ระบบการสื่อสารจะขาดการอ่อนตัวเกิดการสูญเสียของช่องสัญญาณ จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้ในข่ายการสื่อสารที่มีข้อมูลเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างมาก แต่จะมีประโยชน์ที่สามารถตอบสนองการใช้งานได้ทันที ถ้าแบ่งมอบการใช้งานล่วงหน้าถาวร ผู้ใช้ต้องมีปริมาณการส่งข้อมูลจึงจะมีประสิทธิภาพ

**DAMA (Demand-assigned Multiple Access) การแบ่งมอบตามความต้องการ (Demand Assignment: DA)** ระบบนี้ไม่มีการจัดสรรความถี่หรือช่วงเวลาถาวร จะแบ่งมอบเมื่อต้องการใช้งานเท่านั้นการใช้ช่องสัญญาณแบบ DAMA ยึดหลักที่ว่าไม่มีการติดต่อสื่อสารทางเสียง (โทรศัพท์) ไม่มีการติดต่อตลอดเวลา ช่องสัญญาณจะว่างคิดเป็นอัตราส่วนมากกว่า ๘๐ % ของเวลาทั้งหมด การทำงานแบบ DAMA จะไม่มีการกำหนดช่องสัญญาณที่แน่นอนให้แก่สถานี โดยช่องสัญญาณที่มีอยู่จะ

เสมือนกับช่องสาธารณะถ้าสถานีใดจะใช้จะต้องทำการร้องขอไปยังส่วนควบคุมระบบ แล้วส่วนควบคุมระบบจึงจะกำหนดช่องสัญญาณที่ว่างให้ การร้องขอและการกำหนดช่องสัญญาณเป็นไปโดยอัตโนมัติและกินเวลาไม่กี่ Millisec ซึ่งจะกระทำเมื่อมีคำขอจองสัญญาณล่วงหน้าผ่านช่องสัญญาณร่วม จึงต้องมีสถานีกลางไม่น้อยกว่า ๑ สถานีคอยควบคุมการแบ่งมอบสัญญาณตามคำขอการนำระบบ DAMA มาใช้จะลดความต้องการ Bandwidth ได้อย่างน้อย ๑ ใน ๓ เมื่อเทียบกับ PAMA วิธีกำหนดหน้าในข่าย SCPC ของสถานี VSAT สถานีจะใช้คลื่นพาหุที่ได้รับการแบ่งมอบล่วงหน้าส่งข่าวไปยังสถานีกลาง (Substation) แล้วส่งต่อไปยังปลายทางอีกความถี่หนึ่งทำให้สถานี VSAT ไม่ต้องมีอุปกรณ์แปลงความถี่ต้นทุนถูกลง แต่ถ้าเป็นการแบ่งความถี่ตามต้องการ (DA) สถานี VSAT จะถูกแบ่งมอบความถี่ใดความถี่หนึ่งในข่ายมาให้ก็ได้ สถานี VSAT จะต้องมีอุปกรณ์แปลงความถี่ให้ตรงกับที่แบ่งมอบ จึงทำให้ราคาสูงขึ้น แต่ข้อดีคือใช้ประโยชน์ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ได้สูงสุดคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ

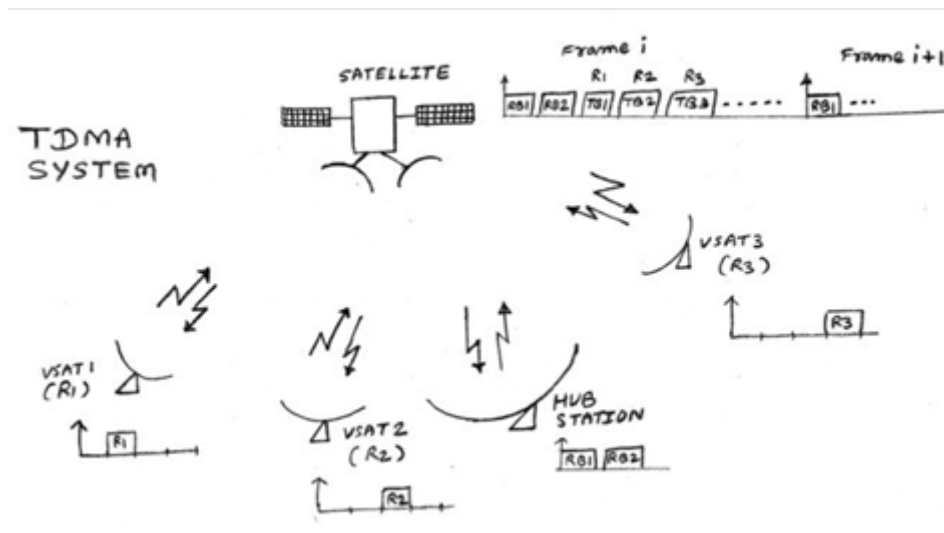
นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีใหม่ในการเข้าถึง คือ Frequency and Time Division Multiple Access (FTDMA) เป็นเทคโนโลยีแบบหนึ่งในการเชื่อมต่อ (Access Scheme) สัญญาณดาวเทียมระหว่าง ดาวเทียมสื่อสาร (Communication Satellite) และสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (VSAT-Very Small Aperture Antenna) เทคโนโลยีนี้ได้รับการยอมรับจากผู้เชี่ยวชาญด้านระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมทั่วโลกกว่า เป็นระบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อสัญญาณดาวเทียมสูงกว่าเทคโนโลยีเดิม คือ TDMA และ SCPC (FDMA)

ในอดีตการเชื่อมต่อสัญญาณดาวเทียมมีการใช้เทคโนโลยีดั้งเดิมที่เรียกว่า SCPC (Single Channel Per Carrier) ซึ่งเป็นการจัดสรรความถี่ (Frequency Division) ดังรูป เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณดาวเทียมแบบง่ายๆ โดยจัดสรรความถี่ที่คงที่ให้สถานีภาคพื้นดินติดต่อกัน แต่ประสิทธิภาพการใช้วงจรรดาวเทียม (Transponder) ต่ำมาก ส่งผลให้มีการสิ้นเปลืองการใช้วงจรรดาวเทียม (Transponder)



ภาพที่ ๓-๒๘ แสดงเทคโนโลยี SCPC

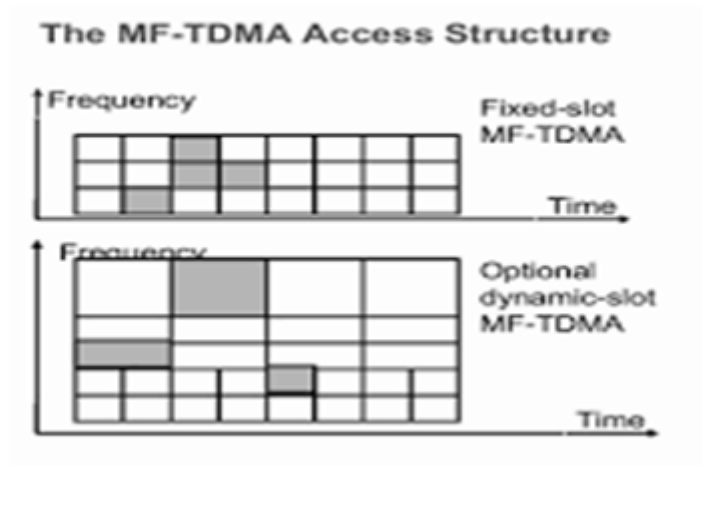
ต่อมาเทคโนโลยี TDMA (Time Division Multiple Access) ได้ถูกนำมาใช้โดยมีการจัดสรรเวลา (Time Division) ดังแสดงในภาพที่ ๓-๒๘ ให้เป็นหลักในการเชื่อมต่อสัญญาณดาวเทียมโดยสถานีภาคพื้นดินติดต่อกันภายในความถี่ที่คงที่แต่มีการสลับช่วงเวลาในการติดต่อซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการใช้งานดีขึ้นบ้าง ส่งผลให้การสิ้นเปลืองการใช้วงจรรวมลดลง แต่ไม่สามารถลดปัญหาที่เกิดจากการรบกวนอย่างรุนแรงของคลื่นความถี่ (Harmful Interference) จากดาวเทียมดวงอื่น



ภาพที่ ๓-๒๘ แสดงเทคโนโลยี TDMA

MFTDMA (Multi Frequency Time Division Multiple Access) (ข้อมูลจาก บริษัท Gilat ประเทศไทย จำกัด, ๒๕๔๓) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการพัฒนาโดยการนำ เทคโนโลยี TDMA ซึ่งใช้การจัดสรรเวลา (Time) และเทคโนโลยี FDMA ซึ่งใช้การจัดสรรความถี่ (Frequency) มาทำการผสมผสานกัน (Multiplexing) ดังแสดงในรูปด้านล่างทำให้สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินสามารถจัดสรรแบบสุ่มเวลาและความถี่ช่วงใดช่วงหนึ่งเพื่อเชื่อมต่อสถานีภาคพื้นดินเข้าหากันได้เองโดยอัตโนมัติ เทคโนโลยี MFTDMA จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานช่องสัญญาณดาวเทียมให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการประหยัดการใช้ช่องสัญญาณดาวเทียมได้มากกว่าเดิม นอกจากนี้ เทคโนโลยี MFTDMA ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการรบกวนอย่างรุนแรงของคลื่นความถี่ (Harmful Interference) จากดาวเทียมดวงอื่น โดยการสุ่มเวลาและความถี่ที่ปราศจากการรบกวน แล้วจัดสรรให้แก่สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินไปใช้งานโดยอัตโนมัติ

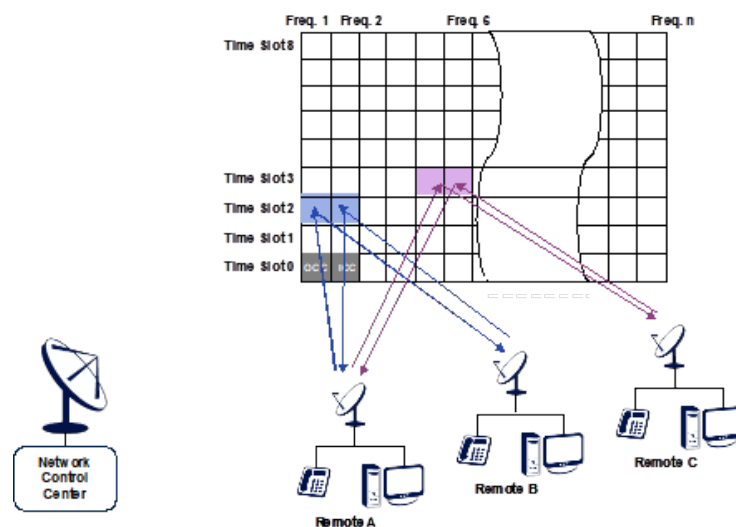




ภาพที่ ๓-๓๐ แสดงเทคโนโลยี MFTDMA

เทคโนโลยี MFTDMA ได้รับการยอมรับจากผู้ใช้ทั่วโลก เช่น US Postal Service ในประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน ๒๖,๐๐๐ แห่ง Global Village Telecom (GVT) ในประเทศโคลัมเบีย จำนวน ๔,๕๐๐ แห่ง Telkom SA ในประเทศแอฟริกาใต้ จำนวน ๓,๐๐๐ แห่ง Xinjiang PTA ในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน จำนวน ๑,๐๕๐ แห่ง เป็นต้น

ดังนั้น เทคโนโลยี MFTDMA จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและได้พิสูจน์แล้วว่า MFTDMA ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณวงจรรวมเทียม (Transponder) ให้ประหยัดมากขึ้น อันเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเช่าช่องวงจรรวมเทียมให้แก่องค์กร การเชื่อมต่อสถานีภาคพื้นดินได้ง่าย และรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมถึงการช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการรบกวนอย่างรุนแรงของคลื่นความถี่จากดาวเทียมดวงอื่น

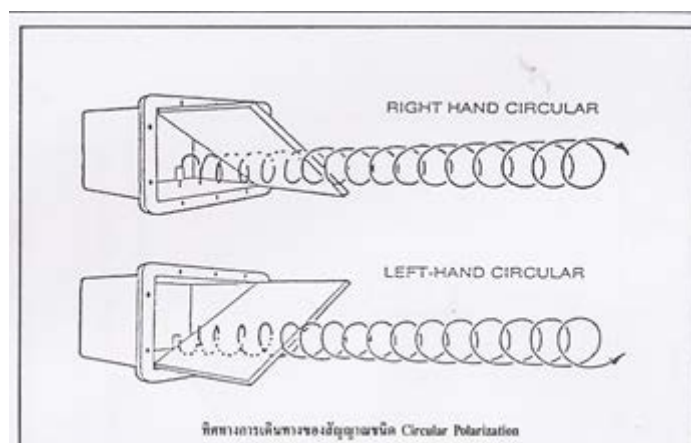
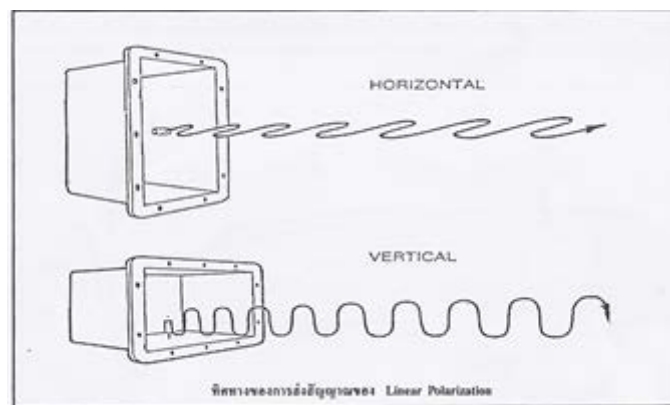


ภาพที่ ๓-๓๑ แสดงเครือข่าย VSAT ที่ใช้เทคนิคการเข้าถึงแบบ MFTDMA

## เทคนิคการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse Technique)

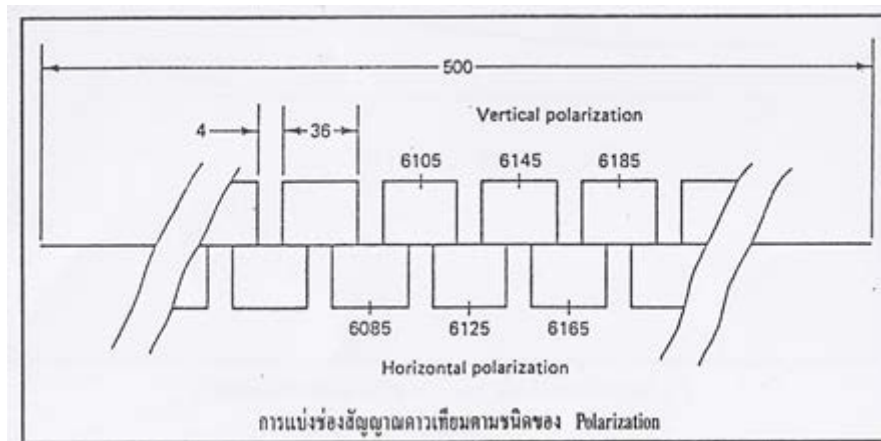
ความถี่วิทยุซึ่งใช้ในการสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นค่อนข้างมีปริมาณจำกัด ดังนั้นเพื่อให้การสื่อสารดาวเทียมมีการนำความถี่มาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีการออกแบบเพื่อให้ดาวเทียมสามารถมีช่องสัญญาณดาวเทียม (Transponder) เพิ่มขึ้นได้ โดยใช้เทคนิคการรับส่งสัญญาณวิทยุความถี่เดียวกันในทิศทางการเดินทางของสัญญาณ (Polarization) ที่ต่างกันทำให้ดาวเทียมถูกสร้างให้มี Transponder เพื่อใช้งานเพิ่มเป็นสองเท่า โดยสัญญาณที่ส่งในแต่ละ Transponder ที่มี Polarization ต่างกัน จะไม่รบกวนซึ่งกันและกัน การส่งสัญญาณตามลักษณะ Polarization แบ่งได้ ๒ แบบคือ

๑. **Linear Polarization** มีการแบ่งแยกการส่งสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันโดยให้วิ่งไปในแนวตั้งเรียกว่า Vertical Polarization และสัญญาณที่วิ่งแนวขนานนอนเรียกว่า Horizontal Polarization พร้อมๆ กัน การส่งสัญญาณในลักษณะเชิงเส้น (Linear Polarization) ดังรูป นิยมนำมาใช้งานในดาวเทียมสื่อสารกับภูมิภาคโดยทั่วไป เช่น ดาวเทียม PALPA ของอินโดนีเซีย เป็นต้น



ภาพที่ ๓-๓๒ แสดงลักษณะสัญญาณของการโพลาไรเซชันแบบต่างๆ

**๒. Circular Polarization** เป็นการส่งสัญญาณที่มีทิศทางของสัญญาณที่หมุนเป็นเกลียวเวียนซ้ายตามเข็มนาฬิกา (Left Hand Circular Polarization LHCP) หรือหมุนขวาตามเข็มนาฬิกา (Right Hand Circular Polarization RHCP) ตามรูป ทำให้สัญญาณที่ใช้ความถี่เดียวกันไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน การใช้งาน Circular Polarization นี้มีการใช้งานระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมระหว่างประเทศ เช่น ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม INTELSAT เป็นต้น



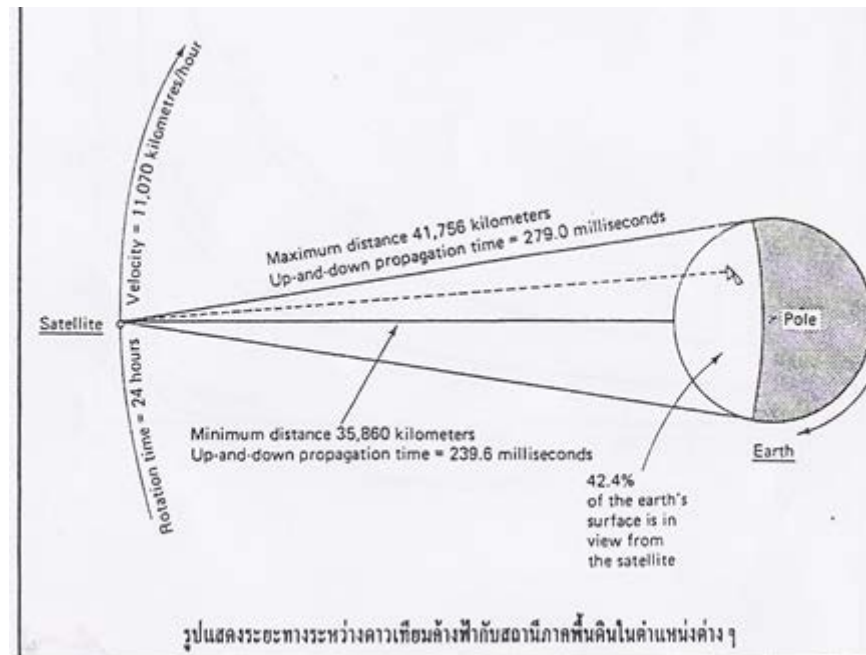
ภาพที่ ๓-๓๓ แสดงการแบ่งช่องสัญญาณตามชนิดของการโพลาไรเซชัน

เทคนิคการส่งสัญญาณที่มี Polarization ที่ต่างกันนี้ถูกนำมาแก้ปัญหาด้านเทคนิคสำหรับดาวเทียม THAICOM ทำให้ดาวเทียม THAICOM 1 และ ดาวเทียม THAICOM 2 สามารถส่งขึ้นไปอยู่บนวงโคจรในตำแหน่งเดียวกันที่ ๗๘.๕ องศาตะวันออกได้ โดยดาวเทียมแต่ละดวงมีการส่งสัญญาณแบบ Linear Polarization เพียงลักษณะเดียว กล่าวคือ ดาวเทียม THAICOM 1 มีการส่งสัญญาณแบบ Vertical Polarization ส่วนดาวเทียม THAICOM 2 มีการส่งสัญญาณแบบ Horizontal Polarization ซึ่งสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินสามารถสามารถติดต่อกับดาวเทียมทั้งสองที่ตำแหน่งวงโคจรเดียวกันได้ โดยการส่งสัญญาณตาม Polarization ของดาวเทียมแต่ละดวงได้อย่างถูกต้อง

### เวลาการเดินทางของสัญญาณในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม (Propagation Delay)

การส่งสัญญาณระหว่างสถานีภาคพื้นดินไปยังดาวเทียมนั้น สัญญาณจะเดินทางด้วยความเร็วแสง ซึ่งระยะทางระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดินจะมีระยะทางต่าง ๆ กันตามตำแหน่งที่ตั้งของสถานีภาคพื้นดิน ซึ่งเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทาง (Propagation Delay) จะเปลี่ยนไปด้วย ระยะที่ดาวเทียมค้างฟ้าห่างจากโลกมากที่สุด คือ ๔๑,๗๕๖ กิโลเมตร เมื่อสถานีตั้งอยู่ในตำแหน่งที่งานสายอากาศมีมุมเงย (Elevation) เป็นศูนย์ และระยะที่ดาวเทียมและสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินอยู่ใกล้กันมากที่สุด คือ ๓๕,๘๐๐ กิโลเมตร ดังนั้นการเดินทางของสัญญาณขึ้นและลง จะใช้เวลาตั้งแต่ 239.6 ไปจนถึง 279.0 MSEC โดยคำนวณจากระยะทาง/ความเร็วของแสง

ระยะเวลาการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมนี้ เป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งของการสื่อสารผ่านดาวเทียม เช่น ในระบบการสื่อสารข้อมูลของระบบคอมพิวเตอร์ จะทำให้มีเวลาการตอบสนองช้าลงกว่าระบบสื่อสารภาคพื้นดิน แต่อย่างไรก็ตามก็ได้มีการแก้ไขปัญหาโดยใช้เทคนิคทางด้าน การสื่อสารข้อมูลเข้ามาช่วย เช่นการใช้ Protocol ที่เหมาะสมในการสื่อสารดาวเทียม ซึ่งจะมีการอธิบายในบทที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานดาวเทียมสื่อสารโดยละเอียดอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ ๓-๓๔ แสดงระยะทางระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน

## ๘. สัญญาณการรบกวนในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (Interference)

การเกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม มีความเป็นไปได้จากหลาย ๆ สาเหตุด้วยกัน ซึ่งได้มีการแบ่งเป็นชนิดของการเกิดสัญญาณรบกวน โดยสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ ITU (International Telecommunication Union) ดังต่อไปนี้

**A1** การส่งสัญญาณของระบบส่งสัญญาณภาคพื้นดิน (Terrestrial Transmissions) อาจทำให้เกิดการรบกวนแก่ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน

**A2** การส่งสัญญาณของดาวเทียมภาคพื้นดิน อาจทำให้เกิดการรบกวนกับระบบส่งสัญญาณภาคพื้นดินอื่น ๆ (Terrestrial Station)

**B1** การส่งสัญญาณของดาวเทียมดวงหนึ่ง อาจทำให้เกิดการรบกวนแก่ภาครับของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินของระบบดาวเทียมอื่น ๆ

B2 การส่งสัญญาณของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินของระบบดาวเทียมหนึ่ง อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนซึ่งรับได้โดยดาวเทียมในระบบอื่น ๆ ได้

C1 การส่งสัญญาณของดาวเทียม อาจทำให้เกิดการรบกวนแก่สถานีรับส่งสัญญาณภาคพื้นดิน เช่น ระบบไมโครเวฟ เป็นต้น

C2 การส่งสัญญาณของสถานีรับส่งสัญญาณภาคพื้นดิน อาจทำให้เกิดการรบกวนแก่ดาวเทียม

E การส่งสัญญาณของดาวเทียมดวงใดดวงหนึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนแก่ดาวเทียมดวงอื่น ๆ

### การเกิดสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ (Mode of Interference)

การเกิดสัญญาณรบกวนในการสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นมาจากสาเหตุหลาย ๆ ประการด้วยกันซึ่งสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

#### ๑. สัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบดาวเทียมที่มีตำแหน่งโคจรใกล้กัน (Adjacent Satellite System)

ได้แก่การรบกวนชนิด B1 และ B2 ซึ่งเป็นการรบกวนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างสถานีภาคพื้นดินของระบบสื่อสารดาวเทียมคนละระบบกัน สำหรับดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary Satellite) นั้น การรบกวน ชนิด B1 และ B2 เป็นตัวกำหนดระยะห่างของตำแหน่งดาวเทียม (Orbital Spacing) ในวงโคจร ซึ่งในปัจจุบัน มีการอนุญาตให้มีช่องว่างระหว่างดาวเทียมห่างกันได้ ๒ องศา สำหรับดาวเทียมที่ใช้งานในด้าน C-Band (6/4-GHz) ปัจจัยในการควบคุมการรบกวนชนิด B1 และ B2 นี้ก็คือ ลักษณะการแพร่สัญญาณจากจานสายอากาศ (Radiation Pattern) ของสถานีภาคพื้นดิน ซึ่งจานสายอากาศที่มีตัวสะท้อนสัญญาณขนาดใหญ่จะทำให้ความกว้างของลำสัญญาณแคบลงจึงเป็นการลดโอกาสการส่งสัญญาณไปรบกวนระบบสื่อสารดาวเทียมข้างเคียงได้

#### ๒. สัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบส่งสัญญาณภาคพื้นดิน (Terrestrial Interference)

การรบกวนชนิด A1, A2, C1, C2 เป็นการรบกวนที่เกิดระหว่างดาวเทียมกับระบบส่งสัญญาณทางพื้นดิน (Terrestrial Transmissions) เช่น ระบบส่งสัญญาณไมโครเวฟซึ่งมีความถี่ในช่วง C-Band (6/4 GHz) ซึ่งเป็นความถี่เดียวกันกับความถี่ที่ใช้งานในระบบดาวเทียม C-Band เช่นกัน

### ๓. การเกิดสัญญาณรบกวนจากการส่งสัญญาณที่ใช้ Polarization ต่างกัน (Cross-Polarization Interference)

ระบบดาวเทียมที่ใช้งานกันมากอยู่ในปัจจุบันมีการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse) โดยการส่งสัญญาณที่มี Polarization ต่างกันเช่น แบบ Linear Polarization (Vertical & Horizontal) หรือ Circular Polarization (Left Hand & Right Hand) การรบกวนสัญญาณซึ่งกันและกันระหว่าง Polarization จะมีความเป็นไปได้มาก วิธีป้องกันเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิด Cross Polarization สามารถกระทำได้โดยการติดตั้งจานสายอากาศที่มีการปรับแต่งมุมของตำแหน่ง Feed ให้ถูกต้อง โดยการวัด Cross-polarization Discrimination ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างคู่สัญญาณในแต่ละด้านของ Polarization โดย Discrimination จะมีค่าโดยทั่วไป 27-40 dB

### ๔. Adjacent Chanel Interference

เกิดจากการ Overlap ระหว่างสัญญาณคลื่นที่ติดกัน

### ๕. Intermodulation Interference

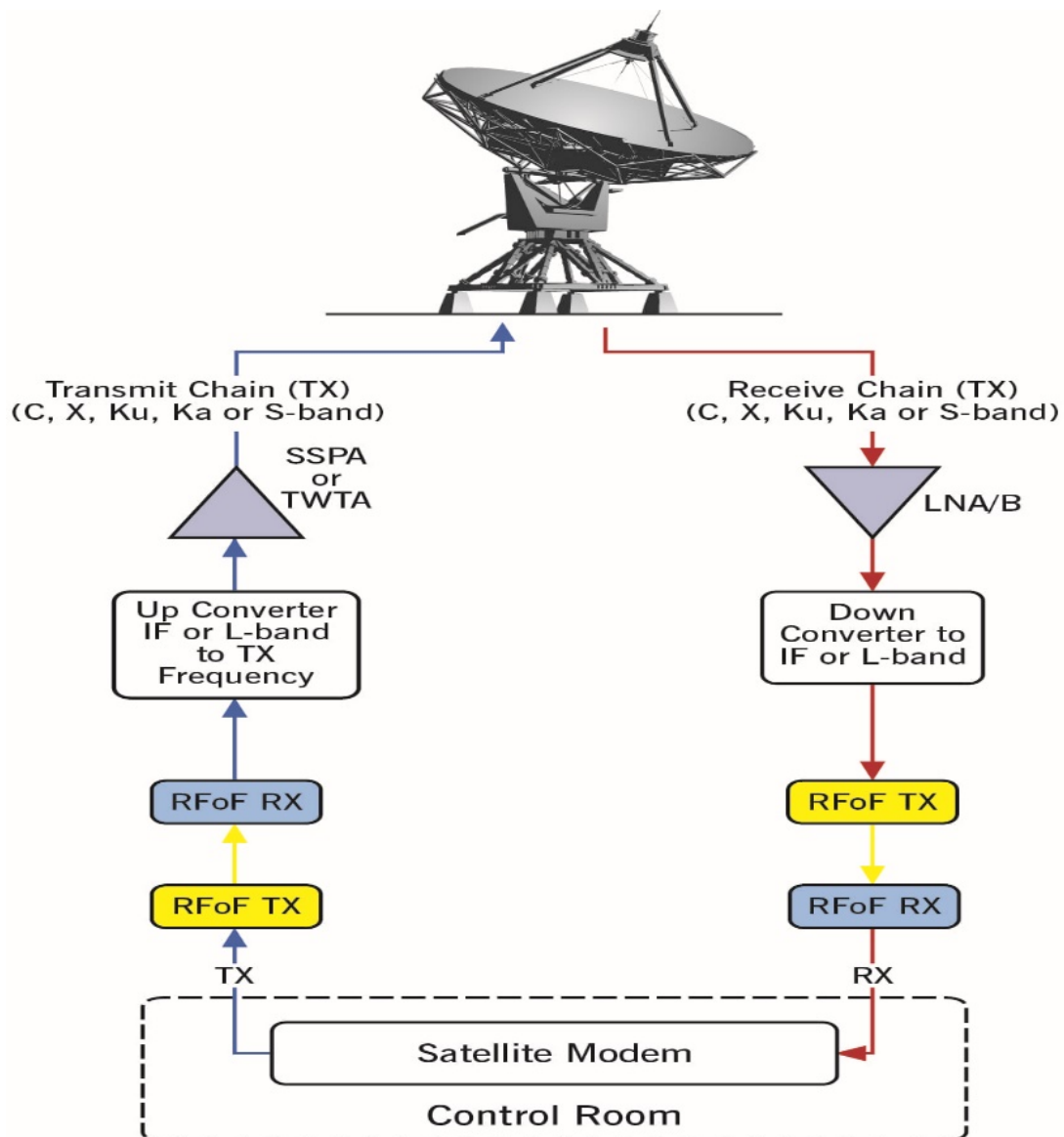
เกิดจาก Interference Product ที่เกิดขึ้นภายใน Transponder ที่มีสัญญาณคลื่นหลาย ๆ สัญญาณอยู่ภายใน การป้องกันปัญหา Intermodulation ทำได้โดยการออกแบบการใช้งานให้สัญญาณมีกำลังงาน (Power) ที่เหมาะสมไม่ส่งสัญญาณแรงเกินไป และให้มีช่องว่างระหว่างสัญญาณย่อย (Guard band) ที่เหมาะสม

### ๖. Intersymbol Interference

เกิดจากภายในระบบของดาวเทียมเอง เป็นผลมาจาก Filtering และ Nonlinear Characteristic ของเครื่องขยาย TWTA บนดาวเทียมที่กำลังขยายสูงจนใกล้ถึงจุดอิ่มตัว สัญญาณรบกวนในระบบดาวเทียมนั้น สามารถที่จะป้องกันได้ด้วยการออกแบบสถานีดาวเทียมให้เหมาะสมกับการใช้งานเช่น การใช้กำลังส่งให้เหมาะสม การเลือกใช้งานสายอากาศที่ได้มาตรฐานและมีขนาดที่เหมาะสม กับการใช้งานตลอดจนการเลือกสถานที่ติดตั้งที่ไม่มีสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่น และการติดตั้งสถานีดาวเทียมอย่างถูกต้องด้วย

## ๙. ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมของ ทอ.

ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ทอ. มีการติดตั้งตามกองบินหลักและสถานีเรดาร์ทุกที่เพื่อใช้เป็นเครือข่ายสำรองในกรณีที่เครือข่ายการสื่อสารหลักไม่สามารถติดต่อได้ปัจจุบัน เนื่องจากข้อจำกัดเรื่อง Bandwidth ทำให้ไม่สามารถรองรับความต้องการใช้งานทางยุทธการได้ทั้งหมด รองรับได้เฉพาะสัญญาณเรดาร์และหมายเลขโทรศัพท์ยุทธการเพียงบางส่วนประกอบด้วย สถานีดาวเทียมหลักระบบ MFTDMA และ ชุดสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ โดยสถานีดาวเทียมหลักระบบ MFTDMA ประกอบด้วย ศทค. ชั้น ๑ ดอนเมือง (ทำหน้าที่เป็นสถานีแม่ข่าย), ศทค. ชั้น ๒ หาดใหญ่, ศทค. ชั้น ๒ สุราษฎร์ธานี, ศทค. ชั้น ๒ บน.๔๑, ศทค. ชั้น ๒ สมุย, และ ศทค. ชั้น ๒ ภูเก็ต, และอีก ๒ สถานีในโครงการ RTADS II คือ สถานีภูม้นขาว สถานีเขาใหญ่ จ.กาญจนบุรี และ ศทค. ชั้น ๒ สร.ภูเก็ต



ภาพที่ ๓-๓๕ แสดงสถานีดาวเทียมแม่ข่าย (HUB)

ระบบสื่อสารดาวเทียม ทอ. แบ่งออกเป็น ๒ ระบบหลักคือ

### ๙.๑ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมหลัก MFTDMA (Multi Frequency Time Division Multiple Access)

ในระบบ MFTDMA มีการนำเอาเทคนิคที่เรียกว่า Demand Assigned Multiplex/Access คือ Bandwidth หรือ Frame ในกรณีของ TDMA ช่วงหนึ่งๆ จะไม่ถูกกำหนดให้ช่องสัญญาณช่องใดช่องหนึ่งใช้โดยเฉพาะ Bandwidth หรือ Frame ที่มีอยู่จะถูกกำหนดให้ช่องสัญญาณหนึ่งๆใช้ก็ต่อเมื่อมีความต้องการใช้เท่านั้น เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ถูกใช้แล้ว Bandwidth หรือ Frame ก็จะถูกกำหนดให้ช่องสัญญาณอื่นๆ ใช้ต่อไปซึ่งด้วยเทคนิคนี้เครือข่ายจะสามารถรองรับช่องสัญญาณหรือหมายเลขเพิ่มขึ้นได้ถึง ๔-๕ เท่า

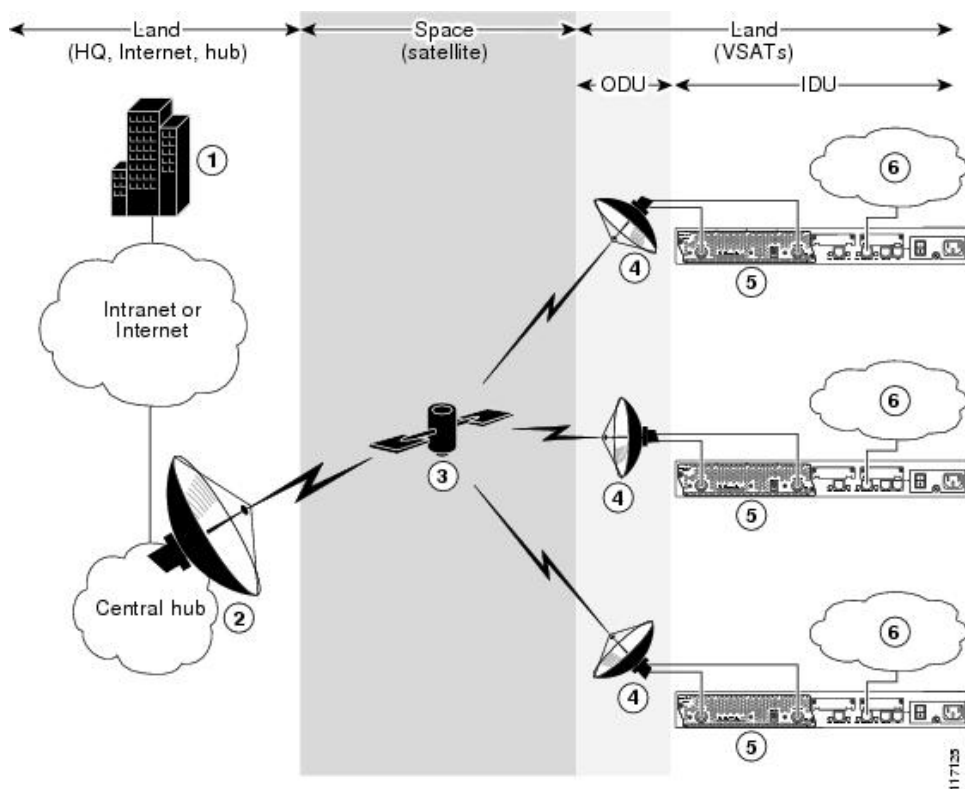
#### ข้อดีระบบ MFTDMA

- ใช้ Bandwidth ได้อย่างเต็มที่ (ทางทฤษฎี ๑๐๐% )
- การรบกวนระหว่างสัญญาณในเครือข่ายมีน้อย
- การบริหารช่องสัญญาณเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

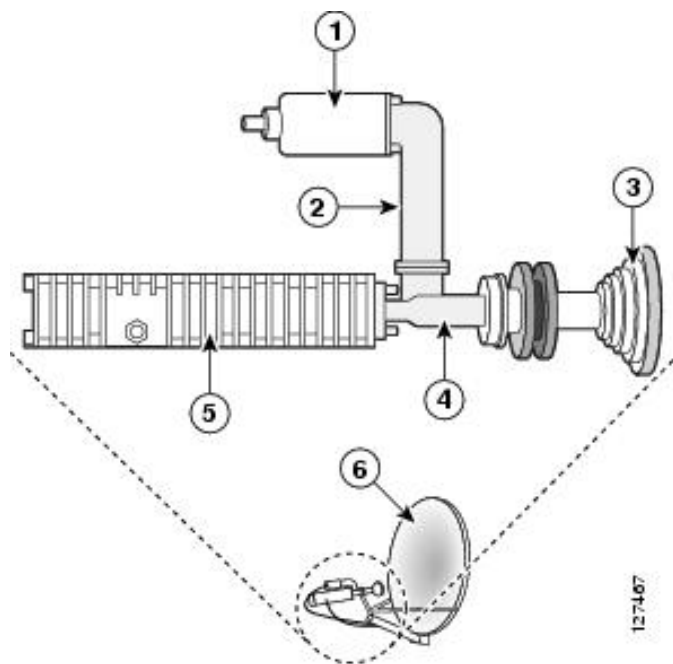
#### ข้อเสียระบบ MFTDMA

- อุปกรณ์มีราคาแพง
- ต้องการการ Synchronization ที่แม่นยำและเที่ยงตรง
- จำเป็นต้องมีการส่งสัญญาณตลอดเวลา





ภาพที่ ๓-๓๖ แสดงการเชื่อมต่อสื่อสารดาวเทียมแบบ MFTDMA

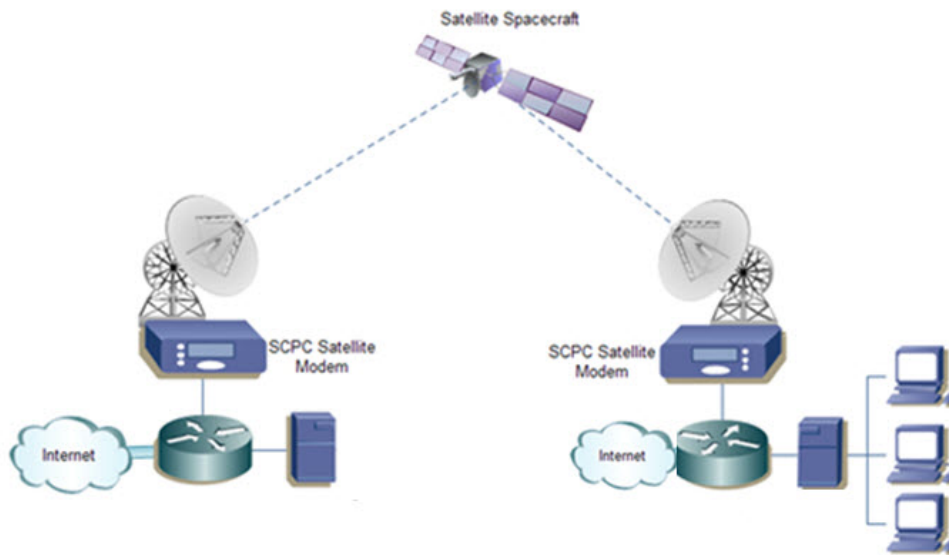


ภาพที่ ๓-๓๗ แสดงอุปกรณ์ ODU VSAT สื่อสารดาวเทียมแบบ MFTDMA

## ๙.๒ ชุดสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่ SCPC (Fly Away)

ส่วนระบบย่อย SCPC/FDMA นั้นมีสถานีแม่ข่ายอยู่ที่ตอนเมืองโดยใช้ระบบจาน สายอากาศและอุปกรณ์ Power Amplifier และอุปกรณ์ที่เรียกว่า Up/Down Converter ร่วมกับอุปกรณ์ในระบบ MFTDMA

ในกรณีที่ใช้ย่าน C - Band การใช้งานแบบ SCPC ทอ.ยังมีการใช้งานย่านความถี่ Ku Band ซึ่งเหมาะกับภารกิจทางยุทธการ การติดตั้งและเคลื่อนย้ายสะดวก จานสายอากาศมีขนาดเล็ก อุปกรณ์เชื่อมต่อมีขนาดเล็กลง แต่ Transponder ยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการเช่าช่องสัญญาณ



ภาพที่ ๓-๓๘ แสดงการเชื่อมต่อสื่อสารดาวเทียมแบบ SCPC



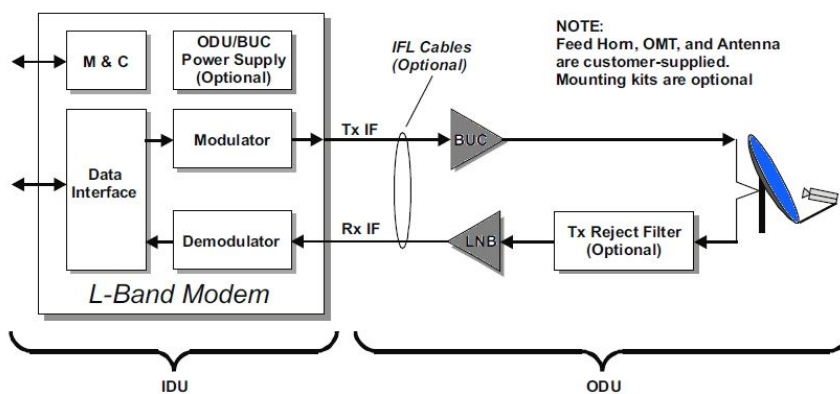
ภาพที่ ๓-๓๙ แสดงอุปกรณ์ ODU ย่านความถี่ Ku Band



Low Noise Block Converter (LNB)

Block Up Converter (BUC)

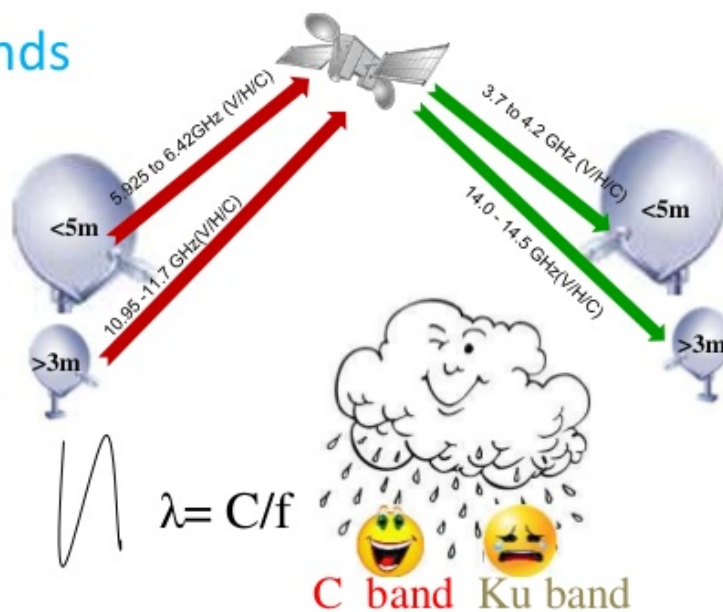
Indoor Unit (IDU)



ภาพที่ ๓-๔๐ แสดงอุปกรณ์ดาวเทียมที่ใช้งานแบบ SCPC

## Frequency Bands

L band	1 to 2 GHz
S band	2 to 4 GHz
<b>C band</b>	<b>4 to 8 GHz</b>
X band	8 to 12 GHz
<b>Ku band</b>	<b>12 to 18 GHz</b>
K band	18 to 26.5 GHz
K <sub>u</sub> band	26.5 to 40 GHz



ภาพที่ ๓-๔๑ แสดงย่านความถี่ใช้งาน C Band กับ Ku Band

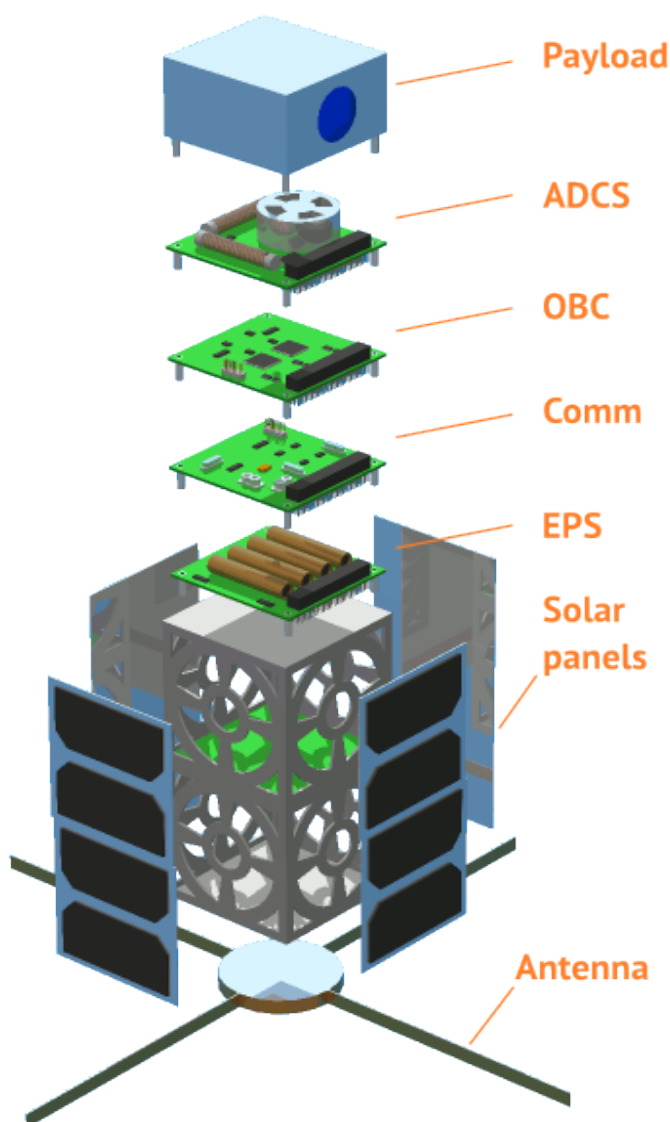
จากภาพที่ ๓-๔๑ แสดงให้เห็นว่าย่านความถี่ใช้งานมีผลต่ออุปกรณ์ เช่น ขนาดของจานสายอากาศ ซึ่งจานสายอากาศย่าน C Band จะมีขนาดใหญ่กว่า ย่าน Ku Band และย่าน C Band มีผลกระทบจากเมื่อดฝนน้อยกว่า (Rain Loss) ย่าน Ku Band แต่ย่าน Ku Band จะมี Bandwidth ที่สูงกว่า ย่าน C Band ทำให้การ รับ-ส่ง มีความเร็วสูง

ช่องสัญญาณบนดาวเทียม ทอ. มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดาวเทียม	ไทยคม 6, Transponder 8
Polarization	Vertical
ย่านความถี่	C-band
Up-link	6235.170 – 6235.920 MHz
Down-link	4010.170 – 4014.310 MHz
Bandwidth	4.14 MHz

ตารางที่ ๓-๑ แสดงข้อมูลดาวเทียมไทยคม ๖ (ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคอาจมีการเปลี่ยนแปลง)

ดาวเทียมที่ใช้ในการสื่อสารในอวกาศ (GEO Orbit) จะมีแนวโน้มที่พัฒนาเทคโนโลยีไม่ได้แบบก้าวกระโดด เนื่องจากต้นทุนค่อนข้างสูงแต่ยังคงมีความจำเป็นอยู่ ในอวกาศจะมีการพัฒนาดาวเทียมที่มีขนาดเล็ก (Nano Satellite) หรือ CubeSat ซึ่งสามารถพัฒนาตามเทคโนโลยีเปลี่ยนแปลงเร็ว เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ซึ่งจะถูกใช้งานทางด้านทดลองวิทยาศาสตร์ เช่น ตรวจสอบชั้นบรรยากาศถ่ายภาพทางอวกาศ (ทางด้านทหาร) การสื่อสารต่างๆ โดยที่พัฒนาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจากภาพที่ ๓-๔๒ แสดงองค์ประกอบของดาวเทียมที่มีส่วนประกอบต่างๆ คล้ายกับดาวเทียมขนาดใหญ่ แต่ต่างกันในวัสดุประสงค์ของการทำงานขึ้นอยู่กับการทำงาน



ภาพที่ ๓-๔๒ แสดงองค์ประกอบ Nano Satellite หรือ CubeSat

## บทที่ ๔

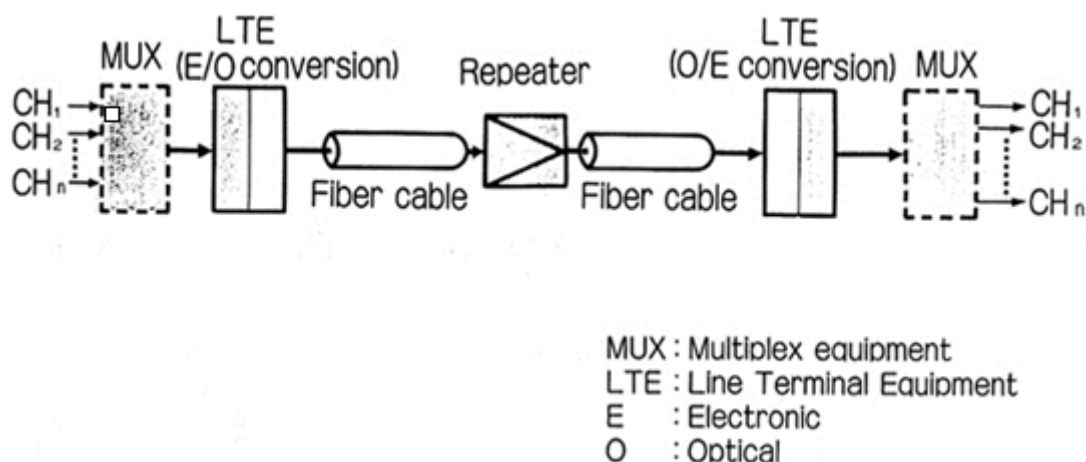
### ระบบสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง

#### (Fiber Optic Communication System)

การสื่อสารด้วยแสงได้มีการคิดค้นและพัฒนาเป็นเวลากว่า ๑๐๐ ปีแล้ว และเริ่มมีการใช้งานกันอย่างจริงจังเมื่อปี ๑๙๗๐ โดยใยแก้วนำแสงที่ผลิตจากสารประเภทซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) โดยมีอัตราการสูญเสียประมาณ 20 dB/Km. การใช้งานใยแก้วนำแสงในการสื่อสารได้ผลมาจากพัฒนาการของอุปกรณ์นำแสงและอุปกรณ์รับแสงจากสารประเภทกึ่งตัวนำ (Semiconductor Light Source) ปัจจุบัน การสื่อสารทางแสง ได้เป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานทั่วไปแล้ว โดยเฉพาะในระบบสื่อสารโทรคมนาคม (Long Haul Communications) ที่เห็นได้ชัดเจนคือ การติดต่อสื่อสารระหว่างประเทศทั่วโลก เช่น โครงการ Fiber Link Around the Glob (FLAG) ซึ่งเป็นโครงการที่มีเครือข่ายของเส้นใยแก้วนำแสงเชื่อมทุกทวีปในโลก เข้าด้วยกัน เส้นทางที่วาง F/O ส่วนใหญ่คือใต้ทะเล ซึ่งมีระยะห่างแต่ละสถานีทวนสัญญาณ (Repeater Span) ถึง ๓๐๐ กม. ใยแก้วนำแสงที่มีคุณภาพสูง มีอัตราการลดทอน (Attenuation) ต่ำ และใช้เทคโนโลยีของการขยายสัญญาณแสงด้วย Optical Amplifier

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงสามารถเดินทางได้ไกลจนสามารถนำสัญญาณเสียงหรือสัญญาณอื่นๆ เช่น ภาพ ข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่อยู่ไกลกันมากตามที่ต้องการได้นั้น มิใช่มีแต่คลื่นวิทยุเท่านั้น คลื่นแสงหรือพลังงานแสงซึ่งจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็สามารถนำมาประยุกต์ในการนำสัญญาณจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่อยู่ห่างไกลได้เช่นกัน ต่างกันแต่ว่าในการนำสัญญาณดังกล่าว คลื่นวิทยุพร้อมสัญญาณที่ผสมอยู่จะกระจายไปในอากาศจากสายอากาศส่งไปในสายอากาศรับสถานีรับจะจูน (Tune) รับคลื่นความถี่ที่ต้องการและถอดสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ผสมมากับคลื่นดังกล่าว เพื่อดำเนินการตามความต้องการต่อไป แต่ในกรณีของคลื่นแสงสัญญาณต่างๆที่ต้องการส่งในลักษณะสัญญาณไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นสัญญาณคลื่นแสงส่งผ่านไปตามตัวกลางตลอดเส้นทางจากจุดส่งจนถึงจุดรับ ที่ซึ่งสัญญาณแสงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มของสัญญาณแสง เพื่อดำเนินการตามที่ต้องการต่อไป ตัวกลางที่นิยมใช้ในการให้คลื่นแสงเดินทางเพื่อการสื่อสารดังกล่าวได้แก่ สายใยแก้วนำแสง (Optical Fiber)

หลักการทั่วไปของการสื่อสารในสายไฟเบอร์ออปติกคือการเปลี่ยนสัญญาณ (ข้อมูล) ไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแสงก่อน จากนั้นจึงส่งออกไปเป็นพัลส์ของแสงผ่านสายไฟเบอร์ออปติกสายไฟเบอร์ออปติกทำจากแก้วหรือพลาสติกสามารถส่งลำแสง ผ่านสายได้ทีละหลาย ๆ ลำแสงด้วยมุมที่ต่างกัน ลำแสงที่ส่งออกไปเป็นพัลส์นั้น จะสะท้อนกลับไปที่ผิวของสายชั้นในจนถึงปลายทาง แสดงได้ดังรูป



ภาพที่ ๔-๑ แสดงหลักการสื่อสารไฟเบอร์ออฟติก

เครื่องส่ง (Transmitter) เครื่องส่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่ได้ถูกมอดูเลตและขยายแล้วโดยการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสง ชุดเครื่องส่งนี้จะมีส่วนประกอบหลักคือ แหล่งกำเนิดแสง และวงจรขับที่สามารถทำการขยายและมอดูเลตสัญญาณได้แหล่งกำเนิดแสง Transmitter ที่ใช้กันอยู่มี ๒ ประเภทคือ LED (Light Emitting Diode) กับ Laser Diode (LD) รายละเอียดจะกล่าวต่อไป

เครื่องรับ (Receiver) เครื่องรับจะทำหน้าที่รับสัญญาณแสงแล้วเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า โดยเครื่องรับประกอบด้วยอุปกรณ์รับแสงและขยายกำลัง เป็นอุปกรณ์เพื่อประกอบเป็นเครื่องรับสัญญาณ Receivers มีอยู่ ๒ ชนิดใหญ่ๆ คือ Avalanche Photodiode (APD) และ PIN Diode โดยที่ PIN Diode มีการพัฒนาใช้เทคโนโลยีแบบ Field Effect Transmitter (FET) และ High Effect Transmitter Mobility Transistor (HEMT) Amplifier ทั้ง APD และ PIN Diode ได้รับการพัฒนาควบคู่กันขึ้นมา โดยที่ในการใช้งานปัจจุบันสามารถรับแสงด้วย bit rate มากกว่า 2 Gb/s ในบรรดา Receivers ทั้งหมดที่กล่าวมา PIN FET มีวิธีการผลิตที่ง่ายที่สุด ในกรณีที่เครื่องรับสัญญาณทำหน้าที่ขยายกำลังแสงเพื่อส่งต่อไปจะเรียกว่า อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) จะใช้ APD หรือพินโฟโตไดโอด

อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) สัญญาณแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแก้วนำแสง จะมีการสูญเสียสัญญาณไปกับระยะทางหรือความยาวของใยแก้วนำแสง ดังนั้นเมื่อถึงระยะหนึ่งสัญญาณแสงอาจต่ำมากจน ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) ระยะทางระหว่าง Repeater คือ Link ความต้องการคือต้องการให้ ระยะห่างระหว่างสถานีทวนสัญญาณ (Repeater Span) สูงที่สุด เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายให้มากที่สุด องค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา คือส่วน Transmitter Cable และ Receivers โดยที่มีความต้องการใช้ กำลังส่งสูง, สาย Cable ที่มีอัตราการลดทอนต่ำ และ Receiver Sensitivity สูง

การสื่อสารทางแสง เราสามารถควบคุมสถานภาพแวดล้อมได้ เพราะเป็นการส่งคลื่นแสงไปตามสาย จึงได้มีการให้ความสำคัญด้านการพัฒนาอย่างมากทั้งในด้านสายใยแก้วนำแสงและอุปกรณ์แปลงสัญญาณ จนมีผลให้เกิดข้อดีอื่นๆ ขึ้นหลายประการในปัจจุบัน เช่น สามารถมีการทำให้มีการ

สูญเสียกำลังกำลังจากการเดินทางในสายใยแก้วนำแสงน้อยลงได้มาก อุปกรณ์กำเนิดแสงที่มีการแตกกระจายของแสงน้อยลงทำให้สามารถมีแบนด์วิธ (Bandwidth) ของสัญญาณที่กว้างขึ้นเพราะมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่น้อย ฯลฯ ซึ่งเมื่อรวมกับข้อดีอื่นๆ เช่น การที่คลื่นแสงมีสเปกตรัมที่กว้างมาก สายใยแก้วนำแสงมีขนาดที่เล็ก น้ำหนักเบา การไม่มีการรบกวนจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากสายใยแก้วนำแสงไม่ใช่โลหะ สายใยแก้วนำแสงไม่เป็นสนิมจึงไม่ผุกร่อนและการที่อุปกรณ์ที่ใช้ทำสายใยแก้วนำแสงสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก เช่น ในกรณีที่ใช้ซิลิกอนออกไซด์ ซึ่งมีมากในธรรมชาติเพราะเป็นสารในทราย เป็นต้น

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับข้อเสียของการสื่อสารทางแสงเอง เช่น สายใยแก้วนำแสงแตกหักง่ายกว่าสายโลหะ สายใยแก้วนำแสงต้องการการเชื่อมต่อที่มีความแน่นนอนถูกต้องเสมอความไม่เหมาะสมสำหรับงานสื่อสารเคลื่อนที่ มีการเชื่อมต่อในเส้นทางการติดต่อด้วยเสมอแล้ว จะพบว่าสายใยแก้วนำแสงมีข้อดีมากกว่า และเหมาะสมอย่างยิ่งกับการสื่อสารประจำที่ ดังนั้น ในปัจจุบันการสื่อสารทางแสงจึงเป็นกำลังเป็นที่นิยมในการใช้มากขึ้นเรื่อยๆ ในกิจการสื่อสารประจำที่ทั้งในด้านการสื่อสารโทรคมนาคมและด้านโทรทัศน์ (ผ่านสายใยแก้วนำแสง)

จากประเด็นดังกล่าว จึงเห็นควรที่จะได้มีการกล่าวถึงการกระจายหรือการเดินทางของคลื่นแสงในสายใยแก้วในหัวข้อวิชาการการแพร่กระจายคลื่นนี้ด้วย (โดยกล่าวถึงเฉพาะการกระจายหรือการเดินทางของคลื่นแสงในสายใยแก้วนำแสงเท่านั้น ไม่รวมหัวข้ออื่นของการสื่อสารทางแสง เช่น การแปลงและการผสมสัญญาณที่ภาคส่ง และการรับคลื่นด้วย)

## ๑. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแสงและการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

### ๑.๑ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านแสงจะมีความเร็วสูงสุดเมื่อเคลื่อนที่ในสุญญากาศ ความเร็วของแสงในสุญญากาศจะแทนด้วยตัวอักษร  $C$  และมีค่าเท่ากับ  $300,000$  กิโลเมตรต่อวินาที ตามกฎของไอส์ไตน์ ความเร็วนี้เป็นความเร็วสูงสุดที่สามารถสังเกตได้ในการวัดทางกายภาพ เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางอย่างอื่นจะมีความเร็วลดลง ความเร็วของแสงในการเดินทางผ่านตัวกลางอื่นนี้จะแทนด้วยตัวอักษร  $v$  และมีความสัมพันธ์กับ  $C$  ดังสมการ

$$v = \frac{C}{n}$$

$n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของวัสดุตัวกลางที่แสงผ่าน ตามปกติแล้วแก้วที่ใช้ในการทำเส้นใยแก้วนำแสงจะมีค่าดัชนีการหักเหประมาณ ๑.๕ หากนำค่าที่กำหนดแทนที่ในสมการด้านบน ความเร็วของแสงในแก้วจะเป็น  $200,000$  กิโลเมตรต่อวินาที

คุณลักษณะของแสงในสภาพคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รูปแบบหนึ่งในการพิจารณาแสง คือ การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบด้วยความถี่และความยาวคลื่น อันเป็นคุณลักษณะพื้นฐานเดียวกับคลื่นวิทยุต่างกันเพียงแต่ว่าแสง จะมีความถี่สูงกว่า จากรูปข้างล่าง สเปกตรัมของคลื่น



แม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ ในย่านความถี่ต่ำจะเป็นไฟฟ้า และความถี่วิทยุซึ่งใช้ในด้านดนตรี การกระจายเสียง และการสื่อสารด้วยไมโครเวฟ ในย่านความถี่สูงจะเป็นย่านของแสงที่มองเห็น และรังสีต่างๆ ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงจะมี ซึ่งเท่ากับ ๓๐๐,๐๐๐ กิกะเฮิรตซ์ ความถี่นี้จะต่ำกว่าความถี่แสงที่มองเห็น (Visible Light) หมายความว่าแสงที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงจะเป็นแสงที่มองไม่เห็น (Invisible Light) และความถี่แสงอยู่ในย่านรังสีอินฟราเรด (Infrared Light) ตามปกติแล้วการกำหนดชนิดของแสงจะใช้ความยาวคลื่น ของแสงนั้นแทนที่จะใช้ความถี่หรือสี ความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศจะสัมพันธ์กับ C และความถี่ V ดังสมการ

$$\lambda = C / V$$

ในทางปฏิบัติค่าความยาวคลื่น (l) ที่ใช้ในการสื่อสารนั้นจะอยู่ในย่าน ๘๕๐, ๑๓๑๐ หรือ ๑๕๕๐ นาโนเมตร ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่แสงเดินทางผ่านสำหรับวัสดุอื่น นอกเหนือจากสุญญากาศแล้วความยาวคลื่นของแสงในวัสดุ ( $\lambda_{mat}$ ) นั้นสามารถหาได้จากสูตร

$$\lambda_{mat} = \frac{V_{mat}}{V}$$

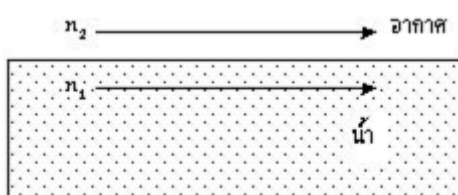
$$\lambda_{mat} = \frac{C}{n_{mat}} \times \frac{l}{V} \quad ; \quad V_{mat} = \frac{C}{n_{mat}}$$

$$\lambda_{mat} = \frac{\lambda_{vac}}{n_{mat}}$$

โดยที่  $\lambda_{vac}$  คือ ความยาวคลื่นแสงเมื่อแสงเดินทางผ่านสุญญากาศ  
 $n_{mat}$  คือ ค่าดัชนีการหักเหของวัสดุที่แสงเดินทางผ่าน

## ๒. คุณสมบัติของแสง

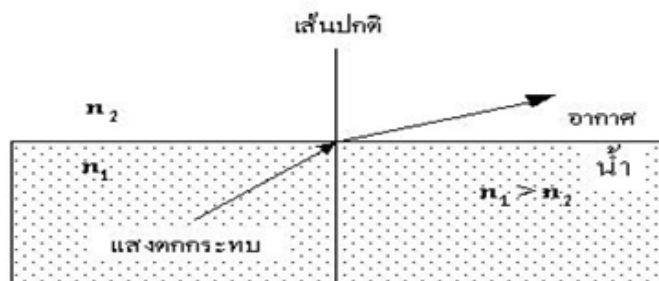
แสงเดินทางเป็นเส้นตรง ตามปกติแล้วแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียว หรือมีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง



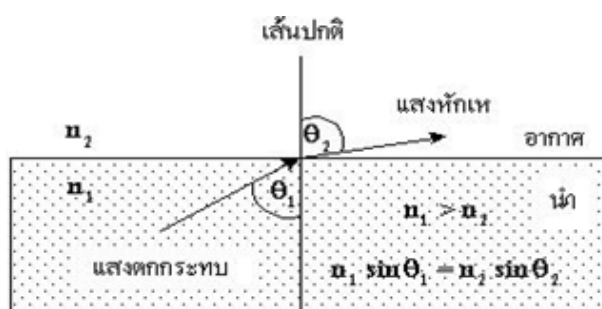
ภาพที่ ๔-๒ แสงเดินทางเป็นเส้นตรง

## ๒.๑ การหักเหของแสง และมุมหักเหของแสง

แสงตกกระทบบจะหักเหที่รอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหที่แตกต่างกัน ดังรูป

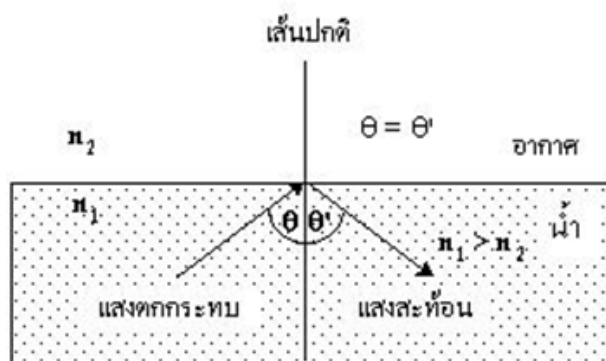


ภาพที่ ๔-๓ การหักเหของแสง



ภาพที่ ๔-๔ มุมหักเหของแสง

แสงตกกระทบบ แสงหักเห และเส้นปกติที่เกิด ณ จุดตกกระทบบที่รอยต่อของตัวกลาง ทั้งสองจะอยู่ในระนาบเดียวกัน มุมหักเหจะสามารถคำนวณได้โดยกฎของสเนล (Snell's Law) ดังรูป



ภาพที่ ๔-๕ มุมสะท้อนของแสง

การสะท้อนของแสง และมุมการสะท้อนของแสง แสงตกกระทบจะสะท้อนที่รอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหที่ต่างกัน ดังรูป

ค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) ปกติแล้วแสงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ คือ ประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที แต่ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางชนิดอื่นๆ จึงเห็นได้ว่าแสงจะเกิดการหักเหขึ้น ถ้าหากเดินทางผ่านตัวกลาง ๒ ชนิด ตามคุณสมบัติของแสง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหของแสง ความเร็วของแสงในตัวกลางและความเร็วของแสงในสุญญากาศได้ดังนี้

$$n = \frac{c}{v}$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางนั้น

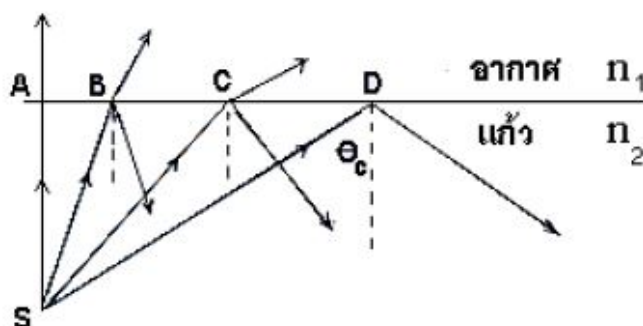
$c$  คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ ( $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที)

$v$  คือ ความเร็วของแสงในตัวกลางนั้น

ตัวกลาง	ดัชนีการหักเห
Water	๑.๓๓
Ethyl Alcohol	๑.๓๖
Carbon Bisulfide	๑.๖๓
Air (1 atm and 20 <sup>0</sup> C)	๑.๐๐๐๓
Methylene Iodide	๑.๗๔
Fused Quartz	๑.๔๖
Glass, Crown	๑.๕๒
Glass, Dense Flint	๑.๖๖
Oidium Chloride	๑.๕๓
Polyethylene	๑.๕๐-๑.๕๔

ตารางที่ ๔.๑ ตารางแสดง ค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางต่างๆ

อธิบายโดยใช้หลักการของแสง (Geometrical Optic) ได้ดังนี้



ภาพที่ ๔-๖ หลักการของแสง

ให้จุดกำเนิดแสงอยู่ที่ S จะมีแสงออกจากจุด S นี้ไปยังจุดต่าง ๆ ของผิวแก้ว ดังรูป ที่จุด A แสงจะพุ่งออกจากแก้วไปยังอากาศโดยไม่มีการหักเห ที่จุด B จะมีการหักเหเล็กน้อย และมีบางส่วนสะท้อนกลับมาในแก้ว ที่จุด C จะมีการหักเหมากขึ้นเล็กน้อย และมีบางส่วนสะท้อนกลับมาในแก้ว ที่จุด D จะไม่มีการหักเห แสงจากจุด S ทั้งหมดจะสะท้อนกลับมาในแก้ว ณ. จุดนี้จะเรียกมุม  $\theta_c$  ว่า มุมวิกฤต (Critical Angle) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ การสะท้อนกลับหมด (Total Reflection) หาค่ามุม  $\theta_c$  ได้จากสมการ

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

### ๓. เส้นทางของแสงในสายไฟเบอร์ออปติก



ภาพที่ ๔-๗ เส้นทางของแสงในสายไฟเบอร์ออปติก

เมื่อแสงผ่านเข้ามาในสายไฟเบอร์ออปติก(เส้นใยแก้วนำแสง)ที่ทำจากแก้ว จะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวแก้ว (บริเวณที่เป็นรอยต่อของแก้วกับอากาศ) แสงที่สะท้อนนี้จะกลับเข้ามาในสายไฟเบอร์ออปติก(เส้นใยแก้วนำแสง) และเกิดการสะท้อนที่ผิวแก้วอีกด้านหนึ่ง การสะท้อนนี้จะเกิดภายในแก้ว โดยไม่มีการทะลุผ่านผิวแก้วออกไปยังอากาศ ทำให้สายไฟเบอร์ออปติก(เส้นใยแก้วนำแสง) สามารถนำแสงจากจุด A ไปยังจุด B ได้ โดยเส้นทางของ AB เป็นเส้นโค้ง จากสมบัติข้อนี้จึงได้มีการสร้างเครื่องมือตรวจดูอวัยวะภายในร่างกายมนุษย์โดยการนำแสงจากภายนอกผ่านสายไฟเบอร์ออปติก (เส้นใยแก้ว

นำแสง) ไปยังกระเพาะอาหาร และนำภาพกระเพาะอาหารกลับมายังภายนอกให้ผู้ทำการตรวจได้มองเห็น

### ๓.๑ คุณลักษณะในการส่งสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสง

เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงคือสื่อกลางชนิดหนึ่งที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งไม่ว่าจะเป็นตัวกลางชนิดใดย่อมจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณที่ทำการส่งเส้นใยแก้วนำแสงก็เช่นเดียวกัน โดยเส้นใยแก้วนำแสงจะมีคุณลักษณะต่างๆ ในการส่งสัญญาณนี้

#### การลดทอนสัญญาณ

การลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เส้นใยแก้วนำแสง นิยมนำมาใช้ในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม โดยการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงก็จะแสดงอยู่ในหน่วย เดซิเบล เช่นเดียวกับตัวนำที่เป็นโลหะ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Single Attenuation} = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o}$$

แต่เนื่องจากการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสงนั้นนิยมบอกค่าการลดทอนสัญญาณในรูปของเดซิเบลต่อหน่วยความยาว (เช่น  $\text{dBkm}^{-1}$ ) ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\alpha_{\text{dB}} L = 10 \log_{10} P_i / P_o$$

โดย  $\alpha_{\text{dB}}$  คือ การลดทอนสัญญาณต่อหน่วยความยาวและ  $L$  คือความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง

การสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง การลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงจะทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณ (Transmission Loss) โดยเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น องค์ประกอบ สารที่นำมาสร้าง เทคนิคในการเตรียมสารและการทำให้สารบริสุทธิ์ และโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้ คอนเนคเตอร์ และการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งสามารถแยกการสูญเสียสัญญาณออกได้เป็น ๒ ประเภทหลัก คือ การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวเส้นใยแก้วนำแสง (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากการนำไปใช้งาน (Addition Loss)

#### การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวเส้นใยแก้วนำแสง ประกอบด้วย

##### การสูญเสียจากการดูดกลืนแสงของวัสดุที่ใช้สร้าง (Material Absorption Losses)

คือการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบของสารที่ใช้ในการสร้างเส้นใยแก้วนำแสง โดยการสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารที่ใช้สร้างและกระบวนการในการสร้าง (Fabrication Process) เส้นใยแก้วนำแสง โดยจะทำให้เกิดการกระจายตัวของกำลังงานแสงที่ส่งกลายเป็นความร้อนขึ้นภายในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งการสูญเสียแสงเนื่องจากการดูดกลืนแสงสามารถแบ่งได้ ๒ กรณี คือ

## ๑. การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสง (Intrinsic Absorption)

เนื่องจากแก้วซิลิกาบริสุทธิ์ที่ใช้ในการสร้างเส้นใยแก้วนำแสงจะมีการดูดกลืนแสงดังภาพที่ ๔-๘ โดยการดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตมากที่สุดที่ความยาวคลื่น ๐.๑ ไมโครเมตร และมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมากที่สุดที่ความยาวคลื่น ๑๐ ไมโครเมตร

## ๒. การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารที่เจือปนอยู่ในเส้นใยแก้วนำแสง (Extrinsic Absorption)

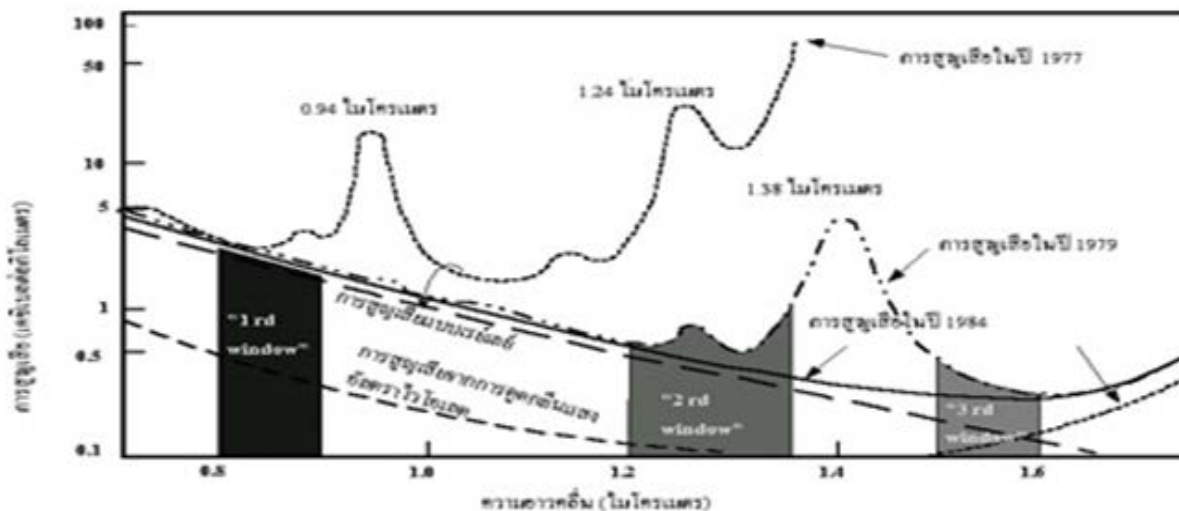
เกิดขึ้นเนื่องจากการเจือปนไอออนของธาตุโลหะในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการหลอมแก้ว ซึ่งสารที่เจือปนในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดจากการหลอมเหลวนี้นี้เป็นสาเหตุสำคัญของการลดทอนสัญญาณแสง

### การสูญเสียแสงเนื่องจากการกระจัดกระจายแสง (Scattering Losses)

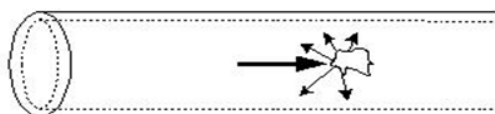
เมื่อเกิดการกระจัดกระจายของแสงจะทำให้แสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนโหมด ซึ่งจะทำให้แสงเกิดการเปลี่ยนไปสู่โหมดที่สามารถแพร่กระจายออกไปนอก เส้นใยแก้วนำแสงได้ ไม่สามารถเดินทางไปในคอร์ได้ แต่จะแพร่กระจายออกไปภายนอก การสูญเสียที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงสามารถแบ่งได้ ๒ ชนิด คือ แบบเรย์เลย์ (Rayleigh Scattering) และแบบไม (Mie Scattering) ซึ่งทั้งสองแบบล้วนมีสาเหตุมาจากคุณลักษณะทางกายภาพที่ไม่สมบูรณ์ของเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดจากกระบวนการผลิตซึ่งยากที่จะกำจัดให้หมดไปในปัจจุบัน

### ๑. แบบเรย์เลย์

เกิดมาจากการที่แสงเดินทางไปกระทบวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียง กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณทำให้แสงแตกกระจายออกไปในทิศทางที่ต่างๆ ดังภาพที่ ๔-๘ โดยวัตถุที่เจือปนอยู่นั้นเกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตเส้นใยแก้วนำแสง คือ ในกระบวนการทำเส้นใยแก้วนำแสงให้ความร้อนประมาณ ๒,๐๐๐ องศาเซลเซียส แก้วแท่งแก้วพรีฟอร์มแล้วดึงแท่งแก้วให้เป็นเส้นใยแก้วนำแสงขนาดเล็ก และลดอุณหภูมิของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นเป็น ๒๐ องศาเซลเซียส อย่างรวดเร็วซึ่งจะ ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่น และเกิดเป็นวัตถุขนาดเล็กๆ ขึ้น โดยค่าการสูญเสียเนื่องจากการกระจัดกระจายแบบเรย์เลย์นี้จะเกิดกับแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและอินฟราเรด จะแปรผกผันกับความยาวคลื่นแสง



ภาพที่ ๔-๘ การสูญเสียทั้งหมดในเส้นใยแก้วนำแสง



ภาพที่ ๔-๙ การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เลห์

โดยค่าการสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เลห์นี้จะมีค่าประมาณ ๐.๓ เดซิเบลต่อกิโลเมตรที่ความยาวคลื่น ๑๓๐๐ นาโนเมตร และ ๐.๑๘ เดซิเบลต่อกิโลเมตรที่ความยาวคลื่น ๑๕๕๐ นาโนเมตร

๒. แบบมี

เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างรูปทรงกระบอกของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติของรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง ค่าดัชนีการหักเหของคอร์กับแคลดดิ้งที่แตกต่างกัน ในแต่ละช่วงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง และการผันแปรของเส้นผ่าศูนย์กลาง เป็นต้น ส่งผลให้แสงที่ตกกระทบเกิดการกระจัดกระจายออก การสูญเสียแสงแบบนี้จะแปรผันโดยตรงกับความยาวคลื่นตามสมการ

$$Mie\ Scattering\ Loss = \frac{\lambda}{10}$$

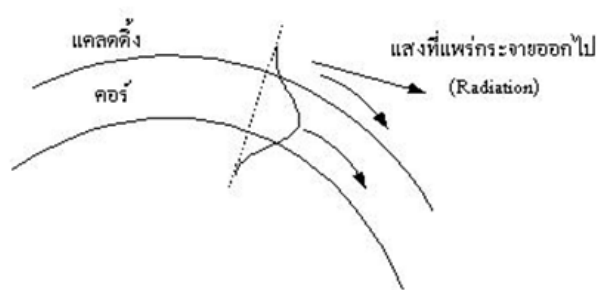
การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมาจากการนำไปใช้งาน ประกอบด้วย

### ๑. การสูญเสียแสงเนื่องจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง (Bending Loss)

จะเกิดขึ้นเมื่อมีการโค้งงอเส้นใยแก้วนำแสง โดยมีมุมการโค้งงอมากกว่ามุมวิกฤต ซึ่งทำให้แสงที่เดินทางไปเกิดการกระจัดกระจายออกไปนอกคอร์ได้ ดังภาพที่ ๔-๑๐

### ๒. การสูญเสียที่เกิดจากการโค้งงอเส้นใยแก้วนำแสงแบบไมโครเบนดิง (Micro Bending)

เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงที่เกิดจากการมีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของ เส้นใยแก้วนำแสงส่งผลให้แกนของเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการบิดงอไปเล็กน้อย (ประมาณ ๒ - ๓ ไมโครเมตร) ทำให้แสงที่ตกกระทบบริเวณดังกล่าวเกิดการหักเหออกไปภายนอกเส้นใยแก้วนำแสงได้



ภาพที่ ๔-๑๐ การสูญเสียแสงที่เกิดจากการโค้งงอเส้นใยแก้วนำแสง

### ๓. การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแก้วนำแสง (Connection Loss)

จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมต่อไม่สมบูรณ์ ดังภาพที่ ๔-๑๑ นอกจากนี้บริเวณรอยต่อจะเกิดช่องว่างขนาดเล็กซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียแสงจากการสะท้อนกลับ ซึ่งเรียกว่า "Fresnel Reflection" ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า " Fresnel Loss " โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Fresnel Loss} = -10 \log(1 - r)$$

$$\text{โดยที่ } r = \left( \frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2$$

$r$  = ขนาดของเฟรสเนลรีเฟลคชัน

$n_1$  = ดัชนีการหักเหของคอร์

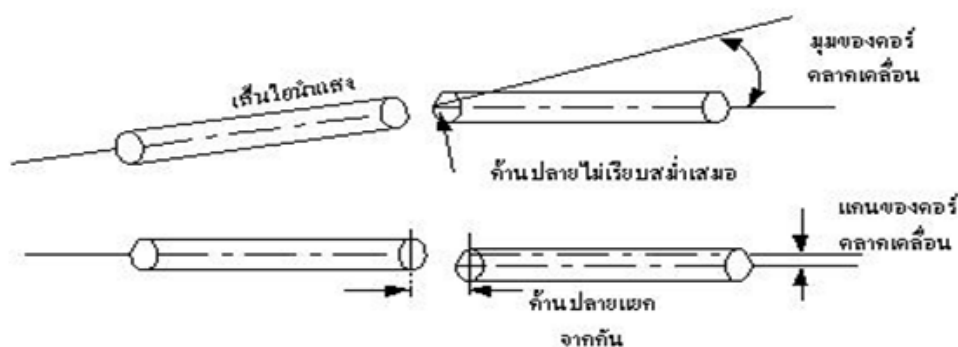
$n$  = ดัชนีการหักเหของตัวกลางที่อยู่

ระหว่างเส้นใยนำแสงที่ทำการเชื่อมต่อ



#### ๔. การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการคัปปลิงสัญญาณ (Coupling Loss)

เป็นการสูญเสียระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงกับแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีความกว้างของลำแสงไม่เท่ากัน คือ เลเซอร์ไดโอด (LD) จะมีลำแสงแคบกว่าแอลอีดี (LED) จึงทำให้การ สูญเสียจากการคัปปลิงสัญญาณของเลเซอร์มีค่าน้อยกว่าแอลอีดี นอกจากนี้ค่าการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) ของเส้นใยแก้วนำแสง ถ้ามีค่ามากก็จะ เกิดการสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่า เส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่าการเปิดรับให้แสงผ่านน้อย



ภาพที่ ๔-๑๑ การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยแก้วนำแสง

#### การขยายกว้างออก

การขยายกว้างออกของสัญญาณแสงที่จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนทั้งในกรณีที่เป็นการส่งสัญญาณแบบอานาล็อก และดิจิทัล ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเราจะใช้ในการส่งสัญญาณแบบดิจิทัล ดังนั้นเมื่อเกิดการขยายกว้างออกก็ทำให้สัญญาณพัลส์ของแสงที่ทำการส่ง และเดินทางไปใน เส้นใยแก้วนำแสง การขยายกว้างออกเกิดขึ้นดังภาพที่ ๔-๑๒ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์ ทำให้ภาครับไม่สามารถแยกสัญญาณออกจากกันได้ ซึ่งเราเรียกผลที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Intersymbol Interference (ISI)" หากมีค่า ISI สูงก็จะส่งผลให้ความผิดพลาดสูงขึ้น ในภาพที่ ๔-๑๓ แสดงการเกิดการขยายกว้างออกของสัญญาณดิจิทัลที่ทำการส่งใน เส้นใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ โดยความกว้างของพัลส์จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่แสงเดินทางด้วย โดยสามารถแยกชนิดของการขยายกว้างออกได้เป็น ๒ ชนิด คือ

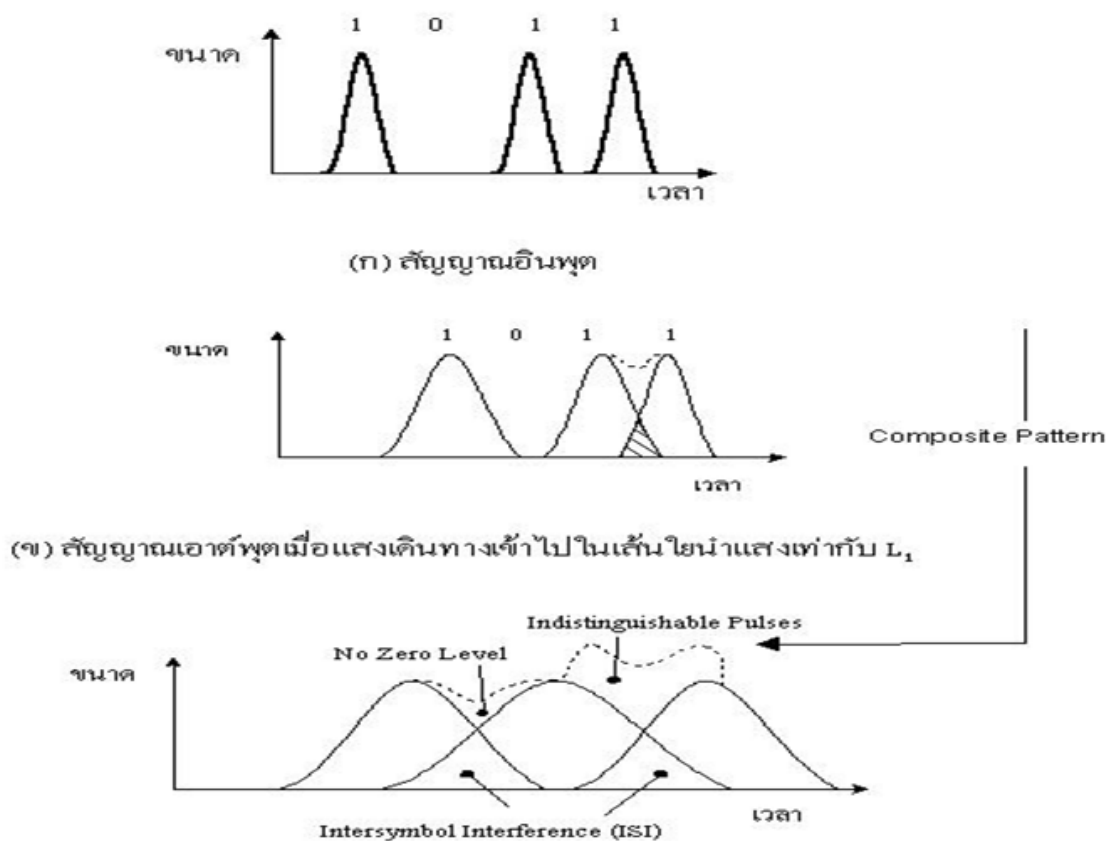
#### ๑. การขยายกว้างออกเนื่องจากโหมด (Mode Dispersion หรือ Modal Dispersion)

จะเกิดขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะของแสง กล่าวคือ ความเร็วในการเดินทางของแสงแต่ละโหมดจะแตกต่างกัน ดังนั้นแสงจะเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ส่งผลให้เกิดการซ้อนทับกันของข้อมูล โดยสามารถแก้ไขโดยไม่ส่งพัลส์ของข้อมูลที่มีความแคบมากเกินไป คือ การจำกัดความเร็วในการส่งนั่นเอง โดยการเกิดโหมดดิสเพอร์ชันนี้จะเกิดในเส้นใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์มากกว่า เส้นใยแก้วนำแสงแบบเกรดเดดอินเด็กซ์

## ๒. การขยายกว้างออกเนื่องจากความยาวคลื่น แบ่งได้เป็น ๒ ชนิด

๒.๑ การขยายกว้างออกเนื่องจากสารที่ใช้สร้าง (Material Dispersion) เกิดขึ้นเนื่องจากในตัวกลางชนิดเดียวกัน ถ้าความยาวคลื่นแสงที่เดินทางในตัวกลางนั้นมีค่าต่างกันด้วย และเนื่องจากแสงที่ใช้ในระบบการสื่อสารก็ไม่ได้เพียงความยาวคลื่นเดียวที่แท้จริง กล่าวคือแอลอีดีจะมีความกว้างของสเปกตรัมเท่ากับ ๓๐ ถึง ๖๐ นาโนเมตร และเลเซอร์ไดโอดจะมีความกว้างสเปกตรัม ๒ ถึง ๕ นาโนเมตร ดังนั้นแสงก็จะเดินทางจะเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ส่งผลให้เกิดการซ้อนทับกันของข้อมูลเหมือนกับกรณีของการขยายกว้างออกเนื่องจากโหมด

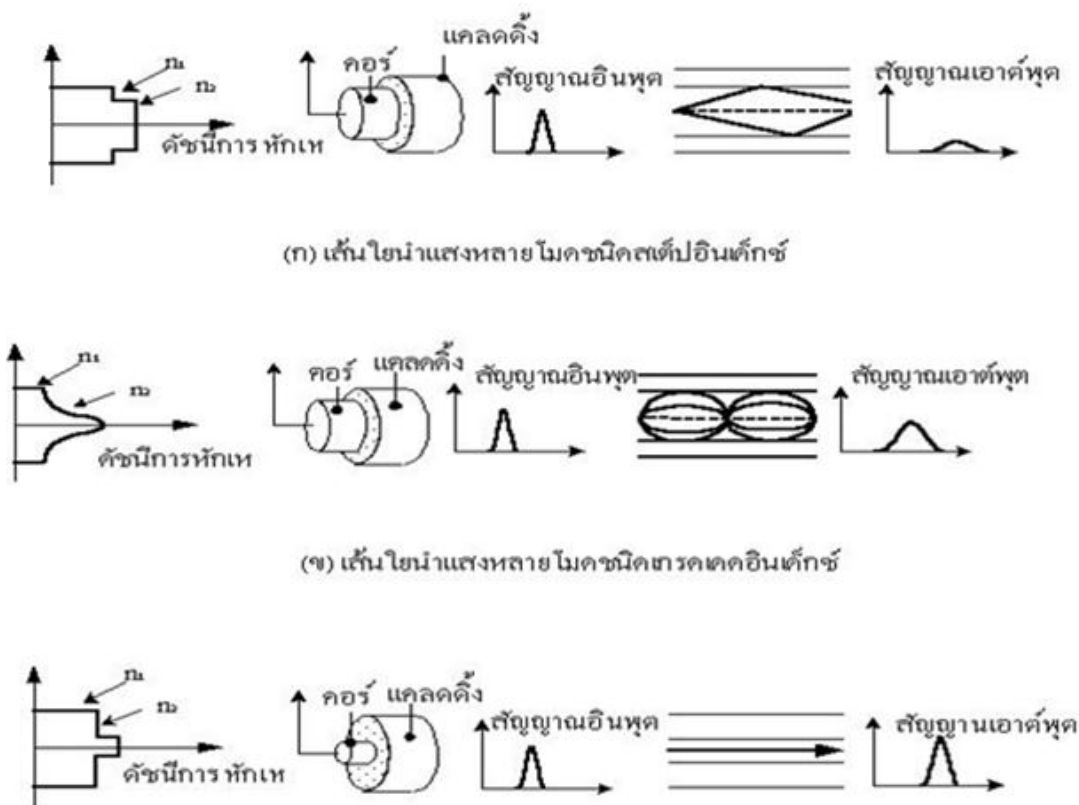
๒.๒ การขยายกว้างออกเนื่องจากโครงสร้าง (Structure Dispersion) จะเกิดจากการป้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีหลายความยาวคลื่น ทำให้ค่าดัชนีการหักเหไม่เท่ากัน



ภาพที่ ๔-๑๒ การขยายกว้างออกเนื่องจากโครงสร้าง

สัญญาณเอาต์พุตเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ  $L_2 > L_1$

รูปที่ ๔.๑๒ การเกิดการขยายกว้างออกของสัญญาณพัลส์ ๑๐๑๑ เมื่อผ่านเส้นใยแก้วนำแสง



(ก) เส้นใยนำแสงหลาย โหมดชนิดสเต็ปอินดั๊กซ์

(ข) เส้นใยนำแสงหลาย โหมดชนิดการคดเคี้ยวอินดั๊กซ์

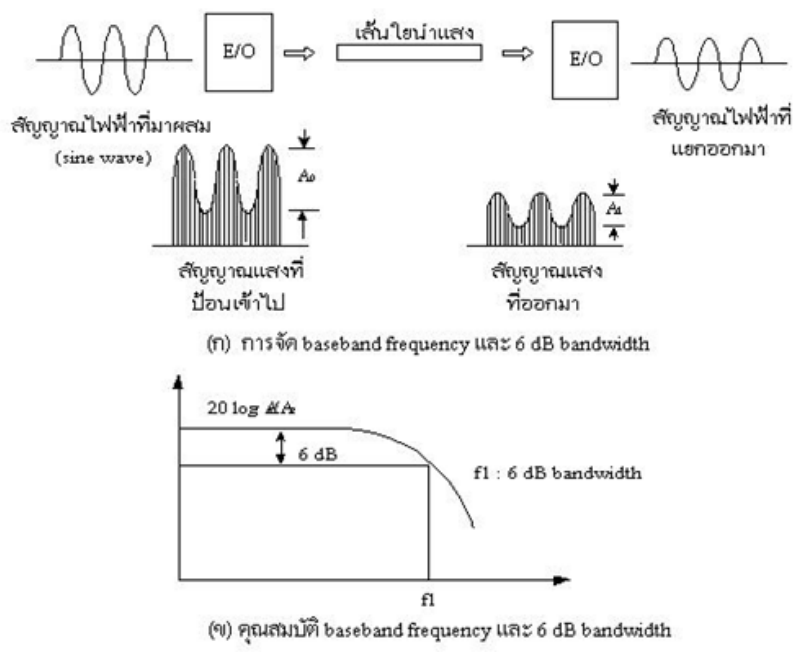
ภาพที่ ๔-๑๓ การเกิดการขยายกว้างออกของสัญญาณดิจิทัล

ดังนั้นผลต่างดัชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งก็จะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น โดยแสงที่มีค่าความยาวคลื่นสูงกว่าจะเดินทางทะลุผ่านเข้าไปในส่วนของแคลดดิ้งมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการขยายกว้างออกชนิดต่างๆ จะได้ดัง สมการ ๒.๒๑ การขยายกว้างออกเนื่องจากโหมด >> การขยายกว้างออกเนื่องจากสารที่ใช้สร้าง > การขยายกว้างออกเนื่องจากโครงสร้าง (ภาพ ๔-๑๒) ดังนั้นเส้นใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดจะถูกกำหนดแบนด์วิดท์โดยโหมดดิสเปอร์ชัน ส่วนเวฟเล็่ง์ดิสเปอร์ชันจะมีผลต่อการส่งสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดน้อยมาก แต่จะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว ซึ่งในการใช้งาน เส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวก็จะเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ทำให้แมทที่เรียลดิสเปอร์ชันหักล้างกับสต็อคเตอร์ดิสเปอร์ชันให้มากที่สุด ซึ่งความยาวคลื่นนี้เรียกว่า "Zero Dispersion Wavelength"

**แบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณ (Transmission Bandwidth)**

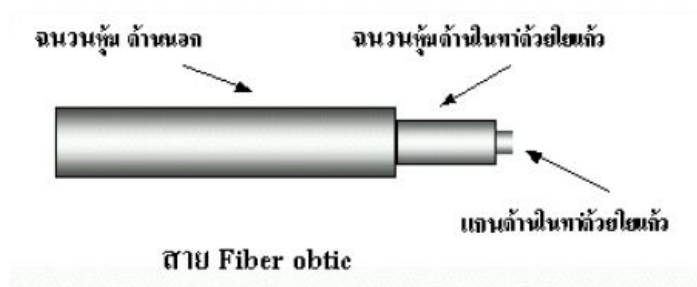
ความกว้างของแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณเส้นใยแก้วนำแสงสามารถหาได้จากการป้อนสัญญาณแสงที่มอดูเลตแล้วดังรูปที่ ๔-๑๔ (ก) เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงที่มอดูเลตแล้วทางด้านเอาต์พุตเมื่อแสงเดินทางไปได้ ๑ กิโลเมตร แล้วนำค่าของ A1 และ A0 มาวาดกราฟดังรูปที่ ๔-๑๔ (ข) จากนั้นทำการเพิ่มความถี่ของสัญญาณที่นำการมอดูเลตให้สูงขึ้นจนถึงจุดที่ขนาดของคุณลักษณะทางความถี่ของ

สัญญาณเบสแบนด์ (Baseband Frequency Characteristic) ลดลงมา 6 dB ความถี่ ณ ตำแหน่งที่  
 คุณลักษณะทางความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ลดลงมา 6 dB คือ แบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณของ  
 เส้นใยแก้วนำแสง



ภาพที่ ๔-๑๔ การจัดและคุณสมบัติ Baseband Frequency

๓.๒ โครงสร้าง(ส่วนประกอบ)ของเส้นใยแก้วนำแสง



ภาพที่ ๔-๑๕ โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง

**Core** ทำหน้าที่ให้แสงเดินทางผ่าน ซึ่งเป็นตัวนำสัญญาณ จะมีขนาดและเส้นผ่าศูนย์กลาง  
 9 μm, 50 μm และ 62.5 μm

**Cladding** ทำหน้าที่เป็นตัวหนกของแสง เป็นสารเคลือบแก้วให้นำสัญญาณได้ นิยม  
 เคลือบจนแก้วมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 μm

**ฉนวนป้องกัน (Coating)** เป็นเสมือนผนังของเส้นแก้วที่เคลือบให้ปลอดภัยขึ้น และใส่สีที่ผนังชั้นนี้ ซึ่งจะเคลือบจนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 250  $\mu\text{m}$

**Jacket** ทำหน้าที่ป้องกันส่วน Core และ Cladding เป็นเสมือนเสื้อนอกที่ใส่ให้เกิดความเรียบร้อย ฉนวนชั้นนี้จะมีความแตกต่างตามการใช้งานได้แก่ Indoor, Outdoor เป็นต้น

การป้อนแสงเข้าไปเส้นใยแก้วนำแสง ใช้ทฤษฎีการหักเหของแสง โดยสรุปคือ แสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางต่างกัน ความเร็วของแสงจะไม่เท่ากันทำให้เกิดการหักเหของแสง ดังนั้นระหว่าง Core กับ Cladding จะมีดัชนีการหักเหของแสงไม่เท่ากัน เมื่อแสงถูกป้อนเข้าไปด้วยมุมที่พอเหมาะ แสงจะเกิดการหักเหและเดินทางได้ภายในใยแก้วนำแสง

ชนิดของใยแก้วนำแสงการแบ่งชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามชนิดของ DIELECTRIC ที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น ๓ ชนิดคือ

### ๓.๒.๑ Silica Glass Optic Fiber

ใช้ Dielectric ที่เป็น Silica Glass ซึ่งนอกจากจะใช้ Silica ( $\text{SiO}_2$ ) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อทำให้ค่าดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่า Dopant ได้แก่ Germanium (Ge), Boron (B), Fluorine (F) เป็นต้น สำหรับเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Silica Glass Optic Fiber นั้นนิยมใช้ในข่ายการสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunication Network) เพราะมีข้อดีคือ การลดทอน (Loss) ต่ำ และคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

### ๓.๒.๒ Multi Component Glass Optic Fiber

ใช้ Dielectric ที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน ส่วนมากจะใช้ Soda Calcium, แก้ว, แก้วที่มี Boron และ Silicon ผสม และอื่นๆ เป็นสารหลัก ส่วน Dopant ได้แก่ โซเดียม (Na), แคลเซียม (Ca)

### ๓.๒.๓ Plastic Optic Fiber

ใช้ DIELECTRIC ที่เป็นพลาสติก ซึ่งใช้สารพวก Silicon Resin, Acryl Resin, (เช่น Ploymetacryl Methyl Acid : PMMA) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติการส่งที่ด้อยลงมาใช้งานง่าย ต่อเชื่อมง่าย หักยากแม้จะงอเส้นใยแก้วนำแสงมากๆ และใช้กับการสื่อสารระยะทางใกล้ เช่น ใช้กับการเดินสายภายในรถยนต์ (Wire Harness) และอื่นๆ

การแบ่งสายใยแก้วนำแสงตามลักษณะการใช้งานจะพิจารณาจากรูปแบบของการนำสายไปใช้งาน ซึ่งแบ่งได้เป็น

- สายเบิลเดินในท่อหรือเดินลอย (Ducted Cable Or Lash Aerial)
- สายเคเบิลฝังดินโดยตรง (Direct Buried)
- สายเคเบิลเดินลอยมีสายรับแรง (Figure '8' Aerial)
- สายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine)
- สายเคเบิลไม่มีตัวนำรับแรงด้วยตัวเอง (All Dielectric Self Support)
- สายเคเบิลใช้เป็นสายดินในระบบสายส่งกำลัง (Overhead Ground Wire)

### ๓.๒.๔ การแบ่งชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามจำนวน Propagation Mode

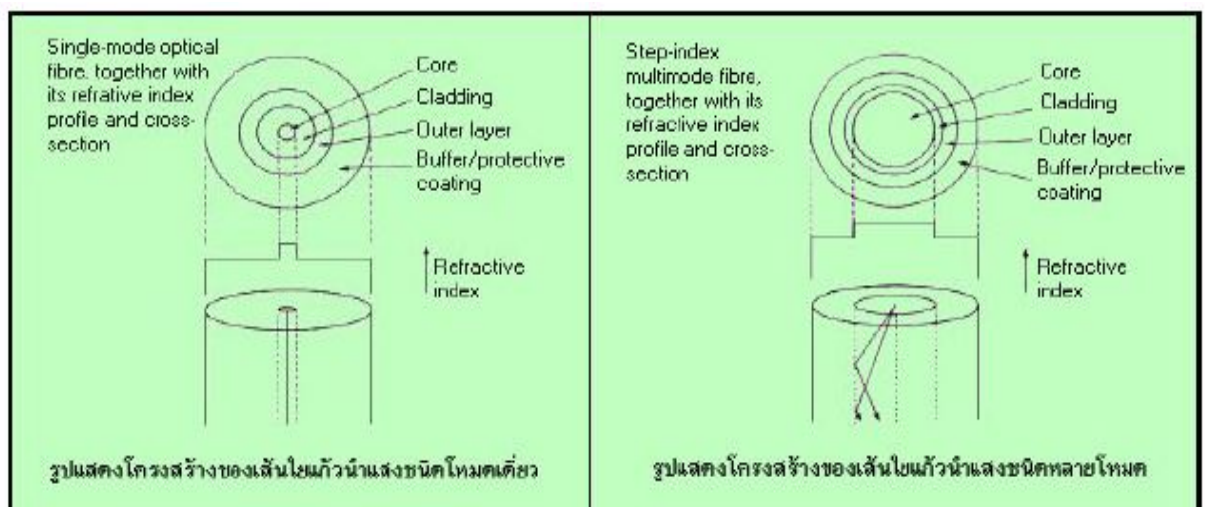
สามารถแบ่งออกได้เป็น ๒ ชนิด คือ

#### ๓.๒.๔.๑ Single Mode Optic Fiber (SM fiber)

เส้นใยแก้วนำแสงแบบ SM fiber นี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ประมาณ ๕-๑๐ ไมครอน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding ประมาณ ๑๒๕ ไมครอน ซึ่งส่วนของ Core ที่มีขนาดเล็กมากนี้เองมีผลทำให้แสงเดินทางออกมาเพียงโหมดเดียว มีการแตกกระจายของสัญญาณเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง

#### ๓.๒.๔.๒ Multi Mode Optic Fiber (MM fiber)

เส้นใยแก้วนำแสงแบบ MM fiber นี้ มีขนาดของ Core ประมาณ ๕๐ ไมครอน และมีขนาดของ Cladding ประมาณ ๑๒๕ ไมครอน ซึ่งจะเป็นว่าขนาดของ Core จะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยแก้วนำแสงแบบ SM Fiber มีผลทำให้แสงที่ตกกระทบที่ปลายอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงมีมุมตกกระทบที่แตกต่างกันหลายค่า ทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด ซึ่งทำให้เกิดการแตกกระจายของโหมดแสง



ภาพที่ ๔-๑๖ Multi Mode Optic Fiber (MM fiber)

### ๓.๒.๕ การแบ่งชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะของดัชนีการหักเห

สามารถแบ่งออกได้เป็น ๒ ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเห คือ

#### ๓.๒.๕.๑ Step Index Optic Fiber (SI-Fiber)

เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Cladding เป็นในลักษณะขั้นบันได (Step)

#### ๓.๒.๕.๒ Graded Index Optic Fiber (GI-Fiber)

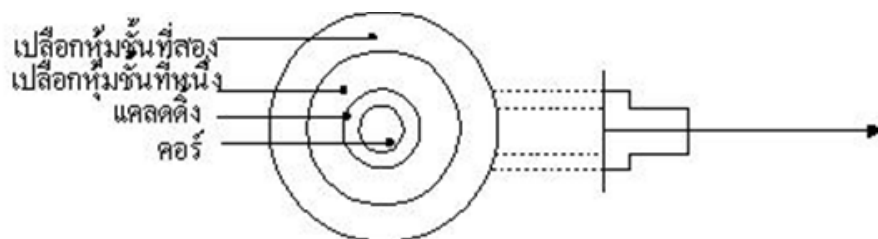
เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Cladding ค่อยๆ ลดลงทีละน้อย จึงเรียกว่า Graded Index Optic Fiber

SM Fiber นั้นจัดอยู่ในพวกของ SI-Fiber เหมือนกันแต่เนื่องจากจุดประสงค์ที่ต้องการให้เป็น Single Mode จึงทำให้อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีการหักเหของ Core และ Cladding มีค่าน้อยมาก จึงแบ่งชนิดแยกออกมาต่างหาก ดังนั้นในกรณีที่เราเรียกว่า SI-Fiber นั้น โดยทั่วไปจะหมายถึง Multi Mode Optic Fiber ที่มีผลต่างของดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได (Step) จะกล่าวถึงรายละเอียดประเภทของเส้นใยแก้วนำแสง ที่นิยมที่ใช้กัน

#### ๓.๒.๕.๓ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดสเต็ปอินเด็กซ์

##### (Multimode Step Index)

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้สร้างจากแก้วหลายๆ ชนิดปนกัน หรือแก้ว ซิลิกาก็ได้ โดยจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง และขนาดการเปิดรับแสงขนาดใหญ่เพื่อประสิทธิภาพในการคับปลิงสัญญาณกับแหล่งกำเนิดแสงแบบหลายความยาวคลื่น (Incoherent) เช่น แอลอีดี คุณสมบัติ และประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับสารที่ใช้สร้าง และกระบวนการ ในการเตรียมสาร ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้สามารถดูได้ดังรูป ๔.๑๗



ภาพที่ ๔-๑๗ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดสเต็ปอินเด็กซ์

โครงสร้าง เส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดสเต็ปอินเด็กซ์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ เท่ากับ ๕๐ ถึง ๔๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้ง

เท่ากับ ๑๒๕ ถึง ๕๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกหุ้มเท่ากับ ๒๕๐ ถึง ๑๐๐๐ ไมโครเมตร และมีขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) เท่ากับ ๐.๑๖ ถึง ๐.๕

คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ

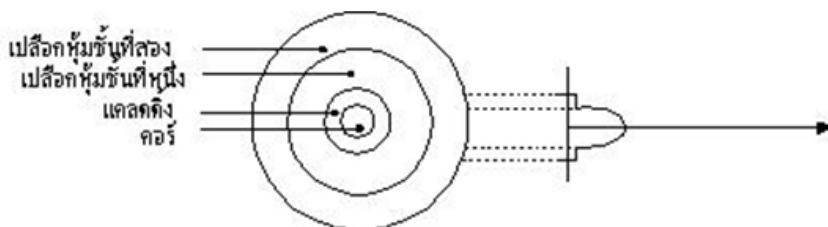
๑) การลดทอนสัญญาณ มีการลดทอนสัญญาณในช่วง ๒.๖ ถึง ๕๐ เดซิเบลต่อกิโลเมตรที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร ถูกจำกัดโดยการดูดกลืน การกระจาย และการลดทอนจากความยาวคลื่น

๒) แบนด์วิดท์ มีแบนด์วิดท์อยู่ในช่วง ๖ ถึง ๕๐ เมกะเฮิรตซ์กิโลเมตร

๓) การใช้งาน เหมาะที่สุดสำหรับใช้งานในโครงข่ายแบบการสื่อสารระยะสั้น (Short - Haul) มีแบนด์วิดท์จำกัดและใช้งานกับงานที่ราคาไม่สูง

### ๓.๒.๕.๔ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดเกรดเดดอินเด็กซ์

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้สร้างจากแก้วหลายชนิดปนกัน หรือแก้วซิลิกา ก็ได้ เช่นเดียวกับ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดสเต็ปอินเด็กซ์ โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ แสดงดังรูป



ภาพที่ ๔-๑๘ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดเกรดเดดอินเด็กซ์

๑) โครงสร้าง เส้นใยแก้วนำแสงชนิดมัลติโหมดเกรดเดดอินเด็กซ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์เท่ากับ ๓๐ ถึง ๑๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้ง เท่ากับ ๑๐๐ ถึง ๑๕๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกหุ้มเท่ากับ ๒๕๐ ถึง ๑๐๐๐ ไมโครเมตร และขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) เท่ากับ ๐.๒ ถึง ๐.๓

๒) คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ

๒.๑) การลดทอนสัญญาณ มีการลดทอนสัญญาณในช่วง ๒ ถึง ๑๐ เดซิเบลต่อกิโลเมตร ที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร ถูกจำกัดโดยการกระจาย ส่วนการลดทอนสัญญาณ



โดยเฉลี่ย ที่ความยาวคลื่น ๑,๓๐๐ นาโนเมตร และ ๑,๕๕๐ นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ ๐.๔ และ ๐.๒๕ เดซิเบลต่อกิโลเมตร ตามลำดับ

๒.๒) แบนด์วิดท์ มีแบนด์วิดท์อยู่ในช่วง ๓๐๐ เมกะเฮิรตซ์กิโลเมตร ถึง ๕๐ กิกะเฮิรตซ์ กิโลเมตร

๓) การใช้งาน เหมาะที่สุดสำหรับใช้งานในโครงข่ายแบบการสื่อสารระยะกลาง มีแบนด์วิดท์ปานกลางถึงสูง ซึ่งใช้แอลอีดี หรือเลเซอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์กำเนิดแสง

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับแคลดดิ้ง ดังนี้

๓.๑) เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับแคลดดิ้ง เท่ากับ ๕๐ ถึง ๑๒๕ ไมโครเมตร ซึ่งค่าขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) โดยปกติอยู่ระหว่าง ๐.๒๐ ถึง ๐.๒๔ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้พัฒนา และกำหนดมาตรฐานโดย CCITT (Recommendation G 651) สำหรับงานด้าน โทรคมนาคมที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตรและ ๑,๓๐๐ นาโนเมตร แต่ปัจจุบันนิยมนำมาใช้ในงานในด้านการสื่อสารข้อมูลระบบ LAN

๓.๒) เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับแคลดดิ้ง เท่ากับ ๖๒.๕ ถึง ๑๒๕ ไมโครเมตร ซึ่งค่าขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) โดยปกติอยู่ระหว่าง ๐.๒๖ ถึง ๐.๒๙ ถึงแม้ว่า เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะพัฒนามาเพื่อการใช้งานใน Subscriber Loop ที่มีระยะทางไกลที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร และ ๑๓๐๐ นาโนเมตร แต่ในปัจจุบันการใช้งานส่วนใหญ่จะนำมาใช้ในระบบ LAN

๓.๓) เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับแคลดดิ้ง เท่ากับ ๘๕ ถึง ๑๒๕ ไมโครเมตร ซึ่งค่าขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) โดยปกติอยู่ระหว่าง ๐.๒๖ ถึง ๐.๓๐ เส้นใย นำแสงชนิดนี้จะพัฒนามาเพื่อการใช้งานที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร และ ๑๓๐๐ นาโนเมตร ในระบบ LAN และระบบสื่อสารระยะสั้น (Short- Haul)

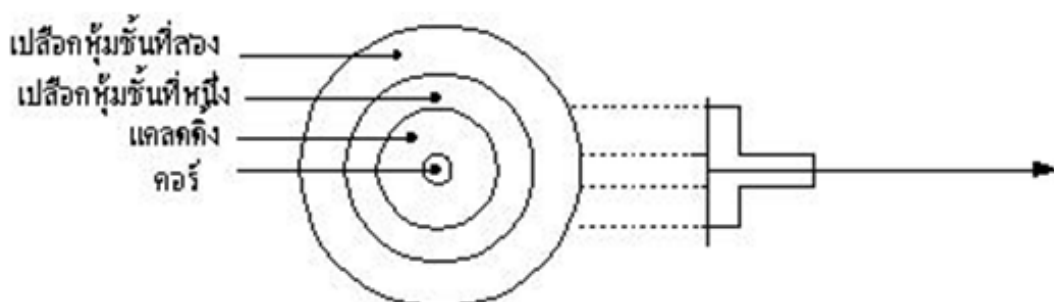
๓.๔) เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับแคลดดิ้ง เท่ากับ ๑๐๐ ถึง ๑๒๕ ไมโครเมตร ซึ่งค่าขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) โดยปกติอยู่ระหว่าง ๐.๒๙ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้พัฒนามาเพื่อการใช้งานที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร เพื่อมาใช้งานในระบบที่ราคาถูก และระยะทางสั้น

### ๓.๒.๕.๕ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Singlemode

#### Optical Fibers, SM)

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิงเกิลโหมด เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวนี้สามารถ ที่จะสร้างให้มีความแตกต่างของดัชนีได้ทั้งแบบ สเต็ปอินเด็กซ์ และเกรดเดดอินเด็กซ์ แต่เนื่องจากการสร้างเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยวที่มีความ แตกต่างของดัชนีการหักเหแบบเกรดเดดอินเด็กซ์มีราคาแพง และคุณสมบัติที่ได้จากการที่มีความแตกต่างของดัชนีการหักเหแบบเกรดเดดอินเด็กซ์ก็ไม่มีประโยชน์ต่อระบบการสื่อสาร ด้วยเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นในปัจจุบันเส้นใยแก้วนำแสง

แบบโหมดเดี่ยวที่สร้างขึ้นในเชิงพาณิชย์ก็จะมีแต่เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเต็ปอินเด็กซ์เท่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับงานที่ต้องการแบนด์วิธที่กว้าง และระยะทางไกล โดยทั่วไปจะสร้างจากแก้วซิลิกาเพื่อให้มีการลดทอนสัญญาณต่ำ ถึงแม้ว่าเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยวจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์เล็กเพื่อให้มีโหมดที่เดินทางเพียงโหมดเดียว แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งก็ต้องมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์อย่างน้อย ๑๐ เท่า เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียจากการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวแสดงดังภาพ ๔-๑๙



ภาพที่ ๔-๑๙ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิงเกิลโหมดเดี่ยว

๑) โครงสร้าง เส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิงเกิลโหมดนั้นมีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์เท่ากับ ๕ ถึง ๑๐ ไมโครเมตรโดยปกติอยู่ประมาณ ๘.๕ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งโดยทั่วไปมีขนาด ๑๒๕ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกหุ้มเท่ากับ ๒๕๐ ถึง ๑,๐๐๐ ไมโครเมตร และขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) เท่ากับ ๐.๐๘ ถึง ๐.๑๕ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ ๐.๑

#### ๒) คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ

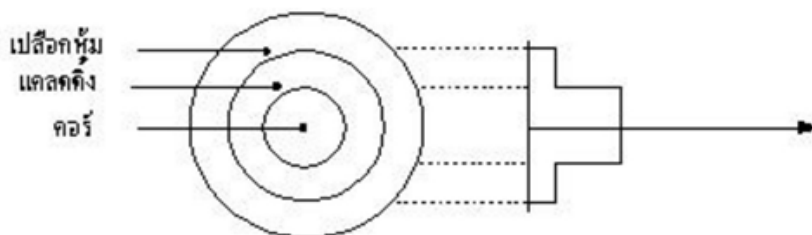
๒.๑) การลดทอนสัญญาณ มีการลดทอนสัญญาณในช่วง ๒ ถึง ๕ เดซิเบล ต่อ กิโลเมตร ที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตรมีการลดทอนสัญญาณโดยเฉลี่ย ๐.๓๕ และ ๐.๒๑ เดซิเบล ต่อ กิโลเมตร ที่ความยาวคลื่น ๑,๓๐๐ นาโนเมตร และ ๑,๕๕๐ นาโนเมตร ตามลำดับ

๒.๒) แบนด์วิธ มากกว่า ๕๐๐ เมกะเฮิรตซ์กิโลเมตร ในทางทฤษฎีแบนด์วิธจะถูกจำกัดโดยความยาวคลื่น และการขยายกว้างออกเนื่องจากโครงสร้าง โดยมีค่าประมาณ ๔๐ กิกะเฮิรตซ์ ที่ความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร ในทางปฏิบัติแล้วแบนด์วิธมากกว่า ๑๐ กิกะเฮิรตซ์ ที่ความยาวคลื่น ๑,๓๐๐ นาโนเมตร

๒.๓) การใช้งาน เหมาะกับงานที่ต้องการแบนด์วิธสูง และระยะทางไกลมาก โดยใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์กำเนิดแสง

### ๓.๒.๕.๖ เส้นใยแก้วนำแสงแบบพลาสติกแคลดดิ้ง

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้เป็นเส้นใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมด ซึ่งมีความแตกต่างของดัชนีการหักเหทั้งแบบสเต็ปอินเด็กซ์ และ เกรดเดดอินเด็กซ์ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีส่วนของแคลดดิ้งที่สร้างมาจากพลาสติก (โดยส่วนใหญ่จะใช้ยางซิลิโคน) และส่วนของคอร์สร้างมาจากซิลิกา ซึ่งเรามักเรียก เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ว่า "PCS (Plastic Clad Silica)" เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะมีราคาถูกลงกว่า เส้นใยแก้วนำแสงที่สร้างจากแก้วซิลิกา แต่ก็จะมีคุณลักษณะทางประสิทธิภาพที่จำกัด โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้แสดงดังรูปที่ ๔.๒๐



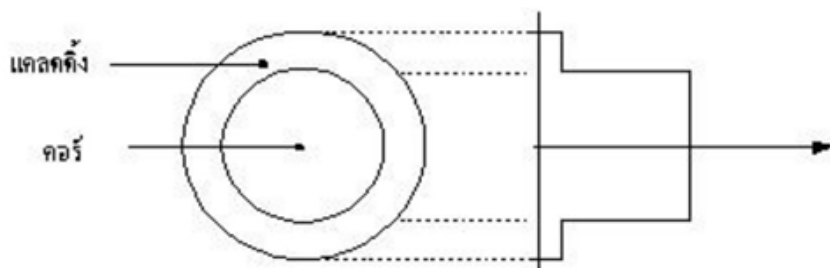
ภาพที่ ๔-๒๐ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด PCS แบบมัลติโมเดสตีปอินเด็กซ์

๑) โครงสร้าง เส้นใยแก้วนำแสงแบบพลาสติกแคลดดิ้งชนิดสเต็ปอินเด็กซ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางของ คอร์เท่ากับ ๑๐๐ ถึง ๕๐๐ ไมโครเมตร ชนิดเกรดเดดอินเด็กซ์ มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์เท่ากับ ๕๐ ถึง ๑๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งชนิดสเต็ปอินเด็กซ์เท่ากับ ๓๐๐ ถึง ๘๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งชนิดเกรดเดดอินเด็กซ์เท่ากับ ๑๒๕ ถึง ๑๕๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกหุ้มชนิดสเต็ปอินเด็กซ์เท่ากับ ๕๐๐ ถึง ๑๐๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกหุ้มชนิดเกรดเดดอินเด็กซ์เท่ากับ ๒๕๐ ถึง ๑๐๐๐ ไมโครเมตร ขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์เท่ากับ ๐.๒ ถึง ๐.๕ ขนาดการเปิดรับให้แสงผ่านชนิดเกรดเดดอินเด็กซ์เท่ากับ ๐.๒ ถึง ๐.๓

๒) คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ การลดทอนสัญญาณ การลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ เท่ากับ ๕ ถึง ๕๐ เดซิเบลต่อกิโลเมตร ชนิดเกรดเดดอินเด็กซ์เท่ากับ ๔ ถึง ๑๕ เดซิเบลต่อกิโลเมตร

### ๓.๒.๕.๗ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติกทั้งหมด

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะเป็นแบบมัลติโหมดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับ แคลดดิ้งขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีเปลือกหุ้ม เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะมีราคาถูกลง โดยเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะใช้สาร Polymethyl Methacry (PMMA) ในการสร้างคอร์ และใช้ Fluorinated Acrylic ในการสร้างแคลดดิ้ง ซึ่งในปัจจุบันสามารถให้มีความสูญเสียต่ำที่สุดประมาณ ๒๐ เดซิเบลต่อกิโลเมตรที่ความยาวคลื่น ๐.๘๖ ไมโครเมตร



ภาพที่ ๔-๒๑ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนำแสงพลาสติกทั้งหมด

การพัฒนาและปรับปรุงเส้นใยแก้วนำแสงที่สร้างจากพลาสติกนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในสภาวะแวดล้อมพิเศษต่างๆ เช่น สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงหรือในภาวะที่มีอันตรายต่างๆ สำหรับโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้แสดงให้ดูในภาพที่ ๔-๒๑

๑) โครงสร้าง เส้นใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติกมีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์เท่ากับ ๒๐๐ ถึง ๖๐๐ ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลคดิ่งโดยทั่วไปมีขนาด ๔๕๐ ถึง ๑๐๐๐ ไมโครเมตร และขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) เท่ากับ ๐.๕ ถึง ๐.๖

๒) คุณสมบัติทางประสิทธิภาพ

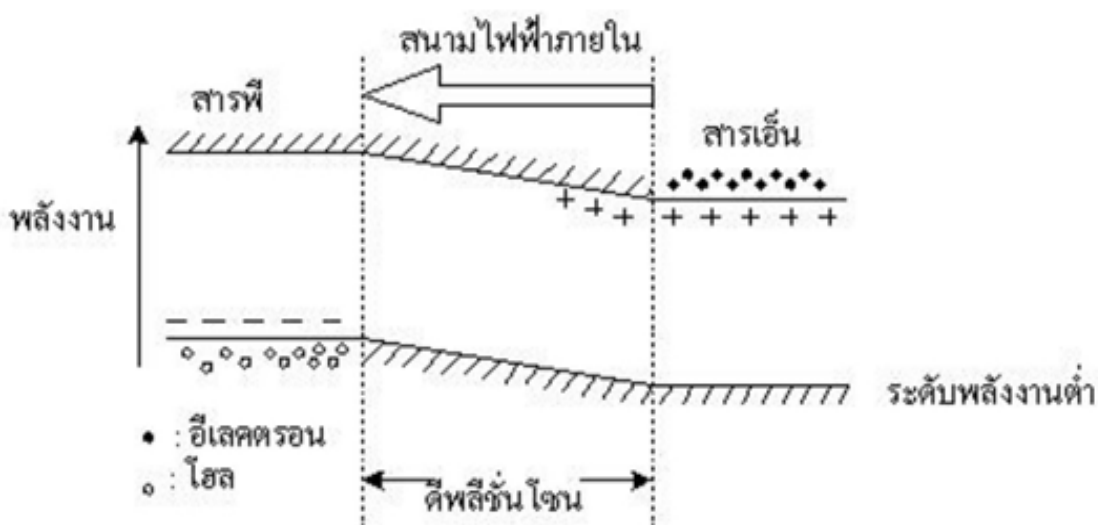
๒.๑) การลดทอนสัญญาณ มีการลดทอนสัญญาณ ๕๐ ถึง ๑๐๐๐ เดซิเบลต่อกิโลเมตร ที่มีความยาวคลื่น ๖๕๐ นาโนเมตร

๒.๒) การใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ใช้สำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ราคาต่ำที่มีระยะทางสั้นมาก (Very Short - Haul Low Cost Link) เท่านั้น เช่น ในบ้าน โดยมีการเชื่อมต่อและการคัปปลิงที่ง่าย

### ๓.๓ อุปกรณ์รับแสง

#### ๓.๓.๑ การเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า

การรับแสงหมายถึง การเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกเป็น ๒ วิธี คือ วิธีที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง วิธีที่สองทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า วิธีที่หนึ่งนั้นเรียกว่า "โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค (Photo Electric Effect)" ส่วนวิธีที่สองเรียกว่า "เซนซิทีฟฮีทเอฟเฟค (Sensitive Heat Effect)" หลักการของโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคใช้ขบวนการดูดพลังงาน เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำจะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูง แต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเท่านั้น และในที่สุดมันจะไปรวมกันใหม่กับโฮลในระดับพลังงานต่ำอีก ทำให้ไม่ได้รับโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคเพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่มันจะรวมกัน



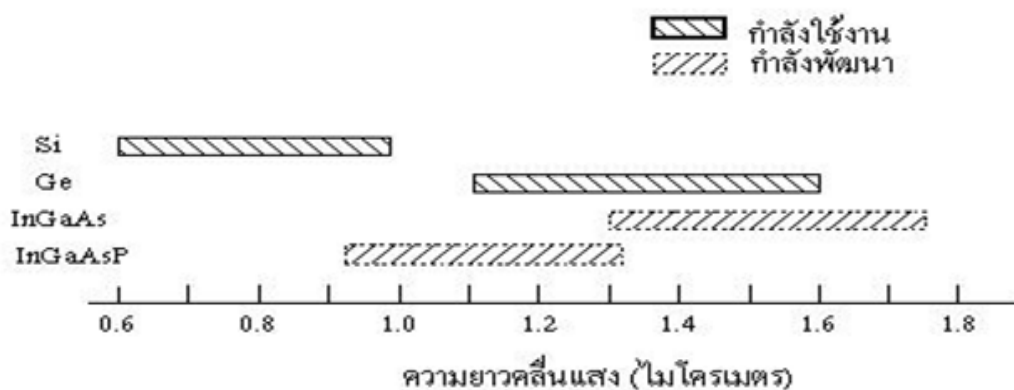
ภาพที่ ๔-๒๒ ดีพลีชันโซน

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั่นคือ เพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้รอยต่อพีเอ็น ที่รอยต่อของพีกับเอ็นนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้า ในที่ว่างขึ้น แต่มันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของสารเอ็นและโฮลของสารพี ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และบวก เป็นผลให้เกิดบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงรอยต่อบริเวณนี้เรียกว่าดีพลีชันโซน (Depletion Zone) ดังแสดงในภาพ ๔-๒๒ ในสภาพอย่างนี้เมื่อมีแสงมากระทบจากทางด้านบริเวณสารพีแสงนั้นจะถูกดูด พร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปทางบริเวณสารเอ็นแต่ที่ดีพลีชันโซนอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดจากการดูดพลังงานจากแสงจะถูกสเปคอิเล็กทริกฟิลด์ (Space Electric Field) แยกไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ อิเล็กตรอนไปทางด้านเอ็นและโฮลไปทางด้านพี ที่บริเวณซึ่งอยู่ห่างจากดีพลีชันโซน นั้นเนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดจากโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคจะรวมตัวกันใหม่ ในระหว่างเคลื่อนที่ แต่สำหรับอิเล็กตรอน และโฮลที่เคลื่อนที่เข้าไปในสเปคอิเล็กทริกฟิลด์แล้วนั้นจะสามารถเข้าไปยังบริเวณตรงกันข้ามได้ ผลที่ได้ก็คือ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับบริเวณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกแยกขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของสารพีและ สารเอ็นถ้าหากนำวงโคจรภายนอกมาต่อกับปลายทั้งสองนี้จะทำให้อิเล็กตรอน และโฮลสามารถรวมตัวกันได้โดยผ่าน วงจรภายนอก นั่นคือมีกระแสไหลนั่นเองกระแสที่เกิดที่ดีพลีชันโซนเรียกว่า "Drift Current" ส่วนกระแสที่เกิดตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากดีพลีชันโซนเรียกว่า "Diffusion Current" และกระแสนี้เป็นหลักของการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า

### ๓.๓.๒ สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

#### ๓.๓.๒.๑ สารที่ใช้สร้างอุปกรณ์รับแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นมีสารหลายชนิด นอกจากนั้น ผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานสูงและระดับพลังงานต่ำ ของอุปกรณ์รับแสงมีค่าแตกต่างกันทำให้มีย่านความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดสัญญาณที่เข้ามาได้ง่าย (ความไวในการรับแสง) คุณสมบัติความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดดังภาพ ๔-๒๕ ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์รับแสงที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง สำหรับย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า ๑ ไมโครเมตร จะใช้สารซิลิกอน สำหรับย่านความยาวคลื่น ๑ - ๑.๗ ไมโครเมตร ใช้เจอร์เมเนียมเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นในปัจจุบันสำหรับความยาวคลื่นในช่วง ๑.๕๕ ไมโครเมตร เป็นความยาวคลื่นมีการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสงน้อยมาก และเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในวินโดวส์ที่สาม (Third Window) การใช้งานอุปกรณ์รับแสงชนิดใหม่ที่ทำจากสารที่เป็นสารประกอบของ สารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์และอื่นๆ ซึ่งมีความไวในการรับแสงดีมากนั้น กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

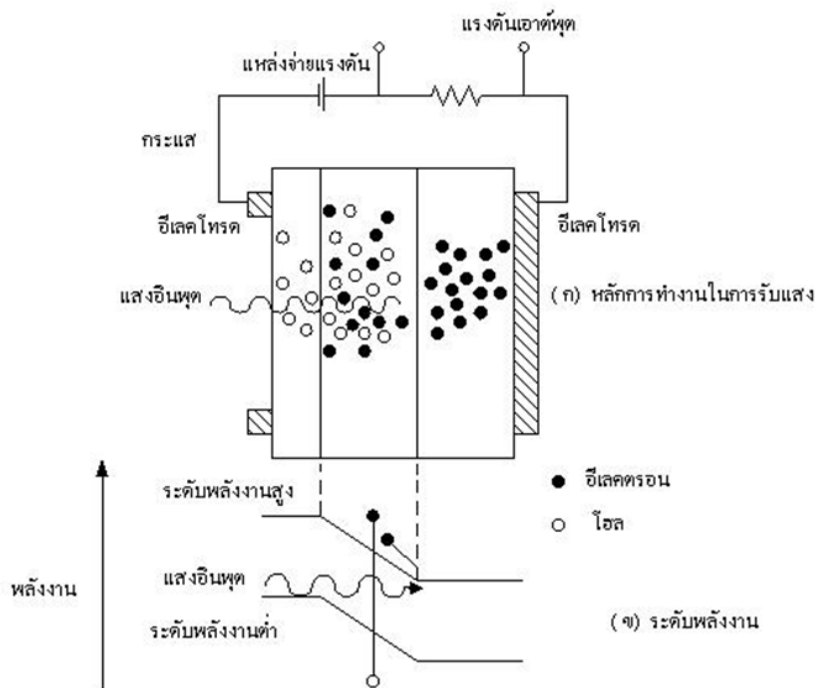


ภาพที่ ๔-๒๓ ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

#### ๓.๓.๒.๒ โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงสเปคทีโรอิเล็กทริกฟิล์มตรงรอยต่อสารพีเอ็นที่ทำให้ อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม แต่ถ้าให้แรงดันไฟฟ้ากลับทิศทางจากภายนอกกล่าวคือทางด้านพีให้โพล และทางด้านเอ็นให้ไฟบวกจะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลตรงรอยต่อที่มีอัตราเร่งเพิ่มขึ้น อุปกรณ์รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนี้แบ่งออกเป็น ๒ พวกใหญ่ๆ คือ โฟโตไดโอด (Photo Diode : PD) กับ อวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photo Diode : APD) พวกโฟโตไดโอดนั้นเป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย ส่วนพวกอวาลานซ์โฟโตไดโอด เป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณมาก ตัวอย่างของโฟโตไดโอด คือ พินโฟโตไดโอด (PIN-Photo Diode) ดังแสดงในภาพ ๔.๒๔ PIN หมายถึงว่าในระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P - Type)

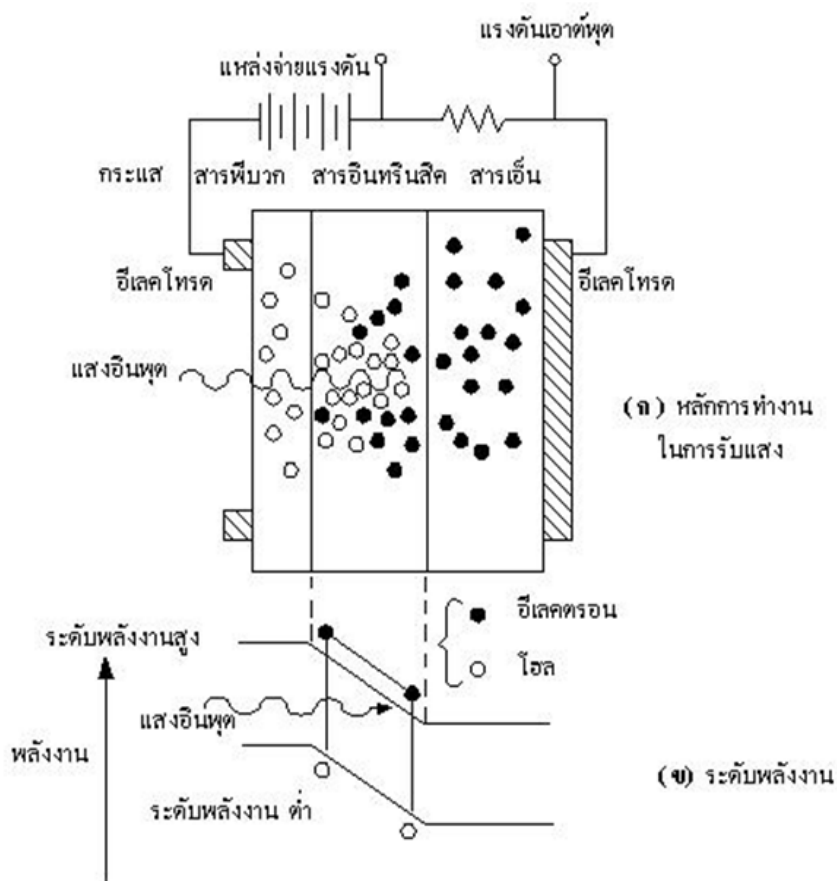
และชนิดเอ็น (N - Type) มีสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าอินทรินสิค (Intrinsic : I) คั่นอยู่ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าดริฟต์เคอร์เรนต์ (Drift Current) นั้นเกิดขึ้นในดีพลีชันโซน และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการตอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม ดริฟต์เคอร์เรนต์ที่เกิดขึ้นภายนอกดีพลีชันโซนนั้นมีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความกว้างของ ดีพลีชันโซนยิ่งกว้างมากเท่าใดประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency) และความเร็วในการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของดีพลีชันโซนนี้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮลของสารพีและสารเอ็นยิ่งต่ำจะยิ่งกว้าง ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบ I ที่คั่นกลางระหว่างสารพี กับสารเอ็น จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของดีพลีชันโซนกว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจากโฟโตไดโอดที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้นโดยทั่วไปต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้พินโฟโตไดโอด



ภาพที่ ๔-๒๔ หลักการทำงานการรับแสง และระดับพลังงานของพินโฟโตไดโอด

อวาลานซ์โฟโตไดโอดนั้นใช้ปฏิกิริยาการขยาย (Avalanche) ของอิเล็กตรอนและโฮล ในสารกึ่งตัวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดแล้วเป็นอุปกรณ์รับแสงที่ให้กระแสจำนวนมาก หลักการทำงานของอวาลานซ์โฟโตไดโอดแสดงดังภาพ ๔-๒๕ สำหรับโครงสร้างนั้นส่วนใหญ่ ทางด้านสารพีของรอยต่อพีเอ็นจะมีสารกึ่งตัวนำแบบสารพีที่มีความหนาแน่นของโฮลสูงติดอยู่(ส่วนที่แสดงด้วยสารพีบวกในรูป) โดยการทำให้เช่นนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในของบริเวณใกล้เคียงรอยต่อที่มีสารพีเป็นศูนย์กลางมีค่ามาก อิเล็กตรอนที่ดูดแสงที่มาจากกระทบบทางด้านพีบวก และถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานต่ำไปยังระดับพลังงานสูงในระหว่างที่มันได้รับอัตราเร่ง และผ่าน สารพีนั้นมันจะได้รับพลังงานจำนวนมากกว่าผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานสูงกับระดับ พลังงานต่ำจากเหตุผลนี้ทำให้สามารถกระตุ้น

อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำและทำให้เกิด อิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ได้ และอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่นี้ยังถูกสนามไฟฟ้าเร่งอัตราเร่งให้อีกทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลขึ้นมาใหม่อีก เมื่อขบวนการนี้เกิดอย่างต่อเนื่องกันนั้น จำนวนของ อิเล็กตรอนกับโฮลจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากมาเป็นผลให้เกิดการขยายที่เรียกว่า "Avalanche Multiplication" ผลนี้ทำให้เกิดกระแสถูกขยายนั่นเอง



ภาพที่ ๔-๒๕ หลักการการรับแสง และระดับพลังงานของอวาแลนซ์โฟโตไดโอด

### ๓.๓.๒.๓ คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

การเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งานจะต้องพิจารณาคุณสมบัติ

ต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### (๑) มีความไวสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน

อุปกรณ์รับแสงในยุคแรกจะตอบสนองการใช้งานกับความยาวคลื่นแสงช่วงวินโดว์ที่ ๑ แต่ในปัจจุบันระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงนิยมใช้งานในช่วงวินโดว์ที่ ๒ และช่วงวินโดว์ที่ ๓ ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องสร้างให้สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นดังกล่าวได้ดี โดยการเลือกใช้สารที่เหมาะสม



## (๒) ความสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสง

ได้มาก

ความสามารถในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทางควอนตัมของสารที่ใช้สร้าง โดยทั่วไปประสิทธิภาพทางควอนตัมจะถูกกำหนดโดยสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption Coefficient ;  $a_0$ ) ของสารนั้น ค่า  $a_0$  นี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น คือ สารแต่ละชนิดจะมีค่า  $a_0$  ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เท่ากัน

## (๓) มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต

เพื่อให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์

เนื่องจากในปัจจุบันแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงจะมีค่าตั้งแต่หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันกับสัญญาณอินพุตที่ได้รับ

## (๔) สัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์แสงจะต้องมีค่าต่ำ

สัญญาณรบกวนที่สำคัญคือ สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise หรือ Shot Noise) เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโต โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากแสงที่มาตกกระทบในบางช่วงเป็นแสงที่ไม่มีเฟสเดียวกัน หรือมีหลายความยาวคลื่น ทำให้อิเลคตรอนได้รับพลังงานไม่เท่ากันจึงทำให้จำนวนอิเลคตรอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณกระแสโฟโต จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สัญญาณรบกวนควอนตัมนี้จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสกลับ

## (๕) มีขนาดเล็ก

เพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย

## (๖) ใช้แรงดันไบอัสต่ำ

เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า

## (๗) มีความเชื่อถือได้สูง

อุปกรณ์รับแสงจะต้องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี

## (๘) มีราคาต่ำ

เนื่องจากการออกแบบระบบ ปัจจัยทางด้านการเงินมักจะเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการออกแบบด้วย

### ๓.๓.๓ หัวต่อ (Connectors)

หัวต่อมีหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้น หรือระหว่างเส้นใยแก้วนำแสง กับแหล่งกำเนิดแสง หรือระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงกับดีเท็กเตอร์ทำหน้าที่ต่อ หรือปลดสายออกจากกัน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้กับสายที่ออกจากเครื่องมือ สายเดินในบอร์ด หรือสายคัพเพลอร์ในระบบ LAN เมื่อมีหัวต่อในวงจรจะเกิดการสูญเสียในแต่ละจุดที่ใช้หัวต่อ แต่จำนวนหัวต่อที่ต้องใช้นั้นอย่างน้อยที่สุดก็ต้องมีสองจุด คือที่เครื่องส่ง ๑ ตัว และเครื่องรับ ๑ ตัว และถ้ามีความจำเป็นถ้าใช้สายเชื่อมต่อหรือเดินในแผง จำนวนหัวต่อก็จะเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นการลดจำนวนหัวต่อให้น้อยที่สุดก็จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานของแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หัวต่อส่วนใหญ่จะมีค่าสูญเสียอยู่ระหว่าง ๐.๑ ถึง ๐.๗ เดซิเบล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ และวิธีการต่อ ค่าต่อไปนี้เป็นค่าเฉลี่ยโดยทั่วไปที่ไม่ได้จากการต่อแบบสุ่มจากเส้นใยแก้วนำแสงหลายขนาดหลายชนิด และจากผู้ผลิตต่างบริษัท ค่าการสูญเสียต่างๆ คิดเทียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ดังตาราง

ค่าการสูญเสีย (dB)	เปอร์เซ็นต์สูญเสีย
๐.๐๕	๑ %
๐.๐๙	๒ %
๐.๒๓	๕ %
๐.๕๐	๑๐ %
๑.๐๐	๒๐ %

ตารางที่ ๔-๒ ค่าการสูญเสียเปรียบเทียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์

หัวใจในการออกแบบหัวต่อที่จะให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด คือ

๑) ปลอกที่สอดสายเส้นใยแก้วนำแสงเข้าไปในนั้นต้องมีขนาดพอดีๆ กับขนาดความโตภายนอกของตัวแกนเส้นใยแก้วนำแสง

๒) ระหว่างหัวต่อสองอันการเยื้องศูนย์จะต้องไม่เกิน ๑ ถึง ๒ เปอร์เซ็นต์ของขนาดของแกนเส้นใยแก้วนำแสง และเปอร์เซ็นต์ของมุมชนกันของแกนเส้นใยแก้วนำแสงจะต้องน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การเยื้องศูนย์ การยึดกันของหัวต่อต้องไม่พิตเกินไปจนทำให้หน้าสัมผัสเกิดการสึกหรอหรือมีรอยขีดข่วน

๓) หน้าผิวสัมผัสระหว่างหัวต่อจะต้องไม่มีช่องว่าง ซึ่งจะทำให้เกิดแสงสะท้อนกลับ แต่จะป้องกันผิวปลายสายไม่ให้เกิดการขีดข่วนทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์ของแต่ละ

บริษัทผู้ผลิต ซึ่งต้องนำปัญหาต่างๆ มาคิดด้วยรวมทั้งต้นทุนการผลิต ในระบบทางไกล โดยทั่วไปแล้ว ใช้หัวต่อเพียงอันเดียวก็พอ และเหมาะสมกว่าส่วนการเดินสายเคเบิลในอาคารจะใช้หัวต่อที่แตกต่างออกไป คุณภาพและมาตรฐานของหัวต่อที่ใช้ในอาคารมักจะมีชนิดเอสที (ST) และชนิดเอสซี (SC)

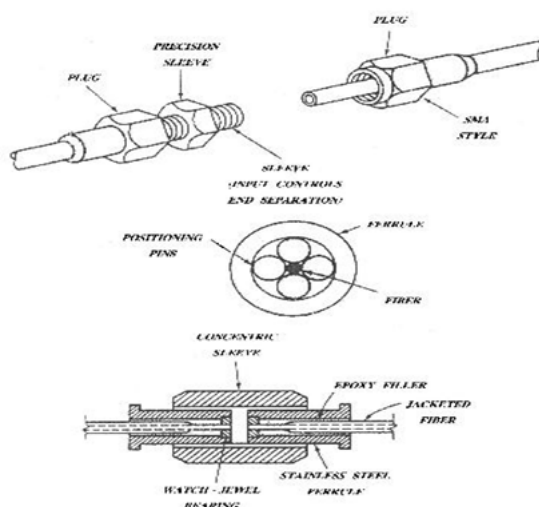
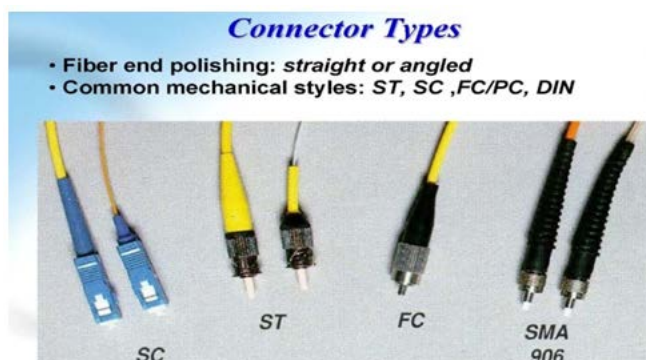
### ๓.๓.๓.๑ ชนิดของหัวต่อ

#### (๑) หัวต่อชนิดยึดหมุนได้

หัวต่อชนิดนี้เป็นหัวต่อที่ทำด้วยพลาสติกใช้ได้ทั้งแบบมัลติโหมด และซิงเกิลโหมด หัวที่ชนกันทำเป็นลักษณะปลายเรียวซึ่งเป็นของบริษัทแอมป์ (Amp) หัวต่อจริงๆ ทำด้วยพลาสติกที่ยึดหมุนได้ แต่ปลอกที่สวมหุ้มหัวนั้นทำด้วยโลหะเพื่อรับแรง ปลายสานที่ชนกันนั้นจะอยู่ในปลอกหุ้ม ซึ่งประกอบด้วยหัวแกนเอียง (Taper) โดยใช้เกลียวยึดกัน

#### (๒) หัวต่อชนิดเอสเอ็มเอ (SMA)

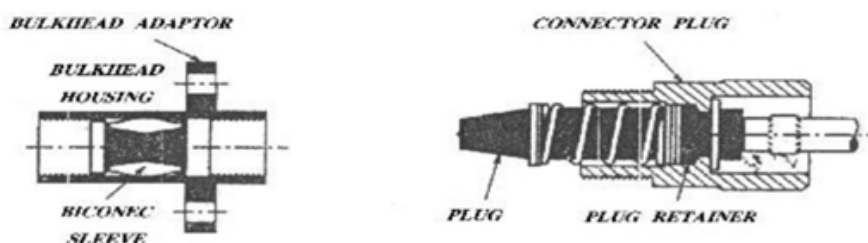
หัวต่อชนิดนี้เป็นที่นิยมมาก หัวต่อเป็นน็อตหกเหลี่ยม และนิยมใช้กับสายเคเบิลแบบมัลติโหมด การออกแบบและประกอบหัวต่อชนิดนี้ทำได้ง่ายกว่าชนิดอื่นๆ การออกแบบหัวต่อชนิดเอสเอ็มเอ ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของปลอกที่บังคับหน้าสัมผัส และวิธีการออกแบบนี้ ก็ขึ้นอยู่กับเทคนิคผู้ผลิตแต่ละบริษัท



ภาพที่ ๔-๒๖ หัวต่อชนิดเอสเอ็มเอ

### (๓) หัวต่อชนิดไบคอนิก (Biconic Connector)

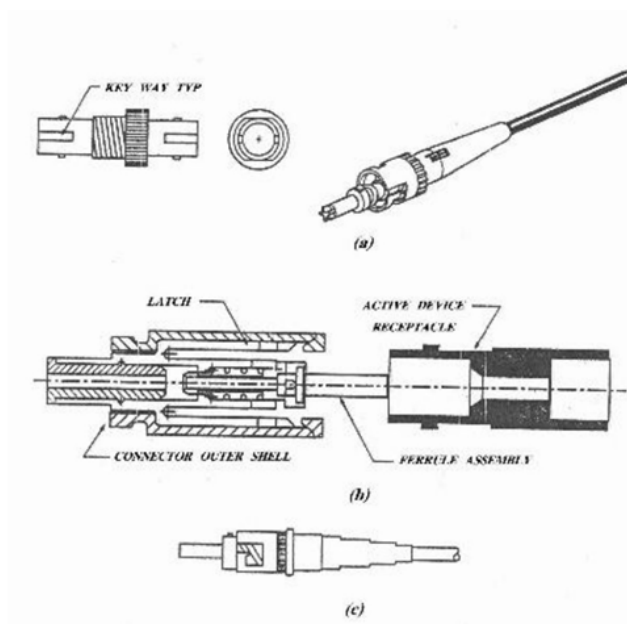
หัวต่อแบบไบคอนิกเป็นหัวต่ออีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้มากกับสายเคเบิลทั้งแบบซิงเกิลโหมด และมัลติโหมด หัวต่อเป็นพลาสติกหล่อแข็ง และกลึงเป็นลักษณะคล้ายรูปกรวย โดยมีปลอกโลหะเป็นตัวบังคับให้แกนปลายเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ในแนวแกนที่ชนกันพอดี หัวต่อชนิดนี้มีหัวเสียบที่มีรูปคล้ายกรวย และเจาะรูตรงกลางเพื่อให้เส้นใยแก้วนำแสงแบบมัลติโหมดหรือซิงเกิลโหมดผ่านทั้งหัวเสียบ และรูเสียบ จะยึดติดกันพอดีเมื่อเวลาประกอบกันเข้า และปลายสายจะต้องขัดให้ดีเพื่อให้ได้หน้าสัมผัสที่สุ่มไม่ให้เกิดการสูญเสียหัวต่อ ชนิดนี้บริษัทเบลล์แลบ (Bell Laboratory) เป็นผู้ผลิต หัวต่อชนิดนี้มีขายสำหรับใช้กับเส้นใยแก้วนำแสงเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกขนาด ๑๒๕, ๑๔๐, ๒๕๐ และ ๔๐๐ ไมโครเมตร และมีค่าอินเซอร์ชันลอส (Insertion Loss) ของทั้งซิงเกิลโหมด และมัลติโหมด อยู่ระหว่าง ๐.๕ ถึง ๑.๑ เดซิเบล ขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อเส้นใยแก้วนำแสง การสูญเสียอันเนื่องมาจากการสะท้อนของแสงที่หน้าสัมผัสในหัวต่อมีค่าต่ำกว่า ๓๒ เดซิเบล



ภาพที่ ๔-๒๗ หัวต่อชนิดไบคอนิก

### (๔) หัวต่อแบบเอสที (ST Connector)

หัวต่อแบบเอสทีเป็นเครื่องหมายการค้าของบริษัทเอทีแอนด์ที (AT&T) ภาพ ๔-๒๘ เป็นแบบที่บริษัทโทมัสแอนด์เบตต์ (Thomas&Betts) เป็นผู้ออกแบบ หัวต่อในส่วนที่ยึดติดกันก็โดยการใช้แรงดันเข้าแล้วหมุน เมื่อเร็วๆ นี้บริษัทสามเอ็ม (3M) ได้พัฒนาหัวต่อแบบพูช-พูล ขึ้นมาใหม่ การที่หัวต่อจะชนกันได้สนิทที่สุดก็อยู่ที่ปลอกยึด และการผลิตที่ละเอียดอ่อนแม่นยำเที่ยงตรง การที่จะได้รูเจาะที่เที่ยงตรงและแม่นยำนั้นบริษัทได้พยายามนำวัสดุหลายชนิดมาทดลองทำ เช่น เซอร์โคเนีย เซรามิก อลูมินาเซรามิก รูแก้วในเซรามิก รูแก้วในพลาสติก รวมทั้งสแตนเลส ARCAP และวัสดุที่เป็นคอปเปอร์เบส ในกรณีของบริษัทสามเอ็มเขาใช้ปลอกเซอร์โคเนียเซรามิกและแต่งปลายสัมผัสให้ได้หน้าสัมผัสอพติคที่มีการลดการหักเหของแสงได้ต่ำสุด พลาสติกที่ใช้ทำหัวต่อจะเป็นเทอร์โมพลาสติก ปลอกโลหะที่ใช้จะมีขนาดของรูเจาะตั้งแต่ ๑ ไมโครเมตร และมีขนาดต่างกันตามความโตของเส้นใยแก้วนำแสง บริษัทสามเอ็มยังได้ประดิษฐ์หัวต่อแบบละลายด้วยความร้อน เพื่อใช้สำหรับต่อสายมัลติโหมดโดยใช้ปลอกเซอร์โคเนีย และมีกาวร้อนเป็นตัวติด เมื่อกาวเย็นลงก็จะยึดติดแน่นเสร็จแล้วค่อยขัดปลายเส้นใยแก้วนำแสง

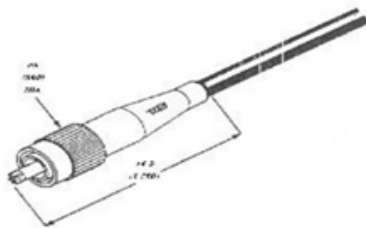


ภาพที่ ๔-๒๘ หัวต่อชนิดเอสที

หัวต่อชนิดเอสที ค่าสูญเสียในซิงเกิลโหมดประมาณ ๐.๑๕ ถึง ๐.๒๕ เดซิเบล และค่า ลดทอนอยู่ระหว่าง ๐.๔ ถึง ๐.๗ เดซิเบล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต สำหรับมัลติโหมดก็มีค่าลดทอนอยู่ระหว่าง ๐.๐๕ ถึง ๐.๑๕ เดซิเบล และสูงสุดอยู่ระหว่าง ๐.๑ ถึง ๐.๓ เดซิเบล ปัจจุบันหัวต่อชนิดเอสทีเป็นหัวต่อที่มีผู้นิยมใช้มากขึ้นทั้งนี้เพราะเป็นหัวต่อที่มี ขนาดเล็กแต่ก็ไม่ค่อยกระทบต่อรัศมีเท่ากับชนิดเอสซี ปัจจุบันได้ดัดแปลงปรับปรุงให้เป็นแบบถอดเข้าออกได้จึงทำให้ชนิดเอสซีรับความนิยมนำมากขึ้น

#### (๕) หัวต่อชนิดเอฟซี (FC Connector)

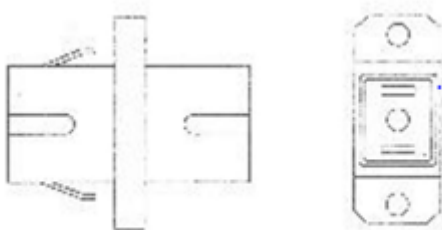
หัวต่อแบบนี้ออกแบบเป็นปลอกเหล็กอยู่ในปลอกหุ้มอีกชั้นหนึ่ง ชุดแกนของหัวต่อมีเกลียวหมุนเข้ากับตัวเรือนหุ้ม ดังรูป ๔.๒๙ การออกแบบทำเป็นพิเศษ คือ ตัวเสียบนั้นไม่มีลิ้ม และตัวรับมีร่องเมื่อเสียบเข้ากันแล้ว หน้าสัมผัสของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองข้างไม่เกิดการหมุน หรือขยับเขยื้อน ซึ่งอาจทำให้หน้าสัมผัสของเส้นใยแก้วนำแสงเกิดรอยขีดข่วนได้หัวต่อชนิดนี้เมื่อใช้กับซิงเกิลโหมดจะเกิดการสูญเสียอยู่ระหว่าง ๐.๔ ถึง ๐.๗ เดซิเบล หรือสูงสุดอยู่ระหว่าง ๐.๘ ถึง ๑.๐ เดซิเบลขึ้นอยู่กับคุณภาพของสินค้าผู้ผลิต



ภาพที่ ๔-๒๙ หัวต่อชนิดเอฟซี

## (๖) หัวต่อชนิดเอสซี (SC Connector)

หัวต่อชนิดนี้เป็นการออกแบบของเอ็นทีทีเพื่อให้ได้งานหลายอัน ดังรูปที่ ๔.๓๐ ข้อดีของหัวต่อชนิดนี้คือหัวต่อชนิดนี้มีรูสอดเส้นใยแก้วนำแสง นั้นมีขนาดพอดีกับความโตของเส้นใยแก้วนำแสง และมีวิธีการผลิตที่ละเอียดอ่อนเที่ยงตรง



ภาพที่ ๔-๓๐ หัวต่อชนิดเอสซี

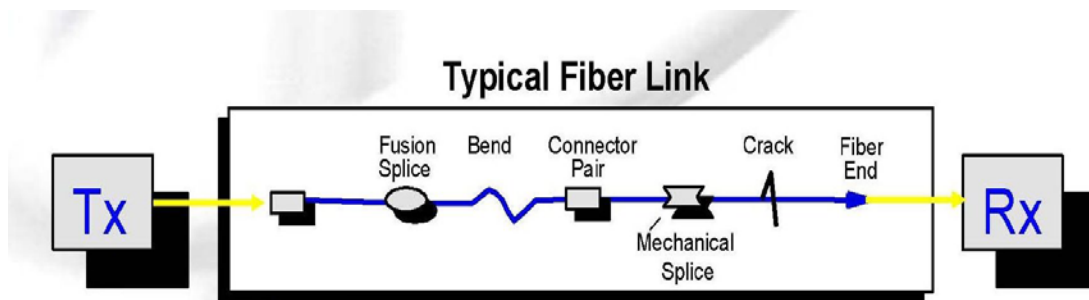
การลดทอนสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงแบบซิงเกิลโมดมีค่าประมาณ ๐.๒๕ เดซิเบล และอาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง ๐ ถึง ๐.๖ เดซิเบล ขณะที่เอาหัวต่อเสียบต่อกัน หัวต่อแบบเอสซีเป็นของใหม่เพิ่งนำออกมาวางตลาดในอเมริกามีใช้ประมาณ ๑ เปอร์เซ็นต์ ของที่ติดตั้งทั้งหมด แต่ขณะนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากใช้งานง่ายเป็นแบบถอดเข้าออกได้ และในขณะที่เอาหัวต่อกันก็ไม่ต้องหมุนหรือบิด แต่ใช้เสียบต่อตรงๆ นอกจากนี้หัวต่อยังเป็นชนิดปรับแกนเส้นใยแก้วนำแสงได้ด้วย

## (๗) หัวต่อชนิดเอฟดีดีไอ (FDDI Connector)

หัวต่อแบบเอฟดีดีไอ บางที่เรียกว่า "Media Interface Connector (MIC)" ออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์อันแรก คือ เชื่อมต่อระบบส่งเส้นใยแก้วนำแสงจากสายส่งเส้นใยแก้วนำแสงชุดแรกไปยังชุดที่สอง หรือส่งสัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงผ่านหัวต่อเอฟดีดีไอแล้วแยกไปยังอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องรับ เครื่องส่ง หรือ สวิตช์บายพาส (Bypass Switch) ตัวปลั๊กเสียบมีปุ่มล็อกเพื่อล็อกกับตัวรับอีกทีหนึ่ง หัวต่อชนิดนี้มีปลอกโลหะสำหรับยึดสายจำนวนสองปลอก เพื่อใช้งานกับเคเบิลแบบ ดูเพล็กซ์ (Duplex Cable) ตัวปลอกมีสภาพเป็นประเภทยึดหด หรือปรับตัวได้ขณะที่เสียบต่อกัน

### ๓.๔ องค์ประกอบระบบพื้นฐาน

เมื่อพิจารณาระบบพื้นฐานสื่อสารทางแสงหรือใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ได้ทั้งกับการสื่อสารอนาล็อกและดิจิทัลโดยเริ่มพิจารณาจากหลักการและองค์ประกอบเบื้องต้นเป็นลำดับไปคือ



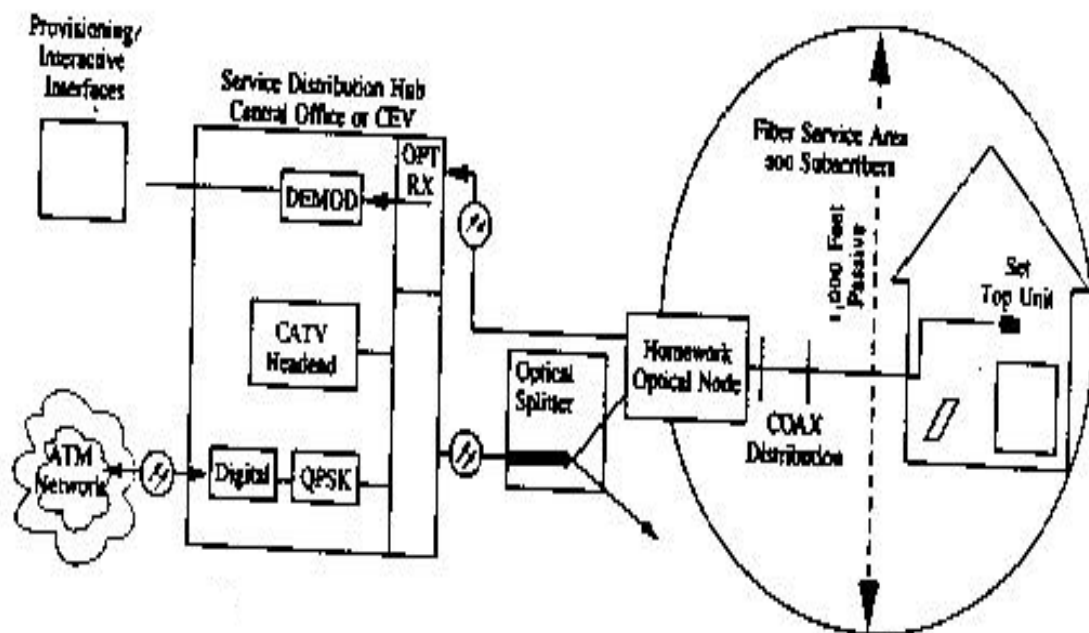
ภาพที่ ๔-๓๑ องค์ประกอบกายภาพสายไฟเบอร์ออฟติก

### ๓.๔.๑ เครื่องส่ง (Transmitter)

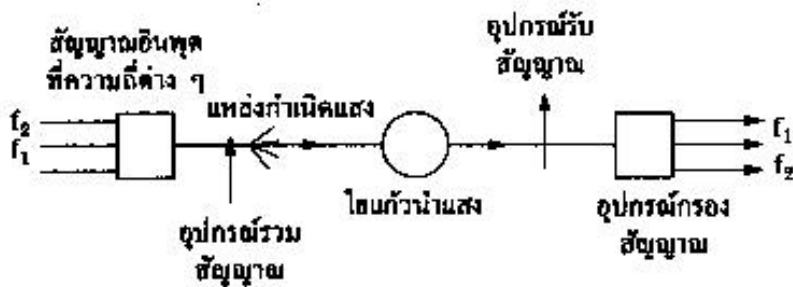
เครื่องส่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่ได้ถูกมอดูเลตและขยายแล้วโดยการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสง ชุดเครื่องส่งนี้จะมีส่วนประกอบหลักคือ แหล่งกำเนิดแสง และ วงจรขับที่สามารถทำการขยายและมอดูเลตสัญญาณได้

### ๓.๔.๒ เครื่องรับ (Receiver)

เครื่องรับจะทำหน้าที่รับสัญญาณแสงแล้วเปลี่ยน เป็นไฟฟ้า โดยเครื่องรับ ประกอบด้วยอุปกรณ์รับแสงและขยายกำลัง ในกรณีที่เครื่องรับสัญญาณทำหน้าที่ขยายกำลังแสงเพื่อส่งต่อไปจะเรียกว่า อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงใหม่ด้วย โดยทั่วไปจะใช้ APD หรือพินโฟโตไดโอด เป็นอุปกรณ์เพื่อประกอบเป็นเครื่องรับสัญญาณ



ภาพที่ ๔-๓๒ แสดงตัวอย่างของระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง

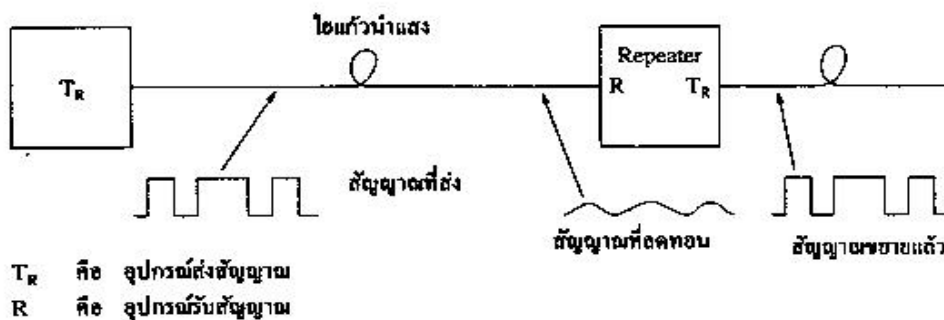


f คือ ความถี่

ภาพที่ ๔-๓๓ แสดงการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

### ๓.๔.๓ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ

สัญญาณแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแก้วนำแสง จะมีการสูญเสียสัญญาณไปกับระยะทางหรือความยาวของใยแก้วนำแสง ดังนั้นเมื่อถึงระยะหนึ่งสัญญาณแสงอาจต่ำมากจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการทวนสัญญาณซึ่งไดอะแกรมของอุปกรณ์ แสดงได้ตามรูป



TR คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณ  
R คือ อุปกรณ์รับสัญญาณ

ภาพที่ ๔-๓๔ แสดงการทวนสัญญาณ

### ๓.๔.๓.๑ ใยแก้วนำแสง และการเชื่อมต่อ

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ให้การสื่อสารนั้นประกอบเป็นระบบได้ เพราะสามารถทำให้ติดต่อกันได้ในระยะทางไกลและเป็นจำนวนมากอีกด้วยการคับปลิงแสงใยแก้วนำแสงกำลังของแสงที่สูญเสียจากการคับปลิงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่ใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งจากการที่ NA ของใยแก้วนั้นไม่สัมพันธ์กับพื้นที่ของแหล่งกำเนิดแสง โดยปกติแล้วพื้นที่ปล่อยแสงของแหล่งกำเนิดแสงนั้นต้องเล็กกว่าแกนของใยแก้วนำแสง การสูญเสียกำลังนี้สามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$\text{Loss}_{\text{area}} = 10 \log (A_c/A_s)$$

สำหรับใยแก้วนำแสงแกนวงกลมสมการเปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} \text{Loss}_{\text{area}} &= 10 \log (D_c/D_s)^2 \\ &= 20 \log ((D_c/D_s)) \end{aligned}$$



เมื่อกำหนดให้  $A_c$  คือพื้นที่ของใยแก้วนำแสง

$A_s$  คือพื้นที่แอคทีฟของแหล่งกำเนิดแสง

$D_c$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของแกน

$D_s$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดแสง

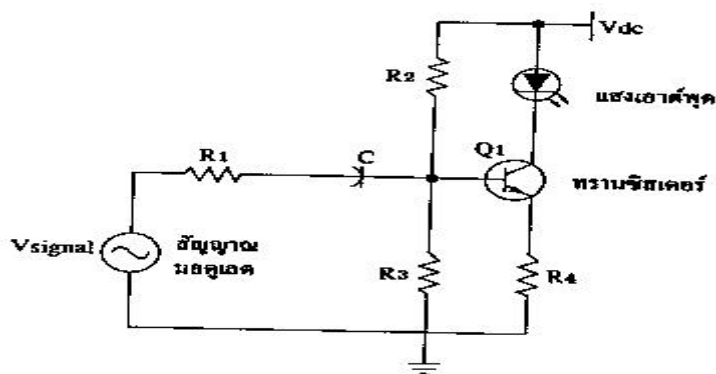
และสมการจะใช้ได้เมื่อ  $A_c < A_s$  หน่วยของการสูญเสียนั้นเป็นเดซิเบล (dB) ถ้าเขียนความสัมพันธ์ของการสูญเสียในเทอมของ NA จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{Loss}_{NA} = 20 \log (NA)$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } (NA) = (P_c/P_t)^{1/2}$$

โดย  $P_c$  คือกำลังของแสงที่คัปปลิงสู่ใยแก้วนำแสง  $P_t$  คือกำลังแสงส่งออกทั้งหมด

การมอดูเลชันแบบต่างๆรวมไปถึงเรื่องมัลติเพล็กซ์และการเข้ารหัสด้วย ซึ่งจะเห็นว่าเทคนิคต่างๆ นั้น จะเกิดจากการทำงานของส่วนที่อยู่ในชุดอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณที่เป็นวิธีการที่กระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้า นอกจากการมัลติเพล็กซ์ทางแสงที่เรียกว่า WDM เท่านั้นที่สามารถนำรวมเข้าไปกับสัญญาณแสงได้



ภาพที่ ๔-๓๕ แสดงการมัลติเพล็กซ์ทางแสง

### ๓.๕ องค์ประกอบของระบบสื่อสารทางแสง

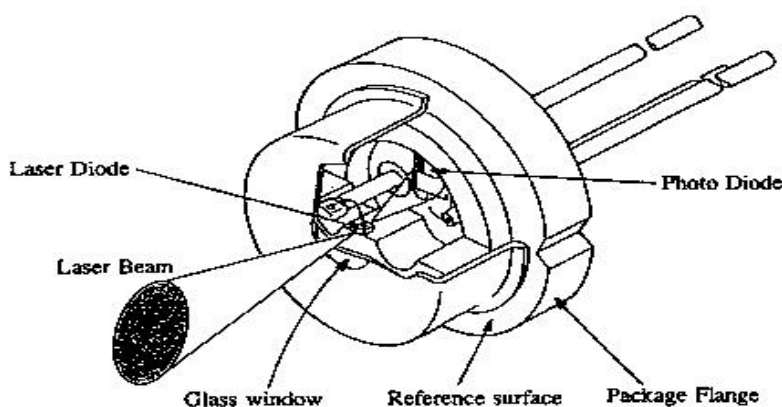
อุปกรณ์ส่งสัญญาณพิจารณาการมอดูเลตไดโอดเปล่งแสง หรือ แอลอีดี (LED) แบบอนาล็อกซึ่งกำลังของแสงเอาต์พุตที่ได้จาก LED จะแปรโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านวงจรถ่ายใช้ในการมอดูเลต ตามวงจรถ่ายรูปจะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_{dc} + I_{sp} \cos \omega t$$

แล้วในเทอมของกำลังสามารถเขียนได้เป็น

$$P = P_{dc} + P_{sp} \cos \omega t$$

โดยที่  $P_{dc}$  คือกำลังของแสงที่ได้จากกระแสไบแอส ส่วน  $P_{sp} \cos \omega t$  คือกำลังของแสงที่ได้จากกระแสของสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นขั้วสารหรือสัญญาณมอดูเลต โดย แอลฟา คือที่เชิงมุมในการปฏิบัติที่สัญญาณมอดูเลตจะสามารถเห็นได้ไม่ว่า  $P_{dc}$  จะถูกออฟเซตหรือไม่ก็ตาม อย่างไรก็ตามการไบแอสต้องเป็นไปตามข้อกำหนดเฉพาะไดโอดเปล่งแสงด้วย

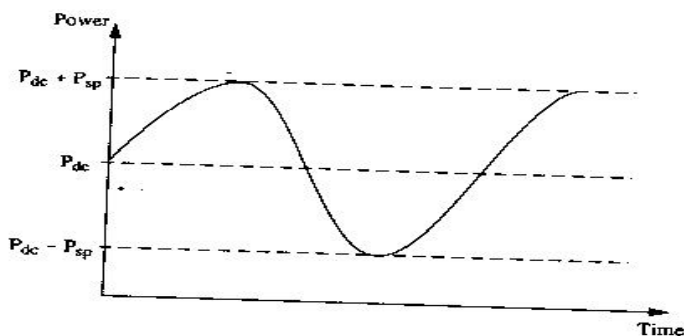


ภาพที่ ๔-๓๖ แสดงลักษณะของไดโอดเลเซอร์

รูปแสดงลักษณะของไดโอดเลเซอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กมากที่ให้ลำแสงออกมาจากส่วนที่เป็นอุปกรณ์เลเซอร์ และลำแสงนี้เองที่สามารถใช้เป็นคลื่นพาห์สำหรับการสื่อสารได้ส่วน LED ก็จะมีลักษณะคล้ายกันจะแตกต่างกันเฉพาะโครงสร้างดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนรูปต่อไปเป็นการแสดงค่าตามสมการ

$$P = P_{dc} + P_{sp} \cos \omega t$$

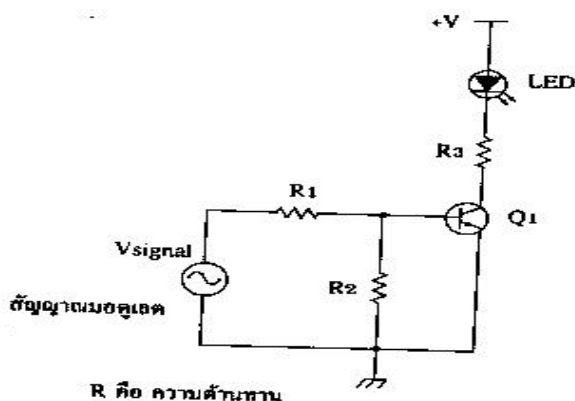
ของ LED



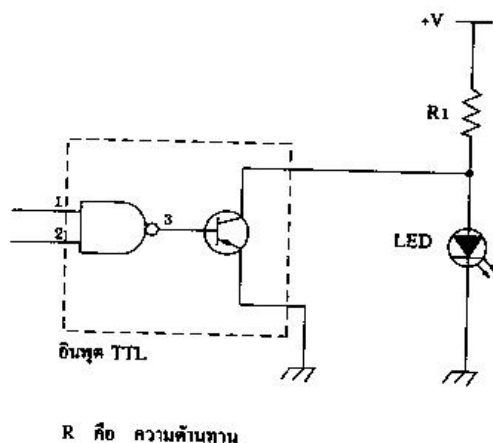
ภาพที่ ๔-๓๗ แสดงความสัมพันธ์ของกำลังและแสงในการมอดูเลต LED

### ๓.๕.๑ การมอดูเลต LED

การมอดูเลตแบบดิจิตอล คือการทำให้ LED เปิดหรือปิด ในกรณีที่ปิดนั้น LED จะเปล่งแสงออกมาน้อยมากหรือไม่เปล่งแสงเลย ในกรณีที่เปิดนั้น LED จะเปล่งแสงออกมามากที่สุด การมอดูเลตแบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้กระแสไบแอส กล่าวคือเมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเกินระดับหนึ่งก็จะทำให้ LED นั้นเปิดเต็มที่ คือมีแสงออกมามากที่สุด แต่เมื่ออินพุตมีค่าต่ำกว่าระดับหนึ่งก็จะทำให้ LED ไปที่ปิด ซึ่งก็คือจะไม่มีแสงเปล่งออกมาเลย การเชื่อมต่อ LED กับวงจร TTL ใช้กรณีที่ต้องการต่อ LED กับไอซี TTL สามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ไอซี ในรูป เป็นการแสดงผังวงจรของการมอดูเลต LED แบบแอนะล็อกและดิจิตอลตามลำดับ



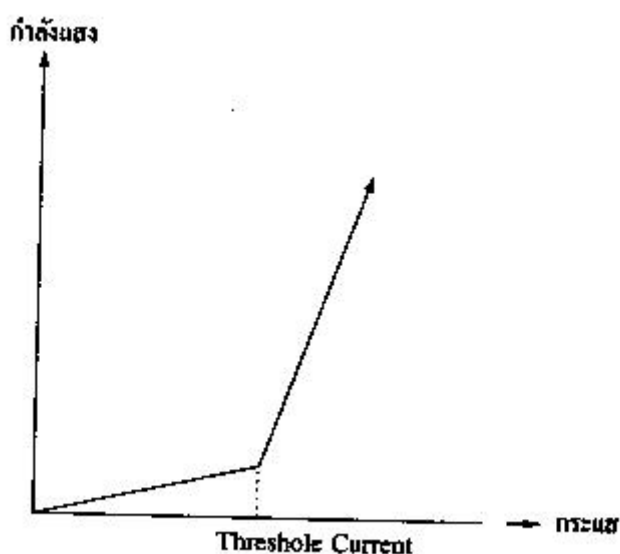
ภาพที่ ๔-๓๘ แสดงวงจรใช้กับมอดูเลตแบบแอนะล็อกกับ LED



ภาพที่ ๔-๓๙ แสดงวงจรมอดูเลต LED แบบดิจิตอล

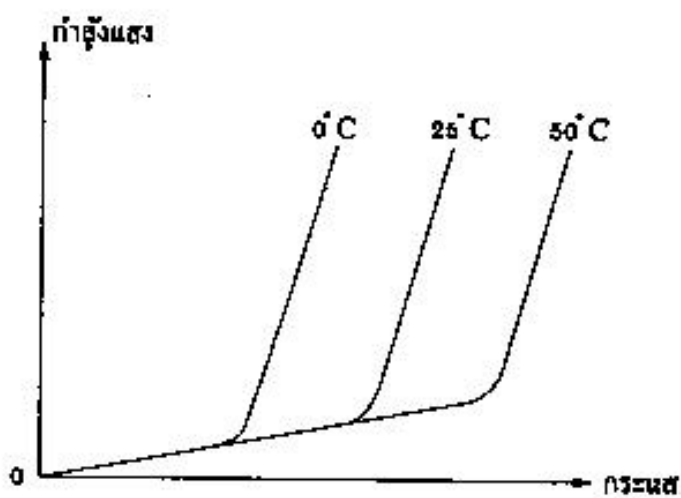
### ๓.๕.๒ การมอดูเลตไดโอดเลเซอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสงและการไหลผ่านไดโอด เลเซอร์จะไม่ใช่เป็นเชิงเส้นทั้งหมดดังแสดงในรูปข้างล่างจะเห็นว่าจะมีลักษณะแสงเข้าเว้นเป็นช่วงๆกล่าวคือ

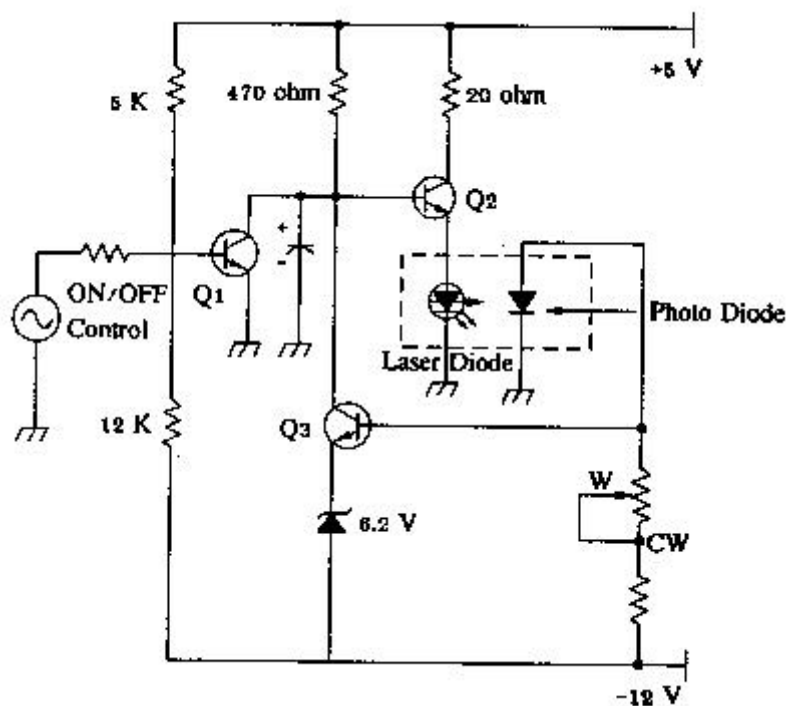


ภาพที่ ๔-๔๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วไดโอดเลเซอร์และกำลัง เอาต์พุต

ขณะที่กระแสต่ำกว่ากระแสขีดเริ่มนั้นไดโอดเลเซอร์จะทำงานเหมือนกับ LED เมื่อกระแสไหลผ่านไดโอดเลเซอร์มากกว่ากระแสขีดเริ่มกำลังของแสงที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยที่ค่ากระแสขีดที่เริ่มจะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง ๑ องศาเซลเซียส ค่าของกระแสขีดเริ่มจะเพิ่มขึ้น ๑ หรือ ๒ เปอร์เซ็นต์ ตามรูป ถ้าไดโอดเลเซอร์ถูกไบแอสด้วยกระแสที่คงที่ การลดลงของอุณหภูมิจะทำให้กำลังของแสงเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งอาจทำให้ไดโอดเลเซอร์เสียหายดังนั้นปัจจุบันไดโอดเลเซอร์จะมีโฟโตไดโอดอยู่ภายในรวมอยู่ด้วย เพื่อตรวจสอบกำลังของแสง และนอกจากนั้นโฟโตไดโอดนี้จะใช้เป็นส่วนป้อนกลับเพื่อควบคุมกำลังของแสงให้คงที่

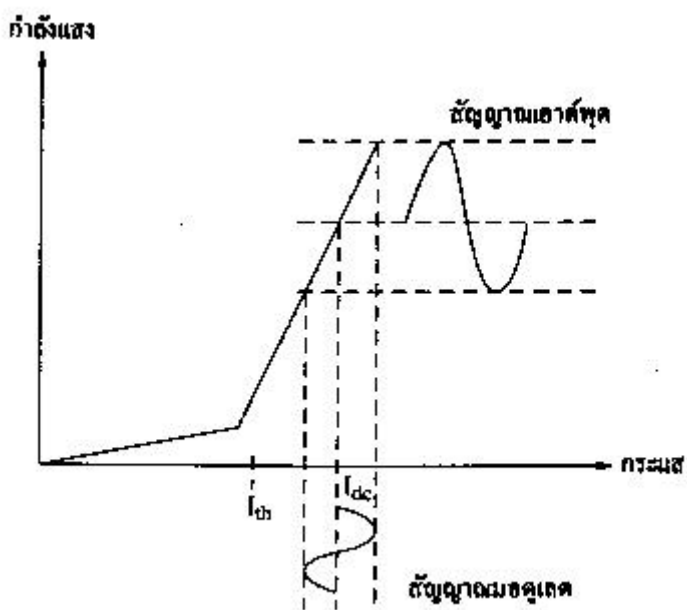


ภาพที่ ๔-๔๑ ลักษณะของเอาต์พุตของไดโอดเลเซอร์กับกระแสขณะที่อุณหภูมิไม่คงที่

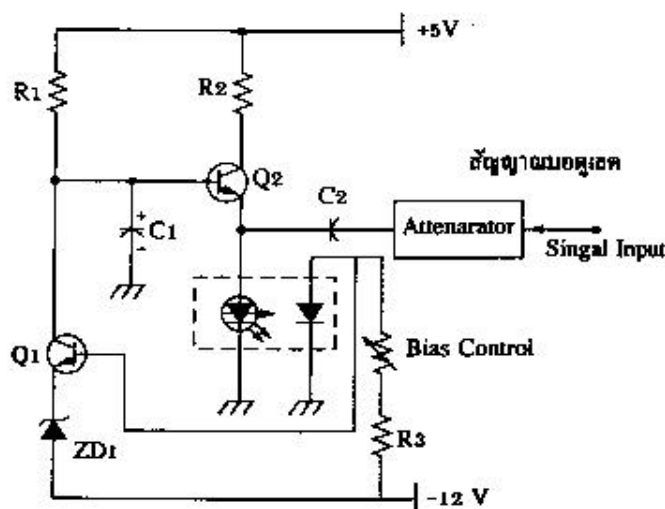


ภาพที่ ๔-๔๒ วงจรขับไดโอดเลเซอร์ (Q คือ ทรานซิสเตอร์ W คือ ความต้านทานปรับค่าได้)

ลักษณะของวงจรมอดูเลตดังแสดงในรูปด้านล่าง สำหรับกรณีของการมอดูเลตแบบแอมพลิจูด ไดโอดเลเซอร์จะคล้ายๆ กับ LED กล่าวคือมีส่วนของวงจรที่สร้างกระแสไบแอสซึ่งจะต้องมากกว่า กระแสขีดเริ่ม



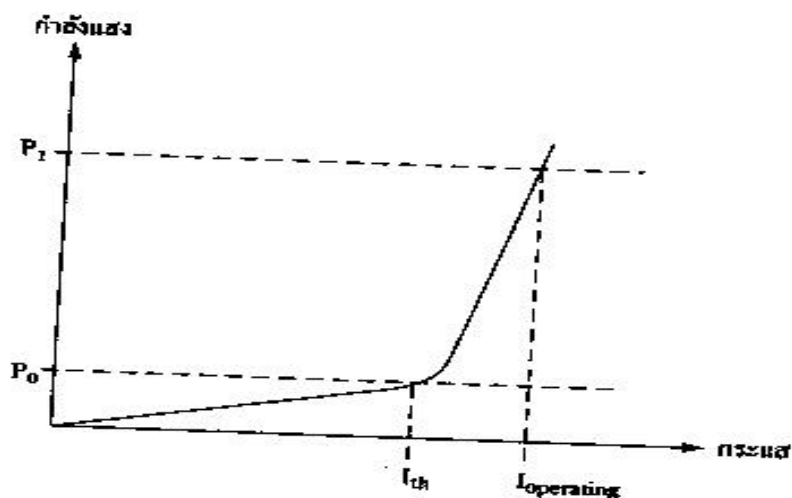
ภาพที่ ๔-๔๓ แสดงการมอดูเลตไดโอดเลเซอร์แบบแอมพลิจูด



- Q . คือ ทรานซิสเตอร์
- C . คือ ตัวเก็บประจุ
- ZD . คือ ซีเนอร์ไดโอด
- R . คือ ความต้านทาน

ภาพที่ ๔-๔๔ วงจรสำหรับการมอดูเลตไดโอดเลเซอร์แบบดิจิทัล

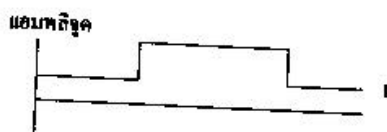
รูปด้านบน เป็นไดอะแกรมของมอดูเลตเลเซอร์ ส่วนรูปถัดมา เป็นผังวงจรของวงจรขับไดโอดเลเซอร์แบบดิจิทัล โดยอาจใช้เทคนิคในการมอดูเลต หรือเข้ารหัสต่างๆ ได้ตามความเหมาะสม สำหรับการมอดูเลตแบบดิจิทัลนั้นไดโอดเลเซอร์จะถูกไบแอสให้มีกระแสไหลผ่านอยู่ที่กระแสขีดเริ่ม สำหรับสัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ คือลอจิก "0" ซึ่งเป็นการให้กำลังของแสงมีค่าน้อยซึ่งให้เท่ากับ  $P_0$  และเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นลอจิก "1" จะทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดเลเซอร์มากขึ้นมีผลทำให้ได้กำลังของแสง  $P_1$  ซึ่งมีความมากกว่า  $P_0$  โดยทั่วไปแล้ว  $P_1$  จะมีความมากกว่า  $P_0$  สิบเท่า



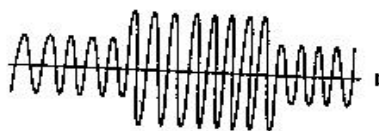
ภาพที่ ๔-๔๕ แสดงลักษณะกำลังของเอาต์พุตของไดโอดเลเซอร์

### ๓.๕.๓ ชนิดของสัญญาณไฟฟ้า

สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าเครื่องส่งหรือตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงนั้นจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณข่าวสารโดยตรงซึ่งเราเรียกว่า สัญญาณเบสแบนด์ ซึ่งจะมีทั้งสัญญาณแอนะล็อก เช่น สัญญาณเสียงพูดในระบบโทรศัพท์ หรือสัญญาณดิจิทัลเช่น ข้อมูลจากพอร์ตอาร์เอส ๒๓๒ ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น นอกจากสัญญาณเบสแบนด์แล้วสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเครื่องส่งก็อาจจะเป็นสัญญาณ AM หรือ FM หรือ PCM ซึ่งสัญญาณ AM คือสัญญาณไฟฟ้าที่จะมีลักษณะเป็นรูปไซน์ มีค่าความถี่เพียงค่าเดียว แต่ขนาดของสัญญาณจะถูกทำให้เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณข่าวสาร สัญญาณ PCM คือรหัสของสัญญาณดิจิทัลที่ใช้แทนระดับของสัญญาณข่าวสาร ณ เวลาหนึ่งๆ



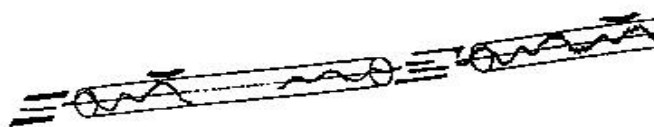
ภาพที่ ๔-๔๖ สัญญาณคลื่นพาทช์



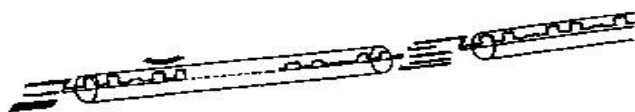
ภาพที่ ๔-๔๗ สัญญาณมอดูเลต



ภาพที่ ๔-๔๘ สัญญาณมอดูเลตเชิงความถี่

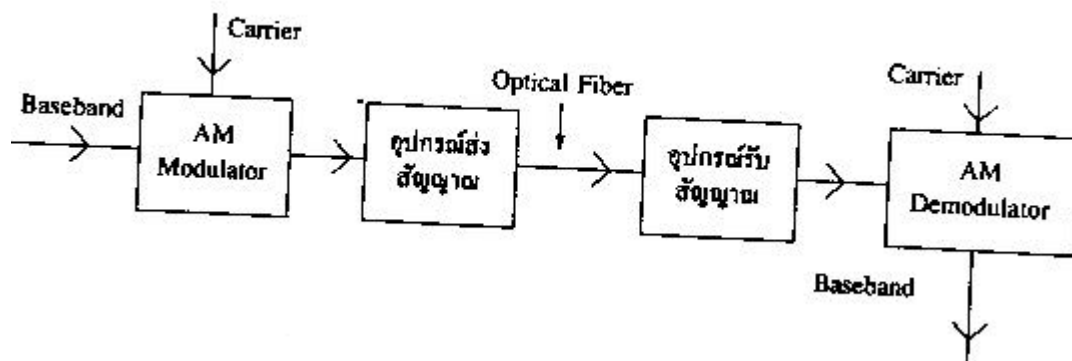


ภาพที่ ๔-๔๙ สัญญาณแอนะล็อก

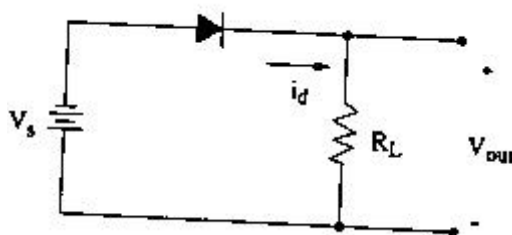


ภาพที่ ๔-๕๐ สัญญาณดิจิทัล

ลักษณะสัญญาณในใยแก้ว ในกรณีที่สัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณ AM ระบบสื่อสารที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง ก็จะมีส่วนเพิ่มเติมดังแสดงในรูปด้านล่าง โดยสัญญาณเบสแบนด์จะถูกผสมกับสัญญาณเอเอ็มแล้วส่งเข้าใยแก้วนำแสงไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ หลังจากนั้นคลื่นพาห์จะถูกตัดออกแล้วนำสัญญาณเอาต์พุตไปใช้งาน



ภาพที่ ๔-๕๑ แสดงระบบสื่อสารแบบ AM



ภาพที่ ๔-๕๒ แสดงวงจรของเครื่องรับสัญญาณแสง

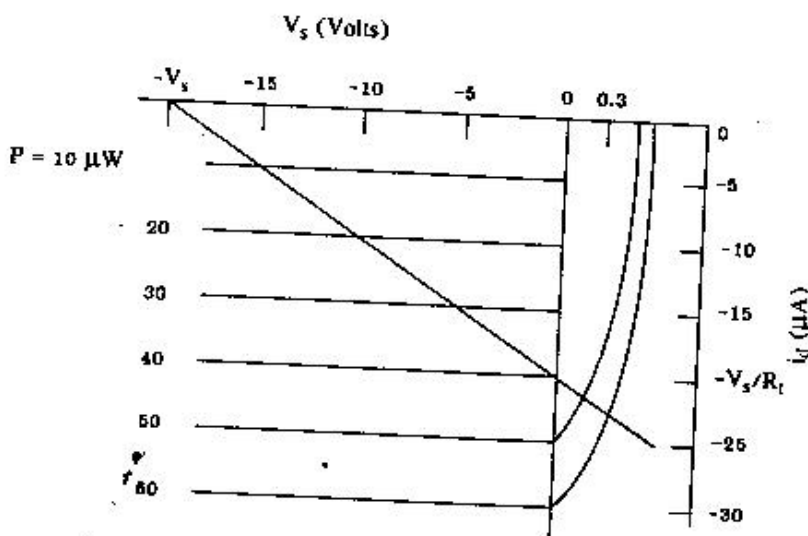
อุปกรณ์รับสัญญาณดังรูปด้านบน จะเห็นว่าค่า  $V_{out}$  จะมีค่าเท่ากับ  $i_d R_L$  ซึ่งจะเห็นว่าถ้า  $R_L$  ยิ่งมากเท่าไร ขนาดของ  $V_{out}$  ก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และค่า  $V_{out}$  จะขึ้นอยู่กับกระแส  $i_d$  ที่แปรโดยตรงกับกำลังแสงที่ตกกระทบบโฟโตไดโอด

ตัวอย่างเช่น  $V_s = 20 \text{ V}$

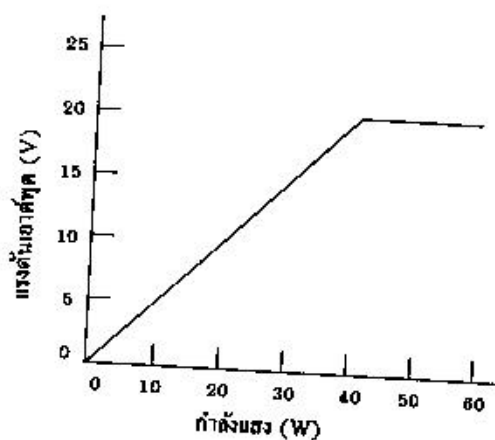
โดยมี  $R_L = 1 \text{ M}\Omega$

และโฟโตไดโอดเป็นชนิดพินโฟโตไดโอด ดังรูป



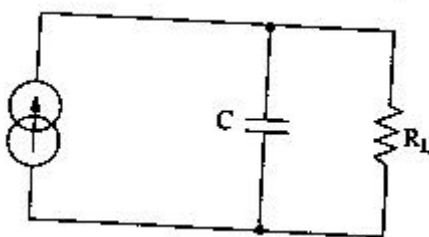


ภาพที่ ๔-๕๓ แสดงคุณสมบัติของฟิโนไดโอดในรูปของกำลัง (uW) แรงดัน (Volts) และกระแส (mA)



ภาพที่ ๔-๕๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตกับกำลังแสง เมื่อ  $R_L = 1 \text{ M}\Omega$  และการตอบสนองเป็น  $0.5 \text{ A/W}$

ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดนั้นจะถูกจำกัดด้วยค่าทรานซิทไทม์ (Transit Time) คือเวลาที่ประจุใช้ในการข้ามชั้นดีพลีชัน (Depletion Layer) นอกจากนี้ค่าคาปาซิแตนซ์ของโฟโตไดโอดเนื่องจากถูกไบแอสกลับก็จะเป็นตัวจำกัดความเร็วในการตอบสนองเช่นกัน ค่าคาปาซิแตนซ์นี้จะลดลงถ้าบริเวณแอ่งที่มีค่าน้อยกว่า ๑๐๐ ไมครอน ค่าคาปาซิแตนซ์จะมีค่าน้อยกว่า ๑ พิโคฟารัด (PF) ที่  $V_s = -30 \text{ v}$  เป็นต้น ภาพที่ ๕.๒๐ แสดงลักษณะของวงจรตัวเก็บประจุ



ภาพที่ ๔-๕๕ แสดงวงจของตัวเก็บประจุ

ค่าคาปาซิแตนซ์จะมีผลต่อแบนวิดท์ ในการตอบสนองของโฟโตไดโอดซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

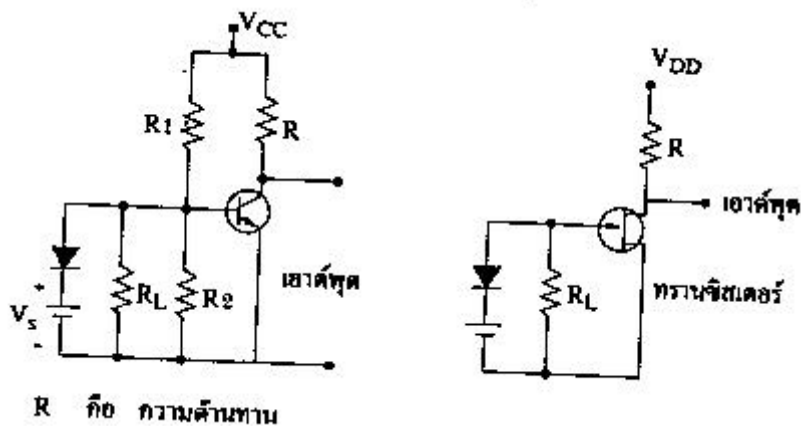
$$f_{3-dB} = \frac{1}{2\pi R_L C}$$

และค่าไรซ์ไทม์  $T_r = 2.19 R_L C$

ตัวอย่างเช่น ถ้า  $C = 1$  PF,  $R_L = 50$   $\Omega$  จะได้  $T_r = 2.16 * 50 * 1 * 10^{-12} = 0.1$  ns

และ  $f_{3-dB} = 1/(2*550*10^{-12}) = 3.18$  GHz

ในวงจรแบบนี้จะเห็นว่าสำหรับแรงดันเอาต์พุตสูงนั้นจำเป็นต้องใช้  $R_L$  ที่มีค่าสูงนั่นคือเมื่อ  $R_L$  ที่มีค่าสูงจะทำให้ค่า  $f_{3-dB}$  ต่ำสำหรับการตอบสนองที่รวดเร็วจะต้องใช้  $R_L$  ที่มีค่าต่ำกว่าแต่จะให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำวงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์ เพื่อใช้ตัวต้านทานที่มีค่า  $R_L$  ลดลงเราสามารถทำได้โดยใช้วงจรขยายที่เป็นทรานซิสเตอร์ และ FET ดังรูป



ภาพที่ ๔-๕๖ แสดงวงจร FET

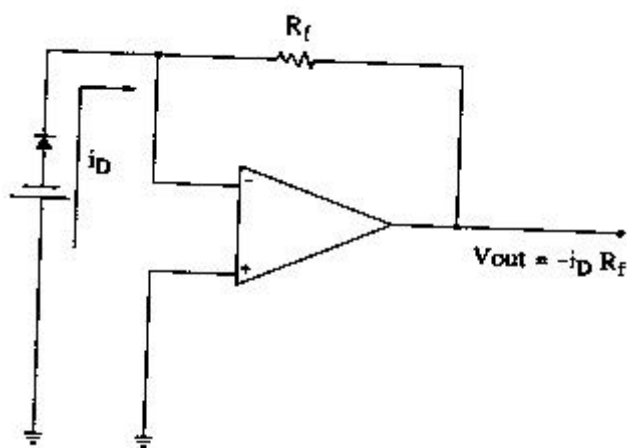
ในวงจรนี้ทำให้แรงดันเอาต์พุตสูงขึ้น เนื่องจากสัญญาณจะถูกขยายด้วยทรานซิสเตอร์ และ  $f_{3-dB}$  จะมีค่าเท่ากับ

$$f_{3-dB} = \frac{1}{2\pi R_T C_T}$$

เมื่อ  $C_T$  มีค่าเท่ากับค่าคาปาซิเตอร์ของไดโอดต่อขนานกับอินพุตคาปาซิแตนซ์ทรานซิสเตอร์

$R_T$  จะมีค่าเท่ากับ  $R_L$  ต่อขนานกับความต้านทานเข้าของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และ FET

เนื่องจากความต้านทานขาเข้าของ FET มีค่าสูงกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มากๆ จึงทำให้ค่า  $f_{3-dB}$  ของ FET จะต่ำกว่าวงจรรขยายที่ใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์



ภาพที่ ๔-๕๗ แสดงวงจรการเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

#### (๑) วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

วงจรมีใช้ออปแอมป์ เป็นตัวเปลี่ยนกระแส  $i_D$  เป็นแรงดันซึ่งเท่ากับ  $-i_D R_f$  ในวงจรมีทำให้ค่า  $f_{3-dB}$  มีค่าสูงและมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี โดยมีค่า  $f_{3-dB}$  เท่ากับ

$$f_{3-dB} = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

เมื่อ  $C_f$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างขาลบ และเอาต์พุตของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

จากรูปด้านบน แสดงการเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน นั่นคือในขณะที่แสงตกกระทบอุปกรณ์รับสัญญาณนั้นจะได้เอาต์พุตเป็นกระแสโฟโต ซึ่งเมื่อใช้วงจรมีกระแสจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดัน

## (๒) งบประมาณกำลัง

งบประมาณกำลัง (Power Budget) คือค่าสูญเสียกำลังทั้งหมดของแสงที่ยอมได้ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ตรวจรับแสง ถ้าให้ ( $P_S$ ) คือ กำลังของแสงที่ป้อนให้กับระบบ และ  $P_R$  คือ ความไวของเครื่องรับและงบประมาณกำลังจะเท่ากับ  $P_S - P_R$  ในการออกแบบระบบนั้นจำเป็นต้องมีค่ากำลังเพื่อหรือเตรียมการของระบบ (Power Margin) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างงบประมาณกำลัง และค่าสูญเสียของระบบ โดยค่ากำลังเพื่อควรมีค่าเป็นบวก ค่าสูญเสียในระบบนั้นจะเกิดจากการสูญเสียที่เกิดจากข้อต่อหัวเชื่อมต่อที่เกิดจากการต่อใยแก้วนำแสง และค่าสูญเสียเกิดจากการลดทอนกำลังของใยแก้วนำแสงเอง เป็นต้นโดยทั่วไปการออกแบบระบบนั้นจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดดังนี้คือ

- พิจารณาถึงใยแก้วนำแสงที่เกี่ยวกับการลดทอนกำลัง การกระจาย และแถบความถี่ หรือแบนวิดท์
- ข้อจำกัดของเครื่องส่งซึ่งจะพิจารณาถึงกำลังสูงสุด ความกว้างของสเปกตรัม การตอบสนองความถี่ และความเป็นเชิงเส้น ข้อจำกัดของเครื่องรับที่จะพิจารณาถึงสัญญาณรบกวน การตอบสนองต่อสเปกตรัม การตอบสนองต่อความถี่ ความไว และความเป็นเชิงเส้น

## (๓) การคำนวณงบประมาณกำลัง

ในการคำนวณงบประมาณกำลังนั้นสามารถแทนได้ด้วยสูตรการคำนวณดังสมการ

$$P_{SL} = P_S - S$$

เมื่อ  $P_{SL}$  คือค่าสูงสุดของการสูญเสียของระบบ

$P_S$  คือกำลังของแหล่งกำเนิดแสง

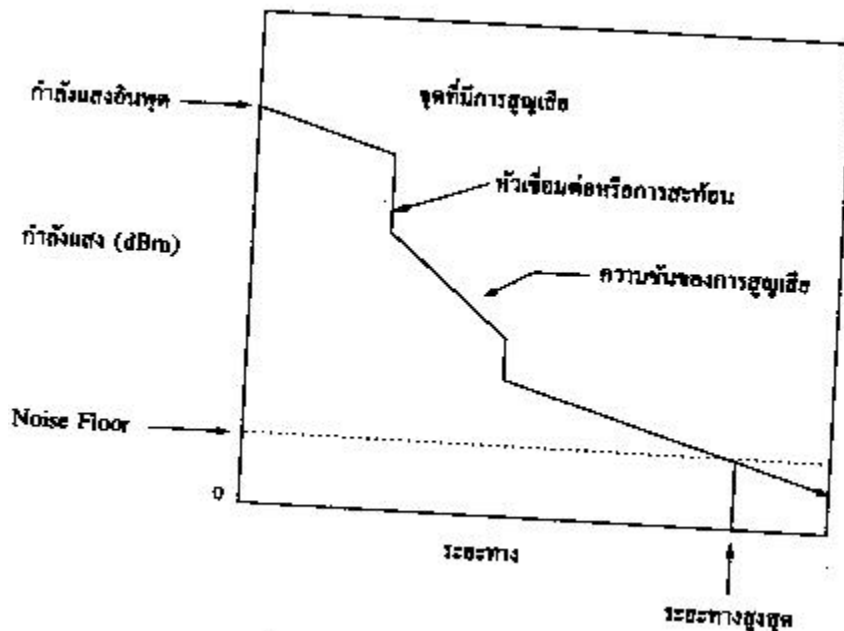
และ  $S$  คือ ค่าตอบสนองต่ำสุดของอุปกรณ์รับสัญญาณ



ภาพที่ ๔-๕๘ แสดงระบบสื่อสารทางแสง

ในการออกแบบระบบสื่อสารต้องพิจารณาในเรื่องของอุปกรณ์ส่งสัญญาณซึ่งประกอบไปด้วยกำลังของเอาต์พุต ความกว้างของสเปกตรัม ความถี่ที่ตอบสนองและความถี่เชิงเส้น ในส่วนของใยแก้วนำแสงนั้นต้องพิจารณาการลดทอนของสัญญาณ การกระจายและแบนวิดท์ ในส่วนของอุปกรณ์รับสัญญาณ

ต้องพิจารณาถึงสัญญาณรบกวน สเปกตรัมของการตอบสนอง ความถี่ตอบสนองและความเป็นเชิงเส้น เป็นต้น ภาพที่ ๔-๕๙ เป็นไดอะแกรมของเอาต์พุตของสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์ที่เรียกโอทีดีอาร์ (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)



ภาพที่ ๔-๕๙ แสดงกำลังของแสงกับระยะทาง

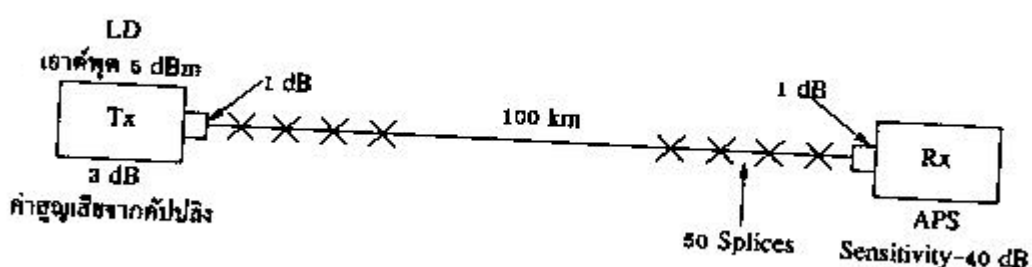
ตัวอย่างการคำนวณ เช่น ในระบบสื่อสารที่ใช้ใยแก้วเป็นระยะทาง ๑๐๐ กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้คือ ๑,๕๕๐ นาโนเมตร เส้นใยแก้วมีการลดทอนกำลังเท่ากับ 0.25 dB/km มีรอยต่อของเส้นใยแก้ว ๕๐ จุด แต่ละจุดมีการสูญเสีย 0.1 dB และมีข้อต่อ ๒ ตัว แต่ละข้อต่อหรือหัวเชื่อมต่อมีค่าการสูญเสีย 1 dB กรณีนี้แหล่งกำเนิดแสงเป็นไดโอดเลเซอร์ที่มีกำลัง 5 dBm ในการส่งแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วมีค่าสูญเสีย 3 dB ทางด้านรับใช้ APD ที่มีความไว -40 dBm สำหรับสัญญาณดิจิทัล ที่มีความผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-9}$  จงคำนวณหาค่ากำลังเพื่อของระบบ

พิจารณาการคำนวณดังนี้

กำลังจากไดโอดเลเซอร์	5 dBm
ค่าสูญเสียจากการส่งแสงเข้าเส้นใยแก้ว	3 dB
ค่าสูญเสียในข้อต่อ	2 dB
ค่าสูญเสียในรอยต่อ	5 dB
ค่าลดทอนกำลังของเส้นใยแก้ว	25 dB

ค่าสูญเสียทั้งหมด	35 dB
ดังนั้นกำลังอุปกรณ์ที่รับสัญญาณได้เท่ากับ (๕-๓๕) -30 dBm	
APD มีความไวเท่ากับ	-40 dBm
กำลังที่คงเหลือ (๔๐-๓๐)	10 dB

ถ้าแทน APD ด้วยพินโฟโตไดโอด และมีความไวเท่ากับ -32 dBm จะทำให้ได้กำลังที่เหลือ คือ ซึ่งเหลือกำลังเป็น 2 dB (๓๒-๓๐)



ภาพที่ ๔-๖๐ แสดงการวางระบบสื่อสารสำหรับการคำนวณงบประมาณกำลังซึ่งประกอบด้วยส่วนของการสูญเสียจากการคัปปลิงและการเชื่อมต่อ

#### (๔) งบประมาณแบนวิดท์

ในการออกแบบนั้นแบนวิดท์ของระบบจะต้องมีความกว้างพอที่จะรองรับแบนวิดท์ของข่าวสารหรือข้อมูลที่ส่งผ่านระบบ แบนวิดท์ของระบบหมายถึงแบนด์วิดท์รวมของเครื่องส่งใยแก้วนำแสงและเครื่องรับในการคำนวณแบนวิดท์ของระบบนั้นจะคำนวณเป็นค่าไรซ์ไทม์ ซึ่งจะได้ว่า

$$f_{3-dB} = \frac{0.35}{t_s}$$

เมื่อ  $t_s$  คือไรซ์ไทม์ของระบบซึ่งมีความสัมพันธ์กับไรซ์ไทม์ของแหล่งกำเนิดแสง ( $t_{LS}$ ) เมื่อให้  $t_F$  คือ ไรซ์ไทม์ของเส้นใยแก้วนำแสง และไรซ์ไทม์ของโฟโตไดโอด คือ  $t_{PD}$  ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์คือ

$$t_s^2 = t_{LS}^2 + t_F^2 + t_{PD}^2$$

โดยที่  $f_{3-dB}$  ในสมการข้างต้นจะเป็นความถี่ที่ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงเป็นครึ่งหนึ่ง ในการคำนวณแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะใช้ความถี่ที่ให้กำลังแสงลดลงเป็นครึ่งหนึ่งจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแบนด์

วิดท์ของเส้นใยแก้วให้อ้างอิงกันกับกำลังไฟฟ้าทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก  $P_{\text{OPT}} \propto I$  และ  $P_{\text{elect}} \propto I^2$  ดังนั้น  $P_{\text{elect}} \propto P_{\text{OPT}}^2$  นั่นคือ  $\text{dB}_{\text{elect}} = 2 \text{ dB}_{\text{opt}}$

หรือ

$$\text{dB}_{\text{opt}} = 0.5 \text{ dB}_{\text{elect}}$$

พิจารณาจากสมการ แสดงว่าในขณะที่สัญญาณไฟฟ้าลดลงเป็น 3 dB สัญญาณแสงจะลดลงเป็น ๑.๕ dB และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $f_{3\text{-dB}}(\text{electrical})$  และ  $f_{3\text{-dB}}(\text{optic})$  ได้ดังนี้คือ

$$f_{3\text{-dB}}(\text{electrical}) = 0.71 f_{3\text{-dB}}(\text{optic})$$

พิจารณาคคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ จะเห็นว่าโรซีโคม์ของแหล่งกำเนิดแสงขึ้นอยู่กับชนิดแหล่งกำเนิดแสงเช่น LED หรือไดโอดเลเซอร์ ส่วนค่าของโรซีโคม์ของโฟโตไดโอดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

พิจารณาโรซีโคม์ของใยแก้วนำแสง ( $t_F$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การกระจายของใยแก้วเอง โดยเขียนเป็นสมการได้คือ

$$t_F^2 = t_{\text{mod}}^2 + t_{\text{dis}}^2$$

เมื่อ  $t_{\text{mod}}$  คือ โรซีโคม์ของเส้นใยแก้วเนื่องจากการกระจายของโหมดซึ่งสามารถหาจากแบนด์วิดท์  $t_{\text{dis}}$  คือ โรซีโคม์ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุและการกระจายท่อนำคลื่นโดยที่

$$t_{\text{dis}} = -(M+M') \Delta\lambda$$

ในกรณีที่สัญญาณข้อมูลหรือข่าวสารเป็นสัญญาณดิจิทัลสามารถหาแบนด์วิดท์ได้จากการพิจารณาว่ารูปร่างของสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบ NRZ หรือเป็นแบบ RZ ตามลำดับ

$$f_{3\text{-dB}}(\text{electrical}) = \frac{R_{\text{NRZ}}}{2}$$

$$f_{3\text{-dB}} = R_{\text{RZ}}$$

พิจารณาตัวอย่าง เมื่อต้องการส่งสัญญาณแอนะล็อกที่มีแบนด์วิดท์ 6 MHz ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด ทั้งแบบสเตปอินเดกซ์ และเกรดอินเดกซ์ จงคำนวณหาระยะทางที่สามารถส่งสัญญาณนี้ไปได้ไกลที่สุดกี่กิโลเมตร โดยกำหนดให้ แหล่งกำเนิดแสงเป็น LED มีกำลัง 1 mw ที่ความ

ยาวคลื่น 850 nm มีโรซีท์หม้เท่ากับ 12 ns สเปกตรัมกว้าง 35 nm และมีรัศมีของบริเวณที่เปล่งแสงน้อยกว่า 25 mm

ในกรณีแรกใช้เส้นใยแก้วหลายโหมดมี  $NA = 0.24$  แบนด์วิดท์แสง  $f_{3-dB} * L = 33 \text{ MHz} * \text{km}$  มีการสูญเสีย 5 dB/km และแกนกลางมีรัศมี 50  $\mu\text{m}$  เมื่ออุปกรณ์รับสัญญาณต้องการกำลังของแสง -22.2 dBm และวงจรที่ใช้เป็นวงจรมี  $C_D = 5 \text{ pF}$  และ  $R_L = 5.1 \text{ k}\Omega$  โดยทำให้มีการสูญเสียในการส่งแสงไปยังเส้นใยแก้ว 12.6 dB สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดสเตปอินเด็กส์ และ 15.6 dB ใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กส์ มีหัวเชื่อมต่อ (Connector ๒ ตัว) อุปกรณ์เชื่อมต่อ ๒ ตัว ที่ปลายทั้ง ๒ โดยแต่ละตัวมีการสูญเสียเท่ากับ 1 dB

พิจารณางบประมาณกำลังดังนี้

กำลังจาก LED ( 1 mw) 0 dBm

ค่าการสูญเสียในการส่งแสงเข้าเส้นใยแก้วนำแสง 12.6 dB/15.6 dB

ค่าสูญเสียในข้อต่อ 2 dB

ความไวของอุปกรณ์รับสัญญาณ -22.2 dBm

ดังนั้นจะมีกำลังเหลือเพื่อสูญเสียในเส้นใยแก้ว

สำหรับใยแก้วชนิดสเตปอินเด็กส์ได้  $22.2 - 12.6 - 2 = 7.6 \text{ dB}$

หรือสำหรับใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กส์ได้  $22.2 - 15.6 - 2 = 4.6 \text{ dB}$

ดังนั้นระยะทางของใยแก้วชนิดสเตปอินเด็กส์คือ  $= 7.6/5 = 1.52 \text{ km}$

หรือระยะทางของเส้นใยแก้วชนิดเกรดอินเด็กส์  $= 4.6/5 = 0.92 \text{ km}$

ในการออกแบบระบบนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงกำลังงบประมาณแล้ว ยังคงต้องคำนึงถึงงบประมาณแบนด์วิดท์ด้วย เพราะข้อจำกัดของแบนด์วิดท์ในส่วนของสัญญาณทางไฟฟ้าอาจไม่สอดคล้องกับสัญญาณทางแสงก็ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดของแหล่งกำเนิดแสง ใยแก้วนำแสง และอุปกรณ์รับสัญญาณแสงดังตัวอย่าง

พิจารณางบประมาณแบนด์วิดท์

งบประมาณแบนด์วิดท์ระบบคือ  $t_s = (0.35/f_{3-dB}) = (0.35/6 \text{ MHz}) = 58.3 \text{ ns}$

โรซีท์หม้ของแหล่งกำเนิดแสงคือ  $2.19 R_L C_D = 55.8 \text{ ns}$



จะได้

$$= [(58.3)^2 - (12)^2 - (55.8)^2]^{1/2} = 11.9 \text{ ns}$$

$$t_F^2 = t_{\text{mod}}^2 + t_{\text{dis}}^2$$

$$t_{\text{mod}} = 0.35 / (0.71 \times \text{แบนด์วิธที่แสง})$$

$$t_{\text{dis}} = - (M+M')\Delta\lambda$$

ไรซ์ไทม์ของเส้นใยแก้วคือ

$$\sqrt{t_S^2 - t_{LS}^2 - t_{PO}^2}$$

ดังนั้นที่ความยาวคลื่น 850 nm ค่า M จะมีค่าน้อยกว่า M' ดังนั้นค่า M ตัดทิ้งไปได้ที่ความยาวคลื่นนี้นั้นคือ

$$T_{\text{dis}} = -90 \times 35 = -3.2 \text{ ns/km หรือ } 3.2 \text{ ns/km}$$

ในกรณีของเส้นใยแก้วนำแสง ชนิดสเตปอินเด็กซ์ได้

$$t_{\text{mod}} = \frac{0.35}{0.74 \times 33 \text{ MHz}} = 14.9 \text{ ns/km}$$

$$t_{F/\text{km}} = \sqrt{(14.9)^2 + (3.2)^2}$$

$$= 15.23 \text{ ns/km}$$

โดยเส้นใยแก้วจะยาวไม่เกิน  $11.9/3.34 = 3.56 \text{ km}$

พิจารณาตัวอย่าง ในกรณีที่ต้องใช้ข้อมูลที่ต้องใช้ส่งในระบบเป็นสัญญาณดิจิทัล ชนิด NRZ มีความเร็ว 400 Mbps ถ้าใช้เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดียวที่มีความยาวคลื่น 1550 nm ใช้ไดโอดเลเซอร์ที่มีไรซ์ไทม์ 1 ns และความกว้างของสเปกตรัมเท่ากับ 0.15 nm ถ้าต้องการให้ออกแบบงบประมาณแบนด์วิธเพื่อไว้ ๑๐ % จงคำนวณว่าไรซ์ไทม์ของตัวรับควรมีค่าเท่าไร

$$f_{3\text{-dB}} \text{ ของสัญญาณ NRZ} = \frac{R_{\text{NRZ}}}{2}$$

$$= \frac{400 \text{ Mbps}}{2} = 200 \text{ MHz}$$

เนื่องจากต้องการเพี้ยนบนตัวทวิ 10%

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ } f_{3\text{-dB}} &= 1.10 \times 200 \text{ MHz} \\ &= 220 \text{ MHz} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้นไรซไทม์ของระบบคือ } \frac{0.35}{220 \text{ MHz}} = 1.59 \text{ ns}$$

$$\text{ไรซไทม์ของแหล่งกำเนิดแสงคือ } t_{LS} = 1 \text{ ns}$$

$$\text{ไรซไทม์ของเส้นใยแก้วคือ } t_r = \sqrt{t_{\text{mod}}^2 + t_{\text{dis}}^2}$$

นั่นคือ  $t_{\text{mod}}$  ของเส้นใยแก้วชนิดโหนดเคียวมีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งไปได้

$$\text{และ } t_{\text{dis}} = -(M+M')\Delta\lambda$$

ที่ความยาวคลื่น 1,550 nm ได้  $M = -20 \text{ ps/nm} \times \text{km}$  และ  $M' = 4.5 \text{ ps/nm} \times \text{km}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } t_{\text{dis}} &= -(-20 + 4.5) 0.15 \times 100 \text{ km} \\ &= 0.23 \text{ ns} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } t_F &= 0.23 \text{ ns} \\ &= \sqrt{t_S^2 - t_F^2 - t_{LS}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } t_{PD} &= (1.59)^2 - (0.23)^2 - (1)^2 \\ &= 1.21 \text{ ns} \end{aligned}$$

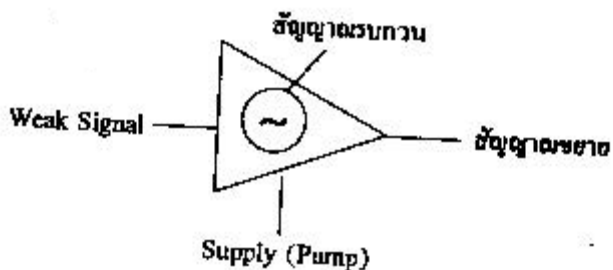
ในเรื่องของงบประมาณกำลังนั้นจะกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในบทที่ ๕ ซึ่งเป็นการออกแบบระบบสื่อสารใยแก้ว และการตรวจสอบใช้งาน

### (๕) การขยายสัญญาณแสง

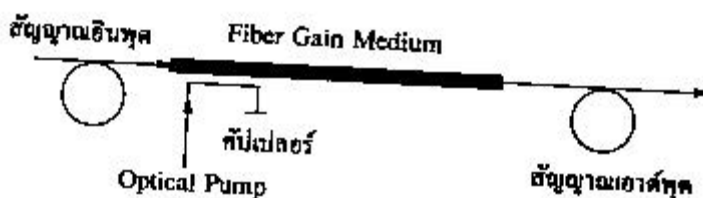
เนื่องจากงานทางด้าน การสื่อสารผ่านระยะทางไกลๆ เช่นการส่งสัญญาณจากสถานีส่งไปยังอีกสถานีรับหนึ่งซึ่งจะมีขนาดลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ขนาดของสัญญาณมีค่าสูงพอที่จะให้การแปลงข้อมูลที่เครื่องรับมีได้ จึงต้องมีอุปกรณ์สำหรับขยายสัญญาณติดตั้งที่สถานีส่งและสถานีรับตามจำนวนที่จำเป็น แต่เดิมการขยายขนาดของสัญญาณจะดำเนินการโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนของการแปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปขยาย และจากนั้นต้องมีการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณแสงดั้งเดิมเพื่อส่งผ่านกลับเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงต่อไปยังจุดหมายปลายทาง

โดยทั่วไปแล้ววงจรสำหรับขยายวงจรในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกออกแบบมาให้ทำงานได้กับจำนวนความจุของข้อมูลคงที่ค่าหนึ่ง (จำนวนบิตของข้อมูลที่ส่งมีค่าคงที่ค่าหนึ่งใน ๑ วินาที) เนื่องจากความจำกัดในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งข้อจำกัดเช่นนี้ไม่เหมาะสมกับสภาวะการณ์ของการเจริญทางด้าน การสื่อสารข้อมูลที่ต้องการส่งมีเพิ่มมากขึ้นอย่างในปัจจุบัน

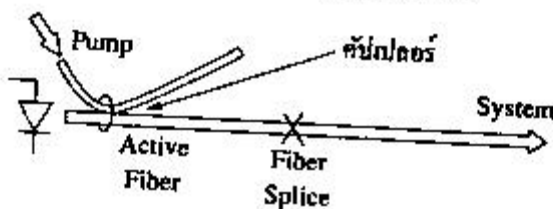
ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาระบบการขยายสัญญาณในเชิงแสงขึ้นมาแทน เพราะระบบนี้ไม่มีข้อจำกัดในแง่ของความจุข้อมูลมาเกี่ยวข้องเหมือนเช่นระบบอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว ระบบทางแสงนี้รู้จักกันในนามของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Fiber Amplifier) โครงประกอบ



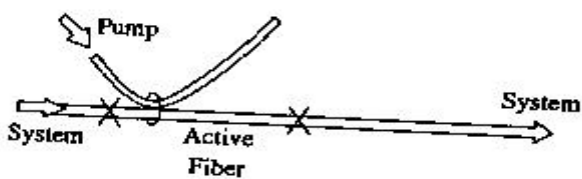
รูปที่ 4.26 แสดงการขยายสัญญาณด้วยอิเล็กทรอนิกส์



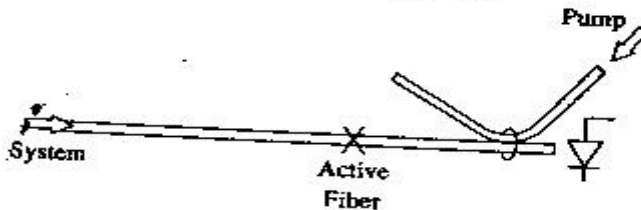
รูปที่ 4.27 แสดงการขยายสัญญาณทางแสง



(ก) การขยายสัญญาณที่อุปกรณ์ส่ง



(ข) อุปกรณ์ทวนสัญญาณแสง



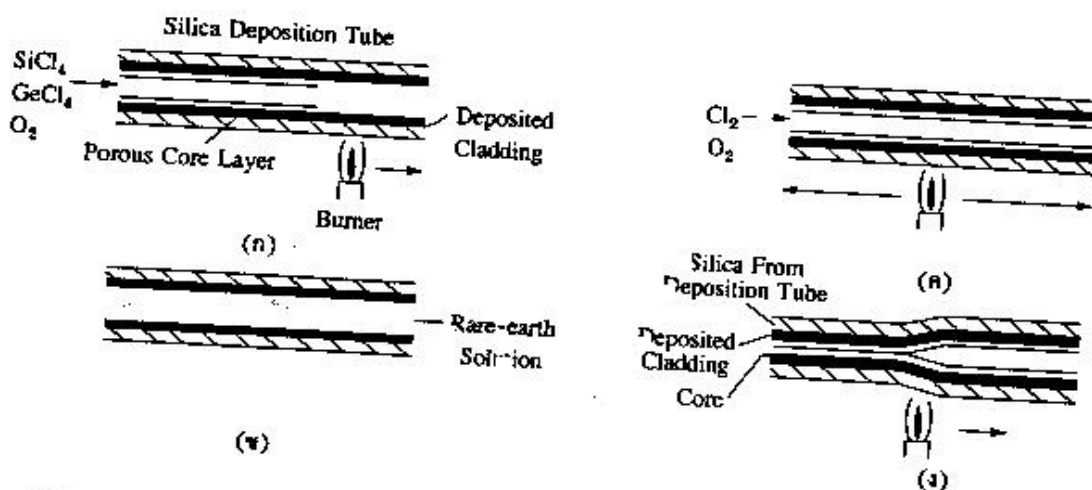
(ค) การขยายสัญญาณที่อุปกรณ์รับ

ภาพที่ ๔-๖๑ แสดงลักษณะต่างๆของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง

ในการที่จะทำการวางสายเคเบิลใยแก้วใต้ทะเลนั้นปัญหาที่ประสบอยู่คือ ขีดความสามารถของตัวทวนสัญญาณ ซึ่งอาจจะต้องวางลึกลงไปใต้ทะเลถึง ๕๐๐๐ เมตร ซึ่งก็หมายความว่าถ้าเกิดการชำรุดขึ้นนั้นจะนำมาซึ่งความสูญเสียอย่างมากทีเดียว ในปัจจุบันใช้ตัวทวนสัญญาณที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีปัญหาในการเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงเพราะมีการสูญเสียกำลังสัญญาณที่จุดต่อสูง การทวนสัญญาณด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ปรับค่าเวลาของสัญญาณ (Retiming) เพื่อให้สัญญาณมีความถูกต้องสมบูรณ์ซึ่งมีผลทำให้ตัวทวนสัญญาณแบบนี้ไม่มีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลทำให้ระบบการสื่อสารเสื่อมประสิทธิภาพตามขีดความสามารถของตัวทวนสัญญาณ ทำให้ใช้งานไม่ได้ไม่เต็มความสามารถที่เส้นใยแก้วนำแสงจะทำได้

ดังนั้นเพื่อให้การพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยคลื่นแสงให้ได้ประโยชน์เต็มที่จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่จะมาเป็นตัวทวนสัญญาณให้มีคุณสมบัติที่เป็นอุปกรณ์ทางแสงโดยตรง ซึ่งในที่นี้เราจะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า ตัวขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifiers)

ใยแก้วเออร์เบียมโดป (Erbium Doped Amplifiers) ทำให้การเติมธาตุในกลุ่มแรร์เอิร์ท (Rare Earths) คือนีโอโดเมียม (Neodymium) หรือ เออร์เบียม (Erbium) ที่อยู่ในรูปของออกไซด์เข้าไปในระหว่างขั้นตอนในการประดิษฐ์เส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่รู้จักกันดีในชื่อเลเซอร์ใยแก้ว (Fiber Laser) ซึ่งทำให้ปัญหาที่เคยมีกับตัวขยายสัญญาณแบบสารกึ่งตัวนำหมดไป การเติมสารเจือให้กับเส้นใยแก้วนำแสงนั้นท่อนำคลื่นที่ได้จะมีความสมมาตร และสามารถนำมาเชื่อมต่อเข้ากับเส้นใยแก้วนำแสงได้ดีโดยให้การลดทอนสัญญาณที่จุดต่อที่ต่ำ

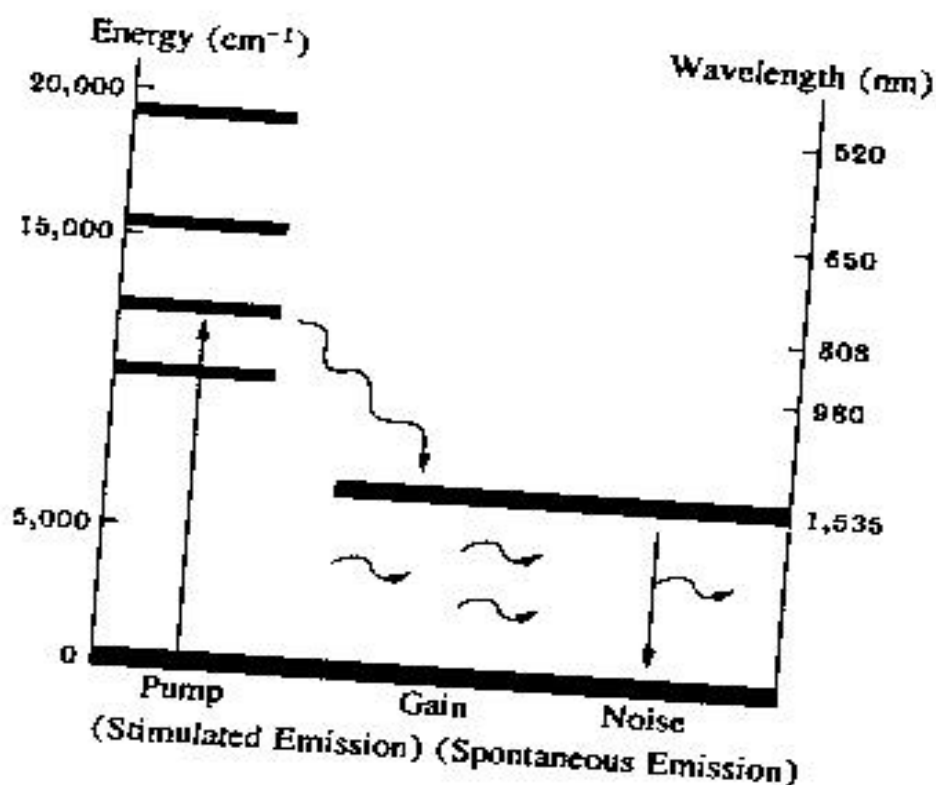


ภาพที่ ๔-๖๒ แสดงการสร้างใยแก้วนำแสงชนิดเออร์เบียมโดปหรือเจือสารเออร์เบียม ซึ่งมีขั้นตอนจาก (ก) - (ง)

ในแก้วซิลิกาตามรูป แสดงเส้นใยแก้วของเออร์เบียมโดป การดูดกลืนแสงโดยอออนในสถานะพื้นฐานจะทำให้อออนขึ้นไปอยู่ในชั้นที่สูงกว่าระดับเลเซอร์ทันที ในสถานะเลเซอร์จะมีช่วงชีวิตที่ยาว

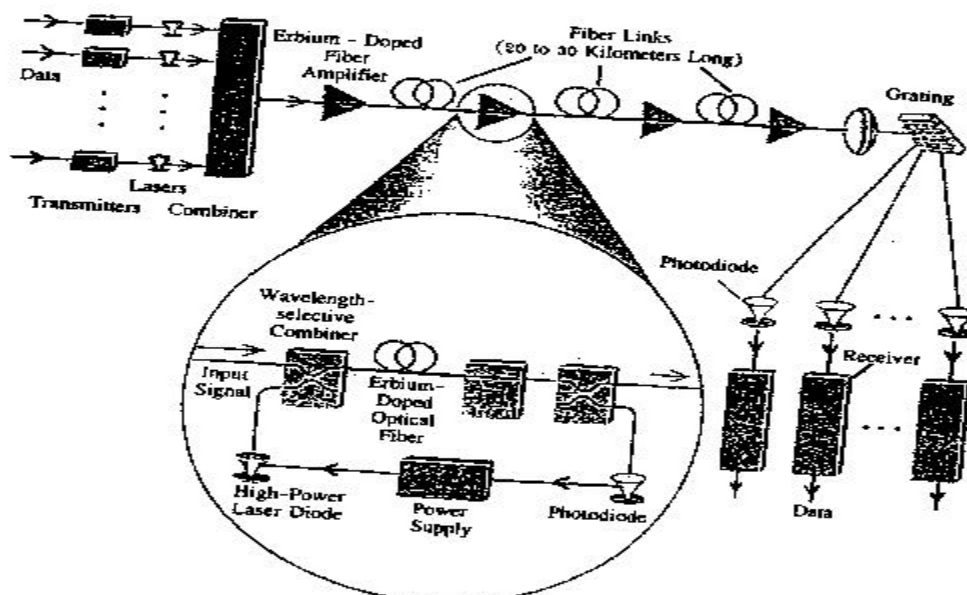
และกระทำตัวเหมือนชั้นที่สะสมอออน โฟตอนที่มีความยาวคลื่นที่ ๑.๕๓๕ ไมโครเมตร จะถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนที่เหมือนกันและออกมาเป็นเลเซอร์หรือมีการขยายสัญญาณ

จากการสังเกตไดอะแกรมของระดับพลังงานของแถบสเปกตรัมที่จะนำมาใช้งานที่ดีที่สุด จะมีอยู่ ๒ ช่วงคือ ที่ ๙๘๐ ไมโครเมตร และที่ ๑.๔๖ - ๑.๔๙ ไมโครเมตร ซึ่งที่ ๙๘๐ ไมโครเมตร จะมีเกณฑ์ที่ 3.9 dBmW<sup>-1</sup> ใช้เลเซอร์ไดโอดที่เป็น GaAlAs หรือตัวกระตุ้น ส่วนที่ ๑.๔๖ - ๑.๔๙ ไมโครเมตร จะมีเกณฑ์ 2.2 dBmW<sup>-1</sup> ใช้เลเซอร์ไดโอดชนิด GaAsP เป็นตัวกระตุ้น



ภาพที่ ๔-๖๓ ลักษณะของระดับพลังงานของเออร์เปียม

อัตราขยายสูงสุดที่ทำได้ของตัวขยายสัญญาณแบบนี้ตามที่มีการรายงานไว้ทำได้ถึง 46.5 dB โดยที่การกระตุ้นที่พลังงาน 133 mW ที่ 1.48 ไมโครเมตร และอัตราขยายที่ 25-40 dB สำหรับพลังงานที่ 40-100 mW ที่ ๑.๔๘ ไมโครเมตร และ 6-20 mW ที่ ๙๘๐ ไมโครเมตร การที่ตัวขยายสัญญาณแบบนี้มีค่าการสูญเสียเนื่องจากรอยต่อ ที่ต่ำทำให้อัตราขยายที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง เมื่อนำไปใช้งานแต่ค่าแบนด์วิดท์ทางแสงมีค่าที่จำกัดมากกว่าตัวขยายของสัญญาณแบบสารกึ่งตัวนำ (๓-๑๐ นาโนเมตร ) แต่ปัญหาใหญ่เกิดจากการที่มีค่าแบนด์วิดท์ทางแสงที่แคบ ทำให้มีค่าอ้อมตัวของเอาต์พุตต่ำ ที่ต่ำ -5 ถึง +3 dB



ภาพที่ ๔-๖๔ การใช้งานใยแก้วนำแสงขยายสัญญาณ

ใยแก้วเออร์เบียมโดป มีข้อดีเหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานเนื่องจากให้อัตราขยายสูง มีสัญญาณรบกวนต่ำ และไม่มีผลรบกวนเรื่องโพลาไรซ์ แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของช่องความกว้างของช่องการสื่อสาร (Optical Bandwidth) ที่แคบและมีค่าเอาต์พุตที่อิมพัลส์ต่ำ ภาพที่ ๔-๖๔ เป็นผังแสดงการใช้อุปกรณ์ใยแก้วขยายสัญญาณ ส่วนในระบบสื่อสารใยแก้วเพื่อลดการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และข้อจำกัดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงนั่นเอง

## (๖) ขยายสัญญาณแสงในเส้นใยแก้ว (Optical Fiber Amplifier)

เมื่อเอ่ยถึงคำว่าแอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) ในระบบสื่อสารด้วยแสงที่ใช้เส้นใยแก้ว (Optical Fiber) เป็นสายส่งสัญญาณ ข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากสถานีต้นทางไปยังผู้รับหรือสถานีปลายทาง จะมีความแตกต่าง จากข้อมูลเริ่มต้นอยู่ ๒ ประการหลัก คือ

๑. **ขนาดของข้อมูลจะเล็กลง** นั่นคือ ค่าความเข้มแสง (Optical Intensity) หรือกำลังความสว่างของแสงที่ได้รับจะมีค่าน้อยกว่าค่าเริ่มต้นเช่น สมมติให้ข้อมูลที่ส่งออกมาจากกรุงเทพฯ มีค่าความเข้มแสง ๑๐๐ มิลลิวัตต์เมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วไปยังเพชรบุรีค่าความเข้มแสงที่รับได้อาจมีค่าลดลงเหลือเพียง ๑๐ มิลลิวัตต์เป็น ต้นทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) ของเส้นใยแก้วเอง เส้นใยแก้วที่มีค่าการลดทอนสูง (เช่น 1 dB/km) ย่อมทำให้ค่าความเข้มแสงลดลงได้มากกว่าเส้นใยแก้วที่มีค่าการลดทอนต่ำ (เช่น 0.3 dB/km) เมื่อเส้นใยแก้วมีขนาดความยาวเท่ากัน

๒. **ความกว้างของข้อมูลพัลส์ในระบบดิจิทัล จะมีขนาดกว้างขึ้นมากกว่าเดิม (Dispersion)** ในเส้นใยแก้ว เช่น ข้อมูลส่งที่มีความกว้างพัลส์เพียง ๑๐ นาโนวินาที อาจมีความกว้างพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น

๑๕ นาโนวินาทีเมื่อต้องเดินทางไปในเส้นใยแก้วเป็นระยะทางหนึ่งเป็นต้น โดยค่าความกว้างพัลส์ที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าแปรผันตรงกับความยาวของเส้นใยแก้ว กล่าวคือ ยิ่งเส้นใยแก้วมีความยาวมากขึ้นเท่าไร ก็ยิ่งทำให้พัลส์มีขนาดกว้างเพิ่มขึ้นเท่านั้น การที่สัญญาณพัลส์ของแสงที่ปลายทางที่ขนาดความกว้างมากๆจะส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรต (Bit Rate) มีขนาดลดลงไปด้วย เมื่อบิตเรตมีค่าน้อยก็ จะส่งข้อมูลได้น้อย

### (๗) สถานีทวนสัญญาณหรือรีพีตเตอร์ (Repeater)

หากเราต้องการออกแบบและติดตั้งระบบสื่อสาร ด้วยแสง ที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นสายส่งเชื่อมโยงระหว่างสถานีระยะห่างระหว่างผู้ส่งและผู้รับ (ถ้าจะให้ถูกต้อง ควรหมายถึงขนาดความยาวของเส้นใยแก้ว) ต้องอยู่ในระยะที่มีค่าเหมาะสมเพื่อที่ผู้รับยังสามารถรับรู้ ข้อมูลและมีความเข้าใจได้อย่างถูกต้องแม้ว่าข้อมูลที่ได้รับจะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากข้อมูลเดิม ทั้งขนาด ความกว้างพัลส์และค่าความเข้มแสงถ้าระยะทางไกลเกินไปสัญญาณจะมีความผิดเพี้ยนมากขึ้น จนกระทั่งผู้รับไม่เข้าใจข้อมูลเดิมเพราะไม่สามารถตีความให้ถูกต้องได้แต่ในความเป็นจริงระยะห่าง ระหว่างสถานีต้นทางและปลายทางมักมีค่าแน่นอน(เช่น ระยะห่างระหว่างเมืองสองเมือง) และอาจมีค่า มากกว่าระยะทางที่เหมาะสมในการใช้งานเส้นใยแก้วจึงต้องทำการแก้ปัญหาโดยการเพิ่มสถานีทวน สัญญาณหรือรีพีตเตอร์ (Repeater) เข้าไประหว่างสถานีเพื่อทำหน้าที่จัดรูปแบบ สัญญาณที่ผิดเพี้ยน ไป (แต่ยังคงเข้าใจได้) ให้กลับคืนสู่รูปแบบเดิมทั้งขนาดความกว้างพัลส์และค่าความเข้มแสงแล้วทำการ ส่งออกไปใหม่เสมือนกับการย่นระยะของสถานีส่งให้อยู่ใกล้เข้ามานั่นเองทำให้ผู้รับสามารถรับข้อมูลได้ ถูกต้องในช่วงระยะห่างระหว่างสถานีอาจมีสถานีทวนสัญญาณอยู่หลายสถานีโดยทั่วไปใน ระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงระยะห่างระหว่างสถานีทวนสัญญาณมี ค่าประมาณ ๑๐-๕๐ กิโลเมตร (ในระบบโทรศัพท์ด้วยสายส่งทองแดงระยะนี้มีค่าประมาณ ๒-๘กิโลเมตร เท่านั้น)

หลักการทำงานของสถานีทวนสัญญาณ ในระบบสื่อสารด้วยแสงที่ เป็นอยู่เดิม แสดงได้ด้วยบล็อก การทำงานสถานีทวนสัญญาณตามรูป ซึ่งจะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำการแปลงสัญญาณแสงกลับให้เป็น สัญญาณไฟฟ้าก่อนแล้วจึงทำการจัดรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าให้มีลักษณะเหมือนข้อมูลเดิม (Reform Signal) จากนั้นทำการเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้ากลับไปเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งออกไปสู่เส้นใยแก้ว อีกทีหนึ่ง ซึ่งการทำงานทั้งหมดในสถานีทวนสัญญาณจะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสิ้นหากเราลองคิด เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณแสงกับสัญญาณ ไฟฟ้าก็คงจะพอเดาได้ว่าแสงต้องมีความเร็วมากกว่า ไฟฟ้าอยู่แล้วดังนั้นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อยู่ในสถานีทวนสัญญาณแบบนี้จึงเป็นตัวที่ทำให้ประสิทธิภาพ ของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงลดลง อย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะจะทำให้ความเร็วในการส่ง ข้อมูลหรือบิตเรตมีค่าลดลงไปจากที่ควรจะเป็นเหมือนกับเราขับรถยนต์ด้วยความเร็วสูงแล้วมาติดไฟ แแดงที่สี่แยก ทำนองนั้นแหละ ปัญหาอีกประการหนึ่งก็คือ หากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ผิดพลาดทำให้ไม่ สามารถส่งข้อมูลต่อไปยังปลายทางได้ ผู้ใช้อาจเกิดความสับสนว่า ระบบส่ง ระบบรับ หรือ สถานีทวน สัญญาณกันแน่ที่เป็นปัญหาจึงต้องมีสวิตซ์ตัดเข้าสู่เส้นใยแก้วในลักษณะบายพาส (By Pass) ที่สถานี

ทวนสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเกิดมีปัญหาขึ้นซึ่งลักษณะเช่นนี้ผู้รับยังคงสามารถรับสัญญาณแสงได้แต่อาจไม่สามารถเข้าใจความหมายของข้อมูลได้เพราะสัญญาณจะผิดเพี้ยนไปมากแน่นอนแต่ผลลัพธ์เช่นนี้ก็ทำให้ผู้ใช้เข้าใจได้ทันทีว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นที่สถานีทวนสัญญาณอย่าง

## (๘) สถานีทวนสัญญาณแสง Fiber Amplifier

การที่จะทำให้บิตเรตหรือความเร็วในการส่งข้อมูลมีมากขึ้น ต้องทำให้ข้อมูลแสงเดินทางจากผู้ส่งไปถึงยังผู้รับได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการขัดจังหวะกล่าวคือข้อมูลแสงต้องไม่มีการถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าในระหว่างการเดินทาง ในขณะที่เดียวกันขนาดและรูปแบบของสัญญาณข้อมูลจะต้องถูกปรับปรุงลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมอยู่เสมอ ด้วยซึ่ง ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน สามารถกระทำได้โดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงด้วยแสงในเส้นใยแก้วหรือออปติคัลไฟเบอร์แอมพลิฟายเออร์ เป็นสถานีทวนสัญญาณ

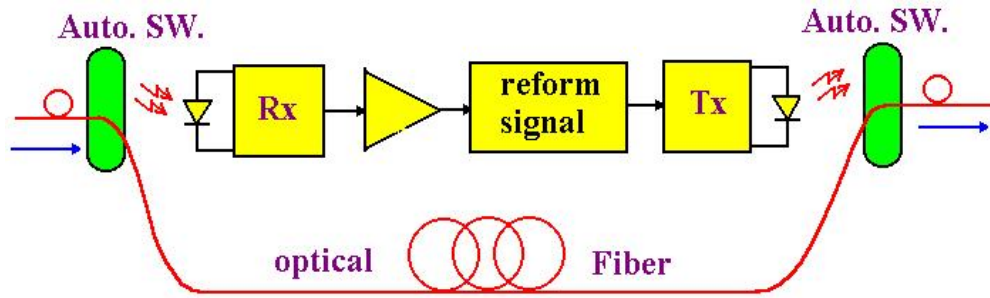
หลักการการทำงานของ Fiber Amplifier อาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่ใช้การกระตุ้นพลังงานจากภายนอกเข้าไปในสาระ แล้วทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของมันเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากธรรมชาติของอิเล็กตรอน มันจะไม่สามารถดำรงอยู่ในสภาวะอื่นที่ไม่ใช่สภาวะเดิมของมันได้มันจึง ต้องหาทางกลับบ้านของมันและจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกที่ป้อนให้ก่อนหน้านั้นมันจึงต้องคายพลังงานส่วนเกินนั้นออกมาในรูปของพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสาระเพื่อให้อิเล็กตรอนกลับสู่สภาวะเดิมได้ หากเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมพลังงานส่วนเกินที่อิเล็กตรอนคายออกก็จะกลายเป็นพลังงานของแสงตามที่เราต้องการ วัสดุที่สามารถเปล่ง แสงสีเดียวกับแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วในกระบวนการของ Fiber Amplifier มีหลายชนิดเช่นสารเออร์เบียม (Erbium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น ๑.๕๕ ไมครอน และสารนีโอดีเมียม (Neodymium) จะให้แสงออกมาใน ช่วงความยาวคลื่น ๑.๓๓ ไมครอน เป็นต้น

ในทางปฏิบัติเส้นใยแก้วชนิดพิเศษจะถูกสร้างขึ้นให้มีส่วนประกอบของสารเหล่านี้อยู่ในส่วนของคอร์ของเส้นใยแก้วเช่น หากเลือกใช้สารเออร์เบียมผสมกับเนื้อแก้วของเส้นใยแก้วจะเรียกว่า Erbium - Doped Fiber หรือ EDF ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยแก้วธรรมดาทั่วไป และเมื่อนำมา EDF มาใช้ในการขยายสัญญาณแสงจะเรียกว่า Erbium-Doped Fiber Amplifier หรือ EDFA แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแก้ว EDF จะมีพฤติกรรมเหมือนเดินทางในเส้นใยแก้วทั่วไปคือเกิดการลดทอนสัญญาณและเกิด Dispersion ตามปกติ โดยจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับสัญญาณข้อมูล แต่ถ้าทำการกระตุ้นเส้นใยแก้ว พิเศษนี้ด้วยการป้อนพลังงานแสงที่เหมาะสมให้กับ EDF ข้อมูลแสงที่เดินทางผ่านเข้าไปจะถูกทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมกันทางความเข้มแสงของสัญญาณเดิมที่นำข้อมูล กับสัญญาณแสงที่เปล่ง ออกมาใหม่จากการกระตุ้นพลังงานเข้าไป ซึ่งแสงทั้ง



สองต้องมีความยาวคลื่นที่ตรงกัน จึงเสมือนกับการขยายสัญญาณข้อมูลแสงที่เดินทางในระบบ สายส่งให้มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งจะเดินทางไปในระยะทางที่ไกลออกไปได้

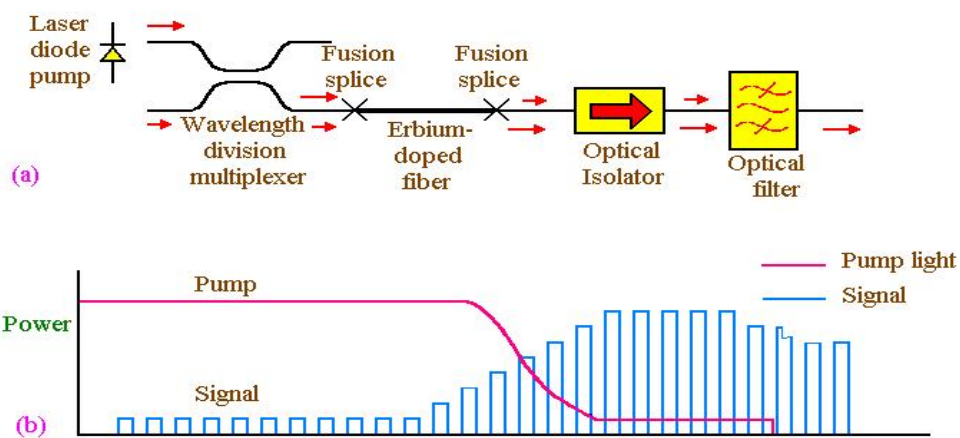
โครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDF ต่อแทรกเข้าไปในระบบสายส่งข้อมูลแสงในระบบ สื่อสารที่มีความยาวคลื่น ๑.๕๕ ไมครอน จะเดินทางผ่านคัปเปิลเลอร์เส้นใยแก้ว (Fiber Coupler) ออกไป ในขณะที่สัญญาณอินพุตอีกทางหนึ่งของคัปเปิลเลอร์เส้นใยแก้ว จะถูกป้อนด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาว คลื่นประมาณ ๙๘๐ นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้น EDF แสงทั้งสองที่เดินทางรวมกัน ออกจากคัปเปิลเลอร์ในช่วงของเส้นใยแก้วธรรมดาจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นข้อมูลแสงเดิมก็ยังคงมีความเข้มแสง ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในส่วนของ EDF แสงที่มีความยาวคลื่น ๙๘๐ นาโนเมตร จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่าเป็นการปั๊ม (Pump) และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงาน ออกมาเพื่อแต่จะขึ้นอยู่กับขนาดความยาวที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้นอุปกรณ์ Optical Isolator ที่เห็น ในรูปทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของแสงให้เดินทางไปในทิศทางที่ต้องการ จะมีหรือไม่มีก็ได้แล้วแต่สภาพ โดยรวมของระบบและการใช้งานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงด้วยแสงหรือ EDFA ช่วยให้ความเร็วใน การส่งข้อมูลทางแสงเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะจะช่วยลดปัญหาความเข้มแสงของสัญญาณ ที่ถูกลดทอนจากเส้นใยแก้วได้เป็นอย่างดี แต่อุปกรณ์นี้ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาการเกิดดิสเพอร์ชัน ที่ ทำให้เกิดการบานออกของสัญญาณพัลส์ได้ ซึ่งในกรณีหลังนี้ การแก้ไขปัญหานั้นทำได้โดยการเลือกสีของ แสงเฉพาะที่มีความยาวคลื่นแสง ๑.๓ และ ๑.๕๕ ไมครอน เป็นตัวนำข้อมูลโดยปกติแสงที่มีความยาว คลื่น ๑.๓ ไมครอนเป็นช่วงที่ทำให้เส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันต่ำทำให้การ บานออกของสัญญาณพัลส์น้อยมากแม้ว่าจะส่งข้อมูลไปในระยะทางไกลก็ตาม สำหรับแสงที่มีความยาว คลื่น ๑.๕๕ ไมครอนจะทำให้เส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณน้อยลงไปอีก (เมื่อเทียบกับเส้นใยแก้ว เส้นเดียวกัน) แต่ค่าดิสเพอร์ชันจะสูง จึงต้องใช้เส้นใยแก้วชนิด DSF (Dispersion-Shifted Fiber) ซึ่ง ถูกออกแบบให้ค่ามีค่าดิสเพอร์ชันต่ำมากที่ความยาวคลื่น ๑.๕๕ ไมครอน ในระบบ สื่อสารปัจจุบันและ อนาคต จะเลือกใช้ขนาดความยาวคลื่น ๑.๕๕ ไมครอน แทน ๑.๓ ไมครอน ส่วนใหญ่ การเปลี่ยนแปลง ระบบไปจากเดิมทันทีทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายมากเพราะระบบรับส่งแสงที่ความยาวรักษาสภาพ ของตัวมันจะได้แสงที่มีความยาวคลื่น ๑.๕๕ ไมครอน เมื่อรวมกับข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากันก็ จะทำให้สัญญาณพัลส์แสงมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นตามความยาวของ EDF และสามารถเดินทางเข้า ไปในเส้นใยแก้วธรรมดาที่เป็นสายส่งได้ต่อไป ในขณะที่เดียวกันพลังงานของแสงที่นำมาปั๊ม (ที่ ๙๘๐ นาโนเมตร) ก็จะมีค่าลดลงและจางหายไปมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดความยาวของ EDF ที่มีค่า มากๆ มิได้หมายความว่าทำให้ความสามารถในการขยายสัญญาณแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอด้วย ๑.๓๓ ไมครอน จะหมดความสำคัญและกลายเป็นขยะไปในทันทีจึงมีการออกแบบเส้น ใยแก้วที่เรียกว่า Dispersion-Flattened Fiber ซึ่งเป็นเส้นใยแก้วที่มีค่าดิสเพอร์ชันต่ำทั้งใน ช่วงของความยาวคลื่น แสงที่ ๑.๓๓ และ ๑.๕๕ ไมครอน ทำให้ระบบเดิมยังคงสามารถใช้งานได้



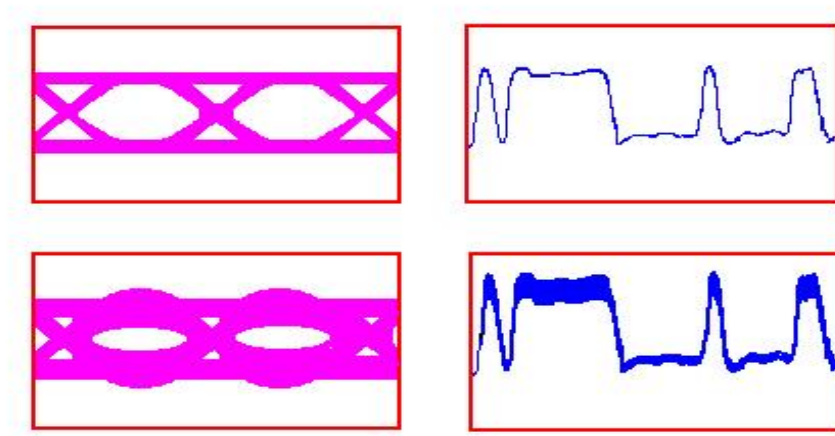
ภาพที่ ๔-๖๕ รูปที่แสดงโครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDF

(๙) ระบบสื่อสารที่ใช้ EDF

ระบบสื่อสารแบบดิจิทัลด้วยเส้นใยแก้ว ที่ทดลองโดย AT&T ร่วมกับ KDD เมื่อหลายปีมาแล้ว โดยทำการทดลองส่งข้อมูลขนาด 5 Gb/s (ระบบที่ดีที่สุดในบ้านเรามีบิตเรตประมาณ 565 Mb/s เท่านั้น) ด้วยการเข้ารหัสแบบ NRZ (Nonreturn to Zero) เป็นระยะทาง ๙๐๐๐ กิโลเมตร !! โดยใช้สถานีทวนสัญญาณแสงที่เป็น EDFA ถึง ๒๗๔ ตำแหน่ง (ระยะห่างระหว่างสถานีทวนสัญญาณหรือ Repeater Spacing ประมาณ ๓๒ กิโลเมตร) เมื่อทำการวัดสัญญาณข้อมูลที่ปลายทางเทียบกับข้อมูลเดิมที่ส่งจากต้นทางดังแสดงในรูปด้านล่าง จะเห็นว่า ข้อมูลที่ได้รับก็ยังถือว่ามีลักษณะที่ดีไม่ว่าจะเป็นรูปสัญญาณหรือการแสดงด้วย Eye Diagram ปัจจุบัน Optical Fiber Amplifier โดยเฉพาะที่เป็น EDFA เริ่มถูกนำมาใช้ในระบบปัจจุบันมากขึ้น ข้อดีของ EDFA นอกเหนือจากการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงแล้วยังลดความซับซ้อนทางด้านเทคนิค เพราะโครงสร้างของ EDFA ไม่มีความยุ่งยากสามารถออกแบบให้เป็นแพ็คเกจเดียวที่มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับระบบอิเล็กทรอนิกส์เดิมที่ประกอบด้วยแผงวงจรขนาดใหญ่กว่าซึ่งในอนาคตสถานีทวนสัญญาณ ระบบสื่อสาร ด้วยเส้นใยแก้วจะเป็นการทำงานเชิงแสงทั้งหมด



ภาพที่ ๔-๖๖ รูปแสดงระบบสื่อสารดิจิทัลด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้EDFA ระยะทาง ๙๐๐๐ กิโลเมตร



ภาพที่ ๔-๖๗ รูปแสดงรูปสัญญาณดิจิทัลขนาด 5 Gb/s และ Eye Diagrams

#### หมายเหตุ

ดิสเพอร์ชัน (Dispersion) เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้พัลส์แสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วเกิดการบานออก คือมีขนาดความกว้างพัลส์เพิ่มมากขึ้น ตามระยะทางที่แสงเดินทางในเส้นใยแก้ว

คัปเปิลอร์เส้นใยแก้ว (Fiber Coupler) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้ว เส้นหนึ่งออกไปเป็นหลายทางในเส้นใยแก้วเส้นอื่นหรือทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้ว หลายเส้น ให้เดินทางรวมกันไปในเส้นใยแก้วที่กำหนดด้านขาออก

#### ระบบ DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) เป็นเทคนิคการส่งข้อมูลบนเส้นไฟเบอร์อปติกโดยใช้วิธีส่งข้อมูลไปบนหลาย ๆ ช่วงความยาวคลื่นของเส้นไฟเบอร์ ออปติก ๑ เส้น DWDM จึงเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการส่งข้อมูลให้แก่เครือข่ายไฟเบอร์อปติก DWDM พัฒนามาจากเทคโนโลยี WDM (Wavelength Division Multiplexing) (ซึ่งเดิมสามารถรองรับการส่งข้อมูลที่อัตรา 2.5 Gbps ถึง 10 Gbps ที่ 32 ถึง ๖๔ ช่องสัญญาณ) โดยการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณเป็น ๑๖๐ ช่องสัญญาณโดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณถี่ขึ้นคืออยู่ที่ 50 GHz และรองรับอัตราการส่งข้อมูลที่ 1 Terabit/s

การเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูลผ่านระบบสายส่งสัญญาณไปเป็นระยะทางไกลจำเป็นต้องใช้สายส่งที่เป็นเส้นใยแก้วนำแสงโดยเทคนิคที่สำคัญในการเพิ่มความเร็วมีวิธีการหลักอยู่สองวิธี คือ

#### (๑๐) เพิ่มอัตราเร็วจากระบบเดิมที่ใช้อยู่

ระบบ SDH/SONET เป็นระบบสื่อสารเชิงแสงที่มีความเร็วสูงการเพิ่มความเร็วของข้อมูลจากระดับต่ำ (เช่น จาก STM-16 ที่มีความเร็ว ๒.๕ กิกะบิตต่อ

วินาที) ไปเป็นระดับที่สูงขึ้น (เช่น STM-64 มีความเร็ว ๑๐ กิกะบิตต่อวินาที) จะทำให้ระบบมีความเร็วเพิ่มมากขึ้นซึ่งระบบ SDH/SON เดิมยังคงสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นได้ประมาณ ๑๐ หรือมากกว่า ๑๐๐ กิกะบิตต่อวินาที อย่างไรก็ตาม การพัฒนาไปสู่ความเร็วที่ยิ่งสูงขึ้นอาจทำได้ยากขึ้น เนื่องจากถูกจำกัดด้วยเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ โดยเฉพาะความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จึงทำให้ระบบมีราคาแพงขึ้นมากหลายเท่า

## (๑๑) เพิ่มจำนวนความยาวคลื่นแสงในเส้นใยแก้ว

### นำแสงเส้นเดิม

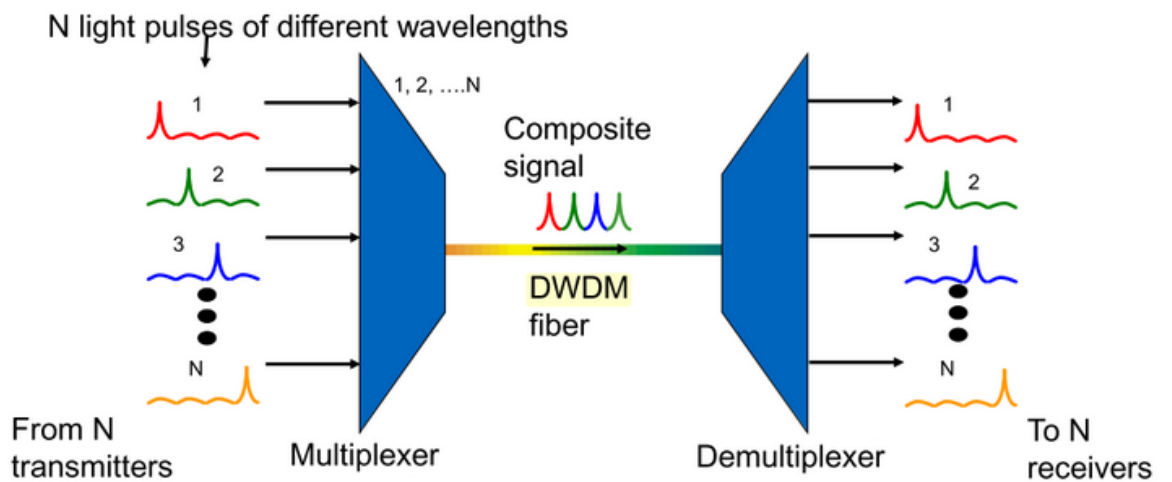
เทคนิคนี้สามารถกระทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยี ที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเส้นใยแก้วนำแสงเดิมในระบบยังพอสามารถรองรับขีดการทำงานนี้ได้ซึ่งจากแนวคิดนี้ เป็นจุดเริ่มต้นของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM.ซึ่งพัฒนามาเป็น DWDM

## (๑๒) โครงสร้างพื้นฐานการเชื่อมโยงของระบบ

### DWDM

โครงสร้างพื้นฐานในส่วนของ การเชื่อมโยงระหว่าง สถานีส่ง (Tx) และสถานีรับ (Rx) เมื่อนำระบบ DWDM มาใช้แสดงดังรูปที่ ๑ ซึ่งเป็นระบบ สื่อสารแบบทางเดียว (simplex) เริ่มจากสถานีส่งแต่ละช่อง (เช่น Tx๑, Tx๒, ..., Txn) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณข้อมูลจากไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสง โดยที่แต่ละช่องสัญญาณจะส่งแสง ออกมา ๑ ความยาวคลื่น ที่แตกต่างจากช่องสัญญาณอื่น ข้อมูลแสงทุกช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการทางแสงด้วยอุปกรณ์รวมแสงหรือ DMDM เพื่อส่งไปยังปลายทางด้วยเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว ข้อมูลที่เดินทางในระหว่างเส้นทางจะถูกลดทอนสัญญาณทำให้แสงมีค่าความเข้มแสงอ่อนลง จึงต้องมีสถานีทวนสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกัน ให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกล ๆ ได้ หากระยะทางระหว่างสถานีไกลมากอาจต้องมีสถานีทวนสัญญาณแสงมากกว่าหนึ่งสถานี โดยปกติระยะห่างระหว่างสถานีทวนสัญญาณ (Repeater Spacing) ในระบบเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าประมาณ ๓๐-๘๐ กิโลเมตร (บางระบบอาจถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่า ๑๐๐ กิโลเมตร) ในระบบสื่อสารที่มีความยาว คลื่นอยู่ในช่วง ๑๕๕๐ นาโนเมตร สถานีทวนสัญญาณแสงที่นิยมใช้ ได้แก่ EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) ในระบบสื่อสารสัญญาณข้อมูลโดยส่วนใหญ่เป็นแบบดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูลซึ่งสัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ทำให้ความกว้างของสัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ตามระยะทางที่เดินทางผลลัพธ์ก็คือ ดิสเพอร์ชัน เป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้น ระบบ DWDM จึงมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยปรากฏการณ์ ของการบานออกของสัญญาณพัลส์ เรียกว่า Dispersion Compensator เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ

เนื่องจากระบบ DWDM มีความยาวคลื่นแสงหลายค่า ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดย่อมมีผลกระทบต่อทุกช่องสัญญาณด้วย ยิ่งระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมาก ก็ต้องยิ่งให้ความดูแลและเอาใจใส่กับผลกระทบของดิสเพอร์ชัน มากขึ้นด้วย เมื่อสัญญาณแสงเดินทางมายังสถานีรับปลายทาง จะถูกแยกช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่น ต่างกันออกจากกันด้วยอุปกรณ์แยกแสง หรือ Optical Demultiplex (DeMux) เพื่อจัดให้แสงแต่ละความยาวคลื่นแยกเดินทางไปยังสถานีรับตามช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับสถานีรับต่อไป (เช่น Rx๑, Rx๒, ..., Rx<sub>n</sub>)



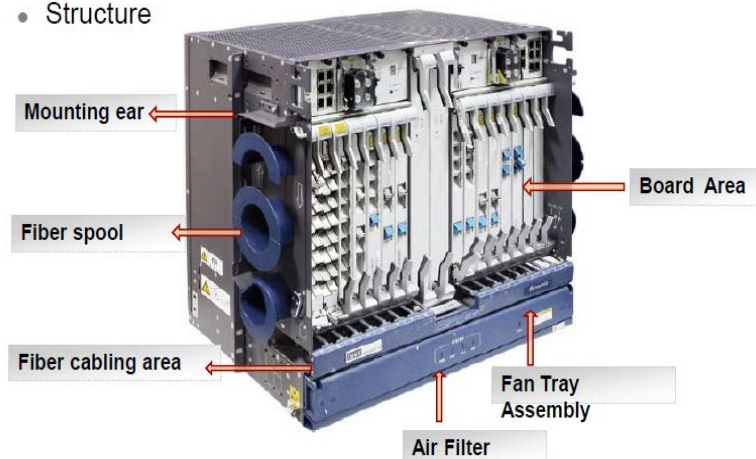
ภาพที่ ๔-๖๘ โครงสร้างพื้นฐานการเชื่อมโยงของระบบ DWDM

(๑๓) ระบบ DWDM กองทัพอากาศ

ระบบ DWDM ที่ใช้งานในกองทัพอากาศของ บริษัท HUAWEI MODEL OSN 8800 – T16 ดังรูป

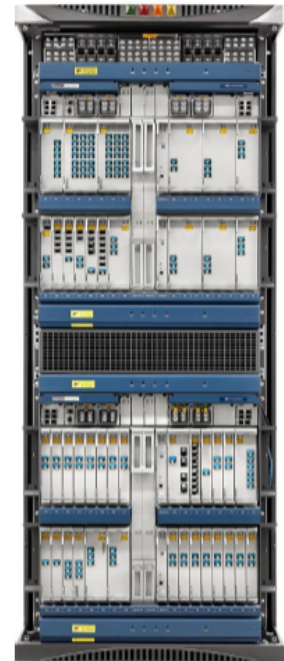
Subrack (T16)

- Structure



ภาพที่ ๔-๖๙ HUAWEI OSN 8800 T 16

- OptiX OSN 8800 can be installed in:
  - N63B cabinet(OSN 8800 T32 & T16)
  - N66B cabinet(OSN 8800 T64 & T32 & T16)
- Technical Specifications
  - Nominal working voltage:  $-48V/-60V$  DC
  - Working Voltage Range:  $-40V \sim -72V$  DC



ภาพที่ ๔-๗๐ HUAWEI OSN 8800 CABINET

โดยแต่ละการ์ดที่กองทัพอากาศใช้งานมีหลักการทำงานดังนี้

#### OTN Tributary Board

- TOA ทำหน้าที่ เป็น Board Interface ระหว่างอุปกรณ์ Huawei DWDM ไปยังอุปกรณ์ปลายทางของลูกค้า (Client) เช่น Router, Switch หรือ อื่นๆ

#### OTN Line Board

- NQ2 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณความถี่ที่รับมาจากอุปกรณ์ปลายทางของลูกค้า (Client) หลังจากนั้นจะแปลงความถี่ให้อยู่ในย่านความถี่ของ DWDM (ความถี่ C-Band)  
 ทั้งนี้ โดยปกติสัญญาณความถี่ที่รับมาจากอุปกรณ์ปลายทางของลูกค้า (Client) จะเป็น 1550 nm, 1310 nm หรือ 850 nm

#### Optical Multiplexer Board and Demultiplexing Board

- M40 ทำหน้าที่ รับสัญญาณความถี่ที่แปลงเรียบร้อยแล้วจาก Board NQ2 หลังจากนั้นจะนำสัญญาณความถี่แต่ละสัญญาณมารวมกัน และส่งสัญญาณความถี่ออกไปในสาย Fiber Optic เพียงเส้นเดียว
- D40 ทำหน้าที่ แยกสัญญาณความถี่หลายๆสัญญาณออกจากกัน หลังจากนั้นสัญญาณความถี่แต่ละสัญญาณที่แยกออกจากกันแล้ว จะส่งต่อไปยัง Board NQ2 เพื่อรับสัญญาณ

- FIU ทำหน้าที่รวมและแยกสัญญาณความถี่ DWDM และสัญญาณความถี่ Management ข้อดีของ FIU คือ กรณี สัญญาณความถี่ DWDM ล้ม เรายังคงสามารถ Manage อุปกรณ์ DWDM ได้อยู่เพราะ สัญญาณความถี่ Management ยังคงอยู่

#### Optical Amplifier Board

- OAU ทำหน้าที่บูตสัญญาณให้แรงขึ้น Gain สามารถปรับค่าได้
- OBU ทำหน้าที่บูตสัญญาณให้แรงขึ้น Gain ไม่สามารถปรับค่าได้
- RAU ทำหน้าที่บูตสัญญาณให้แรงขึ้น ใช้กับระยะทางไกลๆ ประมาณ 120km ขึ้นไป

#### Cross-Connect Board and System and Communication Board

- XCH ทำหน้าที่เป็น Board ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์, เก็บข้อมูล Configuration, มีความสามารถในการทำ Electrical Cross-Connect (Cross-Connect ระหว่าง OTN Tributary Board กับ OTN Line Board)
- SCC ทำหน้าที่เป็น Board ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์, เก็บข้อมูล Configuration Optical Supervisory Channel Board
- HSC1 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ Management เพื่อสื่อสารกันระหว่าง Node ผ่านทางสาย Fiber Optic โดยจะใช้กับระยะทางไกล เช่นใน Node ที่เป็นระบบ Raman
- ST2 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ Management เพื่อสื่อสารกันระหว่าง Node ผ่านทางสาย Fiber Optic โดยจะใช้กับระยะทางใกล้ เช่นใน Node ที่ไม่เป็นระบบ Raman

#### Optical Protection Board

- DCP ทำหน้าที่ Split สัญญาณ ๑ สัญญาณที่รับมาจาก Board NQ2 ออกเป็น ๒ สัญญาณ โดย ๒ สัญญาณที่ออกมาจะแยกเป็น Main และ Protection

- Dispersion Compensation Board

- DCU ทำหน้าที่ปรับสัญญาณความถี่ที่บานออกให้กลับมาเป็นสัญญาณสภาพเดิม โดยปกติสัญญาณความถี่ที่วิ่งอยู่ในสาย Fiber Optic จะมีการบานออก หรือเรียกว่า Dispersion โดย DCU จะทำหน้าที่ชดเชยการบานออกของสัญญาณ



LC Connector



SC Connector



ST Connector



MTRJ



MU



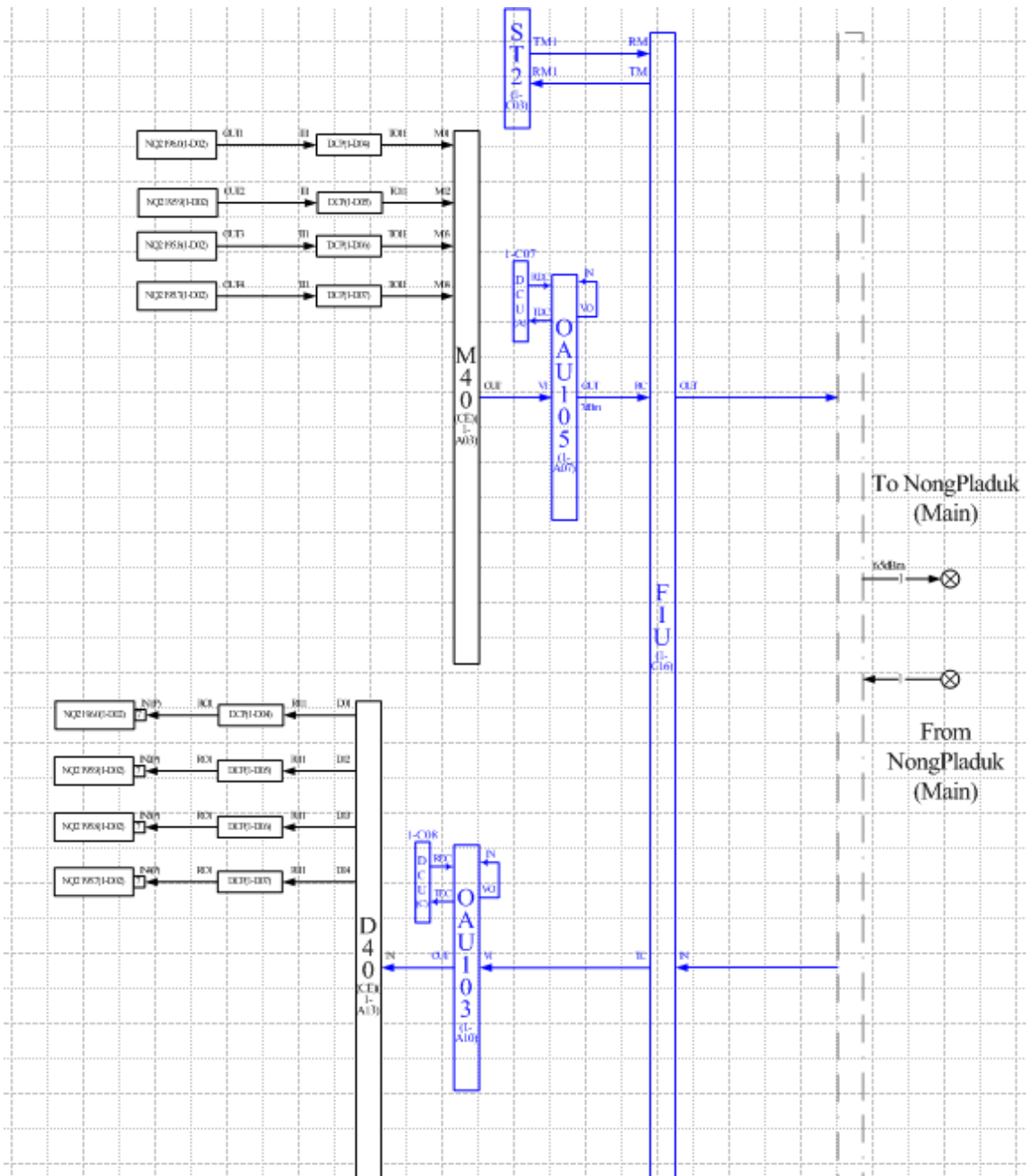
E 2000 Connector



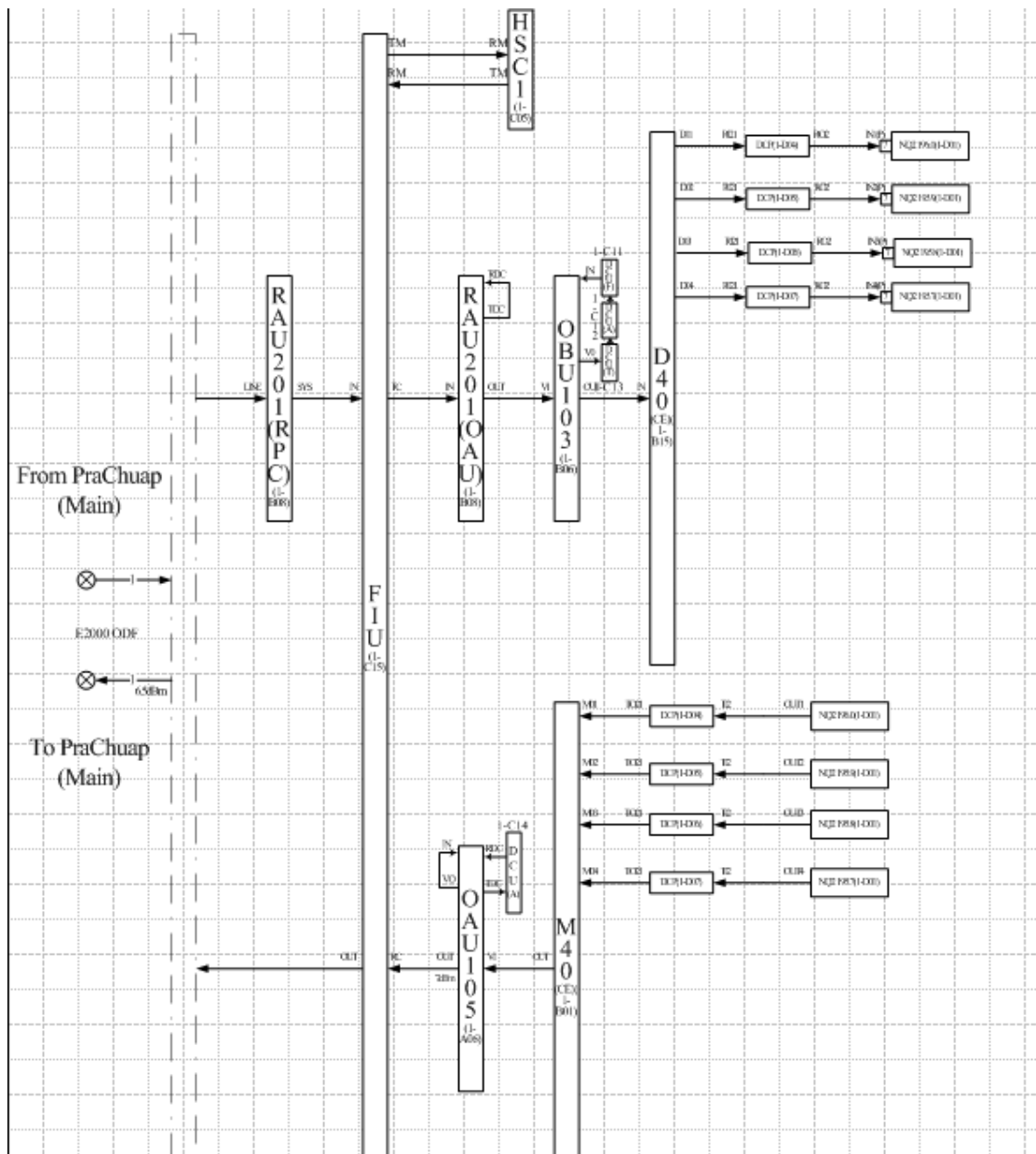
E 2000 CONNECTOR ใช้งานกับ การ์ด RAU เท่านั้น

ภาพที่ ๔-๗๑ CONNECTOR แบบต่างๆ





ภาพที่ ๔-๗๒ Block diagrame DWDM ST2 Management



ภาพที่ ๔-๗๓ Block diameg DWDM HSC1 Management

ข้อดีของการสื่อสารระบบ Fiber Optic

๑) ช่วงการส่งสัญญาณ (Bandwidth) กว้างเนื่องจากความถี่ของแสงสูงมาก ทำให้ใช้แบนด์วิดท์ได้กว้างและสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราสูง ในทางทฤษฎีอาจได้ถึง 10<sup>14</sup> bps ในปัจจุบันเส้นใยนำแสงสามารถใช้ส่งข้อมูลได้ประมาณ 1,000 Mbps ในระยะทาง ๑ กิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากเวลาตอบสนองของโฟโตนิกส์ต่อแสงใช้เวลา ๑๐<sup>-๙</sup> วินาที ปกติแล้วเส้นใยแก้วนำแสงสามารถใช้ส่งข้อมูลเสียงได้พร้อม ๆ กัน ๓๐,๐๐๐ ช่องสัญญาณ และเนื่องจากอัตราการส่งข้อมูลสูงจึงเหมาะสำหรับใช้ส่งข้อมูลเสียง ภาพ และข้อมูลดิจิทัลจากคอมพิวเตอร์ไปพร้อม ๆ กันในระบบ ISDN (Inergrated Services Digital Network)

๒) ไม่มีการเหนี่ยวนำจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสาย Fiber Optic ทำจากแก้วพอลิซิลิกา ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก เช่น ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า สายไฟแรงสูง คลื่นโทรทัศน์ คลื่นวิทยุ เป็นต้น และเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสารอโลหะจึงไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณวิทยุ ตลอดจนการสปาร์ก (sparks) ทางไฟฟ้างั้นความผิดพลาดจะต่ำกว่า  $10^{-9}$  ในขณะที่สายทองแดงมีอัตราความผิดพลาดประมาณ  $10^{-6}$

๓) อัตราการสูญเสียในการรับ-ส่งสัญญาณต่อการสูญเสียในสาย Fiber Optic ในปัจจุบันค่าต่ำที่สุด คือ 0.2 db/Km (Coaxial Line หรือ สายลวดทองแดง การสูญเสียต่ำสุด 1 dB/Km)

๔) เพิ่มระยะห่างของสถานีทวนสัญญาณ ระยะห่างระหว่างสถานีทวนสัญญาณ(Repeater) จะเพิ่มมากขึ้นเพราะมีอัตราการสูญเสียในสาย Fiber Optic ต่ำ เนื่องจากการสูญเสียกำลังส่งของสัญญาณ (Signal Loss) ในเส้นใยแก้วนำแสงมีน้อยกว่าสายทองแดงและสายโคแอกเซียลมาก ดังนั้นจึงอาจใช้รีพีตเตอร์เพื่อทวนสัญญาณใหม่ในระยะทางที่ห่างกันได้ถึง ๒๐-๓๐ ไมล์ ในขณะที่สายทองแดงต้องใช้รีพีตเตอร์ทุก ๆ ๒.๘ ไมล์ ในการส่งสัญญาณแบบดิจิตอล

๕) จำนวนของสัญญาณในการรับ-ส่งมีมากเนื่องจากในสาย Fiber Optic เพียงเส้นเดียว สามารถบรรจุช่องการสื่อสารได้เป็นจำนวนมาก จึงสามารถรับ-ส่งสัญญาณภาพ เสียง และข้อมูล (Computer Network) โดยแยกให้เห็นชัดเจนได้ คือ โทรศัพท์, ข้อมูล (Computer, Radar Data), เคเบิลทีวี, วิดิทัศน์ (Video Conference: เป็นการประชุมระยะไกลที่ต้องส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงได้พร้อมกัน)

๖) ขนาดของสาย Fiber Optic มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาเส้นผ่าศูนย์กลางของสาย Fiber Optic มีขนาดเพียง ๒๕๐ ไมครอน เท่านั้น ดังนั้นภายในสายเคเบิล ๑ สาย จึงประกอบด้วย Fiber Optic จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ในสายเคเบิลประกอบด้วยสาย Fiber Optic จำนวน ๑๒ เส้น มีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง ๐.๔๙ นิ้ว เท่านั้น สายเคเบิลของเส้นใยแก้วนำแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่การวางสายและติดตั้งน้อยเพื่อวางสายน้อย

๗) ไม่มีขีดจำกัดเรื่องการใช้ความถี่วิทยุ การใช้ความถี่วิทยุซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในอากาศ และต้องได้รับการจัดสรรและควบคุมจากกรมไปรษณีย์โทรเลข ซึ่งปัจจุบันความถี่วิทยุที่ได้รับการจัดสรรเหลือน้อยแต่การสื่อสารแบบ Fiber Optic เป็นการสื่อสารโดยใช้สัญญาณแสงผ่านทาง Fiber Optic ซึ่งเป็นสาย Cable จึงไม่ต้องขออนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข

๘) ความปลอดภัย (Security) สูงในทางจารกรรมข้อมูล จะทำได้เพียงวิธีเดียว คือ การต่อเชื่อมสาย Fiber Optic เท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากทางด้านการส่งสัญญาณจะ

ตรวจพบในทันทีที่มีการสูญเสียของสัญญาณเกิดขึ้น นอกจากนี้จะไม่ถูกรบกวน (Jamming) จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

๙) อายุการใช้งาน ระบบ Fiber Optic มีอายุการใช้งานนานถึง ๒๕ ปี ในขณะที่ระบบไมโครเวฟและดาวเทียม มีอายุการใช้งานประมาณ ๑๕ ปี

### ๓.๖ เครื่องมือทดสอบทางด้านสื่อสารใยแก้วนำแสง

การทดสอบหรือตรวจสอบทางด้านการสื่อสารใยแก้วนำแสง อาจเริ่มตั้งแต่การทดสอบการเชื่อมต่อการตรวจสอบการส่งผ่านสัญญาณ การตรวจสอบการรับ-ส่งสัญญาณแบบแอนาล็อก และดิจิทัล หรือแม้กระทั่งการทดสอบคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงของแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับสัญญาณ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องดำเนินการในการติดตั้งระบบสื่อสารใยแก้ว

ในการทดสอบและตรวจสอบการสื่อสารทางแสงนั้น มีอุปกรณ์ จะต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ เช่น

- ๑ อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณความถี่ (Spectrum Analyser)
- ๒ เครื่องตรวจสอบระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง โอปติคัล (Optical Time Domain Reflectomet,OTDR)
- ๓ อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแก้ว (Splicer)
- ๔ อุปกรณ์ทดสอบการส่งผ่านสัญญาณ (Talk Set)
- ๕ อุปกรณ์คัดเลือกสายสัญญาณ (Fiber Identifier)
- ๖ เครื่องตรวจสอบการส่งผ่านสัญญาณดิจิทัล (Digital Tester)
- ๗ เครื่องตรวจสอบโปรโตคอล (Protocal Analyzer)
- ๘ อุปกรณ์ตรวจสอบการสูญเสียสัญญาณ (Loss Test Set)

นอกจากเครื่องมือเหล่านี้แล้ว ก็ยังมีเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ในการทดสอบใยแก้วนำแสงอีก เช่น เครื่องตรวจสอบทางเรขาคณิต (Fiber Geometry) ชุดทดสอบการกระจาย (Dispersion) และเครื่องทดสอบการลดทอนในใยแก้วนำแสง (Fiber Attenuation) เป็นต้น

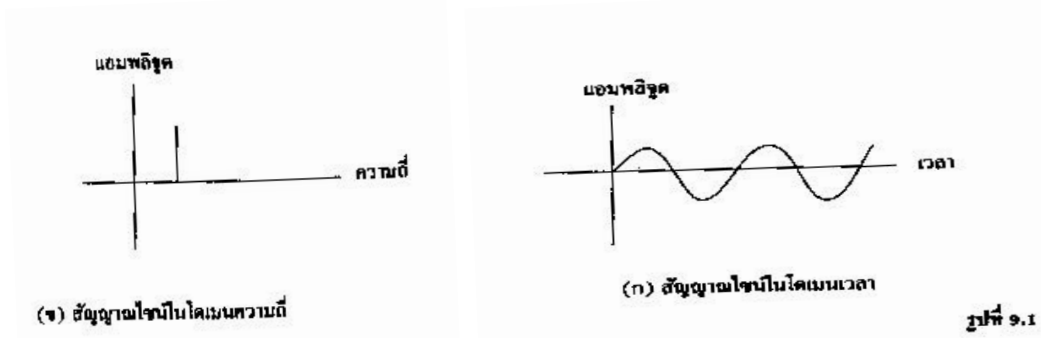
#### ๓.๖.๑ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่

สัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายนั้นสามารถอธิบายได้ทั้งในแง่การเป็นฟังก์ชันของเวลาและความถี่ เมื่อสัญญาณมีลักษณะเป็นกลางจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความถี่จะค่อนข้างชัดเจน แต่ถ้าสัญญาณมีลักษณะการสุ่ม (Random) จำเป็นจะต้องใช้วิธีการทางสถิติเข้ามาช่วย แต่ความสัมพันธ์ของเวลาและความถี่ก็ยังคงมีความสำคัญอยู่ เวลาเป็นสมบัติพื้นฐานของเอกภพที่เราอาศัยอยู่นี้โดยมีความถี่เข้ามาเกี่ยวข้องกับเวลาโดยผ่านธรรมชาติของการเป็นคาบ

ออสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์ที่โดยพื้นฐานแล้วจะแสดงลักษณะของสัญญาณว่าขึ้นกับเวลาอย่างไร ในขณะที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่จะแสดงคุณสมบัติของสัญญาณว่ามีความถี่อย่างไรบ้าง โดยคำนึงการใช้งานแบบทั้งสองแบบที่วัดก็เพื่ออธิบายปรากฏการณ์เดียวกัน ทั้งเวลาและความถี่ต่างก็ขึ้นซึ่งกันและกัน ถ้ารู้ค่าหนึ่งค่าใดแล้วเมื่อใช้คณิตศาสตร์ที่เหมาะสมก็จะสามารถหาค่าอีกค่าหนึ่งได้

เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างรูปคลื่นใหม่ ๆ ได้โดยอาศัยการรวมคลื่นตามทฤษฎีของฟูรีเยร์ เช่น คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) คลื่นรูปสามเหลี่ยม (Triangular Wave) คลื่นรูปฟันเลื่อย (Sawtooth Wave)

ดังนั้น ตามทฤษฎีของฟูรีเยร์ สัญญาณเชิงเวลา (แอมพลิจูดเปลี่ยนกับเวลาด้วยค่าที่แน่นอน) จึงมีความสัมพันธ์กับความถี่อย่างใกล้ชิด เมื่อสัญญาณในโคมายเวลาอันหนึ่ง ก็จะสามารถที่จะหาว่าสัญญาณนั้น ประกอบด้วยความถี่ใดบ้าง โดยอาศัยคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)



ภาพที่ ๔-๗๔ สัญญาณไซน์ในโดเมนความถี่ และในโดเมนเวลา

ส่วนคลื่นรูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม และรูปฟันเลื่อยจะมีองค์ประกอบของคลื่นมากมาย ดังตาราง (แสดงไว้เพียง ๙ ฮาร์โมนิก และตัวเลขในช่องแอมพลิจูดนั้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

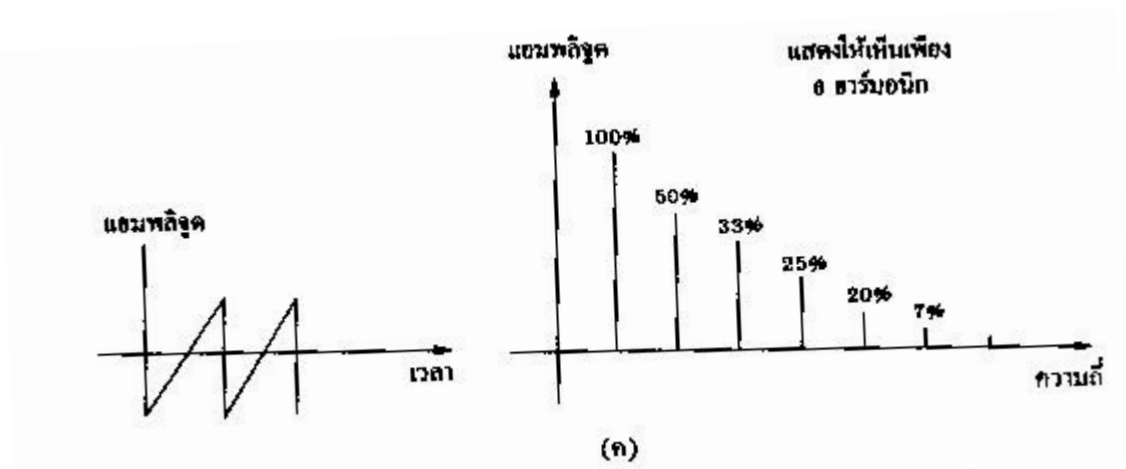
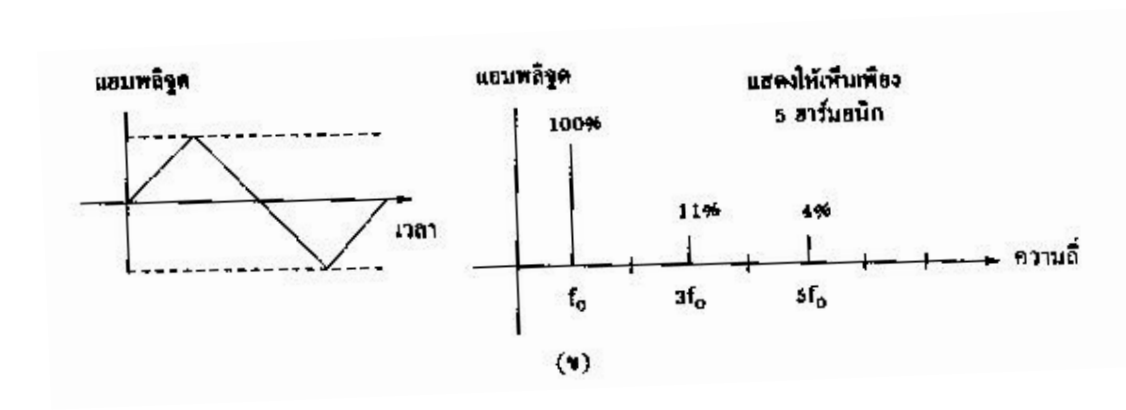
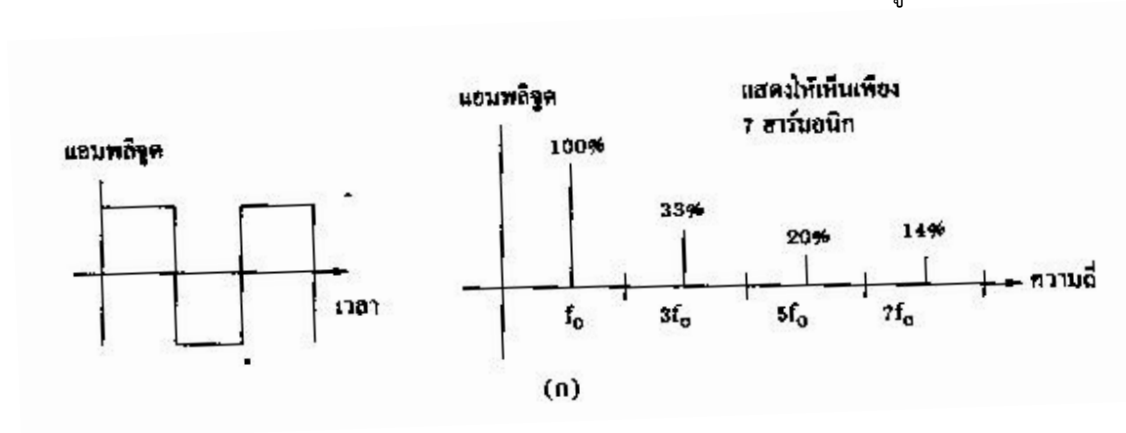
ตารางที่ ๔-๓ ตารางแสดงลำดับฮาร์โมนิก

รูปคลื่น		ลำดับฮาร์โมนิก								
		1*	2	3	4	5	6	7	8	๙
สี่เหลี่ยม	แอมพลิจูด	100	0	33	0	20	0	14	0	11
	เฟส	0°	-	180°	-	0°	-	180°	-	0°
สามเหลี่ยม	แอมพลิจูด	100	0	11	0	4	0	2	0	1.2
	เฟส	0°	-	0°	-	0°	-	0°	-	0°
ฟันเลื่อย	แอมพลิจูด	100	50	33	25	20	17	14	12.5	11
	เฟส	90°	270°	90°	270°	90°	270°	90°	270°	90°

\* หมายความว่า ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency)

รูปคลื่นที่ได้จะยิ่งใกล้เคียงกับความเป็นจริงของเรขาคณิตมากขึ้นเมื่อจำนวนฮาร์มอนิกที่มาประกอบมีมากยิ่งขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วสามารถได้ค่าอนันต์ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทำได้ ฮาร์มอนิกที่กล่าวถึงในตารางนั้น ก็คือจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ( $f_0$ ) เช่นฮาร์มอนิกที่ ๑ ก็คือ  $1f_0$  ซึ่งก็คือความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกที่ ๒ ก็คือ  $2f_0$  ซึ่งก็คือ ๒ เท่าของความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกที่ ๓ คือ  $3f_0$  ซึ่งก็คือ ๓ เท่าของความถี่มูลฐาน เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

เมื่อเราเขียนเป็นภาพเปรียบเทียบระหว่างโดยเวลาและโดยความถี่จะได้ดังรูป

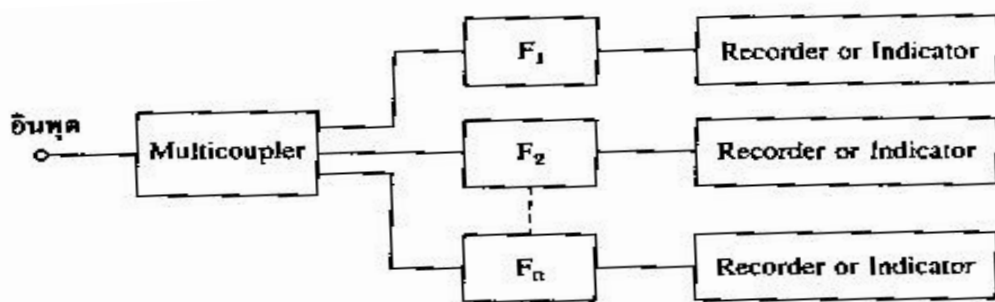


ภาพที่ ๔-๗๕ แสดงคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของคลื่นหลายๆ ฮาร์มอนิกและแอมพลิจูดต่าง ๆ กัน

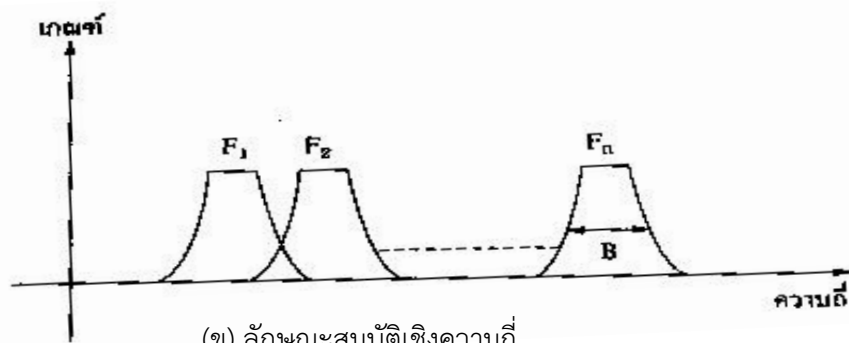
### ๓.๖.๑.๑ โครงสร้างของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ

สามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยแปลงจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนของความถี่ หรือใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งประหยัดเวลามาก อย่างไรก็ตามการใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ความถี่ส่วนใหญ่จะใช้กันในส่วนของความถี่ต่ำ ๆ ซึ่งอยู่นอกเหนือพิสัยของเครื่องวิเคราะห์เชิงความถี่

การวิเคราะห์องค์ประกอบของความถี่ของสัญญาณ นอกเหนือจากการใช้คอมพิวเตอร์ดังกล่าวน่าจะใช้วงจรกรอง (Filter Circuit) กรองความถี่ละเอียดมาก ๆ ดังรูปต่อไป



(ก) บล็อกไดอะแกรม

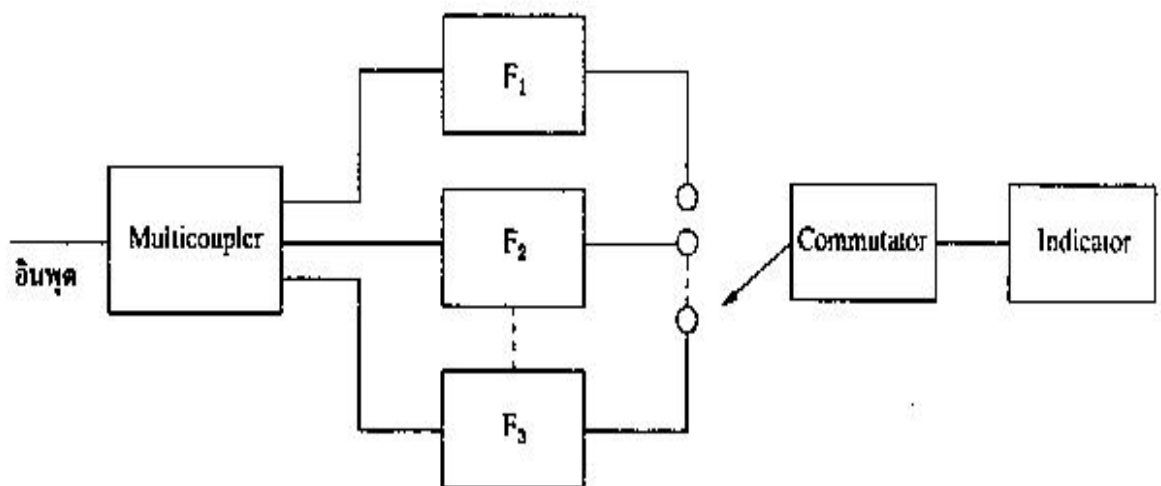


(ข) ลักษณะสมบัติเชิงความถี่

ภาพที่ ๔-๗๖ แสดงคลังวงจรกรองสัญญาณ

ซึ่งเราสามารถสร้างขึ้นได้ด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณ (ในโดเมนเวลา) จะผ่านมัลติคอปเปอร์ซึ่งทำหน้าที่แบ่งสัญญาณไปที่ฟิลเตอร์ต่าง ๆ วงจรกรอง  $F_1$   $F_2$   $F_3$  .. $F_n$  ก็อาจจะกรองที่ทำหน้าที่กรองความถี่จากค่าต่ำไปหาสูงเรียงลำดับไปยังช่วงห่างระหว่างเวลากรองยังมีค่าน้อยความละเอียดการวัดจะมากขึ้น ซึ่งตามรูปที่ (๔.๗๖ ข) ค่า B ยิ่งแคบค่าความละเอียดยิ่งสูง เมื่อสัญญาณที่จะศึกษาผ่านวงจรกรองก็วัดค่าแอมพลิจูดของแต่ละความถี่ที่ผ่าน วงจรกรองออกมาแล้วบันทึกค่าไว้ซึ่งจะทำให้ทราบว่าสัญญาณประกอบด้วยค่าความถี่ใดบ้าง จากภาพที่ (๔.๗๖ ก) จะพบว่าต้องใช้ตัวบันทึกค่าความถี่ (Recorder or Indicator) จำนวนมาก(เท่ากับจำนวนวงจรกรอง) ดังนั้น เพื่อลด

ค่าใช้จ่ายดังกล่าวจะใช้ตัวบันทึกค่าความถี่เพียงตัวเดียว แต่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ที่จะเป็นตัวเลือกต่อระหว่าง วงจรกรองกับตัวบันทึก ซึ่งเรียกว่าตัวคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) หรือสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Swap Switch) ซึ่งจะเลือกเชื่อมต่อกับ  $F_1$   $F_2$  ...  $F_n$  เรียงกันเป็นอนุกรมเวลา ตัวอย่าง เช่น ถ้าคอมมิวเตเตอร์ใช้เวลาเชื่อมต่ออยู่วงจรใดๆ เป็นเวลาครึ่งวินาทีและอีกครึ่งวินาทีเป็นเวลาที่ใช้ในการที่ต้องเคลื่อนย้ายจากความถี่หนึ่งไปยังความถี่ถัดไป ก็จะได้ว่านี่เอาต์พุตเวลา ๑๐.๐ ถึง ๑๐.๕ วินาที หลังจากเริ่มต้นก็จะหมายถึงสัญญาณของความถี่ของวงจรกรองที่ ๑๑ และด้วยความเร็วที่เหมาะสมของบันทึก (สมมติเป็น ๑ นิ้วใน ๑ วินาที) ก็จะสามารถแปลงแกนเวลาของตัวบันทึกไปเป็น แกนเวลาของความถี่ได้ ตามตัวอย่างจะได้ว่าที่ตำแหน่ง ๑๐ นิ้ว จากจุดเริ่มต้นจะหมายถึงความถี่ของ วงจรกรองที่ ๑๑



ภาพที่ ๔-๗๗ แสดงคลังวงจรกรองที่ใช้คอมมิวเตเตอร์

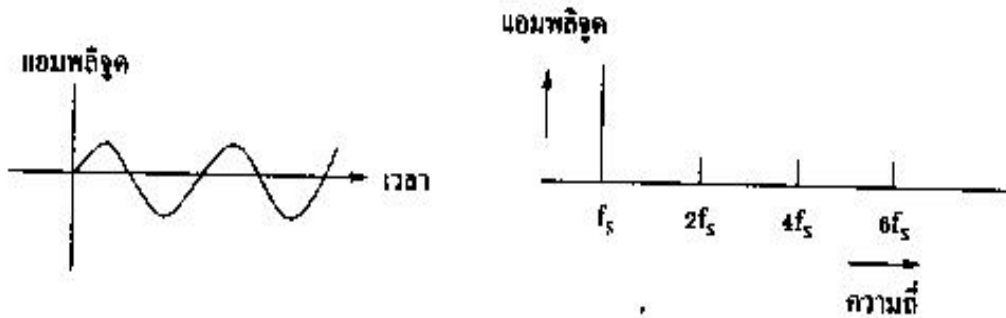
### ๓.๖.๑.๒ การประยุกต์ใช้งานเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

ทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังนี้

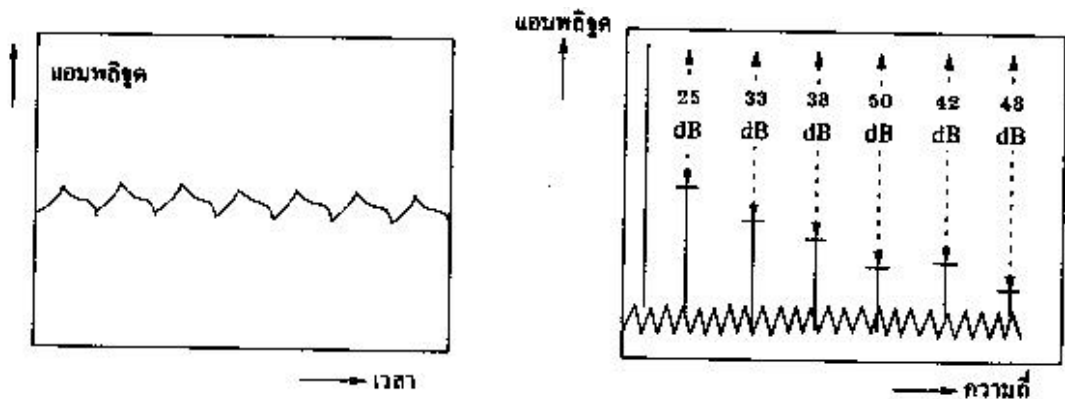
๑. การวิเคราะห์รูปคลื่น (Waveform Analysis) เมื่อมีคลื่นรูปไซน์ รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม หรือรูปฟันเลื่อยแล้ว เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยผ่านเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ จะต้องประกอบ ของคลื่นนั้น ๆ เป็นความถี่และแอมพลิจูดต่าง ๆ กัน แต่มีรูปแบบที่แน่นอนสำหรับรูปคลื่นแต่ละชนิด การวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นกรณีที่ง่ายและชัดเจนที่สุด ส่วนกรณีรูปคลื่นอื่น ๆ นั้น จะสามารถวิเคราะห์ หาค่าประกอบของความถี่ออกมาได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้คลื่นรูปไซน์ที่เราเป็นรูปไซน์อย่างสวยงาม บนจอออสซิลโลสโคป ก็อาจจะมีการผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกได้ ซึ่งจะเห็นได้ก็ต่อเมื่อผ่านการวิเคราะห์ สัญญาณเชิงความถี่ ดังรูป





ภาพที่ ๔-๗๘ แสดงการวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่

นอกจากนี้ยังใช้วัดการผิดเพี้ยนของคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform) เช่น ดังภาพที่ ๔-๗๙ (ก) เป็นรูปคลื่นในโดเมนเวลา ซึ่งเห็นได้ว่าเป็นคลื่นรูปไซน์ที่ขาดความสมบูรณ์อย่างยิ่ง (เกิดในวงจรรขยายบางย่านความถี่) เมื่อนำไปวิเคราะห์ผ่านเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่แล้วจะพบว่าประกอบด้วยหลายฮาร์มอนิก



ภาพที่ ๔-๗๙ (ก) แสดงคลื่นรูปไซน์ที่ผิดเพี้ยนไปมาก

(ข) สเปกตรัมของความถี่ซึ่งประกอบด้วยหลายฮาร์มอนิก

จากภาพที่ ๔-๗๙ (ก) จะเห็นว่าแอมพลิจูดที่ค่าความถี่ต่าง ๆ จะต่ำกว่าความถี่มูลฐานเป็น 25 dB, 33dB, 38 dB, 50 dB, 42 dB ตามลำดับ เมื่อจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ก็คูณค่าความต่างศักย์เหล่านั้นด้วย ๑๐๐ จะได้ค่าเป็น ๕.๖% , ๒.๒% , ๑.๓% , ๐.๓% , ๐.๘% และ ๐.๔% ตามลำดับ ซึ่งจะได้ว่าค่าผิดเพี้ยน ฮาร์มอนิกรวม (HD) มีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 HD &= \sqrt{(5.6)^2 + (2.2)^2 + (1.3)^2 + (0.3)^2 + (0.8)^2 + (0.4)^2} \\
 &= 6.2\%
 \end{aligned}$$

๒. ใช้ในการพบเปอร์เซ็นต์ของการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด หรือเอเอ็ม (AM Medulation) เมื่อสัญญาณและคลื่นพาห้ถูกรวมเข้ากันแบบแอมพลิจูดมอดูเลชั่น สมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการพอดูเลชั่น ดังกล่าว จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าจะมีความถี่สองความถี่เกิดขึ้นที่สองด้านของคลื่นพาห้ โดยอยู่ห่างไปเท่า ๆ กัน และแอมพลิจูดเท่า ๆ กัน ซึ่งจะเรียกว่า เป็นความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequencies) ดังจะเห็นได้จากสมการข้างล่าง

$$f_{AM}(t) = A_c \cos \omega_c t + B \cos \omega_1 t + B \cos \omega_2 t \quad \dots\dots\dots (9.1)$$

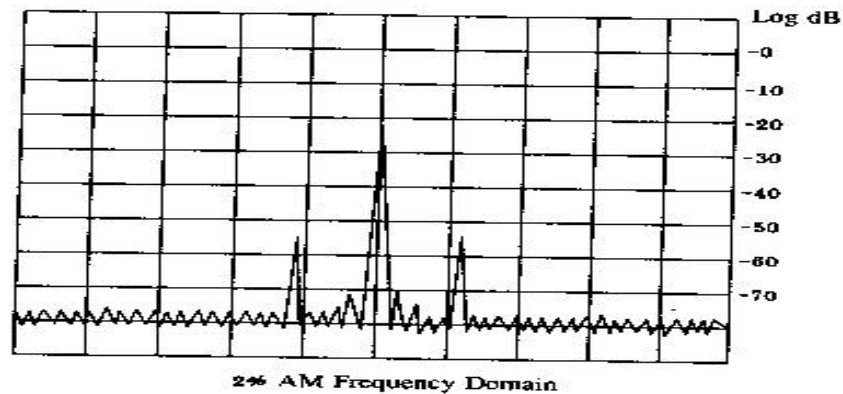
เมื่อ  $f_{AM}(t)$  คือ แอมพลิจูดของคลื่นรวมที่เวลา  $t$  ใด ๆ  
 $A_c$  คือ แอมพลิจูดของคลื่นพาห้

$$B = \frac{mA_c}{2}, \text{ เมื่อ } m \text{ คือ คำนีการมอดูเลต} \quad \dots\dots\dots (9.2)$$

$$\omega_1 = \omega_c - \omega_m \text{ และ } \omega_2 = \omega_c + \omega_m \quad \dots\dots\dots (9.3)$$

$\omega_m$  คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณ (ที่ต้องการมอดูเลต )

ดังนั้นเมื่อสัญญาณที่ถูกมอดูเลตเอเอ็มถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่จะได้ลักษณะของสเปกตรัมดังตารางด้านล่างนี้

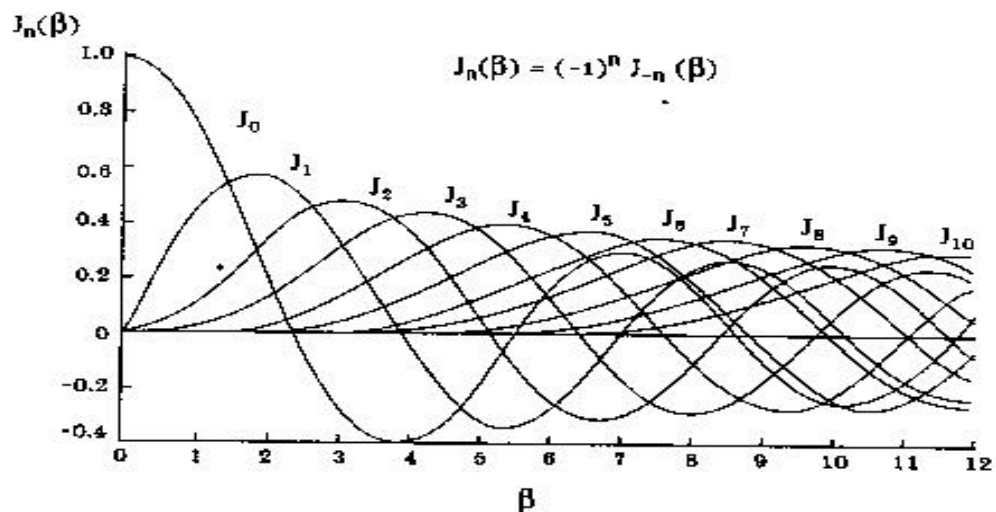


ภาพที่ ๔-๘๐ แสดงลักษณะของสเปกตรัม

๓. ใช้การวิเคราะห์การเบี่ยงเบนความถี่และความว่องไวในการมอดูเลตเชิงความถี่หรือเอฟเอ็ม (FM Peak Frequency Denation and FM Modulator Sersiltvity) การมอดูเลตเชิงความถี่ (FM = Frequency Modulation) จะมีสเปกตรัมของความถี่เช่นเดียวกันกับการมอดูเลตเชิงเฟส (PM = Phase Modulation) โดยมีแอมพลิจูดของสัญญาณรวมที่เวลา  $t$  ใด ๆ ในการ มอดูเลตแบบความถี่ จะได้ดังสมการข้างล่าง

$$f_{AM}(t) = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos(\omega_c + n\omega_m)t \quad \dots\dots\dots (9.4)$$

- เมื่อ  $f_{FM}(t)$  คือ แอมพลิจูดรวมของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตที่เวลา  $t$  ใดๆ
- $J_n(\beta)$  คือ เบสเซลฟังก์ชัน (Ordinary Bessel Function of the First Kind)
- $A_c$  คือ แอมพลิจูดของการมอดูเลต
- $\omega_c$  คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณพาห้
- $\omega_m$  คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณที่ค้ดงการมอดูเลต
- $n$  คือ จำนวนเต็ม



ภาพที่ ๔-๘๑ แสดงกราฟระหว่าง  $J_n(\beta)$  กับ  $\beta$

ถ้าสมมติว่าสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตไม่มีการผิดเพี้ยนใด ๆ เลยและความถี่ข้างเคียงทั้งหมดก็จะออกมาจากการแสดงผลของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ ซึ่งนั่นหมายถึงแบนด์วิดท์ของการผ่านออกมาจะเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วความถี่ข้างเคียงที่สำคัญ ๆ เท่านั้นที่จะผ่านออกมาได้ คำว่า “สำคัญ” โดยปกติแล้วจะมีความหมายว่าความถี่ข้างเคียงเหล่านั้นจะต้องมีความต่างศักย์อย่างน้อยที่สุด  $1\beta$  (-40dB) ของโวลต์เตจของสัญญาณพาห้ การวัดแบนด์วิดท์ของการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม (หรือพีเอ็ม) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณความถี่ทำได้โดยเพียงแต่นับจำนวนความถี่ข้างเคียง “สำคัญ” ที่ผ่านออกมา

ตารางต่อไป จะแสดงให้เห็นถึงค่าดัชนีของการมอดูเลต ( $\beta$ ) ในขณะที่ยาค่า ซึ่งเป็นค่าที่  $J_1(\beta)$  แอมพลิจูดของความถี่พาห้เป็นศูนย์

ตารางที่ ๑.๒ ตำแหน่งของการเป็นศูนย์ของแอมพลิจูดของพาหุ

Order of Carrier Zero	ค่านิจของการผลคูณ (β)
1	2.40
2	5.52
3	8.65
4	11.79
5	14.93
6	18.07
n (n>6)	18.07 + π (n-6)

ตารางนี้ มีประโยชน์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม (และพีเอ็ม) ซึ่งเรียกว่าการเบี่ยงเบนความถี่  $\Delta f$  (FM Peak Frequency Deviation) และความไวในการมอดูเลต  $m_f$  (Modulation Sensitivity; Hz) ในการณีของพีเอ็ม จะเป็นการวัดค่าเบี่ยงเบนเฟส  $\beta$  (PM Peak Phase Deviation : rad) และค่าความไวในการมอดูเลต  $m_p$  (Modulation Sensitivity) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\beta = \frac{m_f A_m}{f_m} \quad \text{สำหรับเอฟเอ็ม}$$

และ  $\beta = m_p A_m \quad \text{สำหรับพีเอ็ม}$

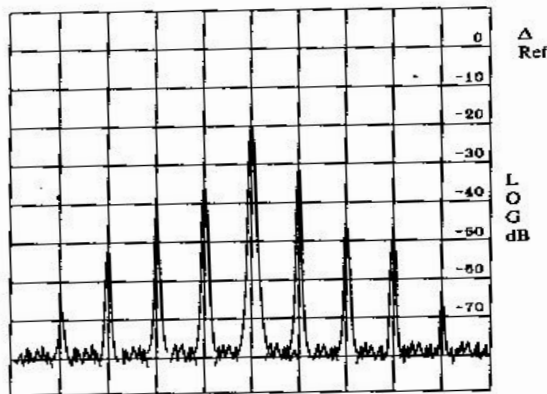
เมื่อ  $A_m$  และ  $f_m$  คือแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณที่ต้องการมอดูเลต

เมื่อ  $\beta$  มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์โดยการเพิ่มโวลเลจของการมอดูเลตขนาดของสัญญาณพาหุของเอฟเอ็มหรือพีเอ็ม ซึ่งแสดงผลที่หน้าจอของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่จะเป็นศูนย์ เมื่อค่า  $\beta = 2.40$ ,  $\beta = 5.52$ ,... และค่าอื่น ๆ ดังตารางที่ด้านบน ที่ตำแหน่งที่สัญญาณพาหุเป็นศูนย์นี้  $f_m$  จะสามารถอ่านได้จาก การแสดงผลของเครื่อง ส่วน  $A_m$  ก็จะได้ที่อินพุตก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ ดังนั้น เราจะสามารถหาค่า  $\Delta f$ ,  $m_f$  และ  $m_p$  ได้โดยอาศัยสมการข้างบนทั้งสอง

๔. การมอดูเลตที่มีการผสมระหว่างเอฟเอ็มกับเอฟเอ็ม พิจารณาการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม และแบบเชิงมุม (Angular Modulation) [จะหมายถึงการมอดูเลตแบบเอฟเอ็มหรือแบบพีเอ็ม] จะเป็นการมอดูเลตที่แตกต่างกันแต่ก็มีสมบัติร่วมกันอันหนึ่งก็คือการมีสมมาตรของแอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียง (Symmetrical Sideband Amplitude) ภาพด้านล่าง จะแสดงให้เห็นถึงการมอดูเลตที่ความถี่ข้างเคียงมีแอมพลิจูด ไม่เท่ากัน ซึ่งมีเพียงวิธีเดียวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดกรณีเช่นนี้ขึ้นได้ก็คือ

การมอดูเลตเอเอ็ม ร่วมกับเอฟเอ็ม พร้อม ๆ กัน ด้วยความถี่ของการมอดูเลตเดียวกัน และเนื่องจากความถี่ข้างเคียงเลขคู่ (Oed-Onder Sidebands) ของเอฟเอ็ม(และของพีเอ็ม) ที่สองด้านของความถี่พาห้จะมีเครื่องหมายกลับกัน ดังนั้น ความถี่ข้างเคียงที่เกิดขึ้นแต่ละด้านของความถี่พาห้จะไม่เท่ากัน เพราะด้านหนึ่งจะถูกบวกเพิ่มขึ้นไป ในขณะที่ด้านหนึ่งจะถูกหักลบออกไป ผลก็คือเกิดความไม่สมมาตรของแอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียง

๕. การวัดความเร็วดอปเปลอร์ (Doppler Velocity Measuremen) เมื่อมีคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าส่งไปกระทบวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนจากวัตถุดังกล่าวจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงไป เรียกว่า ความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler Frequency) ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อวัตถุวิ่งเข้าหาแหล่งกำเนิดและมีย่าน้อยลงเมื่อวิ่งออกห่างจากแหล่งกำเนิด ปรากฏการณ์นี้มีชื่อเรียกว่า “ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์” ความเร็วของวัตถุนั้นเราจะเรียกว่า “ความเร็วดอปเปลอร์” ถ้าให้  $f_D$  คือความแตกต่างความถี่ (Doppler Difference Frequency) และ  $f_1$  เป็นความถี่แหล่งกำเนิดที่ส่งออกไปและ  $Y$  เป็นความเร็ววัตถุ (Targer Velocity) แล้ว  $f_D$  จะหาได้จาก



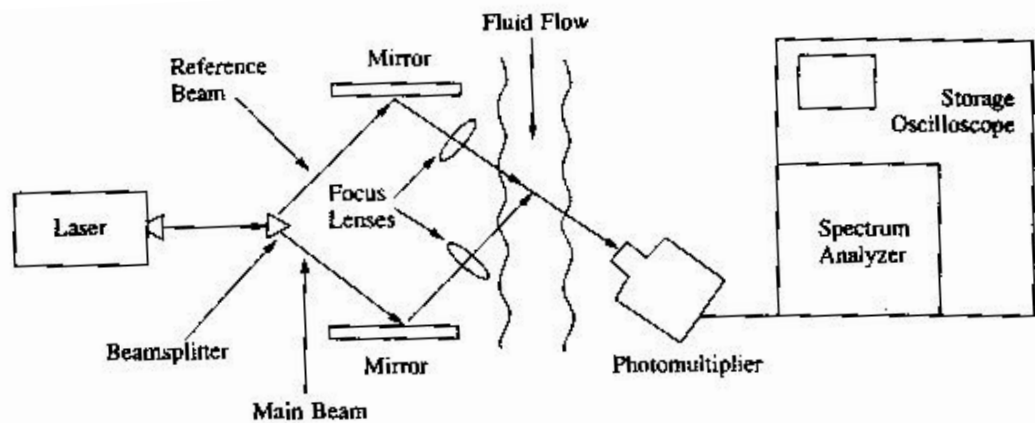
รูปที่ ๑.๑ แสดง 42x ๒๒ เล็มกับเอฟเอ็ม ที่เพิ่มลบกับ

$$f_D = \left[ \frac{2v}{c} \right] \cdot f_1 \quad \dots\dots\dots (๑.7)$$

เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสง สมมติระบบเป็นเรดาร์แบบดอปเปลอร์มีความถี่แหล่งกำเนิดและความถี่ดอปเปลอร์ ( $f_D$ ) จะมีค่าประมาณ สำหรับวัตถุที่มีความเร็ว 100 MHz ไมล์ต่อชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานนี้ควรจะเป็นเครื่องชนิดความถี่ต่ำ

การวัดความเร็วดอปเปลอร์ที่ซับซ้อนกว่าที่กล่าวมาจะแสดงให้เห็นด้วยรูปที่กล่าวมา ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่จะใช้ในการวัดความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler Frequency) ของแสงเลเซอร์โดยของเหลวที่กำลังเคลื่อนที่

แสงอาทิตย์ของลำแสงเลเซอร์จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยใช้ตัวแยกแสง (Beamspliner) และให้มีระยะห่างเท่ากัน (Equal Path Lengeh) โดยให้ลำแสงอันหนึ่งตกกระทบตรง ๆ บนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (PM Tube) ส่วนอีกลำแสงหนึ่งให้มีทิศทางไปอีกทางหนึ่ง(ดูรูป) จากรูปแสงจำนวนหนึ่งจากลำแสงจะถูกกระเจิงโดยของไหลที่กำลังเคลื่อนที่และเข้าไปในหลอดพีเอ็มพร้อม ๆ กับแสงที่มาจากตัวแสงอ้างอิงหลอดพีเอ็มจะทำหน้าที่คล้ายตัวมิกเซอร์ ซึ่งจะรวมสัญญาณแสงทั้งสองและสร้างเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน โดยความถี่ของลำแสงอ้างอิงจะยังคงเท่าเดิม แต่ความถี่ของแสงที่ได้จากการกระเจิงนั้นจะความถี่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะเป็ผลโดยเร็วของของไหล (ปรากฏการณ์ ดอปเปอร์) ซึ่งจะถูกวัดโดยทางอ้อมผ่านทางเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ที่มีค่าความละเอียดสูง ๆ



รูปที่ ๑.๑๐ แสดงการจัดการทดลองเพื่อวัดความเร็วคอปเพลอร์ของไหลโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่

๖. การประยุกต์ ใช้งานอื่น ๆ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ได้อีกเป็นอันมาก เช่น ใช้วัดสัญญาณรบกวน (Random Noise) ใช้ในการวัดการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference ; EM) ของวงจรไฟฟ้า ใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนเนื่องจากการมอดูเลตภายใน (Internodulation Distortion) ของวงจรขยาย เป็นต้น

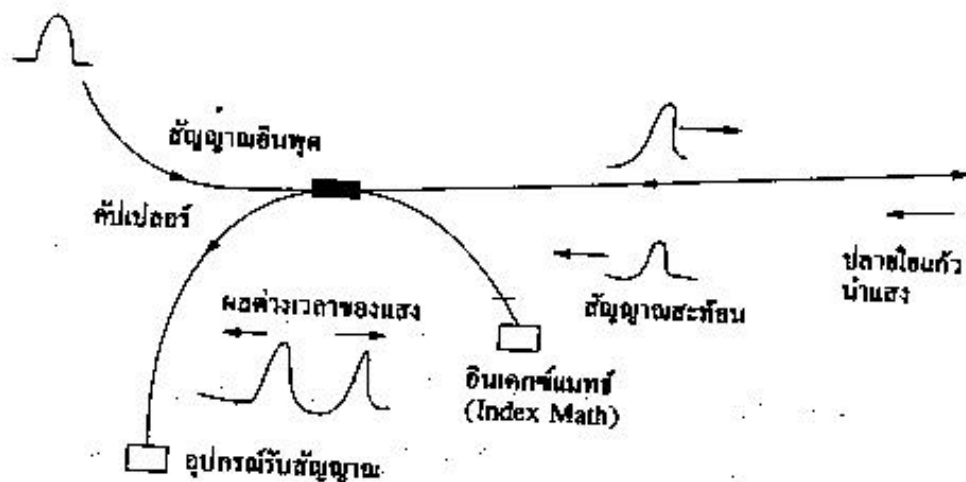
### ๓.๖.๑.๓ เครื่องตรวจสอบใยแก้วนำแสงโอทีดีอาร์

#### ๑. เครื่องมือวัดการสะท้อนกลับเชิงเวลา

เมื่อสัญญาณคลื่นถูกส่งผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่รู้ความเร็ว เช่น เมื่อคลื่นแสงเดินทางในอากาศหรือในน้ำ คลื่นจะเคลื่อนที่โดยมีความเร็วแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางนั้น ๆ จากหลักการดังกล่าวนำมาสร้างเครื่องโซนาร์ (Sonar) ซึ่งสามารถบอกตำแหน่งหรือบอกระยะทางของวัตถุที่อยู่ลึกลงไปในน้ำได้โดยบันทึกเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางไปและกลับ จากเรือไปยังวัตถุใต้น้ำและสะท้อนกลับข้างเรืออีกครั้งและทราบความเร็วของเสียงในน้ำ ในระบบเรดาร์ก็เช่นกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งออก

ไปเป็นพัลส์จากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังวัตถุ ทำการตรวจวัดจำนวนพัลส์ของคลื่นที่สะท้อนกลับจากวัตถุ แล้ววัดเวลาหน่วง (Time Delay) ระหว่างพัลส์ที่ส่งไปและพัลส์ที่ได้รับจากกระสะท้อนกลับก็จะสามารถบอกระยะของตำแหน่งวัตถุได้เช่นกัน

สัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้าที่เดินทางในสายนำสัญญาณด้วยความเร็วคงที่ (ประมาณ ๙๐% ของความเร็วแสงที่เดินทางในสุญญากาศ) เมื่อสัญญาณเดินทางมาถึงปลายทาง จะมีสัญญาณบางส่วนสะท้อนกลับทางเดิม ถ้าทราบค่าความเร็วของพัลส์ที่เดินทางภายในสายและรู้เวลาไปและกลับก็จะสามารถบอกระยะทางระหว่างปลายทั้งสองได้ จากกระบวนการการนำสัญญาณเข้าสู่ปลายอินพุตตรวจวัดการสะท้อนกลับ และใช้เวลาที่แตกต่างกันระหว่างสัญญาณที่ถูกส่งเข้าและสะท้อนกลับที่ปลายอีกด้านหนึ่งสามารถบอกระยะทางระหว่างปลายทั้งสองได้ วิธีการดังกล่าวเรียกว่าเครื่องมือวัดการสะท้อนกลับเชิงเวลา (Time Domain Reflectometry ; TDR)



ภาพที่ ๔-๘๒ แสดงพัลส์ของแสงที่เดินทางไปและกลับภายในสายสัญญาณ

วิธีการดังกล่าวไม่สามารถตรวจวัดเวลาจากพัลส์ส่งไปยังปลายสายได้โดยตรงแค่พิจารณาจากครั้งหนึ่งของระยะเวลาระหว่างระยะทางที่ตรวจวัด ดังนั้นความยาวของสายอาจจะได้จากการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ระยะทาง} &= \text{ความเร็ว} \times \text{เวลา} \\ &= \text{ความเร็ว} \times (\text{ผลต่างของเวลา}) / ๒ \end{aligned}$$

## ๒. การวัดการสะท้อนของแสงเชิงเวลา

เมื่อคลื่นแสงถูกส่งเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงพัลส์ของแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงด้วยความเร็วที่ขึ้นกับดัชนีหักเหของแสงของเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นสายส่ง ซึ่งตัวดัชนีหักเหของแสงเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศกับความเร็วแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อพัลส์ของแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วนำแสงเคลื่อนที่มาถึงบริเวณปลายทาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับมายัง

ตัวรับสัญญาณแสงที่อยู่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง เครื่องมือที่อาศัยหลักการวัด การสะท้อนของแสงเชิงเวลาสามารถตรวจวัดพัลส์ของแสงที่สะท้อนกลับและคำนวณความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง โดยพิจารณาดัชนีหักเหแสงของคุณสมบัติของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำการตรวจวัดถูกนำมาสร้างเป็นเครื่อง โอ ที ดี อาร์ เพื่อใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในเส้นใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาว โดยนำปลายคอนเนคเตอร์ (Connector) ด้านหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการวัดต่อเข้ากับเครื่อง โอ ที ดี อาร์

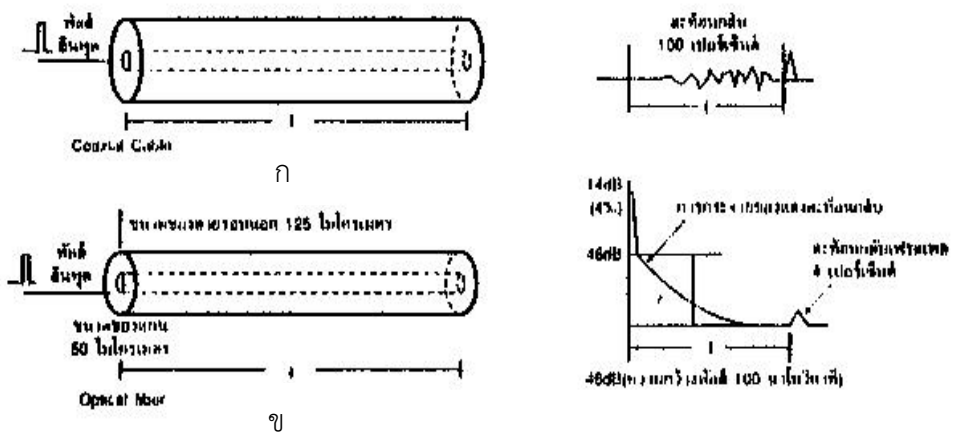
### ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จากเครื่อง โอ ที ดี อาร์

- ๑ สามารถตรวจวัดความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง
- ๒ สามารถตรวจวัดค่าการลดทอนกำลังของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง เช่น
  - ๒.๑ การลดทอนกำลังของแสงรวมของเส้นใยแก้วนำแสงตลอดทั้งเส้น
  - ๒.๒ การลดทอนกำลังของแสงต่อหน่วยความยาว หน่วย
  - ๒.๓ การลดทอนกำลังของแสงที่แต่ละตำแหน่ง
- ๓ สามารถตรวจวัดค่าการสูญเสียกำลังของแสงอันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อ
- ๔ สามารถบอกได้ว่าการเชื่อมต่อแบบใดบ้างในสายทั้งเส้น
- ๕ สามารถบอกระยะทางที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่ง
- ๖ สามารถตรวจสอบและค้นหาตำแหน่งที่มีปัญหาภายในเส้นใยแก้วนำแสง เช่นมีการขาดหรือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้น

### หลักการทำงานของเครื่องโอ ที ดี อาร์

โดยทั่วไปเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบหารอยตำหนิในสายเคเบิลชนิดแกนร่วม (Coaxial Cable) สามารถกระทำได้โดยการส่งสัญญาณในรูปพัลส์ (Pulse) ที่ปลายด้านหนึ่งของสายเคเบิล และทำการตรวจวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากรอยตำหนิที่เกิดขึ้นภายในเส้นใยแก้วนำแสง (การสะท้อนกลับของสัญญาณดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางของสัญญาณที่บริเวณรอยตำหนิซึ่งสัญญาณที่สะท้อนกลับจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเด่นชัด) โดยการตรวจวัดจะสนใจเวลานับจากมีการส่งสัญญาณไปจนกระทั่งสัญญาณสะท้อนกลับมาถึงด้านอินพุตเดิม นอกจากนี้ถ้าทราบความเร็วของสัญญาณที่วิ่งในสายเคเบิล ก็จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งของรอยตำหนิได้





ภาพที่ ๔-๘๓ (ก) หลักการ TDR สำหรับ Coaxial Cable และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณที่สะท้อนกลับ (แกนตั้ง และระยะทาง แกนนอน)

(ข) หลักการ TDR สำหรับ Optical Fiber และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่สะท้อนกลับ (แกนตั้ง) และระยะทาง (แกนนอน)

เทคนิคดังกล่าวที่ชื่อเฉพาะว่า Time Domain Reflectometry (TDR) ซึ่งหมายถึงวิธีการที่ให้สัญญาณเข้าไปทางด้านอินพุตของตัวนำสัญญาณ และทำการวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับพร้อมจับเวลา (Time Delay) ระหว่างการส่ง และรับ สัญญาณซึ่งสามารถนำค่า Time Delay ที่ได้พร้อมกับความเร็วของสัญญาณที่วิ่งในตัวกลางมาคำนวณหาระยะทาง ณ ตำแหน่งที่สัญญาณสะท้อนกลับมา ดังนั้นถ้าสัญญาณสะท้อนกลับมาจากปลายของสายตัวนำสัญญาณ ระยะทางที่คำนวณได้ก็คือความยาวของตัวนำสัญญาณนั่นเอง

หลักการของ TDR ไว้ในภาพที่ ๔-๘๓ (ก) เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้กับใยแก้วนำแสงด้วย และด้วยเหตุที่สัญญาณที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นสัญญาณแสงโดยอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบจะทำการส่งสัญญาณแสงในลักษณะของพัลส์เข้าไปยังเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการตรวจสอบเทคนิคนี้จึงถูกเรียกให้เฉพาะลงไปว่า Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) ดังแสดงหลักการของ OTDR ไว้ในภาพที่ ๔-๘๓ (ข) เนื่องจากค่า Time Delay ที่วัดโดย OTDR เป็นช่วงเวลาที่สัญญาณใช้เคลื่อนที่ไปและกลับ (โดยประมาณ) ดังนั้นช่วงเวลาที่สัญญาณแสงใช้เคลื่อนที่ไปก็จะเป็นครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด

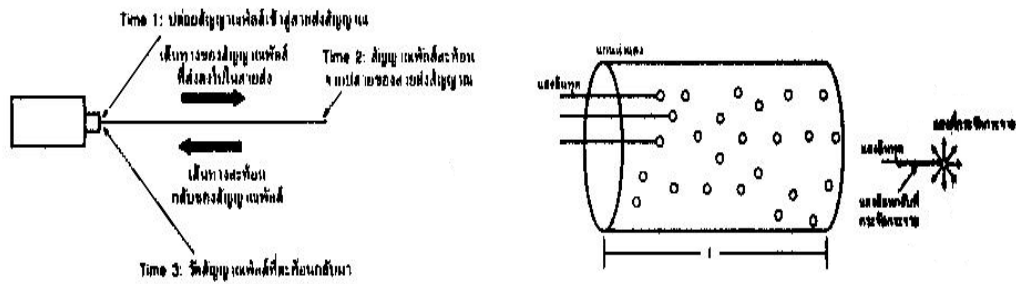
ซึ่งก็คือ  $(\frac{1}{2})(\text{Time } 3 - \text{Time } 1)$

ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๒ ดังนั้นความยาวของตัวนำสัญญาณสามารถหาได้จากสมการ

ระยะทาง = (ความเร็ว x Time 3 - Time 1/2)

โดยในที่นี้ความเร็วของสัญญาณแสงในตัวกลาง จะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางแสงที่แสงเดินทางผ่านซึ่งหาได้จาก

ความเร็วของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง = ความเร็วของแสงในสุญญากาศ / ดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้ว



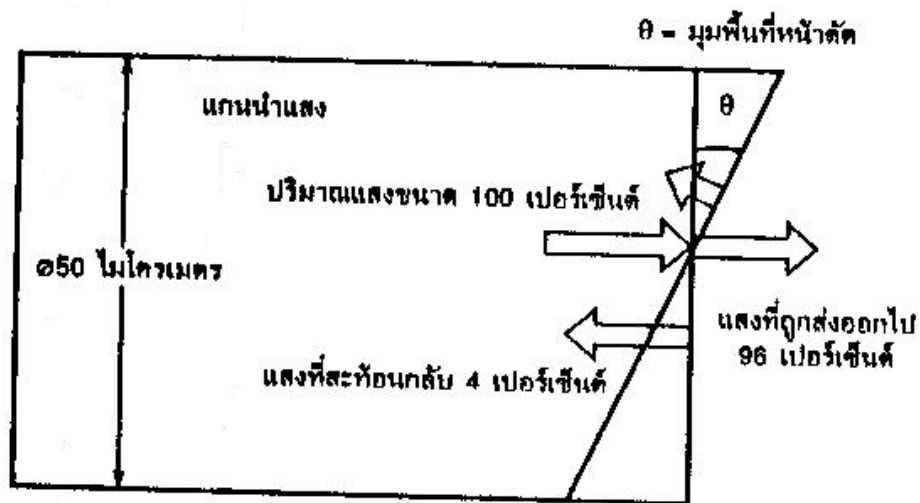
ภาพที่ ๔-๘๔ แสดงเวลาต่างๆ ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ และ ลักษณะของ Scattering Objects ภายในเส้นใยแก้วนำแสงและทิศทางของ Scattering Light และ Back Scattering Light

OTDR จะอาศัยการวัดกำลังของแสงที่กระจัดกระจาย (Scattering) กลับจากภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยการกระจัดกระจายของแสงนี้อาจเกิดเนื่องมาจากความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอของเนื้อสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการผลิต โดยขณะที่กำลังจะดึงเส้นใยแก้วนำแสงจากแท่ง Preform จำเป็นจะต้องให้ความร้อนแก่แท่ง Perform ซึ่งบริเวณ ณ ที่ให้ความร้อน โมเลกุลของสารมีการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบ (Random) หลังจากที่ทำภารกิจบริเวณปลาย Perform จนได้เป็นเส้นใยแก้วนำแสงออกมาแล้ว เส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวจะมีอุณหภูมิลดลง ทำให้โมเลกุลของเนื้อสารเคลื่อนที่ช้าลงจนกระทั่งหยุดในที่สุด โดยตำแหน่งของโมเลกุลที่หยุดก็เป็นแบบไม่เป็นระเบียบเช่นกัน จึงมีผลให้เนื้อสารมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ กันตลอดเส้นหรืออาจกล่าวได้ว่า ทำให้มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน คล้ายกับมีสารเจือปนกระจายอยู่ตลอดความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อมีแสงเดินทาง ผ่านบริเวณดังกล่าว จึงเกิดการกระจายของแสงขึ้น ซึ่งการกระจายแสงลักษณะนี้เรียกว่า เป็นการกระจายแบบ Rayleigh (Ray Leigh Scattering ) พบได้ตลอดความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง

ทิศทางของแสงที่เกิดการกระจายแบบ Rayleigh นี้มีโอกาสเกิดได้ทุกทิศทางดังแสดงไว้ในภาพด้านบน แต่จะมีแสงบางส่วนที่กระจัดกระจายกลับไปยัง OTDR แสงที่สะท้อนออกไปในลักษณะนี้เรียกว่า Back Scattering Light โดยจะมีขนาดของกำลังแสงลดลงเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อเทียบกับระยะทางที่สัญญาณแสงใช้ในการเดินทางไปและกลับ โดยทั้งไปขนาดของแสงที่สะท้อนกลับเทียบกับขนาดของสัญญาณที่ OTDR ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงจะอยู่ในช่วง ๕๐-๖๐ เดซิเบล

Rayleigh Scattering เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความยาวช่วงในคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร สาเหตุของ Rayleigh Scattering เกิดมาเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางของแสง (Refractive Index Fluctuation) ขณะที่เส้นใยแสงเย็นตัวลง โดยการลดทอนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุดังกล่าวยังไม่สามารถจำกัดออกไปได้

ด้วยเทคนิคการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงในปัจจุบันทิศทางการกระจายของแสงที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปได้ทุกทิศทาง จากการศึกษาพบว่า การลดทอนของแสงเนื่องจาก Rayleigh Scattering แปรผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ดังนั้น ถ้ายังใช้แสงที่มีความยาวคลื่นยาวมากการลดทอนของสัญญาณก็จะลดลง การสะท้อนของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของแสงเช่นการสะท้อน ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อสารกับอากาศ ดังแสดงลักษณะไว้ในรูป

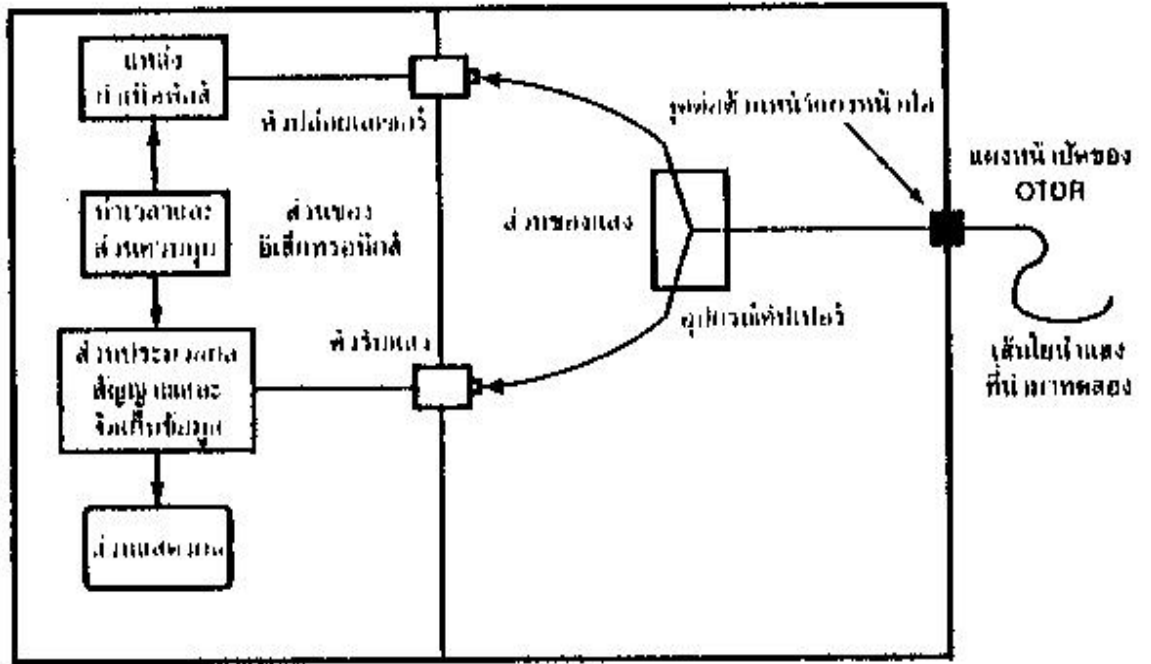


ภาพที่ ๔-๘๕ การสะท้อนกลับของแสงที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางแก้วกับอากาศ

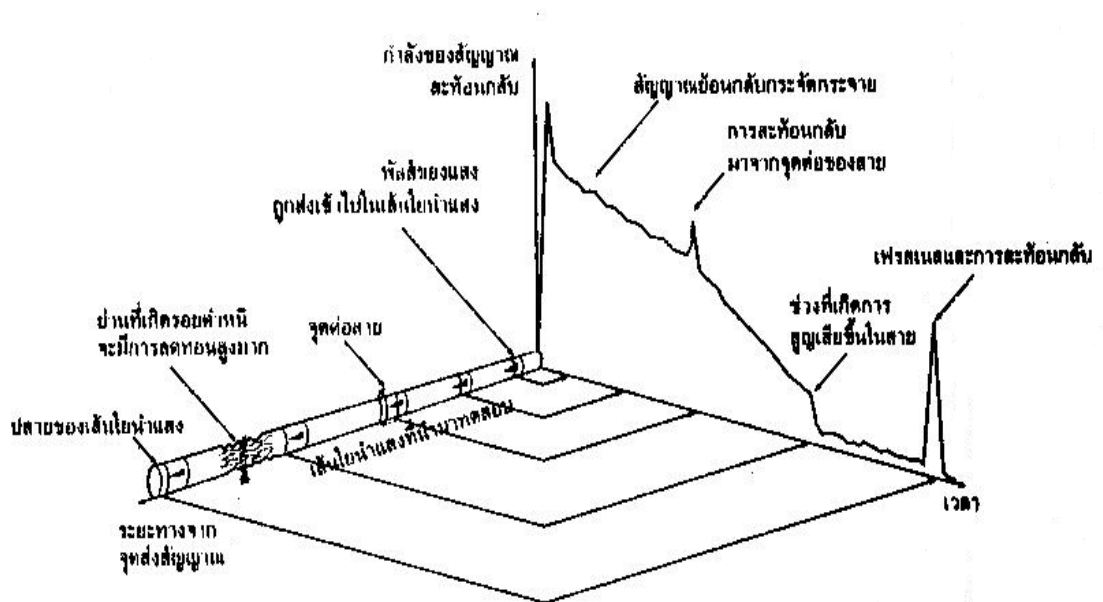
ถ้าหน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสงตั้งฉากกับทางเดินของแสง (หรือแกนของเส้นใยแก้วนำแสง) สัมประสิทธิ์ของแสงสะท้อนจะไม่เกิน 4% (13.98 dB) ลักษณะการสะท้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การสะท้อนแบบเฟรสเนล (Fresnel Reflection) ซึ่งลักษณะการสะท้อนแบบเฟรสเนลสามารถพบได้ที่รอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสง ๒ เส้นที่เชื่อมต่อกันด้วยหัวต่อ รวมทั้งจุดต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยแก้วนำแสงและที่ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอีกด้วย

บล็อกไดอะแกรมของ OTDR จากรูป แสดงถึงส่วนประกอบหลักของ OTDR โดยโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนย่อย คือส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และส่วนอุปกรณ์ทางแสงซึ่งทั้งสองส่วนจะทำงานสัมพันธ์กันเริ่มจากในส่วนของตัวกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตสัญญาณพัลส์ไปขับเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) ให้ปล่อยแสงออกมาในลักษณะของพัลส์ จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งเข้าไปยังปลายด้านหนึ่งของตัวคัปเปอร์ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งผ่านสัญญาณแสงไปยังเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการทดสอบ และรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเส้นใยแก้วนำแสงกลับมายังหัววัดแสง (Detector) สัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมานี้เกิดจากการสะท้อนแบบเฟรสเนล ณ จุดต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยแก้วนำแสง รวมถึงปลายเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อระหว่าง

เนื้อสารกับอากาศ และบริเวณจุดต่อต่างๆ และการกระจัดกระจายกลับที่เกิดจากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh Scattering ตลอดเส้นใยแก้วนำแสงขณะที่แสงเดินทางตามความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงไว้ในรูป



ภาพที่ ๔-๘๖ โครงสร้างของ OTDR



ภาพที่ ๔-๘๗ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงสะท้อนกลับตามความเส้นใยแก้วนำแสงกับเวลารวมถึงสาเหตุของการเกิดแสงสะท้อนกลับ

สัญญาณแสงที่วัดได้นี้จะถูกนำมาประมวลผลโดยส่วนของ Signal Ac Quisition & Processing โดยอาศัยข้อมูลในส่วนของ Timing & Control จากนั้นผลที่ประมวลได้จะแสดงออกมาในรูปของการลดทอนของสัญญาณตามความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง จากรูป สัญญาณแสงจาก OTDR ถูกส่งเข้าทางด้านปลายของเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งวิธีการดังกล่าวทำให้เกิดการสะท้อนของแสงในลักษณะของการสะท้อน แบบเฟรสนเอลทำให้มีกำลังของแสงที่สะท้อนกลับมาอาจจะมีผลทำให้หัววัดแสง (โดยส่วนใหญ่ใช้ Avalanche Photo Diode: APD) เกิดการอิ่มตัวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง มีผลทำให้ APD ไม่สามารถรับรู้สัญญาณที่เกิดขึ้นตามมาหลังจากเกิดจากอิ่มตัวไปชั่วขณะหนึ่งทำให้เกิดสิ่งๆ เรียกว่า Dead Zone ขึ้น

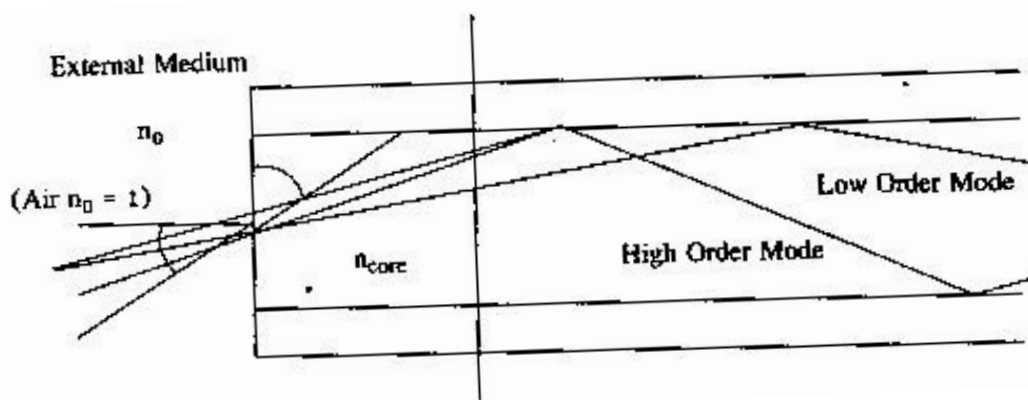
หลักการการทำงานของเครื่องโอ ที ดี อาร์ ในกระบวนการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงชนิดแก้วที่ทำจากทรายซิลิกา โดยการหลอมด้วยความร้อนสูงและทำให้เย็นลงให้อยู่ในสภาพของแข็งซึ่งพบว่าแก้วยังไม่สามารถคงรูปเป็นของแข็งได้ ต้องเติมสารเจือลงไปทำให้แก้วแข็งแรงขึ้นและให้มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ความหนาแน่นที่ไม่เท่ากันนี้เองทำให้มีดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแตกต่างกันในแต่ละส่วนของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงมีส่วนประกอบ ๒ ส่วนคือ ส่วนของแกน และหลอด แต่ภายในส่วนที่แสงเดินทางอยู่ ภายในนั้นคือส่วนของแกนก็ยังมีดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ไม่เท่ากันบ้างเล็กน้อยเนื่องจากความหนาแน่นของตัวกลางที่ไม่เท่ากันนี้เอง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระเจิงกลับในระหว่างที่แสงเดินทางอยู่ภายในได้ เครื่องโอ ที ดี อาร์อาศัยหลักการสะท้อนของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงเทียบกับเวลาซึ่งแสงจะเดินทางย้อนกลับมายังด้านต้นทางที่แสงเข้าเนื่องมาจากสาเหตุ ๒ ประการคือ การกระเจิงกลับ (Back scattering) และการสะท้อนแบบเฟรสนเอล (Fresnel Reflection)

๑. การกระเจิงกลับ

เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในแกนของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีดัชนีหักเหไม่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต หรือกระทบอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงจะมีแสงบางส่วนสะท้อนหรือกระเจิงในแต่ละทิศทาง ปรัชการณนี้เรียกว่าการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering) โดยความเข้มของแสงของการกระเจิงเป็นปฏิกิริยาตามกับปริมาตรของอนุภาคตามกำลังสอง และเป็นปฏิกิริยากลับความยาวคลื่นของแสงกำลังสี่ ดังสมการด้านล่าง ซึ่งแสงกระเจิงในทุกทิศทาง และมีแสงบางส่วนกระเจิงกลับมายังตัวรับสัญญาณแสงซึ่งอยู่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง การสะท้อนของแสงลักษณะนี้เรียกว่าการกระเจิงกลับ (Backscatter) ซึ่งดูได้จากความสัมพันธ์

$$S_R \propto 1 / \lambda^4 \tag{9.8}$$

เมื่อ  $S_R$  คือ การกระเจิงแบบเรย์ลี  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง



ภาพที่ ๔-๘๘ แสดงการเดินทางสะท้อนกลับของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากการกระเจิงกลับแบบเรย์ลี และการสะท้อนแบบเฟรสเนล

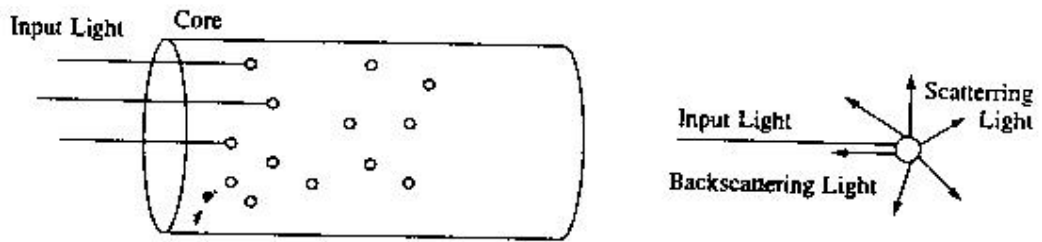
๒. การสะท้อนแบบเฟรสเนล (Fresnel Reflection)

เนื่องจากแสงเดินทางผ่านบริเวณรอยต่อที่มีดัชนีหักเหของแสงแตกต่างกัน เช่น บริเวณรอยต่อของปลายเส้นใยแก้วนำแสงกับอากาศ หรือการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงบางแบบจะเกิดการสะท้อนกลับ โดยค่าการสะท้อนแบบเฟรสเนลเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$R_F = \left\{ (n_1 - n_0) / (n_1 + n_0) \right\}^2 \dots\dots\dots (9.9)$$

เมื่อ  $n_0$  คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ  
 $n_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแกนภายในเส้นใยแก้วนำแสง

การกระเจิงกลับของแสงนั้นเป็นเพียงส่วนน้อยของปริมาณความเข้ม แสงทั้งหมดหรือระดับกำลังของแสง (Power Level) ที่เดินทางเข้ามาในเส้นใยแก้วนำแสง การตรวจวัดแสงที่กระเจิงกลับมาสัมพันธ์กับเวลา (ซึ่งแปลงกลับมาเป็นระยะทางในเส้นใยแก้วนำแสง) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแสงที่กระเจิง กลับมาสัมพันธ์กับเวลาจะสามารถแสดงระดับกำลังของแสงที่แต่ละตำแหน่งของเส้นใยแก้วนำแสงที่ตรวจวัด (Fiber Signal)



ภาพที่ ๔-๘๙ แสดงการกระเจิงกลับของแสง

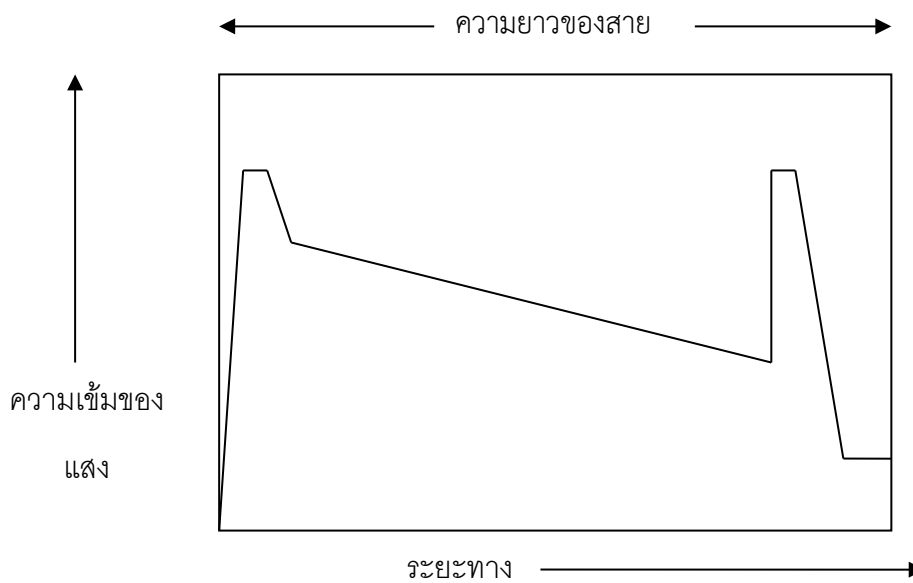
รูปแบบของการกระเจิงกลับของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงแสดงดังรูป โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น จากรูปแสดงความหมายจากด้านซ้ายไปยังด้านขวา ที่ตำแหน่งเริ่มต้น (ด้านซ้าย) แสดงตำแหน่งปลายคอนเนคเตอร์ของเส้นใยแก้วนำแสงต่อกับแหล่งกำเนิดแสงของเครื่องโอ ที ดี อาร์ ซึ่งระหว่างรอยต่อดังกล่าวเป็นช่องอากาศ เมื่อแสงเดินทางผ่านจะเกิดการสะท้อนกลับมาแบบเฟรสเนลประมาณ ๔% (ที่รอยต่อของตัวกลางเส้นใยแก้วนำแสงกับอากาศ) อธิบายได้จากทฤษฎีของสัญญาณที่เกิดขึ้นบนหน้าจอโอ ที ดี อาร์ และมีลักษณะเดียวกับตำแหน่งปลายของสาย (ด้านขวา) ที่ตำแหน่งต่อมาความชันคงที่อธิบายได้ว่าระดับกำลังของแสงลดลงอย่างคงที่สัมพันธ์กับความยาว นั่นคือขณะนั้นเกิดการลดทอน ความเข้มของพัลส์ของแสงที่ลดลงนี้จะลดลงตามความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง หากทำการเปรียบเทียบระดับกำลังของแสงที่ระหว่างตำแหน่ง ๒ ตำแหน่งในเครื่องโอ ที ดี อาร์ ก็จะสามารถบอกค่าการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างตำแหน่ง ๒ ตำแหน่งในเส้นใยแก้วนำแสงได้

โดยปกติหากโครงสร้างภายในของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหสม่ำเสมอ การลดทอนของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงจะแสดงความชันอันเนื่องมาจากการกระเจิงกลับแบบเรย์ลี มาหักเหของเครื่องโอ ที ดี อาร์ เป็นเส้นตรงคงที่ หากพบว่าความชันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันหันแสดงว่าขณะนั้นตรวจพบบางสิ่งที่ทำให้ระดับการกระเจิงกลับเปลี่ยนแปลง เช่นตรวจพบจุดที่เชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสง และสามารถบอกชนิดของจุดที่เชื่อมต่อได้ด้วยซึ่งให้ผลแสดงแบบเครื่องโอ ที ดี อาร์ แตกต่างกัน

### ข้อพิจารณาในการปฏิบัติของ OTDR

ภายในเส้นใยแก้วนำแสงเทียบกับเวลา (หรือระยะทาง) ซึ่งบอกลักษณะทางกายภาพของเส้นใยแก้วนำแสงได้เป็นอย่างดีโดยในการตรวจวัดเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชุดก็จะได้ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับที่แตกต่างกันออกไป สัญญาณดังกล่าวจึงเรียกว่า Fiber Signature

ในรูป เส้นตรงที่มีความชันคงที่ลากจากซ้ายไปขวาแสดงถึงปริมาณการสะท้อนกลับของแสงภายในใยแก้วนำแสง สิ่งที่น่าสังเกตก็คือ ค่ากำลังของแสงที่แสดงในแนวแกนตั้งเป็นกำลังของแสงที่



ภาพที่ ๔-๙๐ แสดง Fiber Signature แบบง่าย ๆ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสงที่สะท้อนกลับกับระยะทาง

สะท้อนกลับจากจุดต่าง ๆ ตามความยาวเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าที่ระยะทางไกลออกไปจาก OTDR กำลังของแสงที่สะท้อนกลับมีขนาดเล็กลง โดยปริมาณของกำลังแสงที่ลดลงต่อช่วงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง บอถึงการลดทอนสัญญาณแสงสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงที่กำลังทดสอบ

สำหรับบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณนั้น มีการสะท้อนของแสงเช่นกัน แต่กลไกของการสะท้อนเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของสัญญาณ หรืออาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง ทำให้ปริมาณของแสงสะท้อนเกิดขึ้นมากกว่า การสะท้อนกลับของแสงในแบบข้างต้น เป็นตัวอย่างของ Fiber Signature ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณที่วัดได้จาก OTDR ในทางปฏิบัติจากรูปได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพที่มีบนเส้นใยแก้วนำแสงกับเวลาหรือระยะทางลักษณะทางกายภาพบนจุดต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสง ประกอบด้วย

- ๑ จุดเชื่อมต่อของหัวต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยแก้วนำแสง
- ๒ จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง ๒ เส้นเข้าด้วยกัน โดยการใช้ความร้อน (Fusion Splicing)
- ๓ จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง ๒ เส้นเข้าด้วยกัน โดยการใช้หัวต่อหรือ Mechanical Splice
- ๔ จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง ๒ เส้นเข้าด้วยกัน โดยการใช้ความร้อน
- ๕ จุดปลายของเส้นใยแก้วนำแสง

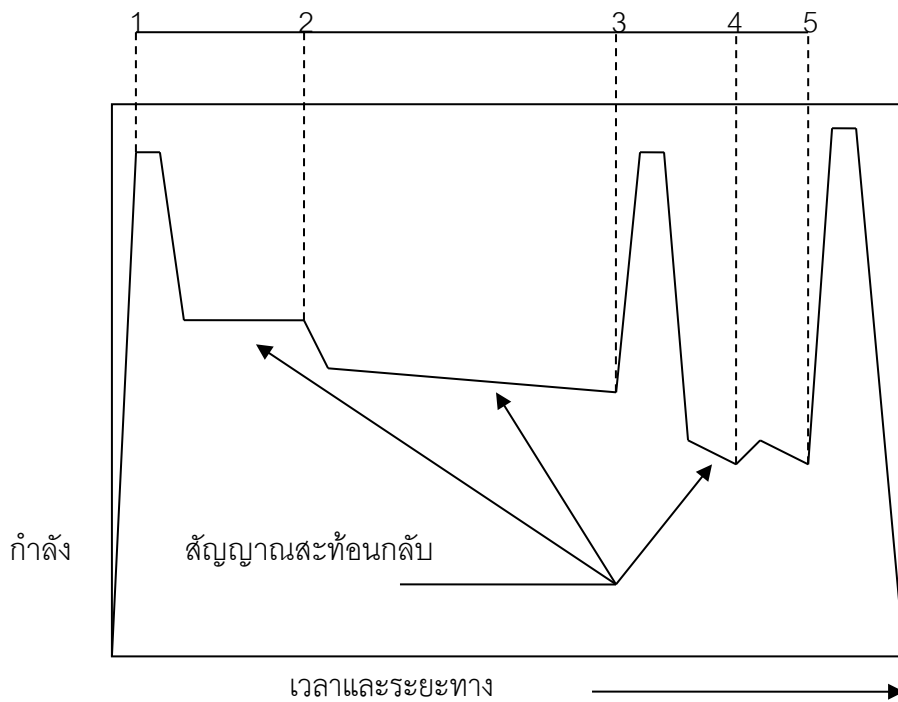


ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไปดังกล่าว มีผลทำให้กำลังของแสงที่สะท้อนกลับมายังหัววัดแสง มีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะที่แตกต่างกันดังกล่าว

โดยทั่วไปลักษณะการลดลงของกำลังแสงที่สะท้อนกลับมายัง OTDR สามารถแสดงเป็นเส้นตรงตามรูปที่ผ่านมา เพราะว่าการสะท้อนกลับของแสงในลักษณะดังกล่าวเกิดจากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh ซึ่งทำให้เกิดการกระจัดกระจายของแสงอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย นำแสง แต่เมื่อใดก็ตามที่ความชันของสัญญาณสะท้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดแสดงว่าพัลส์แสงจะต้องเคลื่อนที่ผ่านบริเวณหนึ่งบนเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำให้ปริมาณของแสงที่สะท้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก บริเวณดังกล่าวอาจเป็นบริเวณที่เป็นจุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสงกับ OTDR หรือจุดเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสง ๒ เส้น หรือบริเวณปลายสายของเส้นใยแก้วนำแสง

ตามรูป การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ จุดที่ ๑.๓ และ ๕ เกิดมาจากสาเหตุที่คล้ายคลึงกัน นั่นก็คือการเปลี่ยนแปลงของชนิดตัวกลางของแสง(หรือค่าดัชนีหักเหของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน) บริเวณดังกล่าวจะมีช่องว่างอากาศเล็กๆ เกิดขึ้น ทำให้ปริมาณแสงที่สะท้อนกลับไปยังหัววัดแสงใน OTDR มีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณของแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการเชื่อมต่อแบบใช้อุปกรณ์ช่วย เช่น หัวต่อ จึงเรียกว่าเป็นการเชื่อมต่อแบบ Mechanical แต่ในบางครั้งก็เรียกว่าเป็น Reflective Splice ก็เพราะมีการสะท้อนของแสงเกิดขึ้นที่รอยต่อนั่นเอง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ จุดที่ ๒ และ ๔ ไม่ทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนกลับในรูปของพัลส์ตามแบบกรณีข้างต้น เนื่องจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธี Fusion Splicing โดยใช้ความร้อน ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเชื่อมติดกันเสมือนเป็นเนื้อเดียว แต่ในทางปฏิบัติ ณ จุดที่เชื่อมต่อก็ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง (ณ รอยต่อ) ที่แตกต่างจากค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาเชื่อมต่ออยู่บ้าง รวมทั้งคุณสมบัติบางอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาเชื่อมต่อกันมีความแตกต่างกัน จึงทำให้สัญญาณที่สังเกตได้อาจมีทั้งลดลง (Loss) และเพิ่มขึ้น (Increase) จุดเชื่อมต่อในลักษณะนี้ นอกจากจะเรียกว่า Fusion Splice แล้ว อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Non -Reflective Splice



ภาพที่ ๔-๙๑ แสดง Fiber Signature ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพบนเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันตลอดเส้น

### สมการอย่างง่ายของกำลังสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับทิศทาง

เมื่อพัลส์ของแสงถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง พัลส์ดังกล่าวจะมีขนาดลดลงตามขนาดความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง ถ้าพิจารณาว่ากำลังของสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงมีขนาด  $P(o)$  ดังนั้นกำลังของสัญญาณแสงดังกล่าวที่ระยะทาง  $l$  (วัดจากปลายของเส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกับ OTDR) สามารถเขียนได้เป็น

$$P(l) = P(o) \exp(-\alpha_1 l) \quad \dots(๓)$$

โดยที่  $\alpha_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่อหน่วยความยาว

เมื่อพิจารณากำลังของแสง  $P(l)$  ที่กระจัดกระจายย้อนกลับมายังหัววัดแสงของ OTDR กำลังของแสงที่ตรวจวัดได้จะเป็นไปตามสมการ

$$P_B(l) = (1/2) P(o) S \alpha_s V_g W \exp(-2\alpha_1 l) \quad \dots(๔)$$

โดย  $P_B(l)$  คือ กำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับทิศทาง

$P(o)$  คือ กำลังของแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง

S คือ แฟกเตอร์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ (มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้)

$\alpha_s$  คือ สัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh

$V_g$  คือ ความเร็วของกลุ่มคลื่นแสง (Group velocity)

W คือ ความกว้างของพัลส์แสง (Pulse width)

$\alpha_1$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนต่อหน่วยความยาว

l คือ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง

ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ ของเส้นใยแก้วนำแสงแบบ step index multimode สามารถเขียนให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังนี้

$$S = [\pi(NA)^2]/[4\pi n_1^2] = (NA)^2/[4n_1^2] \dots (5)$$

โดยที่ NA คือ อะเปอร์เจอร์เชิงตัวเลขของเส้นใยแก้วนำแสง

$N_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้วนำแสง

ความหมายของสมการ (๕) คือ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนเส้นใยแก้วนำแสง เช่นที่ตำแหน่งห่างจากจุดต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงกับ OTDR มาเป็นระยะทางความยาว L จะเกิดมีการกระจัดกระจายของแสงขึ้นเนื่องจากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh ( $\alpha_s$ ) แสงสามารถกระจัดกระจายได้หลายทิศทาง แต่จะมีบางส่วนที่กระจัดกระจายย้อนกลับทิศทางมายังหัววัดแสงของ OTDR กำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับมานั้นจะมีปริมาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแฟกเตอร์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ (S) กำลังของแสงมีการลดทอนตามเส้นใยแก้วนำแสงทั้งขาไปและขากลับ ทำให้ลดลงด้วย  $\exp(-2\alpha_1 L)$

ตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการตรวจสอบเป็นชนิด Step Index Multimode ที่มีคุณสมบัติดังนี้

๑  $NA = 0.2$

๒ ดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้วนำแสง = 1.5

๓ สัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh =  $0.7^{-1} \text{ km}$

๔ ความกว้างของพัลส์แสง = 50 ns

๕ ความเร็วของแสง =  $2.998 \times 10^8$  m/s

จะสามารถหาค่ากำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ  $P_B(L)$  เทียบกับกำลังของแสงที่ส่งเข้าไป  $P(o)$  ในเส้นใยแสงได้ดังนี้

จากสมการ (๔) กำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ หาได้จาก

$$P_B(L) = (1/2)P(o) S \alpha_s V_g W \exp(-2\alpha_s L)$$

เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการหา  $P_B$  คือที่ด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงดังนั้น  $L = 0$

$$P_B(o) = (1/2)P(o) S \alpha_s V_g W \dots\dots(6)$$

เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงที่พิจารณา คือ Step Index Multimode จึงสามารถแทนที่สมการ (5) ลงใน S ของสมการ (6) ได้เป็น

$$P_B(o) = (1/2) \{[(NA)^2 \alpha_s W V_g] / [4n_1^2]\} P(o) \dots\dots(7)$$

เนื่องจาก  $V_g = C / n_1$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_B(o)/P(o) &= (1/2) \{[(NA)^2 \alpha_s W C] / [4n_1^2]\} \\ &= (1/2) \{[(0.2)^2 \times 0.7 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-9} \times 2.998 \times 10^8] / [4(1.5)^2]\} \\ &= 1.55 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

หรือหากคิดในหน่วยเดซิเบลจะได้เป็น

$$P_B(o)/P(o) = 10 \log_{10} 1.55 \times 10^{-5} = -48.1 \text{ เดซิเบล}$$

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่า ที่จุดอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสง จะมีกำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับมาน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าไป อย่างไรก็ตามอย่าสับสนกับปริมาณแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับแบบเฟรสนเอลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง

ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาทางด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสง กำลังของแสงที่สะท้อนกลับ (ในแนวตั้งฉากกับผิวรอยต่อ) เทียบกับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าไปจะหาได้จากสมการ

$$P_r(o)/P(o) = [(n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)]^2 \dots\dots(8)$$

โดยที่  $P_r$  คือ กำลังของแสงสะท้อน

$N_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ = 1.00

$N_2$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้วนำแสง = 1.50

$$P_r(o)/P(o) = [(1-1.5)/(1+1.5)]^2 = 0.04 \text{ หรือ } 4 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ผลลัพธ์ที่ได้หมายความว่า ถ้ามีแสงที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อ ๑๐๐ เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณแสงประมาณ ๔ เปอร์เซ็นต์สะท้อนกลับหรือคิดในหน่วยเดซิเบลจะได้เป็น -๑๓.๙๗ เดซิเบล ซึ่งค่าจากเดซิเบลทั้งสองที่ได้ จะเห็นว่ากำลังของแสงที่ได้จากการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล มีค่ามากกว่ากำลังที่ได้จากการกระจายย้อนกลับแบบ Rayleigh

### พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องทำการเซตเมื่อทำการวัดด้วยเครื่องโอ ที ดี อาร์ (OTDR)

เมื่อจะทำการตรวจสอบเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเครื่องโอ ที ดี อาร์ ทุกครั้ง ผู้ใช้เครื่องจะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์บางตัวที่เหมาะสมกับระบบที่กำลังทำการวัด ค่าดังกล่าวประกอบด้วย Wavelength (ความยาวคลื่นแสงที่ใช้), Refractive Index (ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง), Pulse Width (ความกว้างของพัลส์ที่ใช้), Fiber Range (ช่วงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่กำลังตรวจสอบ), Averaging (จำนวนครั้งของการเฉลี่ยค่าที่วัดได้), Back Scatter Coefficient (สัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ), Unit (หน่วยของการวัดความยาว) และ Scale (สเกลการวัด)

อย่างไรก็ตามค่าต่าง ๆ ที่ผู้ใช้ต้องทำการป้อนก่อนจะทำการวัด อาจมีความแตกต่างไปบ้างจากตัวอย่างที่ยกมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องโอ ที ดี อาร์ ที่กำลังใช้งานอยู่เช่นกัน ดังรูปแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไปและมีความหมายดังนี้

Wavelength เนื่องจากในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงอาจมีการใช้แสงซึ่งมีความยาวคลื่น ๑,๓๑๐ หรือ ๑,๕๕๐ นาโนเมตร ดังนั้นในการตรวจสอบเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเครื่องโอ ที ดี อาร์ จึงจำเป็นต้องเลือกความยาวคลื่นแสงที่ใช้ให้เหมาะสมด้วย

Refractive Index โดยทั่วไปค่าดัชนีหักเหจะได้จากผู้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งค่าดังกล่าวมีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางของเครื่องโอ ที ดี อาร์ เป็นอย่างมาก

Pulse Width ค่า Pulse Width ที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไปนี้ สามารถเลือกได้จากเครื่องโอ ที ดี อาร์ โดยมีหลักในการเลือกขึ้นอยู่กับ Resolution (จะอธิบายความหมายในตอนต่อไป) และความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำการตรวจวัด ในกรณีที่เลือก Pulse Width ที่กว้างมีผลทำให้กำลังของพัลส์แสงมีค่ามากจึงเป็นการเพิ่มความสามารถของเครื่อง โอ ที ดี อาร์ ให้วัดเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวมากได้ แต่ผลเสียก็คือทำให้ขนาดของ Dead Zone (จะอธิบายความหมายในตอนต่อไป) กว้างขึ้นและยากที่จะอธิบายความแตกต่างระหว่างรอยตำหนิ (Faults) บนเส้นใยแก้วนำแสงที่อยู่ใกล้ๆกัน ได้ (Resolution

ไม่ตี) ในกรณีที่เลือก Pulse Width ที่แคบเครื่อง โอ ที ดี อาร์ สามารถวัดเส้นใยแก้วนำแสงได้สั้นลง แต่ Dead Zone จะแคบและแยกความแตกต่างของจุดบกพร่องที่ใกล้ๆกันได้ดี (Resolution ดีขึ้น)

Fiber Rang การเลือก Fiberrang ควรจะเลือกให้ยาวกว่าความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่กำลังตรวจสอบเพียงเล็กน้อย ตัวอย่าง เช่น ถ้าเส้นใยแก้วนำแสงที่กำลังทำการวัดมีความยาว ๘๐ กิโลเมตรผู้ใช้ควรตั้งค่า Fiber Rang ไว้ที่ ๑๐๐ กิโลเมตร เนื่องจากถ้าป้อนค่า Fiber Rang ที่สั้นเกินไปจะทำให้สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากปลายของเส้นใยแก้วนำแสงปรากฏอยู่ ณตำแหน่งที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าโดยหลักการของเครื่อง โอ ที ดี อาร์ แล้วช่วงเวลาที่หัววัดแสงทำการวัดแสงที่สะท้อนมาจากภายในเส้นใยแก้วนำแสง จะสัมพันธ์กับ Fiber Rang ที่ตั้งไว้ ดังนั้นถ้าตั้งค่า Fiber Rang สั้นกว่าความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่แท้จริงช่วงเวลาที่หัววัดแสงเปิดรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาก็จะสั้นลงด้วยจึงเป็นเหตุให้สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากปลายเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งใช้เวลาในการเดินทางมากกว่าช่วงเวลาดังกล่าวไม่อาจถูกตรวจวัดได้ในเวลาที่ถูกต้องในทางตรงกันข้ามถ้าทำการเลือก Fiber Rang ให้ยาวเกินไปจะทำให้ช่วงเวลาที่หัววัดแสงเปิดรับแสงที่สะท้อนกลับมีเวลานานเป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ Ghosting ได้ (จะอธิบายความหมายในตอนต่อไป) และมีผลเสียอีกประการหนึ่งที่ได้เห็นได้ชัดเจนก็คือ การวัดในแต่ละครั้งก็จะใช้เวลามากขึ้นด้วย

**Averaging** เนื่องจากการวัดแต่ละครั้ง ค่าความเข้มของสัญญาณที่สะท้อนกลับอาจมีค่ากระจายอยู่รอบๆ หนึ่ง ดังนั้นเครื่องโอ ที ดี อาร์ บางเครื่องสามารถเลือกค่าเฉลี่ยที่วัดได้ภายในช่วงเวลา (Time Period) หรือตามจำนวนครั้งในการวัด (Sweeping Number)

**Back Scatter Coefficient** ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับเป็นอีกค่าหนึ่งที่ได้จากผู้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งค่าดังกล่าวจะนำมาใช้ในการคำนวณกำลังของสัญญาณแสงที่กระจายย้อนกลับ (ตามสมการ (๔))

**Unit** สำหรับเครื่องโอ ที ดี อาร์ บางเครื่องการแสดงหน่วยของความยาว เลือกได้ตามความต้องการ เช่น เมตร กิโลเมตร หรือ ไมล์ เป็นต้น

**Scale** ผู้ใช้สามารถเลือก Scale ที่เหมาะสมในการแสดง Fiber Signature ได้ โดยทั่วไปแกนตั้งจะแสดงถึงกำลังแสงที่หัววัดแสงวัดได้ เทียบกับกำลังแสงอินพุต เป็นหน่วยเดซิเบล และจะมี Scale เป็น dB/div ส่วนแกนนอกแสดงถึงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นหน่วยกิโลเมตรและจะมี Scale เป็น km/div

ในตอนแรกก็เป็นการกล่าวถึงวิธีการตรวจสอบหารอยตำหนิในเส้นใยแก้วนำแสงของเครื่องโอ ที ดี อาร์ และแสดงวิธีต่าง ๆ หาค่า ที่เกี่ยวข้อง อันเป็นการแสดงให้เห็นว่าความสามารถของเครื่องโอ ที ดี อาร์ ที่นำมาตรวจสอบสภาพของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงและให้ความสะดวกต่อ

ผู้ใช้งานมารวมทั้งตรวจสอบได้หลากหลายวิธีและหลากหลายชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงด้วยในตอนต่อไปนี้จะกล่าวถึงความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการตรวจสอบเส้นใยแก้วนำแสงและส่วนที่เหลืออย่างละเอียด

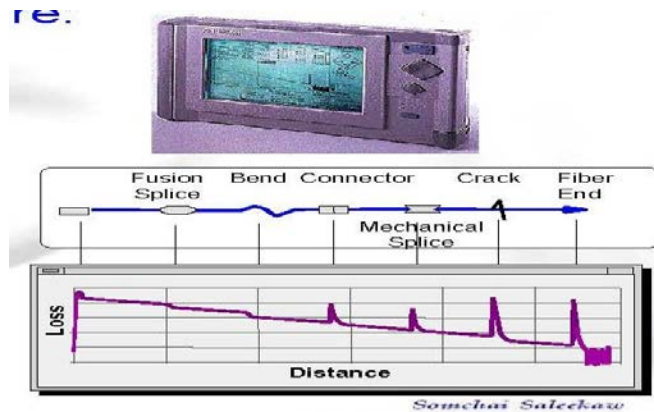
## การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง

การสูญเสียของกำลังแสงในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นเป็น ๒ ประเภท ขึ้นกับวิธีการเชื่อมต่อคือ

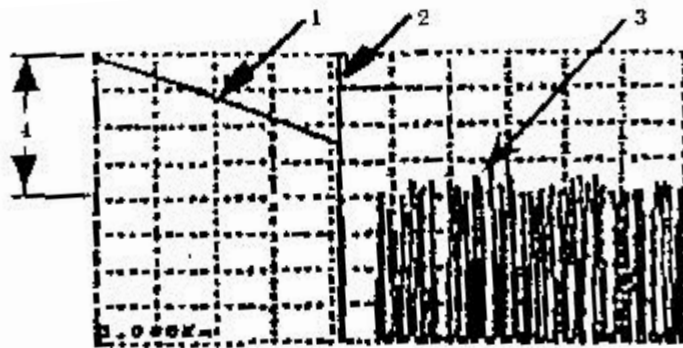
๑. การเชื่อมต่อเชิงกล (Mechanical Splice) กล่าวคือ เมื่อแสงเดินทางมาพบบริเวณช่องอากาศ (Gap) หรือมีการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่างเส้นใยแก้วนำแสง ๒ เส้นที่เชื่อมต่อกันอาจเกิดการสะท้อนที่บริเวณรอยต่อขึ้นได้ทำให้มีแสงเดินทางย้อนกลับมาได้บางส่วนมายังตัวรับสัญญาณแสงภายในเครื่อง การสะท้อนลักษณะนี้เกิดจากรอยต่อของดัชนีหักเหที่ต่างกันหรือเกิดการสะท้อนแบบเฟรสเนล ซึ่งแสดงถึงการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงโดยใช้อุปกรณ์ทางกลที่ไม่ซับซ้อนโดยนำเส้นใยแก้วนำแสงติดกันและที่บริเวณรอยต่อมีช่องอากาศเกิดขึ้น

๒. การเชื่อมต่อแบบหลอมรวม (Fusion Splice) การเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงแบบนี้มีประสิทธิภาพดีกว่ามีค่าการสูญเสียของสัญญาณน้อยกว่าแบบเชิงกลเมื่อเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดของแกนแตกต่างกันทำการเชื่อมต่อกัน การเชื่อมต่อแบบนี้อัตราการลดทอนของสัญญาณแสงจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาต่อ ซึ่งที่จุดเชื่อมต่อนี้มีอัตราการลดทอนของแสงแตกต่างกันทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความซับซ้อนของสัญญาณการกระเจิงกลับอาจเรียกการเชื่อมต่อแบบไม่มีการสะท้อน

จากรูป แสดงตัวอย่างของสัญญาณจากการตรวจวัดเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งแสดงชนิดต่างๆ ของการเชื่อมต่อ พัลส์ของแสงที่เกิดขึ้นจากริมด้านซ้ายแสดงการสะท้อนของแสงที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของแหล่งกำเนิดแสงในเครื่องโอ ที ดี อาร์ และเส้นใยแก้วนำแสง ส่วนด้านขวาเมื่อแสดงการสะท้อนของแสงที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของปลายเส้นใยแก้วนำแสงกับอากาศ โดยสัญญาณจะลดระดับลงมาถึงระดับของสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ซึ่งระดับนี้แสดงว่าต่อจากนี้ไม่มีแสงสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณแสงในเครื่องโอ ที ดี อาร์ อีก



รูปแสดงแบบการตรวจวัดบนหน้าจอโอ ที ดี อาร์



ภาพที่ ๔-๙๒ แสดงรูปแบบการตรวจวัดบนหน้าจอโอ ที ดี อาร์

ตำแหน่งที่ ๑ แสดงความซับซ้อนของการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสง

ตำแหน่งที่ ๒ เกิดการสะท้อนแบบเฟรสนอลที่รอยต่อระหว่างปลายของเส้นใยแก้วนำแสงกับ

อากาศของแหล่งกำเนิดแสงบนเครื่องโอ ที ดี อาร์

ตำแหน่งที่ ๓ แสดงสัญญาณรบกวนที่อยู่ในระยะที่หันปลายในแก้วนำแสง

ตำแหน่งที่ ๔ แสดงระดับกำลังสูงสุดของเครื่องโอ ที ดี อาร์

ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถบอกค่าได้ที่แกนในแนวระดับของเครื่องโอ ที ดี อาร์ โดยเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยเวลาในการส่งแสงไปและกลับของพัลส์ของแสงสามารถแปลงเป็นระยะที่แสงเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงของตัวกลางหรือเส้นใยแก้วนำแสงได้โดยทราบความเร็วของการส่งแสงสัญญาณขึ้นกับค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางหรือเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด ส่วนแกน Y แสดงกำลังของแสง (Optical Power) ในหน่วยเดซิเบล



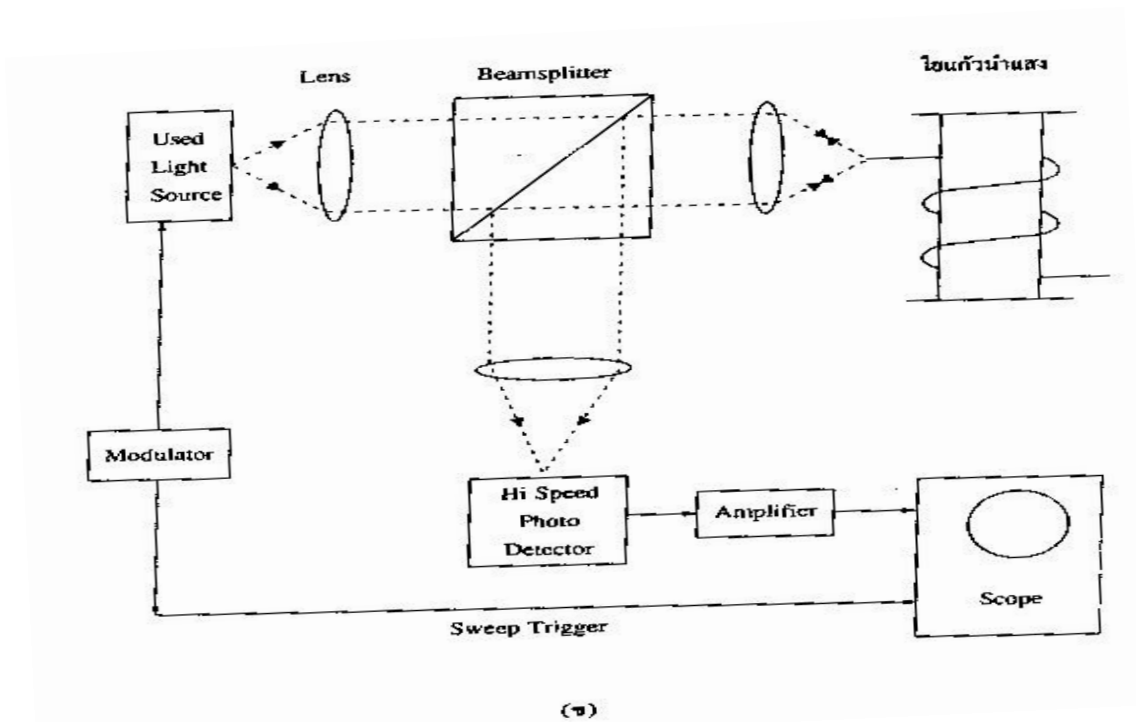
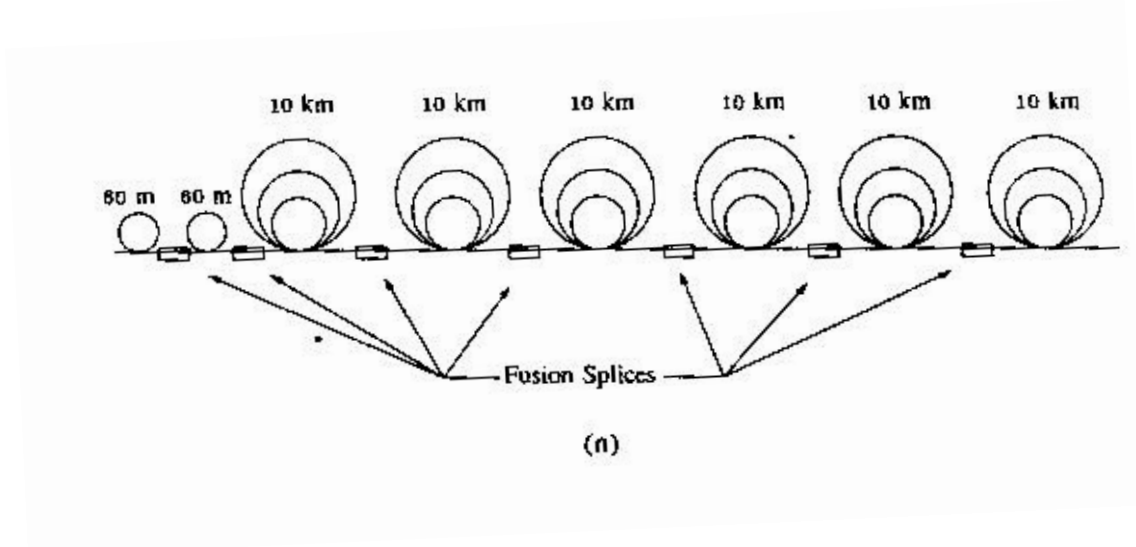
ระยะเดดโซน (Dead Zone) คือ ขนาดของช่วงกว้างของพัลส์ (Pulse Width) ของแสงจากแหล่งกำเนิดของแสงสามารถเลือกค่าได้ และขนาดของพัลส์แสงนี้เองที่เป็นตัวกำหนดระยะเดดโซน ซึ่งจะแสดงความสามารถในการวัดสัญญาณของเครื่องโอ ที ดี อาร์ เมื่อพัลส์ของแสงเดินทางมาพบกับตำแหน่งที่ทำให้เกิดการสะท้อน (เช่น รอยเชื่อมต่อเชิงกล หรือปลายทางของเส้นใยแก้วนำแสง) จะเกิดการสะท้อนโดยกำลังของแสงที่ตรวจวัดได้อันเนื่องจากการสะท้อนแบบเฟรสเนลนี้จะมีค่ามากกว่าการสะท้อนของแสงอันเนื่องจากการกระเจิงกลับโดยทั่วไป และตัวรับสัญญาณแสงของเครื่องโอ ที ดี อาร์ นั้นมีความไวสูงมาก หากกำลังของแสงเนื่องมาจากการสะท้อนนี้มีค่ามากพอทำให้ตัวรับแสงอิ่มตัวในช่วงเวลาสั้น ๆ ช่วงเวลาดังกล่าวเครื่องจะไม่สามารถตรวจวัดสิ่งผิดปกติใด ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงในช่วงระหว่างระยะเดดโซนได้เลย ช่วงเวลาของช่องกว้างของพัลส์ของตัวรับสัญญาณทางแสงนี้เรียกว่าระยะเดดโซนแสดงระยะความกว้างของพัลส์ที่ปรากฏของโอ ที ดี อาร์ ถ้าหากมีลักษณะใดๆ เกิดขึ้นภายในช่วงระยะทางดังกล่าว เครื่องโอ ที ดี อาร์ จะไม่สามารถตรวจวัดได้จากข้อจำกัดของระยะเดดโซนดังภาพที่ ๔.๙๒ แสดงรายละเอียดของการเชื่อมต่อใยแก้วนำแสงและระบบและการทำงานของเครื่องโอ ที ดี อาร์

### โอ ที ดี อาร์พารามิเตอร์

ก่อนจะทำการตรวจวัดเส้นใยแก้วนำแสงจำเป็นต้องกำหนดการทำงานของเครื่องก่อน โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องซึ่งจะต้องเลือก หรือทำการปรับฟังก์ชันต่าง ๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้การวัดค่าได้ถูกต้องที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับรุ่นของเครื่องโอ ที ดี อาร์ ในส่วนต่อไปนี้จะแสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องโอ ที ดี อาร์ รุ่นทั่ว ๆ ไป

๑. ความยาวคลื่น (Wavelength) เครื่องโอ ที ดี อาร์สามารถเลือกความยาวคลื่นแสงที่ใช้สำหรับตรวจสอบเส้นใยแก้วนำแสงได้ ปกติความยาวคลื่นแสงที่นิยมใช้อยู่ในช่วง ๑,๓๑๐ และ ๑,๕๕๔ นาโนเมตร ขึ้นกับชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการตรวจสอบ

๒. ดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) เครื่องโอ ที ดี อาร์ จะใช้ระบุค่าดัชนีหักเหแสงของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการตรวจสอบด้วย เนื่องจากความเที่ยงตรงของการวัดระยะทางของเครื่องโอ ที ดี อาร์ จะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของการกำหนดค่าดัชนีหักเหแสงของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้



ภาพที่ ๔-๙๓ แสดงโครงสร้างทั่วไปของระบบแสงเครื่องโอ ที ดี อาร์

๓. ช่วงกว้างของพัลส์ (Pulse Width) เครื่องโอ ที ดี อาร์ สามารถเลือกช่วงกว้างของพัลส์ของแสงที่เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ ๑-๑,๐๐๐ เมตร ขึ้นกับความต้องการให้ค่าความละเอียดในการวัดหากเลือกช่วงกว้างของพัลส์กว้างส่งผลให้กำลังของแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้น ทำให้อ่านการวัดของเครื่องโอ ที ดี อาร์ หรือระยะทางที่สามารถวัดได้ยาวขึ้น อย่างไรก็ตาม ช่วงกว้างของพัลส์ที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลในห้วงระยะเดซีคอนเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้การต่อการตรวจวัดสิ่งที่อยู่ภายในระยะเดซีคอน หากเลือกช่วงกว้างของพัลส์แคบ ทำให้อ่านการตรวจวัดของเครื่องโอ ที ดี อาร์

หรือระยะทางที่สามารถวัดได้สั้นลง แต่เพิ่มความละเอียดของการวัดมากขึ้น ระยะทางของการวัดมีความเที่ยงตรงมากขึ้นเนื่องจากระยะเดตาอยู่ในช่วงแคบ ๆ

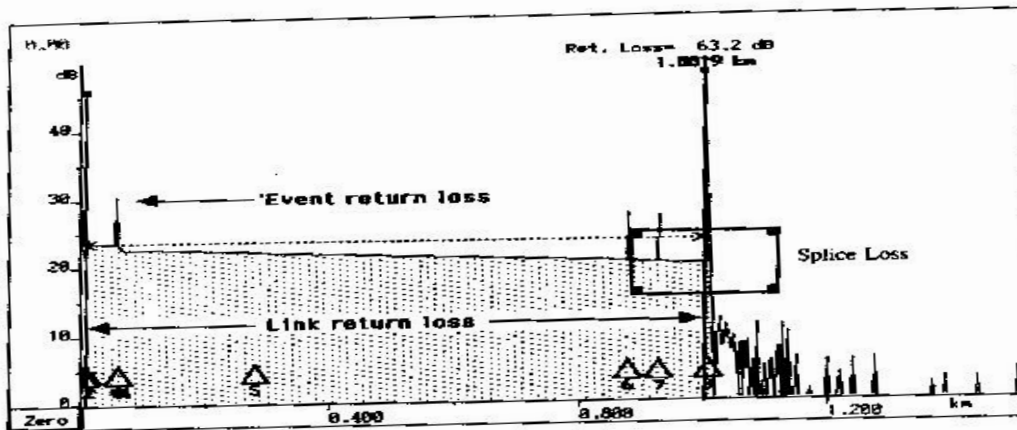
๔. ระยะของเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Range) ในการกำหนดค่าการวัดที่อาศัยหลักการของเวลานี้ การกำหนดค่าระยะของการวัดนี้ควรจะต้องให้มีค่าระยะมากกว่าความยาวจริงที่ต้องการวัด ค่านี้มีความสำคัญมาก หากกำหนดระยะให้กับเครื่องสั้นเกินไปจะทำให้เครื่องเริ่มส่งพัลส์ใหม่ และรอบของการตรวจวัดการกระเจิงกลับก่อนที่การสะท้อนที่ปลายจากการตรวจสอบก่อนหน้านี้ได้รับเป็นสาเหตุให้ปลายที่สะท้อนผิดพลาดได้ หรือปรากฏการณ์บางอย่างที่บริเวณตรงกลางของเส้นใยแก้วนำแสงต่อการกำหนดระยะให้กับเครื่องยาวเกินไปจะทำให้การวัดผิดพลาดเช่นกัน ถ้าหากกำหนดระยะมากกว่าเป็น ๒ เท่าของความยาวของเคเบิลจริง อาจเกิดการสะท้อนซ้ำ (Ghost Reflection) เกิดขึ้นหลังจากการสะท้อนที่ปลายของเคเบิลแล้วปรากฏบนหน้าจอของเครื่องโอ ที ดี อาร์ อีกได้ อีกทั้งยังทำให้การวัดซ้ำลงอีกด้วย โดยทั่วไปการกำหนดค่าระยะสัมพันธ์กับความยาวของเคเบิลที่จะทำการวัด

๕. ค่าเฉลี่ย (Averaging) ค่าเฉลี่ยของการวัดเป็นตัวเลขที่บอกถึงว่าในการตรวจวัดแต่ละครั้งจะทำการเฉลี่ยกับค่าที่ทำการตรวจสอบครั้งที่แล้ว การเลือกค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการวัดทำให้ค่าของการวัดดีขึ้นลดสัญญาณรบกวนลงได้

๖. สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (Backscatter Coefficient) ค่านี้ถูกกำหนดขึ้นจากกระบวนการผลิตเส้นใยแก้วนำแสง โดยปกติเครื่องจะกำหนดเป็น “Normal” ที่ความยาวคลื่นและช่วงกว้างของพัลส์ที่กำหนดให้ ซึ่งถูกใช้สำหรับคำนวณความเที่ยงตรงของการสะท้อน

๗. หน่วย (Unit) เครื่องสามารถเลือกได้ว่าจะวัดหน่วยของความยาวเป็น เมตร กิโลเมตร ฟุต และไมล์ เป็นต้น

๘. สากล (Scale) การแสดงผลบนหน้าจอ โอ ที ดี อาร์ มาตรฐานในแนวแกน Y แสดงค่ากำลังของแสง หน่วยเดซิเบลต่อช่อง ซึ่งอาจเปลี่ยนให้มีค่ามากขึ้นหรือลดลงก็ได้ เช่นสามารถกำหนดมาตราส่วน ๑๐ เดซิเบลต่อช่องมาตราส่วนในแนวแกน X ซึ่งแสดงระยะทางปกติมีหน่วยกิโลเมตร(ไมล์หรือฟุต) ต่อช่องสามารถเปลี่ยนให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้เช่นกัน เช่นกำหนดมาตราส่วน ๕ กิโลเมตรต่อช่อง เป็นต้น



ภาพที่ ๔-๙๔ แสดงการมาตราส่วนบนหน้าจอโอ ที ดี อาร์

จากรูป แสดงมาตราส่วนในแนวแกน Y เป็น 10 dB/div และแนวแกน X เป็น 4,000km/div

### การประยุกต์ใช้เครื่องโอ ที ดี อาร์

๑. การตรวจสอบม้วนเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสง บริษัทด้านการสื่อสารโทรคมนาคมหลายบริษัท ได้นำเครื่องโอ ที ดี อาร์ใช้ตรวจสอบเส้นใยแก้วนำแสงก่อนทำการวางสาย เนื่องจากเคยพบปัญหาว่า หลังทำการวางระบบไปแล้วพบว่าสายเคเบิลกลับมีปัญหา

๒. การประเมินค่าเคเบิลใหม่ก่อนทำการติดตั้ง หลังจากทำการวางสายเคเบิลไปแล้ว ก็ยังคงต้องมีการตรวจสอบอีกครั้ง เนื่องจากหลังทำการติดตั้งแล้วซึ่งย่อมต้องมีการสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อแบบต่าง ๆ ในแต่ละจุด การสะท้อน การโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง ค่าการลดทอนต่าง ๆ และค่าอันเกิดจากการวางระบบในแต่ละครั้งอื่น ๆ จำเป็นต้องบันทึกค่าเริ่มต้นไว้ทุกครั้งเพื่อเป็นมาตรฐานในการติดตั้งครั้งต่อไปตลอดจนทราบค่าลดทอนในระบบนั้น ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับการซ่อมแซมอันจะต้องเกิดขึ้นในอนาคตว่าการลดทอนรวมต้องอยู่ในค่านี้อย่างยอมรับได้ก่อนหรือทิ้งไปและเปลี่ยนเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงใหม่มาแทน

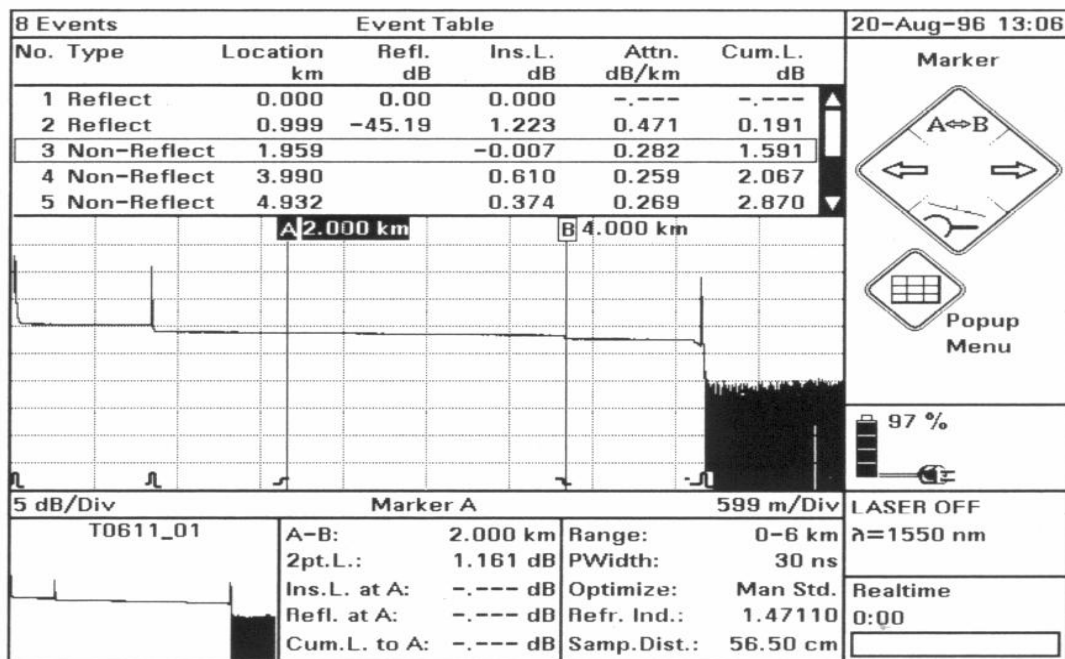
๓. การตรวจสอบการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสง เป็นการตรวจสอบว่าเคเบิลในแต่ละจุดยังคงมีประสิทธิภาพในการคัปปลิงสัญญาณแสงได้ดีเช่นเดิมหรือไม่ เพราะมีบางครั้งสามารถวัดได้ก่อนแต่เนิ่น ๆ ก่อนจะเกิดปัญหาทำให้ระบบเสียหายไม่สามารถทำงานได้ซึ่งจะสร้างความสูญเสียเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่นถ้าพบว่าค่าการสูญเสียที่จุดหนึ่งหากมีความชันมากสังเกตได้บนหน้าจอ หรือปรากฏการเชื่อมต่อแบบหลวมรวมขึ้นทั้ง ๆ ที่บริเวณนั้นไม่มีการเชื่อมต่อเลย นั้นย่อมแสดงว่าบริเวณดังกล่าวเกิดปัญหา

๔. การประเมินค่าเส้นทางที่สงสัยว่าจะเกิดปัญหา ถ้าการส่งผ่านสัญญาณเกิดการผิดพลาดในบริเวณหนึ่ง ๆ เครื่องโอ ที ดี อาร์สามารถยืนยันได้ว่าเส้นใยแก้วนำแสงนั้นกำลังถูกต้องหรือผิดพลาด

๕. ตำแหน่งที่เกิดการผิดพลาดเครื่องโอ ที ดี อาร์สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดการผิดพลาดได้อย่างถูกต้อง

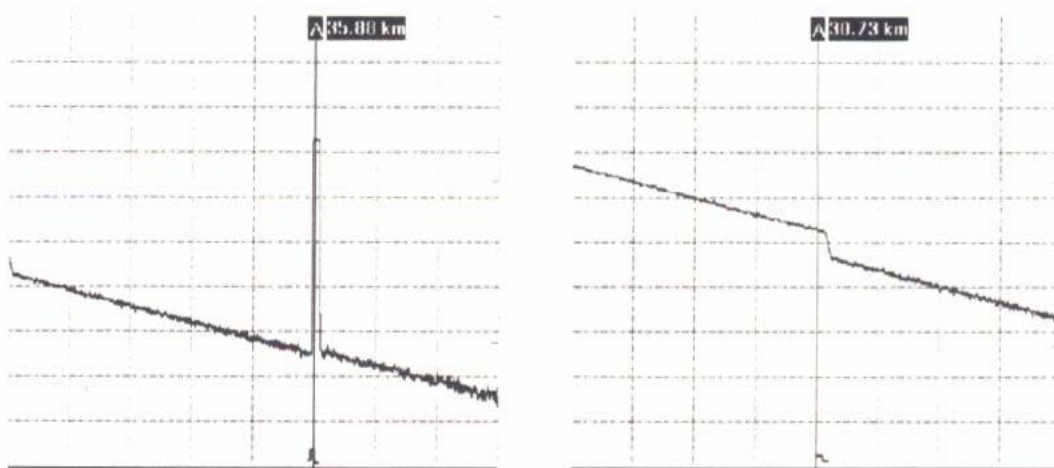
เครื่องโอ ที ดี อาร์ รุ่นใหม่ล่าสุดของโยโกกาวา ใช้สำหรับตรวจสอบสภาพของเส้นใยแก้วทั้งจุดที่ขาด จุดที่แตก หรือแม้ตรวจสอบการเชื่อมต่อ (Splice) ของเส้นใยแก้วแล้วแสดงออกมาเป็นระยะทางและค่าการสูญเสีย (Loss) ด้วยระยะ Dead Zone เพียง ๒ เมตร และ Sampling Resolution ๕ เซนติเมตร จึงทำให้มีความถูกต้องในการวัด โดยเครื่องโอ ที ดี อาร์ รุ่นนี้ยังมีทั้ง FDD, เครื่อง Printer ในตัวและพอร์ต USB ที่สามารถถ่ายโอนข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วหรืออาจจะเชื่อมต่อกับเครื่อง Printer ภายนอกก็ได้ จึงทำให้มีความสะดวกในการใช้เพิ่มขึ้น

การใช้เครื่องโอ ที ดี อาร์ (Optical Time Domain Reflectometer) จะส่ง Optical Pulse ที่มีความกว้างน้อยๆ (10 ns - 10 ns) เข้าไปใน Fiberoptic Cable ซึ่งแสงบางส่วนจะกระเจิง (Scatter) กลับมาที่ต้นสาย และจะถูกตรวจจับด้วยตัว Detector ภายในเครื่องโอ ที ดี อาร์ โดยระยะเวลาที่แตกต่างกันระหว่างจากที่เริ่มส่ง Pulse จนถึงเวลาที่รับสัญญาณได้จะถูกคำนวณให้เป็นระยะความยาวของสายเพื่อความสะดวกในการแสดงผล ซึ่งท้ายที่สุดแล้วเครื่องโอ ที ดี อาร์ จะแสดงผลโดยให้แกนนอนเป็นระยะทางและให้แกนตั้งเป็นปริมาณแสงที่ตรวจวัดได้ปริมาณแสงที่ตรวจจับได้ที่ต้นสายจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งก็เป็นผลมาจากการลดทอนใน Fiberoptic Cable เอง และนอกจากนั้นแล้ว ถ้าภายในสายมีการต่อ ไม่ว่าจะเป็นการต่อด้วย Connector หรือ Fusion Splice ปริมาณ แสงที่ตรวจวัดได้จากบริเวณนั้นก็จะมีลักษณะที่ต่างไปจากปกติ ดังรูปข้างล่างนี้



รูปตัวอย่างการแสดงผลของเครื่องโอ ที ดี อาร์ เมื่อเจอ Connector (ซ้าย) และ Fusion Splice (ขวา)

เมื่อแสงเดินทางถึงปลายสาย Fresnel Reflection จะทำให้ปริมาณของแสงสะท้อนกลับมามากเป็นพิเศษและหลังจากนั้นปริมาณแสงที่รับได้ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นบริเวณปลายสายจึงมีลักษณะพิเศษเฉพาะที่สามารถสังเกตได้โดยง่าย ดังรูปข้างล่างนี้



รูปตัวอย่างการแสดงผลของเครื่องโอ ที ดี อาร์ ตลอดความยาวสาย

ดังนั้น เครื่องโอ ที ดี อาร์ จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้วัดความยาวสายของ Fiberoptic Cable ตลอดจนวัดหาความผิดปกติเช่น การลดทอนที่อาจจะเกิดขึ้นมากผิดปกติภายในสาย และเนื่องจากเครื่องโอ ที ดี อาร์ ทำการตรวจสอบสาย โดยต่อเข้าที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของสาย จึงเป็นการสะดวกอย่างยิ่ง เพราะไม่ว่าสายจะยาวเท่าใดก็ตาม ก็สามารถทำการวัดได้ด้วยเครื่องโอ ที ดี อาร์ เพียงเครื่องเดียว

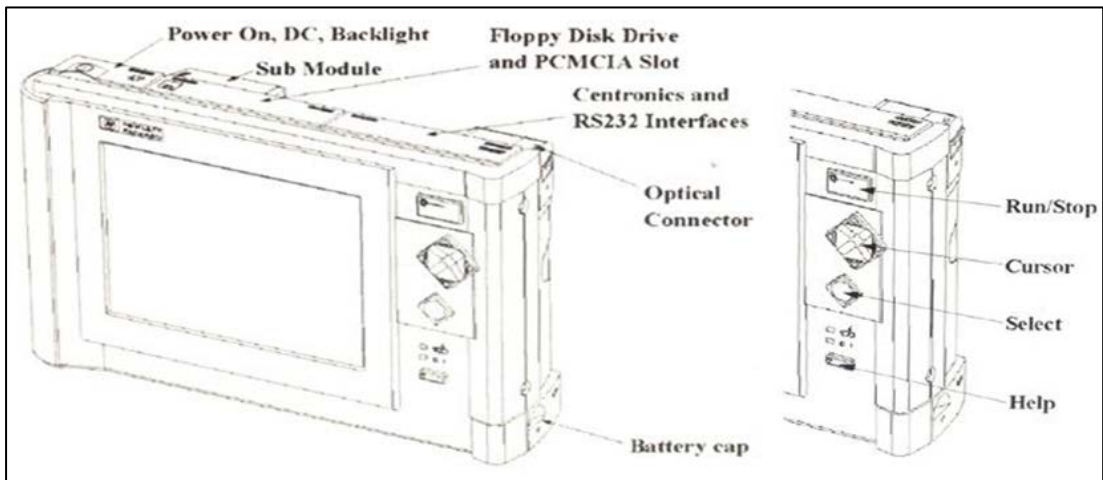
๑. จะต้องต่อ Fiber Optic Cable เข้ากับเครื่องโอ ที ดี อาร์ ก่อนที่จะจ่าย Optical Power ออกจากเครื่องโอ ที ดี อาร์ ทั้งนี้เนื่องจาก Infrared LASER ที่ไม่สามารถมองเห็นได้นี้มีกำลังมากพอที่จะทำให้อันตรายต่อระบบรับภาพของมนุษย์

๒. ห้ามมองเข้าไปที่ปลาย Fiber Optic Cable ในขณะที่ปลายอีกด้านถูกต่ออยู่กับเครื่องโอ ที ดี อาร์ เพราะในขณะนั้นเครื่องโอ ที ดี อาร์ อาจจะทำจ่าย Optical Power เข้ามาในสายก็ได้

๓. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานทาง Fiber Optic Communications ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กและบอบบาง

### การใช้งาน HP E6000 A Mini-OTDR เบื้องต้น

เครื่องโอ ที ดี อาร์ รุ่นนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในภาคสนามจริงๆ ดังนั้นมันจึงมีขนาดเล็กกระทัดรัด เพื่อความสะดวกในการพกพา และที่หน้าปัดก็มีปุ่มกดอยู่เพียงไม่กี่ปุ่มเท่านั้น ดังที่แสดงในรูปข้างล่าง



รูปแสดงเครื่องโอ ที ดี อาร์ รุ่น HP E6000A Mini-OTDR

ปุ่ม Run/Stop ใช้เพื่อจ่ายหรือหยุดจ่าย Optical Power ที่ออกจากเครื่องโอ ที ดี อาร์ โดยจะมีไฟสีแดงแสดงสถานะใน ขณะที่มีการจ่าย Optical Power

ปุ่ม Cursor ปุ่มนี้ประกอบด้วยปุ่มย่อย ๔ ปุ่มมีหน้าที่หลายหน้าที่โดยหน้าที่หลักในขณะที่อยู่ใน OTDR Mode คือ

ปุ่ม Up (ปุ่มบน) จะเลือกสลับไปมาระหว่าง Marker A และ Marker B

ปุ่ม Down (ปุ่มล่าง) จะเลือกสลับไปมาระหว่าง Zoom กับไม่ Zoom โดยการ Zoom จะกระทำที่บริเวณตัว Marker ที่กำลังถูกเลือกอยู่

ปุ่ม Left และปุ่ม Right ก็จะทำหน้าที่เลื่อน Marker ตัวที่ถูกเลือกให้ไปด้านซ้ายหรือขวาตามที่ต้องการ

ปุ่ม Select ถ้าอยู่ใน OTDR Mode ตามปกติ ปุ่มนี้จะใช้เรียก Popup Menu แต่ถ้าอยู่ใน Popup Menu แล้ว ปุ่มนี้จะมีไว้เพื่อเลือกค่าที่กำลังถูก Highlight อยู่ (ส่วนการเลือกที่จะ Highlight อะไรนั้นก็จะกระทำได้โดยใช้ปุ่ม Cursor ) เครื่องโอ ที ดี อาร์ สามารถใช้วัดคุณสมบัติของ Fiberoptic Cable ได้หลายอย่างรวมทั้งสามารถใช้วัด Attenuation ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างสายได้อีกด้วย การใช้งาน OTDR เพื่อ

(ก) วัดความยาวจากต้นสายถึงปลายสาย ในภาวะปกติ ถ้าสายไม่มีการขาดภายในสายเราควรที่จะทราบความยาวของสายที่แท้จริงเพื่อใช้เปรียบเทียบกับระยะความยาวของสายในภาวะที่ผิดปกติ กล่าวคือถ้าความยาวของสายที่วัดได้ในภาวะที่ผิดปกติสั้นกว่าความยาวของสายจริงแสดงว่า Fiberoptic Cable มีการขาดเกิดขึ้น

(ข) วัดค่าความลดทอนของ Fiberoptic Cable เพื่อตรวจสอบคุณภาพของ Fiberoptic Cable ในภาวะที่ใช้งานจริงๆ

(ค) วัดค่าความลดทอนของจุดต่อต่างๆ เช่น Connectors หรือ Splices

ปัจจุบันมีการนำสายไฟเบอร์ออปติกเส้นใยแก้วนำแสง เข้ามาใช้ในการส่งสัญญาณไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น จากสถานีโทรทัศน์ โทรศัพท์ สัญญาณจากคอมพิวเตอร์ โดยที่สัญญาณไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแสง สัญญาณแสงดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไฟเบอร์ออปติกเส้นใยแก้วนำแสง จากสถานีส่งไปถึงสถานีปลายทาง เมื่อถึงสถานีปลายทาง สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนกลับมาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิมเพื่อให้เข้าสู่เครื่องรับโทรศัพท์ และคอมพิวเตอร์ การใช้งานโครงข่าย Optic Fiber บนเทคโนโลยี Network ปัจจุบันเป็นไปอย่างกว้างขวาง สาเหตุก็เนื่องมาจากคุณสมบัติในการถ่ายทอดสัญญาณที่เร็วและให้ผลตอบสนองได้ดีกว่าสายทองแดง ซึ่งก็เป็นไปโดยพื้นฐานที่ว่า การส่งถ่ายสัญญาณด้วยแสงจะมีความเร็วกว่าและให้ผลตอบสนองได้ดีกว่าการถ่ายทอดสัญญาณที่อยู่บนพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะแสวงหาเหตุผลหรือคำตอบในเรื่องนี้เราต้องมองไปที่ข้อมูลพื้นฐานของ Physics และทฤษฎีพื้นฐานทางสื่อสาร ข้อมูลพื้นฐานแรกอยู่บนพื้นฐานที่ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีอัตราความเร็วในการแพร่กระจายสัญญาณอยู่ที่ ๓๐๐,๐๐๐ กิโลเมตรต่อวินาที หรือ ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์ต่อวินาที ในสุญญากาศ ความเร็วของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้น คลื่นแกมมา, คลื่นอัลตราไวโอเล็ต, แสงที่มองไม่เห็น, อินฟราเรด ( ซึ่งใช้กับ Optical Fiber ) และคลื่นวิทยุจึงใช้เวลาเดินทางในอวกาศด้วยความเร็วเท่ากัน

### คำนิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง

๑. ค่าเฉลี่ย ถ้าเลือกให้เวลาเฉลี่ยมากขึ้น ความเที่ยงตรงของข้อมูลจะมากขึ้นจะลดสัญญาณรบกวน (Random Noise)

๒. การลดทอนสัญญาณ การสูญเสียของความเข้มแสงหรือกำลังแสงในเส้นใยแก้วนำแสงในฟังก์ชันสัมพันธ์กับระยะทางที่แสงเดินทางผ่าน หน่วยเดซิเบล/กิโลเมตร

๓. การกระเจิงกลับ การกระเจิงกลับของแสงแบบเรย์ลี คือการที่แสงตกกระทบอนุภาคแล้วแสงเดินทางกลับมายังแหล่งกำเนิดโดยมุมสะท้อนมากกว่า ๙๐ องศา จากทิศทางเดินของการเคลื่อนที่ (ดูการกระเจิงแบบเรย์ลี)

๔. สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ เป็นค่าที่แสดงส่วนของแสงรวมที่ถูกสะท้อนกระเจิง เมื่อเดินทางเข้ามาในเส้นใยแก้วนำแสง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการแสดงว่าแสงทั้งหมดจำนวนเท่าไรที่เดินทางเข้ามาในเส้นใยแก้วนำแสงถูกกระเจิงกลับที่แต่ละตำแหน่งของความยาว มีค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ



เป็น  $-๗๙.๒$  ที่ความยาวคลื่นแสง  $๑,๓๑๐$  นาโนเมตร และ  $-๖๑.๗$  ที่ความยาวคลื่นแสง  $๑,๕๕๐$  นาโนเมตร

๕. Dead Zone คาบเวลาหลังพัลส์ที่ถูกสะท้อนถูกตรวจวัดก่อนที่ลักษณะอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น ถูกตรวจวัดได้ คาบเวลานี้เป็นฟังก์ชันของช่วงกว้างของพัลส์ของแสงที่เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง และเวลาที่ตัวรับแสงบนเครื่องโอ ที ดี อาร์ตรวจรับได้ ปรากฏรบกวนกับความกว้าง (ของระยะทาง) ของพัลส์ที่สะท้อน

๖. เดซิเบล อัตราส่วนเปรียบเทียบของผลต่างของกำลังแสงเอาต์พุตและอินพุต ตัวอย่างเช่น ค่าการสูญเสีย

$$\text{Loss (dB)} = 10 \log (P_1/P_2)$$

เมื่อ  $P_1$  คือ กำลังแสงเอาต์พุต

$P_2$  คือ กำลังแสงอินพุต

๗. เดลตา แทนด้วยเครื่องหมาย  $\Delta$  แสดงความแตกต่างระหว่างค่า ๒ ค่า สำหรับในเครื่องโอ ที ดี อาร์ ใช้แสดงผลต่างของกำลัง หรือระยะทางระหว่าง ๒ ตำแหน่งที่แสดงบนหน้าจอ

๘. ตัวรับสัญญาณแสง เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงที่ตรวจวัดได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

๙. ย่านการใช้งาน การสูญเสียของกำลังแสงมากที่สุดสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องโอ ที ดี อาร์ ในหน่วยเดซิเบล สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างสัญญาณการกระเจิงที่มากที่สุด และค่า RMS มากที่สุดของระดับสัญญาณรบกวนช่วงของเส้นใยแก้วนำแสง

ตัวอย่างเช่น ต้องการวัดเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาว  $๘๐$  กิโลเมตร จะต้องกำหนดค่าช่วงของการวัดไว้ประมาณ  $๑๐๐$  กิโลเมตร ซึ่งเครื่องโอ ที ดี อาร์จะเก็บแสงที่สะท้อนหลังส่งแสงไปถึงระยะ  $๑๐๐$  กิโลเมตร ถ้าช่วงที่กำหนดสั้นเกินไปจะทำให้สาเหตุให้การสะท้อนที่ปลายผิดตำแหน่งไป หรือสัญญาณที่เกิดการสะท้อนที่ปลาย หรือการสะท้อนเนื่องจากการเชื่อมต่อสิ่งเคลือบแฝง (Wrap Around) เกิดขึ้น และปรากฏพัลส์หลอก ๆ เกิดขึ้น

๑๐. Freerun แสดงสัญญาณการตรวจวัดด้วยค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุด

๑๑. การสะท้อนแบบเฟรสเนล การสะท้อนของพัลส์ของแสงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห โดยทั่วไปการเชื่อมต่อเชิงกลหรือบริเวณที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสง จะปรากฏสัญญาณขึ้นมีรูปแบบโค้งขึ้นเป็นพัลส์

๑๒. การเชื่อมต่อแบบหลอมรวม เป็นการเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันโดยใช้ไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมต่อ การเชื่อมต่อวิธีนี้จะมีการสูญเสียต่ำ รูปแบบของสัญญาณจะไม่เกิดพัลส์

๑๓. เกณฑ์การเชื่อมต่อ (Gainer Splice) การเชื่อมต่อแบบหลอมรวมนี้แสดงให้เห็นถึงการลดทอนที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากเชื่อมระหว่างปลาย ๒ ปลาย ที่มีการกระเจิงของแสงที่แตกต่างกัน

๑๔. Gloost ปราบกฏพัลส์การสะท้อนขึ้นบนหน้าจอต้ง ๆ ที่ตำแหน่งนั้นไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้นเลย โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นเมื่อกำหนดค่าความยาวการวัดไม่ถูกต้อง

๑๕. Insertion Loss การสูญเสียในกำลังทางแสงอันเกิดจากรอยต่อระหว่างเครื่องโอ ที ดี อาร์ กับเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำการวัด

๑๖. Interlock เป็นระบบป้องกันความปลอดภัยที่มีไว้ด้านหลังของอุปกรณ์เพื่อป้องกันเลเซอร์ไหม้

๑๗. Jumper ความยาวสั้น ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีอุปกรณ์เชื่อมต่อติดอยู่ทั้งสองปลายเพื่อใช้เชื่อมต่อระหว่างเครื่องวัดกับเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องการตรวจวัด

๑๘. การลอนซ์แสง (Launch) การส่งผ่านของพัลส์ของแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง

๑๙. ตารางการสูญเสีย รูปแบบการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการวัดด้วยเครื่องโอ ที ดี อาร์ เช่นการเชื่อมต่อ การงอโค้ง การสะท้อนแสงที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสง หรือสาเหตุอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของการกระเจิงกลับแสง ซึ่งค่าตารางการสูญเสียมีความสัมพันธ์กับระยะทางที่แสงเดินทางด้วยการคำนวณการสูญเสียและการสะท้อนที่แต่ละตำแหน่ง

๒๐. มาร์เกอร์ (Marker) เป็นสัญลักษณ์ที่ระบุตำแหน่งใด ๆ ที่พิจารณาบนหน้าจอต้ง ๆ โดยจะแสดงค่าระยะทาง กำลังแสง และตำแหน่ง ณ จุดนั้นที่ทำเครื่องหมายไว้

๒๑. เมนู (Menu) แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ที่สามารถเลือกได้บนหน้าจอต้ง การเลือกทำได้โดยการเลื่อนไฮไลต์หรือเคอร์เซอร์ไปที่รายการนั้นแล้วเลือก

๒๒. ระดับพื้นฐานของสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ที่หน้าจอต้งของเครื่องโอ ที ดี อาร์ บริเวณด้านหลังของปลายของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำการตรวจวัด จะเห็นระดับของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นโดยตรวจวัดเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุต

๒๓. ออฟเซต (Offset) การจะทำให้สัญญาณที่วัดนำมาเขียนให้อ่านง่ายขึ้นนั้นทำได้โดยการแยกสัญญาณรบกวนออกมาจากหน้าจอต้ง ค่าสัญญาณรบกวน RMS ที่มากที่สุดที่บริเวณที่ถูกตรวจวัดได้โดยค่าดังกล่าวถูกหักออกจากระดับของจุดข้อมูลทั้งหมด ทำให้ระดับพื้นของสัญญาณรบกวนต่ำกว่าระดับศูนย์บนหน้าจอต้ง แต่ถ้าจุดที่ทำการออฟเซตอยู่ภายในก่อนถึงปลายสุดของเส้นใยแก้วนำแสงแล้ว

สัญญาณที่ได้อาจผิดพลาดได้ มันจะปรากฏเป็นเส้นตรงราบข้างใต้ของหน้าจอ และปรากฏเพียงรูปแบบการสะท้อนที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสง และการสะท้อนที่มีพัลส์ สูงๆ เท่ากัน

๒๔. สวิตช์ทางแสง (Plog In) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยส่วนของแหล่งกำเนิดแสง (เลเซอร์) และตัวรับสัญญาณแสงซึ่งสามารถเปลี่ยนได้ให้มีค่าความยาวคลื่น พัลส์ และความไวตามต้องการ

๒๕. พัลส์ แสงเป็นห้วงสั้น ๆ ถูกนำเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสง

๒๖. พัลส์สะท้อน (Pulse Reflection) พัลส์ของแสงที่สะท้อนกลับมาและตรวจรับที่เครื่องโอ ที ดี อาร์ จากการสะท้อนเนื่องจากการเชื่อมต่อ หรือจากการสะท้อนที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสง หรือเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสง

๒๗. ช่วงกว้างของพัลส์ (Pulse Width) ในขณะที่พัลส์ของแสงถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ช่วงกว้างของพัลส์ที่วัดได้มีหน่วยเป็นนาโนวินาที แต่เครื่องโอ ที ดี อาร์ วัดในหน่วยระยะทางเป็นเมตร โดยแสงที่เดินทางระหว่างพัลส์ (ระยะทาง = ความเร็วแสง x เวลา)

ช่วงกว้างของพัลส์แปรผันตรงกับย่านทำงาน และเดดโซนของเครื่องโอ ที ดี อาร์ ช่วงกว้างของพัลส์ที่ยาวจะทำให้สัญญาณมีกำลังแสงมากกว่า และยังเพิ่มระยะทางที่แสงสามารถเดินทางไปได้อีกด้วย ส่วนช่วงกว้างของพัลส์ที่สั้นจะทำให้เพิ่มความเที่ยงตรงของการวัดเหมาะสำหรับการวัดในช่วงที่ไม่ไกลนัก และทำให้เดดโซนสั้นกว่าด้วย

๒๘. การกระเจิงกลับแบบเรย์ลี การกระเจิงของแสงเกิดขึ้นจากการที่แสงเดินทางผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหเพียงเล็กน้อยภายในเส้นใยแก้วนำแสง ความเข้มของแสงที่กระเจิงจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นยกกำลังสี่ ตัวอย่างเช่น แสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ แสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่นสั้นมีการกระเจิงเมื่อแสงตกกระทบโมเลกุลของอากาศได้ดีกว่าแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นยาวเป็นสาเหตุที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้า

๒๙. การสะท้อน การสูญเสียของกำลังทางแสงที่สะท้อนกลับมายังเครื่องโอ ที ดี อาร์ การสะท้อนนี้มีหน่วยเป็นเดซิเบล

๓๐. การเชื่อมต่อที่มีการสะท้อน การเชื่อมต่อเชิงกลเป็นสาเหตุให้พัลส์ของแสงสะท้อนกลับมายังเครื่องโอ ที ดี อาร์

๓๑. ดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง (Refractive Index) เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างความเร็วแสงในสุญญากาศกับความเร็วแสงในตัวกลางที่พิจารณา ถ้าค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางหนึ่งมีค่ามาก แสดงว่าความเร็วของแสงที่เดินทางในตัวกลางนั้นช้า ซึ่งการเลือกค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางนั้นก็มีความสำคัญเพราะจะนำไปสู่ความเที่ยงตรงของการวัดระยะทางของเครื่องโอ ที ดี อาร์

$$n = c/v$$

n คือ ดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง

c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ

v คือ ความเร็วของแสงในตัวกลางที่พิจารณา

๓๒. มาตรฐาน (Scale) มาตรฐานในแนวตั้งแสดงกำลังของแสงหน่วยเดซิเบล/ช่อง ส่วน มาตรฐานในแนวระดับแสดงระยะทางหน่วย(กิโลเมตร ไมล์ หรือฟุต)/ช่อง

๓๓. การเชื่อมต่อ (Splice) หมายถึงการเชื่อมต่อกันระหว่างเส้นใยแก้วนำแสง ๒ ส่วน

๓๔. ความยาวคลื่น (Wavelength) ระยะทางที่แสงเดินทางในหนึ่งรอบแปรผกผันกับ ค่าความถี่ความยาวคลื่นของแสงโดยทั่วไปใช้หน่วยนาโนเมตร (nm หรือ  $10^{-9}$ ) หรือไมโครเมตร  $\mu$  ( $\mu$  หรือ  $10^{-6}$  m)

อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) = 10 - 400 nm

แสงขาว(Visible Light) = 400 - 700 nm

อินฟราเรด (Infrared) = 700 - 1,000 nm

## บทที่ ๕

### การสื่อสารข้อมูลและเครือข่าย

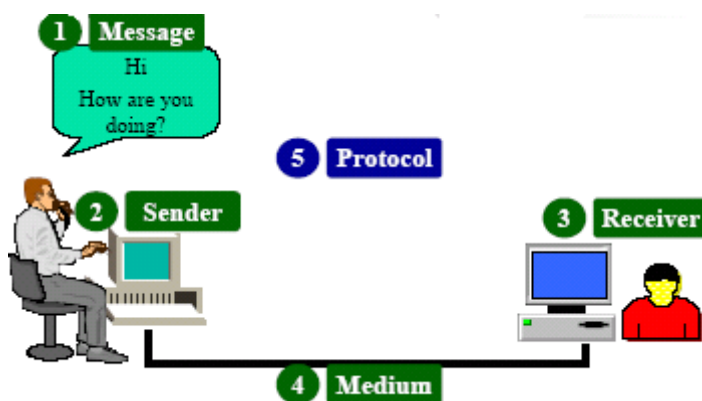
#### (Data Communication and Network)

##### ๑. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารข้อมูล

###### ๑.๑ องค์ประกอบพื้นฐานในการสื่อสารข้อมูล

องค์ประกอบพื้นฐานของการสื่อสารข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น ๕ ส่วนแสดงดังภาพที่

๕-๑



ภาพที่ ๕-๑ องค์ประกอบการสื่อสาร

๑. ผู้ส่งหรืออุปกรณ์ส่งข้อมูล (Sender) เป็นแหล่งต้นทางของการสื่อสารโดยมีหน้าที่ในการให้กำเนิดข้อมูล หรือเตรียมข้อมูล เช่น ผู้พูด คอมพิวเตอร์ต้นทาง เป็นต้น

๒. ผู้รับหรืออุปกรณ์รับข้อมูล (Receiver) เป็นแหล่งปลายทางของการสื่อสาร หรือเป็นอุปกรณ์สำหรับข้อมูลที่จะนำข้อมูลนั้นไปใช้ดำเนินการต่อไป เช่น ผู้รับ คอมพิวเตอร์ปลายทาง เครื่องพิมพ์

๓. ข่าวสาร (Message) เป็นตัวเนื้อหาของข้อมูล ซึ่งมีได้หลายรูปแบบดังนี้ คือ

- ข้อความ (Text) ข้อมูลที่อยู่ในรูปอักขระ หรือเอกสาร เช่น ข้อความในหนังสือ เป็นต้น
- เสียง (Voice) ข้อมูลเสียงที่แหล่งต้นทางสร้างขึ้นมา ซึ่งอาจจะเป็นเสียงที่มนุษย์หรืออุปกรณ์

บางอย่างเป็นตัวสร้างก็ได้

- รูปภาพ (Image) เป็นข้อมูลที่ไม่เหมือนข้อความตัวอักษรที่เรียงติดต่อกัน แต่จะมีลักษณะเหมือนรูปภาพ เช่น การสแกนภาพเข้าคอมพิวเตอร์ เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลรูปภาพกับข้อมูลข้อความ แล้วรูปภาพจะมีขนาดใหญ่กว่า

- สื่อผสม (Multimedia) ข้อมูลที่ผสมลักษณะของทั้งรูปภาพ เสียงและข้อความเข้าด้วยกัน โดยสามารถเคลื่อนไหวได้ เช่น การเรียนผ่านระบบ VDO Conference เป็นต้น โดยข้อมูลจะมีขนาดใหญ่มาก

๔. สื่อกลางหรือตัวกลางในการนำส่งข้อมูล (Medium) เป็นสื่อหรือช่องทางที่ใช้ในการนำข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง ซึ่งอาจเป็นตัวกลางที่มีสายสัญญาณ เช่น สายไฟ หรือตัวกลางที่ไม่ใช้สายสัญญาณ เช่น อากาศ เป็นต้น

**๕. โพรโทคอล (Protocol) และ ซอฟต์แวร์ (Software )** โพรโทคอล (Protocol) หมายถึง กฎระเบียบมาตรฐาน หรือข้อกำหนด ขั้นตอน ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูล เพื่อให้ผู้รับและผู้ส่งสามารถสื่อสารกันได้เข้าใจ ซอฟต์แวร์ ( Software ) หมายถึง โปรแกรมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร เช่น โปรแกรมรับส่งอีเมล

### ๑.๒ การสื่อสารข้อมูลทางคอมพิวเตอร์

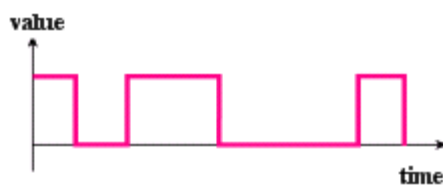
การสื่อสารข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ หมายถึง การโอนถ่าย (Transmission) ข้อมูลหรือการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างผู้ส่งต้นทางกับผู้รับปลายทาง ทั้งข้อมูลประเภท ข้อความ รูปภาพ เสียง หรือข้อมูลสื่อผสม โดยผู้ส่งต้นทางส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีหน้าที่แปลงข้อมูลเหล่านั้นให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้า (Electronic Data) จากนั้นถึงส่งไปยังอุปกรณ์หรือคอมพิวเตอร์ปลายทาง

ประเภทของสัญญาณ

ข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ต้องเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถจำแนกสัญญาณได้ ๒ ลักษณะ

#### ๑.๒.๑ สัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Signal)

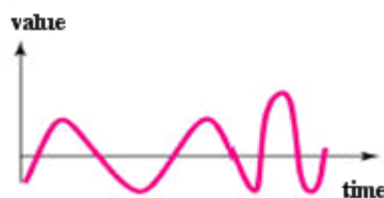
เป็นสัญญาณที่ถูกแบ่งเป็นช่วงๆ อย่างไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยลักษณะของสัญญาณจะแบ่งออกเป็นสองระดับเพื่อแทนสถานะสองสถานะ คือ สถานะของบิต ๐ และสถานะของบิต ๑ โดยแต่ละสถานะคือ การให้แรงดันทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การทำงานในคอมพิวเตอร์ใช้สัญญาณดิจิทัล แสดงดังภาพที่ ๕-๒



ภาพที่ ๕-๒ แสดงสัญญาณแบบดิจิทัล

#### ๑.๒.๒ สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal)

เป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่องของสัญญาณ โดยไม่เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดเหมือนกับสัญญาณดิจิทัล เช่น เสียงพูด หรืออุณหภูมิในอากาศเมื่อเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ ๕-๓



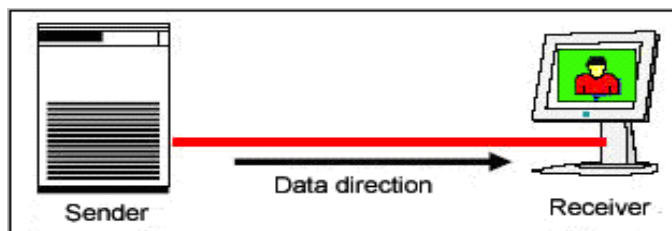
ภาพที่ ๕-๓ แสดงสัญญาณแบบอนาล็อก

### ๑.๓ ชนิดของการสื่อสาร

การสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้รับกับผู้ส่งสามารถแบ่งได้เป็น ๓ ประเภท

### ๑.๓.๑ การสื่อสารข้อมูลทิศทางเดียว (Simplex Transmission)

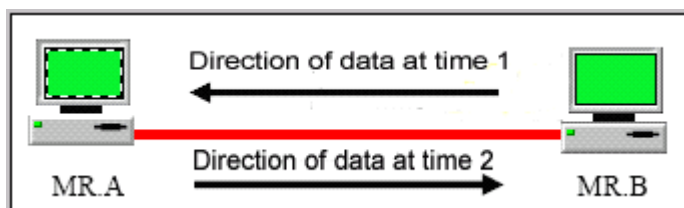
เป็นการติดต่อสื่อสารเพียงทิศทางเดียว คือผู้ส่งจะส่งข้อมูลเพียงฝั่งเดียวและโดยฝั่งรับไม่มีการตอบกลับ เช่น การกระจายเสียงของสถานีวิทยุ การส่ง e-mail เป็นต้น แสดงดังภาพที่ ๕-๔



ภาพที่ ๕-๔ แสดงการสื่อสารข้อมูลทิศทางเดียว

### ๑.๓.๒ การสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน (Half Duplex Transmission)

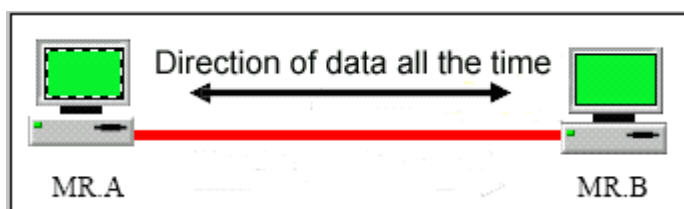
เป็นการสื่อสาร ๒ ทิศทางแต่คนละเวลากัน เช่น วิทยุสื่อสาร เป็นต้น แสดงดังภาพที่ ๕-๕



ภาพที่ ๕-๕ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน

### ๑.๓.๓ การสื่อสารข้อมูลสองทิศทางพร้อมกัน (Full Duplex Transmission)

เป็นการสื่อสาร ๒ ทิศทาง โดยสามารถส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันได้ เช่น การคุยโทรศัพท์ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ ๕-๖



ภาพที่ ๕-๖ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางพร้อมกัน

## ๑.๔ สื่อกลางการสื่อสาร (Transmission Media)

การส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับให้ครบถ้วนและถูกต้องจำเป็นต้องอาศัยสื่อกลางในการเชื่อมต่อซึ่งสื่อกลาง (Medium) ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของข้อมูล โดยคุณภาพของสัญญาณที่ถูก

ส่งออกไปจะเกิดการสูญเสียความเข้มของสัญญาณระหว่างเส้นทางการสื่อสารทำให้ข้อมูลฝั่งรับเกิดข้อผิดพลาดและเป็นการลดทอนประสิทธิภาพของการสื่อสารลง ซึ่งสื่อที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูล (Transmission Medium) จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการส่งด้วย โดยสื่อกลางในการส่งแบ่งออกเป็น ๒ ประเภท คือ

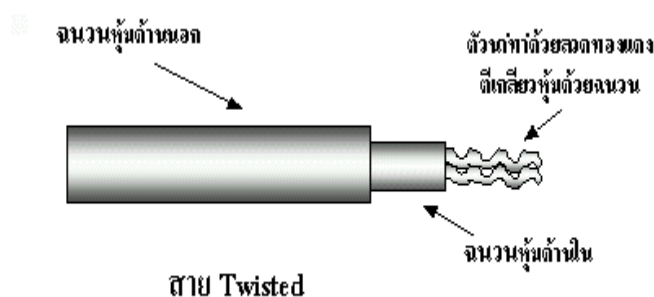
๑. ประเภทมีสาย ได้แก่ สายคู่ไขว้ (Wire Pair หรือ Twisted Pair หรือสายโทรศัพท์), สายตัวนำร่วมแกน (Coaxial Cables), เส้นใยนำแสง หรือไฟเบอร์ออปติกส์ (Fiber Optics)
๒. ประเภทไม่มีสาย ได้แก่ ไมโครเวฟ (Microwave) และดาวเทียม, การสื่อสารดาวเทียม (Stellite Transmission)

### ๑.๔.๑ สื่อกลางแบบสาย (Guided Media)

สื่อกลางแบบมีสาย (Guide Media) เป็นสื่อซึ่งอาศัยวัสดุที่จับต้องได้เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณ เช่น สายทองแดง สายคู่ตีเกลียว (Twisted Pair)

#### ๑.๔.๑.๑ สายเกลียวคู่ (Twisted Pair Cable)

สายเกลียวคู่ เป็นสายที่มีราคาถูกที่สุด ประกอบด้วยสายทองแดง ๒ เส้น แต่ละเส้นมีฉนวนหุ้มพันกันเป็นเกลียว สามารถลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ แต่ไม่สามารถป้องกันการสูญเสียพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อน ในขณะที่มีสัญญาณส่งผ่านสาย สายเกลียวคู่ ๑ คู่ จะแทนการสื่อสารได้ ๑ ช่องทางสื่อสาร (Channel) ในการใช้งานจริง เช่นสายโทรศัพท์จะเป็นสายรวมที่ประกอบด้วยสายเกลียวคู่อยู่ภายในเป็นร้อย ๆ คู่ สายเกลียวคู่ ๑ คู่ จะมีขนาดประมาณ ๐.๐๑๖ - ๐.๐๓๖ นิ้ว



ภาพที่ ๕-๗ สาย Twisted

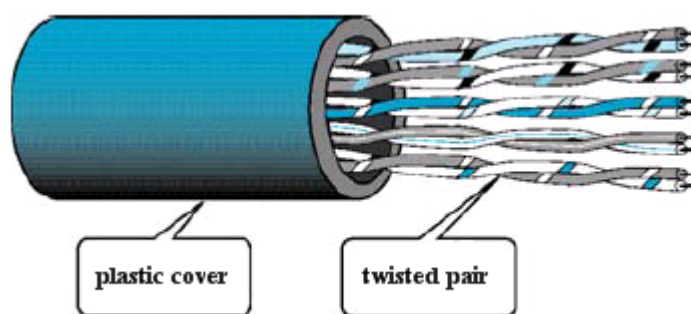
สายเกลียวคู่สามารถใช้ได้ทั้งการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อกและแบบดิจิทัล เนื่องจากสายเกลียวคู่จะมี การสูญเสียสัญญาณขณะส่งสัญญาณ จึงจำเป็นต้องมี "เครื่องขยาย" (Amplifier) สัญญาณ สำหรับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อก ในระยะทางไกล ๆ หรือทุก ๕-๖ กม. ส่วนการส่งสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลต้องมี "เครื่องทบทวน" (Repeater) สัญญาณทุก ๆ ระยะ ๒-๓ กม. เพราะว่าแต่ละคู่ของสายเกลียวคู่จะแทนการทำงาน ๑ ช่องทาง และสามารถมีแบนด์วิดท์ได้กว้างถึง ๒๕๐ กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นในการส่งข้อมูลไปพร้อมกันหลาย ๆ ช่องทางจำเป็นต้องอาศัยหลักการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ เพื่อให้สัญญาณทั้งหมดสามารถส่งผ่านสายสื่อสารไปได้พร้อม ๆ กัน ในการมัลติเพล็กซ์แบบ FDM จะสามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้ถึง ๒๔ ช่องทาง ๆ ละ ๗๔ กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนของอัตราเร็วสูงสุดในการส่งข้อมูลดิจิทัลผ่านของสายเกลียวคู่สามารถมีได้ถึง ๔ เมกะบิตต่อวินาที แต่ถ้าเป็นการส่งข้อมูลผ่านโมเด็ม จะส่งได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุด ๙,๖๐๐ บิตต่อวินาที



สายคู่ตีเกลียวแบ่งออกเป็นสายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวนเรียกสั้นๆ ว่า UTP (Unshielded Twisted Pair) และสายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวน (Shielded Twisted Pair)

### (๑) UTP (Unshielded Twisted Pair)

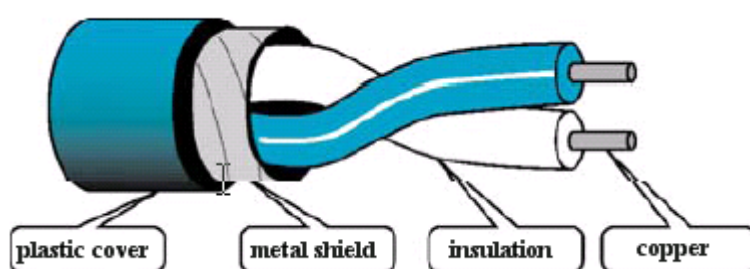
คู่สายในสายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวนคล้ายสายโทรศัพท์ มีหลายเส้น ซึ่งแต่ละเส้นก็จะมีสีแตกต่างกันไปและตลอดทั้งสายนั้นจะถูกหุ้มด้วยพลาสติก (Plastic Cover) ซึ่งการตีเกลียวลักษณะนี้จะช่วยให้มันมีคุณสมบัติในการป้องกันสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ เช่น จากเครื่องถ่ายเอกสารที่อยู่ใกล้ๆ เป็นต้น ปัจจุบันเป็นสายที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาถูกและติดตั้งได้ง่าย แสดงดังภาพ



ภาพที่ ๕-๘ UTP (Unshielded Twisted Pair)

### (๒) STP (Shield Twisted Pair)

เป็นสายคู่ลักษณะคล้ายกันกับสาย UTP แต่มีฉนวนป้องกันสัญญาณรบกวน สายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวนที่เป็นโลหะมักเป็นร่างแหโลหะหรือฟอยล์ ซึ่งร่างแหนี้จะมีคุณสมบัติเป็นเกราะในการป้องกันสัญญาณรบกวนต่างๆ ภาษาเทคนิคเรียกเกราะนี้ว่า ชิลด์ (Shield) จะใช้ในกรณีที่เชื่อมต่อเป็นระยะทางไกลเกินกว่าระยะทางที่จะใช้สาย UTP แสดงดังภาพ

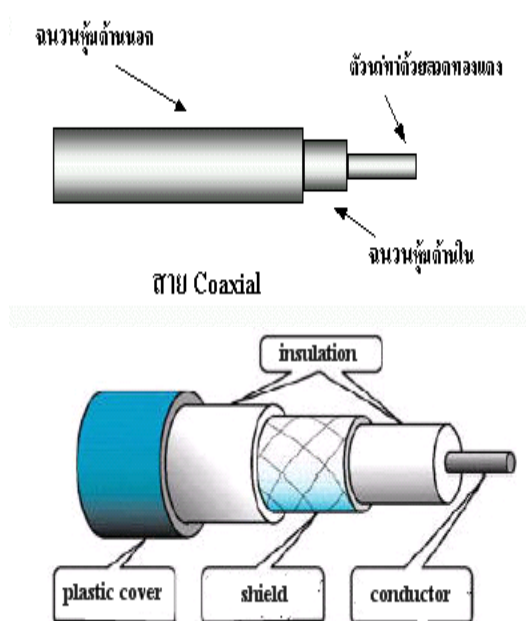


ภาพที่ ๕-๙ สายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวน (Shielded Twisted Pair)

### ๑.๔.๑.๒ สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable)

สายเคเบิลแบบโคแอกเชียลหรือเรียกสั้น ๆ ว่า "สายโคแอก" จะเป็นสายสื่อสารที่มีคุณภาพที่ดีกว่าและราคาแพงกว่า สายเกลียวคู่ ส่วนของสายส่งข้อมูลจะอยู่ตรงกลางเป็นลวดทองแดงมีชั้นของตัวเหนี่ยวนำหุ้มอยู่ ๒ ชั้น ชั้นในเป็นฟืนเกลียวหรือชั้นแข็ง ชั้นนอกเป็นฟืนเกลียว และคั่นระหว่างชั้นด้วยฉนวนหนา เปลือกชั้นนอกสุดเป็นฉนวน สายโคแอกเชียลสามารถม้วนโค้งงอได้ง่าย มี ๒ แบบ คือ ๗๕ โอห์ม และ ๕๐ โอห์ม ขนาดของสายมีตั้งแต่ ๐.๔ - ๑.๐ นิ้ว ชั้นตัว

เหนียวนำทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียพลังงานจากแผ่รังสี เปลือกฉนวนหนาทำให้สายโคแอก มีความคงทนสามารถฝังเดินสายใต้พื้นดินได้ สายโคแอกยังช่วยป้องกัน "การสะท้อนกลับ" (Echo) ของเสียงได้อีกด้วยและลดการรบกวนจากภายนอกได้ดีเช่นกัน



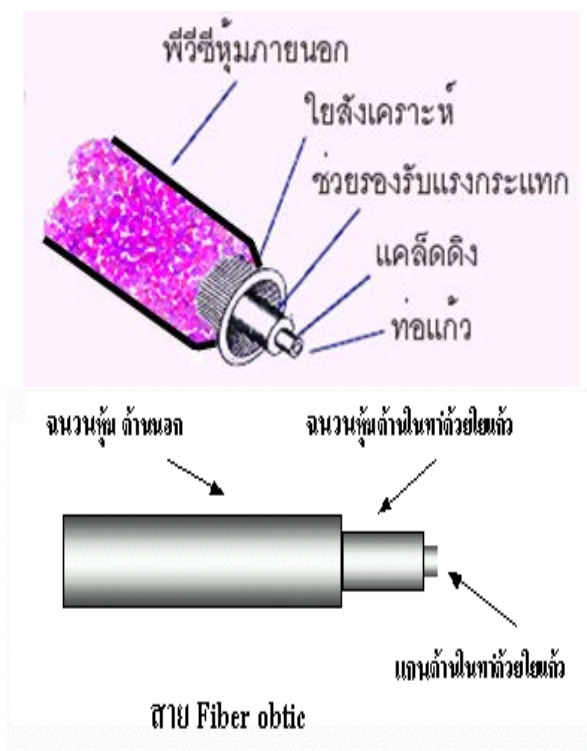
ภาพที่ ๕-๑๐ สายโคแอกเชียล

สายโคแอกสามารถส่งสัญญาณได้ ทั้งในช่องทางแบบเบสแบนด์และแบบบรอดแบนด์ การส่งสัญญาณในเบสแบนด์สามารถทำได้เพียง ๑ ช่องทางและเป็นแบบครึ่งดูเพล็กซ์ แต่ในส่วนของ การส่งสัญญาณ ในบรอดแบนด์จะเป็นเช่นเดียวกับสายเคเบิลทีวี คือสามารถส่งได้พร้อมกันหลายช่องทางทั้ง ข้อมูลแบบดิจิทัลและแบบอนาล็อก สายโคแอกของเบสแบนด์สามารถส่งสัญญาณได้ไกลถึง ๒ กม. ในขณะที่บรอดแบนด์ส่งได้ไกลกว่าถึง ๖ เท้า โดยไม่ต้องใช้เครื่องทวนสัญญาณ หรือเครื่องขยายสัญญาณเลย ถ้าอาศัยหลักการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ FDM สายโคแอกสามารถมีช่องทาง (เสียง) ได้ถึง ๑๐,๐๐๐ ช่องทางในเวลาเดียวกัน อัตราเร็วในการส่งข้อมูลมีได้สูงถึง ๕๐ เมกะบิตต่อวินาที หรือ ๘๐๐ เมกะบิตต่อวินาที ถ้าใช้เครื่องทวนสัญญาณทุก ๆ ๑.๖ กม.

ตัวอย่างการใช้สายโคแอกในการส่งสัญญาณข้อมูลที่ใช้กันมากในปัจจุบัน คือสายเคเบิลทีวี และสายโทรศัพท์ทางไกล (อนาล็อก) สายส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายท้องถิ่น หรือ LAN (ดิจิทัล) หรือใช้ในการเชื่อมโยงสั้น ๆ ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

### ๑.๔.๑.๓ ใยแก้วนำแสง (Fiber-Optic)

ลักษณะใยแก้วนำแสงจะส่งสัญญาณแสงวิ่งผ่านท่อแก้วหรือท่อพลาสติกเล็กๆซึ่งท่อแก้วนี้จะถูกหุ้มด้วยเจลหรือพลาสติก เพื่อป้องกันความเสียหายและการสูญเสียของสัญญาณ มีข้อดีตรงที่ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลโดยไม่มีสัญญาณรบกวน แสดงดังภาพด้านล่าง



ภาพที่ ๕-๑๑ ใยแก้วนำแสง

หลักการทั่วไปของการสื่อสารในสายไฟเบอร์ออปติกคือการเปลี่ยนสัญญาณ (ข้อมูล) ไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแสงก่อน จากนั้นจึงส่งออกไปเป็นพัลส์ของแสงผ่านสายไฟเบอร์ออปติกสายไฟเบอร์ออปติกทำจากแก้วหรือพลาสติกสามารถส่งลำแสง ผ่านสายได้ทีละหลาย ๆ ลำแสงด้วยมุมที่ต่างกัน ลำแสงที่ส่งออกไปเป็นพัลส์นั้นจะสะท้อนกลับไปที่ผิวของสายชั้นในจนถึงปลายทาง จากสัญญาณข้อมูลซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณอนาล็อกหรือดิจิทัล จะผ่านอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณเสียก่อน จากนั้น จะส่งสัญญาณมอดูเลตผ่านตัวไดโอดซึ่งมี ๒ ชนิดคือ LED ไดโอด (light Emitting Diode) และ เลเซอร์ไดโอด หรือ ILD ไดโอด (Injection Laser Diode) ไดโอดจะมีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณมอดูเลตให้เป็นลำแสงเลเซอร์ซึ่งเป็นคลื่นแสงในย่านที่มองเห็นได้ หรือเป็นลำแสงในย่านอินฟราเรดซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ ความถี่อินฟราเรดที่ใช้จะอยู่ในช่วง ๑,๐๑๔ - ๑,๐๑๕ เฮิร์ตซ์ ลำแสงจะถูกส่งออกไปตามสายไฟเบอร์ออปติก เมื่อถึงปลายทางก็จะมีตัวโฟโตไดโอด (Photo Diode) ที่ทำหน้าที่รับลำแสงที่ถูกส่งมาเพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงให้กลับไปเป็นสัญญาณมอดูเลตตามเดิม จากนั้นก็จะส่งสัญญาณผ่านเข้าอุปกรณ์ดีมอดูเลต เพื่อทำการดีมอดูเลตสัญญาณมอดูเลตให้เหลือแต่สัญญาณข้อมูลที่ต้องการ

สายไฟเบอร์ออปติกสามารถมีแบนด์วิดท์ (BW) ได้กว้างถึง ๓ จิกะเฮิร์ตซ์ ( $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$ ) และมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลได้ถึง ๑ จิกะบิตต่อวินาที ภายในระยะทาง ๑๐๐ กม. โดยไม่ต้องการเครื่องทบทวนสัญญาณเลย สายไฟเบอร์ออปติกสามารถมีช่องทางสื่อสารได้มากถึง ๒๐,๐๐๐ - ๖๐,๐๐๐ ช่องทาง สำหรับการส่งข้อมูลในระยะทางไกล ๆ ไม่เกิน ๑๐ กม. จะสามารถมีช่องทางได้มากถึง ๑๐๐,๐๐๐ ช่องทางทีเดียว

ความผิดพลาดในการส่งข้อมูลผ่านสายไฟเบอร์ออปติกนั้นมีน้อยมาก คือประมาณ ๑ ใน ๑๐ ล้านบิตต่อการส่ง ๑,๐๐๐ ครั้ง เท่านั้น ทั้งยังป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้โดยสิ้นเชิง

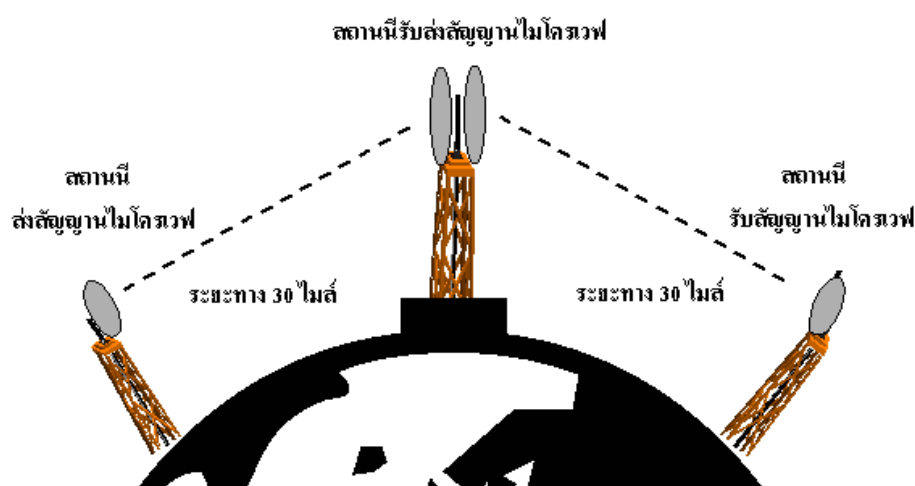
แม้ว่าการส่งข้อมูลผ่านทางสายไฟเบอร์ออปติก จะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพยอดเยี่ยม และจำนวนมหาศาลดังกล่าวมาแล้วก็ตามแต่เราต้องคำนึงถึง ปัญหาและความเหมาะสม บางประการอีกด้วย

### ๑.๔.๒ สื่อกลางแบบไร้สาย (Unguided media)

เป็นสื่อกลางประเภทที่ไม่ใช้วัสดุใดๆ ในการนำสัญญาณ ซึ่งจะไม่มีกำหนดเส้นทางให้สัญญาณเดินทาง เช่น คลื่นไมโครเวฟ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### ๑.๔.๒.๑ ระบบคลื่นไมโครเวฟ

ระบบสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ มักใช้ในการเชื่อมต่อเครือข่ายที่อยู่ในพื้นที่ที่เชื่อมต่อด้วยสื่อประเภทอื่นลำบาก เช่น มีแม่น้ำขวางกั้นอยู่ หรือการสื่อสารข้ามอาคาร เป็นต้น การส่งสัญญาณข้อมูลไปกับคลื่นไมโครเวฟเป็นการส่งสัญญาณข้อมูลแบบรับช่วงต่อๆ กันจากสถานีรับส่งสัญญาณหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง โดยสามารถเกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งสภาพดินฟ้าอากาศมีผลต่อการส่งคลื่นไมโครเวฟพอสมควร เช่น ถ้าสภาพอากาศมีฝนหรือคว้นมาก สัญญาณไมโครเวฟจะถูกรบกวนได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้เครื่องส่งรับไมโครเวฟส่วนใหญ่จะถูกออกแบบมาให้ทำงานในสภาพอากาศต่างๆ ที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพ



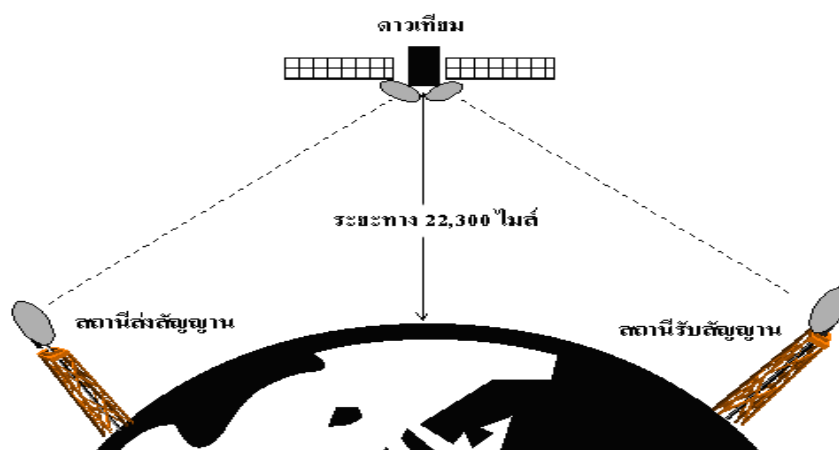
ภาพที่ ๕-๑๒ ระบบคลื่นไมโครเวฟ

การส่งสัญญาณข้อมูลไมโครเวฟมักใช้กันในกรณีที่ต้องการติดตั้งสายเคเบิลทำไม่ได้ไม่สะดวก เช่น ในเขตเมืองใหญ่ ๆ หรือในเขตที่ป่าเขา แต่ละสถานีไมโครเวฟจะติดตั้งงานส่ง-รับสัญญาณข้อมูล ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ๑๐ ฟุต สัญญาณไมโครเวฟเป็นคลื่นย่านความถี่สูง (๒-๑๐ จิกะเฮิรตซ์) เพื่อป้องกันการแทรกหรือรบกวนจากสัญญาณอื่น ๆ แต่สัญญาณอาจจะอ่อนลง หรือหักเหได้ในที่มีอากาศร้อนจัด พายุหรือฝน ดังนั้นการติดตั้งงาน ส่ง-รับสัญญาณจึงต้องให้หันหน้าของจานตรงกัน และห้อยสูงยิ่งส่งสัญญาณได้ไกล

ปัจจุบันมีการใช้การส่งสัญญาณข้อมูลทางไมโครเวฟกันอย่างแพร่หลาย สำหรับการสื่อสารข้อมูลในระยะทางไกล ๆ หรือระหว่างอาคาร โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่สะดวกที่จะใช้สายไฟเบอร์ออปติก หรือการสื่อสารดาวเทียม อีกทั้งไมโครเวฟยังมีราคาถูกกว่า และติดตั้งได้ง่ายกว่า และสามารถส่งข้อมูลได้คราวละมาก ๆ ด้วย อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญที่ทำให้สื่อกลางไมโครเวฟเป็นที่นิยม คือราคาที่ถูกลง

### ๑.๔.๒.๒ ระบบดาวเทียม

การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นการสื่อสารที่สถานีรับ-ส่งที่อยู่บนพื้นดิน ส่งตรงไปยังดาวเทียมแล้วส่งกลับมายังตัวรับปลายทางที่พื้นดินอีกครั้งหนึ่ง ลักษณะการสื่อสารระบบดาวเทียมเหมาะสำหรับการติดต่อสื่อสารระยะไกลที่ระบบสื่อสารอื่นๆ เข้าถึงลำบาก เช่น เดินเรืออยู่กลางทะเล แสดงดังภาพ



ภาพที่ ๕-๑๓ ระบบดาวเทียม

ลักษณะของการรับส่งสัญญาณข้อมูลอาจจะเป็นแบบจุดต่อจุด (Point-To-Point) หรือแบบแพร่สัญญาณ (Broadcast) สถานีดาวเทียม ๑ ดวง สามารถมีเครื่องทบทวนสัญญาณดาวเทียมได้ถึง ๒๕ เครื่อง และสามารถครอบคลุมพื้นที่การส่งสัญญาณได้ถึง ๑ ใน ๓ ของพื้นผิวโลก ดังนั้นถ้าจะส่งสัญญาณข้อมูลให้ได้รอบโลกสามารถทำได้โดยการส่งสัญญาณผ่านสถานีดาวเทียมเพียง ๓ ดวงเท่านั้น ระหว่างสถานีดาวเทียม ๒ ดวง ที่ใช้ความถี่ของสัญญาณเท่ากันถ้าอยู่ใกล้กันเกินไปอาจจะทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณ ซึ่งกันและกันได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวน หรือชนกันของสัญญาณดาวเทียม จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานระยะห่างของสถานีดาวเทียม และย่านความถี่ของสัญญาณดังนี้

๑. ระยะห่างกัน ๔ องศา (วัดมุมเทียบกับจุดศูนย์กลางของโลก) ให้ใช้ย่านความถี่ของสัญญาณ ๔/๖ จิกะเฮิรตซ์ หรือย่าน C แบนด์ โดยมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณอัป-ลิงก์เท่ากับ ๕.๙๒๕-๖.๔๒๕ จิกะเฮิรตซ์ และมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณดาว-ลิงก์เท่ากับ ๓.๗-๔.๒ จิกะเฮิรตซ์

๒. ระยะห่างกัน ๓ องศา ให้ใช้ย่านความถี่ของสัญญาณ ๑๒/๑๔ จิกะเฮิรตซ์ หรือย่าน KU แบนด์ โดยมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณอัป-ลิงก์เท่ากับ ๑๔.๐-๑๔.๕ จิกะเฮิรตซ์ และมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณดาว-ลิงก์เท่ากับ ๑๑.๗-๑๒.๒ จิกะเฮิรตซ์

สำหรับการส่งสัญญาณข้อมูลนั้นในแต่ละเครื่องทบทวนสัญญาณจะมีแบนด์วิดท์เท่ากับ ๓๖ เมกะเฮิรตซ์ และมีอัตราเร็วการส่งข้อมูลสูงสุดเท่ากับ ๕๐ เมกะบิตต่อวินาที

ข้อเสีย ของการส่งสัญญาณข้อมูลทางดาวเทียมคือ สัญญาณข้อมูลสามารถถูกรบกวนจากสัญญาณภาคพื้นอื่น ๆ ได้ อีกทั้งยังมีเวลาประวิง (Delay Time) ในการส่งสัญญาณเนื่องจากระยะทางขึ้น-ลงของสัญญาณ นอกจากนี้สัญญาณรบกวนและสภาพดินฟ้าอากาศที่แปรปรวนจะรบกวนสัญญาณให้ผิดเพี้ยนไปได้ โดยส่วนใหญ่ดาวเทียมจะถูกออกแบบมาให้ชดเชยการรบกวนของสภาพอากาศที่

แปรปรวนเหล่านั้นเช่น ฝน หรือหมอก เป็นต้น และที่สำคัญคือ มีราคาสูงในการลงทุนทำให้ค่าบริการสูงตามขึ้นมาเช่นกัน

### หลักเกณฑ์ในการเลือกสื่อกลาง

ต้องคำนึงถึงในการเลือกสื่อกลางที่เหมาะสมกับการสื่อสารข้อมูลในรูปแบบต่างๆ สรุปได้ดังนี้

๑. อัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูล (Transmission Rate) โดยพิจารณาจากปริมาณของข้อมูลที่ส่งผ่านว่ามากน้อยเพียงใด ข้อมูลนั้นมีความเร่งด่วนหรือสำคัญขนาดไหน

๒. ระยะทาง (Distance) จะต้องทราบวาระยะทางระหว่างอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อนั้น อยู่ห่างกันแค่ไหน เช่น ภายในห้องเดียวกัน จังหวัดใกล้เคียง หรืออยู่ห่างกันคนละประเทศ เป็นต้น

๓. ค่าใช้จ่าย (Cost) จะมีค่าใช้จ่ายมากน้อยเพียงใด และต้องจ่ายในส่วนใดบ้าง เช่น ต้องมีค่าติดตั้ง ค่าดูแลรักษาระบบ หรือ มีค่าบริการรายเดือน เป็นต้น

๔. ความสะดวกในการติดตั้ง (Easy Of Install) โดยพิจารณาถึงความเหมาะสมของสถานที่ว่าควรใช้สื่อกลางแบบใด เช่น พื้นที่ที่ไม่สะดวกในการเดินสายอาจใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟ หรือ ดาวเทียมแทน เป็นต้น

๕. ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม (Resistance To Environmental Conditions) โดยเลือกสื่อกลางให้เหมาะสมกับภูมิประเทศ และสิ่งแวดล้อม

## ๑.๕ อุปกรณ์สำหรับการสื่อสาร

การสื่อสารข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการส่งข้อมูล จากผู้ส่งไปยังผู้รับ ไม่ว่าจะเป็นการแปลงข้อมูล เช่น ข้อความในกระดาษ รูปภาพ ที่ไม่อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าให้เปลี่ยนอยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณดิจิทัล อุปกรณ์ในการสื่อสารยังรวมถึงอุปกรณ์ที่ช่วยในการแก้ปัญหาสัญญาณอ่อนกำลัง ปัญหาสัญญาณรบกวนเมื่อมีการส่งสัญญาณ ดังนั้น ระบบการสื่อสารข้อมูลจึงต้องมีอุปกรณ์การสื่อสารมาช่วยในการจัดการปัญหาต่างๆ เหล่านี้ เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยในหัวข้อนี้จะขอยกตัวอย่างอุปกรณ์ที่มีการใช้กันมากในระบบการสื่อสารข้อมูล

### ๑.๕.๑ เครื่องเทอร์มินอล (Terminal)

เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ต้นทางหรือปลายทางที่ทำหน้าที่ในการส่งและรับข้อมูลได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลต่างๆไป (Personal Computer)

### ๑.๕.๒ โมเด็ม (Modem)

เมื่อต้องการเชื่อมต่อเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวหนึ่งที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายไปยังระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า โมเด็ม ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกแล้วส่งผ่านไปตามระบบโทรศัพท์

### ๑.๕.๓ เครื่องทวนสัญญาณ (Repeater)

เป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และป้องกันการขาดหายของสัญญาณ เนื่องจาก การสื่อสารข้อมูลต้องใช้สัญญาณไฟฟ้าในการรับส่งข้อมูล โดยตามปกติเมื่อสัญญาณทางไฟฟ้าเดินทางจากจุดๆหนึ่งไปยังปลายทางจะเกิดการสูญเสียแรงดันทางไฟฟ้า และส่งผลให้สัญญาณเกิดอ่อนกำลัง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีรีพีตเตอร์มาช่วยในการรับส่งข้อมูล โดยรีพีตเตอร์ทำหน้าที่ทวนสัญญาณไฟฟ้าขึ้นใหม่ให้เหมือนสัญญาณเดิมที่ถูกส่ง

### ๑.๕.๔ เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier)

เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ โดยมีหน้าที่การทำงานเหมือนกับปริ๊นเตอร์ แต่จะ ใช้กับสัญญาณอนาล็อก โดยเมื่อสัญญาณอนาล็อกอ่อนกำลังเครื่องขยายสัญญาณจะทำการขยายสัญญาณ ที่อ่อนกำลังให้มีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับสัญญาณเดิม แต่ของเสียของเครื่องขยายสัญญาณ คือ มันจะขยายสัญญาณรบกวนที่ผสมมากับสัญญาณข้อมูลด้วย

## ๒. ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Computer Network)

ความหมายของเครือข่าย (Network) ระบบเครือข่ายหรือเน็ตเวิร์ก (Network) คือ ระบบที่มี คอมพิวเตอร์ ตั้งแต่ ๒ เครื่องขึ้นไป เชื่อมต่อกันอยู่ การสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ฝั่งส่งกับ คอมพิวเตอร์ฝั่งรับ ๒ เครื่อง แต่เมื่อเราต้องการสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์มากกว่า ๒ ตัว โดย การนำคอมพิวเตอร์มาต่อร่วมกันหลายๆ เครื่อง เราจะเรียกว่า ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Computer Network) ซึ่งในปัจจุบันระบบเครือข่ายมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์นั้น เป็นการเพิ่มความสามารถของระบบให้สูงขึ้นและเป็นการลดต้นทุนระบบโดยรวมลง ซึ่งจะมีการแบ่ง การใช้งานอุปกรณ์และข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนสามารถทำงานร่วมกันได้

ความสำคัญและประโยชน์ของระบบเครือข่าย ในด้านต่าง ๆ ดังนี้ การใช้ทรัพยากร (Resource) ร่วมกัน คือ สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงร่วมกันได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายฮาร์ดแวร์ ลงไปได้มาก เนื่องจากไม่ต้องมีอุปกรณ์เหล่านี้ในทุกๆ จุด เช่น ซื้อเครื่องพิมพ์คุณภาพดีมาใช้ร่วมกัน ดีกว่าซื้อ เครื่องพิมพ์ให้แก่คอมพิวเตอร์ทุกตัว ดังนั้นการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เป็นเครือข่ายจึงเป็นการเพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้งานให้กว้างขวางและมากขึ้นจากเดิม และการเชื่อมต่อเครือข่ายนั้นยังไม่ได้จำกัด อยู่ที่การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการเชื่อมต่ออุปกรณ์รอบข้าง เช่น การเชื่อมต่อกับระบบโทรศัพท์ การใช้ข้อมูลในไฟล์ร่วมกัน การเข้าถึงข้อมูลและแบ่งปันข้อมูลของ เครื่องคอมพิวเตอร์ตัวใดก็ได้ที่เชื่อมต่อกัน การบริหารเครือข่าย (Network Management) ระบบ รักษาความปลอดภัย (Security System) และการสำรองข้อมูล (Back Up) เป็นต้น

โพรโตคอล (Protocol) คือ ระเบียบพิธีการในการติดต่อสื่อสาร เมื่อมาใช้กับเทคโนโลยีสื่อสาร โทรคมนาคม จึงหมายถึงขั้นตอนการติดต่อสื่อสาร ซึ่งรวมถึง กฎ ระเบียบ และข้อกำหนดต่าง ๆ รวมถึงมาตรฐานที่ใช้ เพื่อให้ตัวรับและตัวส่งสามารถดำเนินกิจกรรมทางด้านสื่อสารได้สำเร็จ

แนวคิดด้านสื่อสารข้อมูล หัวใจในการสื่อสารข้อมูลอยู่ที่ว่าจะทำอะไรให้อุปกรณ์สื่อสารต่าง ๆ สื่อสารกันได้อย่างอัตโนมัติ โดยเน้นการสื่อสารที่แตกต่างกันทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์และวิธีการต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์เมนเฟรมยี่ห้อหนึ่ง ติดต่อผ่านข่ายสื่อสารไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์อีกยี่ห้อหนึ่ง โดยมี ผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมโยงในระบบสื่อสารที่มาจากหลายบริษัทผู้ผลิต ด้วยแนวคิดนี้ องค์กรว่าด้วยเครื่อง มาตรฐานระหว่างประเทศ หรือที่รู้จักกันในนาม OSI (Open Systems Interconnection Reference Model) หรือนิยม เรียกกันทั่วไปว่า OSI Reference Model ของ ISO จึงได้วางมาตรฐาน โพรโตคอลไว้ เป็นระดับ เพื่อให้การสื่อสารต่าง ๆ ยึดหลักการนี้และเรียกมาตรฐานโพรโตคอลนี้ว่า OSI Protocol โดยวางเป็นระดับ ๗ ชั้น แบบจำลองสำหรับอ้างอิง เป็นแบบจำลองที่ถูกเสนอและพัฒนาโดยองค์กร International Standard Organization (ISO) โดยจะบรรยายถึงโครงสร้างของสถาปัตยกรรม เครือข่ายในอุดมคติ ซึ่งระบบเครือข่ายที่เป็นไปตาม สถาปัตยกรรมนี้ จะเป็นระบบเครือข่ายแบบเปิด และ อุปกรณ์ ทางเครือข่ายจะสามารถติดต่อกันได้โดยไม่สนใจว่าเป็นอุปกรณ์ จากผู้ผลิตรายใด

แบบจำลอง OSI จะแบ่งการทำงานของเครือข่ายออกเป็น ๗ ชั้น คือ OIS Layer หน้าที่ของแต่ละ Layer ดังนี้

Layer ๑ Physical เป็นชั้นการทำงานทางกายภาพของระบบการเชื่อมต่อ ทั้งในส่วนของสัญญาณทางไฟฟ้า ระบบสายสัญญาณ (Cable) และตัวเชื่อมต่อ (Connector)

Layer ๒ Data Link เป็นชั้นที่รับผิดชอบการนำข้อมูลเข้าและออกจากตัวกลาง การจัดเฟรม การตรวจสอบและจัดการข้อผิดพลาดของข้อมูล (Error Detection Correction and Retransmission) ในชั้นนี้จะมีการแบ่งออกเป็น ๒ ชั้นย่อย (Sub-Layers) คือ LLC (Logical Link Control) จะอยู่ในครึ่งบน รับผิดชอบในเรื่องการตรวจสอบข้อผิดพลาด และ MAC (Media Access Control) อยู่ในครึ่งล่าง เป็นส่วนของวิธีส่งข้อมูลผ่านสื่อกลาง

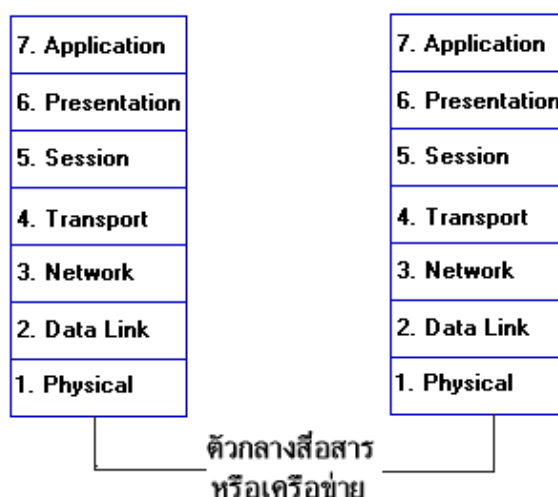
Layer ๓ Network เป็นชั้นที่ทำการตรวจสอบการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย เช่น เวลาที่ใช้ในการส่ง การส่งต่อ (Routing) และการจัดการลำดับ (Flow Control) ของข้อมูล

Layer ๔ Transport เป็นชั้นที่รับผิดชอบการส่งถ่ายข้อมูลระหว่างจุด จะทำการตรวจสอบสามชั้นล่างว่า มีการทำงานที่ถูกต้อง และ ทำการส่งผ่านข้อมูลให้ชั้นที่สูงกว่า โดยซ่อนวิธีการทำงานที่เกิดขึ้นจริงในสามชั้นล่างไว้ โดยปกติแล้ว นับจากชั้นนี้ถึงชั้นบนสุดจะอยู่ในซอฟต์แวร์ประยุกต์ทางด้านเครือข่ายตัวเดียวกัน ในขณะที่ชั้นที่ต่ำกว่านี้เป็นส่วนจัดการเครือข่ายซึ่งขึ้นกับชนิดของระบบเครือข่าย ที่ใช้งานอยู่

Layer ๕ Session รับผิดชอบการควบคุมการติดต่อและการประสานของข้อมูลที่ส่งผ่านระบบเครือข่าย เช่น การตรวจสอบลำดับก่อนหลังที่ถูกต้องของ Packet เป็นต้น

Layer ๖ Presentation เป็นชั้นการทำงานของระบบรักษาความลับและการเปลี่ยนแปลงข้อมูลรูปแบบต่างๆ ให้สามารถแลกเปลี่ยนกันได้ เช่น แปลงระหว่าง EBCDIC กับ ASCII หรือการแปลงข้อมูลที่สลับบรรทัดระหว่างระบบ UNIX กับ MSDOS เป็นต้น

Layer ๗ Application เป็นชั้นการทำงานของซอฟต์แวร์ประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบเครือข่าย เช่น การส่งผ่านแฟ้มข้อมูล การจำลอง Terminal การแลกเปลี่ยนข้อมูล เป็นต้น



## โมเดลมาตรฐานระดับโปรโตคอลตาม OSI

ภาพที่ ๕-๑๔ โมเดลมาตรฐาน OSI



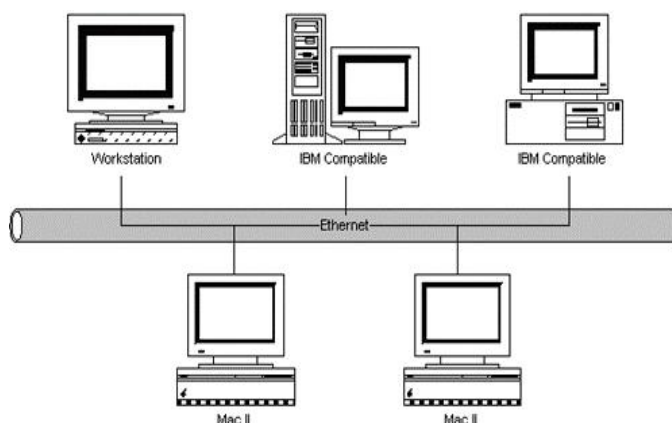
ข้อยกตัวอย่างการทำงานของระดับโปรโตคอลใน LAN ระบบ LAN ที่นิยมและแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ Ethernet, Token Ring และ FDDI โปรโตคอลที่ใช้ประกอบเป็น LAN ตามมาตรฐานข้อกำหนด จึงจัดอยู่ในระดับโปรโตคอลระดับ ๑ และ ๒ เท่านั้น

อีเทอร์เน็ต (Ethernet) เป็น LAN ที่มีผู้นิยมใช้กันมาก อีเทอร์เน็ตมีโปรโตคอลในระดับชั้นฟิสิคัล (Physical) ได้หลายรูปแบบ ตามสภาพความเร็วของการรับส่งข้อมูล รูปแบบสัญญาณและตัวกลางที่ใช้รับส่ง การกำหนดชื่อของ LAN แบบนี้ใช้วิธีการกำหนดเป็น XXBASEY เมื่อ XX คือความเร็ว BASE คือวิธีการส่งสัญญาณเป็นแบบ Digital Baseband ส่วน Y คือตัวกลางที่ใช้ส่งสัญญาณ เช่น

100 BASE-T หมายถึงส่งความเร็ว ๑๐๐ เมกะบิต แบบ Unshielded Twisted-Pair

1000 BASE-T หมายถึงส่งความเร็ว ๑ กิกะบิต แบบสาย UTP

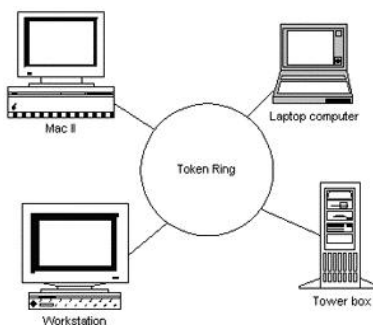
หรือถ้า 1000 BASE-F ก็จะเป็นการใช้สายเส้นใยแก้วนำแสง



สัญญาณทางไฟฟ้าของอีเทอร์เน็ตเป็นแบบดิจิทัล จึงทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องระยะทางที่ใช้ระเบียบข้อกำหนดเหล่านี้จึงอยู่ในกลุ่มโปรโตคอลระดับฟิสิคัล ส่วนในระดับโปรโตคอลดาต้าลิงค์เป็นวิธีการกำหนดแอดเดรสระหว่างกันในเครือข่าย ซึ่งแต่ละสถานีจะมีแอดเดรสเป็นตัวเลขขนาด ๔๘ บิต การรับส่งเป็นการสร้างข้อมูลเป็นแพ็กเก็ตเรียกว่า "เฟรม" การส่งข้อมูลมีวิธีการใส่ข้อมูลแอดเดรสต้นทางและปลายทางและส่งกระจายออกไป ผู้รับจะตรวจสอบแอดเดรสของเฟรมถ้าตรงกับแอดเดรสตนก็จะรับข้อมูลเข้ามา

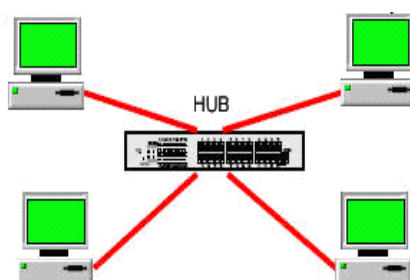
### ๒.๑ รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบเครือข่าย (Network Topology)

สถาปัตยกรรมของระบบเครือข่าย (Network Architecture) หรือโทโปโลยี (Topology) คือลักษณะทางกายภาพ (ภายนอก) ของเครือข่าย เป็นลักษณะของการเชื่อมโยงสายสื่อสารเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ภายในเครือข่ายด้วยกันนั่นเอง



### ๒.๑.๑ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาว

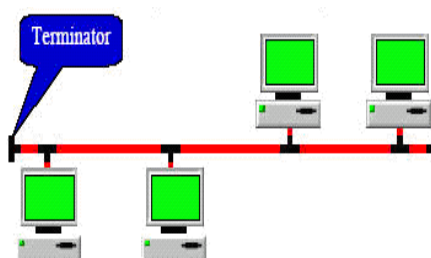
ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์หลายๆ เครื่องมาเชื่อมต่อในลักษณะแบบดาว คือ มีคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งที่เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆ และอุปกรณ์ที่เหลือ โดยเครื่องศูนย์กลางจะทำหน้าที่ในการควบคุมการสื่อสาร ทั้งการกำหนดเส้นทางการสื่อสาร หรือการดูแลอุปกรณ์ที่จะใช้งานร่วมกัน กล่าวคือ คอมพิวเตอร์ตัวใด จะติดต่อสื่อสารกันจะต้องผ่านคอมพิวเตอร์ตัวกลางนี้ตลอด หรือ คอมพิวเตอร์ตัวใด ต้องการพิมพ์งาน ก็จะต้องติดต่อกับเครื่องพิมพ์ผ่านคอมพิวเตอร์ตัวกลางก่อน ซึ่งถ้าคอมพิวเตอร์ศูนย์กลางเกิดเสียหายจะทำให้ทั้งระบบไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ แสดงดังภาพ



ภาพที่ ๕-๑๕ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาว

### ๒.๑.๒ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบบัส

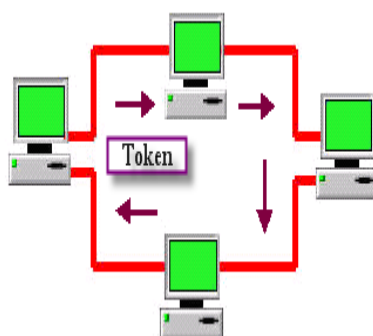
เป็นการเชื่อมต่อเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ทั้งหมดบนสายสื่อสารเพียงเส้นเดียว เช่น สายคู่บิดเกลียว สายโคแอกเชียล หรือสายใยแก้วนำแสง โดยสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอุปกรณ์หรือคอมพิวเตอร์ตัวใดก็ตามจะเป็นลักษณะการกระจายข่าว (Broadcast) คือ ส่งออกไปทั้งสองทิศทางไปยังทุกส่วนของระบบเครือข่ายนั้น โดยมีซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งกับอุปกรณ์แต่ละตัวเป็นตัวควบคุมการสื่อสาร ซึ่งเป็นการทำงานที่ไม่มีอุปกรณ์ตัวใดทำหน้าที่เป็นผู้ควบคุมระบบเลย ในกรณีนี้ถ้าอุปกรณ์ใดก็ตามหยุดการทำงานไปก็จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่ยังคงทำงานอยู่ แต่อย่างไรก็ตาม ณ ระยะเวลาๆ หนึ่งระบบนี้จะมีอุปกรณ์เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่สามารถส่งสัญญาณออกมาได้ โดยอุปกรณ์ตัวอื่นที่ต้องการส่งสัญญาณจะต้องหยุดรอจนกว่าในระบบจะไม่มีผู้ใดส่งสัญญาณจึงจะสามารถเริ่มส่งสัญญาณของตนเองออกมาได้ ถ้ามีอุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปส่งสัญญาณออกมาพร้อมกันก็จะเกิดปัญหาสัญญาณชนกัน (Collision) ซึ่งจะทำให้สัญญาณของทุกฝ่ายเสียหายไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำในกรณีที่มีอุปกรณ์เชื่อมต่ออยู่เป็นจำนวนมาก แสดงดังภาพ



ภาพที่ ๕-๑๖ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบบัส

### ๒.๑.๓ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบวงแหวน

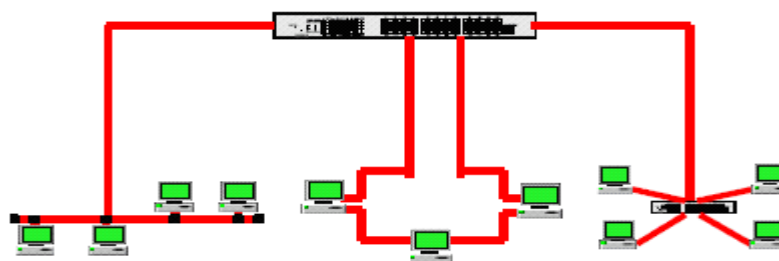
เป็นการเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นวงแหวน การรับส่งข้อมูลจะเป็นไปในทิศทางเดียว โดยใช้ Token ซึ่งเป็นตัวอนุญาตให้คอมพิวเตอร์ตัวใดมีสิทธิ์ส่งข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดการชนกันของข้อมูล โดยถ้าคอมพิวเตอร์ตัวใดต้องการส่งข้อมูลก็จะไปจับ Token มาและใส่ข้อมูลไปกับ Token ซึ่งในขณะที่ Token ไม่ว่างคอมพิวเตอร์ตัวอื่น ก็ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ จึงจำเป็นต้องรอให้ Token ว่างซึ่ง Token จะว่างก็ต่อเมื่อส่งข้อมูลได้ถูกต้องเรียบร้อยแล้ว แสดงดังภาพ



ภาพที่ ๕-๑๗ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบวงแหวน

### ๒.๑.๔ เครือข่ายแบบผสม (Mesh Network)

เป็นเครือข่ายที่ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน เป็นการผสมเครือข่ายหลายๆแบบเข้าด้วยกัน เช่น เครือข่ายแบบบัสผสมแบบวงแหวนผสมแบบดาว แสดงดังภาพ



ภาพที่ ๕-๑๘ การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบผสม

## ๒.๒ องค์ประกอบของระบบเครือข่ายและการเชื่อมโยงระบบเครือข่าย (Internetworking)

ฮาร์ดแวร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างเครือข่ายการที่จะนำเอาคอมพิวเตอร์มาเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายนั้น ในบางครั้งเราจำเป็นต้องทำการขยายเครือข่ายออกไป หรือนำเครือข่ายต่างชนิดหรือต่าง Topology กันมาต่อเชื่อมกัน ซึ่งทำได้หลายแบบจะต้องมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

### ๒.๒.๑ คอมพิวเตอร์

ในระบบเครือข่ายจะต้องมีคอมพิวเตอร์เป็นองค์ประกอบพื้นฐานคอมพิวเตอร์ที่ต่อเชื่อมกันไม่จำเป็นต้องเป็น หรือประเภทเดียวกันสามารถที่จะนำคอมพิวเตอร์หลากรุ่นมาเชื่อมต่อกันได้ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องพีซี แมคอินทอช หรือยูนิกซ์เวิร์กสเตชัน ทรัพยากรอื่น ๆ ในเครือข่าย ซึ่งหมายถึง อุปกรณ์คอมพิวเตอร์อื่น ๆ ที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายได้ เช่น เครื่องพิมพ์ แฟกซ์หรืออุปกรณ์เก็บข้อมูลอื่นๆ เป็นต้น สายเคเบิล คือสายสัญญาณที่นำมาใช้เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์และทรัพยากรอื่นๆ ในเครือข่าย สายเคเบิลที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายแบบด้วยกัน แต่ละแบบก็มีความเร็วในการรับส่งข้อมูล และราคาแตกต่างกันไป ส่วนการเลือกใช้สายเคเบิลอย่างไรนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของเครือข่ายที่ใช้

### ๒.๒.๒ โมเด็ม (Modem)

ย่อมาจากคำว่า "Modulator/Demodulator" กระบวนการที่โมเด็มแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก เรียกว่า มอดูเลชัน (Modulation) โมเด็มที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่า โมดูเลเตอร์ (Modulator) กระบวนการที่โมเด็มแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เรียกว่า ดีมอดูเลชัน (Demodulation) โมเด็มที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่า ดีโมดูเลเตอร์ (Demodulator)

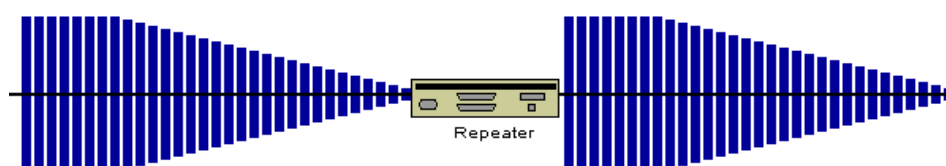
### ๒.๒.๓ การ์ดเชื่อมต่อเครือข่ายหรือแลนการ์ด (Network Interface Card :

NIC)

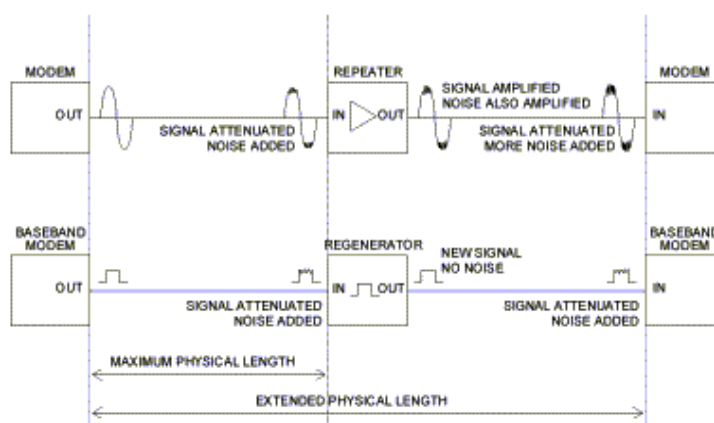
อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมระหว่างคอมพิวเตอร์กับสายเคเบิลคือการ์ดเชื่อมต่อเครือข่าย การ์ดนี้ส่วนใหญ่จะติดตั้งภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยเสียบลงบนเมนบอร์ดของคอมพิวเตอร์ ส่วนพอร์ตในการเชื่อมต่อกับสายเคเบิลจะอยู่ทางด้านหลังของเครื่องคอมพิวเตอร์ ช่วยในการควบคุม การรับส่งข้อมูล และตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

### ๒.๒.๔ รีพีตเตอร์ (Repeater)

โดยปกติแล้วปัญหาที่เกิดขึ้นร่วมกันในทุกเครือข่ายที่มีใช้งานอยู่ในโลกนี้คือ สัญญาณที่ลดทอนลงเสมอเมื่อสัญญาณเดินทางไกล ปัญหาดังกล่าวทำให้สัญญาณไฟฟ้ามีกำลังอ่อนลง เมื่อสัญญาณไฟฟ้าเดินทางไปในคู่สาย (เช่นสายทองแดงซึ่งถูกนำมาใช้ใช้งานอยู่ในเครือข่ายทั้งหลาย) กำลังงานไฟฟ้าในสัญญาณ ไฟฟ้าจะอ่อนลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ๆ ไป ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในสายนั้น ผลกระทบนี้ทำให้ระยะทางของเคเบิลที่จะนำมาใช้ถูกจำกัดอยู่ระยะหนึ่ง หากต้องการเพิ่มระยะทางออกไปต้องนำ Repeater มาใช้งานเพื่อขยายสัญญาณให้แรงขึ้น เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลกว่าเดิม

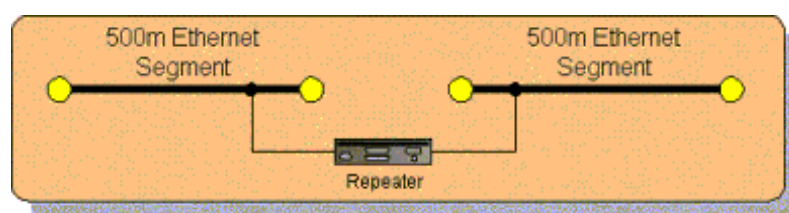


ภาพที่ ๕-๑๙ แสดงหลักการทำงานของ Repeater



ภาพแสดง Repeater and Regenerator

หน้าที่หลักของ Repeater ก็คือการขยายสัญญาณคล้ายๆ กับ Analogue Amplifier แต่ได้เพิ่มความสามารถในเรื่องการสร้างสัญญาณใหม่ (Regenerate) ทั้งนี้เพื่อสร้าง Digital Baseband Signal โดยทั่วไปแล้ว เราจะนำ Repeater มาต่อระหว่าง 2 LAN Cable Segments ในระบบเครือข่ายใด ๆ แต่ทั้งนี้ 2 LAN Cable Segments ที่เราจะนำมาต่อกันผ่านโดยผ่าน Repeater นี้ จะต้องเหมือนกันทุกประการทั้งทางโครงสร้าง (Topology) และสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมันจะขยายสัญญาณไฟฟ้าและส่งผ่านไปยังอีก Segment หนึ่ง



ภาพแสดงการนำ Repeater มาใช้งาน

จำนวนของ Repeaters ที่สามารถนำมาใช้งานได้นั้นจะถูกจำกัดอยู่ที่ค่าหนึ่ง เราไม่สามารถใช้งาน Repeater ได้โดยไม่มีจำกัดจำนวน ทั้งนี้เนื่องจากใน Network ชนิดต่างๆจะถูกกำหนดในเรื่องความยาวของ Network รวมทั้งถูกจำกัดค่า Propagation Time ตัวอย่างเช่นใน Ethernet Network ทุกชนิดจะถูกจำกัดในเรื่องเวลาสำหรับสัญญาณไฟฟ้าที่จะส่งไปยังส่วนต่างๆภายใน Network หรือ Network ที่จะนำมาต่อเชื่อมกัน การนำ Repeaters มาใช้งานทำให้การ Propagation ของสัญญาณช้าลง ดังนั้นจำนวนของ Repeaters จึงถูกจำกัดไปด้วย

### ๒.๒.๕ ฮับ (Hub)

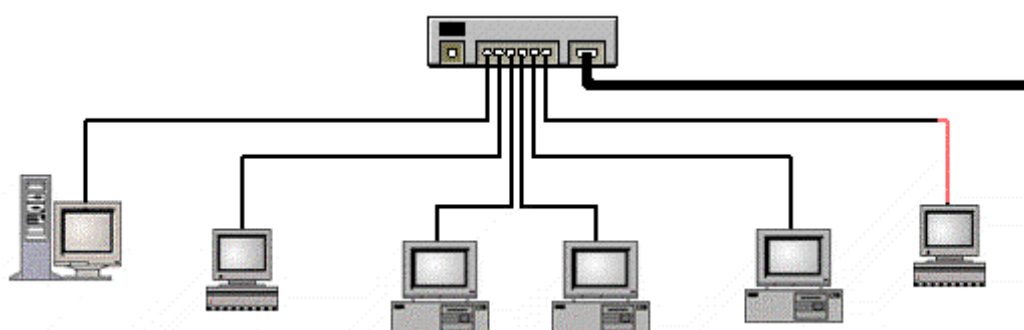
ในสมัยแรกที่น่ามีการ Ethernet LANs มาใช้งานนั้น ความเชื่อถือได้ของระบบขึ้นกับคุณภาพของสายหรือ Physical Characteristics ของที่ใช้ในการส่งสัญญาณภายในเครือข่าย (ปกติเป็น Coaxial Cable) ต่อมาได้มีการพัฒนา Ethernet เทคโนโลยีใหม่ และได้มีการ Cable ชนิดใหม่มาใช้งาน แต่เนื่อง Cable ชนิดใหม่นี้ไม่สามารถต่อโดยตรงเข้ากับ Coaxial Cable ที่ถูกนำมาใช้งานแต่เดิมได้ จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ต่อเชื่อมชนิดใหม่เรียกกันว่า HUBS ขึ้น

ฮับเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในการต่อสาย LAN แบบ UTP (Unshielded Twisted Pair) โดย HUB แต่ละตัวจะมีพอร์ตในการเชื่อมต่อกับสาย UTP ในจำนวนที่แตกต่างกัน เช่น ๘, ๑๖, ๒๔ หรือมากกว่านั้น ข้อดีของการใช้ HUB คือ ถ้ามีเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวใดหรือสายสัญญาณเส้นใดมีปัญหา ผิดปกติก็สามารถดึงออกได้โดยง่าย สามารถสลับเครื่อง เพิ่ม-ลดจำนวน รวมถึงสะดวกในการโยกย้ายสายสัญญาณ เพราะสายสัญญาณทั้งหมดนั้นรวมที่เดียวกันหมด ซึ่งอาจทำเป็นห้องหรือตู้ขึ้นมาเก็บสายสัญญาณให้เรียบร้อยได้ แบ่งได้เป็น สามชนิดคือ

Passive HUB คือ HUB ที่ใช้สำหรับการต่อ LAN หลายๆ Segments เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้ แต่ไม่ได้มีการขยายสัญญาณใดๆ หรือสร้างสัญญาณใดๆขึ้นมาใหม่ กล่าวคือ ไม่มีความสามารถในการด้าน Repeater Function ใดๆทั้งสิ้น ดังนั้น HUB ชนิดนี้ในขณะที่นำมาใช้งานเราไม่จำเป็นต้องทำการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้แก่ตัว HUB

Active HUB การทำงานจะคล้ายๆกับ Passive HUB แต่ได้มีการเพิ่มเติมหน้าที่หรือ Function ในการขยายเพื่อส่งไปยัง Segments ที่หลาย กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ Active HUB เป็น HUB ที่มีความสามารถด้าน Repeater Function ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว HUB ชนิดนี้ในขณะที่ใช้งานจะต้องมีการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้แก่ตัว HUB ด้วย

Intelligent HUB เป็น HUB ที่ทำหน้าที่เพียงการส่งสัญญาณผ่านไปยัง Segment อื่นๆ เมื่อมีการร้องขอจากอุปกรณ์เฉพาะ โดยสาเหตุนี้มันจึงได้ชื่อว่า Intelligent HUB



ภาพแสดง การนำ HUB มาใช้งาน

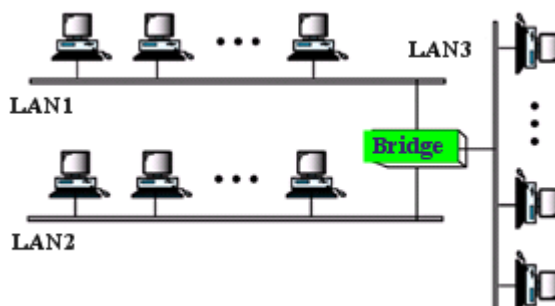
ปัจจุบัน Hubs ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย มันช่วยให้อุปกรณ์ที่แตกต่างกันสามารถนำมาต่อใช้งานร่วมกันได้

### ๒.๒.๖ บริดจ์ (Bridge)

เป็นอุปกรณ์เชื่อมโยงเครือข่ายของเครือข่ายที่แยกจากกัน แต่เดิมบริดจ์ได้รับการออกแบบมาให้ใช้กับเครือข่ายประเภทเดียวกัน เช่น ใช้เชื่อมโยงระหว่างอีเทอร์เน็ตกับอีเทอร์เน็ต (Ethernet)

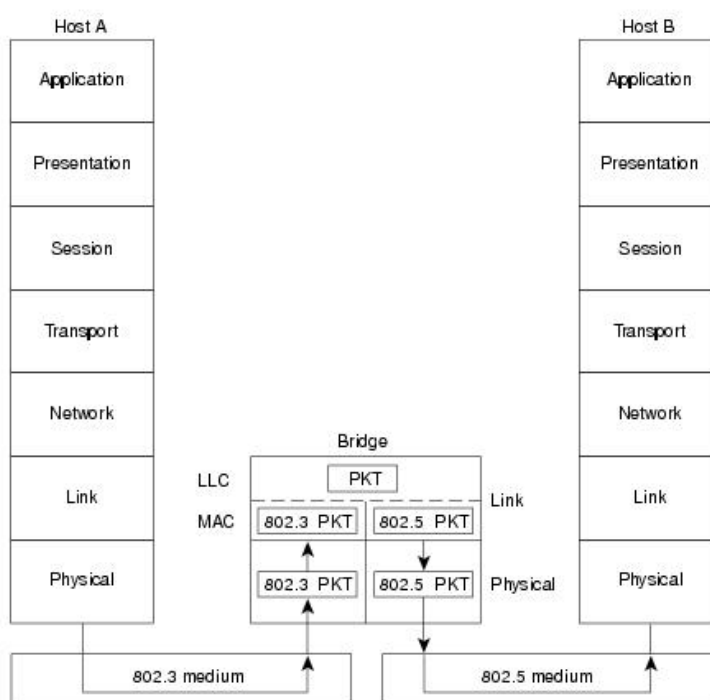
บริดจ์มีใช้มานานแล้ว ตั้งแต่ปี ค.ศ. ๑๙๘๐ บริดจ์ จึงเป็นเหมือนสะพานเชื่อมระหว่างสองเครือข่าย การติดต่อภายในเครือข่ายเดียวกัน มีลักษณะการส่งข้อมูลแบบกระจาย (Broadcasting) ดังนั้น จึงกระจายได้เฉพาะเครือข่ายเดียวกันเท่านั้น การรับส่งภายในเครือข่าย มีข้อกำหนดให้แพ็กเก็ตที่ส่งกระจายไปยังตัวรับได้ทุกตัว แต่ถ้ามีการส่งมาที่แอดเดรสต่างเครือข่าย บริดจ์ก็จะนำข้อมูลเฉพาะแพ็กเก็ตนั้นส่งให้ บริดจ์จะเป็นเหมือนตัวแบ่งแยกข้อมูลระหว่างเครือข่าย

ให้มีการสื่อสารภายในเครือข่ายของตนไม่ให้ปะปนไปยังอีกเครือข่ายหนึ่งเพื่อลดปัญหาปริมาณข้อมูลกระจายในสายสื่อสารมากเกินไป แสดงดังภาพ



ภาพแสดง Bridge ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

อาจจะกล่าวได้ว่า Bridge เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ switch ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง ๒ Network Segment หรือมากกว่า ในระบบเครือข่ายการสื่อสารข้อมูล โดยที่หลักการการทำงานจะทำงานอยู่ในระดับที่ ๒ ของ OSI Reference Model. และอุปกรณ์ซึ่งทำงานที่ระดับที่มักจะถูกเรียกว่า Data Link Layer Device การทำงานของ Bridge เป็นการทำงานใน Link Layer, ซึ่งจะควบคุมการไหลของข้อมูล และทำหน้าที่เกี่ยวกับการควบคุมและแก้ไขข้อผิดพลาดเกี่ยวกับการส่งสัญญาณ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เกี่ยวกับการจัด Provides Physical Addressing, และการจัดการ Manages เรื่องการ Access เข้าไปยัง Physical Medium ใดๆ ทั้งนี้โดยการนำ Link-Layer Protocols ที่มี Algorithms ในการทำหน้าที่ที่ต้องการเช่นการควบคุมการไหลของข้อมูล, การควบคุมเกี่ยวกับความผิดพลาดในการส่งข้อมูล และความสามารถในการ Access ไปยัง Media ต่างๆ เป็นต้น



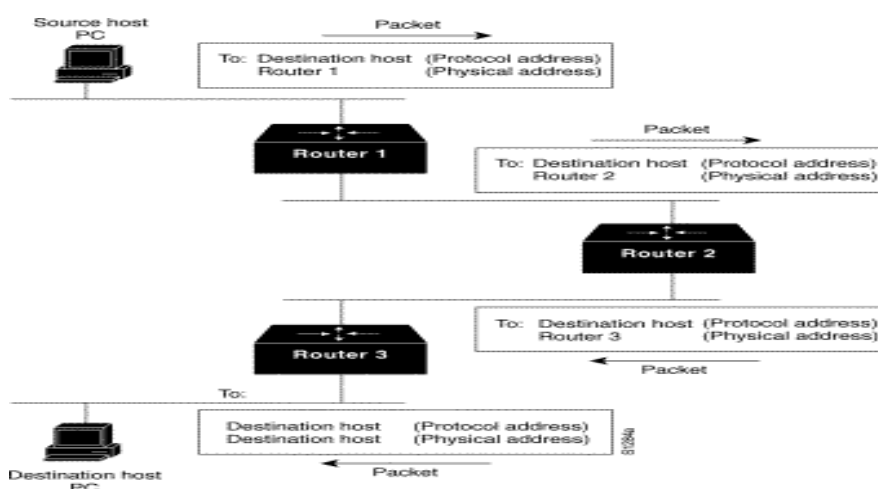
ภาพแสดงการทำงานของ bridge บน OSI MODEL

### ๒.๒.๗ สวิตช์ (Switch)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างเครือข่าย LAN ๒ เครือข่าย โดยบริดจ์จะรับข้อมูลจากเครือข่ายต้นทาง แล้วทำการตรวจสอบตำแหน่งของเครือข่ายปลายทาง จากนั้นจะทำการส่งข้อมูลไปยังเครือข่ายปลายทาง อุปกรณ์สวิตช์มีหลายแบบหากแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นแพ็กเก็ตเล็ก ๆ และเรียกใหม่ว่าเซล (Cell) กลายเป็น เซลสวิตช์ (Cell Switch) หรือ "เอทีเอ็มสวิตช์" (ATM Switch) ถ้าสวิตช์ข้อมูลในระดับเฟรมของอีเทอร์เน็ต ก็จะใช้เรียกว่า อีเทอร์เน็ตสวิตช์ (Ethernet Switch) และถ้าสวิตช์ ตามมาตรฐานเฟรมข้อมูลที่เป็นกลางก็สามารถนำข้อมูลอื่นมาประกอบภายในได้ก็จะเรียกว่า เฟรมรีเลย์ (Frame Relay) อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งจึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีใหม่ และมีแนวโน้มที่จะพัฒนาให้ใช้กับความเร็วของการรับส่งข้อมูลจำนวนมาก เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยม การออกแบบและจัดรูปแบบเครือข่ายองค์กรที่เป็นอินทราเน็ต ซึ่งเชื่อมโยงได้ทั้งระบบ LAN และ WAN จึงต้องอาศัยอุปกรณ์เชื่อมโยงต่าง ๆ เหล่านี้ อุปกรณ์เชื่อมโยง ทั้งหมดนี้สามารถรองรับมาตรฐานการเชื่อมต่อได้หลากหลายรูปแบบเช่น จากเครือข่ายพื้นฐานเป็นอีเทอร์เน็ตก็สามารถเชื่อมเข้าสู่ ATM Switch, Frame Relay, or Bridge, Router ได้ทำให้ขนาดของเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น

### ๒.๒.๘ Routing

What is Routing ? Routing คือกระบวนการเคลื่อนย้ายข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางโดยผ่านไปตามเส้นทางต่างๆที่ได้ถูกจัดสรรหรือเลือกไว้บนเครือข่ายนั้น และโดยปกติมักจะมิใช่การเคลื่อนย้ายข้อมูลจากต้นทางไปถึงปลายทางโดยตรง กล่าวคือต้นทางและปลายทางมิได้ต่อกันแบบ Point - To - Point ดังนั้นข้อมูลจะถูกเคลื่อนย้ายผ่านตามเส้นไปตามเส้นทางที่ได้ถูกเลือกไว้อย่างดีแล้ว ดังนั้นในระหว่างการเคลื่อนย้ายข้อมูล ข้อมูลจะต้องผ่านอุปกรณ์หรือสถานที่ที่อยู่ระหว่างทาง โดยที่อุปกรณ์หรือสถานะนั้นมิใช่จุดหมายปลายทางที่ต้องการ เราเรียกอุปกรณ์เช่นนี้ว่า Intermediate Node การทำงานในลักษณะ Routing จะแตกต่างจากการทำงานในลักษณะ Bridging คือการทำงานในลักษณะ Bridging, จะเป็นการต่อแบบ Point - To - Point ระหว่าง ๒ Network Segment และการทำงานในลักษณะ Bridging นั้นทำงานในระดับที่ ๒ ( Layer ๒ ) ของ OSI Reference Model ส่วนทำงานแบบ Routing เป็นการทำงานที่เกิดขึ้นในระดับ ๓ ของ OSI Reference Model

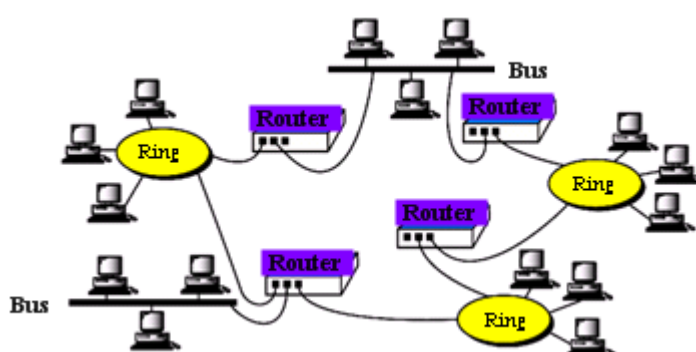


ภาพแสดงการใช้งาน Router ที่จะต้องมีการผ่าน Intermediate Node



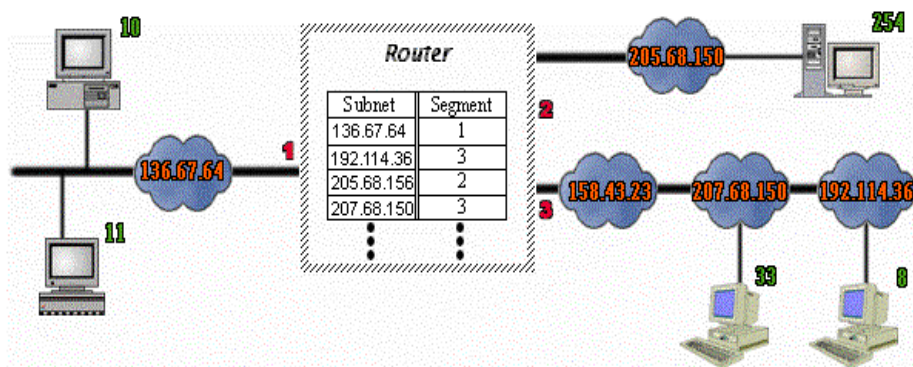
## ๒.๒.๙ เราเตอร์ (Router)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบเครือข่ายหลายระบบเข้าด้วยกัน เราเตอร์เหมือนกับบริดจ์ แต่จะมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยสามารถจัดหาเส้นทางข้อมูล เพื่อส่งไปยังสถานีปลายทางได้อย่างถูกต้อง แต่มีส่วนการทำงานที่ซับซ้อนมากกว่าบริดจ์มาก โดยเราเตอร์จะมีเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างแต่ละเครือข่ายเก็บไว้เป็นตารางเส้นทาง เรียกว่า Routing Table ทำให้เราเตอร์สามารถทำหน้าที่จัดหาเส้นทางและเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการเดินทาง เพื่อการติดต่อระหว่างเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันได้มีการรวมหน้าที่การทำงานของ Gateway ไว้ใน Router แล้วทำให้สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นๆ ได้อย่างไม่มีข้อจำกัดทางด้านรูปแบบของแพ็คเก็ต เช่น Router สามารถแปลงรูปแบบของ Apple talk ไปเป็น TCP/IP ได้ เป็นต้น

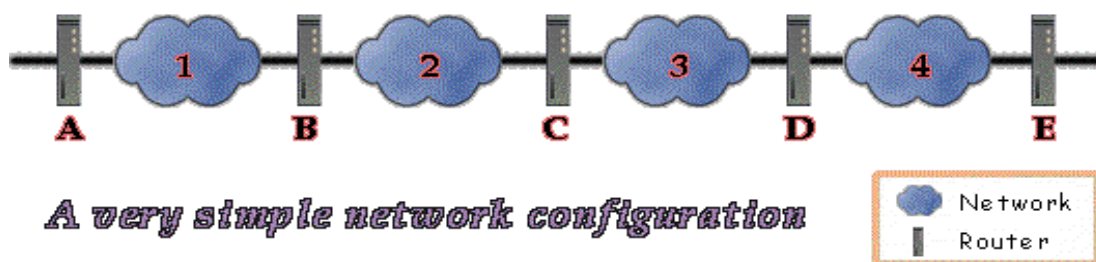


ภาพแสดง Router ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

หากมีการเชื่อมต่อเครือข่ายมากกว่าสองเครือข่ายเข้าด้วยกัน และเครือข่ายที่เชื่อมมีลักษณะหลากหลายเป็นทั้งเครือข่ายแบบ LAN และ WAN การนำ Router มาใช้งานนั้นเป็นการนำมาเพื่อการติดต่อระหว่าง Network ต่างรูปแบบหรือต่างชนิดกันหรือมีสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ไม่เหมือนกัน เช่นในการต้องการเชื่อมโยงหรือติดต่อระหว่างเครือข่ายที่มีเทคโนโลยีในการทำงานต่างกัน เราใช้ Router ในการเชื่อมต่อ(Connect)ระหว่างสองเครือข่ายหรือมากกว่า เมื่อมีข้อมูลเข้ามาที่ด้านหนึ่งของ Routers มันจะตัดสินใจว่าจะทำอย่างไรหรือส่งผ่านทางไหน โดยการทำงานจะต้องสอดคล้องกับ Routing Table ที่มีอยู่ใน Router แต่ละตัว เช่นเมื่อ ตรวจสอบ Packet ที่ถูกส่งมาจาก Segment ที่ ๑ และมี Destination Address เป็น ๑๙๒.๑๙๔.๓๖ และเมื่อตรวจสอบใน Routing Table พบว่า มันอยู่ใน Segment ที่ ๓ ดังนั้น Router จะทำการส่งผ่าน Packet นั้นไปยัง Segment ที่ ๓



ภาพแสดง ตัวอย่างการนำ Router มาใช้งาน



### *A very simple network configuration*

ภาพแสดงการเชื่อมโยงหลายเครือข่ายผ่าน Router

จาก Configuration ข้างต้น หากเราดูที่ Routing Table ของ Router ตามตัวอย่างนั้น หากมีข้อมูลจาก Network ๒ ต้องการส่งไปยัง Network ๔ แล้ว ข้อมูลจาก Network ๒ จะต้องถูกส่งผ่าน Router C ไปยัง Network ๓ และถูกส่งผ่าน Router D ไปยัง Network ๔ ใน IP Networks, Routers จะทำการ Utilize จากข้อเท็จจริงที่ว่าแต่ละ Host's IP Address ประกอบด้วยส่วนประกอบ ๒ ส่วน คือ Host's Network Address, และ The Host's Number ที่บ่งบอกว่า Host นั้นอยู่ ณ จุดใดใน Network. Routers จะทำการตรวจสอบ Examine ข้อมูลที่ปรากฏอยู่ใน Destination Address และ ใช้มันเพื่อเป็น Target Network Address และตัดสินใจบนพื้นฐานของ Network Address นี้ ว่ามันจะ Transfer ข้อมูลไปทางใด

การทำงานที่แท้จริง Router ก็คือ Special Computer ซึ่งถูกแยกหน้าที่ในการทำงานเกี่ยวกับงานด้านการติดต่อระหว่างเครือข่าย ( Interconnecting Networks ) Routers มี Responsibilities ที่สำคัญ ๒ ประการดังนี้

#### ๑. Optimizing the routing paths.

Router จะใช้ Routing Algorithm เพื่อตัดสินใจเกี่ยวกับเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง Algorithms เหล่านี้ มีอยู่ใน Routing Tables ซึ่งจะประกอบด้วยข่าวสารเกี่ยวกับเส้นทาง เช่น Destination/Next Hop Association. ดังนั้นการใช้ Routing Algorithms มีจุดมุ่งหมายหลายประการ เช่น

**Optimality** คือการหาเส้นทางหรือ Route ที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์และความสำคัญที่นำมาใช้ในการกำหนดเส้นทาง เช่น จะไปยังปลายทางนั้นนั้นต้องผ่านกี่ Hops และแต่ละ Hop มี Delay มากน้อยอย่างไร )

**Simplicity And Low Overhead** Router Algorithms จะต้องมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อประโยชน์ในการ Utilization ให้ Overhead มีค่าต่ำที่สุด

**Robustness And Stability** Routers จะต้องถูก Located ที่ Network Junction Points ซึ่งหมายถึงความคงทนและความสามารถในการ Handle พлотกรรมของ Hardware และ Software Components.

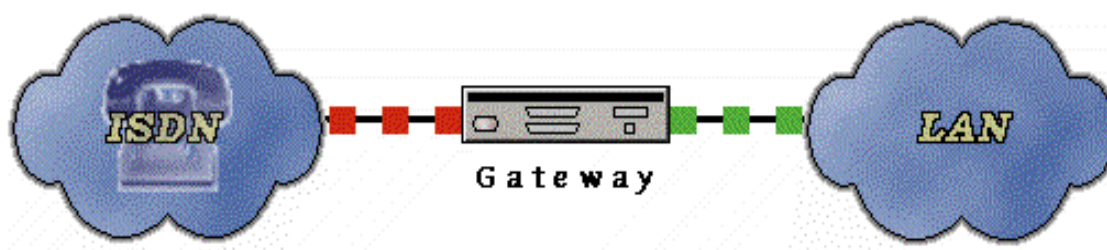
**Rapid Convergence** Routers จะต้องตัดสินใจและตกลงเกี่ยวกับ Optimal Paths บน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการที่ข้อมูลจะวนกลับ ( Loops ) เข้ามาในตัวเอง เช่นเมื่อ Computers หรือ Router เสีย หรือ Network Segment ใดเกิดไม่ทำงาน ( Down ) ในกรณีเช่นนี้ Router จะต้องสามารถให้ สามารถเปลี่ยนเส้นทางที่อยู่ใน Router's Routing Tables ได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่ง Router แต่ละตัวจะต้องทำการคำนวณซ้ำ ( Recalculations ) จากข้อมูลล่าสุดที่ได้รับมาจาก Router ตัวอื่นๆ ที่อยู่ในเครือข่าย

**Flexibility** ความสามารถนี้เป็นการปรับความถูกต้องให้มีความถูกต้องแน่นอนมากขึ้นและต้องเป็นไปอย่างรวดเร็ว กล่าวคือเมื่อการเปลี่ยนแปลงใดเกิดขึ้นภายใน Router จะต้องสามารถปรับตัวได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น เมื่อ Optimal Routes ไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีกต่อไป หรือมีการเปลี่ยนแปลง ต่างๆ เกี่ยวกับเรื่องเกี่ยวกับ Optimal Route เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงบางอย่างภายในเครือข่าย เช่นบาง Segments เกิดการขัดข้อง(Down) หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงใน Bandwidth หรือเกิด Network Delay เพิ่มมากขึ้น หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ในกรณีเช่นนี้ Routing Algorithms ควรปรับตัวให้เข้าสถานการณ์ใหม่ได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้การเลือก Route ที่เหมาะสมแทน Route ที่ใช้อยู่เดิม

## ๒. Switching - Transport Of Packets Over Networks.

เมื่อ Computer ต้องการส่ง Packet ออกไปบนเครือข่าย รูปแบบของ Packet ที่ถูกใช้งานอยู่ที่ Router's Physical Address และ The Destination Address (Protocol Address) ของ Host ที่ปลายทาง Router จะต้อง Searches ที่ Routing Tables ของมัน เพื่อว่า Host ที่ปลายทางอยู่ที่ไหน หากพบว่าไม่สามารถติดต่อเข้าไปยัง Destination Host ได้ Router ก็ควรทิ้ง Packet นั้นไป หากสามารถติดต่อเข้าไปได้มันควรเพิ่ม Physical Address เข้าไปใน Next Hop's Address และทดลองส่ง Packet นั้นไปอีกครั้ง

### ๒.๒.๑๐ เกตเวย์ (Gateway)



ภาพแสดง การนำ Gateway มาใช้งาน

เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถสูงในการเชื่อมต่อเครือข่ายต่างๆ เข้าด้วยกัน โดยสามารถเชื่อมต่อ LAN หลายๆ เครือข่ายที่ใช้โปรโตคอลต่างกัน และใช้ Media หรือสายส่งข้อมูลต่างชนิดกันได้อย่างไม่มีขีดจำกัด ตัวอย่างเช่น เชื่อมต่อ Ethernet LAN ที่ใช้สายส่งแบบ UTP เข้ากับ Token Ring LAN ได้ หากโปรโตคอลที่ใช้รับส่งข้อมูลของเครือข่ายทั้งสองไม่เหมือนกัน Gateway ก็จะทำหน้าที่แปลงโปรโตคอลให้ตรงกับปลายทางและเหมาะสมกับอุปกรณ์ของฮาร์ดแวร์ที่แต่ละเครือข่ายใช้งานอยู่ นั่นได้ด้วย

คำว่า “ Gateway ” เป็นคำที่ถูกใช้แทน Routing Device อย่างหนึ่ง ในปัจจุบันในโลกของ TCP/IP มักจะหมายถึง “ Router ” แต่ความหมายที่แท้จริงของ Gateway นั้นหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เฉพาะ (Special-Purpose Devices) ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลง Protocol โดยที่การทำงานของ Gateways มักเกิดแปลงข่าวสารที่รับมาจาก Protocol ที่แตกต่างจาก Protocol ที่ถูกใช้งานอยู่ตามปกติ โดยปกติแล้ว เกิดขึ้นที่ Application Layer ตัวอย่างเช่น Vocaltec Gateway เป็น Gateway ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเสียงพูดของมนุษย์ ที่ถูกส่งผ่าน Analog Phone Lines เพื่อให้เป็นข้อมูลแบบ Packet ที่

สามารถใช้งานกับ Local Area Network Protocol ได้ Radvision Gateway เป็น Gateway ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่มากับ Digital Phone Lines ให้เป็น Packet Data ที่สามารถใช้งานกับ Into Local Area Network Protocol ได้

ในการที่ Gateway จะสามารถส่งข้อมูลจากเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่งได้อย่างถูกต้อง นั้นตัวของ Gateway เองจะต้องสร้างตารางการส่งข้อมูล หรือที่เรียกว่า Routing Table ขึ้นมาในตัวของมัน ซึ่งตารางนี้จะบอกว่า Server ไหนอยู่เครือข่ายใด และอยู่ภายใต้ Gateway อะไร ตารางนี้จะมีการปรับปรุงข้อมูล ทุกกระยะ สำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Gateway อาจจะ รวมเอาฟังก์ชันการทำงานที่เรียกว่า Firewall ไว้ในตัวด้วย เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้คอมพิวเตอร์ที่อยู่นอกเครือข่ายของบริษัทเข้ามาเชื่อมต่อลักลอบนำข้อมูลภายในออกไปได้เป็น

### ๒.๒.๑๑ ตัวกลางนำข้อมูล

ตัวกลางที่ใช้ในระบบเครือข่าย สามารถเป็นได้หลายชนิด เช่น สาย Coaxial, UTP (Unshielded Twisted-Pairs), สายไฟเบอร์ออปติก หรืออาจเป็นคลื่นวิทยุที่ใช้กับ Wireless LAN นอกจากนี้อุปกรณ์ต่างๆที่กล่าวมา ยังมี ซอฟต์แวร์ ระบบปฏิบัติการของระบบเครือข่าย เรียกว่า NOS (Network Operating System) เป็นตัวติดต่อระหว่างสถานีผู้ใช้ กับ ไฟล์เซิร์ฟเวอร์ เช่น Novell's NetWare OS/2 LAN Server, Microsoft Windows NT Server, Microsoft Windows NT ๒๐๐๐, AppleShare, Unix, Linux เป็นต้น

## ๒.๓ ประเภทของเครือข่าย

การจัดประเภทของเครือข่ายตามขนาดทางภูมิศาสตร์ที่ระบบเครือข่ายนั้นครอบคลุมอยู่ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น ๓ ระบบ กล่าวคือ ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ระยะใกล้ (Local Area Network หรือ LAN) ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ระดับเมือง (Metropolitan Area Network หรือ MAN) และระบบเครือข่ายระยะไกล (Wide Area Network หรือ WAN) มีรายละเอียดดังนี้

### ๒.๓.๑ ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ระยะใกล้ (Local Area Network หรือ LAN)

เป็นระบบเครือข่ายระดับท้องถิ่น มีขนาดเล็ก ครอบคลุมพื้นที่จำกัด เชื่อมโยงกันในรัศมีใกล้ ๆ ในเขตพื้นที่เดียวกัน เช่น ในอาคารเดียวกัน ห้องเดียวกัน ภายในตึกเดียวกันหรือหลาย ๆ ตึกใกล้กัน เป็นต้น โดยไม่ต้องเชื่อมการติดต่อกับองค์การโทรศัพท์หรือการสื่อสารแห่งประเทศไทย ระบบแลนมีประโยชน์คือ สามารถทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์หลาย ๆ เครื่องที่เชื่อมต่อกัน สามารถส่งข้อมูลแลกเปลี่ยนกันได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และยังสามารถใช้ทรัพยากรร่วมกันได้อีกด้วย ระบบเครือข่าย LAN จะเป็นระบบเครือข่ายที่มีการใช้งานในองค์กรต่าง ๆ มากที่สุด

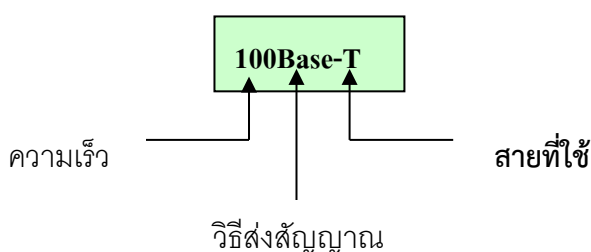


ภาพแสดงระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ระยะใกล้ (LAN)

มาตรฐานของระบบเครือข่ายเฉพาะที่ (LAN) สามารถแบ่งได้ดังนี้

### ๑. อีเทอร์เน็ต (Ethernet)

อีเทอร์เน็ต (Ethernet) เป็นระบบ LAN ที่พัฒนาขึ้นโดย ๓ บริษัทใหญ่คือบริษัท Xerox Corporation, Digital Equipment Corporation (DEC) และ Intel ในปี ค.ศ. ๑๙๗๖ เริ่มจากศูนย์วิจัย PARC (Palo Alto Research Center ของ Xerox) ซึ่งถูกจัดเป็นมาตรฐานรหัส ๘๐๒.๓ ของ IEEE ปัจจุบันมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยในระยะแรกอีเทอร์เน็ตใช้สาย Coaxial เป็นหลักต่อมาได้พัฒนาและเปลี่ยนไปใช้สายแบบ UTP (Unshielded Twisted Pair) มากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถติดตั้งได้ง่าย รวมถึงความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลถูกทำให้เพิ่มขึ้นจาก 10 Mbps ไปเป็น 100 - 1000 Mbps (1 Gbps) ในปัจจุบันและอาจถึง 10 Gbps ลักษณะสำคัญของอีเทอร์เน็ต ปัจจุบันนิยมใช้สาย UTP และต่อผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (Switch) มาตรฐานที่สำคัญของ Ethernet ได้แก่ 100Base-T, 1000Base-T, 1000Base-F โดยรหัสแต่ละตัวมีความหมายแสดงดังภาพ



ภาพแสดงความหมายของรหัสแต่ละตัว

**ความเร็ว** เป็นตัวบอกความเร็วสูงสุดที่ระบบทำได้ในกรณีที่ไม่มีอุปสรรคใด ๆ มาทำให้ความเร็วลดลง โดยในระบบทำงานจริงๆ ไม่สามารถทำได้ ปัจจุบันมีที่ใช้กันคือ ๑๐, ๑๐๐, ๑,๐๐๐ เมกะบิตต่อวินาที

**วิธีส่งสัญญาณ** เป็นตัวบอกลักษณะการส่งสัญญาณทางไฟฟ้า จะมี ๒ ลักษณะคือ Baseband และ Broadband โดย Baseband คือวิธีการส่งสัญญาณแบบดิจิทัล ๐ และ ๑ จะไม่มีการผสมสัญญาณนี้เข้ากับสัญญาณความถี่สูงอื่นใด ส่วน Broadband คือ การส่งสัญญาณแบบอนาล็อก ที่มีการผสมสัญญาณระหว่างสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อกกับสัญญาณคลื่นพา (Carrier Signal) เพื่อให้ส่งได้ไกลและมีความเพี้ยนน้อยกว่าแบบแรก

**สายที่ใช้** รหัสที่ใช้แต่ละตัวมีความหมายดังนี้

๕ หมายถึง การใช้สายแบบ Thick Coaxial ซึ่งมีขนาดใหญ่โยงถึงกัน สายแบบนี้ลากไปไกลได้ไม่เกิน ๕๐๐ เมตร จึงใช้เลข ๕

๒ หมายถึง การใช้สายแบบ Thin Coaxial ซึ่งมีขนาดเล็กโยงถึงกัน สายแบบนี้ลากไปไกลได้ไม่เกิน ๒๐๐ เมตร จึงใช้เลข ๒

T หมายถึง การใช้สาย UTP (Unshielded Twisted-Pair) แบบที่เรียกว่า Category ๕ (CAT ๕) โดยทำการต่อเชื่อมทุกเครื่องเข้าหาอุปกรณ์รวมสายหรือ Hub สายแบบนี้ลากไปไกลได้ไม่เกิน ๑๐๐ เมตร

F เป็นระบบที่ใช้สาย Fiber-Optic ซึ่งสามารถลากไปได้ไกลหลายร้อยเมตรขึ้นไป

## ๒. ฟาสต์อีเทอร์เน็ต และ Gigabit Ethernet

Ethernet ในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีความเร็วเพิ่มจาก 10 Mbps ขึ้นเป็น 100 และ 1,000 Mbps หรือกว่านั้น ซึ่งถูกนำมาใช้กับการส่งข้อมูลขนาดใหญ่หรือภาพ (Image) รวมทั้งข้อมูลที่ต้องรับส่งให้ได้ตามเวลาจริง (Real-Time) เช่น ภาพเคลื่อนไหวและเสียง โดยมาตรฐานของ Ethernet ความเร็วสูงจัดเป็นกลุ่มดังนี้

**100Base-T** เป็นระบบที่พัฒนาโดยใช้สายที่ดีขึ้นกว่า 10Base-T เดิม คือ ใช้เป็นสาย UTP ที่ดีกว่า เช่นสาย CAT๕+ หรือ CAT๕e โดย Hub ต้องรองรับความเร็ว 100Mbps ด้วย ระบบเครือข่าย LAN รุ่นใหม่จะใช้มาตรฐานนี้เป็นหลัก โดยสายที่ใช้กับระบบ 100Base-T นี้จะแยกรับส่งข้อมูลเป็น ๔ คู่สาย ด้วยความเร็วคู่สายละ 25 Mbps รวมเป็น  $25 \times 4 = 100\text{Mbps}$

**Gigabit Ethernet** หรือเรียกกันเป็น 1000Base-T (สาย UTP) หรือ 1000Base-F (สาย Fiber Optic) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่จะทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ในระดับความเร็ว 1000 Mbps หรือ 1 Gbps ซึ่งกำลังจะเป็นมาตรฐานใหม่ของระบบเครือข่ายสำหรับงานที่ต้องการความเร็วสูงมาก เช่น งานกราฟิก

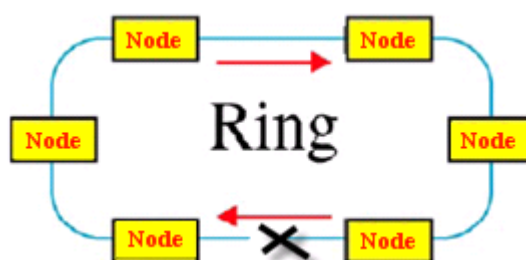
**10 Gigabit Ethernet** เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระดับความเร็ว 10,000 Mbps หรือ 10 Gbps คาดว่าระยะแรกจะใช้กับการเชื่อมต่อระหว่างเมือง หรือ WAN แต่ต่อก็คงเข้ามาอยู่ในระดับเครื่องเซิร์ฟเวอร์และเดสก์ท็อปตามลำดับ รายละเอียดแสดงตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ ๕-๑ แสดงรายละเอียดของ Ethernet แต่ละชนิด

ชนิด	สายเคเบิล	ควายาว สูงสุด (เมตร)	ความเร็ว (Mbps)	ข้อดี
10 Base-T	สายคู่ตีเกลียว	๑๐๐	๑๐	เหมาะในการใช้งานเครือข่ายภายในตึก
100 Base-T	สายคู่ตีเกลียว	๑๐๐	๑๐๐	ถูกสุด
1000 Base-T	สายคู่ตีเกลียว	๑๐๐	๑๐๐๐	ดูแลรักษาง่าย
1000 Base-F	สายใยแก้วนำแสง	๕๕๐	๑๐๐๐๐	เชื่อมโยงระหว่างตึก ทนทานต่อการถูกรบกวนได้เป็นอย่างดี

### ๓. โทเคนริง (Token Ring)

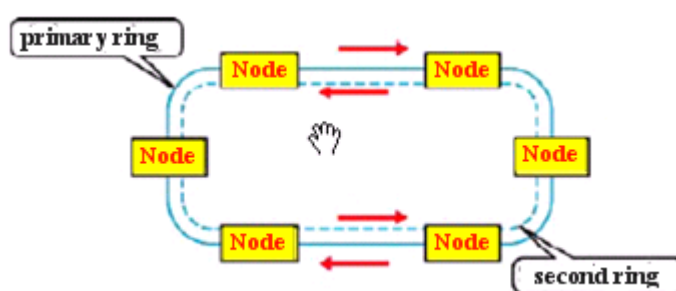
เป็นการต่อ LAN ในแบบวงแหวน (Ring) โดยมีวิธีควบคุมการส่งข้อมูลแบบ Token-Passing ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัทไอบีเอ็ม โดยในรุ่นแรกๆจะมีความเร็วเพียง 4 Mbps แต่ต่อมาได้ปรับปรุงเป็น 16 Mbps จุดอ่อนของ Token-Ring คือ ถ้าสายเส้นใดเส้นหนึ่งขาดวงแหวน จะไม่ครบวงและทำงานไม่ได้ แสดงดังภาพ



ภาพแสดง Token Ring

### ๔. FDDI (Fiber Distributed Data Interface)

FDDI เป็นมาตรฐานการต่อระบบเครือข่ายโดยใช้สาย Fiber Optic ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่มีความเร็วสูงถึง 100 Mbps เท่ากับ Fast Ethernet ลักษณะของ FDDI จะต่อเป็นวงแหวน โดย FDDI เหมาะที่จะใช้เป็น Backbone ที่เชื่อมต่อระบบ LAN หลายวงเข้าด้วยกัน โดยแต่ละวง LAN จะต้องมีตัวรวมสาย (Concentrator) หรืออุปกรณ์ Router ที่ใช้ต่อระหว่าง LAN ทั้งวงเข้าเป็นสถานีในวงของ FDDI มีสายสองชั้นเดินคู่ขนานกัน เพื่อสำรองในกรณีเกิดสายขาดขึ้นจริงจะได้ตัดส่วนที่ขาดออกแล้ววนสายที่เหลือให้ครบรอบเป็น Ring ตามเดิม ลักษณะการรับส่งข้อมูลของ FDDI ก็ใช้วิธี Token-Passing เช่นเดียวกับ Token Ring แสดงดังภาพ

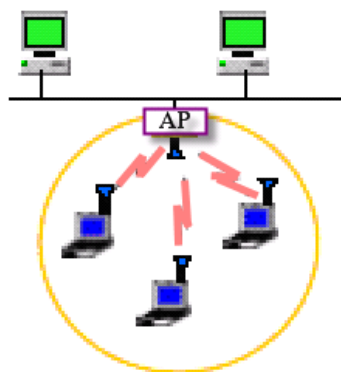


ภาพแสดง FDDI

### ๕. เครือข่าย LAN ไร้สาย (Wireless LAN)

เครือข่าย LAN ไร้สาย คือ เครือข่ายที่อาศัยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งมีประโยชน์ที่เห็นได้ชัด คือ เรื่องของการไม่ต้องเดินสายเหมือน LAN แบบอื่นๆ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในบ้านหรือสถานที่ที่ไม่สะดวกในการเดินสาย เช่น ที่บ้าน โดยคุณอาจเล่นอินเทอร์เน็ตผ่านเครื่องเครื่องหนึ่งที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อผ่านโมเด็มได้จากทุกห้องในบ้าน หรือ แม้แต่บริเวณหน้าบ้าน โดยสามารถเชื่อมต่อได้ทุกที่ทุกจุดภายในระยะทำการ เนื่องจากคลื่นวิทยุนี้มีคุณสมบัติในการทะลุทะลวง

สิ่งกีดขวางต่างๆได้ดี ไม่ว่าจะเป็นผนัง กำแพง เพดาน แต่ปัญหาสำหรับระบบเครือข่ายไร้สายคือเรื่อง การรบกวนของสัญญาณวิทยุ แสดงดังภาพ

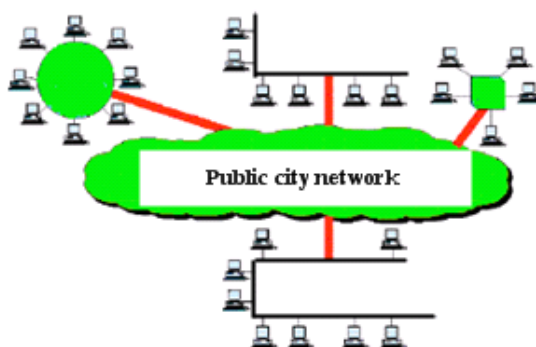


ภาพแสดง Wireless LAN

ปัจจุบันเครือข่ายแบบไร้สายมี ๒ มาตรฐาน คือ HomeRF (Home Radio Frequency) และ IEEE 802.11 โดย IEEE 802.11 นั้นสามารถแตกย่อยออกเป็นหลายมาตรฐานย่อยตามสัญลักษณ์ตัวสุดท้าย เช่น IEEE 802.11a, IEEE802.11b, IEEE802.11g เป็นต้น แต่ที่กำลังเป็นที่นิยมและแพร่หลายกันอยู่คือ IEEE 802.11b หรือ Wireless LAN เรียกสั้นๆว่า “WLAN” เครื่องโน้ตบุ๊กรุ่นใหม่หลายยี่ห้อก็ให้อุปกรณ์ Wireless LAN แบบนี้มาในตัวเลย สำหรับความถี่ของคลื่นที่ได้รับจัดสรรมาให้ใช้จะมี ๓ ช่วง ดังภาพ ซึ่งเรียกว่าเป็น ISM Bands (ISM = Industrial, Scientific และ Medical) โดยขณะนี้กำลังใช้ความถี่ระหว่าง 2.4 – 2.4835 GHz

### ๒.๓.๒ ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ระดับเมือง (Metropolitan Area Network หรือ MAN)

เป็นระบบเครือข่ายระดับเมือง คือมีการเชื่อมโยงกันในพื้นที่ ที่กว้างไกลกว่าในระบบ LAN อาจจะเชื่อมโยงกันภายในจังหวัด โดยมีลักษณะการเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ที่มีระยะห่างไกลกันในช่วง ๕-๔๐ กิโลเมตร ผ่านสายสื่อสารประเภทต่าง ๆ เช่น สายใยแก้วนำแสง สายเคเบิลหรือสายโคแอกเซียล ระบบเครือข่ายระหว่างเมือง(MAN)คือ เป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่า LAN มักเกิดจากการเชื่อมโยงเครือข่าย LAN ในบริเวณเดียวกันเข้าด้วยกัน เช่น การเชื่อมต่อระบบระหว่างองค์กรกับองค์กรที่อยู่ แสดงดังภาพ



ภาพแสดงระบบเครือข่ายระหว่างเมือง



### ๒.๓.๓ ระบบเครือข่ายระยะไกล (Wide Area Network หรือ WAN)

เป็นระบบเครือข่ายระดับไกล คือ จะเป็นเครือข่ายที่เชื่อมคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่อยู่ห่างไกลกันเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจมีขอบเขตการเชื่อมต่อที่กว้างไกลขึ้นจาก LAN และ MAN ซึ่งเมื่อเชื่อมต่อแล้วจะก่อให้เกิดเป็นระบบเครือข่ายในระดับจังหวัด ประเทศ หรือข้ามทวีปได้ อาจจะต้องเป็นการติดต่อสื่อสารกันในระดับประเทศ ข้ามทวีปหรือทั่วโลกก็ได้ ตัวอย่างเช่น อินเทอร์เน็ตถือว่าเป็นเครือข่าย WAN ประเภทหนึ่ง แต่เป็นเครือข่ายสาธารณะ ที่ไม่มีใครเป็นเจ้าของทั้งหมด แสดงดังภาพ



ภาพแสดงระบบเครือข่ายระยะไกล

### ๒.๓.๔ การเลือกเทคโนโลยีสำหรับทางด่วนข้อมูล

ในปัจจุบันนี้เครือข่ายภายในสำนักงาน Local Area network (LAN) และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานภายในเครือข่ายมีความสามารถในการทำงานที่ความเร็วสูงขึ้นมาก เป็นผลทำให้การถ่ายโอนข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายมีปริมาณมาก ดังนั้นจึงต้องมีระบบ Wide Area network (WAN) ที่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการบริหารและจัดการเครือข่ายสูง เพราะหากประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายไม่ดีพอ ตลอดจนเครื่องมือในการบริหารและจัดการที่ใช้งานภายในเครือข่ายมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อน จะมีผลทำให้การถ่ายโอนข้อมูลที่มีปริมาณมากมาย ผ่านระบบเครือข่าย Wide Area Network (WAN) นั้นเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก เทคโนโลยีเครือข่ายพื้นที่กว้างแบบที่สามารถใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีหลายประเภทคือ เทคโนโลยีเครือข่ายแบบใช้โมเด็ม (Dialup/Modem) เทคโนโลยี X.25 เทคโนโลยีแบบถ่ายทอดเฟรม (Frame Relay) เทคโนโลยีเครือข่ายบริการร่วมระบบดิจิทัล (ISDN) ตลอดจน เทคโนโลยี ระบบสื่อสารชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะขออธิบายดังนี้

#### Modems

เทคโนโลยีนี้อาศัยเครือข่ายโทรศัพท์ที่มีอยู่เป็นเครือข่ายในการส่งผ่านสัญญาณ โดยข้อมูลที่ต้องการส่งจะถูกแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกที่ต้นทาง และ แปลงกลับเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ปลายทางตามลำดับโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าโมเด็ม (modem) การแปลงสัญญาณนั้นมีความจำเป็น เนื่องจากต้องทำให้สัญญาณมีความเหมาะสมที่จะส่งผ่านเครือข่ายโทรศัพท์ ซึ่งถูกออกแบบไว้สำหรับสัญญาณเสียงเท่านั้น ความเร็วของข้อมูลที่สามารถรับส่งได้ขึ้นอยู่กับความสามารถของโมเด็มเป็นหลัก ซึ่งอยู่ระหว่าง ๑,๒๐๐ บิตต่อวินาที (Bit Per Second: bps) ถึง ๒๘.๘ กิโลบิตต่อวินาที (kbps) Modulation Method เทคนิคการ Modulation แบบ FSK เป็นเทคนิคง่ายๆใช้กับ Modem ที่ใช้

งานความเร็วต่ำ ( ไม่เกิน 1200 b/s ) ตาม CCITT Rec. V.21 และ V.23 สำหรับการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่านั้นมักจะใช้เทคนิค PSK เช่น V.26 ใช้แบบ Four - state PSK ความเร็ว 2,400 b/s, V.27 ใช้แบบ Eight - state PSK ความเร็ว 4,800 b/s เทคนิค QAM ใช้งานกับ V.29 / V.32 ที่ความเร็ว 9,600 b/s และ V.33 ที่ความเร็ว 14,400 b/s Modem รุ่นใหม่ๆ มีการนำเทคนิค Multi Level Trellis Code ประกอบกับ Viterbi Detection มาใช้งาน

ข้อดีของเทคโนโลยีแบบใช้โมเด็มคือมีราคาถูก และสามารถให้บริการได้อย่างทั่วถึงได้ง่าย เนื่องจากใช้เครือข่ายโทรศัพท์ซึ่งเป็นเครือข่ายสื่อสารที่เข้าถึงผู้ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้มีข้อเสียคือ มีความเร็วต่ำ ไม่เหมาะกับการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย

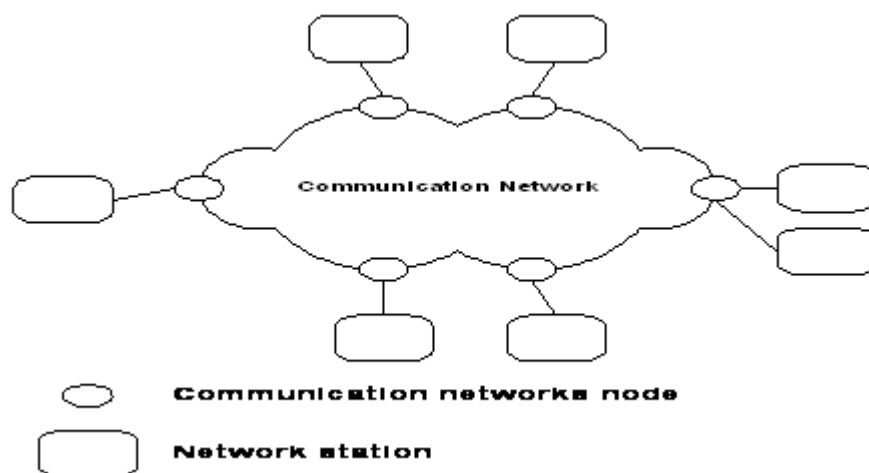
### ชุมสายสื่อสารข้อมูล (Data Communication Switching)

การสื่อสารข้อมูลนั้นก็เช่นเดียวกับการสื่อสารทางโทรศัพท์ การติดต่อสื่อสารเพื่อส่งข่าวสารข้อมูลถึงกันนั้นทำได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและไม่ใช้เทคนิคที่สลับซับซ้อนมากก็คือ การติดต่อถึงกันโดยตรง (Point - to - Point) ซึ่งสามารถทำได้โดยการติดต่อผ่านคู่สายธรรมดา หรือผ่าน Coaxial Cable ในกรณีที่ต้องการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง หรืออาจจะเป็นการใช้งานผ่าน Optical Fiber ก็ได้ ในกรณีที่ไม่สามารถหาระบบทางสายเพื่อเชื่อมโยงโดยตรงแล้ว เราก็อาจจะใช้ระบบวิญญในการเชื่อมโยงก็ได้ แต่ทั้งนี้การที่ให้แต่ละสถานีติดต่อถึงกันโดยตรงทั้งหมดนั้น จะประสบความยุ่งยากและปัญหาดังต่อไปนี้

๑. เมื่อจุดที่ต้องการติดต่อเพิ่มมากขึ้น เราจะต้องทำการเชื่อมโยงไปหลายที่ ปัญหาคือการจัดสรรคู่สายในการเชื่อมโยงระหว่างแต่ละสถานี (Station) การกำหนดเส้นทางติดต่อ (Route) การเพิ่มจำนวน Terminal (ใน ๑ วงจรต้องมี Terminal เฉพาะ ๑ ชุด ) ซึ่งอาจจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น

๒. ในกรณีที่จุดหรือสถานีที่ต้องการติดต่อนั้นอยู่ห่างไกลกันมาก การเชื่อมโยงระหว่างแต่ละสถานีจะมีค่าใช้จ่ายสูง และใช้งานสำหรับการติดต่อไปยังสถานีปลายทางได้สถานีเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่คุ้มค่าในการลงทุน

การแก้ไขปัญหานั้นทำได้โดยการใช้งานผ่าน Communication Networks ซึ่งใน Network จะมี Network Node เชื่อมโยงถึงกันอยู่ และให้แต่ละสถานีติดต่อกับ Node ใด Node หนึ่งเท่านั้น การติดต่อกับสถานีอื่นๆ Network Node จะเป็นผู้จัดการให้ โดยที่ Network จะไม่เข้าไปยุ่งเกี่ยวกับข่าวสารหรือข้อมูลที่แต่ละสถานีมาให้ แต่จะทำหน้าที่เพียงการส่งผ่านข้อมูลไปให้ Node หรือสถานีอื่นๆ เท่านั้น



ภาพแสดง Communication Network

ในที่นี้เราจะกล่าวถึง Communication Network ที่ใช้เทคนิคแบบ Switched Network ซึ่งมีอยู่ด้วยกันสามลักษณะคือ Circuit Switched Network ,Message Switched Network และ Packet Switched Network

### ๒.๓.๔.๑ ชุมสายสื่อสารข้อมูลแบบ Circuit Switched Network

ชุมสายประเภทนี้การติดต่อกันระหว่าง terminal ที่ต้นทางหรือผู้เรียกกับ Terminal ปลายทางหรือผู้ถูกเรียกเกิดจากการที่ชุมสายเชื่อมโยงให้สอง Terminals นั้นติดต่อถึงกันทาง Physical โดยตรง ลักษณะการทำงานในติดต่อภายในเครือข่ายของชุมสายชนิดนี้จะใกล้เคียงกับชุมสายโทรศัพท์และชุมสายเทเล็กซ์ เนื่องจากจะต้องมีวงจรที่ว่างอยู่ระหว่าง ๒ ชุมสายจึงจะสามารถติดต่อกันได้ การติดต่อระหว่าง ๒ Terminal ใดๆ มีขั้นตอนดังนี้

#### Call Setup และ Circuit Establishment

ขั้นตอนนี้เริ่มต้นจาก Terminal ที่ต้องการจะติดต่อกับ Terminal อื่น จะต้องส่งสัญญาณเพื่อขอติดต่อ (Call Request Signal) ไปยังชุมสายที่ Terminal นั้น Connect อยู่ โดยผู้เริ่มต้นการเรียกจะต้องทำการเริ่มต้นการเรียก (Call Request) ซึ่งจะมีผลให้ชุมสายเห็นว่ากระแสไฟฟ้าในวงจรที่ Terminal ติดต่อกับชุมสาย (Local Loop) เพิ่มขึ้น เช่นเพิ่มจาก 5 mA เป็น 20 mA เมื่อชุมสายเห็นสัญญาณขอเรียก ชุมสายจะต้องส่งสัญญาณให้เรียกไปยัง Terminal ที่ขอเรียก เมื่อ Terminal ที่ขอเรียกได้รับสัญญาณตอบรับการขอเรียกจากชุมสาย Terminal นั้นจึงจะเริ่มต้นการเรียกติดต่อไปยัง Terminal ปลายทาง เช่นในระบบชุมสายเทเล็กซ์ จะต้องพิมพ์หมายเลขเทเล็กซ์ปลายทางที่ต้องการติดต่อด้วย การพิมพ์หมายเลขปลายทางนั้นเท่ากับเป็นการแจ้ง Address ของ Terminal ที่ปลายทางให้ชุมสายรับรู้ว่าจะอยู่ที่ไหน เมื่อชุมสายได้รับ Address (กรณีนี้คือหมายเลขเทเล็กซ์) ของ Terminal ปลายทางแล้ว ชุมสายจะต้องตรวจสอบมีวงจรเชื่อมโยงไปยังปลายทางหรือไม่ ในกรณีที่มีวงจรเชื่อมโยงไปยังปลายทางได้ จะต้องตรวจสอบต่อไปว่า Terminal ว่างอยู่ไม่ หากทั้งสองส่วนนี้ว่างไม่มีผู้ใช้งาน ชุมสายจะทำหน้าที่ในการเชื่อมโยงวงจรจาก Terminal ต้นทางไปยัง Terminal ปลายทาง และแจ้งผู้เรียกว่าพร้อมที่จะส่งข้อมูลหรือติดต่อสื่อสารได้แล้ว เช่นกรณีชุมสายเทเล็กซ์ เมื่อติดต่อได้แล้วชุมสายต้นทางจะต้องส่ง Answer Back ของปลายทางไปพิมพ์ที่เครื่องต้นทาง หลังจากนั้นจึงจะสามารถติดต่อส่งข่าวสารกันได้ แต่ถ้าหากไม่ว่างไม่สามารถติดต่อได้ ก็จะต้องแจ้งไปยัง

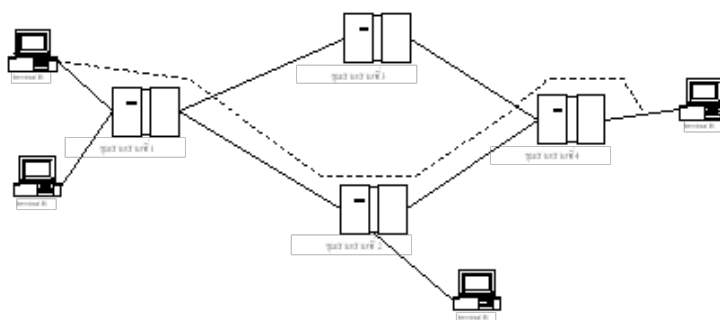
Terminal ต้นทางว่ายังไม่สามารถติดต่อได้ สำหรับชุมสายโทรศัพท์ก็จะมีขั้นตอนที่ใกล้เคียงกัน คือมีการยกหูโทรศัพท์เพื่อขอเรียกติดต่อ หมายเลขหมายปลายทาง ฯลฯ เมื่อวงจรและเครื่องโทรศัพท์ปลายทางว่าง ก็สามารถติดต่อกันได้

### ขั้นตอนการติดต่อเพื่อส่งข้อมูล

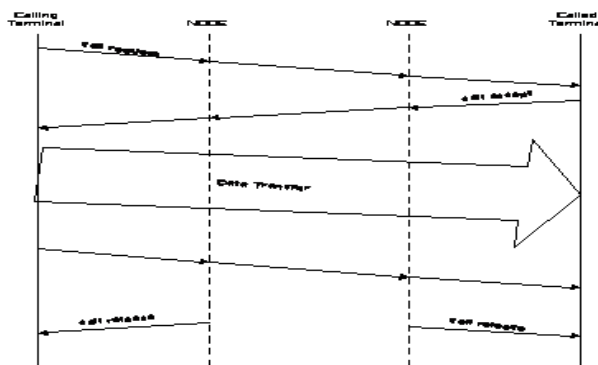
หลังจากที่ชุมสายได้เชื่อมโยงระหว่าง 2 Terminal จนกระทั่งติดต่อกันได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ Terminal ทั้งสองจะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน ในขณะที่วงจรที่ใช้ในการเชื่อมโยงจะถูกครอบครองโดย 2 Terminal นั้น โดยสมบูรณ์โดยไม่มีผู้อื่นสามารถที่จะนำวงจรดังกล่าวไปใช้งานได้ แม้ว่า Terminal ทั้งสองจะไม่ได้ติดต่อกันตลอดเวลา จนกว่าจะมีฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งของเลิกการติดต่อ

### ขั้นตอนการเลิกการติดต่อ (Circuit Disconnect)

เมื่อการติดต่อเพื่อส่งข้อมูลและข่าวสารได้เสร็จสิ้นลง หรือหากมีฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งประสงค์จะขอเลิกติดต่อ ผู้ประสงค์ขอเลิกการติดต่อจะต้องแจ้งไปยังชุมสายหรือ Node ที่ตนเชื่อมโยงอยู่ด้วยเพื่อให้รับรู้ว่าจะเลิกการติดต่อ เช่นในระบบชุมสายเทเล็กซ์ หากผู้เรียกประสงค์ของเลิกการติดต่อสามารถทำได้โดย พิมพ์ตัวอักษร M ห้าตัวอักษรติดกันโดยไม่ต้องเว้นวรรค เมื่อชุมสายรับข้อมูลดังกล่าว ชุมสายจะทราบทันทีว่า ผู้เรียกต้องการเลิกติดต่อ ชุมสายจะต้องส่งสัญญาณขอตัดวงจรไปบอกชุมสายปลายทาง และทุก Node ที่ถูกเชื่อมโยงผ่าน หลังจากนั้นก็จะเป็นการตัดวงจรออก



ภาพแสดง Circuit Switching Network



ภาพแสดง ขั้นตอนการทำงานของ Circuit Switching Network

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจน ขอยกตัวอย่างดังแสดงในรูปอันเป็นตัวอย่างในการใช้งานผ่านเครือข่าย Circuit Switching อย่างง่าย ๆ โดยกำหนดให้วงจรเชื่อมโยงระหว่างชุมสายหนึ่งไปยังอีกชุมสายหนึ่งมีเพียงวงจรเดียวเท่านั้น ดังนั้นในขณะที่ Terminal A กำลังติดต่อกับ Terminal B (ผ่านชุมสาย

๑,๒,๔ ) อยู่ นั่นแม้ว่า Terminal D (ที่ต่ออยู่กับชุมสายที่ ๑) จะใช้ความพยายามเพียงใดก็ตามก็ไม่อาจที่จะติดต่อไปยัง Terminal C (ที่ต่ออยู่กับชุมสายที่ ๒) ได้ เนื่องจากวงจรได้ถูกใช้งานโดย A กับ B อยู่ก่อนแล้วและเครือข่ายจึงไม่สามารถนำวงจรดังกล่าวไปให้ผู้ใช้งานรายอื่นใช้ได้อีกจนกว่าการติดต่อระหว่าง A กับ B จะเสร็จสิ้นลงโดยสมบูรณ์เสียก่อนแม้ว่าในบางครั้ง A และ B มิได้มีการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกันตลอดเวลาก็ตาม ข้อเสียที่เกิดขึ้นก็คือประสิทธิภาพในการใช้งานวงจรเชื่อมโยงของระบบชุมสายชนิดนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการติดต่อระหว่าง Computer หรือ Terminal ใดๆก็ตามหากมิใช่กรณีทำการถ่ายโอนแฟ้มข้อมูล (File Transfer) แล้วมักจะมีการติดต่อเป็นช่วงๆ ทำให้วงจรที่ถูกเชื่อมโยงอยู่นั้นเกิดสภาพ Idle เป็นส่วนมาก ข้อเสียอีกประการหนึ่งก็คือ หากทั้งสอง Terminals มีความเร็วในการทำงานที่แตกต่างกันหรือใช้รหัสแทนข้อมูลที่แตกต่างกันก็จะเกิดการ Garble ไม่อาจที่จะติดต่อกันได้ เช่นเครื่องเทเล็กซ์ที่ใช้ระบบ ๖ Unit Code ไม่สามารถติดต่อกับเครื่องระบบ ๕ Unit Code ได้ แต่ก็มีข้อดีในเรื่อง Delay Time ในการส่งข้อมูลค่อนข้างต่ำกว่าระบบชุมสายประเภทที่สอง (Message Switching)

### ๒.๓.๔.๒ ชุมสายสื่อสารข้อมูลประเภท Message Switching

จากข้อจำกัดของการใช้งานผ่านเครือข่ายชุมสายประเภท Circuit

Switching ที่

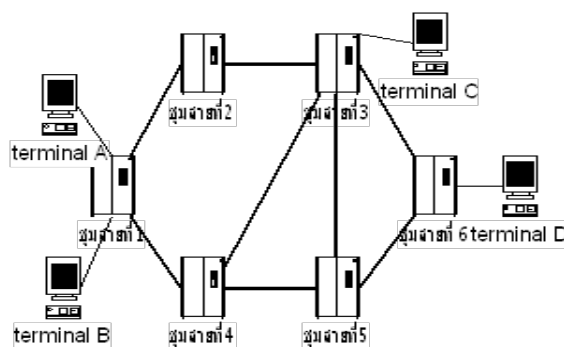
- จะต้องมียังวงจร (Physical Channel) วาง การติดต่อสื่อสารของ ๒ Terminal ใด ๆ จึงจะเป็นไปได้

- ทั้งสอง Terminal จะต้องทำงานพร้อมกันในขณะที่ส่ง - รับข้อมูล

- ทั้งสอง Terminal จะต้องทำงานเหมือนกัน เช่นความเร็วเท่ากัน ใช้รหัสในการสื่อสารที่เหมือนกัน

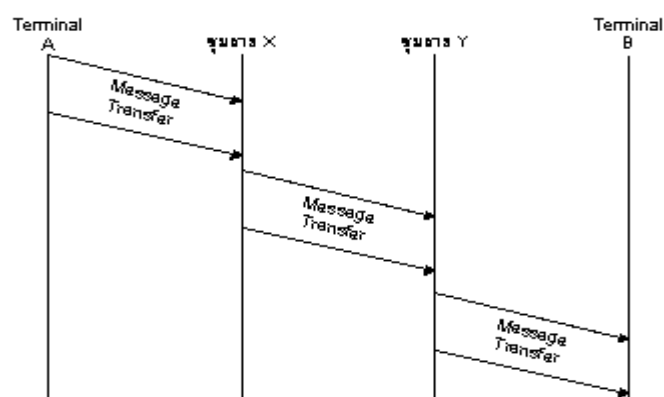
ด้วยสาเหตุข้างต้นจึงได้เกิดชุมสายสื่อสารข้อมูลแบบใหม่คือ Message Switching Network ขึ้น ในระบบเครือข่าย Message Switching Network นี้ Terminals ที่ต่ออยู่กับแต่ละ Node ภายในเครือข่าย Message Switching Network ไม่จำเป็นต้องได้รับการจัดสรรวงจรเชื่อมโยงให้แล้วเสร็จเสียก่อนจึงจะสามารถเริ่มการติดต่อได้เหมือนในกรณี Circuit Switching Network ทั้งนี้เนื่องจากการติดต่อได้อาศัยเทคนิคที่เรียกว่า Store & Forward เทคนิคนี้คือชุมสายจะรับข้อมูลจาก Terminal ที่ต้องการติดต่อผ่านชุมสายให้ครบทั้งหมดก่อน ซึ่งเราเรียกส่วนของข้อมูลดังกล่าวว่า Message ชุมสายจะทำการเก็บ Message ดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งอาจจะเป็นเพียง Buffer ธรรมดา หรืออุปกรณ์ Storage Device เช่น Magnetic Disk หรือ Magnetic Tape ก็ได้ ใน Message ทุกฉบับจะต้องมีตำแหน่ง(Address) ของ Terminal ทางด้านปลายทางเพื่อให้ชุมสายจะได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวทำหน้าที่เลือกเส้นทางในการติดต่อที่เหมาะสมให้ หลังจากที่ชุมสายได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่รับเข้ามา รวมทั้งตรวจสอบ Address ของ Terminal ปลายทางว่าถูกต้องหรือไม่ เมื่อทุกอย่างถูกต้อง ชุมสายจะกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมในการส่ง Message นั้นไปยังปลายทางให้ หลังจากนั้นชุมสายต้นทางจะทำการ Forward หรือส่งข้อมูลทั้งหมดที่มีอยู่ใน Message ฉบับนั้นไปยัง Terminal ปลายทางต่อไปจากลักษณะการทำงานดังกล่าวจะเห็นว่าหาก Message ใดมีข้อมูลมากก็จะเกิดความล่าช้า (Delay Time) สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้า Message นั้นถูก Forward ผ่านหลาย Nodes หรือหลายชุมสาย ก็ยิ่งจะทำให้ความล่าช้าเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ เนื่องจากทุก Node จะต้องรับ Message นั้นให้ครบสมบูรณ์เสียก่อนจึงจะทำการ Forward ต่อไปได้ ระบบชุมสาย Message Switching นี้

โดยทั่วไปแล้วตัวชุมสายมักจะเป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดใหญ่พอสมควร เช่น มินิคอมพิวเตอร์ พร้อมหน่วยความจำ (Storage Devices) ขนาดใหญ่พอสมควรเพื่อไว้เก็บข้อมูลสำหรับการ Forward ต่อไป ตัวอย่างของชุมสายประเภทนี้คือชุมสายโทรเลขอัตโนมัติ (Message Switching Center) ที่การสื่อสารแห่งประเทศไทยใช้ให้บริการรับ - ส่ง โทรเลขอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเจ้าหน้าที่ผู้ส่งโทรเลขจะต้องแจ้ง (พิมพ์) Address (ID) ของที่ทำการปลายทางเพื่อให้ชุมสายแยกแยะได้ถูกว่าจะส่งโทรเลขฉบับนั้นไปยังที่ทำการใด



ภาพแสดง Message Switching Network

ตามภาพ สมมติว่า Terminal A และ Terminal B ต่างก็ต้องการติดต่อกับ Terminal C ด้วยกันทั้งคู่ และส่ง Message มายังชุมสายที่ ๑ ในเวลาที่ไม่ห่างกันมากนัก ชุมสายที่ ๑ จะเก็บ Message ของทั้งสอง Terminals นั้นลงใน Buffer ของชุมสาย และทำการจัดลำดับในการส่ง (Queue) ให้แก่ทั้งสอง Message นั้น ในกรณีนี้สมมติว่า A ส่งมายังชุมสายก่อน เมื่อถึงเวลา (ถึง Queue) ชุมสายก็จะตรวจสอบ Address ปลายทางซึ่งจะพบว่าปลายทางคือ Terminal C ดังนั้นชุมสายที่ ๑ ก็จะจัดเส้นทางให้แก่ Message นั้น เช่นส่งผ่านเส้นทางระหว่างชุมสายที่ ๑ - ๒ - ๓ ไปยัง Terminal C และจะส่งจนกระทั่งจบ Message หากในระหว่างกาส่งเกิดปัญหาขึ้นในเส้นทางที่เลือกไว้ชุมสายก็จะพิจารณาเลือกเส้นทางใหม่เพื่อให้การส่งดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นเมื่อถึงคิวของ Message ที่ส่งมาจาก Terminal B ชุมสายที่ ๑ ก็จะทำเช่นเดียวกันคือตรวจสอบ Address ปลายทางและกำหนดเส้นทาง ซึ่งอาจจะใช้เส้นทางเดียวกับคราวที่ส่ง Message ของ A คือ ๑ - ๒ - ๓ ไปยัง Terminal C ก็ได้ หรืออาจจะเลือกใหม่เป็น ๑ - ๔ - ๓ เพื่อให้ส่งต่อไปยัง C ก็ได้ แต่ในกรณีที่ Terminal A การติดต่อกับ Terminal C และ Terminal B ต้องการติดต่อกับ Terminal D ชุมสายก็สามารถกำหนดเส้นทางแยกกันได้และสามารถส่งได้พร้อมกัน เช่นเลือกเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างชุมสายที่ ๑ - ๒ - ๓ เพื่อส่ง Message ของ A ไปยัง C และเลือกเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างชุมสายที่ ๑ - ๔ - ๕ - ๖ สำหรับการส่ง Message ของ A ไปยัง D เป็นต้น



ภาพแสดงหลักการทำงานของ Message Switching Network

ในระบบชุมสายประเภทนี้มีข้อดีเหนือกว่าระบบ Circuit Switching อยู่บางประการดังนี้ ประการแรกการใช้งานวงจรเชื่อมโยงจะเป็นโดยคุ่มค่ากว่า เนื่องจากไม่มีการกำหนดให้ผู้ใช้งานรายใดใช้วงจรนั้นเป็นการเฉพาะตัวปัญหาในการที่เกิดในระบบ Circuit Switching คือวงจรที่ใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างชุมสาย ถูกยึดครองโดยผู้ใช้งานคู่ใด ๆ จึงหมดไป

ประการที่สองผู้รับไม่จำเป็นต้องพร้อมที่จะรับการติดต่อจากชุมสายทันทีทันใด เหมือนกับกรณี Circuit Switching เนื่องจากชุมสายสามารถ Store ข้อมูลของแต่ละ Message ไว้ได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของ Buffer เป็นสำคัญ แต่ส่วนมากแล้วมักจะตกประมาณ ๑ - ๓ ชั่วโมง

ประการที่สามผู้ใช้งานที่ใช้ Terminal ที่ความเร็วในการรับส่ง และรหัสข้อมูลที่แตกต่างกัน ก็ยังสามารถติดต่อกันได้ ทั้งนี้เพราะแต่ละ Terminal มิได้มีการเชื่อมโยงถึงกันโดยตรงเหมือนในระบบ Circuit Switching แต่เป็นการติดต่อผ่าน Network เท่านั้น และใน Message Switching Network ก็มักจะมีคุณสมบัติในการทำ Speed And Code Conversion ให้ด้วยซึ่งจะทำได้ใน Circuit Switching Network

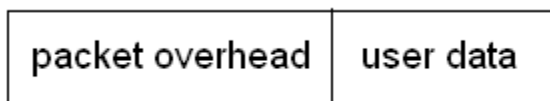
ประการที่สี่ ในระบบเครือข่ายแบบ Message Switching นี้สามารถให้บริการในลักษณะที่เรียกว่า การกระจายข่าว ( Broadcasting Service ) ได้ทำให้ผู้ใช้บริการสามารถส่ง Message เดียวกันไปยังหลายปลายทางพร้อมกันได้โดยสะดวก

ประการที่ห้าในระบบ Message Switching Network นี้สามารถทำการตรวจสอบและควบคุม และแก้ไขความผิดพลาดคลาดเคลื่อนของ Message ที่เกิดขึ้นในระหว่างการรับส่งได้ แต่ในกรณี Circuit Switching Network ผู้ใช้จะต้องทำหน้าที่ในการตรวจสอบความถูกต้องของ Message ด้วยตนเอง

ถึงแม้ว่า Message Switching Network จะมีข้อดีเมื่อเทียบกับ Circuit Switching Network อยู่หลายประการ แต่เนื่องจากมี Delay Time สูงเครือข่ายในลักษณะนี้จึงไม่เหมาะสมในการสื่อสารข้อมูลที่ต้องการความเป็น Real Time หรือต้องการให้ผู้ใช้งานรู้สึกเสมือนว่าได้รับการติดต่อตอบรับในทันทีทันใด (Interactive) ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการติดต่อระหว่าง Computer และ Terminal ที่ต้องติดต่อตอบรับกันอยู่เกือบตลอดเวลา

### ๒.๓.๔.๓ ชุมสายสื่อสารข้อมูลประเภท Packet Switching

ระบบชุมสายประเภทนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อเสียของระบบชุมสายทั้งสองประเภทที่กล่าวมาแล้ว วงชุมสายประเภท Packet Switching ยังคงอาศัย Store & Forward Technique เช่นเดียวกับชุมสายประเภท Message Switching แต่การรับส่งข้อมูลแต่ละครั้งจะถูกแบ่งเป็นหน่วยย่อยที่เรียกว่า Packet โดยไม่ต้องรอครบทั้ง Message เสียก่อนจึงจะทำการ Forward ออกไปได้ และโดยทั่วไปแล้วแต่ละ Packet จะไม่ยาวมาก ในบางระบบอาจจะยาวเพียง ๖๔ Byte ( ๕๑๒ Bits ) ในหนึ่ง Packet ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบ Message Switching ที่มีได้จำกัดความยาวของแต่ละ Message ไว้ ทำให้ในบางครั้งอาจจะหมายถึงการรับส่ง File ขนาดใหญ่ทั้ง File ก็ได้ เมื่อแต่ละ Packet มีขนาดเล็ก จึงมีผลทำให้ชุมสายใช้เวลาในการรับ-ส่งแต่ละ Packet จึงมีผลทำให้การรับ-ส่ง Packet ผ่านแต่ละชุมสายใช้เวลาอันน้อยเป็นผลให้แต่ละ Packet เดินทางถึงจุดหมายปลายทางได้รวดเร็วขึ้น ทำให้ระบบ Packet Switching Network นี้ เหมาะสำหรับการใช้งานที่เป็นลักษณะ On - Line หรืองานที่ค่อนข้างเป็น Interactive แต่ละ Packet มีโครงสร้างง่ายๆประกอบด้วยส่วนที่ถูกเพิ่มเติมเข้ามา( Packet Overhead และส่วนที่เป็นข้อมูลของผู้ใช้งาน(User Data) ส่วนที่เรียกว่า Packet Overhead นั้นเป็นส่วนที่ประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับ Address ของผู้รับที่ปลายทาง (แต่ละ Node หรือแต่ละชุมสายที่ถูกใช้งานในระหว่างการส่งและรับข้อมูลจำเป็นต้องใช้ข้อมูลนี้) ตลอดจนข้อมูลในการควบคุมการรับและส่ง รวมถึงขบวนการในแก้ไขข้อผิดพลาดในการรับและส่งอันอาจจะเกิดขึ้นได้ ทำให้การรับและส่งข้อมูลมีความถูกต้องและความเชื่อถือได้ (Reliability) สูง



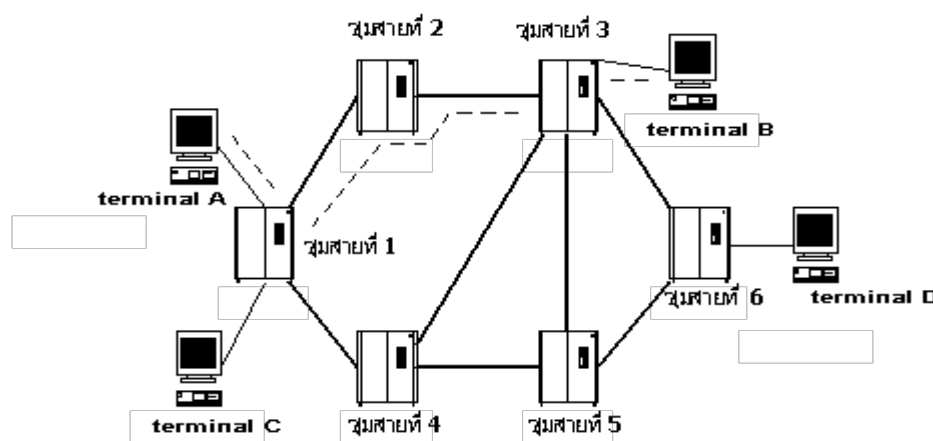
ภาพแสดงโครงสร้างอย่างง่ายของแต่ละ Packet

ถ้าเราพิจารณาการส่งข้อมูลจาก A ถึง B บน Packet Switching Network ซึ่งจะเริ่มต้นโดย Terminal A ส่ง Packet มายังชุมสายที่ ๑ ชุมสายก็จะนำ Packet ที่ได้รับมานั้นเก็บลงใน Buffer หรือ Storage Devices อื่นๆเสียก่อน (ส่วนมากแล้วในกรณีที่เป็น Packet Switching จะเก็บลงใน RAM แต่ถ้าหากเป็น Message Switching แล้วมักจะเก็บลงใน Hard Disk) จากนั้นชุมสายจะทำการตรวจสอบ Address ของผู้รับปลายทาง เพื่อที่จะพิจารณาว่าจะส่งไปอย่างไร (ใช้ Routing อย่างไร) ซึ่งตามปกติต้องคำนึงถึงเรื่อง Delay Time ในการรับ-ส่งข้อมูล ดังนั้นการเลือก Routing จึงมักเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดและผ่านน้อย Node หรือน้อยชุมสายที่สุด ดังนั้นในกรณีนี้จึงเลือกให้ผ่านชุมสายที่ ๒ หลังจากนั้นชุมสายหมายเลข ๑ ก็จะนำ Packet ดังกล่าวไปต่อ Queue ร่วมกับ Packet ที่มาจาก Terminal ของผู้ใช้บริการรายอื่นๆที่ชุมสายได้เลือกแล้วว่าจะต้องส่งผ่านวงจรเชื่อมโยงระหว่างชุมสายที่ ๑ และ ชุมสายที่ ๒ เมื่อถึงคิวก็จะส่ง Packet ดังกล่าวแล้วออกไปยังชุมสายที่ ๒ ต่อไป ชุมสายที่ ๒ ก็จะดำเนินการวิธีเช่นเดียวกับชุมสายที่ ๑ คือเก็บลงใน Buffer และพิจารณาเลือกเส้นทางที่จะส่ง Packet ต่อไปยังผู้รับปลายทาง (ในที่นี้คือ B) ดังนั้นจะต้องส่งไปยังชุมสายที่ ๓ เพื่อให้ชุมสายที่ ๓ ส่งไปยังผู้รับปลายทางต่อไป

ในกรณีที่ข้อมูลที่ผู้ใช้งานต้องการส่งมีขนาดยาวมากๆเกินกว่าขนาดของ Packet ที่ชุมสายกำหนดในกรณีที่ Terminal ของผู้ใช้งานต้นทางเป็น Terminal ประเภท Packet Mode Terminal



หมายถึง Terminal ที่รับรู้และสามารถใช้งานกับ Packet Switching Protocol ได้) Terminal ต้นทางนั้นเองที่จะต้องทำหน้าที่ในการแบ่งข้อมูลนั้นออกเป็นส่วนย่อยๆ แล้วทำให้เป็น Packet ที่มีขนาดพอดีกับที่ชุมสายกำหนดไว้ (โดยเพิ่มเติม Packet Overhead ให้เรียบร้อย) แล้วทยอยส่งแต่ละ Packet ผ่านเครือข่ายจนถึงผู้รับปลายทาง และในกรณีที่ Terminal ของผู้รับปลายทางเป็น Packet Mode Terminal เช่นเดียวกับต้นทางมันก็ต้องทำหน้าที่รวม Packet ย่อยๆที่ได้รับมานั้นให้กลับเป็นข้อมูลดั้งเดิมอีกครั้งหนึ่ง แต่ในกรณีที่ Terminal ไม่ว่าจะเป็นที่ต้นทางหรือปลายทางก็ตามเป็น Terminal ประเภท Non Packet Mode Terminal (ไม่สามารถใช้งานกับ packet switching Protocol ได้) หน้าที่ในการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยแล้วสร้างเป็น Packet ย่อยๆหรือรวม Packet ย่อยๆที่ได้รับมาให้กลับเป็นข้อมูลดั้งเดิม ก็จะเป็นหน้าที่ของอุปกรณ์ที่เรียกว่า Packet Assembly Disassembly : PAD ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่ชุมสายแต่ละชุมสาย



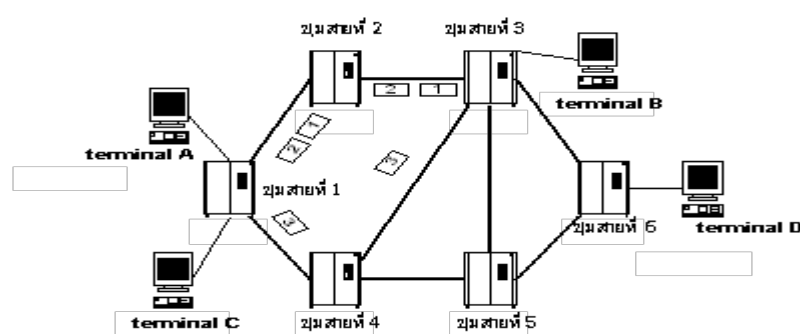
ภาพแสดง Packet Switching Network

ในระบบเครือข่าย Packet Switching วิธีการรับส่งข้อมูลที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไปมีอยู่ด้วยกัน ๒ วิธี ดังต่อไปนี้คือ วิธีการ Datagram และวิธีการ Virtual Circuit

### ๑. วิธีการ datagram

เครือข่ายจะถือเสมือนว่า แต่ละ Packet ที่ผู้ส่งทำการส่งออกมายังชุมสายนั้นไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันเลย ถ้าพิจารณาการทำงานตามภาพด้านล่าง (สมมติว่าทั้ง A และ B เป็น Packet Mode Terminal) ผู้ใช้งานที่ Terminal A ซึ่งถูกต่ออยู่กับชุมสายที่ ๑ ต้องการติดต่อกับผู้ใช้งานที่ Terminal B ซึ่งถูกต่ออยู่กับชุมสายที่ ๒ โดยที่ A มีข้อมูลที่ต้องการส่งจำนวนทั้งสิ้น ๓ Packet ดังนั้น A จึงส่ง Packet ทั้งหมดไปยังชุมสายที่ ๑ เมื่อชุมสายที่ ๑ ได้รับ Packet แต่ละ Packet ก็จะทำการเก็บลงใน Buffer และตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับ Address ปลายทางเพื่อที่จะได้ กำหนดเส้นทางในส่งแต่ละ Packet ไปยัง Terminal B ต่อไป จากตัวอย่างชุมสาย ที่ ๑ เลือกทำการ ส่ง Packet ที่ ๑ และ ๒ ผ่านชุมสายที่ ๒ เพื่อส่งต่อไปยังชุมสายที่ ๓ และส่งต่อไปยัง B ต่อไป สำหรับ Packet ที่ ๓ นั้นได้ถูกส่งผ่านชุมสายที่ ๔ เพื่อให้ทำการส่งต่อไปยังชุมสายที่ ๓ และส่งต่อไปยัง B ต่อไปอีกชั้นหนึ่ง การเลือกเส้นทางนั้นแต่ละชุมสายจะอาศัยข้อมูลใน Routing Algorithm ที่อยู่ใน แต่ละชุมสายโดยคำนึงถึงปริมาณ Traffic ที่มีอยู่ในแต่ละเส้นทางว่ามีอยู่มากน้อยเพียงใด และจะกระทบ ทำให้เกิด Delay Time สูงเกินไปสำหรับผู้ที่กำลังเรียกใช้งานผ่านเครือข่ายอยู่ในขณะนั้นหรือไม่ เมื่อ Terminal B เมื่อได้รับ Packet แต่ละ

Packet มันจะต้องทำหน้าที่ตรวจสอบด้วยลำดับของ Packet ที่ได้รับเข้ามานั้นด้วยว่าถูกต้องความเป็นจริงหรือไม่ ทั้งนี้ Delay Time ในแต่ละเส้นทางอาจจะไม่เท่ากันก็ได้ ในกรณีที่ตรวจสอบแล้วพบว่าลำดับของ Packet ที่ได้รับผิดไปก็จะต้องทำการเรียงลำดับเสียใหม่ ให้ถูกต้องก่อนที่จะทำการรวม Packet ทั้งหมดให้เป็นข้อมูลดั้งเดิมต่อไป จากการทำชุมสายแต่ละชุมสายจะต้องทำการตัดสินใจเลือกเส้นทางให้กับทุกๆ Packet ที่ทำการ Forward ผ่าน ดังนั้น แต่ละ Packet จะต้องต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับ Address ของผู้รับปลายทางเสมอ นอกจากนี้จากการที่ Terminal ที่ปลายทางอาจจะได้รับ Packet ที่ผิดลำดับไปจากความเป็นจริงเนื่องจาก Delay Time ที่อาจจะไม่เท่ากันในแต่ละเส้นทางก็ได้ ดังนั้นใน Packet Switching Network ที่ทำงานโดยวิธีการที่เรียกว่า Datagram นี้ ชุมสายเริ่มต้นที่รับ Data Packet มาจาก Terminal ของผู้ใช้งานจึงต้องมีหน้าที่ในการเพิ่มเติมเลขลำดับที่ของ Packet ให้แก่แต่ละ Packet ที่ได้รับเข้ามาด้วยซึ่งในที่นี้คือชุมสายที่ ๑ ทั้งนี้ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับ Terminal ที่จะทำการตรวจสอบว่าลำดับของ Packet ที่ได้รับเข้ามานั้นถูกต้อง หรือไม่

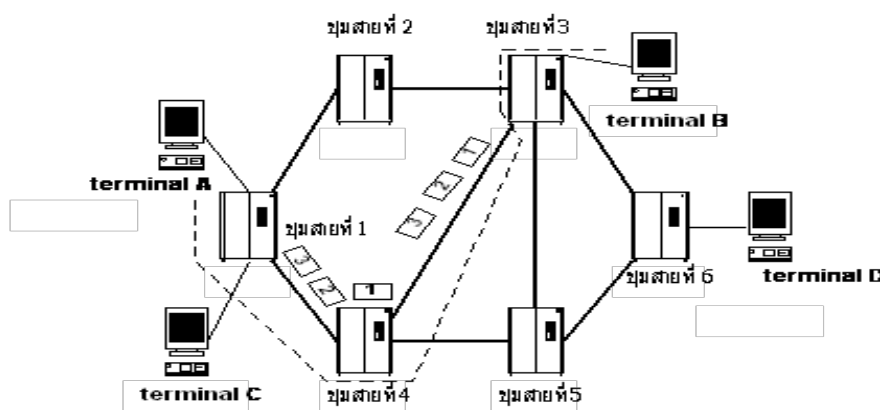


ภาพแสดง Datagram Technique

## ๒. วิธีการ Virtual Circuit

ในวิธีการนี้แต่ละ Packet จะถูกส่งผ่านเส้นทางเดียวกันในทุก Packet โดยการใช้งาน Virtual Circuit ซึ่งเป็นวงจรในการติดต่อชั่วคราวที่ได้ถูกกำหนดขึ้นล่วงหน้าก่อนที่ชุมสายแรกสุดจะเริ่มทำการติดต่อจะทำการ Forward Data Packet ออกไป Packet เข้ามาจะทำการ Forward Packet แรกสุดออกไปยัง Terminal ของผู้ใช้งานที่ปลายทาง ดังนั้นก่อนที่จะมีการติดต่อกันระหว่างผู้ใช้งานที่ต้นทางและปลายทาง Virtual Circuit จะต้อง ถูกกำหนดเสียขึ้นเสียก่อน วิธีการนี้เริ่มต้นด้วย ผู้ใช้งานที่ต้องการเริ่มต้นการติดต่อ (ซึ่งในกรณีนี้คือ A) จะต้อง ส่ง Control Packet ที่เรียกว่า Call Request Packet ไปให้กับชุมสายต้นทาง (ในที่นี้คือชุมสายที่ ๑) โดยระบุความต้องการต้องการติดต่อปลายทางที่ใด (ในที่นี้คือ B) ที่ถูกต่ออยู่กับชุมสายที่ ๓ ในกรณีนี้ชุมสาย แรก (ชุมสายที่ ๑) จะทำการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับ Address ของผู้รับปลายทาง (B) ที่ติดมากับ Call Request Packet เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจะทำการส่งผ่านแต่ละ Packet ไปตามเส้นทางใดจึงจะเหมาะสมและเกิด Delay Time น้อยที่สุด เมื่อตัดสินใจได้แล้วก็จะทำการส่ง Call Request Packet นี้ไปตาม เส้นทางที่ถูกเลือกสมมติว่าเป็นชุมสายที่ ๒ ก็จะทำการส่งไปตามเส้นทางที่เชื่อมโยงระหว่างชุมสายที่ ๑ กับชุมสายที่ ๒ เมื่อชุมสายที่ ๒ ได้รับ Call Request Packet ดังกล่าว มันก็จะทำการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับ Address ของผู้รับปลายทาง ในที่นี้เส้นทางที่เหมาะสมคือส่งต่อไปยังชุมสายที่ ๓ โดยตรงและชุมสายที่ก็จะส่ง Call Request Packet นั้นต่อไปยัง B เมื่อ B พร้อมทั้งจะติดต่อกับ B ก็จะมีส่ง

Call Accept Packet กลับไปยัง A ตามเส้นทางเดิม จาก Virtual Circuit ระหว่าง A กับ B ก็จะถูกจัดเตรียมขึ้นโดยเสร็จ สมบูรณ์ทุกประการ และสามารถเริ่มการติดต่อระหว่าง A กับ B ได้และหลังจากนั้นทุกๆ Packet ที่ติดต่อ ระหว่าง A กับ B จะติดต่อผ่าน Virtual Circuit นี้ทั้งสิ้น ลักษณะสำคัญที่ทำให้ Virtual Circuit แตก ต่างจาก Real Circuit (Physical Circuit) เป็นเพียงการกำหนดช่องสัญญาณเสมือน ( Logical Channel ) เท่านั้น ดังนั้นจึงมีผู้ที่สามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกันเป็นจำนวนมาก แต่จะเป็นจำนวนเท่าใด นั้นขึ้นอยู่กับเครือข่ายว่าในการเชื่อมโยงระหว่างชุมสายหนึ่งไปยังอีกชุมสายหนึ่งนั้นสามารถกำหนด Logical Channel ได้จำนวนเท่าใด ในการใช้งานแบบ Virtual Circuit นี้หลังจากที่ Virtual Circuit ได้ถูกกำหนดแล้วก็ไม่ จำเป็นที่จะต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับ Address ปลายทางเพิ่มเติมมากับทุกๆ Packet อีก เพราะทุกๆ Packet ที่ติดต่อระหว่าง A กับ B จะไม่มีการกำหนดเส้นทางใหม่อีกต่อไป นอกจากนี้หากในขณะเดียวกัน A ต้องการ ที่จะติดต่อกับ C ที่เป็น Terminal ของชุมสายที่ ๖ เครือข่ายในระบบนี้ยอมให้ Terminal ผู้ใช้งานใดๆ ใน ระบบสามารถขอ Virtual Circuit ได้มากกว่า ๑ Virtual Circuit ขึ้นกับว่าในตอนนั้นแจ้งขอใช้งาน (ขอเปิดบริการครั้งแรก) นั้นแจ้งขอไว้สูงสุดจำนวนเท่าใด ดังนั้นในกรณีหาก A ได้แจ้งไว้ว่าจำนวน Virtual Circuit สูงสุดที่จะขอใช้ในแต่ละคราวคือ ๒ A ก็สามารถติดต่อกับ C ได้ในขณะเดียวกันกับที่ติดต่อกับ B แม้ว่า A จะมี Port ที่ติดต่อกับชุมสายเพียง Port เดียวเท่านั้น ซึ่งเป็นการใช้งานในลักษณะของการ Multiplexing นั่นเอง เมื่อการติดต่อเสร็จลง Terminal ที่เริ่มต้นการติดต่อก็ต้องส่ง Clear Request Packet เพื่อเป็นการบอกแก่เครือข่ายว่าการติดต่อได้เสร็จสิ้นลงแล้วให้ทำการยกเลิก Virtual Circuit ที่ใช้งานอยู่นั้น การยกเลิก Virtual Circuit นี้จะเสร็จสิ้นสมบูรณ์เมื่อชุมสายต้นทางได้รับ Clear Confirm Packet ที่ตอบกับมาจากปลายทาง



ภาพแสดง Virtual Circuit Technique

โดยสรุปแล้วข้อแตกต่างระหว่างวิธีการ Datagram กับวิธีการ Virtual Circuit นั้นมีข้อแตกต่าง กันที่วิธีการ Datagram จะทำการเลือกเส้นทางให้แก่แต่ละ Packet ก่อนที่ทำการส่ง Packet ใดๆออกไป ดังนั้นจึงต้องมี Address ปลายทางในทุกๆ Packet และยังต้องมีเลขลำดับที่เพิ่มเติมให้แก่แต่ละ Packet ส่วนในวิธีการ Virtual Circuit ชุมสายจะทำการเส้นทางที่ส่งไว้ล่วงหน้า โดยที่ทุก Packet จะต้องส่งผ่านไปตาม Virtual Circuit ที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นหากมีข้อมูลที่จะต้องส่งจำนวนมากการใช้วิธีการ Virtual Circuit จะเหมาะสมกว่าเนื่องจาก Packet Overhead (เช่น

Address ปลายทาง) มีจำนวนน้อยกว่าและ Packet ที่ปลายทางได้รับก็จะเรียงลำดับโดยถูกต้องทั้งนี้ เนื่องจากทุก Packet ถูกส่งไปในการเส้นทางเดียวกันแต่สำหรับกรณีที่ข้อมูลที่จะส่งมีจำนวนน้อยการใช้วิธี Datagram จะทำให้ส่งได้เร็วกว่าเพราะไม่เสียเวลาในการสร้าง Virtual Circuit เสียก่อน

### ข้อดีของ Packet Switching Network มีข้อดีหลายประการดังนี้

๑. Error Correction ข้อมูลที่ส่งผ่านระบบเครือข่าย Packet Switching จะมีความถูกต้องและความเชื่อถือได้สูงเนื่องจากเมื่อ Node ใดๆได้รับ Packet เข้ามามันจะทำการตรวจสอบความถูกต้อง เสียก่อน หากตรวจพบว่ามีผิดพลาดก็จะแจ้งไปยังต้นทางให้ส่ง Packet นั้นมาใหม่ หากไม่พบข้อผิดพลาด มันจึงจะทำการ Forward ต่อไปได้ ดังนั้นความถูกต้องและเชื่อถือได้สูง

๒. Interactive Communication เนื่องจากข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น Packet ย่อยๆ ทำให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเป็น Interactive มากขึ้น

๓. Speed Conversion เครือข่าย Packet Switching ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ในกรณีที่ Terminal ที่ต้นทางและปลายทางมีความเร็วในการทำงานไม่เท่ากัน เช่น Terminal ที่ต้นทางรับส่งข้อมูล ด้วยความเร็ว 2400 BPS ก็สามารติดต่อกับศูนย์คอมพิวเตอร์ที่รับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 9600 BPS ได้ โดยที่เครือข่ายจะทำหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนความเร็วให้เหมาะสมในการทำงานกับอุปกรณ์ปลายทาง

๔. Protocol Conversion อุปกรณ์ที่ใช้ Protocol ในการทำงานต่างกัน เช่น X.25, X.32 SDLC/SNA, BSC ฯลฯ สามารถติดต่อกันได้ โดยที่เครือข่ายจะทำการแปลง Protocol ให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานแต่ละราย ทำให้การให้บริการมีความคล่องตัวในการติดต่อกับผู้ใช้งานรายอื่นมากขึ้น

๕. High Reliability ในขณะที่ข้อมูลถูกส่งผ่านเครือข่าย หากเกิดขึ้นในวงจรที่กำลังถูกใช้งาน อยู่จนไม่สามารถทำการรับ-ส่งข้อมูลต่อไปได้ ชุมสายจะทำการเลือกวงจรหรือเส้นทางใหม่ทันที เพื่อให้ผู้ใช้งาน สามารถใช้งานต่อไปได้ โดยพยายามให้เกิดผลกระทบกับผู้ใช้งานน้อยที่สุด

๖. Multiplexing จากหลักการของวิธีการ Virtual Circuit หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Logical Channel ทำให้ผู้ใช้บริการสามารถติดต่อกับปลายทางมากกว่าหนึ่งแห่งได้พร้อมๆกัน แม้จะมี Port อยู่เพียง Port เดียวจึงทำให้ประหยัด Port ที่จะต้องนำมาใช้งาน

๗. Security นอกจากการให้บริการรับ-ส่งข้อมูลตามปกติแล้ว เครือข่าย Packet Switching ยังสามารถมีบริการพิเศษ ( User Facility ) อื่นๆที่จะสนับสนุนในด้าน Security เช่น Close User Group ซึ่งเป็นการกำหนดกลุ่มผู้ใช้บริการและป้องกันมิให้ผู้ใช้บริการที่มีได้เป็นสมาชิกของกลุ่มสามารถติดต่อกับสมาชิกภายในกลุ่มได้ นับเป็นระบบ Security อย่างหนึ่ง

๘. Centralized Monitor & Control ในเครือข่าย Packet Switching จะมีอุปกรณ์สำคัญอยู่ชิ้นหนึ่งเรียกว่า Network Control Center หรือ Network Management Center ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจสอบและรวบรวมสภาวะการทำงานต่างๆของเครือข่าย ซึ่งเป็นการช่วยให้เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมเครือข่าย สามารถตรวจสอบและแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ภายในเครือข่ายได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

เครือข่าย Packet Switching ก็มีข้อเสียคล้ายกับเครือข่าย Message Switching สิ่งนั้นก็คือ Delay Time ที่มากขึ้นเมื่อมีผู้ใช้งานมากขึ้น (กรณีที่ Traffic ที่ผ่านเครือข่ายสูง) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการ เพิ่มจำนวนวงจรเชื่อมโยงระหว่างชุมสาย (หมายถึงวงจรจริงที่จับต้องได้คือเป็น Physical

Circuit) ให้ มากขึ้นในกรณีที่มี Traffic ผ่านมากๆ หรือเพิ่ม Capacity ของชุมสายให้สามารถรองรับ ปริมาณ Traffic สูงๆได้ หรืออาจจะใช้การปรับเปลี่ยน Parameter ต่างๆใน Routing Algorithm ใน แต่ละชุมสายให้ เหมาะสมกับปริมาณ Traffic ซึ่งจะเป็นการกระจาย Traffic ไปผ่านชุมสายต่างๆ แทนที่จะไปผ่านชุมสาย ใดชุมสายหนึ่งโดยเฉพาะซึ่งอาจจะทำให้เกิดสภาวะคอขวด (Bottle Neck) หรือเกิดการ Congestion ขึ้นภายในเครือข่ายได้

### ๒.๓.๔.๔ มาตรฐานของเครือข่ายสื่อสารข้อมูลแบบ Packet Switching

ITU-T (เดิมเรียกว่า CCITT : International Telegraph And Telephone Consultative Commitee) ได้ให้ Standard Recommendation (ซึ่งอาจจะถือว่าเป็นข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานได้) ไว้มากมายหลายประการแต่ที่เรามักจะพบเห็นกันบ่อยได้แก่

๑ X.3 เป็นมาตรฐานที่กำหนด Parameters ต่างๆซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของ PAD อาทิ Maximum Packet Size การเลือกความเร็วในการรับส่งข้อมูลกับ Asynchronous Terminal การปรับเปลี่ยน Parameters ต่างๆของ PAD นี้สามารถทำได้โดยการนำ Asynchronous Terminal มาต่อกับ Command หรือ Control Port ของ PAD เพื่อสั่งการในการแก้ไข

๒ X.25 เป็นมาตรฐานที่กำหนดเกี่ยวกับ Protocol ที่ใช้ในการติดต่ออุปกรณ์ของผู้ใช้บริการ กับ Network โดยที่อุปกรณ์ของผู้ใช้บริการจะต้องสามารถทำงานในลักษณะ Packet Mode Terminal ได้ การ ติดต่อระหว่าง X.๒๕ Terminal กับชุมสายหรือเครือข่ายจะต้องเป็น Leased Circuit หรือ Dedicated Line ซึ่งจะต้องมีวงจรเชื่อมโยงกันโดยตรง

๓ X.28 เป็นมาตรฐานที่กำหนด Protocol สำหรับการติดต่อระหว่าง Asynchronous Terminal กับ PAD รวมตลอดถึงการ Interface และวิธีการในการสั่งการเพื่อเปลี่ยนแปลง PAD Parameters โดย Asynchronous Terminal ที่ต่อกับ Command หรือ Control Port ของ PAD

๔ X.29 เป็นมาตรฐานที่กำหนดขั้นตอน (Procedure) ที่จะใช้งานในการแลกเปลี่ยน User และ Control Information ระหว่าง PAD กับ PAD หรือ PAD กับ Packet Mode Terminal เพื่อให้ สามารถเปลี่ยนแปลง Parameters ของ PAD ให้เหมาะสมสำหรับการติดต่อนั้นๆ

๕ X.32 เป็นมาตรฐานของ Protocol ที่ในการติดต่อระหว่าง Packet Mode Terminal กับ ชุมสายหรือเครือข่ายเช่นเดียวกับ X.25 แต่ว่าการเชื่อมโยงระหว่าง Packet Mode Terminal กับ ชุมสาย หรือเครือข่ายเป็นลักษณะ Dial Up คือใช้วิธีการติดต่อโดยการหมุนโทรศัพท์ติดต่อเข้ามายัง ชุมสาย ดังนั้นการ ให้บริการในแบบ X.๓๒ นี้จึงต้องมีความสามารถในการตรวจสอบและระบุตัวผู้ใช้ บริการได้ว่าเป็นใคร เพื่อที่จะ สามารถเรียกเก็บค่าบริการได้ในภายหลัง

๖ X.75 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการติดต่อระหว่างเครือข่าย X.25 สองเครือข่ายใดๆเช่นระหว่าง เครือข่าย X.25 ในประเทศไทยกับเครือข่าย X.25 ในประเทศสิงคโปร์ เป็นต้น

### ๒.๓.๔.๕ เทคโนโลยีลำดับชั้นดิจิทัลซิงโครนัส (Synchronous Digital Hierarchy: SDH)

เทคโนโลยีลำดับชั้นดิจิทัลซิงโครนัส (Synchronous Digital Hierarchy: SDH) เกิดจากความพยายามที่จะทำให้ความเร็วในการส่งสัญญาณดิจิทัลที่ความเร็วสูง เท่ากันและซิงโครนัส (synchronize) กันทั่วโลก เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายการสื่อสารทั่วโลกเข้าด้วยกันโดยง่าย ก่อนมีเทคโนโลยีดังกล่าว ลำดับชั้นความเร็วในการส่งสัญญาณดิจิทัลในโลกมี ทั้งหมด ๓ มาตรฐานคือ มาตรฐานของอเมริกา มาตรฐานของยุโรป และ มาตรฐานของญี่ปุ่น ที่ระดับ

ความเร็วต่ำมาตรฐานเหล่านี้ใช้ความเร็วเดียวกัน แต่ที่ระดับความเร็วสูงใช้ความเร็วต่างกัน ทำให้การเชื่อมต่อเครือข่ายเข้าด้วยกันทำได้ยาก หลังจากมีการกำหนดมาตรฐานร่วมกันด้วยเทคโนโลยีนี้แล้ว ผู้ผลิตในแต่ละประเทศได้เปลี่ยนมาใช้มาตรฐานร่วมกัน ทำให้เชื่อมต่อได้ง่ายขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในการเชื่อมต่อลง ในปัจจุบัน ระบบสื่อสารรุ่นใหม่ ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นจะสามารถใช้ร่วมกันได้ทั่วโลกเป็นระบบเปิด (open system) ความเร็วพื้นฐานของ SDH (Synchronous Transport Module level One: STM-1) คือ 155.52 Mbps ส่วนที่ระดับความเร็วสูงขึ้นไปจะใช้ความเร็วที่เป็นค่าทุก ๆ ๔ เท่าของค่านี้เช่น 622.08 Mbps (STM-4) 2.488 Gbps (STM-16) เป็นต้น

การส่งสัญญาณตามมาตรฐาน SDH นี้ จะส่งในลักษณะเป็นเฟรม (frame) โดยแต่ละเฟรมประกอบด้วยส่วนหัว (Overhead) และส่วนข้อมูล (Virtual Container: VC) ขนาดของส่วนข้อมูลนี้ได้ถูกออกแบบไว้ให้สามารถบรรจุได้ทั้งสัญญาณความเร็วต่ำในปัจจุบัน เช่นสัญญาณบริการร่วมระบบดิจิทัลและสัญญาณความเร็วสูง เช่น สัญญาณของเซล ATM นอกจากนี้ ส่วนหัวก็ได้ถูกออกแบบให้เก็บข้อมูลที่จำเป็นต่อการบริหารเครือข่าย ทำให้การเชื่อมต่อหรือขยายเครือข่ายทำได้ง่าย

### ๒.๓.๕ เครือข่ายบริการร่วมระบบดิจิทัลแบบช่องสัญญาณกว้าง (B-ISDN)

#### ISDN

เทคโนโลยีเครือข่ายบริการร่วมระบบดิจิทัล (Integrated-Services Digital Network: ISDN) เป็นเทคโนโลยีที่เกิดจากความพยายามของผู้ให้บริการเครือข่าย (Network Provider) ในการรวมบริการของเครือข่ายโทรศัพท์ และ เครือข่ายสื่อสารข้อมูลเข้าด้วยกัน เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และ บริหารเครือข่าย ความสามารถของเทคโนโลยีแบบนี้ทำให้ผู้ใช้บริการสามารถโทรศัพท์ไปพร้อม ๆ กับที่ส่งแฟกซ์ ข้อมูล หรือภาพไปในสายส่งเส้นเดียวกันในลักษณะบริการร่วม (Integrated Services) ได้ โดยที่ในทางกายภาพแล้ว เครือข่ายที่ใช้ส่งสัญญาณเสียงโทรศัพท์ และข้อมูล ยังคงแยกอิสระจากกัน ความเร็วของเครือข่ายบริการร่วมระบบดิจิทัลในปัจจุบัน ยังคงจำกัดอยู่ที่ 64 kbps อันเป็นอัตราพื้นฐาน (Basic-Rate ISDN: BRI) สำหรับสายส่งทั่วไป และไม่เกิน 1.544 Mbps อันเป็นอัตราเบื้องต้น (Primary-Rate ISDN: PRI) สำหรับสายส่งเฉพาะ หรือ 2.048 Mbps ในกรณีของมาตรฐานยุโรป ซึ่งยังคงไม่เพียงพอสำหรับการส่งสัญญาณภาพเคลื่อนไหวหรือการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นด้วยความเร็วสูง ทำให้บริการเหล่านี้ยังคงต้องอาศัยเครือข่ายชนิดอื่น หรืออาศัยวงจรเช่าเฉพาะ (Leased Circuit)

ISDN เป็นระบบที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารที่เป็น Circuit Switched แบบ Digital ซึ่งถูกใช้งานมานานนับสิบปี ระบบนี้ยอมให้มีการส่งข้อมูล ภาพวิดีโอ ไปพร้อมๆกับเสียงด้วยความเร็วสูง ถูกตั้งเป็นมาตรฐานโดย ITU-T ในการพัฒนาระบบ PSTN (Public Switched Telephone Network) ให้เป็นการให้บริการแบบ Digital ที่มีความเร็วเหนือกว่า Modem ทั่วไป ในระบบ ISDN จะแบ่งการทำงานเป็น ๒ ส่วนคือส่วน Bearer Channel และ Data หรือ Delta Channel โดย Bearer Channels (B Channels) ทำหน้าที่ให้บริการ เสียง วิดีโอ หรือการส่งถ่ายข้อมูล ในขณะที่ Delta Channel (D Channel) นั้นเป็นตัวจัดการสัญญาณเรียกเข้าในระบบ Network และการตอบรับ กำหนดเบอร์เรียกเข้า

การใช้บริการ ISDN แบ่งออกเป็น ๒ ชนิดคือ Basic Rate Interface (BRI) และ Primary Rate Interface (PRI) ดังนี้

๑. แบบ BRI (Basic Rate Interface) หรือทางองค์การโทรศัพท์เขาเรียกว่า BAI (Basic Access Interface) เป็นรูปแบบการให้บริการด้วยคู่สายโทรศัพท์ธรรมดาจากชุมสาย ISDN จนถึงอุปกรณ์ปลายทาง คู่สายเพียง ๑ คู่สาย สามารถที่จะรองรับอุปกรณ์ปลายทางชนิดต่าง ๆ ได้สูงสุด ๘ อุปกรณ์และสามารถใช้งานได้ ๒ อุปกรณ์พร้อมกันในเวลาเดียวกัน เนื่องจากภายในคู่สาย ISDN แบบ BRI นี้จะประกอบไปด้วยช่องสัญญาณ ๒ ช่องในจะใช้ 2 B channel คือ 64 kbps นั่นคือ 128 Kbps และใช้ 1 D channel 16 kbps รวมแล้วจะได้ Bandwidth 144 kbps บริการนี้เหมาะสำหรับธุรกิจขนาดเล็กและขนาดกลาง ๒. แบบ PRI (Primary Rate Interface) ส่งข้อมูลได้ที่ละหลายๆ ที่ PRI จะใช้ 23 B channel และ 1 D channel plus 64 kbps รวมแล้วจะได้ถึง 1,536 kbps ในแถบ Europe นั้น PRI จะใช้ 30 B channel และ 1 D channel 64 kbps Bandwidth รวมจะได้ 1,984 kbps สูงสุด ปรากฏว่าเมื่อนำระบบ 64 kb/s ISDN มาทดลองใช้ได้ไม่นานพบว่าความเร็วในการรับ-ส่งสัญญาณ ( Bitrate ) ช้าเกินไปนั่นคือให้ความกว้างของ Bandwidth น้อยเกินไป เมื่อคำนึงถึงการส่งสัญญาณ Video ความเร็วเพียง 64 kb/s สามารถส่งได้เพียงสัญญาณ Video ที่มีคุณภาพต่ำมาก ระบบ ISDN นี้จึงถูกเรียกว่า Narrowband ISDN แม้ว่าระบบ Narrowband ISDN จะไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร แต่อย่างไรก็ตาม จากประสบการณ์ ปัญหา และความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทำให้มีการพัฒนาจาก ระบบ ISDN เดิมที่ออกแบบใช้งานกับสื่อสายทองแดงเป็นหลักให้กลายเป็นระบบ Broadband Optical-Fiber-Based ISDN ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะประสบความสำเร็จอย่างสูง

เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านความเร็วในการส่งข้อมูล และ ข้อจำกัดที่ไม่สามารถส่งข้อมูลแบบมัลติมีเดียได้ เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับทางด่วนข้อมูลจะต้องสามารถส่งข้อมูลแบบมัลติมีเดีย และใช้เครือข่ายร่วมเครือข่ายเดียวสำหรับข้อมูลทุกประเภทได้ ในขณะที่มีความยืดหยุ่นพอที่จะรองรับกับบริการใหม่ ๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตด้วย คณะผู้วิจัยมีความเห็นว่า เทคโนโลยีที่มีคุณสมบัติเหมาะสมดังกล่าวในปัจจุบัน และ อนาคตอันใกล้นี้ คือ เทคโนโลยีเครือข่ายบริการร่วมระบบดิจิทัลแบบช่องสัญญาณกว้าง (Broadband ISDN: B-ISDN)

### Broadband ISDN

ความต้องการรับ - ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงและการใช้งาน HDTV ส่งผลให้เกิดความต้องการระบบ Broadband ISDN CCITT Rec. I 121 แบ่งการให้บริการระบบ B-ISDN ออกเป็น Interactive และ Distribution Services

Interactive Services หมายถึงการสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารได้ทั้งสองทาง ทั้งระหว่างผู้ใช้งานกับผู้ใช้งานและระหว่างผู้ใช้งานกับผู้ให้บริการเครือข่ายประกอบด้วย Conversational Services, Messaging Services และ Retrieval Services

Conversational Services เป็นการให้บริการพื้นฐานในการติดต่อสองทาง โดยที่ระบบ B-ISDN จะรวมการใช้งาน Video Data และ Text เข้ากับเสียง Video Telephony น่าจะเป็นอุปกรณ์ใช้งานหลักที่จะออกมาก่อน ระบบจะให้ภาพที่คมชัดเคลื่อนไหวได้เร็วเท่ากับการดู Video ทั่วไปทำให้สามารถใช้งานได้หลายรูปแบบอย่างมีประสิทธิภาพเช่นการสาธิตการขาย หรือการให้การศึกษาทางเทคนิคที่ต้องอาศัยรูปภาพและผังภาพประกอบ เมื่อระบบมีราคาถูกลงก็น่าจะได้รับความนิยมใช้งานในแต่ละบ้าน แม้ว่าจะมีปัญหาลังค่อมอยู่บ้างในด้านการรักษาสิทธิส่วนบุคคล ระบบ Video Telephony สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบ Video Conference ได้โดยง่าย การรับ - ส่งเอกสารสามารถกระทำผ่าน High Resolution FAX ด้วยความเร็วสูง

Messaging Services คือการให้การติดต่อระหว่างผู้ใช้ที่ไม่ได้เป็น Real time เช่นการใช้งาน Mailbox Message Handling คล้ายกับการให้บริการ X.400 หรือ Teletex ในระบบ N-ISDN ระบบ Video Mail เป็นตัวอย่างการให้บริการนี้ในระบบ B-ISDN นั่นคือการส่ง E-Mail ที่อยู่ในรูปของ Video ประกอบด้วยทั้งภาพ เสียงและข้อความ ซึ่งถือว่าเป็นระดับสูงสุดของระบบ Multimedia นั่นเอง

Retrieval Services คือการที่ผู้ใช้สามารถใช้งานข้อมูลที่เก็บอยู่ใน Public Data Bank คล้ายกับระบบ N-ISDN Videotex สำหรับ B-ISDN แล้วนอกจากข้อมูลในลักษณะของข้อความและรูปภาพแล้วบริการนี้จะรวมไปถึงเสียง รูปภาพที่มีความชัดเจนมาก และ Video ประกอบ ซึ่งส่งผลให้มีประโยชน์ต่อการใช้งานในการให้บริการทางการศึกษาจากระยะทางไกลได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังทำให้สามารถจัดทำห้องสมุดเก็บรวบรวม Video ได้โดยง่าย

Distribution Services หรืออาจจะเรียกว่า Broadcast Services ซึ่งสามารถให้บริการผู้ใช้ในสองรูปแบบได้แก่ผู้ใช้จะสามารถเลือกดูเฉพาะรายการที่ต้องการ และการให้บริการเหมือนกับการออกอากาศ TV ในแบบเดิม ระบบ B-ISDN จะให้บริการที่มีคุณภาพสูงกว่าระบบเดิมมาก แม้ว่าญี่ปุ่นจะเป็นประเทศแรกที่ประกาศแผนการใช้งานระบบ B-ISDN อย่างเต็มระบบทั้งประเทศภายในปี ๒๐๑๕ ต่อมาสหรัฐอเมริกาจึงประกาศแผนการวางระบบ Information Super Highway กำหนดแล้วเสร็จภายในปี ๒๐๑๐ ประเทศใดจะเป็นประเทศแรกที่นำระบบนี้มาใช้งานอย่างเต็มที่คงต้องคอยดูกันต่อไป

การติดตั้งใช้งานระบบ B-ISDN ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ B-ISDN ที่ต้องติดตั้งใช้งานเสียก่อนได้แก่ Optical Fiber-To-The-Home (FTTH), Synchronous Digital Hierarchy (SDH) และ Asynchronous Transport Mode (ATM)

Optical FTTH ปัญหาแรกที่เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการใช้งานระบบ B-ISDN ได้แก่สื่อโทรคมนาคม (Media) ที่ใช้ในการส่งสัญญาณที่มี Bandwidth กว้างมาก ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบใยแก้วนำแสงจะเป็นสื่อโทรคมนาคมที่เหมาะสม และราคาของระบบใยแก้วนำแสงจะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการติดตั้งใช้งาน ปัญหาสำคัญประการหนึ่งสำหรับการใช้งานระบบใยแก้วนำแสงต่อบ้านคือปัญหาของกระแสไฟฟ้าใช้งาน เนื่องจากระบบโทรศัพท์แบบเดิมใช้งานสายทองแดงซึ่งสามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปด้วยได้ ในขณะที่สายใยแก้วนำแสงไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ การแก้ไขอาจจะใช้สายทองแดงอีกเส้นส่งกระแสไฟฟ้าแต่ก็มีราคาสูง หรือการใช้งานไฟฟ้าจากบ้านของผู้ใช้งานซึ่งก็มีอุปสรรคจากความไม่แน่นอนของระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า การใช้งาน Solar Cell หรือการใช้งาน Laser Power เป็นวิธีการที่ต้องใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย SDH / SONET ระบบ SDH ที่ได้อธิบายไว้แล้ว เป็นกุญแจสำคัญสำหรับเครือข่าย B-ISDN เนื่องจากระบบ SDH สามารถรองรับการเชื่อมต่อทั้งระบบ Asynchronous และระบบ Synchronous ได้ ระบบเป็นแบบ Synchronous ทำให้มีความอ่อนตัว ควบคุมบริหารเครือข่ายได้ง่าย ปรับปรุงเครือข่ายได้โดยสะดวก มีระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพ ระบบแก้ไขตัวเองได้ (Self Healing) และสามารถ Upgrade ได้โดยสะดวก ในระยะแรกเครือข่าย B-ISDN คงจะใช้งานที่ระดับ STM-1 (155.52 Mb/s) ในระดับ Trunk และ STM-4 (622.08 Mb/s) ที่ระดับ Feeder และคาดว่าใน Main Loop น่าจะใช้ระดับ STM-16 (2.48832 Gb/s) และคงจะมีการขยายเพิ่ม Bandwidth ใช้งานขึ้นไปอีกจนแต่ละ Trunk น่าจะใช้งานที่ความเร็ว 10 Gb/s ขึ้นไป CCITT Rec. I.121 กำหนดไว้แล้วว่าความเร็วในการส่งข้อมูลจากผู้ใช้งานถึงเครือข่ายไม่จำเป็นต้องเท่ากับความเร็วที่เครือข่ายส่งข้อมูลถึงผู้ใช้งาน ระบบ Bandwidth on Request ซึ่งเป็น



ระบบที่ใช้งาน Bandwidth ในลักษณะที่เป็น Dynamic แปรเปลี่ยนไปตามการถูกใช้งานจริง น่าจะเป็นคำตอบที่ทำให้ราคาของระบบถูกลง คุ่มค่าต่อการใช้งาน

**Gigabit Network** แนวโน้มเครือข่ายคอมพิวเตอร์มีความต้องการการส่งผ่านข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดและจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ต่ออยู่บน เดิมที่มีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลอยู่ที่ 10 Mbps. ในอนาคตมีแนวโน้มสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ระดับความเร็ว 1 Gigabit Per Second

ในปัจจุบันโปรโตคอลเชื่อมโยงเครือข่าย (Internetworking Protocol) ได้มีการพัฒนาความสามารถของการส่งข้อมูลที่มีความเร็วระดับ Gigabit ในระดับหนึ่งเท่านั้น ได้มีการตั้งหลักและกฎต่าง ๆ มากมายที่เกี่ยวข้องกับ Data Networking การพัฒนาของ Gigabit Network จะมีการพัฒนาควบคู่ไปกับการพัฒนาของ Fiber Optic จริงๆแล้วการส่งสัญญาณของ Fiber Optic สามารถส่งสัญญาณได้ในระดับ Gigabit Per Sec ในระยะทางไกล และมี Error Rate ต่ำ ตลอดระยะเวลาการส่ง แสดงว่า Gigabit Network มีโอกาสที่จะเป็นไปได้ และประโยชน์ของมันราวกับว่าเป็นตัวกระตุ้นแก่นักวิจัยทั้งหลายในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Gigabit Network ต่อไป

เนื่องจากสาย Fiber และคุณสมบัติของสาย Fiber มีบทบาทที่สำคัญใน Gigabit Networking ทั้งสาย Fiber Optic และคุณสมบัติของสาย Fiber เป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของ Fiber Optic Communication ที่เราต้องทำความเข้าใจ และคุณสมบัติเหล่านี้มีผลกระทบต่อการทำงานของ Gigabit Network จุดเด่นของเส้นใยแก้วนำแสงมีหลายประการ ซึ่งประกอบด้วย

#### ๑. ความสามารถในการรับส่งข้อมูลข่าวสาร

เส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นแท่งแก้วขนาดเล็ก มีการโค้งงอได้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้กันมากคือ ๖๒.๕/๑๒๕ ไมโครเมตร เส้นใยแก้วนำแสงขนาดนี้เป็นสายที่นำมาใช้ภายในอาคารทั่วไป เมื่อใช้กับคลื่นแสงความยาวคลื่น ๘๕๐ นาโนเมตร จะส่งสัญญาณได้มากกว่า ๑๖๐ เมกะเฮิรตซ์ ที่ความยาว ๑ กิโลเมตร แล้วถ้าใช้ความยาวคลื่น ๑,๓๐๐ นาโนเมตร จะส่งสัญญาณได้กว่า ๕๐๐ เมกะเฮิรตซ์ ที่ความยาว ๑ กิโลเมตร และถ้าลดความยาวเหลือ ๑๐๐ เมตร จะใช้กับความถี่สัญญาณมากกว่า ๑ กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงดีกว่าสายยูทียูทีพีแบบแคต ๕ ที่ใช้กับสัญญาณได้ ๑๐๐ เมกะเฮิรตซ์

#### ๒. กำลังสูญเสียต่ำ

เส้นใยแก้วนำแสงมีคุณสมบัติในเชิงการให้แสงวิ่งผ่านได้ การบั่นทอนแสงมีค่าค่อนข้างต่ำตามมาตรฐานของเส้นใยแก้วนำแสง การใช้เส้นสัญญาณนำแสงนี้ใช้ได้ยาวถึง ๒,๐๐๐ เมตร หากระยะทางเกินกว่า ๒,๐๐๐ เมตร ต้องใช้รีพีตเตอร์ทุก ๆ ๒,๐๐๐ เมตร การสูญเสียในเรื่องสัญญาณจึงต่ำกว่าสายตัวนำทองแดงมาก ที่สายตัวนำทองแดงมีข้อกำหนดระยะทางเพียง ๑๐๐ เมตร หากพิจารณาในแง่ความถี่ที่ใช้ ผลตอบสนองทางความถี่มีผลต่อกำลังสูญเสีย โดยเฉพาะในลวดตัวนำทองแดง เมื่อใช้เป็นสายสัญญาณ คุณสมบัติของสายตัวนำทองแดงจะเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ความถี่ต่างกัน โดยเฉพาะเมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณที่ส่งในตัวนำทองแดงสูงขึ้น อัตราการสูญเสียก็จะมากตามแต่กรณีของเส้นใยแก้วนำแสงเราใช้สัญญาณความถี่มอดูเลตไปกับแสง การเปลี่ยนสัญญาณรับส่งข้อมูลจึงไม่มีผลกับกำลังสูญเสียทางแสง

### ๓. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถรบกวนได้

ปัญหาที่สำคัญของสายสัญญาณแบบทองแดงคือการเหนี่ยวนำโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ปัญหานี้มีมาก ตั้งแต่เรื่องการรบกวนระหว่างตัวนำหรือเรียกว่าครอสทอล์ค การไม่แมตช์พอดี้ทางอิมพีแดนซ์ ทำให้มีคลื่นสะท้อนกลับ การรบกวนจากปัจจัยภายนอกที่เรียกว่า EMI ปัญหาเหล่านี้สร้างให้ผู้ใช้ต้องหมั่นดูแล แต่สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงแล้วปัญหาเรื่องเหล่านี้จะไม่มี เพราะแสงเป็นพลังงานที่มีพลังงานเฉพาะและไม่ถูกรบกวนของแสงจากภายนอก

### ๔. น้ำหนักเบา

เส้นใยแก้วนำแสงมีน้ำหนักเบากว่าเส้นลวดตัวนำทองแดง น้ำหนักของเส้นใยแก้วนำแสงขนาด ๒ แกนที่ใช้ทั่วไปมีน้ำหนักเพียงประมาณ ๒๐ ถึง ๕๐ เปอร์เซ็นต์ของสายยูทีพีแบบแคต ๕

### ๕. ขนาดเล็ก

เส้นใยแก้วนำแสงมีขนาดทางภาคตัดขวางแล้วเล็กกว่าลวดทองแดงมาก ขนาดของเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อรวมวัสดุหุ้มแล้วมีขนาดเล็กกว่าสายยูทีพี โดยขนาดของสายใยแก้วนำแสงที่ใช้พื้นที่ประมาณ ๑๕ เปอร์เซ็นต์ของเส้นลวดยูทีพีแบบแคต ๕

### ๖. มีความปลอดภัยในเรื่องข้อมูลสูงกว่า

การใช้เส้นใยแก้วนำแสงมีลักษณะใช้แสงเดินทางในข่าย จึงยากที่จะทำการแตะปหรือทำการดักฟังข้อมูล

### ๗. มีความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน

การที่เส้นใยแก้วเป็นฉนวนทั้งหมด จึงไม่นำกระแสไฟฟ้า การลัดวงจร การเกิดอันตรายจากกระแส ไฟฟ้าจึงไม่เกิดขึ้น

แนวความคิดหนึ่งที่สำคัญของ Gigabit Network ที่เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความสนใจในขณะนี้ ชื่อที่เป็นที่รู้จักกัน เช่น Cell Networking, Cell Switching หรือ Cell Relay รูปแบบเฉพาะของ Cell Networking จะเป็นแบบ ATM ( Asynchronous Transfer Mode) ถูกพัฒนามาจาก CCITT หลังจากนั้นก็มี TSB มารับช่วงต่อ ซึ่ง TSB เป็นส่วนหนึ่งของ B-ISDN (Board Band Integrated Service Digital Network) เป็นเทคโนโลยี Switch ที่ใช้ผสมข้อมูลใน Network รวมไปถึงสัญญาณโทรศัพท์ อย่างไรก็ตาม Gigabit Networking ก็ยังคงสามารถขยายต่อไปได้เพื่อแก้ไขปัญหาหลายๆปัญหาที่เกิดขึ้น

ปัญหาแรกที่เกิดขึ้นคือ โพรโตคอลแบบเก่าใช้หมายเลขลำดับขนาด ๑๖ บิต หรือ ๓๒ บิต ตัวเลขขนาด ๒๓๒ นั้นถือว่าเป็นอนันต์ (Infinity) ในเทคโนโลยีเดิมแต่ไม่เป็นจริงสำหรับเทคโนโลยีใหม่ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็ว ๑ พันล้านบิตต่อวินาทีจะสามารถส่งข้อมูลขนาด ๒๓๒ ไบต์ได้ภายในเวลา ๓๒ วินาทีเท่านั้น หมายความว่าผู้ส่งเริ่มต้นส่งข้อมูลไบต์แรกออกไป ในอีก ๓๒ วินาทีต่อมาจะวนกลับมาส่งข้อมูลไบต์แรก (ของข้อมูลชุดที่สอง) ใหม่ แม้ว่าข้อมูลจะได้รับการตอบรับแล้วก็ตามแต่ผู้ส่งก็ไม่อาจแน่ใจได้ว่าข้อมูลที่ส่งออกไปชุดแรกนั้นเดินทางไปถึงผู้รับแล้วหรือยัง ดังเช่นในระบบอินเทอร์เน็ต แพ็กเก็ตข้อมูลสามารถวิ่งวนอยู่ในระบบได้นานถึง ๑๒๐ วินาทีก่อนที่จะถูกลบทิ้ง สถานการณ์นี้จะยิ่งแยกลงไปอีกถ้าหมายเลขลำดับเป็นเลขขนาดเพียง ๑๖ บิต แต่เริ่มแก้ไขปัญหานี้โดยกำหนดรูปแบบของ Internetworking Protocol มีลักษณะเป็น IP และ CLMP ซึ่งมีความสามารถโดยทั่วไปเกี่ยวกับ Gigabit Data Rate ของ IP และ CLMP ซึ่ง IP และ CLMP มี Transport Protocol เช่นเดียวกัน

กับ UDP TCP และ TP๔ ซึ่งดำเนินการบน Gigabit ต้องมี Gigabit Network Management เนื่องจาก Gigabit มี Bandwidth มีขนาดกว้าง จะมีผลกระทบต่อการจัดการ Bandwidth และ Bandwidth ที่มีจำนวนมาก สามารถทำให้ข้อมูลไปผิดทางได้ในหนึ่งหน่วยเวลา ข้อตกลงคือระบบการจัดการอาจจะต้องวางให้ฉลาดเพียงพอที่จะสามารถเข้าร่วมกับอุปกรณ์ที่ถูกจัดการได้ สามารถเปรียบเทียบการเข้าถึงได้ ตัวอย่างเช่น Simple Network Management Protocol (SNMP) ซึ่งพยายามจำกัดการจัดการ Information ที่เก็บใน Device การรับประกันการบริหารนี้อาจจะต้องการอุปกรณ์ที่ฉลาดมากขึ้นพอสมควร เพราะอุปกรณ์จำเป็นที่จะต้องเรียกข้อมูลในเส้นทางเดิม พร้อมกับพยายามรักษา Flow ที่รับรองก่อนหน้า

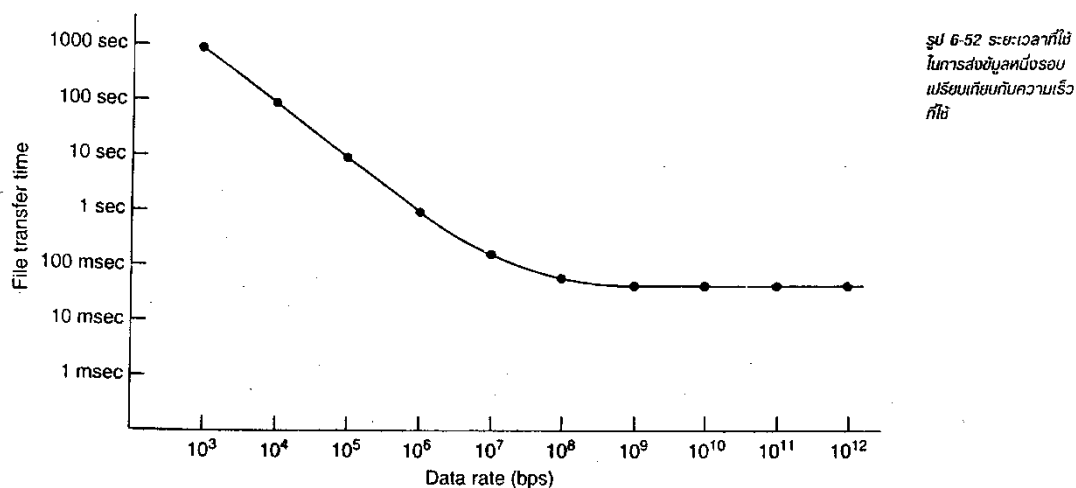
ปัญหาข้อที่สองคือ ความเร็วในการส่งข้อมูล (Communication Speed) นั้นได้รับการพัฒนาให้มีความเร็วสูงขึ้นมากกว่าความเร็วในการประมวลผล (Computing Speed) ราวทศวรรษที่ ๑๙๗๐ เครือข่าย ARPANET มีความเร็วในการส่งข้อมูล ๕๖ กิโลบิตต่อวินาที ในขณะที่เครื่องคอมพิวเตอร์มีความเร็วในการประมวลผล 1 MIPS (ล้านคำสั่งต่อวินาที) แพ็กเก็ตมีขนาด ๑,๐๐๘ บิต จึงสามารถส่งข้อมูลได้ ๕๖ แพ็กเก็ตต่อวินาทีทำให้มีระยะเวลาในการประมวลผลประมาณ ๑๘ มิลลิวินาทีต่อแพ็กเก็ต โฮสต์สามารถกำหนดให้ CPU ทำงาน ๑๘,๐๐๐ คำสั่งสำหรับการประมวลผลแต่ละแพ็กเก็ต ซึ่งอาจจะทำให้ CPU ไม่มีเวลาเหลือไปทำงานอื่นมากนัก อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการกำหนดให้ CPU ทำงานเพียง ๙,๐๐๐ คำสั่งสำหรับการประมวลผลแต่ละแพ็กเก็ตก็เป็นการเพียงพอแล้ว

ในปัจจุบัน เราทำงานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ 100 MIPS เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลขนาด ๔ กิโลไบต์บนสายสื่อสารความเร็วสูงมาก (Gigabit Line) แพ็กเก็ตสามารถวิ่งเข้ามาด้วยความเร็วกว่า ๓๐,๐๐๐ แพ็กเก็ตต่อวินาที ทำให้มีเวลาในการประมวลผลเพียง ๑๕ ไมโครวินาที (Microsecond) ต่อแพ็กเก็ตซึ่งเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลคำสั่งได้เพียง ๑,๕๐๐ คำสั่งหรือประมาณ ๑/๖ เท่าของที่เคยเกิดขึ้นในระบบ ARPANET เท่านั้นเอง สถานการณ์จะยิ่งแยกลงไปกว่านี้ถ้าเลือกใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบ RISC ซึ่งแต่ละคำสั่งสามารถทำงานได้น้อยกว่าคำสั่งในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบเดิมที่เป็น CISC ข้อสรุปในที่นี้คือเครื่องคอมพิวเตอร์มีเวลาน้อยลงสำหรับการประมวลผลจึงมีความจำเป็นจะต้องปรับปรุงโปรโตคอลให้ทำงานง่ายกว่าเดิม

ปัญหาประการที่สามเกิดขึ้นกับโปรโตคอล “Go Back N” ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำมากเมื่อนำมาใช้กับสายสื่อสารที่มีค่า Bandwidth-Delay Product สูงมาก ตัวอย่างเช่น สายความยาว ๔,๐๐๐ กิโลเมตรทำงานที่ความเร็ว ๑ ล้านบิตต่อวินาที มีระยะเวลาเดินทางข้อมูลหนึ่งรอบ ๔๐ มิลลิวินาที ซึ่งผู้ส่งจะสามารถส่งข้อมูลออกมาได้ ๕ เมกะไบต์ ถ้าผู้รับตรวจพบความผิดพลาดในการนำส่งข้อมูล ผู้ส่งจะรับทราบข่าวนั้นในอีก ๔๐ มิลลิวินาทีต่อมา ถ้านำโปรโตคอล “Go Back N” มาใช้ ผู้ส่งนอกจากจะต้องส่งแพ็กเก็ตที่เสียหายแล้ว ผู้ส่งจะต้องส่งข้อมูล ๕ เมกะไบต์ที่ได้ส่งออกไปแล้วเป็นรอบที่สอง ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองอย่างมหาศาลทีเดียว

ปัญหาข้อที่สี่ สายสื่อสารความเร็วสูงมากมีพื้นฐานแตกต่างจากสิ่งที่เกิดขึ้นกับสายสื่อสารความเร็วสูง (Megabit Line) นั่นคือมีข้อจำกัดในการส่งอยู่ที่ระยะเวลาไม่ใช่ขนาดความกว้างของช่องสื่อสารในภาพด้านล่าง แสดงตารางระยะเวลาที่ใช้ในการส่งแฟ้มข้อมูลขนาด ๑ ล้านบิตเป็นระยะทาง ๔,๐๐๐ กิโลเมตรโดยใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลต่างๆ กัน ที่ความเร็วขึ้นไปถึง ๑ ล้านบิตต่อวินาที ระยะเวลาในการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับความเร็วในการส่งข้อมูลเป็นหลัก คือยิ่งส่งข้อมูลได้เร็วก็จะใช้

ระยะเวลาสั้นลง แต่ที่ความเร็วการส่งข้อมูลสูงกว่า ๑ ล้านบิตต่อวินาทีจะถูกบังคับโดยระยะเวลาเดินทางของข้อมูลหนึ่งรอบคือ ๔๐ มิลลิวินาที ทำให้ไม่สามารถลดระยะเวลาที่ใช้แม้ว่าจะส่งข้อมูลเร็วขึ้นกว่าเดิมก็ตาม ภาพด้านล่างไม่ได้แสดงโปรโตคอลที่นำมาใช้ซึ่งเป็นแบบ “Stop-And-Wait” เช่น RPC มีขีดจำกัดสูงสุดอยู่ที่ความเร็วของแสง



รูป 6-52 ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลหนึ่งรอบเปรียบเทียบกับความเร็วก็ได้

ปัญหาข้อที่ห้า เป็นผลพวงที่เกิดขึ้นจากโปรแกรมประยุกต์ที่นำมาใช้ซึ่งมีปริมาณข้อมูลขนาดมหึมา เช่น โปรแกรม Multimedia ทั้งหลาย โปรแกรมประเภทนี้ทำให้เกิดข้อจำกัดใหม่ขึ้นมา นอกเหนือจากระยะเวลาเดินทางของข้อมูลหนึ่งรอบ คือ ระยะเวลาการตอบสนองต่อผู้ใช้ซึ่งเน้นการทำงานในลักษณะความเร็วคงที่ (Uniform Arrival Rate) มากกว่าความเร็วสูงแต่ไม่แน่นอน

ข้อสมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการส่งข้อมูลความเร็วสูงมากคือ ออกแบบมาเพื่อความเร็วโดยไม่ได้เน้นว่าจะต้องให้ผลดีที่สุด โปรโตคอลแบบเดิมได้รับการออกแบบมาโดยกำหนดจำนวนบิตข้อมูลไว้อย่างจำกัดมาก เขตข้อมูลสำหรับการควบคุมต่าง ๆ จึงมักจะมีขนาดเล็กมากเท่าที่จะสามารถใช้งานได้ในปัจจุบันสายสื่อสารมีช่องสัญญาณความกว้างสูงมากแต่กลับมีปัญหาที่จะต้องลดการทำงานของโปรโตคอลให้น้อยที่สุด (เพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุด)

หนทางที่เป็นไปได้ทางหนึ่งในการส่งข้อมูลความเร็วสูงมากคือ การออกแบบส่วนติดต่อเครือข่ายความเร็วสูงไว้ในอุปกรณ์สื่อสารโดยตรง ซึ่งก็มีข้อแม้ว่าโปรโตคอลสื่อสารที่ใส่เข้าไปนั้นจะต้องเป็นแบบที่ง่ายไม่มีความซับซ้อน มิฉะนั้นแล้วจะกลายเป็นว่าจะต้องสร้างอุปกรณ์สื่อสารที่มี CPU และโปรแกรมควบคุมการทำงานเป็นของตนเอง และเพื่อไม่ให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาแพงเกินไป จึงหันมาใช้ CPU ประสิทธิภาพต่ำที่มีราคาถูกกว่ามาก ผลกระทบที่เกิดขึ้นตามมาก็คือตัว CPU หลักที่มีประสิทธิภาพสูงจะไม่มีการทำงานเพราะต้องรอคอยข้อมูลสู่วิกฤตที่ CPU ตัวที่สองกำลังประมวลผลอยู่ (อย่างช้า ๆ) แม้ว่าในระหว่างการรอคอยนั้น CPU หลักอาจมีงานส่วนอื่นที่สามารถทำไปพร้อม ๆ กัน แต่ในความเป็นจริงก็ไม่เป็นเช่นนั้นบ่อยนัก นอกจากนี้ เมื่อใดก็ตามที่ CPU สองตัวมีการสื่อสารถึงกันก็

จะต้องคำนึงถึงกฎกติกาที่จะนำมาใช้เพื่อให้ CPU ทั้งสองทำงานประสานกันได้ดี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาพัฒนาโปรโตคอลใหม่เพื่อควบคุมให้ CPU ทั้งสองตัวสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนทางปฏิบัติที่ดีที่สุดที่ใช้กันโดยทั่วไปจึงลงเอยด้วยการใช้ CPU หลักเพียงตัวเดียวแต่ออกแบบโปรโตคอลให้ลดความซับซ้อนลงให้มากกว่าเดิม

ต่อไปหันกลับมาพิจารณาเรื่องการส่งข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ที่ผู้รับจะต้องส่งกลับมาให้ผู้ส่งข้อมูล เนื่องจากระยะเวลาการรอคอยที่ยาวนานเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วในการส่งข้อมูล การส่งข้อมูลย้อนกลับจึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง เพราะผู้ส่งจะมีความรู้สึกรู้ว่าการตอบรับจากผู้รับนั้นใช้เวลานานเกินไป ตัวอย่างหนึ่งของการแก้ไขวิธีการตอบรับโดยใช้โปรโตคอล “Rate-Based” ซึ่งอนุญาตให้ผู้ส่งทำการส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาโดยมีข้อแม้ว่าผู้ส่งจะต้องส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วไม่มากเกินไปกว่าอัตราความเร็วที่ไต่ตกลงกับผู้รับข้อมูลไว้เป็นการล่วงหน้าเท่านั้น

ตัวอย่างที่สองนำมาใช้กับอัลกอริทึม “Slow Start” ของ Jacobson ซึ่งจะทำให้การทดสอบค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้อยู่เสมอ การกระทำดังกล่าวในระบบเครือข่ายความเร็วสูงมากอาจทำให้เกิดปัญหาการสูญเสียของสื่อสารไปโดยเปล่าประโยชน์สูงมาก หนทางปฏิบัติที่ดีกว่าคือการให้ผู้ส่ง, ผู้รับ, และระบบเครือข่ายจัดการสำรองทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้ไว้ตั้งแต่ในขั้นตอนการจัดตั้งช่องสื่อสาร ซึ่งยังเกิดประโยชน์ในการลดความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาข้อมูลสะดุด (Jitter) ในระหว่างการทำงานด้วย กล่าวโดยรวมแล้ว วิธีการจัดการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงมากวิธีการใด ๆ ก็ตาม จะหันเหเข้าสู่รูปแบบการเชื่อมต่อแบบต่อเนื่อง (Connection-Oriented) ในที่สุด

โครงสร้างของแพ็กเก็ตก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในระบบเครือข่ายความเร็วสูง ข้อมูลส่วนหัวควรจะมีขนาดเล็กที่สุด เพื่อลดเวลาในการประมวลผล แต่ก็ต้องมีมากพอสำหรับควบคุมการสื่อสารได้อย่างดี และจะต้องมีขนาดเป็นสัดส่วนพอดีกับขนาดของคำ (Word) เพื่อความง่ายในการประมวล ขนาดที่พอดีนั้นจะต้องแน่ใจได้ว่าปัญหาเช่นจำนวนหมายเลขลำดับไม่เพียงพอ หรือผู้รับไม่สามารถกำหนดขนาดหน้าต่างสื่อสารให้ใหญ่พอ เนื่องจากขนาดหมายเลขนั้นเล็กเกินไป จะต้องไม่เกิดขึ้นอย่างเด็ดขาด

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลส่วนหัวจะต้องแยกออกจากกันเพื่อเหตุผล ๒ ประการ ประการแรกเพื่อให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องเฉพาะข้อมูลส่วนหัว (ซึ่งจำเป็นจะต้องกระทำในระหว่างการรับ-ส่ง ข้อมูล) โดยไม่ต้องตรวจข้อมูลจริง ประการที่สอง เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องก่อนที่จะเริ่มทำการคัดลอกข้อมูลจริง ไปยังโปรเซสของผู้ใช้ โดยปกติแล้วการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจริง จะเกิดขึ้นในระหว่างการส่งมอบข้อมูลให้แก่โปรเซสผู้ใช้ ซึ่งถ้าข้อมูลส่วนหัวมีข้อผิดพลาดก็อาจจัดส่งข้อมูลไปยังโปรเซสที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นการแยกการตรวจสอบออกจากกัน จึงเป็นสิ่งที่จะต้องทำ

ข้อมูลที่จะส่งนั้นควรมีขนาดใหญ่พอสมควร เพื่อเป็นการรับประกันว่าการสื่อสารจะยังคงมีประสิทธิภาพสูงแม้ว่าจะมีระยะเวลารอคอยที่ยาวนาน นอกจากนี้การส่งข้อมูลขนาดใหญ่ยังเป็นการลดจำนวนกลุ่มข้อมูลให้มัน้อยลง และยังสามารถส่งข้อมูลมาพร้อมกับการร้องขอการเชื่อมต่อช่องสื่อสาร ซึ่ง จะเป็นการลดระยะเวลาในการทำงานลงได้อย่างน้อย ๑ วงรอบของการส่งข้อมูลท้ายที่สุด การออกแบบโปรโตคอล จะมุ่งไปที่ความสำเร็จของการส่งข้อมูลในขณะที่โปรโตคอลแบบเดิมนั้นจะเน้นไปที่การแก้ไขปัญหาเมื่อมีความผิดพลาดอย่างใดอย่างหนึ่งเกิดขึ้น การส่งข้อมูลความเร็วสูงมากจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงการประมวลผลโดยใช้ระยะเวลาสั้นที่สุด ในขณะที่องค์ประกอบทุกอย่างทำงานอย่างถูกต้อง การลดเวลาสำหรับการแก้ปัญหา เมื่อเกิดข้อผิดพลาดเป็นเพียงข้อพิจารณาที่มีความสำคัญรองลงมา

การลดเวลาสำหรับการคัดลอกข้อมูลก็เป็นเรื่องสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องจัดการแก้ไขให้สำเร็จเนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการคัดลอกข้อมูลนั้น มักจะกินเวลานาน และเป็นตัวประกอบหลักของค่าเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการสื่อสาร ถ้าเป็นไปได้โปรแกรมควรที่จะคัดลอกข้อมูลเข้าไปไว้ในหน่วยความจำ ในพื้นที่ติดกันเป็นกลุ่มก้อนเดียว (Contiguous Block) ซึ่งจะสามารถส่งข้อมูลนี้ไปให้กับโปรเซสของผู้ใช้ได้ในการคัดลอกเพียงครั้งเดียว ยิ่งไปกว่านี้กระบวนการคัดลอกข้อมูลควรที่จะได้รับการออกแบบอย่างละเอียดถี่ถ้วนลงไปถึงการทำงานระดับเครื่อง (Machine Level) เช่น การคัดลอกข้อมูล ๑,๐๒๔ คำ ควรที่จะใช้คำสั่งการเคลื่อนย้ายข้อมูลแบบโดยตรงเพียง ๑,๐๒๔ ครั้ง หรือใช้คำสั่งอ่านและบันทึกข้อมูล ๒,๐๔๘ ครั้ง

โครงสร้างหลักของอินเทอร์เน็ตส่งข้อมูลที่ความเร็วในหลัก “เมกะ” (ล้าน) บิตต่อวินาที นักวิจัยค้นคว้าทั้งหลายกำลังพยายามสร้างระบบที่สามารถส่งข้อมูลที่ความเร็วในหลัก “กิกะ” (พันล้าน) บิตต่อวินาที (Gigabit Per Second ) ซึ่งจะช่วยในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์รุ่นใหม่ที่ต้องการความสามารถในการถ่ายเทข้อมูลสูงมาก ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างของระบบดังกล่าวที่ได้รับการสร้างขึ้นมาเพื่อทำการทดลองระบบเครือข่ายที่มีความเร็วในหลัก กิกะบิตต่อวินาที แต่ทั้งนี้ระบบที่มีความเร็วสูงขึ้นไม่มีส่วนช่วยในการลดเวลารอคอย (Delay) ในระบบฯเลย ตัวอย่างเช่น ต้องการส่งข้อมูลขนาด ๑ กิโลบิต จากสถานที่แห่งหนึ่งไปยังสถานี ปลายทางที่อยู่ไกลออกไป ถ้าระบบฯสามารถส่งข้อมูลที่ความเร็ว ๑ เมกะบิตต่อวินาที จะใช้เวลา ๑ มิลลิวินาที ในการส่งข้อมูล และใช้เวลาอีก ๒๐ มิลลิวินาทีสำหรับการรอคอยที่เกิดขึ้นในระบบฯ รวมเวลาทั้งหมด ๒๑ มิลลิวินาทีในการส่งข้อมูล จากผู้ส่งไปยังผู้รับ ถ้าสามารถส่งข้อมูลที่ความเร็ว ๑ กิกะบิตต่อวินาทีจะใช้เวลา ๐.๐๐๑ มิลลิวินาทีในการส่งข้อมูล แต่ยังคงใช้เวลาอีก ๒๐ มิลลิวินาที สำหรับการรอคอยฯ รวมเวลาทั้งหมด ๒๐.๐๐๑ มิลลิวินาที จึงเห็นได้ว่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นถึงหนึ่งพันเท่า นั้นอาจจะกล่าวได้ว่าไม่ได้ช่วยให้เกิดประโยชน์อันใด สำหรับงานทั่วไป การลดเวลาในการรอคอยจะเกิดผลดีที่สุดเห็นรูปธรรมมากกว่าการเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการส่งข้อมูลที่ระดับสูงมากนั้นจะก่อให้เกิดประโยชน์มหาศาลแก่งานประยุกต์บางประเภทซึ่งเป็นหัวข้อที่จะนำมาพิจารณาต่อไป

### ตัวอย่างงานประยุกต์ที่ต้องการระบบส่งข้อมูลความเร็วสูงมาก

๑. การตรวจรักษาคนไข้จากระยะไกล (Telemedicine) โดยทั่วไปคนไข้จะตรวจรักษาด้วย นายแพทย์ส่วนตัวซึ่งมักจะเป็นรักษาโรคทั่วไปที่ความคุ้นเคยกันและอยู่ในบริเวณที่เดียวกับคนไข้ ในกรณีที่คนไข้ต้องการปรึกษากับแพทย์ที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน เช่นแพทย์ผู้เชี่ยวชาญทางสมอง แพทย์ประจำตัวๆ ก็จะต้องส่งตัวคนไข้นั้นไปพบผู้เชี่ยวชาญซึ่งอาจจะอยู่ไกลออกไปตั้งแต่หลาย กิโลเมตรไปจนถึงอยู่ห่างกันคนละซีกโลกก็ได้ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายมากมาย แทนที่จะให้คนไข้ เดินทางไปหาผู้เชี่ยวชาญฯ (หรือในทางกลับกันก็ได้) ระบบการตรวจรักษาคนไข้จากระยะไกลจะช่วย ให้นายแพทย์ส่วนตัวของคนไข้สามารถตรวจได้ในทันทีโดยไม่ต้องให้ผู้เกี่ยวข้องเดินทางไปไหนเลย อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ต้องการนี้มักจะเป็นข้อมูลประเภทรูปภาพ เช่น รูปเอกซเรย์ภาพตรวจสมอง ประเภท CAT หรือ MRI ภาพประเภทนี้จะต้องถ่ายเป็นชุด ชุดหนึ่งอาจมีมากถึง ๑๐๐ รูป ซึ่งเมื่อ แปลงเป็นข้อมูลคอมพิวเตอร์และอาจมีขนาดมากกว่า ๔ หมื่นล้านบิต ถ้าส่งข้อมูลชุดนี้ที่ความเร็ว ๑ เมกะบิตต่อวินาที จะต้องใช้เวลานานถึง ๔ หมื่นวินาทีหรือมากกว่า ๑๑ ชั่วโมง แต่ถ้าส่งข้อมูลที่ ความเร็ว ๑ กิกะบิตต่อวินาทีจะใช้เวลาเพียง ๔๐ วินาทีเท่านั้น

๒. การประชุมผ่านระบบเครือข่าย (Videoconferencing Or Virtual Meeting) ผู้ร่วม ประชุมแต่ละท่านจะเข้ามาอยู่ในห้องที่จัดขึ้นเป็นพิเศษโดยมีกล้องที่สามารถจับภาพ และเสียงของคน ที่อยู่ในห้องนั้นได้ทุกคน ตัวระบบจะจัดการผสมผสานรูปและเสียงของผู้เข้าประชุมทุกคน ซึ่งบางส่วน อาจนั่งอยู่ในห้องเดียวกัน อีกหลายส่วนอาจอยู่ห่างกันหลายร้อยหลายพันกิโลเมตรเข้าด้วยกันและส่ง ข้อมูลนั้นไปยังแวนสามมิติที่ทุกคนจะต้องสวมไว้ ภาพที่เกิดขึ้น (ในแวน ๓) จะทำให้ผู้สวมแวนมองเห็น ส่วนต่างๆรวมทั้งผู้เข้าร่วมประชุมเสมือนหนึ่งว่าทุกคนกำลังนั่งอยู่ในห้องประชุมเดียวกัน สรุปได้ คือ

- ข้อมูลบางประเภทนี้แม้ว่าจำนวนบิตต่อหน่วยเวลาอาจจะไม่มากนักเมื่อเทียบกับข้อมูล ในตัวอย่างแรก แต่ก็จัดว่ามีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับข้อมูลทั่วไป
- เป็นข้อมูลที่จะต้องมีการถ่ายทอดอยู่ตลอดเวลาทำให้จำนวนบิตทั้งหมด (ตลอดการประชุม) อาจมีปริมาณมากกว่าข้อมูลในตัวอย่างแรกหลายเท่าตัวก็ได้
- ในแต่ละวินาทีข้อมูลชุดเดียวกันอาจจะต้องถ่ายทอดไปยังผู้ใช้หลายแห่งทำให้มีปริมาณ ข้อมูลหมุนเวียนในระบบเครือข่าย

### ประเภทเครือข่ายในองค์กร

๑. ระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) เป็นระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์หลายๆ เครือข่าย ที่มีการ เชื่อมโยงเข้าด้วยกัน โดยที่คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้ทั่วโลก

๒. ระบบอินทราเน็ต (Intranet) เป็นระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สื่อสารภายในกลุ่มของ องค์กรนั้น ๆ โดยอาศัยเทคโนโลยีของอินเทอร์เน็ต (Internet) เป็นพื้นฐาน

๓. ระบบเอ็กซ์ทราเน็ต (Extranet) เป็นการเชื่อมโยงระหว่างองค์กรต่าง ๆ ที่มีอินทราเน็ต เข้าด้วยกัน การใช้เอ็กซ์ทราเน็ตนั้น องค์กรที่เชื่อมกันอยู่จะสามารถแบ่งข้อมูลภายในได้ตลอดเวลา ระหว่างเครือข่ายอินทราเน็ตของตนกับองค์กรอื่น ๆ หรือผู้ใช้บริการได้อย่างปลอดภัย

สรุป การสื่อสารข้อมูลในยุคต้นเน้นเรื่องการสื่อสารด้วยเสียงเป็นหลัก แล้วได้เกิดแนวคิดที่จะสร้างกลไกที่เพิ่มประสิทธิภาพในระหว่างสื่อสาร การสื่อสารแบบแพ็กเก็ตได้รับการพัฒนา โดยทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัล แล้วส่งรวมเป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่าแพ็กเก็ต แนวคิดการสลับสายที่ใช้ในชุมสายโทรศัพท์ จึงเปลี่ยนมาเป็นการสลับแพ็กเก็ต หรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตสวิตชิง

เครือข่ายสื่อสารทั้งแลน (LAN) และแวน (WAN) ใช้หลักการของแพ็กเก็ตทั้งหมด แต่บางครั้งมีการกำหนดขนาดของแพ็กเก็ตคงที่และเรียกเซล (Cell) หรือบางระบบมีวิธีการเฉพาะของตัวเองและเรียกกลุ่มข้อมูลเล็ก ๆ นี้ว่า เฟรม (Frame) แพ็กเก็ต เซล หรือเฟรม ก็หมายถึงกลุ่มข้อมูลกลุ่มหนึ่งที่มีการกำหนดตำแหน่งแอดเดรสต้นทางและปลายทาง เพื่อให้อุปกรณ์สวิตชิง ดำเนินการแยกแยะและจัดส่งไปยังเส้นทางที่ถูกต้อง เครือข่ายแลนจึงมีหลายมาตรฐานแต่ละมาตรฐานมีข้อกำหนดเฉพาะที่จะบ่งบอกลักษณะของรูปแบบของข้อมูล บอกคุณสมบัติทางการเชื่อมโยงต่าง ๆ ข้อกำหนดเหล่านี้ผู้ผลิตและผู้พัฒนาจะต้องสร้างให้ใช้งานร่วมกันได้ เพื่อว่าการสื่อสารระหว่างกันจะได้ไม่มีปัญหา เครือข่ายแลนจึงมีเส้นทางพัฒนามากมายหลากหลายรูปแบบ เช่น อีเทอร์เน็ต เป็นเครือข่ายแลนที่รู้จักกันดี แพ็กเก็ตข้อมูลที่รับส่งผ่านไปยังตัวนำร่วมกัน ทุกแพ็กเก็ตมีแอดเดรส อุปกรณ์รับจึงเลือกรับได้ถูกต้อง

โทเคนริง เป็นการเชื่อมโยงอุปกรณ์รับส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเข้าด้วยกันเป็นรูปวงแหวน ข้อมูลแพ็กเก็ตจะส่งจากตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง วนกันไปโดยมีแอดเดรสกำหนดทุกตัวจะตรวจสอบ ถ้าเป็นแอดเดรสของตนจะรับข้อมูลไป

FDDI ก็เป็นแลนอีกประเภทหนึ่งที่มีการรับส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นรูปวงแหวน แต่ส่งผ่านตัวกลางเส้นใยแก้วนำแสง

เอทีเอ็ม เป็นระบบที่ใช้แพ็กเก็ตข้อมูลขนาดคงที่และเรียกว่า เซล ทุกเซลจะมีแอดเดรส เอทีเอ็มจึงเป็นสวิตช์ความเร็วสูงที่เลือกกำหนดเส้นทางให้ข้อมูลแต่ละเซล สำหรับเครือข่ายแวน ก็คือการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ระยะไกล หรืออาจจะเชื่อมเครือข่ายแลนหลาย ๆ เครือข่ายเข้าด้วยกัน และเป็นเครือข่ายในรูปแบบที่ต้องส่งข้อมูลเป็นแพ็กเก็ต มาตรฐานบนเครือข่ายแวนมีหลายรูปแบบขึ้นกับลักษณะการเชื่อมต่อ เช่น การเชื่อมแบบจุดต่อจุด (Point To Point) เป็นการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์สองตัวหรืออุปกรณ์กับเครือข่าย หรือระหว่างเครือข่ายกับเครือข่ายที่ใช้ระยะทางไกล

X.25 เป็นเครือข่ายแบบแพ็กเก็ตที่ทำให้ข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตสามารถเดินทางจากต้นทางไปยังปลายทางได้ มีข้อกำหนดในการตรวจสอบข้อมูลเฉพาะเพื่อความมั่นใจในการรับส่ง

เฟรมรีเลย์ เป็นการรับส่งข้อมูลเป็นเฟรม เพื่อรองรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการลดการหน่วงเวลาในอุปกรณ์สวิตชิงลง เฟรมรีเลย์จึงเป็นฐานให้เกิดการเชื่อมโยงอุปกรณ์และเครือข่ายแลนในระยะไกลได้ การที่เครือข่ายคอมพิวเตอร์ได้รับการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง และมีมากมายหลายมาตรฐานก็เพราะทุกมาตรฐานสามารถเชื่อมโยงเข้าหากันและใช้งานร่วมกันได้ การเชื่อมโยงระหว่างเครือข่ายจึงกระทำได้ทั้งระหว่างแลนกับแลนด้วยกัน หรือแลนกับแวน หรือแม้แต่แวนกับแลน

มาตรฐานที่กำหนดสำหรับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ จึงครอบคลุมตั้งแต่เรื่องราวทางด้านฟิสิกัลรูปแบบของแพ็กเก็ตลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า วิธีการรับส่งหรือที่เรียกว่าโปรโตคอล ตลอดจนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมและตรวจสอบการทำงาน โดยแบ่งชั้นของมาตรฐานออกเป็นหลายระดับ ดังที่เราได้เคยได้ยินได้ฟังว่า ระดับชั้นทาง การสื่อสารแบบมาตรฐาน ISO มีถึง ๗ ระดับ ข้อกำหนดแต่ละระดับเป็นแนวคิดที่แบ่งแยกการทำงานออกจากกันอย่างชัดเจน เช่นระดับล่างสุดคือ ระดับการเชื่อมโยงทางฟิสิกัล คือรูปร่าง หัวต่อ สายสัญญาณ และลักษณะสัญญาณ ระดับต่อ ๆ มาเป็นนิยามการกำหนด



รูปแบบข้อมูล การตรวจสอบ การเชื่อมโยง และการประยุกต์ใช้งาน การเชื่อมต่อเครือข่ายเข้าด้วยกัน จึงต้องเกี่ยวข้องกับมาตรฐาน เพราะเราจะ ต้อง เริ่มจากรูปลักษณะทางฟิสิกส์ หรือหัวต่อ แจ็ก ปลั๊ก สายสัญญาณ การ์ดเชื่อมโยง ตลอดจนถึงรูปแบบของสัญญาณและโปรโตคอลในการรับส่ง หากเชื่อมโยงเครือข่ายมาตรฐานเดียวกันเข้าด้วยกันภายในเครือข่ายเดียวกัน ก็ไม่มีปัญหาใด เช่น ในเครือข่ายอีเทอร์เน็ต ถ้าเราต้องการเพิ่มสถานีงาน ก็เพียงแต่หากการ์ดเชื่อมโยงแบบอีเทอร์เน็ต หาสายสัญญาณ และเชื่อมต่อเข้าไปยังเครือข่ายที่มีจุดให้เชื่อมต่อได้ แต่หากเชื่อมต่อเครือข่ายกับเครือข่ายเข้าด้วยกัน เช่น แลนกับแลน แม้จะเป็นเครือข่ายมาตรฐานเดียวกันก็ต้องมีอุปกรณ์และวิธีการ เช่น มีเครือข่ายอีเทอร์เน็ตสองเครือข่าย และต้องการเชื่อมเข้าหากัน ก็ต้องมีอุปกรณ์เชื่อมต่อที่เรียกว่าบริดจ์ (Bridge) หรือเราเตอร์ (Router) เป็นตัวเชื่อม หากไม่มีอุปกรณ์ดังกล่าว การเชื่อมต่อจะเสมือนเป็นการสร้างเครือข่ายเดี่ยว ไม่ใช่สองเครือข่ายเชื่อมเข้าหากัน ถ้านำเครือข่าย เช่น อีเทอร์เน็ต เชื่อมกับเครือข่ายที่มีมาตรฐานอื่น เช่น เอทีเอ็ม FDDI โทเคนริง ในกรณีนี้จะไม่สามารรถเชื่อมต่อโดยตรง เพื่อรวมเป็นเครือข่ายเดี่ยวแบบอีเทอร์เน็ต แต่จะเชื่อมต่อได้โดยมีอุปกรณ์จำพวก บริดจ์ เราเตอร์ หรือสวิตช์ ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานด้านหนึ่งให้เป็นมาตรฐาน อีกข้างหนึ่งกลับไปมาได้

หากพิจารณาตั้งแต่รูปร่างทางฟิสิกส์เช่น หัวต่อ แจ็ก ปลั๊ก แล้วก็จะมึลักษณะต่างกัน รูปแบบของแพ็กเก็ตก็ต่างกัน หรือแม้แต่วิธีการในการรับส่งสัญญาณ การตรวจสอบสัญญาณก็ต่างกัน อุปกรณ์เชื่อมโยงเหล่านี้จึงมีความจำเป็นเมื่อนำเครือข่ายมาเชื่อมต่อกันด้วยระยะทางไกล จำเป็นต้องนำเอาหลักการทางแวนมาใช้ เช่น เชื่อมเครือข่ายย่อยสองเครือข่ายเข้าด้วยกัน โดยมีลักษณะเป็นแบบจุดต่อจุด (Point To Point) หรือเชื่อมผ่านเครือข่ายแวนในลักษณะมีเครือข่ายย่อยหลาย ๆ เครือข่ายเชื่อมเข้าหากัน การเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายแลนผ่านเครือข่ายแวน ก็จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เชื่อมต่อเช่นกัน นี้ เพราะเครือข่ายแลนใช้มาตรฐานหนึ่ง เมื่อเชื่อมต่อกับเครือข่ายแวนก็ใช้อีกมาตรฐานหนึ่ง อุปกรณ์เชื่อมต่อในลักษณะนี้ต้องแปลงมาตรฐานระหว่างกัน ต้องใช้ เราเตอร์ สวิตช์ หรือ อุปกรณ์จำพวกเกตเวย์สำหรับการเชื่อมโยง บริดจ์ เราเตอร์ สวิตช์ หรืออุปกรณ์เกตเวย์ เป็นอุปกรณ์ที่มีประตูทางเข้าออกของสัญญาณหลาย ๆ ทาง หน้าที่ของอุปกรณ์นี้จึงเป็นตัวเลือกเส้นทางตามแอตเดรส ที่ปรากฏในแพ็กเก็ตและยังแปลงมาตรฐานเพื่อส่งต่อตามเส้นทางที่จะต้องส่งไป การรับส่งสัญญาณระหว่างมาตรฐานหนึ่งไปยังอีกมาตรฐานหนึ่ง จึงต้องมีซอฟต์แวร์ควบคุมอุปกรณ์เชื่อมโยงเครือข่ายเหล่านี้ จึงได้รับการพัฒนามาก และมีแนวโน้มที่พัฒนาให้ก้าวหน้ายิ่ง ๆ ขึ้นไป โดยเฉพาะการประยุกต์เพื่อให้ทุกเครือข่ายเชื่อมโยงถึงกันได้ การใช้งานผ่านเครือข่ายที่เชื่อมโยงกันหลากหลายมาตรฐาน ต้องกระทำเพื่อให้ผู้ใช้มีความรู้สึกเสมือนเป็นเครือข่ายเดี่ยว เช่น ขณะใช้อินเทอร์เน็ต เครือข่ายที่เชื่อมโยงกันทั่วโลกใช้ทุกมาตรฐานที่พัฒนาขึ้น แต่ผู้ใช้จะไม่ทราบว่า ขณะเรียกข้อมูลนั้น ข้อมูลที่วิ่งมาผ่านอุปกรณ์แปลงมาตรฐานใดบ้าง และผ่านมาในเส้นทางใด การเชื่อมโยงระหว่างเครือข่ายจึงทำให้ขนาดของเครือข่ายใหญ่โตขึ้น จนครอบคลุมการใช้งานของคนทั้งโลกได้ ดังเช่น อินเทอร์เน็ต

## IP Address หรือ Internet Protocol Address มีความสำคัญอย่างไร

IP Address เป็นหมายเลขที่ใช้กำหนดให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือ อุปกรณ์ Network ต่างๆ เช่น Router, Switch, Firewall, IP Camera, IP Phone, Accesspoint เป็นต้น ปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์สื่อสารทุกประเภทที่ออกวางจำหน่ายจะมี IP Address ติดพร้อมมาด้วยจากโรงงาน IP Address ที่ใช้ในปัจจุบันนั้นจะเป็นชนิดที่เรียกว่า IPv4 (IP version 4) ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งาน จึงมีการพัฒนาเป็น IPv6 (IP version 6) เพื่อรองรับอุปกรณ์และเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ต้องใช้ IP Address ในการติดต่อสื่อสาร และในเมืองไทยเองก็มีการใช้ IPv6 ในหลายหน่วยงานแล้ว หน่วยงานที่จัดสรร IP Address ให้ในแถบ Asia Pacific คือ APNIC ผู้ให้บริการ Internet หรือ ISP จะขอ IP จาก APNIC แล้วนำมาแจกจ่ายให้แก่ลูกค้าของ ISP นั้นๆ อีกต่อไป

สำหรับผู้ที่จะสอบใบ Certificate ค่าต่างๆ เช่น CCNA, CCNP, LPI, Security +, CWNA เป็นต้น จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับ IP Address โดยเฉพาะ IPv4 ซึ่งจะต้องคำนวณได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว

### IPv4

IPv4 ประกอบด้วยเลขฐานสอง 32 bits (4 bytes ,( 8 bits=1 byte)) แบ่งเป็น ๔ กลุ่ม กลุ่มละ 8 bits แต่ละกลุ่มนั้นจะคั่นด้วย (Dot) กรณีตัวเลขน้อยสุดหรือเป็นเลข 0 ทั้งหมด

00000000 . 00000000 . 00000000 . 00000000

กรณีตัวเลขมากที่สุดหรือเป็น เลข 1 ทั้งหมด

11111111 . 11111111 . 11111111 . 11111111

เมื่อแปลงเป็นเลขฐาน ๑๐ จะได้

กรณีตัวเลขน้อยสุดหรือเป็น เลข 0 ทั้งหมด 0.0.0.0

กรณีตัวเลขมากที่สุดหรือเป็น เลข 1 ทั้งหมด 255.255.255.255

ดังนั้น IPv4 จะมีตัวเลขที่เป็นไปได้ ตั้งแต่ 0.0.0.0 – 255.255.255.255

ก่อนการคำนวณเรื่อง IP เพื่อความรวดเร็ว ให้เขียนตามด้านล่างนี้

IPv4 จะมีตัวเลขที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือตั้งแต่ 0.0.0.0 – 255.255.255.255

สามารถแบ่ง IPv4 ได้เป็น ๕ แบบ หรือ 5 Class ตามด้านล่าง โดยวิธีการแบ่งจะอ้างอิงจาก byte ที่ ๑ ดังนี้

class A byte ที่ ๑ ตัวเลขบิตแรก จะเป็น 0

class B byte ที่ ๑ ตัวเลขบิตแรกจะเป็น 1 บิตที่ ๒ จะเป็น 0

class C byte ที่ ๑ ตัวเลข ๒ บิตแรก จะเป็น 1 บิตที่ ๓ จะเป็น 0

class D byte ที่ ๑ ตัวเลข ๓ บิตแรก จะเป็น 1 บิตที่ ๔ จะเป็น 0

class E byte ที่ ๑ ตัวเลข ๔ บิตแรกจะเป็น 1

จะได้ IP ในแต่ละ Class ดังนี้

Class A จะเริ่มต้นตั้งแต่ 0.0.0.0 ถึง 127.255.255.255

Class B จะเริ่มต้นตั้งแต่ 128.0.0.0 ถึง 191.255.255.255

Class C จะเริ่มต้นตั้งแต่ 192.0.0.0 ถึง 223.255.255.255

Class D จะเริ่มต้นตั้งแต่ 225.0.0.0 ถึง 239.255.255.255

Class E จะเริ่มต้นตั้งแต่ 240.0.0.0 ถึง 255.255.255.255

IP ที่สามารถนำไป Set ให้อุปกรณ์หรือ Host ได้จะมีอยู่ 3 Class คือ Class A, B และ C ส่วน IP Class D จะสงวนไว้ใช้สำหรับงาน Multicast Applications และ IP Class E จะสงวนไว้สำหรับงานวิจัย หรือไว้ใช้ในอนาคต

IPv4 ยังแบ่งเป็น ๒ ประเภท คือ Public IP (IP จริง) และ Private IP (IP ปลอม)

Public IP (IP จริง) คือ IP ที่สามารถ Set ให้อุปกรณ์ Network เช่น Server หรือ Router แล้วสามารถติดต่อสื่อสารกับ Public IP (IP จริง) ด้วยกัน หรือออกสู่ Network Internet ได้ทันที

Private IP (IP ปลอม) สามารถนำมาใช้ Set ให้กับ PC หรืออุปกรณ์ในออฟฟิตได้แต่ไม่สามารถออกสู่ Public IP หรือออก Internet ได้ ต้องมีอุปกรณ์ Gateway เช่น Router, Server หรือ Modem DSL เปิด Service NAT (Network Address Translation) ไว้ จึงจะสามารถออกสู่ Internet ได้ Private IP จะมีเฉพาะ Class A, B และ C ดังนี้

Class A : 10.x.x.x (10.0.0.0 - 10.255.255.255)

Class B : 172.16.x.x - 172.31.x.x (172.16.0.0 - 172.31.255.255)

Class C : 192.168.x.x (192.168.0.0 - 192.168.255.255)

การคำนวณ IPv4

เมื่อเราได้ IP Address มา ๑ ชุด สิ่งที่จะต้องบอกได้จาก IP Address ที่ได้มาคือ

Subnet Mask คือ IP Address อะไร

Network IP คือ IP Address อะไร

Broadcast IP คือ IP Address อะไร

Range host IP ที่สามารถนำมาใช้งานได้ มี IP อะไรบ้าง

จำนวน Subnets, จำนวน Hosts / Subnet

Subnet Mask ทำหน้าที่แบ่ง Network ออกเป็นส่วนย่อยๆ ลักษณะคล้ายกับ IP Address คือประกอบด้วยตัวเลข ๔ ตัวคั่นด้วยจุด เช่น 255.255.255.0 วิธีการที่จะบอกว่า Computer แต่ละเครื่องจะอยู่ใน Network วงเดียวกัน (หรืออยู่ใน Subnet เดียวกัน) หรือไม่นั้น บอกได้ด้วยค่า Subnet Mask

วิธีการหา Subnet Mask

/30 หมายถึง Mask 30 Bits แรก

/27 หมายถึง Mask 27 Bits แรก

/20 หมายถึง Mask 20 Bits แรก

ให้ทำการแปลง Mask Bit ที่กำหนดให้ เป็นค่า Subnet Mask วิธีการคือ Bits ที่อยู่หน้าตัว Mask ให้แทนด้วยเลข 1 Bits ที่อยู่หลังให้แทนด้วยเลข 0

**ตัวอย่าง /30**

/30 11111111 . 11111111 . 11111111 . 111111|00

จะได้ค่า Subnet Mask

/30 255.255.255.252

11111111 . 11111111 . 11111111 . 111111|00 ให้ใช้ตารางช่วยจะทำให้เร็วขึ้น โดยถ้าเป็น 1 จำนวน ๘ ตัวจะได้ 255 ถ้าเป็น 1 จำนวน ๖ ตัวก็คือ 252 หรือจะใช้วิธีนับจาก 24 Bits แรกซึ่งเป็น 1 ทั้งหมดอยู่แล้ว นับต่อมาจะได้ Bits ที่ 30 เป็น 252 พอดี

**ตัวอย่าง /27**

/27 11111111 . 11111111 . 11111111 . 111|00000

จะได้ค่า Subnet Mask

/27 255.255.255.224

**ตัวอย่าง /20**

/20 11111111 . 11111111 . 1111|1111 . 00000000

จะได้ค่า Subnet Mask

/20 255.255.240.0

ตัวอย่าง Subnet Mask ต่างๆ มีดังนี้

Mask ที่เป็นค่า Default ของ IP Class ต่างๆมีดังนี้

Class A = Mask 8 Bits = 255 . 0 . 0 . 0

Class B = Mask 16 Bits = 255 . 255 . 0 . 0

Class C = Mask 24 Bits = 255 . 255 . 255 . 0

Subnet mask ทั่วไป

Mask 10 = 255 . 192 . 0 . 0 Mask 21 = 255 . 255 . 248 . 0

Mask 11 = 255 . 224 . 0 . 0 Mask 22 = 255 . 255 . 252 . 0

Mask 12 = 255 . 240 . 0 . 0 Mask 23 = 255 . 255 . 254 . 0

Mask 13 = 255 . 248 . 0 . 0 Mask 25 = 255 . 255 . 255 . 128

Mask 14 = 255 . 252 . 0 . 0 Mask 26 = 255 . 255 . 255 . 192

Mask 15 = 255 . 254 . 0 . 0 Mask 27 = 255 . 255 . 255 . 224

Mask 17 = 255 . 255 . 128 . 0 Mask 28 = 255 . 255 . 255 . 240

Mask 18 = 255 . 255 . 192 . 0 Mask 29 = 255 . 255 . 255 . 248

Mask 19 = 255 . 255 . 224 . 0 Mask 30 = 255 . 255 . 255 . 252

Mask 20 = 255 . 255 . 240 . 0 Mask 31 = 255 . 255 . 255 . 254

หมายเหตุ เพื่อให้การแปลงตัวเลขจากเลขฐานสอง เป็นฐานสิบเร็วขึ้นให้ดูจากด้านล่าง เช่น ถ้าเป็นเลข 1 ทั้งหมดจะได้เลขฐานสิบคือ 255 ถ้าเป็นเลข 1 จำนวน ๔ ตัวก็คือ 240 ถ้าเป็นเลข 0 ทั้งหมดจะได้เลข ๐

00000000 = 0  
 10000000 = 128  
 11000000 = 192  
 11100000 = 224  
 11110000 = 240  
 11111000 = 248  
 11111100 = 252  
 11111110 = 254  
 11111111 = 255

หลังจากได้ Subnet Mask แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหา Network IP และ Broadcast IP Network IP คือ IP ตัวแรกของ Subnet จะไม่สามารถนำมา Set ให้กับอุปกรณ์หรือเครื่อง PC ได้ และ Broadcast IP ก็ไม่สามารถนำมา Set ให้กับอุปกรณ์หรือเครื่อง PC ได้เช่นกัน

**ตัวอย่าง 192.168.22.50/30** ให้หา Network IP, Broadcast IP และ Range Hosts IP

จากโจทย์ /30 เมื่อแปลงเป็น Subnet Mask จะได้ 255.255.255.252 (เป็น 1 ทั้งหมด ๖ ตัวจะได้ 252 ดังนั้นจึงได้ Subnet Mask เป็น 255.255.255.252)

ต่อไป หาว่า จำนวน IP ต่อ Subnet มีจำนวนเท่าไร จากค่า Subnet Mask ที่ให้มา ดูที่ 2 Bit ที่เหลือ ที่เป็นอะไรก็ได้ นั้น ตัวเลขที่เป็นไปได้หมดคือ 00, 01, 10, 11 มี ๔ ตัว และเมื่อนำ 00, 01, 10, 11 แปลงเป็นฐานสิบจะได้

00 แปลงเป็นฐานสิบจะได้ 0  
 01 แปลงเป็นฐานสิบจะได้ 1  
 10 แปลงเป็นฐานสิบจะได้ 2  
 11 แปลงเป็นฐานสิบจะได้ 3

สรุปคือ จำนวน IP ต่อ Subnet เมื่อ Subnet Mask คือ 255.255.255.252 คือ ๔ ตัว นั่นเอง หรือใช้วิธีสังเกตจากที่เขียนไว้ ตัวเลขที่อยู่บน 252 คือ ๔ ตามด้านล่าง ดังนั้นถ้า /30 จำนวน IP ในแต่ละ Subnet ที่จะเป็นไปได้ดูเฉพาะกลุ่มสุดท้ายคือ 0 - 3 , 4 - 7 , 8 - 11 , \_ \_ \_ , 252-255 หรือเขียนในรูปแบบ IPv4 จะได้

192.168.22.0 - 192.168.22.3  
 192.168.22.4 - 192.168.22.7  
 192.168.22.8 - 192.168.22.11  
 .....  
 192.168.22.48 - 192.168.22.51  
 .....  
 192.168.22.252 - 192.168.22.255

หมายเหตุ ๓ กลุ่มแรกเหมือนเดิมเนื่องจากผลของการ And ระหว่าง Bit เนื่องจาก ๓ กลุ่มแรกเป็น Bit 1 ทั้งหมดทำการ Add กับเลขใดก็ได้ตัวเดิม ๓ กลุ่มแรกจึงได้เลขฐาน ๑๐ ตัวเดิม โดย IP Address

ตัวแรกของแต่ละ Subnet จะเรียกว่า Network IP และ IP Address ตัวสุดท้ายของแต่ละ Subnet จะเรียกว่า Broadcast IP ดังนั้น จากโจทย์ 192.168.22.50/30

๑. Network IP คือ IP Address อะไร

ตอบ 192.168.22.48

๒. Broadcast IP คือ IP Address อะไร

ตอบ 192.168.22.51

๓. Range Hosts IP ที่สามารถนำมาใช้งานได้ หรือ จำนวน Hosts Per Subnet

ตอบ 192.168.22.49 - 192.168.22.50 นำ IP มา Set เป็น Host ได้ 2 IP

วิธีการหา Network IP นอกเหนือจากการเขียนตามด้านบนแล้วยังหาได้โดยวิธีการปกติทำได้โดยการนำเอา Subnet Mask มา AND กับ IP Address ที่ให้มา ผลที่ได้จะเป็น Network IP วิธีการหา นำ IP จากโจทย์ที่ให้มา ตั้งหารด้วยจำนวน IP ที่มีได้ใน Subnet เช่น 192.168.22.50/30 ให้นำเอาตัวเลข 50 หารด้วย 4 ตั้งด้านล่าง เมื่อได้ Network IP แล้ว ก็จะได้คำตอบเช่นเดียวกับด้านบน เนื่องจากเรารู้อยู่แล้วว่า /30 ใน 1 Subnet จะมีจำนวน IP ทั้งหมด ๔ ตัวจากตาราง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

**ตัวอย่าง** 192.168.5.33/27 Which IP address should be assigned to the PC host ?

A. 192.168.5.5

B. 192.168.5.32

C. 192.168.5.40

D. 192.168.5.63

E. 192.168.5.75

จากโจทย์ /27 จะหมายถึง

11111111 . 11111111 . 11111111 . 111/XXXXX = Mask 27 Bit แรก ต้องเป็นเลข 1 ส่วน 5 bit หลัง เป็นอะไรก็ได้

/27 เมื่อแปลงเป็นเลขฐานสิบจะได้ 255 . 255 . 255 . 224

หรือจะคิดแบบลัด ตามตาราง ดูบรรทัดที่ ๔ จะหมายถึงผลบวกของ Bit ใน 8 bit สุดท้าย 111 ก็คือ

$128+64+32 = 224$

เมื่อ ได้ Subnet Mask แล้ว เราก็จะรู้ว่า มีจำนวน IP ต่อ Subnet เท่ากับ 32 หรือจะดูจากที่เขียนไว้ด้านบนของ 224 ก็คือ 32 นั่นเอง

จากโจทย์ 192.168.5.33/27 จะใช้วิธีไหนก็ได้หาตัว Network มาให้ได้ก่อน

192.168.5.33/27 หมายถึง 92.168.5.30 - 92.168.5.63

โดย IP ตัวแรกจะเป็น Network IP (192.168.5.32 ) และ IP ตัวสุดท้ายจะเป็น Broadcast IP

(192.168.5.63) ซึ่งไม่สามารถใช้ Set ให้แก่ PC ได้ ดังนั้นจะเหลือ IP ที่สามารถ Set ให้แก่ PC ได้คือ

192.168.5.33 - 192.168.5.62

คำตอบ จึงเป็นข้อ C. 192.168.5.40

**ตัวอย่าง IP 10.10.10.0/13** เป็น IP ที่นำไป Set ให้ Host ได้หรือไม่ ?

IP ที่สามารถนำไป Set ให้ Host ได้หรือนำไปใช้งานได้ จะต้องไม่ตรงกับ Network IP หรือ Broadcast IP  
วิธีการคิดก่อนอื่นเราต้องทำการแปลง /13 หรือ Mask 13 bit ให้เป็น Subnet Mask

11111111 . 11111/XXX . XXXXXXXX . XXXXXXXX = Mask 13 Bit แรกต้องเป็นเลข  
1 ส่วน Bit ที่เหลือเป็นอะไรก็ได้

/13 เมื่อแปลงเป็นเลขฐานสิบจะได้ 255 . 248 . 0 . 0

จากโจทย์ เขียนใหม่ได้ดังนี้ IP 10.10.10.0 Subnet Mask 255.248.0.0

ขั้นต่อไปเราจะมาหาช่วง IP จาก Subnet Mask ที่หามาได้ 255.248.0.0 หลักที่ ๑ จะมีค่าคงที่คือ  
เลข 10 หลักที่ ๓ และหลักที่ ๔ นั้น ตัวเลขที่เป็นไปได้คือ 0 - 255

ส่วนหลักที่ ๒ นั้น เราต้องมาคำนวณ โดยเว้นไว้ก่อน เขียนช่วง IP จะได้ดังนี้คือ

10 . X . 0 . 0 ถึง 10 . X . 255 . 255

ถ้าเราพิจารณาเฉพาะ 248 (ดูเฉพาะตัวเลขกลุ่มที่ ๒) ถ้าดูจากภาพด้านบน บรรทัดที่ ๓ ซึ่งจะหมายถึง  
IP ที่มีได้ทั้งหมด ก็คือ ๘ ตัว คือ 0 - 7 , 8 - 15 , 16 - 23 , \_ \_ \_ , 248 - 255 หรือเขียนเต็มๆ จะได้

10 . 0 . 0 . 0 - 10 . 7 . 255 . 255

10 . 8 . 0 . 0 - 10 . 15 . 255 . 255 -----> จากโจทย์ 10.10.10.0 จะอยู่ในช่วงนี้

10 . 16 . 0 . 0 - 10 . 23 . 255 . 255

.....

10 . 248 . 0 . 0 - 10 . 255 . 255 . 255

จากโจทย์ 10.10.10.0/13 ก็จะเป็น IP ในช่วง 10 . 8 . 0 . 0 ถึง 10 . 15 . 255 . 255

๑. Network IP คือ IP Address อะไร

ตอบ 10 . 8 . 0 . 0

๒. Broadcast IP คือ IP Address อะไร

ตอบ 10 . 15 . 255 . 255

๓. Range Host IP ที่สามารถนำมาใช้งานได้

ตอบ 10 . 8 . 0 . 1 ถึง 10 . 15 . 255 . 254 ดังนั้น IP 10.10.10.0/13 จึงนำมาใช้งานได้

ถือว่าเป็น Host ตัวนี้

### การหาจำนวน Subnet และ จำนวน Hosts / Subnet

การหาจำนวน Hosts ต่อ Subnet จากค่า Subnet Mask ที่ให้มา จะใช้สูตร  $2^n - 2$

โดย n คือจำนวน Bits ที่อยู่หลังตัว Mask ส่วนเลข ๒ ที่ลบออกไปคือ Network IP และ Broadcast IP

**ตัวอย่าง /30** 11111111 . 11111111 . 11111111 . 111111/00 หรือ 255.255.255.252 จะได้

จำนวน Hosts/Subnet =  $2^n - 2 = 2^2 - 2 = 4 - 2 = 2$

**ตัวอย่าง /20** 11111111 . 11111111 . 1111/0000 . 00000000 หรือ 255.255.240.0

จำนวน Hosts/Subnet =  $2^n - 2 = 2^{12} - 2 = 4096 - 2 = 4094$

การหาจำนวน Subnet จากค่า Subnet Mask ที่ให้มา ปัจจุบันใช้สูตร  $2^n$  ไม่ต้องลบ ๒ เนื่องจาก ปัจจุบันทุก Subnet สามารถใช้ได้ทั้งหมดและใน Router Cisco เองมีการเพิ่ม IP Subnet Zero ไว้อยู่แล้ว โดย  $n$  คือจำนวน Bits ที่อยู่หน้าตัว Mask ถึงตำแหน่ง . (Dot) ที่ใกล้ที่สุดหรือตำแหน่งที่ระบุไว้

**ตัวอย่าง /30** 11111111 . 11111111 . 11111111 . 111111/00

หรือ 255.255.255.252 จะได้

จำนวน Subnet =  $2^n = 2^6 = 64$

**ตัวอย่าง /20** 11111111 . 11111111 . 1111/0000 . 00000000

หรือ 255.255.240.0

จำนวน Subnet =  $2^n = 2^4 = 16$

**ตัวอย่าง** จากเดิม /20 แบ่งเป็น /27 จะได้กี่ Subnet

ข้อนี้ระบุ Mask ต้นทางมาจะได้ 11111111 . 11111111 . 1111/1111 . 111/00000

จำนวน Subnet =  $2^n = 2^7 = 128$

### คำศัพท์ที่ควรรู้

Classful และ Classless

Classful จะสนใจ Class ของ IP เป็นหลักจะไม่สนใจตัว Mask ดูตัวเลข IP ว่าอยู่ Class ไหน เช่น อยู่ Class A, B หรือ C ตามนี้

Class A (0.0.0.0 - 127.255.255.255)

Class B (128.0.0.0 - 191.255.255.255)

Class C (196.0.0.0 - 223.255.255.255)

ในการใช้ IP Address ช่วงแรกๆจะเป็นแบบ Classful ซึ่ง Classful จะมีค่า Default Subnet Mask ดังนี้

A /8 255.0.0.0

B /16 255.255.0.0

C /24 255.255.255.0

ดังนั้นถ้าเราใช้หลักการของ Classful ก็ไม่สามารถแบ่ง Subnet ได้แตกต่างจากค่า Default Subnet Mask ตัวอย่าง Routing Protocols : ที่เป็นแบบ Classful

- RIP Version ๑ (RIPv1)

- IGRP

ส่วน Classless จะตรงข้ามกับ Classful คือจะไม่สนใจ Class ของ IP แต่จะสนใจตัว Mask เป็นหลัก อย่างเช่นที่คำนวณตามตัวอย่างที่ผ่านมา โดยจะเป็นไปตามหลักการของ Classless Inter-Domain Routing (CIDR) ดังนั้น ตัว Mask จะเป็นอะไรก็ได้ไม่สนใจว่า IP อยู่ Class ไหน



ตัวอย่าง routing protocols : ที่เป็นแบบ Classless ได้แก่

- RIP Version 2 (RIPv2)
- EIGRP
- OSPF
- IS-IS
- Variable Length Subnet Masks ( VLSM )

จากหลักการ เครือข่ายที่เราใช้งานกันอยู่ ไม่จำเป็นจะต้องมีขนาดเท่ากันเสมอไป (ไม่จำเป็นต้องมีตัว Mask เท่ากัน) เช่น การเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) ต้องการแค่ 2 IP ก็เพียงพอ ดังนั้นควรใช้ Mask 30 Bit (/30) หรือใช้ Subnet Mask เป็น 255.255.255.252 หรือการเชื่อมต่อใน LAN ที่มีเครื่องเพียง ๒๐ เครื่องควรใช้ Mask 27 Bit (/27) หรือใช้ Subnet Mask เป็น 255.255.255.254 เป็นต้น ดังตัวอย่างในภาพด้านล่าง ใช้หลักการของ VLSM จะเห็นว่าแต่ละ Subnet จะมีตัว Mask ต่างกันและ Mask Bit ตามความเหมาะสมทำให้ประหยัด IP หรือใช้ IP ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

### Multi Protocol Label Switching (MPLS)

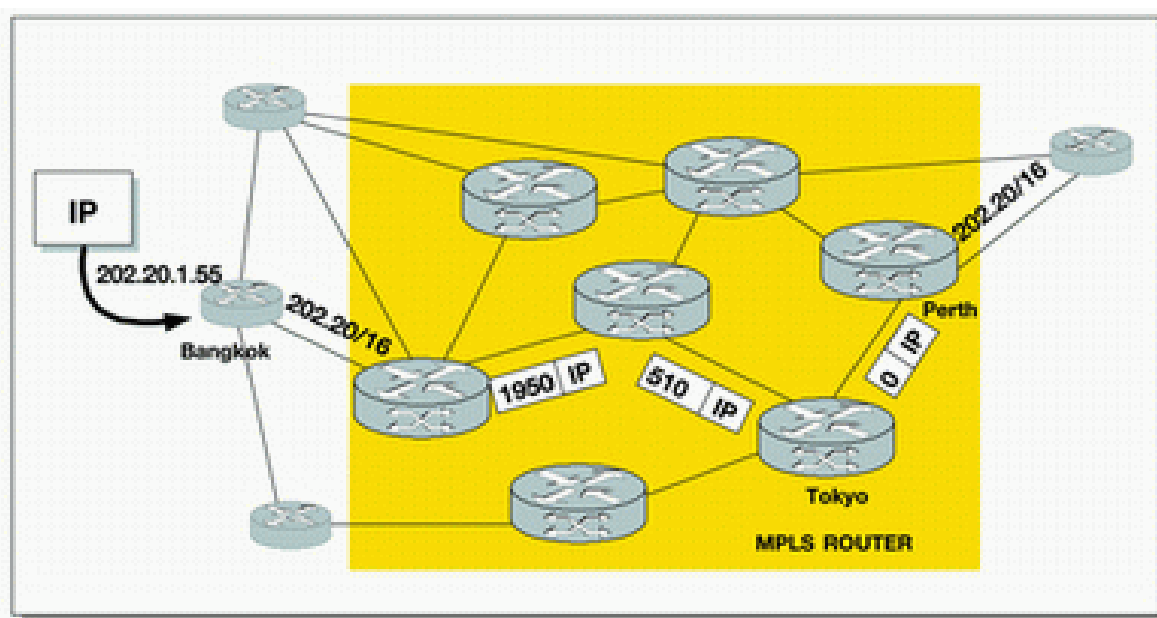
MPLS - Multiprotocol Label Switching เป็นโปรโตคอลที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย The Internet Engineering Task Force (IETF) เพื่อให้การส่งต่อข้อมูลโดย IP แพ็กเก็ตนั้นลดกระบวนการต่าง ๆ ลงให้คล้ายกับการส่งข้อมูลด้วยสวิตช์ และยังช่วยให้หน่วยประมวลผลหรือ ซีพียูของอุปกรณ์ทำงานลดลงตามไปด้วย สุดท้ายผลที่ได้คือ การส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งโดยไม่เกิดการล่าช้า

โดยปกติการรับส่งข้อมูลด้วยเราเตอร์ที่ใช้ IP แพ็กเก็ตเกิดในการรับส่งข้อมูลนั้น จะมีส่วนหัวของแพ็กเก็ตที่ระบุที่อยู่ของต้นทางและปลายทาง การส่งต่อของแพ็กเก็ตเกิดจากต้นทางไปยังปลายทางสามารถเกิดความล่าช้าขึ้นได้ ปัญหาความล่าช้าที่สามารถเกิดขึ้นได้จากความเร็วในการค้นหาเส้นทางของที่อยู่ปลายทางของเราเตอร์ ไปจนถึงขั้นตอนและวิธีการส่งต่อแพ็กเก็ตเกิดจากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง

กระบวนการของ MPLS นั้นได้เพิ่มขั้นตอนอย่างหนึ่งเข้าไปใน IP แพ็กเก็ตเพื่อให้การส่งต่อแพ็กเก็ตเร็วขึ้น คือการใส่ป้ายชื่อหรือ Label เข้าไป การใส่ป้ายชื่อนี้เปรียบเสมือนกับการใส่รหัสไปรษณีย์เพิ่มเข้าไปในหน้าซองจดหมาย ผู้คัดแยกจดหมายไม่จำเป็นต้องควารู้ว่าผู้รับเป็นใคร เพียงแต่แยกวาร์หัสไปรษณีย์รหัสไหนจะส่งต่อไปภาคไหน หรือจังหวัดไหนเท่านั้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขั้นตอนเพียงบางส่วนเข้าไป จะสามารถไปลดเวลาการทำงานโดยรวมให้น้อยลงได้ แนวความคิดแบบนี้คล้ายกับวิธีการของ MPLS ที่เกิดขึ้นมาก็เพื่อลด Overhead ในการใช้งาน Virtual Circuit บนเครือข่าย TCP/IP ลงให้มากที่สุด ซึ่งจะเป็นการผนวกเครือข่าย ATM ซึ่งเป็นเครือข่ายแบบ Virtual Circuit Switching และใช้ ATM Switch ในเลเยอร์ที่ ๒ เป็นหลัก เข้ากับเครือข่าย TCP/IP ซึ่งเป็นเครือข่ายแบบ Packet Switching และใช้ Router ในเลเยอร์ที่ ๓ เป็นหลักเข้าด้วยกัน ประโยชน์ที่ได้รับก็คือการทำวิศวกรรมควบคุมการจราจรบนเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพ จากเดิมที่โปรโตคอลสำหรับการกำหนดเส้นทางส่วนใหญ่ในเครือข่ายจะมองในส่วนองระยะทางเป็นหลัก แต่สำหรับ MPLS แล้ว จะมองที่ความสามารถในการไหลไปยังปลายทางของข้อมูลเป็นหลักแทน และมีกระบวนการกำหนดเส้นทางที่ฉลาดว่าผสมกับการใช้งานแบบ Virtual Circuit ที่มีลักษณะการส่งแบบ Streamline แทนการส่งแบบ Connectionless ทำให้สามารถแก้ปัญหาการจราจรบนเครือข่ายได้เป็นอย่างดี

เนื่องจาก MPLS มีการส่งแบบ Streamline ทำให้สามารถรับประกันเกี่ยวกับปริมาณข้อมูลต่อเวลาได้เป็นอย่างดี เพื่อใช้งานในลักษณะ Real-Time เช่น การถ่ายทอดภาพและเสียงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ โดยทั้งภาพและเสียงมีคุณภาพใกล้เคียงกับคุณภาพที่ได้จากการชมโทรทัศน์หรือฟังวิทยุเลยทีเดียว รวมทั้งสามารถที่จะกำหนดระดับของ QoS ให้เหมาะกับผู้ใช้งานแต่ละรายได้โดยง่าย สามารถใช้งานเป็น Tunnel ให้ VPN ได้เป็นอย่างดี เนื่องจาก ISP ที่ต้องการให้บริการ VPN กับลูกค้าของตนสามารถกำหนด Virtual Circuit ระหว่าง ISP กับลูกค้าเพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับ Tunnel แทน VPN แบบเดิม ๆ ที่วิ่งไปบนเครือข่ายโดยไร้การควบคุม เนื่องจากใช้งานแบบ Connectionless นั้นเอง และสนับสนุนโปรโตคอลได้หลากหลาย ปัจจุบันนอกจากที่สนับสนุนเครือข่าย TCP/IP แล้วยังสามารถนำ MPLS ไปใช้กับเครือข่าย ATM และ Frame Relay หรือแม้กระทั่งใช้บนเครือข่ายทั้งสามซึ่งทำ Overlay Network กันอยู่ก็ได้

### การทำงานของ MPLS



### ตัวอย่าง การควบคุมการจราจรบนเครือข่ายด้วย MPLS

หลักการทำงานของ MPLS โดยสังเขปคือการสร้างระบบจัดเส้นทางของ Packet หรือการ Routing ขึ้นใหม่ภายในบริเวณของเครือข่ายที่กำหนด ซึ่งจะขอเรียกเส้นทางนี้ว่า LSP (Label Switch Path) โดยภายในขอบเขตนี้ Packet ที่วิ่งเข้ามาจะถูกกำหนด Label ประจำตัวให้ใหม่ โดยไม่สนใจ Header เดิม (ซึ่งอาจเป็นของ TCP/IP) จากนั้นจึงวิ่งไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ใน LSP สำหรับ Label ชุดนั้นๆ ซึ่งเส้นทางนี้เป็นไปได้ทั้งการกำหนดตายตัวล่วงหน้า และการกำหนดแบบเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ตามความเหมาะสม ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าโปรโตคอลในการกำหนดเส้นทางของข้อมูลที่ใช้อยู่เดิมในเครือข่าย TCP/IP เช่น มีการคำนวณจากจำนวน Hop ที่ส่งคำนวณจากเวลาที่ใช้น้อยที่สุด หรือพยายามให้ได้ตามเวลาจริง (Real-Time) เช่นสำหรับการส่งข้อมูลมัลติมีเดียและอื่นๆ อีกมาก การทำงานจะทำได้เร็วกว่า Routing แบบเดิมเพราะการคำนวณเพื่อจัดเส้นทางจะทำได้ล่วงหน้า และเป็นอิสระ

จากการรับส่งข้อมูลแต่ละ Packet คือมีหน้าที่จัดเส้นทางใหม่ก็จัดไป เมื่อจัดเสร็จก็เก็บไว้ใช้งาน ส่วนหน้าที่รับส่งข้อมูลก็ทำไปเช่นกันไม่ยุ่งเกี่ยวกัน เมื่อมีข้อมูลเข้ามาถึงจะนำเส้นทางที่ได้เตรียมไว้มาใช้รับส่งข้อมูล เมื่อข้อมูลวิ่งมาถึงปลายทางของ LSP ก็ให้นำ Label ออกจาก Packet และปล่อยให้เป็นหน้าที่ของ Header เดิมของ Packet ทำหน้าที่นำข้อมูลส่งถึงปลายทางที่แท้จริง

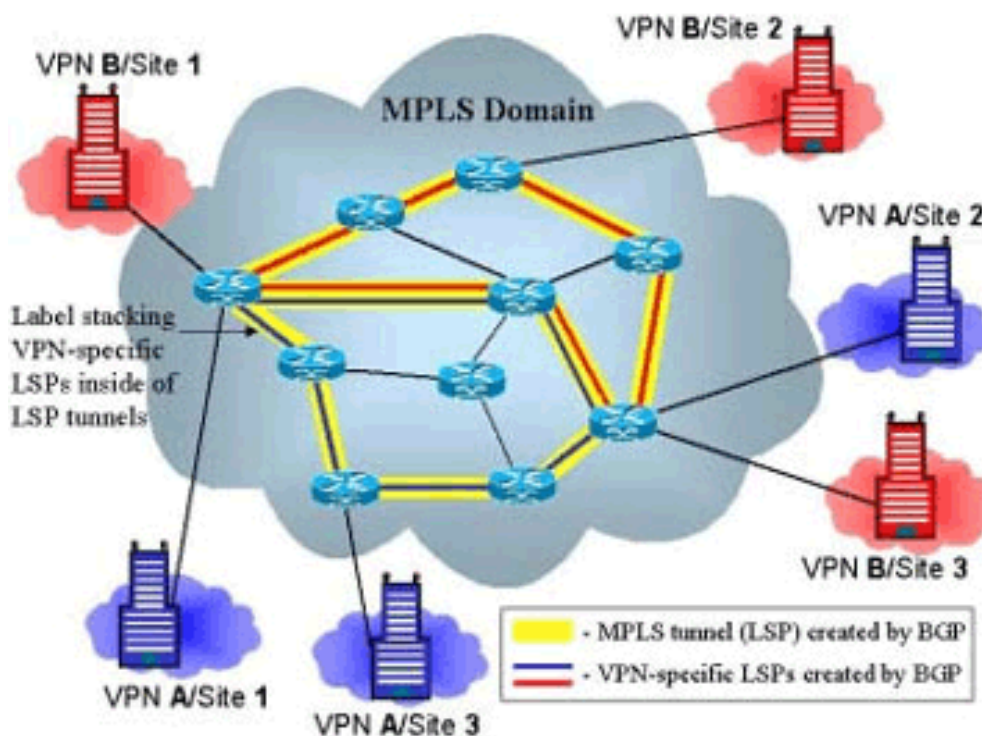
### ข้อดีของ Multi Protocol Label Switching (MPLS)

- มีความเสถียรและปลอดภัยสูงในการรับ-ส่งข้อมูล
- มีปริมาณช่องสัญญาณ (Bandwidth) มากถึง 10 Gbps เพื่อรองรับลูกค้ากลุ่มธุรกิจโดยเฉพาะ
- สามารถเลือกความเร็วได้ตั้งแต่ 64 Kbps - 1 Gbps
- พร้อมรองรับ IP Application ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น VOIP, Routing Protocol, QoS, Multicast และ VDO Conference เพื่อตอบสนองชีวิตการทำงาน แบบที่จะเป็นที่นิยมในอนาคต โดยการรวมเทคโนโลยีต่างๆ ไว้เข้าด้วยกัน เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงาน

### รูปแบบบริการ MPLS เพื่อองค์กร

๑. MPLS Point To Point (VLL) เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อจากสาขาหนึ่งไปยังสาขาหนึ่ง
๒. MPLS Point To Multipoint (VPN) เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างสำนักงานใหญ่กับหลายๆ สาขา หรือแต่ละสาขาเชื่อมต่ออันเอง

### ระบบ MPLS ในการติดตั้ง INTERNET



ตัวอย่างของระบบ MPLS ที่เหมาะสำหรับหน่วยงานที่มีขนาดใหญ่

ที่มา [www.muict.polppolservice.com/Year3\\_2/Telecom/MPLS-sec2/MPLS%202.doc](http://www.muict.polppolservice.com/Year3_2/Telecom/MPLS-sec2/MPLS%202.doc)

### ๓. เครือข่ายสื่อสารข้อมูล ทอ.

ในบทนี้กล่าวถึงเครือข่ายสารสนเทศ ทอ. ซึ่งประกอบด้วย เครือข่ายสารสนเทศด้านการยุทธ และเครือข่ายสารสนเทศด้านธุรการ โดยทั่วไป

แผนแม่บทระบบสารสนเทศ ทอ. กำหนดให้ทุกหน่วยงานใน ทอ. ใช้งานเครือข่ายสื่อสารข้อมูลร่วม ทอ. เพียงเครือข่ายเดียวในการสนับสนุนระบบสารสนเทศ ทอ. ทั้งหมด ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานใน ทอ. สามารถติดต่อผ่านเครือข่ายเดียวกันและสามารถใช้งานร่วมกันได้ทุกเครื่อง ระบบเครือข่ายข้อมูลร่วมประกอบด้วย

#### ๓.๑ เครือข่ายสารสนเทศด้านการยุทธ (CIS: Combat Information System)

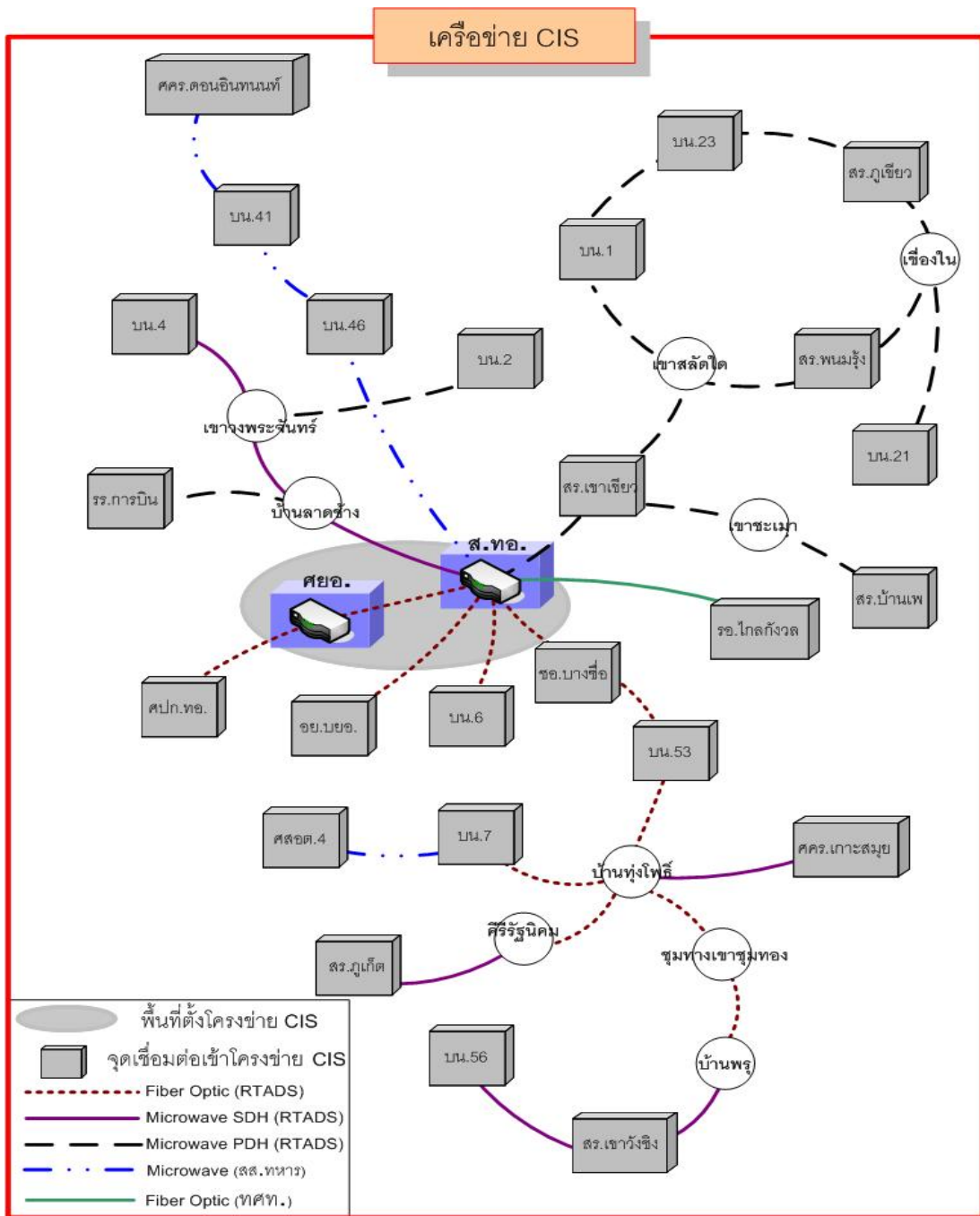
เป็นการเชื่อมต่อระหว่างฐานทัพดอนเมืองไปยังกองบินต่างๆ สถานีเรดาร์และหน่วยควบคุม ทางอากาศยุทธวิธี โดย สอ.ทอ. ติดตั้งอุปกรณ์ Router ทุกกองบิน และสถานีเรดาร์ ทั้งนี้ อุปกรณ์ต่อเชื่อมโดยใช้เครือข่ายโทรคมนาคมของ ทอ. ในภาคกลาง ตะวันออก ตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ยกเว้นในภาคเหนือใช้งานระบบโทรคมนาคมของ สื่อสารทหาร โดยเครือข่ายดังกล่าวควรมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลระหว่างฐานทัพดอนเมืองและกองบินด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 1.544 Mbit/sec (T1) หรือ 2 Mbit/sec (E1) เครือข่ายสารสนเทศด้านการยุทธ สนับสนุนผู้ใช้งานดังนี้

๑) เครือข่ายข้อมูลการยุทธทางอากาศ ( ACIN : Air Combat Information Network ) ได้แก่ระบบข้อมูลข่าวสารการยุทธใช้งานในหน่วยงานทางยุทธการ ทอ. ทั้งหมดในการควบคุมบังคับบัญชา เชื่อมต่อกับ ศปก.ทอ. ไปยังทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น ศปก.กองบิน ยุทธการฝูงบิน บ.เตรียมพร้อม พัน อย. เป็นต้น โดยประกอบด้วยระบบงานดังต่อไปนี้

- ฐานข้อมูลกำลังพล
- ฐานข้อมูลนักบิน
- แฟ้มเป้าหมาย
- ระบบ ATO การสั่งขึ้นบิน
- ระบบติดตาม บ. เตรียมพร้อม
- ระบบ Informix
- ข้อมูลด้านสรรพาวุธ เชื้อเพลิงอากาศยานและข้อมูลของอากาศยาน

#### ๓.๒ ระบบการประชุมทางไกลผ่านวิดีโอ (VTC: Video-Tele Conference)

ซึ่งใช้สนับสนุนการประชุมระหว่างผู้บังคับบัญชา ทอ. ในหน่วยงานต่างจังหวัด เช่น กองบิน สถานีรายงาน และผู้บังคับบัญชาชั้นสูงของ ทอ. ในพื้นที่ตั้งดอนเมือง (ศปก.ทอ.)



ภาพที่ ๕-๒๐ พื้นที่ตั้งโครงข่ายและจุดเชื่อมต่อต่างๆ ภายในเครือข่าย CIS

๓.๓ เครือข่ายสารสนเทศด้านการสนับสนุน (SIS: Support Information System)

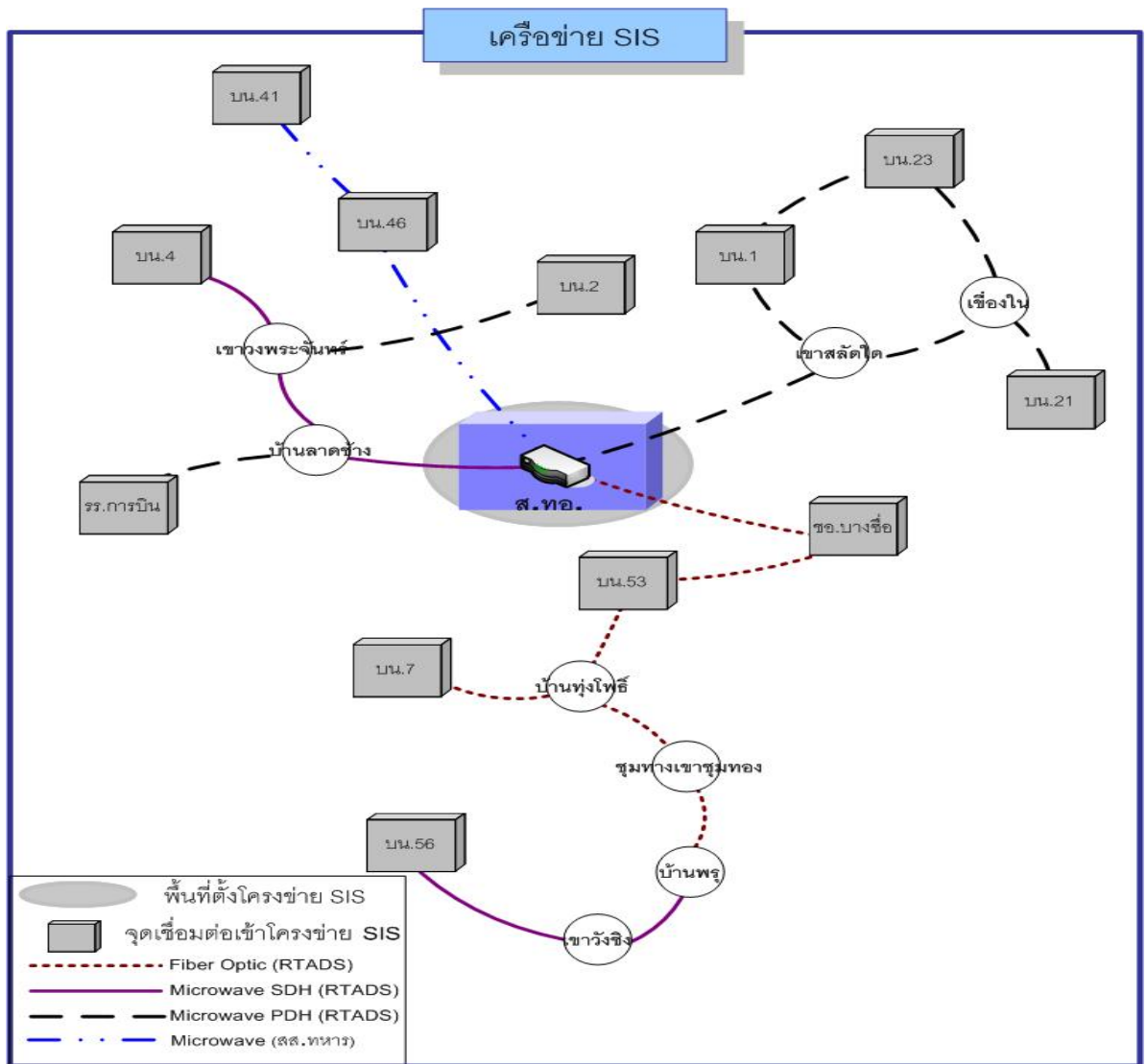
เป็นการเชื่อมต่อระหว่างฐานทัพอากาศเมืองไปยังกองบินต่างๆ โรงเรียนการบิน และ กรมช่างอากาศ ฯ บางชื่อ โดย สอ.ทอ.ติดตั้งอุปกรณ์ Router หน่วยงาน เสร็จสิ้นเมื่อ ๓.ค.๕๖ ทั้งนี้ อุปกรณ์ต่อเชื่อมโดยใช้เครือข่ายโทรคมนาคมของ ทอ. ในภาคกลาง ตะวันออก ตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้

ยกเว้นในภาคเหนือใช้งานระบบโทรคมนาคมของ สื่อสารทหาร โดยเครือข่ายดังกล่าวควรมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลระหว่างฐานทัพตอนเมืองและกองบินด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 1.544 Mbit/sec (T1) หรือ 2 Mbit/sec (E1) เครือข่าย SIS สนับสนุนผู้ใช้งานดังนี้

๑) ระบบสารสนเทศด้านการส่งกำลังบำรุงของกองทัพอากาศ (LMIS: Logistics Management Information Systems) ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ Main Database Server, คอมพิวเตอร์ Database Server, คอมพิวเตอร์ Firewall Serve, คอมพิวเตอร์ Application Server, คอมพิวเตอร์ File Server, คอมพิวเตอร์ Development Server, และคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (Workstation) ติดตั้งใช้งานหน่วยใน ทอ. ทั่วประเทศ โดยมีโปรแกรมสนับสนุนดังนี้

- ระบบการกำหนดหมายเลขและจัดทำสมุดรายการพัสดุ
- ระบบบริหารและควบคุมพัสดุล้างใหญ่
- ระบบบัญชีเงินพัสดุล้างใหญ่
- ระบบแจ้งความต้องการพัสดุเพื่อการจัดซื้อหรือจ้างซ่อมระดับคลังใหญ่
- ระบบบริหารการจัดซื้อทาง FMS และการจ้างซ่อมระดับคลังใหญ่
- ระบบบริหารการจัดซื้อทาง DP/LP และการจ้างซ่อมระดับคลังใหญ่
- ระบบติดตามการขนส่งจากตัวแทนการขนส่ง
- ระบบบริหารเชื้อเพลิงภาคอากาศและภาคพื้น
- ระบบสละอากาศยาน
- ระบบบริหารและควบคุม อาวุธ กระสุน วัตถุระเบิด
- ระบบบริหารและควบคุมพัสดุล้างฐานบิน
- ระบบบัญชีเงินพัสดุล้างฐานบิน
- ระบบบริหารการจัดซื้อจัดหาพัสดุภายในท้องถิ่นระดับกองบิน
- ระบบควบคุมพัสดุล้างระดับกลางในหน่วยขึ้นตรงกองทัพอากาศ
- ระบบการจัดการที่ดิน และอสังหาริมทรัพย์
- ระบบบริการข่าวสารและข้อมูลการส่งกำลังบำรุง
- ระบบสะสมและวิเคราะห์ข้อมูลการซ่อมบำรุง
- ระบบติดตามการใช้งานชิ้นส่วนอะไหล่
- ระบบบริหารเปรียบเทียบมาตรฐาน
- ระบบควบคุมเอกสารเทคนิค
- ระบบควบคุมสถานภาพและติดตามข้อมูลการซ่อมบำรุง
- ระบบควบคุมสถานภาพระบบอาวุธ
- ระบบควบคุมประวัติการซ่อมบำรุง
- ระบบแผนการซ่อมบำรุง และบัญชีความต้องการพัสดุที่ใช้ในการซ่อมบำรุง
- ระบบควบคุมสถานภาพอากาศยาน
- ระบบควบคุมสถานภาพยุทธภัณฑ์

๒) รองรับการใช้งาน Internet ของหน่วยงาน ทอ. ในต่างจังหวัด



ภาพที่ ๕-๒๑ แสดงพื้นที่ตั้งโครงข่ายและจุดเชื่อมต่อต่างๆ ภายในเครือข่าย SIS

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

ความรู้การสื่อสารผ่านดาวเทียม, [www.thaicom.net](http://www.thaicom.net)  
ข้อมูลสื่อสารผ่านดาวเทียมของ ทอ.จาก กทค.กสท.สอ.ทอ.

### ภาษาอังกฤษ

Dennis Roddy Third Edition, **Satellite Communications**, McGraw-Hill 2001  
**Technology Satellite, Internet Data Satellite Regulatory**, ITU International  
Telecommunication Union