



# ตำราวิชาพื้นฐานการสื่อสาร

พ.ศ.๒๕๖๒

โดย

กองวิทยาการ กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ

กองทัพอากาศ

ดอนเมือง

กรุงเทพมหานคร

## คำนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านการสื่อสาร มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก มีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ หลายชนิด เช่น กล้องถ่ายภาพที่สามารถส่งภาพถ่ายคุณภาพสูงกลับมายังศูนย์ภาคพื้นได้ในแบบ Real-Time หรืออากาศยานไร้คนขับที่บังคับโดยคนขับผ่านอุปกรณ์ควบคุม เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการนำเทคโนโลยีด้านการสื่อสารไปใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามแม้เทคโนโลยีดังกล่าวจะก้าวหน้าไปมาก แต่พื้นฐานในด้านการสื่อสารยังคงเหมือนเดิม

ดังนั้น คณะผู้จัดทำ จึงได้รวบรวมและจัดทำตำราวิชาพื้นฐานการสื่อสารขึ้น เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานได้ศึกษาเรียนรู้ด้วยตนเอง ซึ่งจะทำให้เข้าใจวิชาพื้นฐาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีหรืออุปกรณ์ขั้นสูงต่างๆ ได้ต่อไป

คณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณเจ้าของเนื้อหา และข้าราชการทุกท่านที่ได้ร่วมกัน จัดทำตำราวิชาพื้นฐานการสื่อสาร โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา จนสามารถนำไปใช้ในการทำงานได้เป็นอย่างดี และหากมีข้อผิดพลาดบกพร่องประการใดในตำราเล่มนี้ คณะผู้จัดทำ ต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เรืออากาศโท

(สุทัศน์ จันทรา)

นาวาอากาศโท

(มงคล จำนงค์ศรี)

นาวาอากาศโท

(จตุรนต์ เฟื่องฉาย)

คณะผู้จัดทำ

นาวาอากาศเอก

(อัศวพล ทองสุรเดช)

ผอ.กวก.สอ.ทอ.

ประธานที่ปรึกษา

# สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ช
บทที่ ๑ การแพร่กระจายคลื่น (Propagation of Waves)	๑
๑. การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	๑
๒. การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	๑๔
บทที่ ๒ สายอากาศ (Antennas)	๓๕
๑. การพิจารณาขั้นพื้นฐาน	๓๕
๒. ตัวแพร่กระจายคลื่นในอวกาศ	๓๘
๓. พารามิเตอร์ (Parameters) ของสายอากาศ	๔๒
๔. ผลของพื้นดินที่มีต่อสายอากาศ	๔๘
๕. ประเภทการใช้งานของสายอากาศ	๕๓
บทที่ ๓ สายส่งกำลัง (Transmission Line)	๖๘
๑. ประเภทของสายส่งกำลัง	๖๘
๒. ทฤษฎีและหลักการทํางาน	๗๒
บรรณานุกรม	ณ

# สารบัญตาราง

หน้า

-

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ ๑-๑ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง	๒
ภาพที่ ๑-๒ หน้าคลื่นรูปทรงกลม	๓
ภาพที่ ๑-๓ แสดงการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศ	๘
ภาพที่ ๑-๔ การสะท้อนของคลื่น	๙
ภาพที่ ๑-๕ การหักเหของคลื่น	๙
ภาพที่ ๑-๖ แสดงการหักเหของคลื่นในตัวกลางที่ความหนาแน่นค่อยๆ ลดลงอย่างเชิงเส้น	๑๑
ภาพที่ ๑-๗ การแทรกแซงของสัญญาณตรงกับสัญญาณสะท้อน	๑๑
ภาพที่ ๑-๘ รูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) จากการแทรกแซง	๑๒
ภาพที่ ๑-๙ การเลี้ยวเบน (Diffraction) (a) เกิดจากหน้าคลื่นทรงกลม (b) จากหน้าคลื่นแนวระนาบ (c) เกิดจากช่องเล็กๆ	๑๒
ภาพที่ ๑-๑๐ การเลี้ยวเบนรอบๆ มุมสิ่งกีดขวาง	๑๓
ภาพที่ ๑-๑๑ เครื่องรับที่อยู่ใกล้สถานีส่งจะรับสัญญาณได้แรงกว่าเครื่องรับ ที่อยู่ไกลออกไปจากสถานีส่ง	๑๔
ภาพที่ ๑-๑๒ ลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ	๑๕
ภาพที่ ๑-๑๓ การเดินทางของคลื่นดิน	๑๖
ภาพที่ ๑-๑๔ การลดทอนของคลื่นดินที่ความถี่ต่างๆ	๑๖
ภาพที่ ๑-๑๕ การเดินทางของคลื่นอากาศ	๑๗
ภาพที่ ๑-๑๖ การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า	๑๘
ภาพที่ ๑-๑๗ ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบ่งเป็นชั้นย่อยอีกหลายชั้น	๑๙
ภาพที่ ๑-๑๘ ชั้นบรรยากาศรอบโลก	๒๐
ภาพที่ ๑-๑๙ คลื่นวิทยุค่อยๆ ผ่านชั้นบรรยากาศชั้นบาง ๆ	๒๑
ภาพที่ ๑-๒๐ ระยะเวลาสูงเสียดของชั้นไอโอโนสเฟียร์	๒๑
ภาพที่ ๑-๒๑ การหักเหของคลื่นวิทยุที่มุมยิงค่าต่าง ๆ	๒๒
ภาพที่ ๑-๒๒ ความถี่ใช้งานสูงสุดในที่นี้เท่ากับ 20 MHz ที่มุมยิงที่กำหนดให้ เพื่อให้หักเหลงมายังจุด A	๒๒
ภาพที่ ๑-๒๓ การหักเหของคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ สำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์ชั้นย่อย	๒๓
ภาพที่ ๑-๒๔ การสื่อสารแบบที่คลื่นเดินทาง ๒ ฮอป	๒๔
ภาพที่ ๑-๒๕ การรับสัญญาณมัลติพาธ	๒๔
ภาพที่ ๑-๒๖ การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ประจำวัน	๒๖
ภาพที่ ๑-๒๗ การเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ในฤดูร้อนกับฤดูหนาว	๒๗
ภาพที่ ๑-๒๘ จุดของดวงอาทิตย์ (รูป ก.) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไอโอโนสเฟียร์ (ตามรูป ข.)	๒๗

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๑-๒๙ เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ที่จำนวนจุดดับ ในดวงอาทิตย์มากที่สุด และน้อยสุด	๒๘
ภาพที่ ๑-๓๐ ระยะสายตา (LOS หรือ Line Of Sight)	๓๐
ภาพที่ ๑-๓๑ การแพร่คลื่นแบบโทรโปสแกตเตอร์	๓๑
ภาพที่ ๑-๓๒ การสื่อสารผ่านดาวเทียม	๓๒
ภาพที่ ๑-๓๓ พื้นที่ใช้งานของดาวเทียม	๓๓
ภาพที่ ๑-๓๔ ดาวเทียมประจำชาติและพื้นที่ใช้งาน	๓๓
ภาพที่ ๑-๓๕ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แถบความถี่ และช่วงความถี่	๓๔
ภาพที่ ๒-๑ การแพร่กระจายจากสายส่ง	๓๖
ภาพที่ ๒-๒ วิวัฒนาการของ ไดโพล (a) สายส่งปลายเปิดแยกปลายให้กว้างขึ้น (b) ปลายสายเมื่อแยกให้เป็นเส้นแนวเดียวกัน (c) สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น	๓๖
ภาพที่ ๒-๓ Elementary Doublet. (a) สายอากาศ Doublet (b) ภาพตัดแนวตั้งรูปแบบ และ (c) ภาพตัดแนวนอนรูปแบบ ของสายอากาศ Doublet ตามลำดับ	๓๘
ภาพที่ ๒-๔ การกระจายของกระแสและแรงดันบน ไดโพลครึ่งคลื่น(a) ครึ่งรอบแรก (b) ครึ่งรอบหลัง	๓๙
ภาพที่ ๒-๕ การกระจายของกระแสบนเรโซแนนซ์ไดโพล (Resonant Dipole)	๓๙
ภาพที่ ๒-๖ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศเรโซแนนซ์ไดโพล ที่ขนาดต่างๆ	๔๐
ภาพที่ ๒-๗ สายอากาศไม่เรโซแนนซ์ (a) การแพร่ของกระแส (b) รูปแบบการแพร่กระจาย	๔๑
ภาพที่ ๒-๘ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศเรโซแนนซ์ (a) เมื่อคลื่นเดินทางไปข้างหน้า (b) เมื่อคลื่นสะท้อนกลับ (c) ผลรวมของรูปแบบ	๔๑
ภาพที่ ๒-๙ รูปแบบการแพร่กระจายหลาย ๆ แบบ	๔๖
ภาพที่ ๒-๑๐ รูปแบบการแพร่กระจายที่มีพู่ข้าง	๔๗
ภาพที่ ๒-๑๑ ความกว้างลำ (Beamwidths)	๔๗
ภาพที่ ๒-๑๒ สายอากาศเหนือพื้นดินกับสายอากาศจินตภาพ	๔๘
ภาพที่ ๒-๑๓ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น วางแนวนอนเหนือพื้นดินที่ระยะต่างๆ	๔๙
ภาพที่ ๒-๑๔ สายอากาศต่อลงพื้นดิน (a) สายอากาศและจินตภาพ (b) การแพร่กระจาย	๔๙
ภาพที่ ๒-๑๕ คุณลักษณะของสายอากาศแนวตั้งแบบต่อลงดิน (a) การกระจายกระแส ที่ความสูงแตกต่างกัน (b) รูปแบบการแพร่กระจาย	๕๐
ภาพที่ ๒-๑๖ Ground Mat สำหรับสายอากาศแนวตั้งแบบต่อลงดิน	๕๐
ภาพที่ ๒-๑๗ Top Loading	๕๑
ภาพที่ ๒-๑๘ "Top Hat" ของเสาอากาศ	๕๒

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๒-๑๙ Radiation Pattern ของสายอากาศ Marconi	๕๓
ภาพที่ ๒-๒๐ Counterpoises (Top View)	๕๔
ภาพที่ ๒-๒๑ Half Wave Antenna	๕๕
ภาพที่ ๒-๒๒ Two Half Wave Antenna	๕๕
ภาพที่ ๒-๒๓ Long Wire Antennas	๕๖
ภาพที่ ๒-๒๔ Typical Radiation Pattern	๕๖
ภาพที่ ๒-๒๕ การแพร่กระจายคลื่นของ Rhomic Antenna	๕๘
ภาพที่ ๒-๒๖ การแพร่กระจายคลื่นของ Broadside Array	๖๐
ภาพที่ ๒-๒๗ การแพร่กระจายคลื่นของ End Fire Array	๖๑
ภาพที่ ๒-๒๘ การแพร่กระจายคลื่นของ Cardioid Array	๖๒
ภาพที่ ๒-๒๙ การแพร่กระจายคลื่นของ Collinear Array	๖๒
ภาพที่ ๒-๓๐ การแพร่กระจายคลื่นของ Parasitic Array	๖๓
ภาพที่ ๒-๓๑ Yagi Antenna	๖๕
ภาพที่ ๒-๓๒ ทิศทางการสะท้อนคลื่น	๖๖
ภาพที่ ๒-๓๓ ทิศทางการสะท้อนคลื่น	๖๗
ภาพที่ ๒-๓๔ การแพร่กระจายคลื่นด้วย Parabolic Reflector	๖๗
ภาพที่ ๓-๑ สายคู่ขนานแบบ Parallel Two-Wire Line	๖๘
ภาพที่ ๓-๒ สายคู่ขนานแบบ Two-Wire Ribbon	๖๙
ภาพที่ ๓-๓ สายคู่ควั่นเกลียว ( Twist Pair)	๖๙
ภาพที่ ๓-๔ สายหุ้มชีลด์ (Shield Pair)	๗๐
ภาพที่ ๓-๕ สาย Air Coaxial	๗๐
ภาพที่ ๓-๖ สาย Flexible Coaxial	๗๑
ภาพที่ ๓-๗ แสดงให้เห็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดต่อการนำกระแส	๗๓
ภาพที่ ๓-๘ Dielectric Losses	๗๓
ภาพที่ ๓-๙ Equivalent Circuit Of A Two Wire Transmission Line	๗๔
ภาพที่ ๓-๑๐ Simple Circuit Terminate With Its Characteristic Impedance	๗๕
ภาพที่ ๓-๑๑ Balanced Line	๗๕
ภาพที่ ๓-๑๒ Unbalance Line	๗๖
ภาพที่ ๓-๑๓ การป้อนไฟ DC ให้กับสายส่งกำลัง	๘๐
ภาพที่ ๓-๑๔ ตัวอย่างวงจรที่ ๑	๘๐
ภาพที่ ๓-๑๕ ตัวอย่างวงจรที่ ๒	๘๑
ภาพที่ ๓-๑๖ ตัวอย่างวงจรที่ ๓	๘๒

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๓-๑๗ ตัวอย่างวงจรที่ ๔	๘๔
ภาพที่ ๓-๑๘ Charge Analysis	๘๕
ภาพที่ ๓-๑๙ แบบของสายส่งกำลังที่มีความยาวจำกัดต่อไว้แบบวงจรเปิด	๘๖
ภาพที่ ๓-๒๐ สายส่งกำลังที่ Shorted ปลายสาย	๘๘
ภาพที่ ๓-๒๑ ความสัมพันธ์ที่มีอยู่ระหว่าง Incident Wave กับ Reflected Wave ในสายส่งกำลังแบบปลายเปิด	๘๙
ภาพที่ ๓-๒๒ Conventional Picture of Standing Wave	๙๐
ภาพที่ ๓-๒๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงไฟ	๙๐
ภาพที่ ๓-๒๔ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงไฟ กระแสและความต้านทานในระยยะต่าง ๆ ของสายแบบปลายเปิด	๙๒
ภาพที่ ๓-๒๕ Schematic For Problem	๙๕
ภาพที่ ๓-๒๖ Impedance Along Quarter Wave Line	๙๖
ภาพที่ ๓-๒๗ Quarter Wave Matching Transformer	๙๗
ภาพที่ ๓-๒๘ Metallic Insulators	๙๘
ภาพที่ ๓-๒๙ Harmonic	๙๙
ภาพที่ ๓-๓๐ Series Even Harmonic Filter Generator ไปสู่ Load	๙๙
ภาพที่ ๓-๓๑ Second Harmonic Frequency	๑๐๐



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และ/หรือคำย่อ	ความหมายและ/หรือคำเต็ม
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VLf	Very Low Frequency
LF	Low Frequency
MF	Medium Frequency
HF	High Frequency
MUF	Maximum Usable Frequency
LUF	Lowest Usable Frequency
LOS	Line Of Sight
Pr	กำลังของสายอากาศอ้างอิง (มาตรฐาน)
Pt	กำลังของสายอากาศที่ทดสอบ
Ra	ความต้านทานของสายอากาศ
Rr	ความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่น
BALUN	Balance to Unbalance
L	Distributed Inductance
C	Distributed Capacitance
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
RL	Load Resistance
Freq.	Frequency

## บทที่ ๑

### การแพร่กระจายคลื่น (Propagation Of Waves)

ในระบบสื่อสาร การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับต้องส่งสัญญาณผ่านตัวกลาง โดยตัวกลางที่เรารู้จักและคุ้นเคยกันดีคือ สายส่ง เช่น สายโทรศัพท์ สายเคเบิลใต้น้ำ สายเคเบิลใยแก้ว เป็นต้น ยังมีตัวกลางอีกประเภทที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายที่สุด นั่นคืออากาศ หรืออวกาศ เป็นตัวกลางที่มีอยู่ทั่วไป การรับส่งสัญญาณผ่านตัวกลางประเภทนี้ ต้องผ่านทางสายอากาศ ด้วยวิธีการแพร่กระจายคลื่น โดยในส่วนแรก เราจะทบทวนถึง การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation) ธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (Propagation) การลดทอน (Attenuation) และการดูดกลืน เมื่อคลื่นเดินทาง (Absorption) ตลอดจนการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การแทรกสอด (Interference) และ การเลี้ยวเบน (Diffraction) ส่วนที่สองจะกล่าวถึงรายละเอียดการแพร่กระจายคลื่น

#### ๑. การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อกำลังงานไฟฟ้าถูกป้อนเข้าไปในวงจรซึ่งมีส่วนประกอบเป็นรีแอคทีฟ เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังงานส่วนหนึ่งจะหลุดออกไปอวกาศว่าง (Free Space) เราเรียกว่าเกิดการแผ่พลังงาน (Radiation) และกำลังงานนี้จะแพร่ออกไปในอวกาศว่าง ในรูปแบบที่เราเรียกกันว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อวกาศว่าง (Free Space) คือที่ว่างเปล่า ซึ่งไม่มีการสอดแทรกจากการแผ่พลังงานและการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ดังนั้น จึงไม่มีสนามแม่เหล็กและสนามโน้มถ่วง ไม่มีวัตถุแข็ง และไม่มีอนุภาคไอออน ความจริงแล้ว อวกาศว่างดูเหมือนว่าไม่เคยมีจริงที่ไหน และคงไม่อยู่ใกล้โลกแน่นอน อย่างไรก็ตามแนวคิดที่ใช้อวกาศว่าง ก็เพราะทำให้การเข้าถึงการแพร่กระจายคลื่นเป็นไปได้ง่ายขึ้น ทำให้เป็นไปได้ในการคำนวณที่สภาวะต่างๆ จากที่ว่างเปล่า แล้วจึงพยากรณ์ผลจากคุณสมบัติจริง บางครั้งสภาวะการแพร่กระจายก็ใช้ค่าประมาณการจากอวกาศว่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่เหนือกว่าย่าน UHF การแผ่พลังงานและการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ดังนั้นการอธิบายทั้งหมดจึงอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎี และยอมรับได้เพียงเป็นค่าทางการพยากรณ์ เช่น ใช้เพื่อการทำนายว่าจะเกิดอะไรขึ้นต่อไป ทฤษฎีของการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกเสนอข้อคิดเห็นโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ในปี ค.ศ.๑๘๕๗ และสุดท้ายในปี ค.ศ.๑๘๗๓ เป็นการนำหลักการทางคณิตศาสตร์อธิบายถึงพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า สมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งคงไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้

### ๑.๑ หลักมูลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแกว่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในอวกาศว่าง (Free Space) จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสงคือ

$$v_c = 299,792,500 \pm 300 \text{ m / s}$$

$$\approx 3 \times 10^8 \text{ m / s}$$

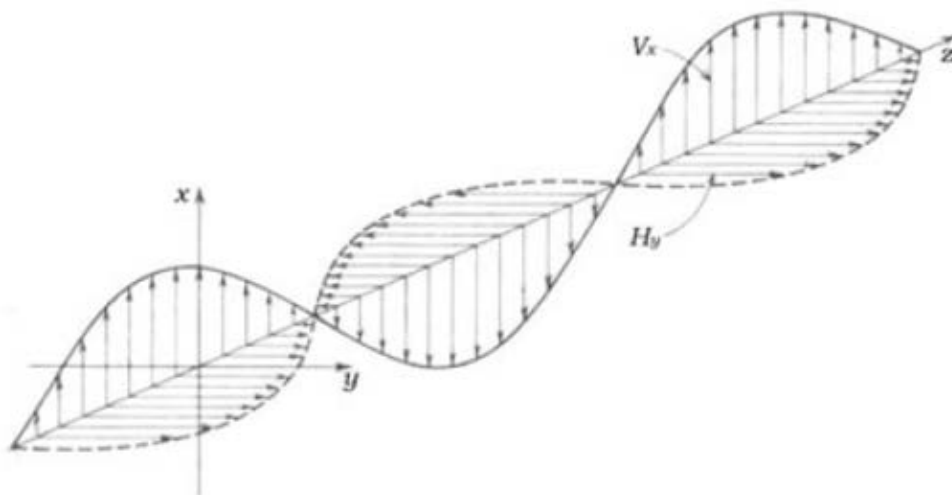
เป็นค่าคงที่ที่ได้มาจาก

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m / s}$$

เมื่อ

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H / m}$$

$$\epsilon_0 = 1 / 36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F / m}$$



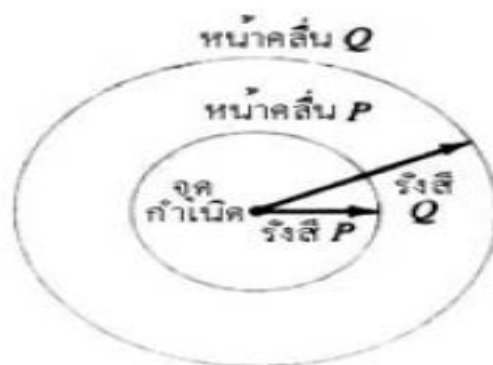
ภาพที่ ๑-๑ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง

การแพร่กระจายคล้ายๆ กับการเคลื่อนที่ออกของคลื่นหลังจากที่เราโยนก้อนหินลงในสระน้ำ แต่ก็มีข้อแตกต่างกันอย่างมากตรงที่ คลื่นน้ำเป็น Longitudinal คือ แกว่งในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่กระจาย ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น Transverse คือ แกว่งในทิศทางตั้งฉากกันกับทิศทางการแพร่กระจาย ดังนั้น สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และทิศทางการแพร่กระจาย ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังแสดงในภาพที่ ๑-๑ ซึ่งเป็นสมมุติฐานทางทฤษฎีที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ เพราะเรามองไม่เห็นคลื่น แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถใช้ในการพยากรณ์

พฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกสภาวะการณ์ เช่น การสะท้อน การหักเห และการเลี้ยวเบนที่จะกล่าวถึงต่อไป

### ๑.๑.๑ คลื่นในอวกาศว่าง

เนื่องจากการที่ไม่มีสิ่งสอดแทรกหรือสิ่งกีดขวางในอวกาศว่าง ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงสามารถแผ่จากจุดแหล่งกำเนิดอย่างเป็นระเบียบในทุกทิศทาง โดยมีหน้าคลื่น (Wave Front) เป็นรูปทรงกลม ดังภาพตัดแสดงในภาพที่ ๑-๒ หรือจะอธิบายง่ายๆ โดยการจินตนาการว่า คือ เส้นรังสีออกจากศูนย์กลางของแสงในทุกทิศทางมาตั้งฉากกับพื้นหน้าคลื่นเหมือนกับซี่ล้อ



ภาพที่ ๑-๒ หน้าคลื่นรูปทรงกลม

ที่ระยะความยาวเท่ากับรังสี  $P$  คลื่นมีเฟสที่แน่นอนออกจากแหล่งกำเนิด ในขณะที่แรงดัน และกระแสสูงสุดถูกบดบังเข้าวงจร เช่น ที่แวกเตอร์สูงสุดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก หากระยะทางการเดินทางเท่ากันหมด ความเข้มของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าชั่วขณะนั้น เท่ากับศูนย์ทุกจุด หากต่อทุกๆจุด ที่เท่ากันนี้เป็นพื้นเดียวกัน นั่นคือค่าจำกัดความของหน้าคลื่น (Wave Front) ซึ่งในที่นี้ ก็คือรูปทรงกลม หากความยาวของรังสี  $Q$  ยาวเป็นสองเท่าของรังสี  $P$  พื้นที่ของทรงกลมรัศมี  $Q$  ย่อมมากกว่าเป็นสี่เท่าของพื้นที่ทรงกลมรัศมี  $P$  จะเห็นได้ว่ากำลังงานทั้งหมดจากแหล่งกำเนิด จะต้องแผ่ให้ครอบคลุมพื้นที่เป็นสี่เท่า เมื่อระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดเป็นสองเท่า ดังนั้นหากความเข้มของกำลังงาน ถูกกำหนดเป็นการแพร่กำลังงานต่อหน่วยพื้นที่แล้ว ที่ระยะทางห่างออกไปเป็นสองเท่า ความเข้มของกำลังงานจะลดลงสี่เท่าจะเห็นได้ว่าความเข้มของกำลังงาน ผกผันกลับกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดกำลังสองหรือ

$$P = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$

(๑)

ในเมื่อ  $P$  = ความหนาแน่นกำลังงานที่ระยะทาง  $r$  ห่างจากแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก

$P_t$  = กำลังเครื่องส่ง

แหล่งกำเนิด ไอโซทรอปิก เป็นชื่อของแหล่งกำเนิดที่มีการแผ่พลังงานสม่ำเสมอทุกทิศทางในอวกาศว่าง ถึงแม้ว่าแหล่งกำเนิดเช่นนี้ จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่แนวความคิดของการแผ่พลังงานชนิดไอโซทรอปิก มีประโยชน์และใช้กันบ่อย ที่น่าสนใจอีกอย่างก็คือ แม้ว่าแหล่งกำเนิดไม่ใช่ไอโซทรอปิก กฎของส่วนกลับกำลังสองก็ยังคงนำมาใช้สำหรับหน้าคลื่นรูปทรงกลม ความเร็วของการแผ่พลังงานจะต้องคงที่ทุกๆจุด และตัวกลางที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายถูกต้องเช่นนี้ ก็เรียกว่า ไอโซทรอปิก เช่นเดียวกัน ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็มีความสำคัญมากปริมาณของทั้งสองสิ่งนี้ เป็นส่วนโดยตรงของแรงดันและกระแสในวงจร หน่วยของการวัดเป็นโวลต์ต่อเมตร และแอมแปร์ต่อเมตร ตามลำดับ

สำหรับวงจรไฟฟ้าเรามี

$$V = ZI$$

ดังนั้นสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$E = ZH \quad (๒)$$

ในเมื่อ

$E$  = ค่า rms ของความแรงสนาม (Field Strength) หรือ ความเข้ม มีหน่วยเป็น  $V/m$ .

$H$  = ค่า rms ของความแรงสนาม (Field Strength) แม่เหล็ก หรือ ความเข้ม มีหน่วยเป็น  $A/m$ .

$Z$  = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของตัวกลาง มีหน่วยเป็น  $\Omega$

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ของตัวกลางหาได้จาก

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (๓)$$

ในเมื่อ

$\mu$  = ความซาบซึ่มได้(permeability)ของตัวกลาง

$\epsilon$  = สภาพยอม(permittivity)ทางไฟฟ้าของตัวกลาง

สำหรับในอวกาศว่าง

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H / m}$$

$$\epsilon = 1 / 36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F / m}$$

จากหน่วยของทั้งสองค่านี้ เราก็คงจะพอทราบได้ว่า ความเข้มขาบได้เป็นสมมูลของตัวเหนี่ยวนำ และสภาพยอมเป็นสมมูลของตัวเก็บประจุ ในวงจรไฟฟ้า และจากสมการที่ (๓) เราก็คงสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในอวกาศว่างได้คือ

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{1/36\pi \times 10^9}} = \sqrt{144\pi^2 \times 100}$$

$$= 120\pi = 377\Omega \quad (๔)$$

ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะคำนวณหาความเข้มสนามที่ระยะห่าง  $r$  จากแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก และจาก  $P = V^2/Z$  ในวงจรไฟฟ้า

ดังนั้น  $P = E^2/Z$  สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ  $E = \sqrt{PZ}$

แทนค่า  $P$  จากสมการที่ (๑) และค่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะในอวกาศว่าง จะได้

$$E = \sqrt{\frac{P_t}{4\pi r^2} \times 120\pi} = \sqrt{\frac{30P_t}{r^2}}$$

$$E = \frac{\sqrt{30P_t}}{r} \quad (๕)$$

จากสมการที่ (๕) จะเห็นได้ว่าความเข้มสนามผกผันกลับกับระยะทางจากแหล่งกำเนิด แต่ผกผันตรงกับรากที่สองของความหนาแน่นกำลังงาน สุดท้ายลองมาพิจารณาน้ำคลื่นอีกครั้ง ดังที่เคยกล่าวมาแล้วว่าน้ำคลื่นเป็นรูปเชิงทรงกลมในตัวกลางไอโซทรอปิก แต่ในกรณีพื้นที่น้อยและระยะทางไกลจากแหล่งกำเนิดมาก เราสามารถพิจารณาน้ำคลื่นเป็นเชิงระนาบได้ ซึ่งเห็นได้ชัดทางเรขาคณิต จากตำบลดั้งและจากที่เราพบบ่อยๆ เช่น เราจะบอกว่าสนามฟุตบอลมีลักษณะแบน แม้จะรู้ว่าโลกเป็นรูปทรงกลม แต่เมื่อพิจารณาระยะทางจากจุดศูนย์กลางมายังผิวเทียบกับพื้นที่สนามฟุตบอล ซึ่งน้อยมาก แนวคิดเรื่องคลื่นเชิงระนาบนี้มีประโยชน์มาก เพราะทำให้เข้าใจง่ายต่อวิธีแสดงคุณสมบัติทางแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การสะท้อนและการหักเห

### ๑.๑.๒ การแผ่พลังงานและการรับ

สายอากาศเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือการแพร่กระจายเป็นผลจากการไหลของกระแสความถี่สูงในวงจรที่เหมาะสม ซึ่งสามารถพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ ที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ตัวลวด และหากสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงจากไฟกระแสสลับ ก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเช่นกัน ซึ่งสัดส่วนระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่สามารถหลุดไปจากเส้นลวดตัวนำที่เป็นสายอากาศมากนัก จะสัมพันธ์กับความยาวสายอากาศต่อความยาวคลื่นของกระแสที่ไหลผ่าน

### ๑.๑.๓ โพลาริเซชัน (Polarization)

จากภาพที่ ๑-๑ เราจะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับเส้นลวด ส่วนสนามไฟฟ้าจะขนานกับเส้นลวดและทรวงตรงนี้ ก็จะเป็นรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปจากเส้นลวด ดังนั้นจึงเกิดขั้วของคลื่นที่แพร่กระจายจากสายอากาศ เรียกว่า โพลาริเซชัน ซึ่งจะเป็นเชิงเส้นคงที่ตลอด เช่น สายอากาศชนิดแนวตั้ง (Vertical) จะแพร่กระจายคลื่นโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวตั้ง จึงเรียกว่า เวกติคอลโพลาริซ์ (Vertical Polarized) และในภาพที่ ๑-๑ ก็จะเป็นว่า เวกติคอลโพลาริซ์ ส่วนสายอากาศชนิดแนวนอน (Horizontal) ก็จะแพร่กระจายคลื่นโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวนอน จึงเรียกว่า ฮอริซอนทอลโพลาริซ์ (Horizontal Polarized) สำหรับดวงอาทิตย์การแพร่กระจายแสงจะมีเวกเตอร์สะเปะสะปะไม่แน่นอน เราจึงเรียกว่า แรนดอมโพลาริซ์ (Random Polarized) นอกจากนี้ยังมีสายอากาศที่เรียกว่า เฮลิคอล (Helical) เวกเตอร์ไฟฟ้าของการแพร่กระจายจะหมุนเป็นวง เราจึงเรียกว่า เซอคูล่าโพลาริซ์ (Circular Polarized) ในการติดตั้งสายอากาศส่งและรับ จะต้องมีโพลาริซ์เหมือนกันจึงจะรับสัญญาณได้ดีที่สุด

### ๑.๑.๔ การรับ (Reception)

ลวดที่มีกระแสความถี่สูงไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ล้อมรอบ ดังนั้นหากเราเอาลวดอีกเส้นไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็เกิดการเหนี่ยวนำในตัวมัน เราจึงพูดได้ว่าลวดได้รับส่วนของการแพร่กระจายหรือเป็นสายอากาศรับนั่นเอง แม้ว่ากระบวนการรับจะกลับกันกับกระบวนการส่ง แต่สายอากาศส่งและรับสามารถสับเปลี่ยนกันได้ ยกเว้นเรื่องขนาด ในการรองรับกำลังงานแล้ว สายอากาศทั้งสองชนิดนี้จะเทียบเท่ากันในคุณสมบัติทุกประการ เช่น อิมพีแดนซ์และแพทเทิน (Pattern) ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถพิสูจน์ได้ทางคณิตศาสตร์

## ๑.๒ คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### ๑.๒.๑ การลดทอนและการดูดกลืน (Attenuation and Absorption)

กฎกำลังสองผกผัน แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกำลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกลดทอนลงเมื่อระยะทางไกลออกไป โดยการลดทอนจะเป็นสัดส่วนตรงกับระยะทางยกกำลังสอง การลดทอนมีหน่วยวัดเป็น เดซิเบล (Decibels) หรือ เนเปอร์ (Nepers) โดย  $1 \text{ Nepers} = 8.686 \text{ dB}$  การลดทอนของความหนาแน่นกำลังกับความเข้มสนามจะมีค่าเท่ากัน กำหนดให้  $P_1$  และ  $E_1$  แทนความหนาแน่นของกำลังงานและความเข้มสนาม ตามลำดับ ที่ระยะทาง  $r_1$  จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ  $r_2$  เป็นระยะที่ห่างออกไปมีค่า  $P_2$  และ  $E_2$  การลดทอนของกำลังงาน ที่ระยะไกลเทียบกับที่ระยะใกล้ เป็นเดซิเบลจะได้

$$\alpha_p = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{P_t / 4\pi r_1^2}{P_t / 4\pi r_2^2} = 10 \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (๖)$$

เช่นเดียวกันกับการลดทอนของความเข้มสนาม เราจะได้

$$\alpha_E = 20 \log \frac{\sqrt{30P_t} / r_1}{\sqrt{30P_t} / r_2} = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (๖')$$

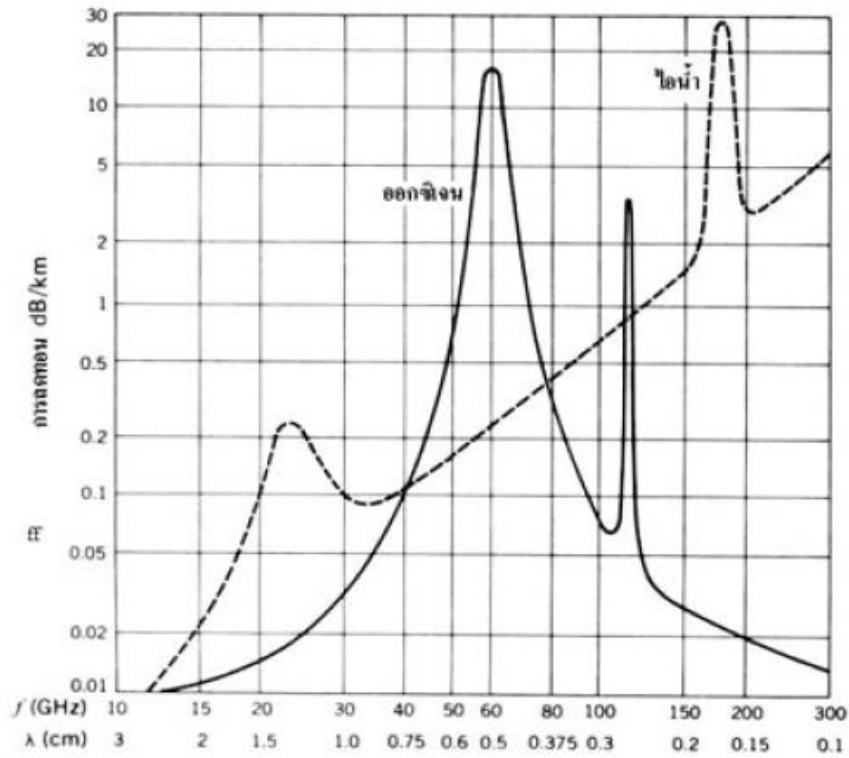
จะเห็นได้ว่าทั้งสองสูตรเหมือนกันและที่ระยะห่างออกไป  $2r$  จากแหล่งกำเนิดของคลื่น ทั้งความหนาแน่น กำลัง และความเข้มสนาม จะมีค่าลดลงเท่ากับ 6 dB เทียบกับระยะห่างที่เท่ากับ  $r$  ในอวกาศว่างจะไม่มีสิ่งใดดูดกลืนคลื่นวิทยุ แต่ในชั้นบรรยากาศสัณฐานวิทยุจะถูกดูดกลืนบางคลื่น ทั้งนี้เพราะว่าพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกถ่ายโอนไปเป็นอะตอมและโมเลกุลของชั้นบรรยากาศ การถ่ายโอนนี้ จะทำให้อะตอมและโมเลกุลสั่นบ้าง แต่ในขณะที่ชั้นบรรยากาศมีความอบอุ่น จะเกิดการดูดกลืนน้อยมาก และโชคติที่ความถี่ต่ำกว่า 10 GHz. แทบไม่มีการดูดกลืนเลย ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ ๑-๓ การดูดกลืนที่เกิดจากออกซิเจนและไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จะเริ่มมากขึ้นที่ความถี่สูงขึ้นไปบางความถี่ จะถูกดูดกลืนสูงมากเนื่องจากเกิดการรีโซแนนซ์ของโมเลกุล เช่น ที่ความถี่ 60 GHz. และ 120 GHz. จึงไม่แนะนำให้แพร่กระจายคลื่นทางไกลในชั้นบรรยากาศที่ความถี่นี้ นอกจากนี้สำหรับการดูดกลืนจากออกซิเจน เราจะเรียกว่าเป็นช่องหน้าต่างที่มีการดูดกลืนสูงระหว่าง 33 - 110 GHz. และเช่นเดียวกันการดูดกลืนของไอน้ำที่ความถี่ 23 GHz. กับ 180 GHz. ก็ไม่เหมาะที่จะแพร่กระจายคลื่น ยกเว้นในกรณีที่อากาศแห้งมาก ภาพที่ ๑-๓ แสดงการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศแยกเป็นสองส่วน ในส่วนของการดูดกลืนที่เกิดจากไอน้ำเป็นค่าจากความชื้นมาตรฐาน แต่ถ้าความชื้นเพิ่มขึ้น เช่น เกิดมีหมอก มีฝนหรือหิมะ การดูดกลืนจะเพิ่มมากขึ้นทันที และการสะท้อนจากหยดน้ำฝนก็มีผลมาก เช่น ระบบเรดาร์ความถี่ 10 GHz. สามารถใช้ได้ดีที่ระยะ 75 km. ในอากาศแห้ง ลดลงเหลือ 68 km. เมื่อฝนตกปรอยๆ เหลือระยะ 55 km. ในฝนตกบางๆ เหลือระยะ 22 km. หากฝนตกพองประมาณ และเหลือระยะเพียง 8 km. เมื่อฝนตกหนัก แสดงให้เห็นผลความรุนแรงของการดูดกลืนที่ความถี่ไมโครเวฟ แต่จะเกิดขึ้นน้อยมากที่ความถี่ต่ำ ยกเว้นที่ระยะทางการส่งไกลมากๆ

### ๑.๒.๒ ผลจากสิ่งแวดล้อม

เมื่อการแพร่กระจายคลื่นเกิดขึ้นใกล้ๆ โลก จะมีปัจจัยอื่นที่ไม่มีในอวกาศว่าง เช่น การสะท้อน (Reflection) จากพื้นดิน ภูเขา และตึกหรือสิ่งก่อสร้าง คลื่นเกิดการหักเห (Refraction) เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน หรือการเกิดไอออนต่างองศา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) อ้อมมวลวัตถุที่สูง คลื่นอาจเกิดการแทรกแซง (Interference) ระหว่างกันเมื่อสองคลื่นจากแหล่งกำเนิดเดียวกันมาพบกัน หลังจากเดินทาง

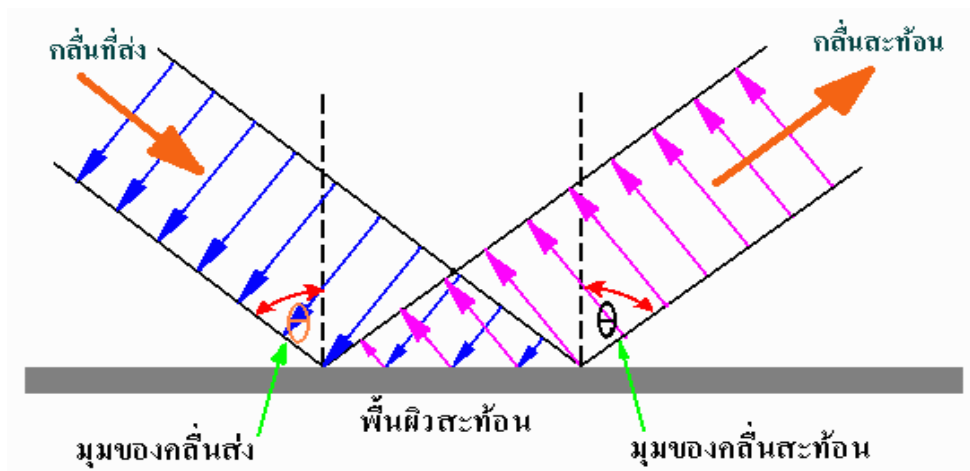


มาจากทางต่างกัน คลื่นอาจจะถูกดูดกลืนโดยตัวกลางที่ต่างกัน ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้ เราจะพิจารณาในรายละเอียดแต่ละหัวข้อต่อไป



ภาพที่ ๑-๓ แสดงการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศ

๑.๒.๓ การสะท้อนของคลื่น

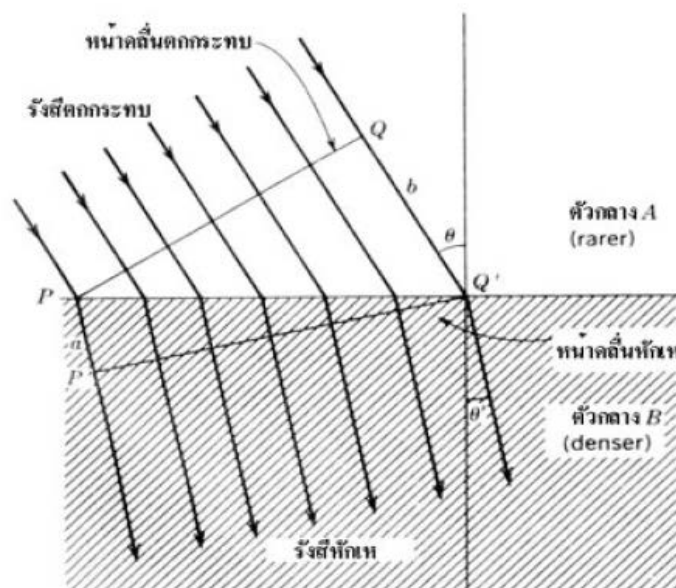


ภาพที่ ๑.๔ การสะท้อนของคลื่น

การสะท้อนของแสงจากกระจกเงากับการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากตัวกลางที่เป็นตัวนำมีความเหมือนกันคือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ดังแสดงในภาพที่ ๑.๔ ในกรณีลำคลื่นตกกระทบ เส้นตั้งฉากและลำคลื่นสะท้อนเป็นระนาบเดียวกัน แนวความคิดในการใช้ แหล่งกำเนิดจินตภาพ ก็จะทำให้ประโยชน์การพิสูจน์ความเท่ากันของมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนและ ตามด้วยการพิสูจน์ที่เรียกว่ากฎที่สองของการสะท้อนของแสง จะต้องอยู่บนพื้นฐานความจริงที่ว่า ความเร็วในการเดินทางของคลื่นที่ตกกระทบกับคลื่นสะท้อนต้องเท่ากัน การสะท้อนของคลื่นมีความ คล้ายคลึงกับการสะท้อนแสงด้วยกระจก ถ้าเราเคยเข้าไปในร้านตัดผมที่มีกระจกทั้งด้านหน้าและ ด้านหลัง จะเห็นภาพซ้อนกันจำนวนมากมาย แต่ถ้าสังเกตให้ดีจะเห็นภาพเหล่านั้นแต่ละภาพค่อยๆ ลดความสว่างลง ทั้งนี้เพราะเกิดการดูดกลืนในการสะท้อนแต่ละครั้ง ซึ่งจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับ คลื่นวิทยุ จึงกำหนดสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน  $\rho$  เป็นอัตราส่วนความเข้มไฟฟ้าของคลื่นสะท้อน ต่อคลื่นที่ตกกระทบ หากผิวตัวนำที่ทำให้เกิดการสะท้อนสมบูรณ์ก็จะมีค่าเท่ากับ ๑ แต่โดยปกติ จะน้อยกว่า ๑ ในทางปฏิบัติ อันเป็นผลให้เกิดการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นโดยตัวนำที่ไม่สมบูรณ์

#### ๑.๒.๔ การหักเห

เช่นเดียวกับกับแสง การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อคลื่น แพร่กระจายผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ความเร็วของคลื่น จะเปลี่ยนจึงทำให้หน้าคลื่นเปลี่ยนแนวในตัวกลางที่สอง พิจารณาจากภาพที่ ๑-๕ ตัวกลาง A มีความ หนาแน่นน้อยกว่าตัวกลาง B เมื่อลำคลื่นผ่านตัวกลาง A ไปยังตัวกลาง B ด้วยมุมที่ไม่ใช่  $90^\circ$  ตาม หน้าคลื่น P-Q และเมื่อผ่านเข้าตัวกลาง B หน้าคลื่นเปลี่ยนแนวเป็น P'-Q' รังสี b เดินทางด้วย ความเร็วในตัวกลาง ได้ระยะทาง Q-Q' ในขณะที่เดียวกันรังสี a เดินทางด้วยความเร็วในตัวกลาง B ได้ระยะทาง P-P' โดย P-P' จะสั้นกว่า Q-Q' เพราะความเร็วคลื่นในตัวกลาง B จะช้ากว่า



ภาพที่ ๑-๕ การหักเหของคลื่น

ความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบ  $\theta$  กับมุมหักเห  $\theta'$  สามารถคำนวณโดยอาศัยตรีโกณมิติ และเรขาคณิตต่างๆ ให้พิจารณาจากสามเหลี่ยมมุมฉาก  $PQQ'$  และ  $PP'Q'$  เราได้ว่า

$$\widehat{PQ'Q} = \theta \quad \text{และ} \quad \widehat{P'Q'P} = \theta' \quad (๗)$$

$$\text{และ} \quad \frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{PP' / PQ'}{QQ' / PQ'} \frac{PP'}{QQ'} = \frac{v_B}{v_A} \quad (๘)$$

$$\text{ในเมื่อ } v_A = \text{ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง A} = \frac{v_c}{\sqrt{k}}$$

$$v_B = \text{ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง B} = \frac{v_c}{\sqrt{k'}}$$

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \sqrt{\frac{k}{k'}} = \frac{1}{\mu} \quad (๙)$$

ในเมื่อ  $k$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลาง A

$k'$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลาง B

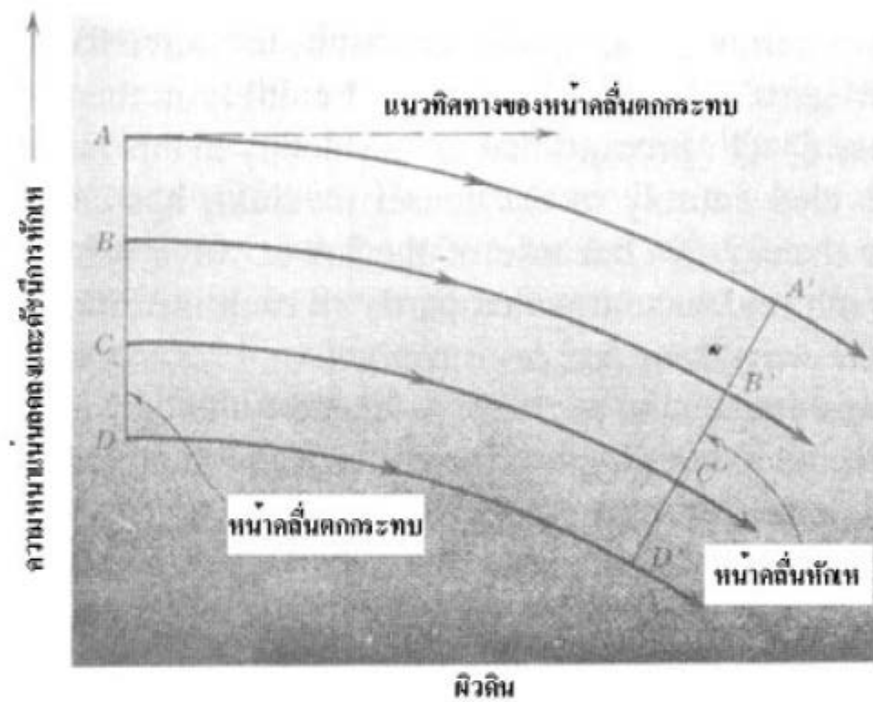
$\mu$  = ดัชนีการหักเห

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ ๑ และในอากาศมีค่าใกล้เคียง ๑ หากรอยต่อระหว่างตัวกลางมีความหนาแน่นแตกต่างกันทันที ลำคลื่นก็จะหักเหดังในภาพที่ ๑-๕ แต่ถ้าความหนาแน่นระหว่างรอยต่อค่อยๆ เปลี่ยนและเป็นเชิงเส้น การหักเหของคลื่นจะเป็นเส้นโค้งดังแสดงในภาพที่ ๑-๖ และในชั้นบรรยากาศเหนือโลก ความหนาแน่นจะค่อยๆ เปลี่ยนไปอย่างเชิงเส้นกับความสูงโดยความหนาแน่นด้านบนจะบางกว่าด้านล่าง และคลื่นส่วนบนจึงเดินทางเร็วกว่าส่วนล่าง ทำให้การหักเหของลำคลื่นโค้งลง แทนที่จะพุ่งเป็นเส้นตรงด้วยเหตุนี้ขอบเขตการส่งวิทยุจึงเพิ่มขึ้นทางแนวนอน

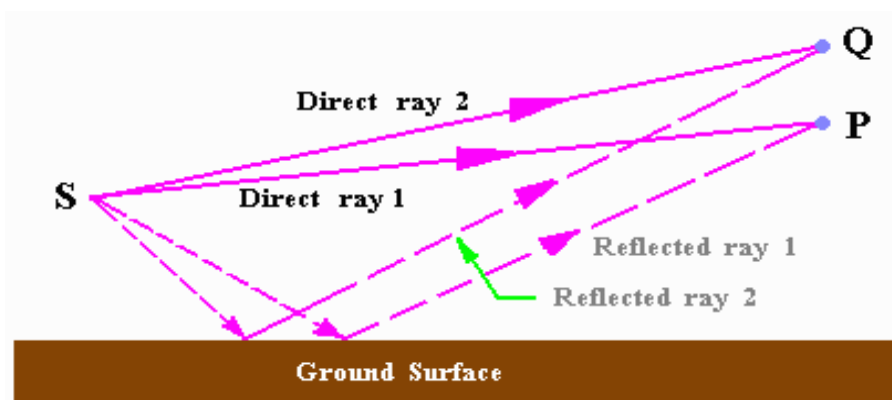
### ๑.๒.๕ การแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแทรกแซงหรือการรบกวนจะเกิดขึ้นเมื่อสองคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันแต่เดินทางไปคลื่นละทางจนถึงจุดหมาย ซึ่งมักเกิดขึ้นบ่อยในย่านความถี่สูงที่แพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นฟ้า (Sky Wave) และย่านความถี่ไมโครเวฟที่แพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นอวกาศ (Space Wave) แต่ในที่นี้เราจะมาพิจารณากันเฉพาะกรณีหลัง จากภาพที่ ๑-๗ สายอากาศไมโครเวฟที่ P และ Q ติดตั้งใกล้พื้นดินที่มีความสูงต่างกัน รับสัญญาณที่ส่งมาจากจุด S สัญญาณ

ที่มาถึงสายอากาศไม่เฉพาะสัญญาณตรงอย่างเดียวแต่จะมีสัญญาณที่สะท้อนมาจากพื้นดินด้วย สัญญาณตรงจะมีระยะทางสั้นกว่าระยะทางของสัญญาณสะท้อน มาดูที่สายอากาศ P หากเส้นทาง 1 กับเส้นทาง 1' ต่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น สัญญาณทั้งสองจะเกิดการหักล้างกันหมดที่จุด P หากว่าสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นดินสะท้อนอย่างสมบูรณ์ ทำนองคล้ายกันที่สายอากาศ Q หากเส้นทาง 2 และ 2' ต่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น สัญญาณที่ Q จะเสริมกันซึ่งมากหรือน้อยก็ขึ้นกับการสะท้อนจากพื้นดิน

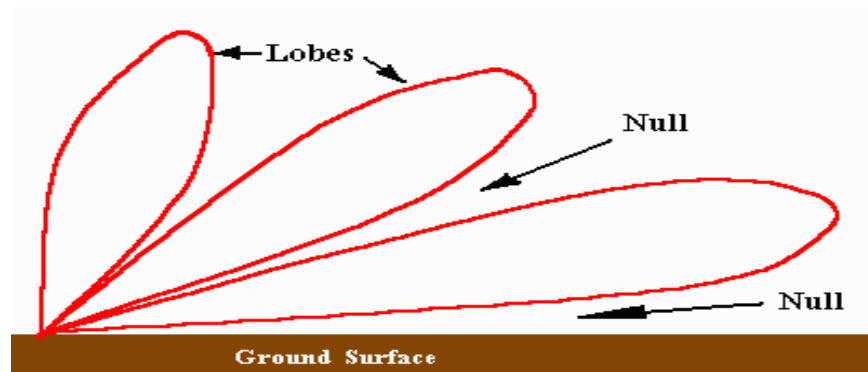


ภาพที่ ๑-๖ แสดงการหักเหของคลื่นในตัวกลางที่มีความหนาแน่นค่อยๆ ลดลงอย่างเชิงเส้น

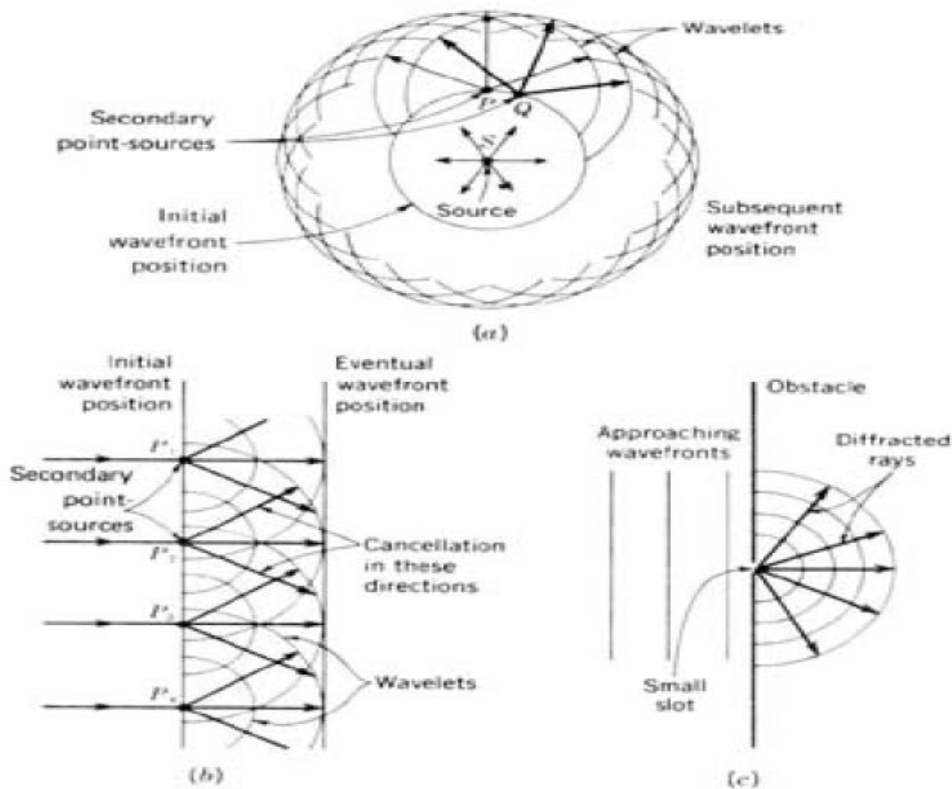


ภาพที่ ๑-๗ การแทรกแซงของสัญญาณตรงกับสัญญาณสะท้อน

ความต่างกันที่ระยะใกล้ๆกันจากข้างบนและข้างล่างจึงเกิดขึ้น ลักษณะรูปแบบจากการแทรกแซง ประกอบด้วย การสลับของการหักล้างและการเสริมกันของสัญญาณ สามารถวัดความเข้มสนาม (Field-strength) จริงและนำมาคำนวณหรือพล็อต ดังภาพที่ ๑-๘ ตรงที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Null) หรือบอดเกิดจากสัญญาณหักล้างกันเช่นที่จุด P และตรงที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นพหุ (Lobes) เกิดจากสัญญาณเสริมกันเช่นที่จุด Q ดังนั้นในกรณีนี้การเพิ่มกำลังส่งของเครื่องส่งให้แรงขึ้น จึงไม่ได้ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ทุกๆตำแหน่ง เพียงแต่เลื่อนตำแหน่งหรือปรับมุมการรับของสายอากาศให้ถูกต้อง ก็สามารถรับได้ดีแล้ว



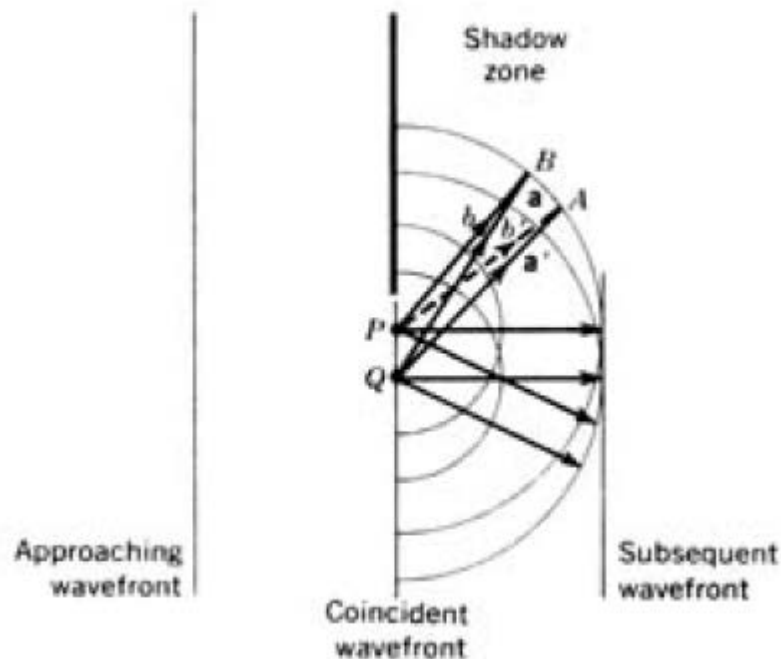
ภาพที่ ๑-๘ รูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) จากการแทรกแซง



ภาพที่ ๑-๙ การเลี้ยวเบน (Diffraction) (a) เกิดจากหน้าคลื่นทรงกลม (b) จากหน้าคลื่นแนวระนาบ (c) เกิดจากช่องเล็กๆ

### ๑.๒.๖ การเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ (Diffraction of Radio Wave)

การเลี้ยวเบนของคลื่นเป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มักเกิดขึ้นกับรูเล็กๆบนระนาบตัวนำ หรือมุมที่คมของสิ่งขีดขวางวิถีคลื่น ซึ่ง Huygens เป็นผู้ค้นพบ ตั้งแต่ศตวรรษที่ ๑๗ โดย Huygens กล่าวว่าทุกๆจุดของหน้าคลื่นทรงกลมจะเป็นแหล่งกำเนิดทุติยภูมิที่แพร่คลื่นไกลออกไปดังในภาพที่ ๑-๙ (a) สนามรวมทั้งหมดที่พุ่งออกจากแหล่งกำเนิด จะเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของจุดกำเนิดทุติยภูมิเหล่านี้ในกรณีหน้าคลื่นแนวระนาบให้พิจารณา จากภาพที่ ๑-๙ (b) การเกิดแหล่งกำเนิดทุติยภูมิก็มีเช่นเดียวกัน แต่ทำไมหน้าคลื่นยังคงเป็นแนว ระนาบแทนที่จะแผ่ออก เหตุผลก็คือหากไม่จำกัดระนาบคลื่นจะเกิดการหักล้างกันของคลื่นในทิศทาง อื่นๆทั้งหมด ยังคงเหลือเฉพาะคลื่นในทิศทางเดิมอย่างไรก็ตามถ้าระนาบคลื่นจำกัด การหักล้าง จะไม่หมดเลยทีเดียว จึงอาจมีการลู่ออกหรือกระจัดกระจายบ้างเพียงแต่หน้าคลื่นมีขนาดเล็ก แต่ถ้า ในกรณีช่องเล็กๆของแนวขีดขวางดังภาพที่ ๑-๙ (c) คลื่นจะกระจายออกและแผ่ออกไปทุกทิศทาง

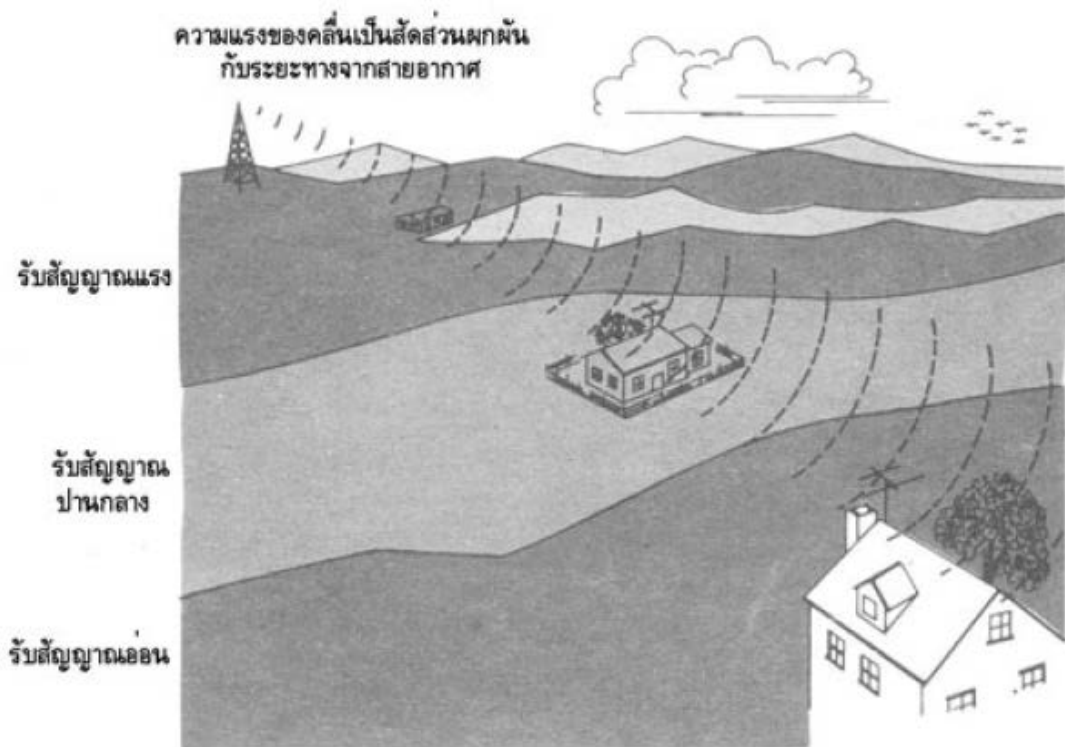


ภาพที่ ๑-๑๐ การเลี้ยวเบนรอบๆ มุมสิ่งกีดขวาง

สำหรับกรณีสิ่งกีดขวางดังภาพที่ ๑-๑๐ เมื่อหน้าคลื่นเจอมุมของ สิ่งกีดขวางจะเกิดการเลี้ยวเบน เช่น ที่จุด P และ Q ใกล้ๆมุมสิ่งกีดขวางคลื่นจะเบนออก ทำให้ ด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้รับคลื่น ซึ่งปกติถ้าไม่มีสิ่งกีดขวาง เวกเตอร์หน้าคลื่นอื่นจะหักล้างกันเหลือ แต่หน้าคลื่นเดิม การเลี้ยวเบนของคลื่นมีประโยชน์ในทางปฏิบัติที่เห็นชัด ๒ อย่างคือ หนึ่งทำให้ เครื่องรับซึ่งอยู่หลังสิ่งขีดขวาง เช่น ภูเขา หรือ ดึกสูงสามารถรับคลื่นอากาศ (Space Wave) ได้ และ สองใช้หลักการเลี้ยวเบนของคลื่นในการออกแบบสายอากาศไมโครเวฟ เพื่อลดพู่ข้าง (Side Lobes) ที่ไม่ต้องการ

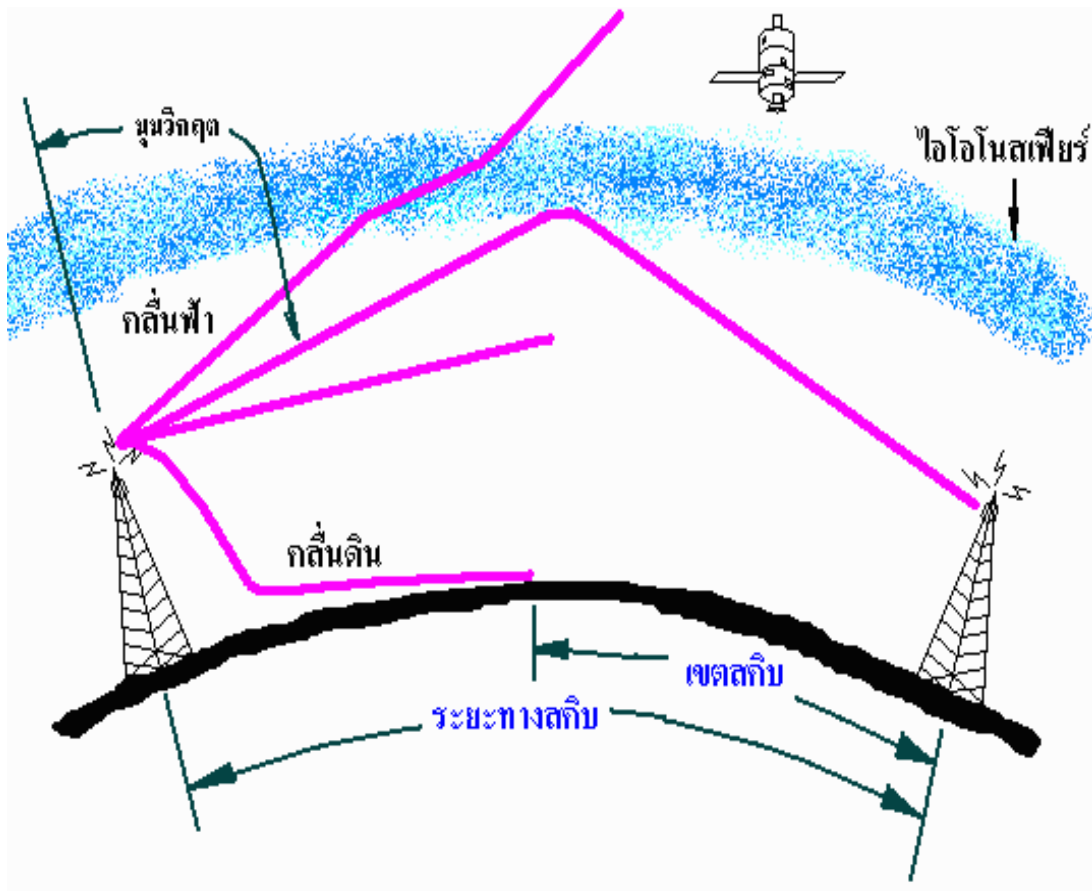
## ๒. การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น จะมีการแพร่ออกไปในทุกทิศทาง คลื่นวิทยุเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางไปได้ด้วยความเร็วเท่าแสง อย่างไรก็ตาม คลื่นวิทยุที่มีความถี่ไม่เท่ากันก็มีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นไม่เท่ากัน ในพื้นที่ที่ไกลออกไปจากสถานีส่ง คลื่นวิทยุก็มีความแรงลดลง สัญญาณจึงอ่อนลงๆ ดังในภาพที่ ๑-๑๑ ฉะนั้นเครื่องรับที่อยู่ใกล้เครื่องส่งมากกว่าย่อมรับสัญญาณได้แรง และคุณภาพของสัญญาณดีกว่าเครื่องรับที่อยู่ห่างออกไปจากเครื่องส่ง



ภาพที่ ๑-๑๑ เครื่องรับที่อยู่ใกล้สถานีส่งจะรับสัญญาณได้แรงกว่าเครื่องรับที่อยู่ไกลออกไปจากสถานีส่ง

เรานิยมแบ่งชนิดของคลื่นตามลักษณะการเดินทาง เช่น คลื่นดิน คลื่นอากาศ คลื่นฟ้า การเดินทางของคลื่นเหล่านี้แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง การใช้ประโยชน์คลื่นวิทยุเหล่านี้ จึงต้องเลือกความถี่ และการเดินทางของคลื่นให้เหมาะสม เพื่อให้คลื่นวิทยุสามารถเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยมีการลดทอนน้อยที่สุด ภาพที่ ๑-๑๒ แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ

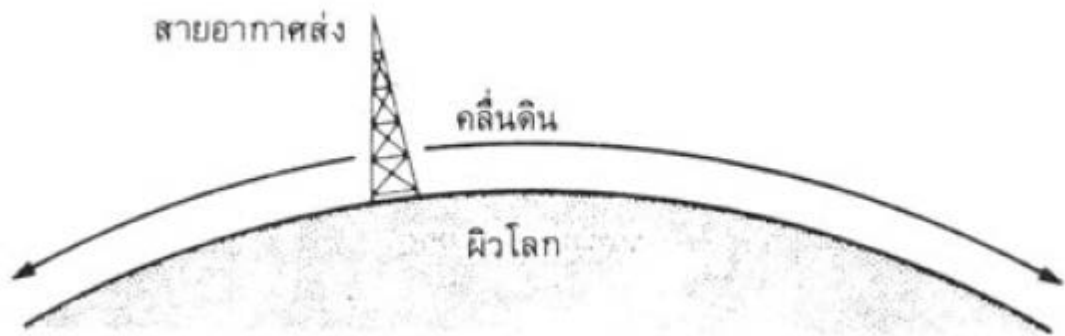


ภาพที่ ๑-๑๒ ลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ

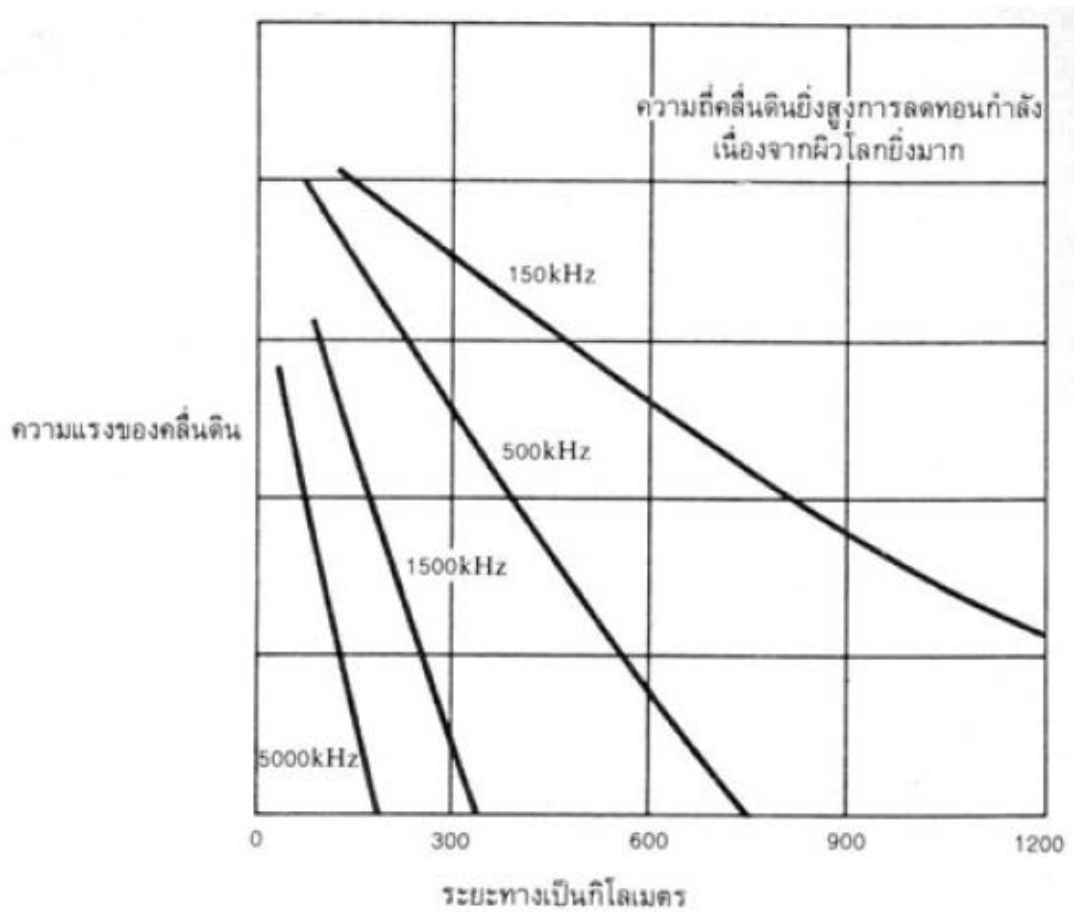
## ๒.๑ คลื่นดิน (Ground Wave)

คลื่นดินเป็นคลื่นวิทยุที่เดินทางไปบนผิวโลก บางครั้งเรียกว่าคลื่นผิว (Surface Wave) เราสามารถใช้คลื่นดินติดต่อสื่อสารกันได้ในย่านความถี่ต่ำ และปกติคลื่นดินที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า จะเดินทางไปได้ไกลกว่า และจะเดินทางไปไกลกว่าขอบฟ้า ดังภาพที่ ๑-๑๓ สำหรับคลื่นดินที่มีความถี่สูงขึ้นไปจะเดินทางไปไม่ไกล เพราะถูกลดทอนมาก เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศ หรือสิ่งกีดขวาง (ภาพที่ ๑-๑๔) เหตุผลก็คือ เมื่อความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะสั้นลง วัตถุที่ใหญ่เช่นภูเขาจึงมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น ยกตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 30 kHz ความยาวคลื่นจะเท่ากับ 10,000 m หรือ 6.2 miles เมื่อเทียบกับขนาดของภูเขาแล้ว ภูเขายังมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น ฉะนั้นการลดทอนคลื่นดินที่ความถี่นี้จะมึน้อย แต่ที่ความถี่ 3 MHz ความยาวคลื่นจะเป็น 100 m. วัตถุที่ใหญ่กว่าความยาวคลื่น เช่น ต้นไม้ เนินเขา อาคาร บ้าน จะเริ่มมีผลในการลดทอนคลื่นดิน





ภาพที่ ๑-๑๓ การเดินทางของคลื่นดิน

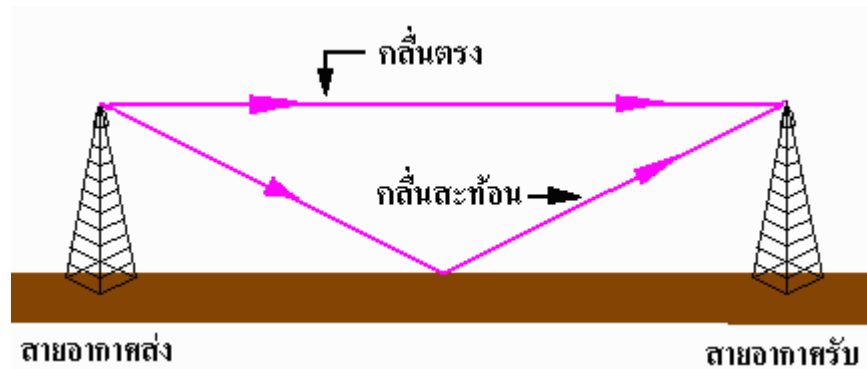


ภาพที่ ๑-๑๔ การลดทอนของคลื่นดินที่ความถี่ต่าง ๆ

วิธีการที่จะให้คลื่นดินแพร่ไปได้ไกลมากขึ้น ทำได้โดยการแพร่กระจายคลื่นให้มีโพลาริเซชันแนวตั้ง ในกรณีที่เราแพร่กระจายคลื่นให้มีโพลาริเซชันแนวราบ สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นขนานกับผิวโลก ฉะนั้นคลื่นดินจะเหมือนถูกลัดวงจร (ดูดกลืน) ด้วยการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของผิวโลก อย่างไรก็ตามเราใช้ประโยชน์คลื่นดินได้เฉพาะย่านความถี่ LF กับ MF เท่านั้น ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่มีความยาวในย่านความถี่นี้ จะสร้างได้ยากมาก เพราะมีขนาดใหญ่โตมโหฬาร ฉะนั้นเราจึงไม่ค่อยนิยมสื่อสารกันในย่านความถี่ LF แต่สำหรับย่านความถี่ MF เราสามารถติดต่อสื่อสารโดยคลื่นดินได้ เพราะขนาดสายอากาศในย่านความถี่นี้มีขนาดใหญ่ไม่มากนัก

## ๒.๒ คลื่นอากาศ

เมื่อความถี่ของคลื่นวิทยุสูงกว่า 4.5 MHz คลื่นดินเริ่มจะไปได้เพียงไม่กี่กิโลเมตร และเมื่อความถี่สูงขึ้นไปในย่าน VHF และ UHF คลื่นอากาศจะไปได้ไกลกว่าคลื่นดิน การติดต่อสื่อสารในย่านความถี่นี้ สายอากาศจะต้องอยู่ในระยะสายตา เพราะคลื่นอากาศเดินทางโดยตรงจากสายอากาศเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ บางครั้งจึงเรียกว่าคลื่นโดยตรง (Direct Wave) จากภาพที่ ๑-๑๕ คลื่นอากาศจะถูกจำกัดให้มีรัศมีการติดต่ออยู่ไม่เกินระยะสายตา ฉะนั้น ถ้าเราต้องการขยายการติดต่อสื่อสารให้ไกลขึ้น วิธีง่าย ๆ ก็คือต้องเพิ่มความสูงของสายอากาศ การติดต่อโดยคลื่นอากาศอีกแบบหนึ่ง ได้แก่ การติดต่อผ่านดาวเทียมหรือเครื่องบิน วิธีนี้ทำให้ความสูงสายอากาศไม่ต้องเพิ่มขึ้นมากมาย รัศมีการติดต่อก็จะไปได้ไกลขึ้น ในย่านความถี่ VHF และ UHF หรือความถี่ที่สูงกว่านี้ เรานิยมสื่อสารกันโดยใช้คลื่นอากาศ

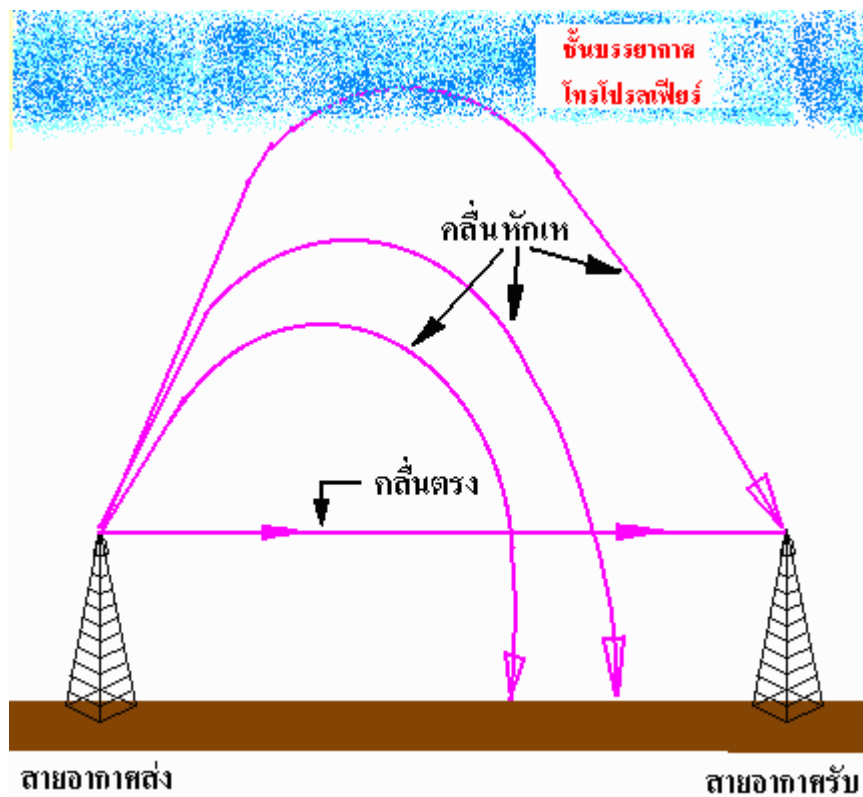


ภาพที่ ๑-๑๕ การเดินทางของคลื่นอากาศ

## ๒.๓ คลื่นฟ้า (Sky Wave)

เหนือผิวโลกขึ้นไปประมาณ 50 - 400 km. การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์จะทำให้คุณภาพของก๊าซในชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก แตกตัวเป็นไอออน (Ionize) เกิดประจุบวกและประจุลบ รวมทั้งอิเล็กตรอนอิสระมากมาย ชั้นบรรยากาศที่โดนรังสีแล้วเกิดไอออนนี้

เรียกว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางเข้าสู่ชั้นบรรยากาศนี้ จะถูกหักเหเนื่องจากสนามไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับแสงถูกหักเหหรือสะท้อนผ่านกระจาเงา การหักเหของคลื่นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ความถี่ของคลื่นที่เดินทางเข้ามาในชั้นบรรยากาศ ปริมาณความหนาแน่นของไอออนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ มุมที่คลื่นเดินทางเข้าสู่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ ถ้าหากคลื่นมีความถี่พอเหมาะกับชั้นบรรยากาศและมุมยิงเข้าสู่ชั้นบรรยากาศถูกต้องพอดี คลื่นก็จะสามารถหักเหกลับมายังพื้นโลกได้อีก ดังภาพที่ ๑-๑๖ คลื่นอากาศที่เดินทางขึ้นไปบนฟ้าแล้วหักเหลงมายังผิวโลกนี้เรียกว่าคลื่นฟ้า การติดต่อสื่อสารในย่านความถี่ HF นี้ ใช้คลื่นไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามในเวลากลางคืน คลื่นในย่านความถี่ MF ก็สามารถสื่อสารโดยคลื่นฟ้าได้เช่นกัน

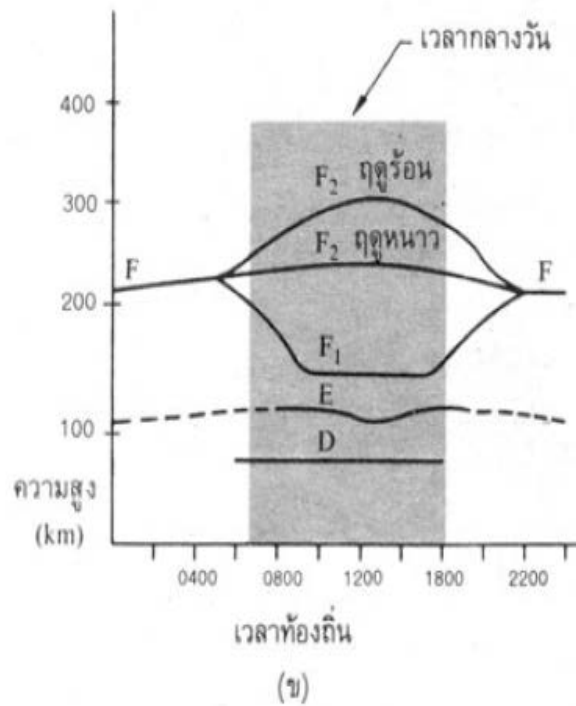
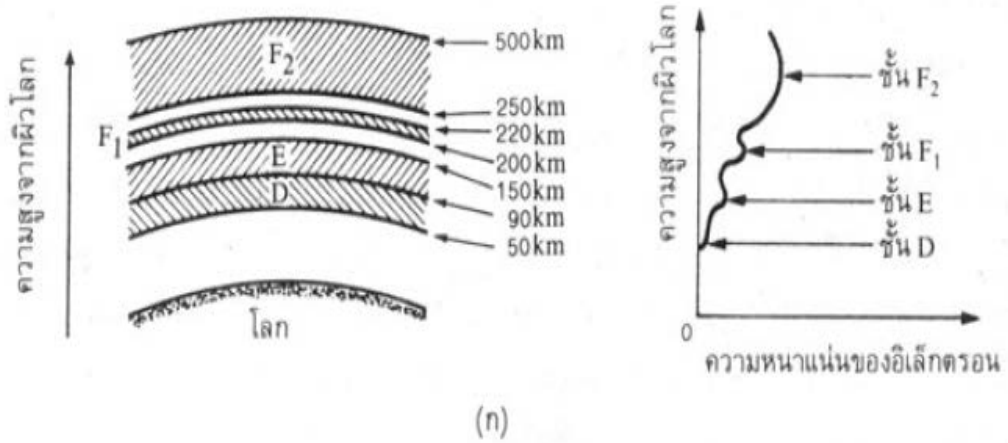


ภาพที่ ๑-๑๖ การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า

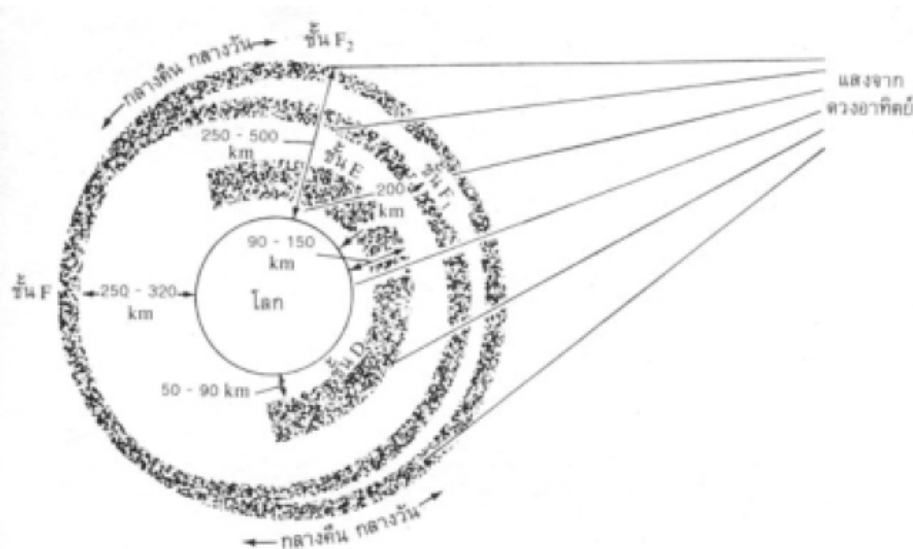
## ๒.๔ ชั้นไอโอโนสเฟียร์

ชั้นไอโอโนสเฟียร์ สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชั้นย่อยตามปริมาณไอออนที่เกิดขึ้น คลื่นฟ้าที่สะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น อาจมาจากชั้นย่อย ๆ ที่ความสูงต่างกัน และนอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับความถี่ในช่วงเวลาเช้า กลางวัน เย็น หรือกลางคืน ปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นไอโอโนสเฟียร์นั้น จะไม่เท่ากัน เพราะก๊าซต่างๆ ที่ห่อหุ้มโลกมีอยู่หลายชนิดที่มีความดันต่าง ๆ กัน ทำให้รับอิทธิพลจากรังสีคอสมิกและอัลตราไวโอเล็ตไม่เท่ากัน จึงเกิดชั้นย่อย ๆ ในชั้นไอโอโนสเฟียร์อีกหลายชั้น ชั้นย่อยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงอยู่ทุก ๆ ชั่วโมงแต่ละวัน แต่ละเดือน แต่ละฤดูกาล แต่ละปีไม่ซ้ำแบบกันหรือไม่เท่ากันอิทธิพลสำคัญของการเปลี่ยนแปลงนี้ มาจาก

ดวงอาทิตย์ เช่น เมื่อดวงอาทิตย์แผ่รังสีมายังโลกโดยตรงปริมาณไอออนจะหนาแน่นมากขึ้น และระดับความสูงเฉลี่ยของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะต่ำลง นอกจากนี้ความแปรปรวนใด ๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ทั้งสิ้น



ภาพที่ ๑-๑๗ ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบ่งเป็นชั้นย่อยอีกหลายชั้น

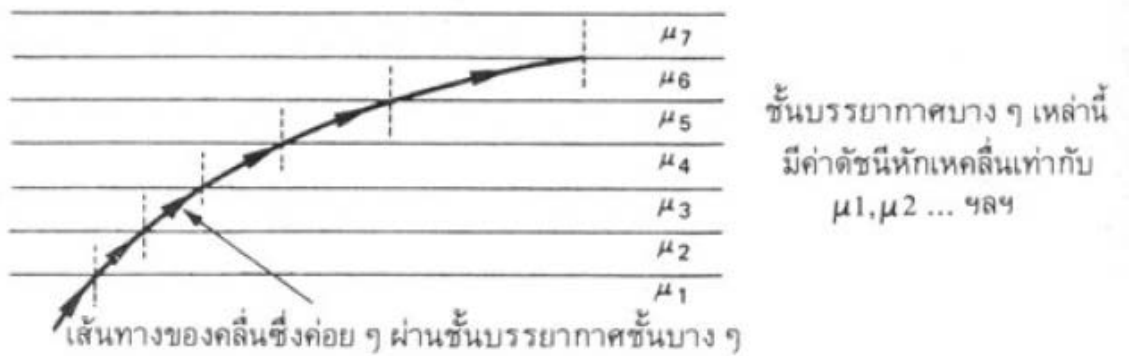


ภาพที่ ๑-๑๘ ชั้นบรรยากาศรอบโลก

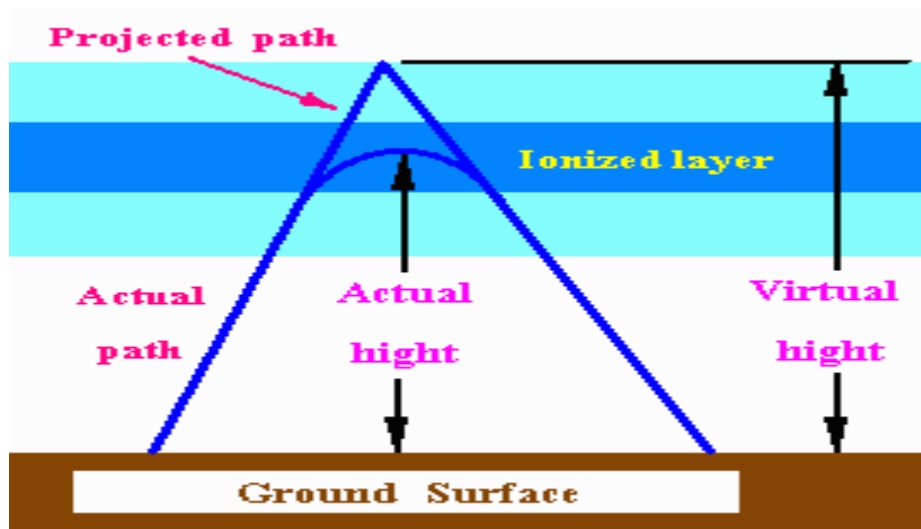
ชั้นย่อยในไอโอโนสเฟียร์ยังแบ่งออกเป็นหลายชั้นย่อยที่ความสูงต่างๆ กัน ดังภาพที่ ๑-๑๗ สังเกตว่าชั้น D จะเกิดขึ้นเฉพาะเวลากลางวัน ชั้นนี้อยู่ไกลจากดวงอาทิตย์ปริมาณไอออนจะมีน้อยมากชั้น D จึงไม่ค่อยหักเหคลื่นวิทยุ แต่จะมีการดูดกลืนคลื่นให้ลดน้อยลงไปบ้าง ฉะนั้นในการสื่อสารผ่านชั้นนี้ คลื่นจะถูกลดทอนทั้งขาขึ้นและขาลง สำหรับคลื่นในย่านความถี่ MF ชั้น D จะถูกดูดกลืนจนหมดสิ้น ฉะนั้นคลื่นในย่านความถี่นี้จะสื่อสารได้เฉพาะคลื่นดินในตอนกลางวัน แต่ในตอนกลางคืนชั้น D จะหายไป คลื่น (ในย่าน MF) ก็จะสามารถเดินทางได้ทั้งทางคลื่นดินและคลื่นฟ้าด้วยชั้น E อยู่ในช่วงความสูงตั้งแต่ 90 - 130 km. เหนือผิวโลก ชั้นนี้จะมีปริมาณไอออนหนาแน่นที่สุดในตอนเที่ยงวัน และมีน้อยมากในตอนกลางคืน (ดูภาพที่ ๑-๑๘ ประกอบ) ส่วนชั้น F ค่อนข้างเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เพราะเป็นชั้นที่อยู่นอกสุดและใกล้ดวงอาทิตย์กว่าชั้นอื่นๆ ในตอนกลางวันชั้นนี้จะมีชั้นเดียว อยู่ระหว่างความสูงประมาณ 180 - 400 km. แต่ในตอนกลางวันรังสีจากดวงอาทิตย์จะแผ่มาแรงมาก จึงแบ่งออกเป็นชั้นย่อยอีกคือ กับ F1 กับ F2 ชั้น F1 อยู่ระหว่าง 130 - 250 km. ส่วนชั้น F2 อยู่ระหว่าง 140 - 300 km. ในฤดูหนาวและจะสูงขึ้นไปอีกระหว่าง 250 - 350 km. ในฤดูร้อน

## ๒.๕ การสื่อสารทางคลื่นฟ้า

การสื่อสารทางคลื่นฟ้านี้ ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดูภาพที่ ๑-๑๘ จะเห็นว่าคลื่นฟ้าค่อยๆ หักเหกลับมาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ทีละน้อย มิใช่เป็นการหักเหแบบหักมุม แต่เป็นการค่อยๆ โค้งลง อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกเราจะสมมติว่า คลื่นได้สะท้อนหรือเสมือนกับว่าสะท้อนมาจากชั้นความสูงตามเส้นประ ระยะความสูงของชั้นบรรยากาศซึ่งเสมือนว่าสะท้อนคลื่นลงมานั้น เรียกว่า ระยะสูงเสมือน (Virtual Height) ดูในภาพที่ ๑-๒๐ ระยะสูงเสมือนของชั้นไอโอโนสเฟียร์คำนวณได้ จากการยิงคลื่นของพัลส์ความถี่ต่าง ๆ ขึ้นไปตรง ๆ ในแนวตั้ง และให้สะท้อนกลับ

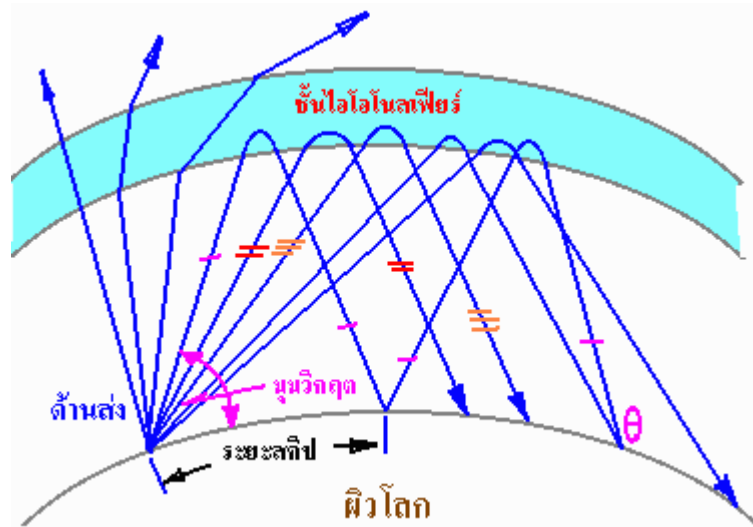


ภาพที่ ๑-๑๙ คลื่นวิทยุค่อย ๆ ผ่านชั้นบรรยากาศชั้นบาง ๆ



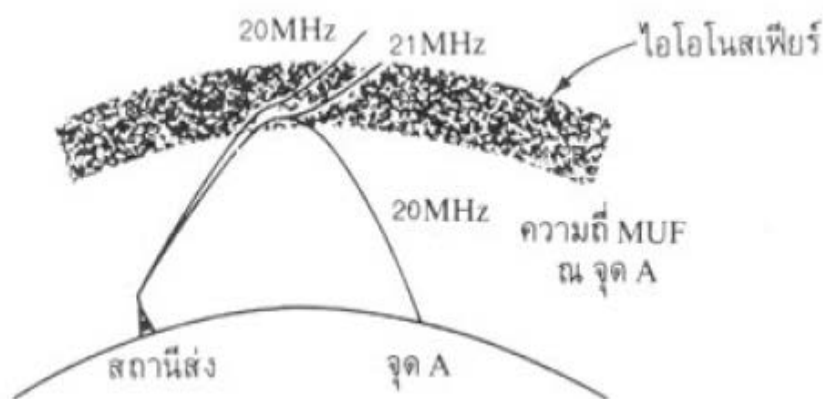
ภาพที่ ๑-๒๐ ระยะสูงเสมือนของชั้นไอโอโนสเฟียร์

มายังโลก เมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้นไปเกินค่าหนึ่ง คลื่นจะไม่สะท้อนกลับมา ความถี่ค่านี้เรียกว่าความถี่วิกฤต (Critical Frequency) ฉะนั้นเมื่อส่งคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่วิกฤตขึ้นไปในแนวคลื่นก็จะไม่สะท้อนกลับมายังโลก ความถี่วิกฤตนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งไม่แน่นอน สมมติว่า เรายิงคลื่นขึ้นไปเป็นมุมเฉียง (แทนที่จะเป็นแนวตั้ง) คลื่นก็จะเดินทางในชั้นไอโอโนสเฟียร์นานขึ้น ดังนั้นการหักเหจะหักเหได้มากขึ้น ซึ่งหมายความว่า คลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่วิกฤต จะสะท้อนกลับสู่โลกได้ถ้ายิงคลื่นเป็นมุมเฉียง อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดอื่นๆ อีก กล่าวคือ ถ้ามุมยิงสูงขึ้นจนถึงมุมยิงค่าหนึ่งแล้ว คลื่นจะทะลุฟ้าไปเลย ไม่สะท้อนกลับมา มุมนี้เรียกว่ามุมวิกฤต



ภาพที่ ๑-๒๑ การหักเหของคลื่นวิทยุที่มุมยิงค่าต่าง ๆ

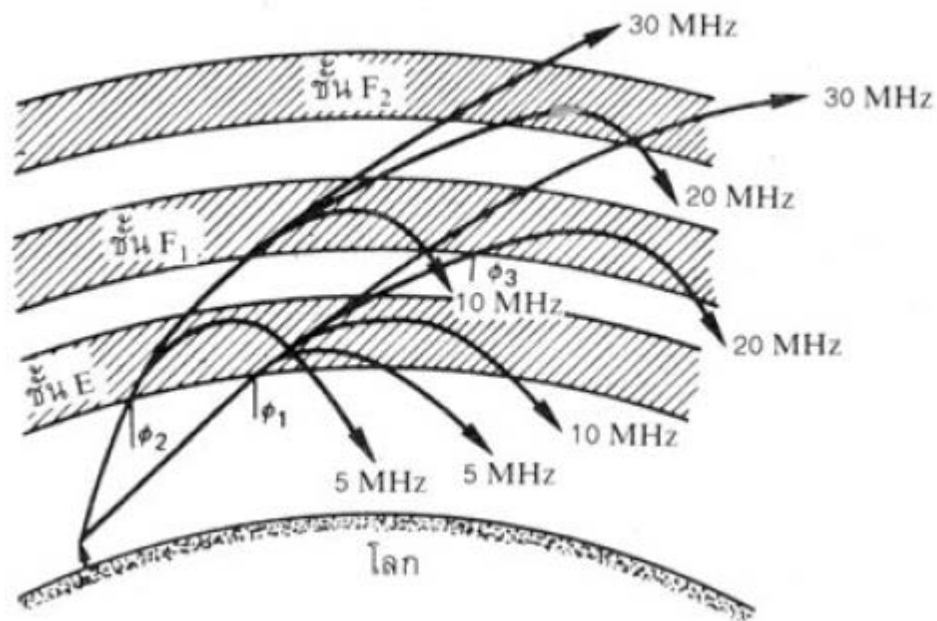
จากภาพที่ ๑-๒๑ สังเกตว่าเมื่อมุมยิงต่ำลง ระยะทางติดต่อสื่อสารไกลขึ้น ระยะทางนี้เรียกว่า ระยะสกีป (Skip Distance) ฉะนั้นระยะสกีปจะไกลที่สุด ก็ต่อเมื่อใช้มุมยิงต่ำที่สุด และใช้คลื่นที่มีความถี่สูงสุดที่จะหักเหได้ที่มุมยิงนั้น



ภาพที่ ๑-๒๒ ความถี่ใช้งานสูงสุดในที่นี้เท่ากับ 20 MHz. ที่มุมยิงที่กำหนดให้เพื่อให้หักเหลงมายังจุด A

ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้ติดต่อได้ระหว่างจุด ๒ จุด เรียกว่า ความถี่ใช้งานสูงสุด (Maximum Usable Frequency หรือ MUF) ความจริงความถี่ต่ำกว่า MUF ก็ใช้ได้ เพราะคลื่นสามารถหักเหลงมาได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่ต่ำลงอัตราการลดทอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะเพิ่มขึ้นมากมาย ระดับสัญญาณที่รับได้จะอ่อนลง ความถี่ต่ำสุดที่ใช้ติดต่อกันได้นี้เรียกว่า ความถี่ใช้งานต่ำสุด (Lowest Usable Frequency หรือ LUF) นั่นคือ ถ้าใช้ความถี่ต่ำกว่า LUF จะรับคลื่นไม่ได้เพราะถูกลดทอนหมด ถ้าใช้ความถี่สูงกว่า MUF ก็จะไม่รับได้เพราะคลื่นทะลุฟ้าไม่สะท้อนกลับ ฉะนั้นที่ความถี่ MUF เราจะได้รับสัญญาณแรงที่สุดดัง ในภาพที่ ๑-๒๒ โดยปกติค่า MUF

จะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นเราจึงเลือกความถี่ใช้งานที่พอเหมาะ (Optimum Usable Frequency) คือให้ต่ำกว่าค่า MUF ลงมามากพอที่จะให้ระดับสัญญาณที่รับได้ไม่กระเพื่อม (Fluctuation) มากนักในแต่ละนาทิต (สมมติถ้าใช้ความถี่พอดีกับ MUF สัญญาณที่รับได้ในแต่ละนาทิตจะกระเพื่อม แรงบ้างอ่อนบ้าง) เท่าที่อธิบายมาข้างต้นนั้น ทำให้เราอาจจะเข้าใจผิดว่าการสื่อสารทางคลื่นฟ้านั้น เอาแน่นอนอะไรไม่ได้ อย่างไรก็ตามมนุษย์ได้พยายามศึกษาความเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ และสังเกตการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับดวงอาทิตย์ทำให้เราสามารถคำนวณและกำหนดค่าความถี่ LUF และ MUF รวมทั้งความถี่ที่เหมาะสม ในการใช้งานได้ดังในภาพที่ ๑-๒๓



ภาพที่ ๑-๒๓ การหักเหของคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ สำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์ชั้นย่อย

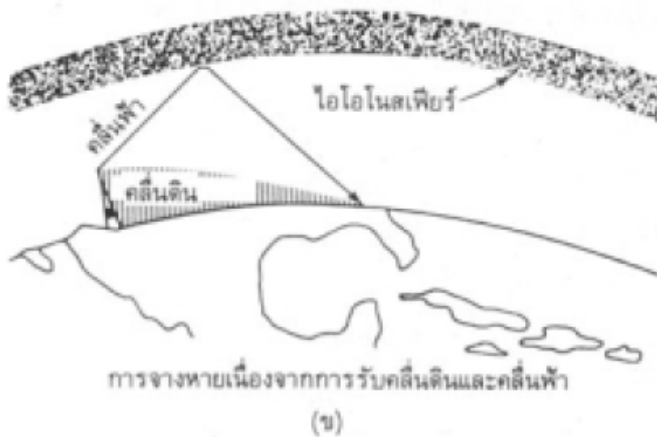
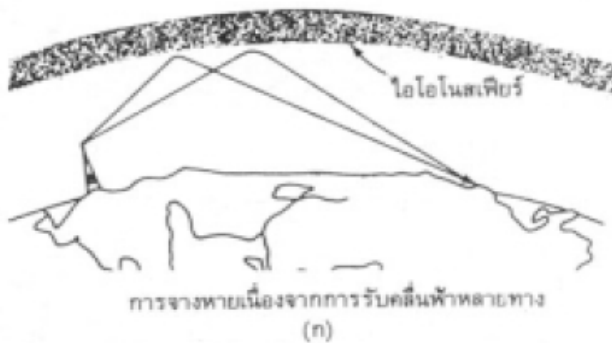
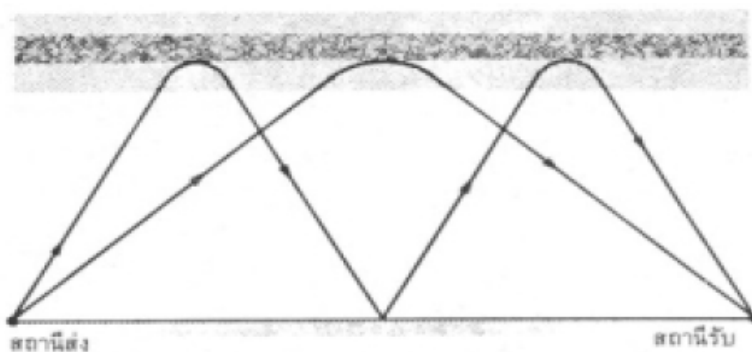
## ๒.๖ การสื่อสารหลายฮอป

คลื่นที่เราส่งขึ้นไปบนฟ้าเมื่อหักเหกลับลงมายังโลก หากคลื่นแรงพออาจจะสะท้อนผิวโลกกลับขึ้นไปบนฟ้า แล้วหักเหกลับลงมายังโลกได้อีก ดังในภาพที่ ๑-๒๔ จากเครื่องส่งจะยิงคลื่นขึ้นฟ้าสะท้อนกลับมาที่จุด A แล้วยังมีความแรงพอจึงสะท้อนขึ้นไปบนฟ้าอีกและกลับลงมาที่จุด B ได้ การสื่อสารแบบนี้คลื่นจะกระโดด (Hop) หลายครั้ง จึงเรียกกันว่าเป็นการสื่อสารหลายฮอป (Multihop) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ระยะทางที่สื่อสารกันได้แบบฮอปเดียว การสะท้อนของคลื่นจากชั้นบรรยากาศเพียงครั้งเดียวอาจจะไปได้ไกลถึง 2,000 - 3,000 km. ขึ้นอยู่กับมุมยิง แต่มุมยิงจะต่ำกว่าขอบฟ้าไม่ได้ ฉะนั้นการสื่อสารที่ไกลกว่านี้ เราต้องใช้แบบหลายฮอป อย่างลึ้มว่าทุกๆ ฮอปจะมีการลดทอนอย่างมาก ดังนั้นการสื่อสารหลายฮอป จึงต้องคำนึงถึงการลดทอนของชั้นไอโอโนสเฟียร์และการสะท้อนคลื่นกับผิวโลกด้วย





ภาพที่ ๑-๒๔ การสื่อสารแบบที่คลื่นเดินทาง ๒ ฮอป



ภาพที่ ๑-๒๕ การรับสัญญาณมัลติพาท

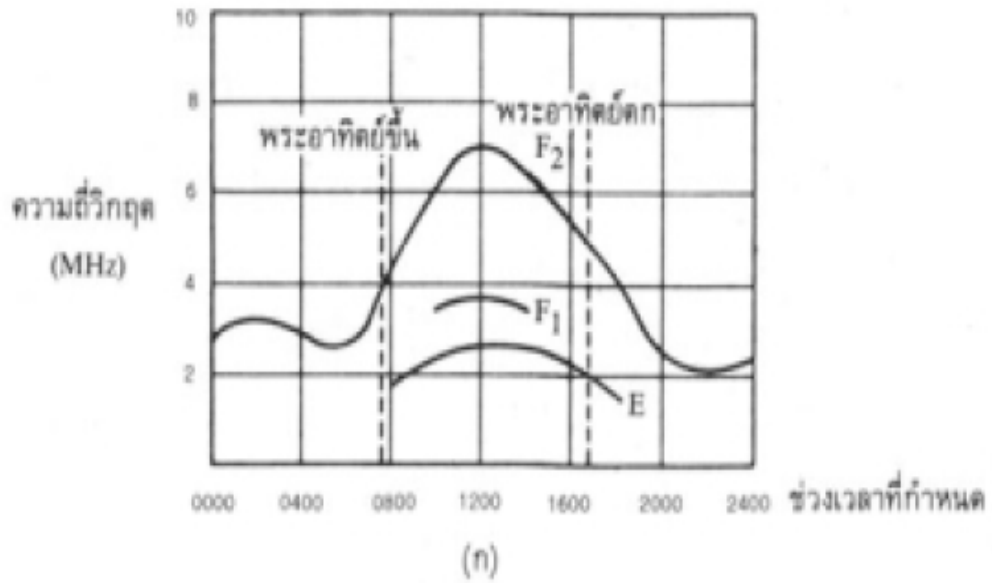
## ๒.๗ การจางหาย

การสื่อสารทางคลื่นฟ้าขึ้น ความแรงสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ อ่อนบ้าง แรงแบบบ้าง ถ้าระดับสัญญาณกระเพื่อมน้อย ระบบ AGC ในเครื่องรับก็จะชดเชยระดับสัญญาณที่ได้รับได้ ทำให้ความดังคงที่แต่บางครั้งสัญญาณก็หายไปเฉยๆ เพราะถูกลดทอนมาก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การจางหาย การจางหายนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับจากหลายเส้นทาง ในบางครั้งก็มาเสริมกันหรือหักล้างกันซึ่งเรียกว่า มัลติพาท (Multipath) และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ รูปภาพที่ ๑-๒๕ (ก) สัญญาณจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับจากหลายเส้นทาง คือมาแบบฮอปเดียว และ ๒ ฮอป ในกรณีนี้คลื่นทั้งสอง จะเดินทางมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกัน เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเฟส ผลรวมของคลื่นทั้งสองอาจจะเสริมกันบ้าง หรือหักล้างกันเองบ้าง แล้วแต่การเดินทาง เช่น ถ้าหากคลื่นมีเฟสต่างกัน  $180^{\circ}$  (หรือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) คลื่นก็จะหักล้างกันเอง การจางหายของคลื่นฟ้าจึงเกิดขึ้นได้เสมอดังภาพที่ ๑-๒๕ (ข) นอกจากนี้คลื่นที่รับได้ที่เครื่องรับอาจมาจากทั้งคลื่นฟ้าและคลื่นดิน ทำให้เฟสของสัญญาณที่มาถึงไม่ตรงกัน การจางหายก็เกิดขึ้น กรณีหลังนี้จะเกิดเฉพาะคลื่นในย่านความถี่ MF รูปภาพที่ ๑-๒๕ (ก)

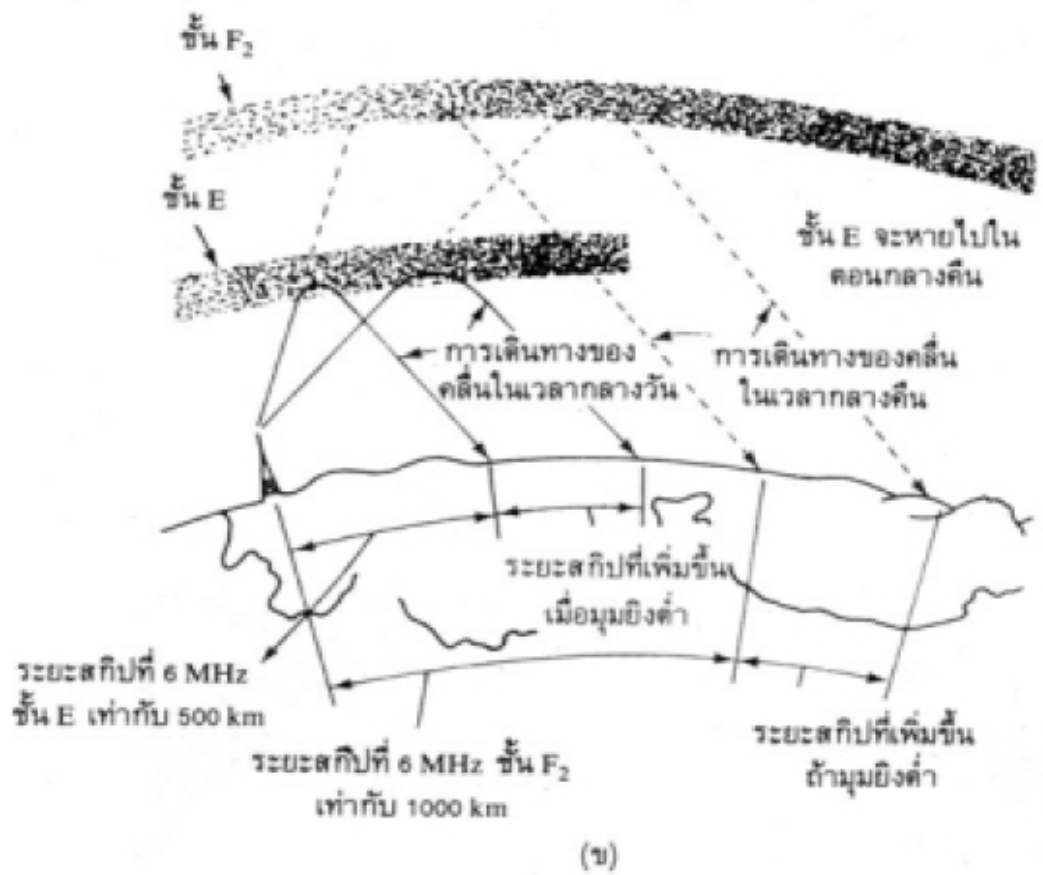
## ๒.๘ การเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ชั้นไอโอโนสเฟียร์ เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีของดวงอาทิตย์ ฉะนั้นการโคจรของดวงอาทิตย์และโลก จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ มนุษย์เราเฝ้าสังเกตการเปลี่ยนแปลงทั้งปวงจนจับลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้ว่า แบ่งออกเป็นการเปลี่ยนแปลงประจำวัน (Diurnal) การเปลี่ยนแปลงประจำฤดูกาล (Seasonal) การเปลี่ยนแปลงตามลักษณะภูมิศาสตร์ (Geographical) รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงครบรอบ (Cyclical) การเปลี่ยนแปลงประจำวัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมง เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก สรุปการเปลี่ยนแปลงประจำวันได้ว่า ชั้น D, E และ F1 จะขึ้นอยู่กับความสูงของดวงอาทิตย์เหนือขอบฟ้า การเกิดไอออนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากตอนเช้า ดวงอาทิตย์โผล่จากขอบฟ้าจนถึงเที่ยงวันไอออนจะมากที่สุด แล้วค่อยๆ ลดลงจนอาทิตย์ลับขอบฟ้า ชั้น D, E และ F1 จะหายไปในตอนกลางคืน ในภาพที่ ๑-๒๖ แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในรูปของความถี่วิกฤต จะเห็นว่าชั้น F2 จะสูงขึ้นเมื่อดวงอาทิตย์ขึ้น แล้วค่อยๆ ลดลงเมื่อดวงอาทิตย์ตก และชั้น F2 ก็ยังคงมีอยู่ในตอนกลางคืน

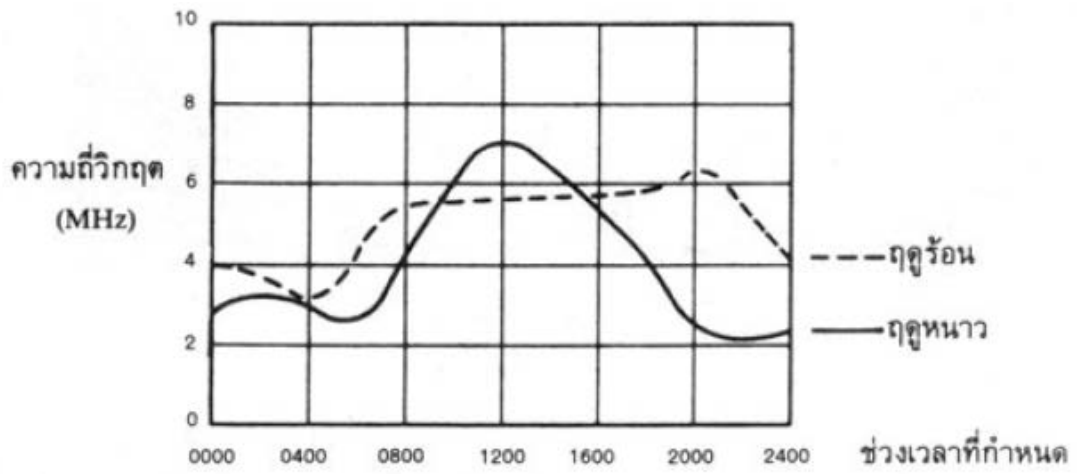
เนื่องจากโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ระยะทางจาก(จุดบน)โลก ไปยังดวงอาทิตย์ จะเปลี่ยนแปลงด้วยการเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ก็จะเป็นไปตามฤดูกาล จากภาพที่ ๑-๒๗ แสดงการเปลี่ยนแปลงประจำฤดูกาลของความถี่วิกฤต F2 จะเห็นว่าในฤดูหนาวโลกอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์มากกว่าฤดูร้อน จึงได้รับรังสีมากกว่า ความถี่วิกฤตตอนเที่ยงวันจึงสูงกว่าปริมาณของรังสีที่กระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ ขึ้นอยู่กับเส้นรุ้งหรือละติจูด (Latitude) เช่นรังสีจะเข้มข้นที่เส้นศูนย์สูตร ในขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี และที่เส้นละติจูดไปทางทิศเหนือและใต้จะเข้มข้นน้อยลง การเปลี่ยนแปลงปริมาณไอออนจึงขึ้นอยู่กัตำแหน่งของเส้นรุ้ง หรือลักษณะทางภูมิศาสตร์ด้วย นอกจากนี้ เวลาครบรอบของจุดบนดวงอาทิตย์เท่ากับ ๑๑ ปี จุดที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์มาก ภาพที่ ๑-๒๘ แสดงจำนวนจุดบนดวงอาทิตย์ในอดีต ที่ผ่านมามีจำนวนจุดบนดวงอาทิตย์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ต



ภาพที่ ๑-๒๖ การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ประจำวัน

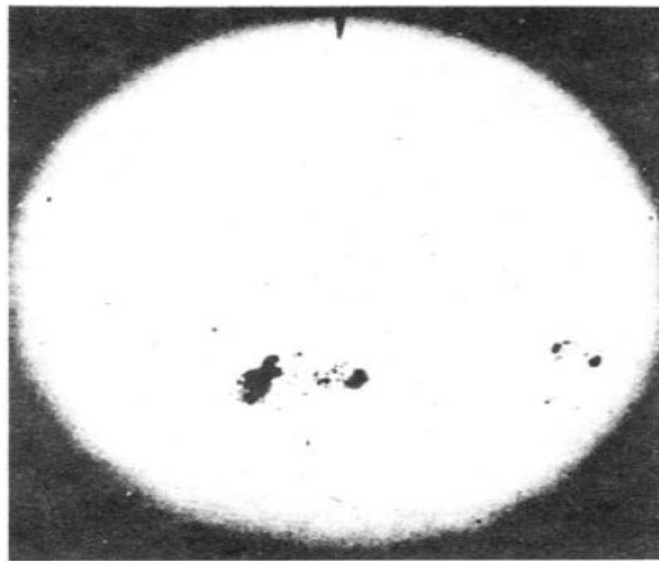


ภาพที่ ๑-๒๖(ต่อ) การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ประจำวัน

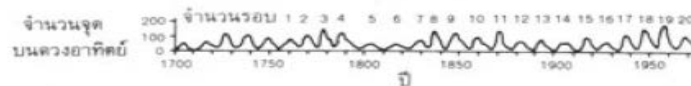


ภาพที่ ๑-๒๗ การเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ในฤดูร้อนกับฤดูหนาว

คือ จุดยิ่งมารังสียิ่งเข้มข้น รังสีนี้จะมีอิทธิพลต่อการเกิดไอออนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ จากภาพที่ ๑-๒๘ จะเห็นว่าความถี่วิกฤตสำหรับชั้น F2 ในปีที่มีจุดดับมากและน้อย จะแตกต่างกันกว่าเท่าตัว การที่มีจุดดับมากๆ มักจะส่งผลให้การสื่อสารไปได้ไกลขึ้น และความแน่นอนในการสื่อสารทางคลื่นฟ้าดีขึ้น

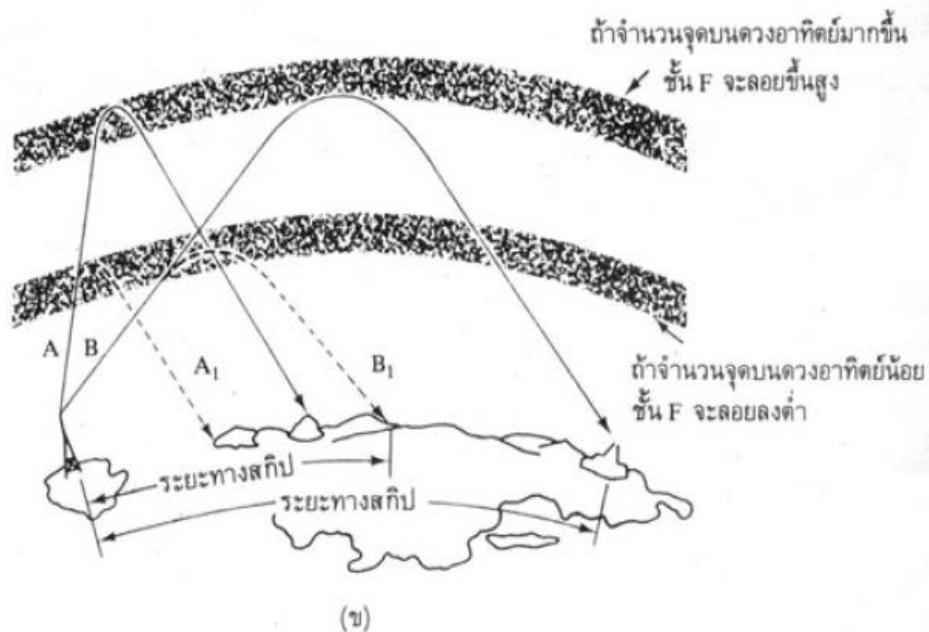
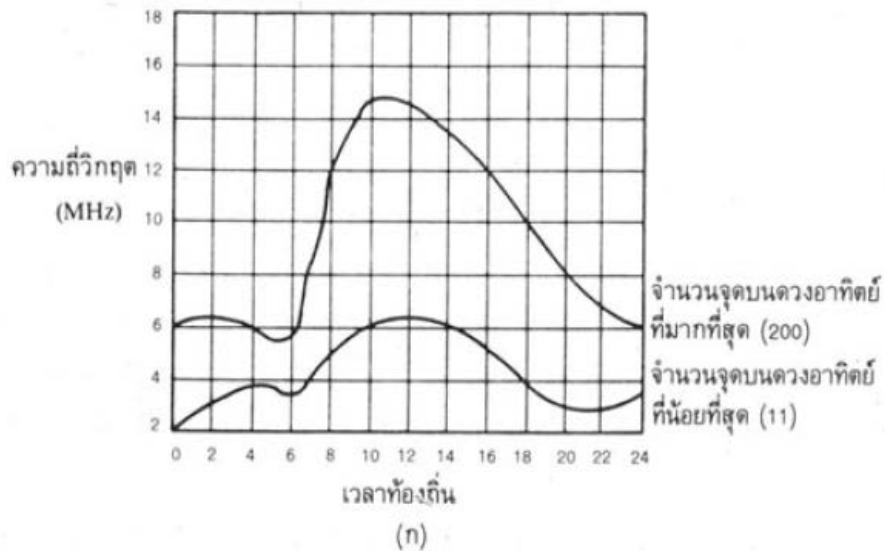


(ก)



(ข)

ภาพที่ ๑-๒๘ จุดของดวงอาทิตย์ (รูป ก.) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไอโอโนสเฟียร์ (ตามรูป ข.)



ภาพที่ ๑-๒๙ เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ที่จำนวนจุดดับ ในดวงอาทิตย์มากที่สุด และน้อยสุด

นอกจากความเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ประจำวัน ประจำฤดูกาล ตำแหน่ง หรือลักษณะทางภูมิศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงตามเวลาครบรอบ ๑๑ ปี ของจุดแล้ว ตามที่ศึกษามาข้างต้นนั้น ชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังมีความเปลี่ยนแปลงอื่นๆ อีก ความเปลี่ยนแปลงนี้ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนนัก หรือไม่สามารถทำนายได้ โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกระทบต่อความถี่ ย่าน HF ในลักษณะของการลดทอนที่ละน้อยหรือบางครั้งก็ลดทอนอย่างฉับพลัน จนสัญญาณหายไปเฉย ๆ แต่ในทางตรงกันข้าม สำหรับความถี่ย่าน VHF การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ กลับทำให้เกิดช่องว่าง ทำให้การสื่อสารไปได้ไกลมากอย่างเหลือเชื่อ (สำหรับคลื่นในย่าน VHF

ซึ่งเดินทางไปไม่เกินระยะสายตา LOS) การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวในชั้น E จึงเรียกว่า ชั้น E สไปราดิก (Sporadic E) สาเหตุแห่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ ยังไม่ทราบแน่ชัด แต่เชื่อกันว่าเกิดจากการโซติช่วงบนผิวดวงอาทิตย์ (Solar Flare) ลักษณะการเกิดอาจจะกินเวลานาน ตั้งแต่ ๒๐ นาที ไปจนกระทั่งถึง ๑ หรือ ๒ ชั่วโมง ในระหว่างช่วงเวลานี้ การสื่อสารทางคลื่นฟ้าย่านความถี่ HF แทบจะติดต่อไม่ได้เลย (Black Out)

## ๒.๙ การแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่ VHF และ UHF

การสื่อสารทางคลื่นฟ้าจะใช้ได้เฉพาะในย่านความถี่ HF เท่านั้น เนื่องจากความถี่ในย่านนี้จะมีค่าไม่เกิน 30 MHz. ถึงแม้จะเป็นในช่วงที่จุดบนดวงอาทิตย์มากที่สุด ความถี่ MUF ก็จะสามารถขึ้นไปได้เพียง 50 - 60 MHz. เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การสื่อสารด้วยคลื่นในย่านความถี่ VHF และ UHF จึงต้องใช้คลื่นอากาศซึ่งเดินทางไปได้ไม่เกินระยะสายตา อุปสรรคสำคัญของการสื่อสารในย่านความถี่ VHF และ UHF นี้ก็คือ ภูมิประเทศและความโค้งของโลกบังคับคลื่นเอาไว้ ความจริงแล้วอากาศบนผิวโลกนี้ สามารถหักเหคลื่นในย่านความถี่ VHF และ UHF ได้เล็กน้อยสาเหตุของการหักเหเนื่องมาจาก เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของอากาศจะลดลงนั่นคือ คลื่นส่วนบนยอมเดินทางเร็วกว่าคลื่นส่วนล่าง ทำให้คลื่นโค้งเข้าหาผิวโลก จึงดูเหมือนกับว่าระยะสายตา (ระยะทางที่คลื่นเดินทางไปพ้นขอบฟ้า) ไกลกว่าปกติ ๑.๓ เท่า (ระยะสายตาในกรณีที่คลื่นไม่หักเห)

ระยะสายตา (LOS) หาได้จากสูตร

$$D_t = 4\sqrt{H_t} \quad (๑๐)$$

ในที่นี้  $D_t$  คือ ระยะสายตามีหน่วยเป็น km.

$H_t$  คือ ความสูงของสายอากาศมีหน่วยเป็น m.

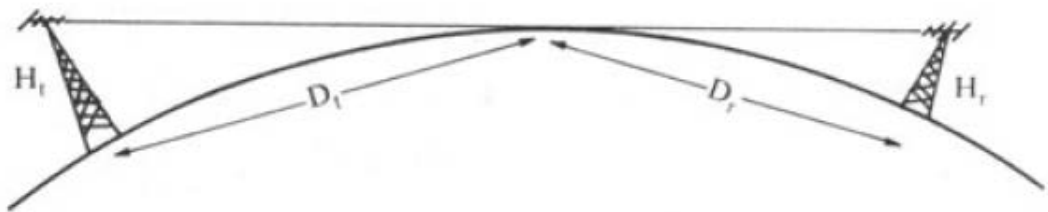
ในกรณีของเครื่องรับก็ใช้สูตรนี้เช่นกัน ทำให้เราสามารถคำนวณหาระยะทางที่สามารถติดต่อกันด้วยคลื่นอากาศได้ คือ

$$\begin{aligned} D &= D_t + D_r \\ &= 4\sqrt{H_t} + 4\sqrt{H_r} \end{aligned} \quad (๑๑)$$

ตัวอย่างที่ ๑ สายอากาศของเครื่องส่งสูง 100 m. สายอากาศเครื่องรับสูง 49 m. ระยะทางที่สามารถสื่อสารด้วยคลื่นอวกาศจะเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 D &= 4\sqrt{H_t} + 4\sqrt{H_r} \\
 &= 4\sqrt{100} + 4\sqrt{49} \\
 &= 4(10) + 4(7) \\
 &= 40 + 28 = 68 \text{ กิโลเมตร}
 \end{aligned}$$

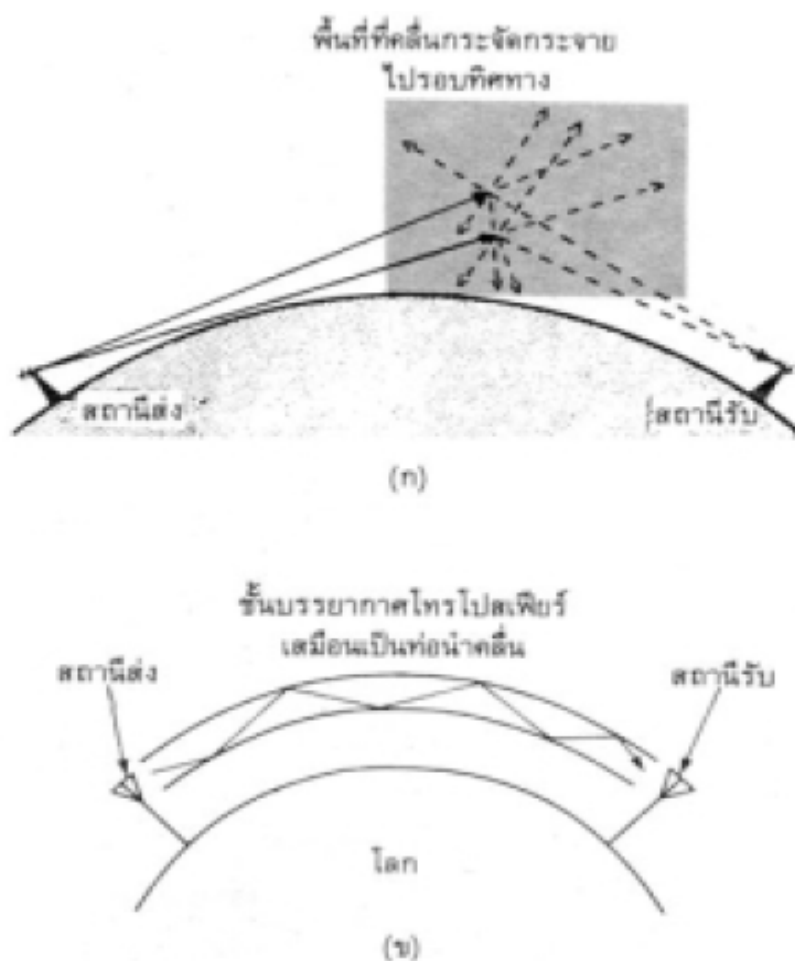
หมายความว่าในกรณีนี้ เราสามารถติดต่อกันได้ไกลถึง 68 km. ทั้งนี้สมมติว่าไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ เลย กล่าวคือ ไม่มีภูเขา เนินเขา ตึก ฯลฯ มาบังระหว่างเส้นทาง ที่คลื่นเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ



ภาพที่ ๑-๓๐ ระยะสายตา (LOS หรือ Line Of Sight)

## ๒.๑๐ การแพร่กระจายคลื่นแบบโทรโปสแกตเตอร์

ในการสื่อสารแบบโทรโปสแกตเตอร์ (Troposcatter หรือ Tropospheric Scatter) เราใช้เครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงมาก และใช้สายอากาศที่มีเกนสูง ส่งออกอากาศขึ้นไป (คล้าย ๆ กับส่งคลื่นไฟฟ้า) โดยยิงออกไปให้กระทบชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ พลังงานของคลื่นบางส่วนซึ่งน้อยมาก จะกระจัดกระจายไปยังทิศทางของเครื่องรับ ขบวนการกระจายคลื่นนั้น ยังไม่มีคำอธิบายที่เป็นที่ยอมรับ แต่ในทางทฤษฎีบอกว่าสัญญาณจะสะท้อนกลับลงมาเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศ แต่บางทฤษฎีก็บอกว่าการสะท้อนเกิดขึ้นเพราะชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม การสื่อสารโดยวิธีโทรโปสแกตเตอร์ นับว่ามีความแน่นอนสูงมาก และทำให้สามารถสื่อสารโดยใช้คลื่นย่านความถี่ UHF หรือสูงกว่านี้ ออกไปไกลกว่าระยะสายตา (ภาพที่ ๑-๓๑)



ภาพที่ ๑-๓๑ การแพร่คลื่นแบบโทรโปสเฟเตอร์

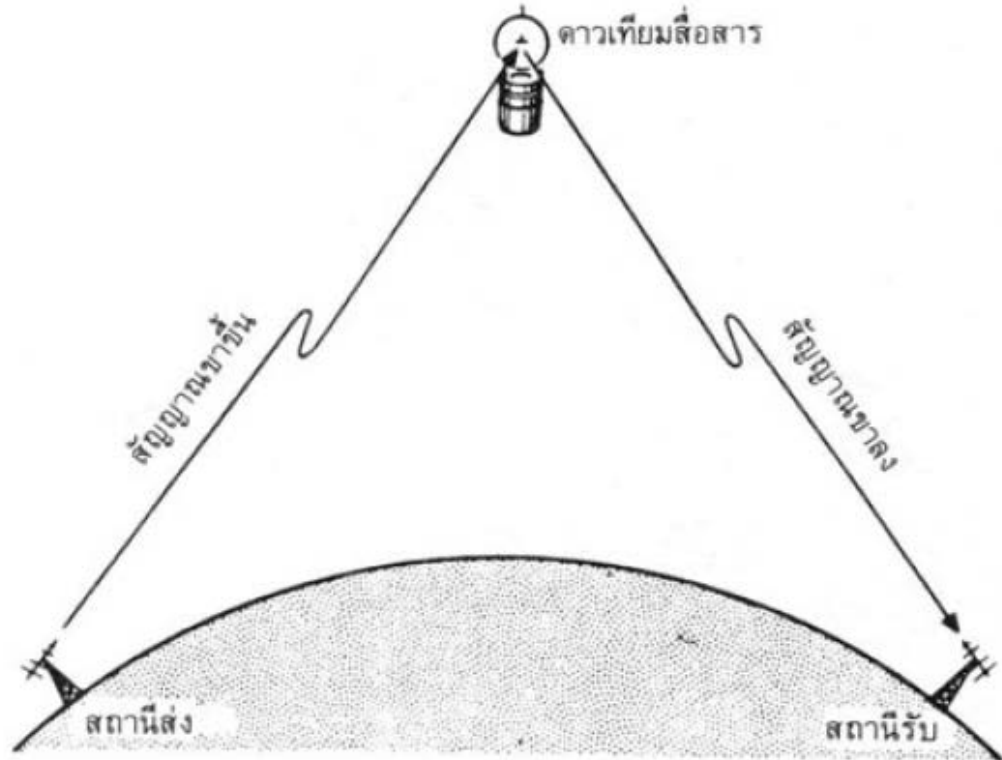
ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารโทรโปสเฟเตอร์ ก็คือ 900 MHz., 2 GHz. และ 5 GHz. ระยะทางติดต่อได้ไกลตั้งแต่ 300 - 1,000 km. (ถ้าใช้คลื่นอากาศจะไปได้ไม่เกิน 100 km.) ข้อเสียของการสื่อสารโทรโปสเฟเตอร์ก็คือ ต้องใช้กำลังส่งสูงมาก และสายอากาศต้องมีแกนสูง วิธีโทรโปสเฟเตอร์เมื่อเทียบกับการสื่อสารโดยใช้คลื่นอากาศและรีพีตเตอร์เชื่อมต่อกัน วิธีโทรโปสเฟเตอร์ก็ยิ่งแพงกว่ามาก อย่างไรก็ตาม ถ้าภูมิประเทศเป็นอุปสรรคอย่างมากในการติดตั้งสถานีรีพีตเตอร์ หรือด้วยเหตุผลอื่น ๆ วิธีโทรโปสเฟเตอร์ ก็นับเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง ตัวอย่างการใช้งานของระบบโทรโปสเฟเตอร์ ได้แก่ การติดต่อสื่อสารไปยังแท่นขุดเจาะน้ำมันในทะเลเหนือ เป็นต้น

## ๒.๑๑ การสื่อสารผ่านดาวเทียม

ดาวเทียมสื่อสาร ก็คือ สถานีรีพีตเตอร์ไมโครเวฟนั่นเอง ดาวเทียมจะรับสัญญาณขาขึ้น (Up Link) จากโลกทำการขยายให้มีความแรงมากขึ้น แล้วจึงส่งสัญญาณขาลง (Down Link) กลับมายังผิวโลก ความถี่ขาขึ้นกับขาลงจะไม่เท่ากัน เนื่องจากตำแหน่งของดาวเทียมอยู่สูงจากโลกมาก ทำให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง ในภาพที่ ๑-๓๒ แสดงการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม



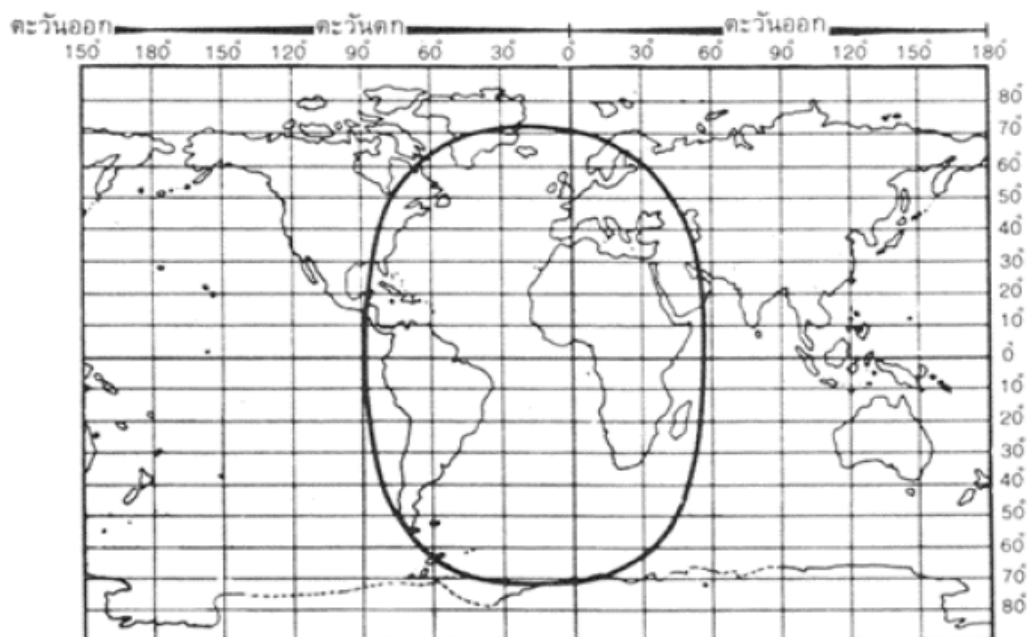
ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมจะใช้ความถี่ขาขึ้น 6 GHz. และความถี่ขาลง 4 GHz. ปริมาณข่าวสารที่ส่งผ่านดาวเทียมดวงหนึ่ง คิดเป็นจำนวนช่องโทรศัพท์ได้นับหมื่นช่อง



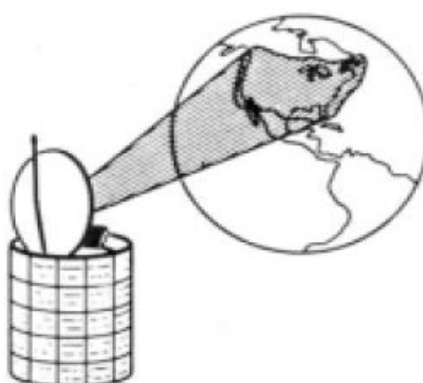
ภาพที่ ๑-๓๒ การสื่อสารผ่านดาวเทียม

ดาวเทียมส่วนใหญ่จะลอยค้างฟ้าอยู่ในวงโคจรซิงโครนัส (Synchronous Orbit) กล่าวคือ ลอยนิ่งอยู่ในอวกาศเหนือเส้นศูนย์สูตรประมาณ 35,800 km. เวลาโคจรรอบโลกจะต้องเท่ากับเวลาที่โลกหมุนรอบตัวเองคือ ๒๔ ชั่วโมง ฉะนั้น ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของดาวเทียมกับโลกจะต้องเท่ากัน ดาวเทียมประเภทนี้เรียกว่า ดาวเทียมค้างฟ้า เมื่อดาวเทียมลอยนิ่งอยู่บนฟ้าในวงโคจรซิงโครนัส เราสามารถตั้งสายอากาศเล็งไปยังดาวเทียมได้ ในภาพที่ ๑-๓๓ แสดงพื้นที่ใช้งานซึ่งดาวเทียมค้างฟ้าสามารถครอบคลุมได้ ดาวเทียมดวงนี้ ลอยอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรค่อนข้างไปทางทิศตะวันตก  $๑๕^{\circ}$  จากแผนที่นี้เราจะเห็นว่า เราใช้ดาวเทียมเพียง ๓ ดวง ก็จะสามารถครอบคลุมพื้นที่ของโลกได้เกือบทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติเราใช้จำนวนดาวเทียมมากมาย เนื่องจากปริมาณข่าวสารที่ติดต่อสื่อสารกันมีมาก จนดาวเทียมดวงเดียวไม่สามารถทำได้

สำหรับดาวเทียมประจำชาติ หรือดาวเทียมภายในประเทศ (Domestic) จะต้องใช้สายอากาศพิเศษเพื่อควบคุมพื้นที่ใช้งาน ให้จำกัดอยู่เฉพาะประเทศของตัวเองในภาพที่ ๑-๓๔ แสดงให้เห็นดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ดาวเทียมจะประกอบด้วยสายอากาศ (ตัวเดียวใช้ทั้งรับและส่ง)



ภาพที่ ๑-๓๓ พื้นที่ใช้งานของดาวเทียม



ภาพที่ ๑-๓๔ ดาวเทียมประจำชาติและพื้นที่ใช้งาน

ITU (International Telecommunication Union) ได้จัดสรรและควบคุมการใช้ความถี่ในกิจการต่างๆ ทั้งในประเทศและระหว่างประเทศเพื่อไม่ให้เกิดการทับซ้อน และรบกวนกันความถี่ที่ใช้กับดาวเทียมจะใช้หลักการเรียกชื่อคล้ายกับที่ใช้ใน เรดาร์และไมโครเวฟ แต่ความถี่ใช้งานอาจแตกต่างกันบ้างตามภารกิจ และวิธีการใช้ความถี่ เช่น L-band C-band KU-band X-band และ KA-band เป็นต้น ความถี่ที่นิยมใช้กันมาก คือ ย่าน C-band สัญญาณขาขึ้น (Uplink) ใช้ย่านความถี่ 6 GHz และสัญญาณขาลง (Downlink) ใช้ย่านความถี่ 4 GHz. จึงนิยมเรียกว่า 6/4 GHz. ความถี่ C-band นี้ อาจรบกวนกับการสื่อสารผ่านคลื่นไมโครเวฟบนภาคพื้นดินได้ง่าย อีกความถี่ที่ใช้งานมากคือ KU-band ใช้ความถี่ขาขึ้น 12 - 14 GHz. และความถี่ขาลง 11 - 18 GHz. โดยประมาณ ซึ่งนิยมใช้ในกิจการส่งสัญญาณโทรทัศน์โดยตรง (Direct Broadcast System: DBS) แต่มีข้อเสียหลัก คือสัญญาณจะถูกลดทอนกำลังจากเมฆฝนค่อนข้างมาก ความถี่ย่าน

X -band (8/12 GHz.) ใช้ในกิจการทหาร ส่วนความถี่ย่าน KA-band (40/20 GHz.) มีแนวโน้มจะนำมาใช้กันมากในอนาคต เพื่อแก้ปัญหาความแออัดของความถี่ใช้งาน

แถบความถี่	ช่วงความถี่
L band	1 ถึง 2 GHz
S band	2 ถึง 4 GHz
C band	4 ถึง 8 GHz
X band	8 ถึง 12 GHz
Ku band	12 ถึง 18 GHz
K band	18 ถึง 26.5 GHz
Ka band	26.5 ถึง 40 GHz
Q band	30 ถึง 50 GHz
U band	40 ถึง 60 GHz
V band	50 ถึง 75 GHz
E band	60 ถึง 90 GHz
W band	75 ถึง 110 GHz
F band	90 ถึง 140 GHz
D band	110 ถึง 170 GHz

ภาพที่ ๑-๓๕ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แถบความถี่ และช่วงความถี่

## บทที่ ๒

### สายอากาศ (Antennas)

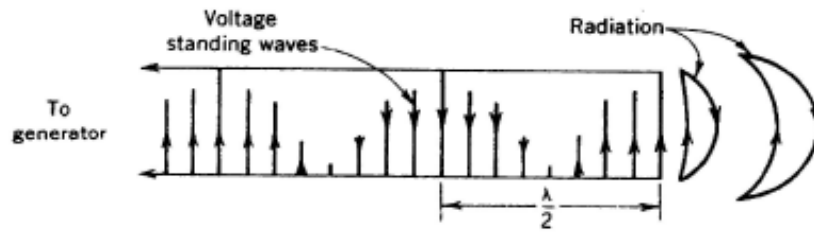
สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับสัญญาณวิทยุ โดยใช้ต่อกับปลายสายส่งของเสาที่พุทเครื่องส่ง เปลี่ยนสัญญาณเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วแพร่กระจายคลื่นไปในอากาศ และทางด้านเครื่องรับ สายอากาศจะรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เปลี่ยนเป็นความถี่วิทยุ ป้อนเข้าเครื่องรับ สายอากาศจึงเป็นเสมือนตัวเชื่อมระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ สายอากาศมีมากมายหลายชนิด อาจจะเป็นแบบเล็กๆ ประกอบด้วยสายพันรอบแกนเฟอร์ไรท์ ๒-๓ รอบ หรือแบบจานพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๓๐ เมตรหรือแบบแฉววางบนพื้นที่เป็นตารางกิโลเมตร ฯลฯ การติดตั้งสายอากาศสามารถติดตั้งตามที่ต่างๆ เช่น บนปีกหรือตัวเครื่องบิน บนดาวเทียม บนเรือ บนรถ บนยอดภูเขา บนบ้าน บนตึก ฯลฯ แต่ไม่ว่าสายอากาศจะมีขนาด รูปร่าง น้ำหนัก ตำแหน่งติดตั้ง แตกต่างกันอย่างใด หลักการเบื้องต้นของสายอากาศคงเหมือนกัน คือทำหน้าที่รับหรือส่งสัญญาณเช่นเดียวกัน ในบทนี้จะกล่าวถึงสายอากาศขั้นพื้นฐาน โดยทั่วไป คุณสมบัติต่างๆ ตลอดจนสายอากาศหลายๆ แบบที่ใช้งานจริง โดยจะมีการคำนวณง่ายๆ ไม่ยุ่งยากซับซ้อนแต่อย่างใด

#### ๑. การพิจารณาขั้นพื้นฐาน

เมื่อป้อนกระแสความถี่สูงเข้าทางปลายต้นทางของสาย จะพบว่าพลังงานที่ส่งออกไปไม่ได้ปรากฏทั้งหมดทางด้านปลายทางของสาย โดยบางส่วนได้หายไป ทั้งนี้เพราะว่าเกิดการแพร่กระจายหายไปบางส่วน ถึงแม้จะมองไม่เห็นแต่กลไกของการแพร่กระจายสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Maxwell การคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับหาพลังงานที่หายไปนี้ ไม่เพียงหาปริมาณที่หายไปเท่านั้น แต่ยังสามารถบอกทิศทางได้ด้วย วิธีการคำนวณนั้นค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากพอสมควร จึงจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้

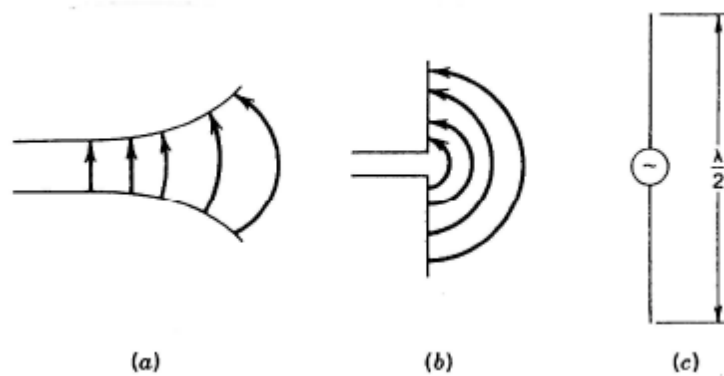
##### ๑.๑ กลไกของการแพร่กระจายคลื่น

เมื่อมีการป้อนสัญญาณเข้าไปในสายส่งวงจรเปิด สัญญาณจะเดินทางไปถึงปลายและเกิดการสะท้อนกลับ อันเนื่องมาจากภาระไม่แมทช์ (Match) ผลรวมของสัญญาณที่เดินทางไปข้างหน้ากับสัญญาณที่สะท้อนกลับทำให้เกิด คลื่นนิ่ง (Standing Wave) บนสาย ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑ สัญญาณที่สะท้อนกลับจะไม่เท่ากับสัญญาณที่ป้อนเข้าทั้งหมด ทั้งนี้เพราะมีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งหลุดออกไปจากระบบที่ปลายสายและถูกแพร่กระจายออกไป พลังงานที่หลุดออกไปในรูปของการแพร่กระจายที่ปลายสายนี้จะมีปริมาณน้อยมาก ด้วยสาเหตุสองประการ คือเนื่องจากปลายเปิด ดังนั้นภาระของสายก็คือพื้นที่บริเวณปลายสาย จึงเท่ากับไม่แมทช์ การถ่ายเทกำลังงานสู่ภาระจึงมีน้อยมาก การแพร่กระจายจากปลายข้างหนึ่งจะมีชั่วคราวกันข้ามกับการแพร่กระจายจากปลายอีกข้างหนึ่ง และด้วยเหตุที่สายทั้งสองอยู่ใกล้กัน ระยะห่างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น จึงเกิดการหักล้างกัน ซึ่งก็เป็นเหตุผลเดียวกันที่ว่าทำไมสายส่งแบบคู่ขนานที่ใช้สำหรับความถี่ต่ำ จึงไม่มีการแพร่กระจาย



ภาพที่ ๒-๑ การแพร่กระจายจากสายส่ง

หากเราแยกให้ปลายสายทั้งสองห่างออกจากกันดังภาพที่ ๒-๒ (a) จะทำให้การหักล้างของการแพร่กระจายจากปลายสายน้อยลง ซึ่งนั่นก็คือทำให้เกิดการแพร่กระจายจากสายส่งมากขึ้น ในพื้นที่รอบๆปลายสาย ยิ่งแยกปลายสายให้ห่างกันมาก คลื่นที่เดินทางมาตามสายจะสะท้อนกลับตอนปลายด้วยความยากลำบาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการแพร่กระจายเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการแพร่กระจายของระบบนี้จะดีที่สุด เมื่อแยกให้ปลายสายทั้งสองอยู่ในระนาบเหมือนกับเส้นเดียวกัน ดังในภาพที่ ๒-๒ (b) ซึ่งตอนนี้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะกระจายสู่พื้นที่รอบๆอย่างเต็มที่ ชนิดของตัวแพร่กระจายแบบนี้เรียกว่า ไดโพล (Dipole)



ภาพที่ ๒-๒ วิวัฒนาการของ ไดโพล (a) สายส่งปลายเปิดแยกปลายให้กว้างขึ้น (b) ปลายสายเมื่อแยกให้เป็นเส้นแนวเดียวกัน (c) สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

เมื่อความยาวทั้งหมดจากปลายถึงปลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เราเรียกดาวแพร่กระจายนี้ว่า สายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่น (Half Wave Dipole) มีรูปแบบดังในภาพที่ ๒-๒ (c) การที่มีการแพร่กระจายมากขึ้น ก็ด้วยเหตุผลที่ว่า ไดโพลครึ่งคลื่นมีคุณสมบัติพื้นฐานเหมือนกับสายส่งปลายเปิดที่มีความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น นำมาแยกปลายออกจากกัน ซึ่งที่ปลายจะมีอิมพีแดนซ์สูง ส่วนที่จุดป้อนจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำ กระแสจึงไหลมากที่จุดป้อน ดังนั้น ไดโพลครึ่งคลื่น จึงเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพดีในการแพร่กระจาย คุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศถูกกำหนดด้วยวิธีการเทียบกับสายอากาศมาตรฐานซึ่งเป็นสายอากาศในทางทฤษฎี ไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่มีลักษณะที่ไม่ซับซ้อนง่ายแก่การเข้าใจและคำนวณ สายอากาศที่ใช้อ้างอิงถึงอันหนึ่งก็คือ Elementary Doublet

## ๑.๒ สายอากาศ ดับเลท (Elementary Doublet)

ไดโพลสั้นหรือ Elementary Doublet เป็นสายอากาศชนิดที่ง่ายที่สุด มีความบางมาก และความยาว  $l$  ซึ่งสั้นมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น

$$\begin{aligned} f_m &= 54 \times 216 \\ &= 108 \text{ MHz} \\ &= v_c / f \\ &= 3 \times 10^8 / 108 \times 10^6 \\ &= 2.778 \text{ m} \\ l_1, l_2, l_3 \\ 0, \phi, \lambda \\ l_c &= 292 / f \end{aligned}$$

สมมติให้  $I$  คือกระแสที่ไหล ผ่านไดโพล มีค่าคงที่ และกระแสของความถี่วิทยุ คือ  $i = I \sin \theta$  โดยการใช้สมการ Maxwell ช่วยเราสามารถหาความเข้มของสนามที่แพร่กระจายคือ

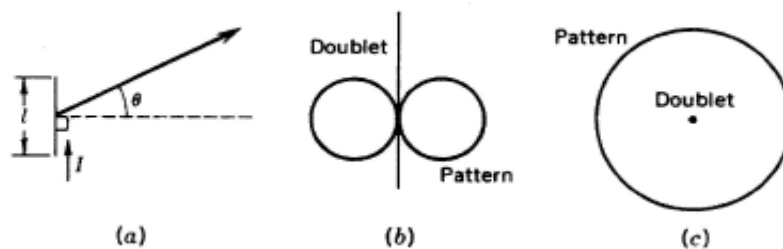
$$\begin{aligned} E &= \left[ Z \left( \frac{l}{2} \right) \frac{I}{d\lambda} \right] \cos \theta \cos \omega \left( t - \frac{d}{v_c} \right) \\ &= \left[ \frac{60\pi I}{d\lambda} \right] \cos \theta \cos \omega \left( t - \frac{d}{v_c} \right) \end{aligned} \quad (๑)$$

ในเมื่อ

- $E$  = ความเข้มสนามของการแพร่กระจาย V/m
- $Z$  = characteristic impedance ในอวกาศ = 120 Ohm
- $d$  = ระยะทางที่ความเข้มของสนามถูกวัดห่างจาก ไดโพล
- $V_c$  = อัตราความเร็ว ของแสงในอวกาศ
- $\theta$  = มุมของความเอียงที่แสดงในภาพที่ ๒-๓(a)

เทอมแรกของสมการจะแสดงขนาด (Magnitude) ของสนามไฟฟ้าจากระยะที่วัด ซึ่งขนาดความแรงของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกำลังของเครื่องส่ง ( $Z$  และ  $I$ ) โดยผกผันกลับกับระยะทางที่วัดและผกผันตรงกับ  $l / \lambda$

เทอมที่สองของสมการ  $\cos \theta$  เป็นตัวกำหนดรูปแบบของการแพร่กระจายที่ตำแหน่งทำมุมตั้งฉากกับไดโพล จะเกิดการแพร่กระจายสูงสุดและลดลงเรื่อยๆ เมื่อทำมุมหมุนเข้าสู่แนวเดียวกันกับไดโพล จนเป็นศูนย์ที่แนวทับกัน ซึ่งรูปแบบ (Pattern) การแพร่กระจายของ Elementary Doublet จะมีลักษณะเหมือนขนมโดนัท มีภาพตัดดั่งแสดงในภาพที่ ๒-๓(b) คล้ายเลขแปดหรือถ้ามองจากด้านบนตามแนวตั้งของไดโพล จะเป็นรูปวงกลม



ภาพที่ ๒-๓ Elementary Doublet. (a) สายอากาศ Doublet (b) ภาพตัดแนวตั้งรูปแบบ และ (c) ภาพตัดแนวนอนรูปแบบของสายอากาศ Doublet ตามลำดับ

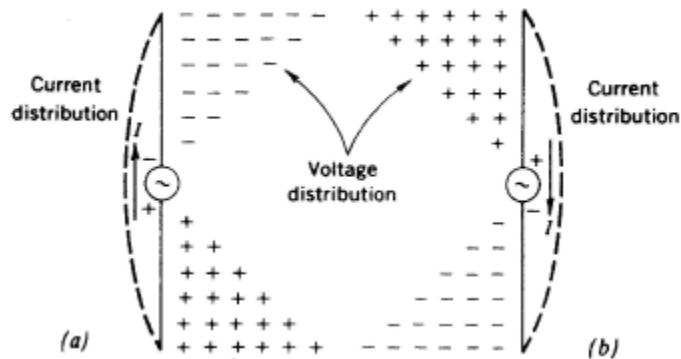
ส่วนทอมที่สามของสมการ เป็นส่วนที่มีความสำคัญน้อยที่สุด คือเพื่อแสดงเฟสของความแรงสนาม ณ จุดที่วัดโดยเทียบกับเฟสของสัญญาณในสายอากาศ ด้วยเวลาที่ใช้เดินทางจากสายอากาศถึงจุดนั้น ( $d/v_c$ ) นอกจากสนามของการแพร่กระจาย (Radiation Field) รอบๆ สายอากาศแล้ว ยังมีสนามการเหนี่ยวนำ (Induction Field) เกิดขึ้นด้วย ห้อมล้อมตัวสายอากาศ ความเข้มสนามการเหนี่ยวนำจะมีมากที่บริเวณใกล้ๆ ตัวแพร่กระจาย (Radiator) อย่างไรก็ตาม ความเข้มนี้จะค่อยๆ จางหายที่ระยะทางไกลออกไป จึงไม่สำคัญอะไรมากนักที่ระยะห่างๆ แต่ถ้านำลวดตัวนำ หรือสายอากาศตัวอื่นมาวางใกล้ๆ จะเกิดการเหนี่ยวนำทำนองเดียวกันกับการเหนี่ยวนำของขดลวด และจากปรากฏการณ์นี้ สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น ในกรณีสายอากาศแถวลำดับ (Arrays Antenna)

## ๒. ตัวแพร่กระจายคลื่นในอวกาศ

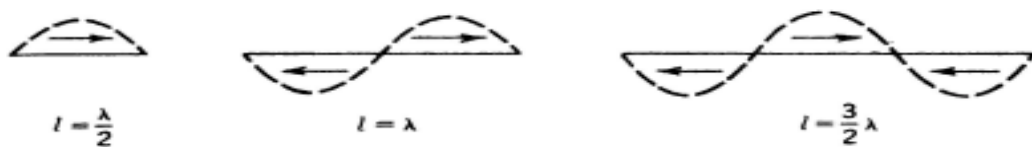
ลวดตัวนำเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นแบบง่ายที่สุดในบรรดาตัวแพร่กระจายทั้งหลาย และอาจคิดว่าสายอากาศลวดก็คือส่วนประกอบของดับเลท (Doublet) จำนวนมากนำมาต่อกัน ดังนั้นคุณสมบัติจึงคล้ายกันกับสายอากาศดับเลท (Doublet) แต่ความแตกต่างกันที่มีอยู่ก็คือความยาวของสายอากาศ ในการพิจารณาเบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศก็เช่นเดียวกันกับการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือจะพิจารณาในกรณีที่ระยะห่างไกลจากพื้นดินคือในอวกาศว่าง (Free space)

### ๒.๑ การกระจายของกระแสและแรงดันในสายอากาศ

การกระจายของกระแสและแรงดันในสายอากาศ จะคล้ายกับการกระจายของกระแสและแรงดันในสายส่ง ในทางปฏิบัติสายอากาศจะมีความยาวเป็นสัดส่วนของความยาวคลื่น และบางครั้งอาจจะมีหลายเท่าของความยาวคลื่น เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่จุดใดจุดหนึ่งบนสายอากาศ ทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ซึ่งหมายถึงเกิดมีกระแสและแรงดันเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งตลอดความยาวสายอากาศ ผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันนี้ทำให้เกิดสนามของการแพร่กระจาย สนามนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวของสายอากาศ กำลังการสูญเสียของตัวเอง และความหนาของลวดสายอากาศก็มีความสำคัญ แต่ในทางปฏิบัติเราถือว่าไม่มีการสูญเสียเลย โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศถือว่าเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น



ภาพที่ ๒-๔ การกระจายของกระแสและแรงดันบน ไดโพลครึ่งคลื่น (a) ครึ่งรอบแรก (b) ครึ่งรอบหลัง



ภาพที่ ๒-๕ การกระจายของกระแสนเรโซแนนซ์ไดโพล (Resonant Dipole)

จากภาพที่ ๒-๔ แสดงการกระจายของแรงดันและกระแสในทางอุดมคติตลอดความยาวของไดโพลครึ่งคลื่น ซึ่งปกติจะเป็นสายอากาศแบบง่าย ๆ ที่ใช้ในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าเหมือนกันกับการกระจายของกระแสและแรงดันบนสายส่งปลายเปิด ขนาดหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น โดยที่จุดป้อนจะมีแรงดันต่ำ แต่กระแสสูง แรงดันและกระแสจะกลับขั้วทุกๆ ครึ่งรอบ ส่วนภาพที่ ๒-๕ แสดงการกระจายของกระแสนบนสายอากาศ ที่มีความยาวเป็นทวีคูณของ  $\lambda/2$  ซึ่งเหมือนกัน และเทียบได้กับสายส่งในส่วนการกระจายแรงดันก็คงเหมือนกันจึงไม่ได้แสดงในรูปแบบนี้

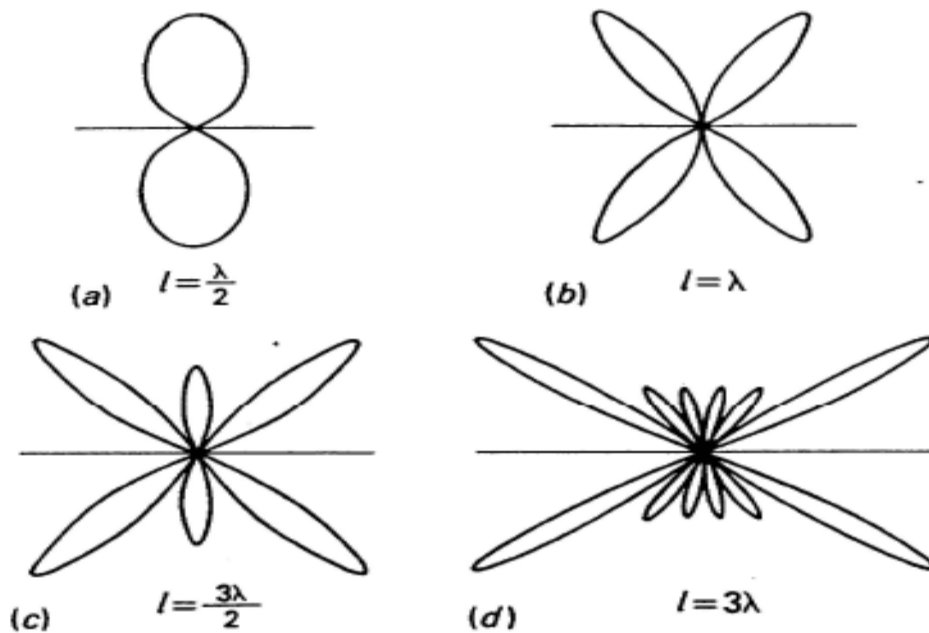
## ๒.๒ สายอากาศเรโซแนนซ์ (Resonant)

สายอากาศเรโซแนนซ์ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับสายส่งเรโซแนนซ์ และสายอากาศไดโพล ดังนั้นสายอากาศ จะมีลักษณะเหมือนสายส่งวงจรเปิดด้านปลาย ที่มีความยาวพอดีกับระยะเรโซแนนซ์ ซึ่งที่ระยะพอดีเรโซแนนซ์ จะมีที่ทุกๆ ความยาวเท่ากับ  $1/4$  ของความยาวคลื่น ดังนั้นสายอากาศเรโซแนนซ์ จะมีความยาวเป็นผลทวีคูณของ  $1/4$  ของความยาวคลื่น เหตุผลในการเลือกความยาวที่ระยะเรโซแนนซ์เป็นสายอากาศ เพราะที่ตำแหน่งนี้มีอิมพีแดนซ์ต่ำและโดยปกติแหล่งจ่ายสัญญาณ (Source) ให้กับสายอากาศจะมีเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำด้วย จึงทำให้สามารถต่อกันได้ดีโดยไม่ทำให้คลื่นนิ่ง (Standing Wave) เสียรูปแบบ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศในอวกาศ ขึ้นอยู่กับความยาวของมันเป็นหลัก สำหรับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น จะคล้ายรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศดับเลข แต่มีลักษณะแบนราบกว่า สูตรในการหารูปแบบ ได้จากการบวก



หรือโดยการอินทิเกรตสมการ สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศดับเลทตลอดความยาวของสายอากาศ รูปแบบของสายอากาศที่ความยาว  $l/2$  ของความยาวคลื่นดังภาพที่ ๒-๖(a) รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นคือเส้นที่ลากต่อจุด ซึ่งมีความเข้มสนามเท่ากันรอบแหล่งกำเนิดในอวกาศ ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกันกับเส้นอนุกรมที่มีจุดที่มีอนุกรมเท่ากันบนแผนที่ทางอุตุนิยมวิทยา เมื่อความยาวของสายอากาศเท่ากับความยาวคลื่น ขั้วกระแสในส่วนครึ่งหนึ่งของสายอากาศจะตรงกันข้ามกับอีกครึ่งหนึ่ง ดังภาพที่ ๒-๕ (b) ดังนั้นการแพร่กระจายที่แนวมุมฉากกับสายอากาศจะเป็นศูนย์ เพราะว่าสนามครึ่งหนึ่งจะหักล้างกับสนามอีกครึ่งหนึ่ง

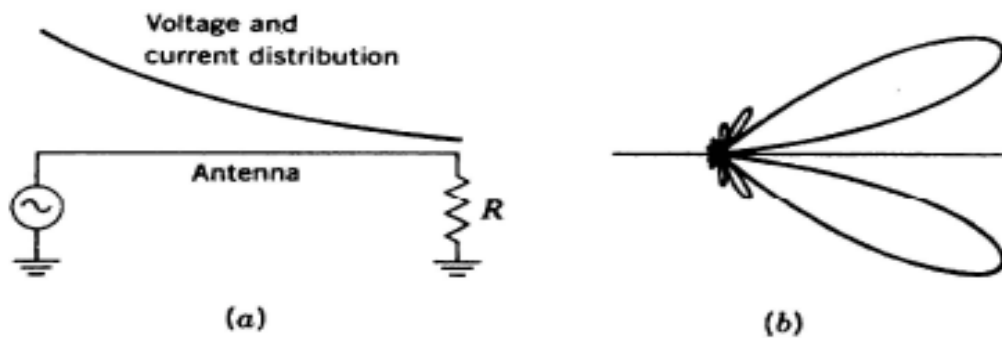
ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ค่าสูงสุดจะมีอยู่ที่มุม  $๔๕^{\circ}$  กับสายอากาศ และผลทั้งหมดเมื่อกระแสสลับรอบ ทำให้เกิดการแพร่กระจายสูงสุดสี่มุม เรียกว่ามี ๔ พู (lobes) ดังภาพที่ ๒-๖ (b) เมื่อความยาวของ ไดโพลเพิ่มขึ้นเป็น  $3\lambda/2$  ของความยาวคลื่น การกระจายของกระแสจะเป็นดังภาพที่ ๒-๕ (c) ผลของการแพร่กระจายในทิศทางเดียวกันจะเสริมกัน ส่วนที่มีทิศทางตรงกันข้ามกันก็จะหักล้าง จึงได้รูปแบบการแพร่กระจายดังภาพที่ ๒-๖ (c) ที่มุมตั้งฉากกับสายอากาศ จะมีการแพร่กระจายเล็กน้อยเป็นพुरอง (Minor Lobes) ส่วนทิศทางการแพร่กระจายสูงสุด หรือพูหลัก (Major Lobes) จะมีทิศทางใกล้เคียงกับแนวสายอากาศ เมื่อสายอากาศไดโพลยาวเป็น  $3\lambda$  รูปแบบการแพร่กระจาย ดังภาพที่ ๒-๖(d) จะเห็นได้ว่า เมื่อความยาวของสายอากาศเรโซแนนซ์ เพิ่มขึ้นจำนวนของพู จะเพิ่มขึ้นด้วย และทิศทางของพูหลักจะยิ่งเข้าใกล้แนวเดียวกันกับทิศทางของไดโพล จำนวนพูทั้งสองด้านของสายอากาศไดโพลจะมีเท่าๆ กัน โดยด้านหนึ่งจะมีพูเท่ากับจำนวน  $l/2$  ของความยาวสายอากาศ เช่น สายอากาศยาว  $3\lambda/2$  จะมี ๓ พู สายอากาศยาว  $3\lambda$  จะมีจำนวนด้านหนึ่ง ๖ พู เป็นต้น



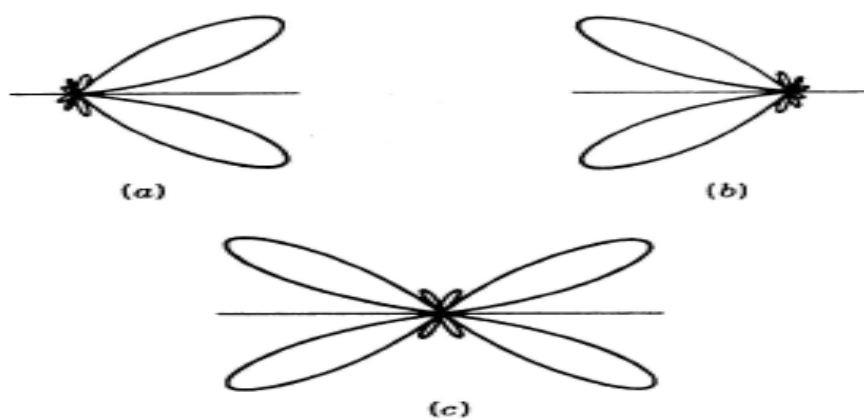
ภาพที่ ๒-๖ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศเรโซแนนซ์ไดโพล ที่ขนาดต่างๆ

### ๒.๓ สายอากาศไม่เรโซแนนซ์ (Non-Resonant)

สายอากาศไม่เรโซแนนซ์ จะเหมือนกันกับสายส่งไม่เรโซแนนซ์ คือไม่เกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ทั้งนี้ เพราะไม่มีการสะท้อนกลับ เนื่องจากการต่อภาระที่ปลาย ด้วยค่าที่เหมาะสม จะมีเฉพาะคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในสายส่ง โดยปกติถ้าภาระแมทช์กับสายส่งอย่างดี กำลังงาน จะถูกถ่ายเทไปที่ภาระทั้งหมด แต่สำหรับสายอากาศดังภาพที่ ๒-๗ กำลังงานที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า ประมาณ  $\frac{2}{3}$  ส่วนจะแพร่กระจายออกไป ส่วนที่เหลือจะสูญเสียในสายอากาศ โดยไม่มีการสะท้อน กลับมาที่อินพุทเลยจากรูป ๒-๗ (b) เป็นรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศไม่เรโซแนนซ์ ซึ่ง คล้ายกันกับสายอากาศเรโซแนนซ์ แต่จะผิดกันที่คุณสมบัติอีกอย่าง คือสายอากาศไม่เรโซแนนซ์ จะมี ทิศทางเดียว (Unidirectional) อันเป็นผลจากการที่คลื่นเดินทางไปข้างหน้าอย่างเดียว ส่วน สายอากาศเรโซแนนซ์เกิดคลื่นนิ่ง เนื่องจากการสะท้อนกลับด้วย ดังนั้น ถ้าเราแยกรูปแบบการ แพร่กระจายตอนเดินทางไปข้างหน้า และตอนสะท้อนกลับ จะได้ดังภาพที่ ๒-๘ (a) และ ๒-๘ (b) ตามลำดับหากนำมารวมกันก็จะได้ดังภาพที่ ๒-๘ (c) อันเป็นรูปแบบ การแพร่กระจายของ สายอากาศเรโซแนนซ์ มีสองทิศทาง (Bidirectional)



ภาพที่ ๒-๗ สายอากาศไม่เรโซแนนซ์ (a) การแพร่ของกระแส (b) รูปแบบการแพร่กระจาย



ภาพที่ ๒-๘ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศเรโซแนนซ์ (a) เมื่อคลื่นเดินทางไปข้างหน้า (b) เมื่อคลื่นสะท้อนกลับ (c) ผลรวมของรูปแบบ

### ๓. พารามิเตอร์ (Parameters) ของสายอากาศ

### ๓.๑ อัตราการขยาย (Gain)

เกณฑ์สายอากาศ คืออัตราส่วนปริมาณกำลังงานการแพร่กระจาย ในทิศทางที่กำหนดของสายอากาศ เทียบกับปริมาณกำลังงานการแพร่กระจายในทิศทางเดียวกัน ที่ระยะทางเท่ากัน และป้อนกำลังงานเท่ากัน ของจุดกำเนิด (Point Source) หรือ สายอากาศ ไอโซโทรปิก (Isotropic) สายอากาศไอโซโทรปิก เป็นสายอากาศในอุดมคติที่ไม่มีจริงในทางปฏิบัติ มีรูปแบบการแพร่กระจายเป็นรูปทรงกลม ถือว่ามีกำลังงานการแพร่กระจายเท่ากันในทุกทิศทาง อัตราส่วนของปริมาณกำลังงานเรียกว่า Directive Gain ในการหา Directive Gain ของสายอากาศ อันดับแรกให้หาปริมาณกำลังงานของสายอากาศ ในระยะทางและทิศทางตามค่ากำหนด อาจจะคำนวณหรือวัดก็ได้ ขึ้นต่อไปก็คำนวณหาปริมาณกำลังงานจากสายอากาศไอโซโทรปิก ที่ระยะเดียวกันและป้อนกำลังงานเท่ากัน นำผลที่ได้มาเทียบอัตราส่วนได้เป็น Directive Gain ซึ่งจะมีค่ามากกว่า ๑ เสมอ สายอากาศไดโพล ค่าของ Directive Gain จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวเช่น ความยาว  $\lambda/2$  มีเกณฑ์ ๑.๖๔ และความยาว  $8\lambda$  มีเกณฑ์ ๗.๑ ค่าเหล่านี้วัดในอวกาศ แต่ที่ความยาวเดียวกัน สายอากาศไม่เรโซแนนซ์จะมีเกณฑ์ ๓.๒ และ ๑๗.๔ ตามลำดับ จะเห็นว่าสายอากาศไม่เรโซแนนซ์ มีเกณฑ์สูงกว่าสายอากาศเรโซแนนซ์จริงๆ แล้วค่าเกณฑ์เหล่านี้ได้จากการวัดที่พูหลัก ซึ่งเป็นค่า Directive Gain สูงสุด บางครั้งอาจจะเรียกว่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ก็ได้

### ๓.๒ อัตราการขยายกำลัง (Power Gain)

ในการวัดอัตราการขยายกำลัง ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศที่วัด เพื่อให้ได้ค่าความเข้มสนามในทิศทางพูหลักที่ระยะทางเท่ากัน เท่ากับค่าความเข้มสนามของสายอากาศมาตรฐาน แล้วเทียบอัตราส่วนกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศทั้งสอง

$$\text{Power Gain} = 10 \log (P_r/P_t) \text{ (dB)} \quad (๒)$$

$P_r$  คือกำลังของสายอากาศอ้างอิง (มาตรฐาน)

$P_t$  คือกำลังของสายอากาศที่ทดสอบ

ตัวอย่าง เมื่อป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศมาตรฐาน 500 mW. สามารถวัดค่าความเข้มสนามที่ระยะทางและทิศทางเดียวกัน ได้เท่ากับเมื่อป้อนกำลังงานขนาด 125 mW. ให้กับสายอากาศที่นำมาทดสอบ จงหาอัตราการขยายกำลัง

$$\begin{aligned} \text{Power Gain} &= 10 \log [500/125] \\ &= 10 \log 4 = 10 \times 0.6021 \\ &= 6.021 \text{ dB} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่ากรณี Directivity เราคำนึงถึงกำลังการแพร่กระจายในทิศทางที่สูงสุด ส่วนอัตราการขยายกำลัง พิจารณาจากกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศ สองอย่างนี้คล้ายกัน ยกเว้นอัตราการขยายกำลัง มีส่วนของการสูญเสียในสายอากาศเข้ามาด้วย เราจึงเขียนสูตรของอัตราการขยายกำลัง อีกอย่างได้ว่า

ในเมื่อ

$$AP = nD \quad (๓)$$

AP : อัตราการขยายกำลัง

D : สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

n : ประสิทธิภาพสายอากาศ (= ๑ หากไม่มีการสูญเสียเลย)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ปกติเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ส่วนอัตราการขยายกำลัง ใช้ทางปฏิบัติเป็นสำคัญ ค่าทั้งสองนี้จะเท่ากันสำหรับสายอากาศย่าน VHF และ UHF ส่วนใหญ่ แต่สายอากาศย่าน MF และ LF ค่าจะต่างกันบ้างเพราะมีการสูญเสีย

### ๓.๓ ความต้านทานในสายอากาศ

ความต้านทานของสายอากาศ ( $R_a$ ) ประกอบด้วยความต้านทานสองส่วน คือความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่น ( $R_r$ ) เกิดขึ้นเพราะการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความต้านทานที่กำหนดจากค่าสูญเสียในสายอากาศ ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น กำหนดจากอัตราส่วนของกำลังงานการแพร่กระจาย ต่อกำลังของกระแสที่จุดป้อน

$$R_r = \text{radiated power}/(\text{input current})^2 \quad \text{ohms.}$$

$$R_r = P_r / I_i^2 \quad (๔)$$

ความต้านทานของการสูญเสียในสายอากาศ เกิดจากการสูญเสียหลายอย่าง เช่น การดิสชาร์จ หรือโคโรนาเอฟเฟ็ค ฉนวนที่อยู่ใกล้สายอากาศไม่ดีพอ กระแสเอ็ดดี้ (Eddy Current) การเหนี่ยวนำในโลหะที่อยู่ใกล้สายอากาศ เช่น ลวดยึดเสาอากาศ เป็นต้น ความสูญเสียเหล่านี้ทำให้เหมือนกับมีความต้านทานต่ออยู่ระหว่างสายอากาศกับพื้นดิน เรารวมเรียกว่า  $R_d$

เพราะฉะนั้นความต้านทานในสายอากาศ

$$R_a = R_r + R_d \quad (๕)$$

ในทางปฏิบัติ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง จะต้องทำให้  $R_d$  มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ  $R_r$  โดยประสิทธิภาพของสายอากาศหาได้จาก

$$n = R_r/(R_r+R_d) \quad (๖)$$

ตัวอย่าง จงหาความต้านทานการแพร่กระจาย ของสายอากาศที่มีกำลังการแพร่กระจาย 15 W. มีกระแสป้อนเข้า 400 mA.

$$\begin{aligned}
 R_r &= Pr/l_1^2 \\
 &= 15/(0.4)^2 \\
 &= 93.75 \text{ ohms.}
 \end{aligned}$$

สำหรับสายอากาศไดโพลสั้นๆ ความยาวน้อยกว่า 1/2 ของความยาวคลื่น ค่าของความต้านทานการแพร่กระจาย จะสัมพันธ์กับความยาวของสายอากาศ โดยสามารถหาได้จากตาราง ในหนังสือคู่มือสายอากาศ คู่มือเครื่องวัด หรือการคำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned}
 R_r &= 80\pi^2 \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \\
 &= 790 \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2
 \end{aligned} \tag{๗}$$

$$R_r = 790 \left(\frac{1f}{v_c}\right)^2 \tag{๘}$$

ในเมื่อ

$R_r$  : ความต้านทานการแพร่กระจาย (ohm.)

$l$  : ความยาวสายอากาศ (cm.)

$\lambda$  : ความยาวคลื่น (cm.)

$f$  : ความถี่ (Hz.)

$v_c$  : ความเร็วแสง ( $3 \times 10^{10}$  cm./s.)

ตัวอย่าง สายอากาศยาว 15 cm. ใช้งานที่ความถี่ 400 MHz. จงหา  $R_r$

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{v_c}{f} \\
 &= 3 \times 10^{10} / 400 \times 10^6 \\
 &= 75 \text{ cm} \\
 R_r &= 790 [1/\lambda]^2 \\
 &= 790 [15/75]^2 \\
 &= 31.6 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

จากสมการ เมื่อ  $1/\lambda = 1/10$  ค่า  $R_r = 7.9$  ohms. แต่สำหรับไดโพลที่มีความยาว  $\lambda/4$  ค่า  $R_r$  จะเท่ากับ 49.4 ohms. ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศปกติจะหมายถึงความต้านทานทางอินพุทของสายอากาศซึ่ง จะเป็นค่าคอมเพล็กซ์

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (\text{๙})$$

### ๓.๔ แบนด์วิดท์สายอากาศ

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ คือช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด หรือช่วงความถี่ที่สายอากาศ ยังคงมีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลาง จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้ ผิดไปจากข้อกำหนดมาตรฐาน เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์ รูปแบบการแพร่กระจาย บีมวิดท์ โพลาริเซชัน เกณฑ์และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติได้อย่างใดอย่างหนึ่งได้

จึงต้องมีการกำหนดให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติเราใช้คุณสมบัติของรูปแบบการแพร่กระจายกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ รูปแบบแบนด์วิดท์(Bandwidth Pattern) คือค่าความแตกต่างระหว่างความถี่ที่ทำให้กำลังที่ได้รับลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power) ของค่าสูงสุด ในทิศทางการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดสายอากาศที่วิ้งง่าย ๆ เช่น สายอากาศไดโพล หรือ สายอากาศหุกระต่าย ต้องสามารถรับสัญญาณจาก VHF แบนด์ความถี่ตั้งแต่ 54 - 216 MHz. หรือสายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) เล็กๆ รับ UHF แบนด์ความถี่ตั้งแต่ 470 - 1,000 MHz. ผลต่างของความถี่จะเรียกว่าเป็นแบนด์วิดท์ของสายอากาศก็ได้

แต่โดยความจริงแล้ว สายอากาศที่วิ้งที่กล่าวถึงนี้ เป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพแย่งที่สุดที่พอรับสัญญาณได้ เพราะอาศัยเครื่องรับมีความไวสูงและสัญญาณที่ส่งมาก็แรง การหาความถี่เฉลี่ย เพื่อออกแบบสายอากาศที่วิ้งในทางปฏิบัติใช้สูตรง่ายๆ คือ

$$f_m = \sqrt{f_L \cdot f_H} \quad (๑๐)$$

ในเมื่อ

$f_m$  : ค่าความถี่เฉลี่ยเชิงเรขาคณิต

$f_L$  : ค่าต่ำสุดของแถบความถี่

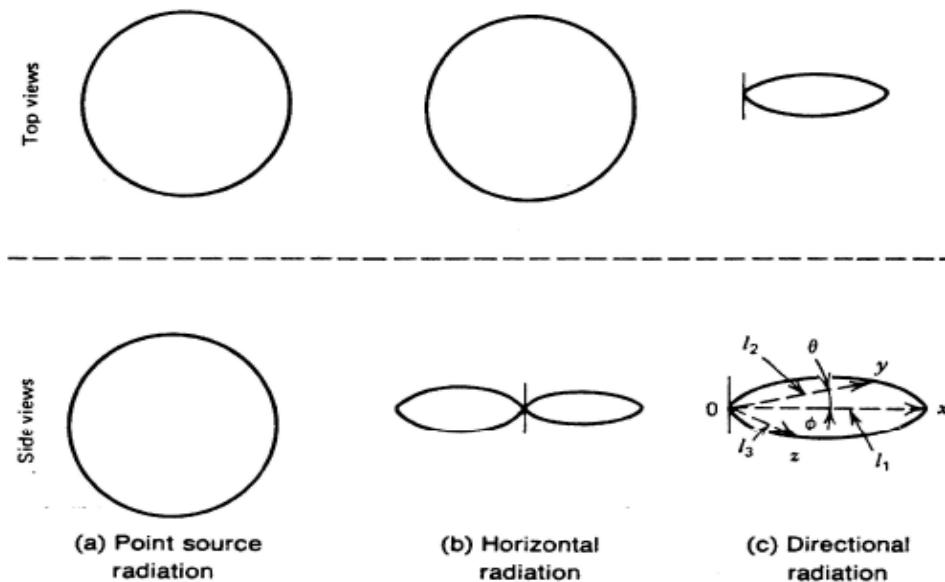
$f_H$  : ค่าสูงสุดของแถบความถี่

ตัวอย่าง สายอากาศที่วิ้ง VHF คลุมย่านความถี่ 54 - 216 MHz. จงหาความยาวของสายอากาศ

$$\begin{aligned} f_m &= 54 \times 216 \\ &= 108 \text{ MHz} \\ &= v_c / f \\ &= 3 \times 10^8 / 108 \times 10^6 \\ &= 2.778 \text{ m} \end{aligned}$$

### ๓.๕ รูปแบบการแพร่กระจาย (Radiation Pattern)

รูปแบบการแพร่กระจายแสดงลักษณะความแรงของสัญญาณที่แพร่กระจายรอบๆ สายอากาศทุกทิศทาง ตัวแพร่กระจายในอุดมคติที่เราเรียกว่าจุดกำเนิด (Point Source) มีรูปแบบการแพร่กระจายเป็นรูปทรงกลม ซึ่งหมายถึงว่าความเข้มสนามที่ระยะทางเท่าๆ กัน จะเท่ากันหมดในทุกทิศทางดังภาพที่ ๒-๙ (a) สายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายทางแนวนอน จะมีรูปร่างเหมือนขนมโดนัท โดยมีสายอากาศเป็นแกนทางแนวตั้ง ดังภาพที่ ๒-๙ (b) สายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายแคบมากๆ จะเป็นสายอากาศชนิดมีทิศทาง (Directional) ดังภาพที่ ๒-๙ (c) รูปแบบการแพร่กระจายจะบ่งถึงความเข้มสนามที่วัดได้ในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างในภาพที่ ๒-๙ (c) X,Y,Z เป็นเวกเตอร์สนามความยาวเท่ากับ  $I_1, I_2, I_3$  โดยวัดที่มุม  $0, \phi, \theta$  ตามลำดับ ความเข้มสนามที่จุด X,Y,Z จะเท่ากันหมด เพียงแต่ x อยู่ห่างจากสายอากาศมากที่สุด และ z ใกล้ที่สุด นั่นคือสัญญาณจะแรงที่สุดในแนว ox สรุปได้ว่า รูปแบบการแพร่กระจาย คือเส้นขอบ (Locus) ของจุดทั้งหมดที่มีความเข้มสนามเท่ากัน



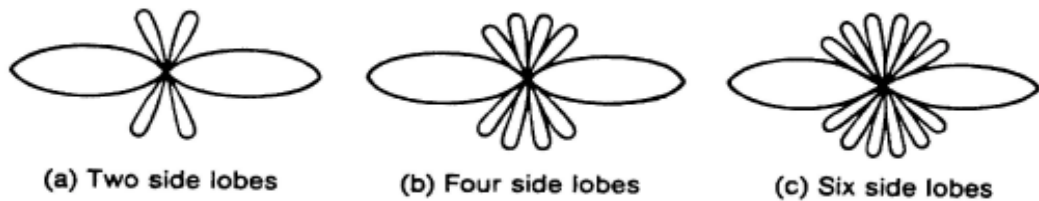
ภาพที่ ๒-๙ รูปแบบการแพร่กระจายหลาย ๆ แบบ

### ๓.๖ พูข้าง (Side Lobe)

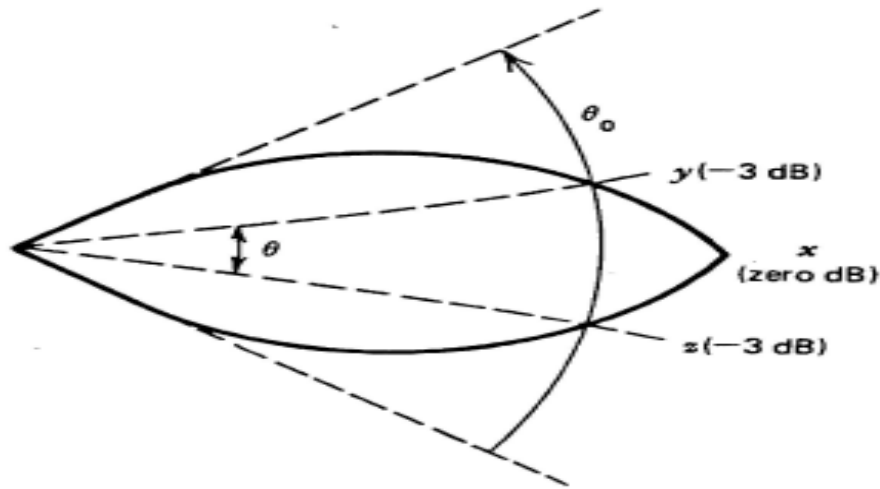
พูข้าง (Side Lobe) คือส่วนหนึ่งของรูปแบบการแพร่กระจาย ที่มีความเข้มสนามน้อย เกิดขึ้นนอกเหนือจากรูปแบบการแพร่กระจายพูหลัก (Major Lobe) ที่มีความเข้มของสนามมาก ในทางปฏิบัติเป็นการยาก ที่จะทำให้มีรูปแบบการแพร่กระจายหลักอย่างเดียว แต่มักจะมีพูข้างเกิดขึ้นด้วยเสมอ พูข้างของสายอากาศจะแพร่กระจายพลังงานในทิศทางที่ไม่ต้องการ ซึ่งถ้าเป็นสายอากาศเครื่องรับ ก็จะได้รับสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการเข้ามา

### ๓.๗ ความกว้างลำ (Beamwidth)

การกำหนดความกว้างลำ (Beamwidth) ของสายอากาศ มีอยู่ ๒ แบบคือ แบบแรกกำหนดจากมุมที่เกิดจากการลากเส้นที่จุดตัดของเส้นโค้งกับเส้นขอบทั้งสองด้านของรูปแบบการแพร่กระจายมายังสายอากาศ ในภาพที่ ๒-๑๑ คือมุม  $\theta$  จุดตัดคือ  $y$  และ  $z$  สำหรับรัศมีของเส้นโค้ง คือระยะกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3 dB) ในแนวที่มีกำลังงานสูงสุด ซึ่งในรูปคือแนว  $x$  และแบบนี้เราเรียกว่าความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Point Beamwidth) อีกแบบกำหนดจากมุมที่ได้จากการลากเส้นในแนวที่ไม่มีความเข้มสนามเลย มาบรรจบกันที่สายอากาศเรียกว่า First-Nulls Beamwidth คือ มุม  $\theta$  , ในภาพที่ ๒-๑๑



ภาพที่ ๒-๑๐ รูปแบบการแพร่กระจายที่มีพูข้าง



ภาพที่ ๒-๑๑ ความกว้างลำ (Beamwidths)

### ๓.๘ โพลาริเซชัน (Polarization)

การเรียกโพลาริเซชันของสายอากาศ ว่าเป็นแบบตั้ง (Vertical) หรือแบบนอน (Horizontal) โดยปกติจะกำหนดตามระนาบของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะมีแนวขนานกับตัวสายอากาศ ดังนั้น Polarization จึงสามารถสังเกตได้ตามลักษณะสายอากาศ สายอากาศความถี่ต่ำมักเลือกโพลาริเซชันแบบตั้ง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับพื้นดิน ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนหลัง ส่วนโพลาริเซชันแบบนอน สัญญาณจะถูกรบกวนน้อย ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้กับสายอากาศความถี่สูง



### ๓.๙ อัตราส่วนหน้า-หลัง (Front To Back Ratio)

สายอากาศชนิดทิศทางเดียว จะต้องมีการแพร่กระจายมากที่สุดทางเดียว ฉะนั้น ค่าอัตราส่วนหน้า-หลัง จึงมีความสำคัญ อัตราส่วนนี้ทำได้จากค่าการแพร่กระจายในทิศทางที่สูงสุด ต่อค่าการแพร่กระจายในทิศทางตรงกันข้าม ในกรณีของสายอากาศเครื่องรับ การรับสัญญาณจากทิศทางตรงกันข้ามได้ด้วย จะทำให้ผลการรับไม่ดี เช่น ความแรงของสัญญาณจะลดลง หากสัญญาณจากอีกด้าน มีเฟสตรงกันข้ามกันหรือเกิดเงาในกรณีเครื่องรับโทรทัศน์รับสัญญาณที่สะท้อนมาจากด้านหลังด้วย

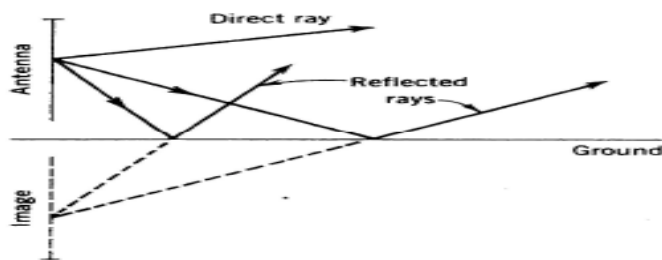
### ๔. ผลของพื้นดินที่มีต่อสายอากาศ

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ตลอดจนคุณสมบัติเบื้องต้นของสายอากาศที่กล่าวมาแล้ว ในตอนแรกๆนั้น เราพิจารณาในอวกาศว่าง (Free Space) ไกลออกไปจากพื้นดิน จึงไม่มีผลกระทบอะไรจากพื้นดิน แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้ว สายอากาศจำเป็นต้องวางใกล้ๆหรือต่อลงพื้นดิน โดยที่ผิวของพื้นดินมีคุณสมบัติในการสะท้อน ดังนั้นเมื่อวางสายอากาศอยู่ใกล้ๆจะทำให้ผลต่อลักษณะรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งผลของพื้นดินที่มีต่อสายอากาศ จะพิจารณาเป็นสองกรณี คือกรณีสายอากาศอยู่ใกล้พื้นดิน กับกรณีที่ต่อลงพื้นดินจริงๆ

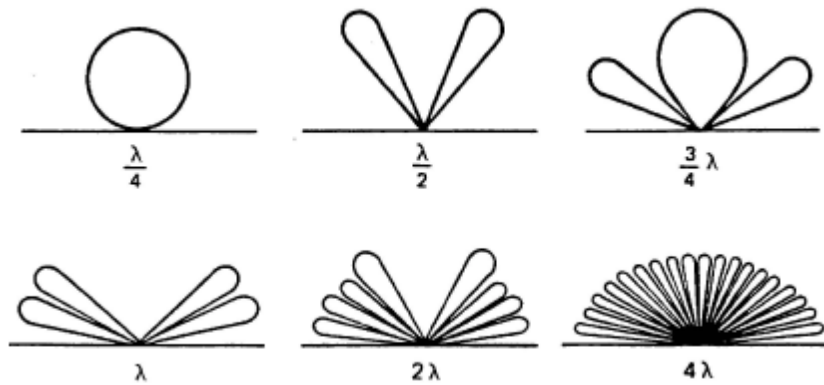
#### ๔.๑ สายอากาศที่ไม่ได้ต่อกับพื้นดิน (Unground Antennas)

เมื่อตัวกระจายคลื่นตั้งอยู่ใกล้กับพื้นผิวที่มีการสะท้อน การรับคลื่นที่ระยะทางและจุดใดๆ จะเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของทิศทางหลักกับทิศทางที่สะท้อน หากวางสายอากาศทางตั้ง (Vertical) ไว้เหนือพื้นดิน คลื่นที่แพร่กระจายออกไปบางส่วนจะไปกระทบพื้นดินและสะท้อนขึ้นมุมและทิศทางของคลื่นที่สะท้อนเหมือนกับแพร่กระจายออกจากสายอากาศจินตภาพใต้ดิน และเพื่อที่จะให้เข้าใจง่ายขึ้น ลองสมมุติว่ามี สายอากาศจินตภาพ เกิดขึ้นใต้สายอากาศจริง เรียกว่า สายอากาศจินตภาพ (Image Antenna) ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๒ จะเห็นว่าผลของการกระจายคลื่นเหมือนกับมาจากทั้งสายอากาศจริง และสายอากาศจินตภาพ มิใช่มาจากสายอากาศที่อยู่เหนือพื้นดิน อย่างเดียวการพิจารณาจะง่ายมากขึ้นถ้าเราสมมุติว่าพื้นผิวเป็นตัวนำที่ดี และเป็นตัวสะท้อนที่สมบูรณ์

กระแสที่ไหลในสายอากาศจินตภาพ ก็จะมีขนาดเหมือนกับสายอากาศจริง และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น จะได้จากผลการคำนวณที่เกิดจากการนำสายอากาศสองเส้นมาเรียงต่อกัน สายอากาศแนวนอน (Horizontal) เมื่อวางไว้ใกล้พื้นดิน ก็จะมีผลกระทบต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเหมือนกัน ภาพที่ ๒-๑๓ แสดงรูปแบบเมื่อเปลี่ยนระยะความสูงจากพื้นดินที่ค่าต่างๆ



ภาพที่ ๒-๑๒ สายอากาศเหนือพื้นดินกับสายอากาศจินตภาพ

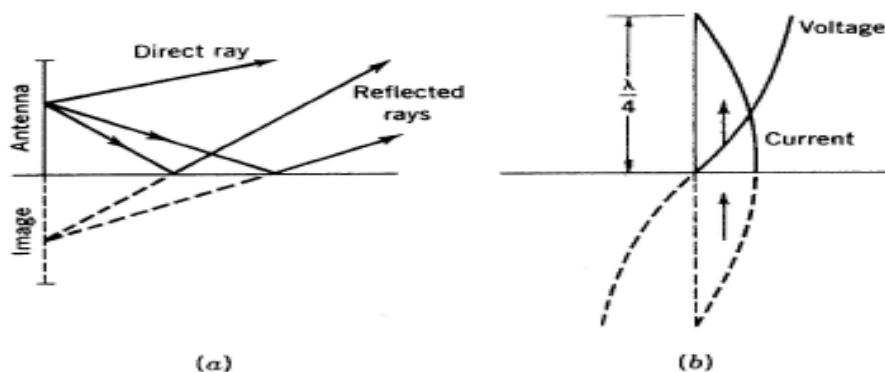


ภาพที่ ๒-๑๓ รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น  
วางแนวขนานเหนือพื้นดินที่ระยะต่างๆ

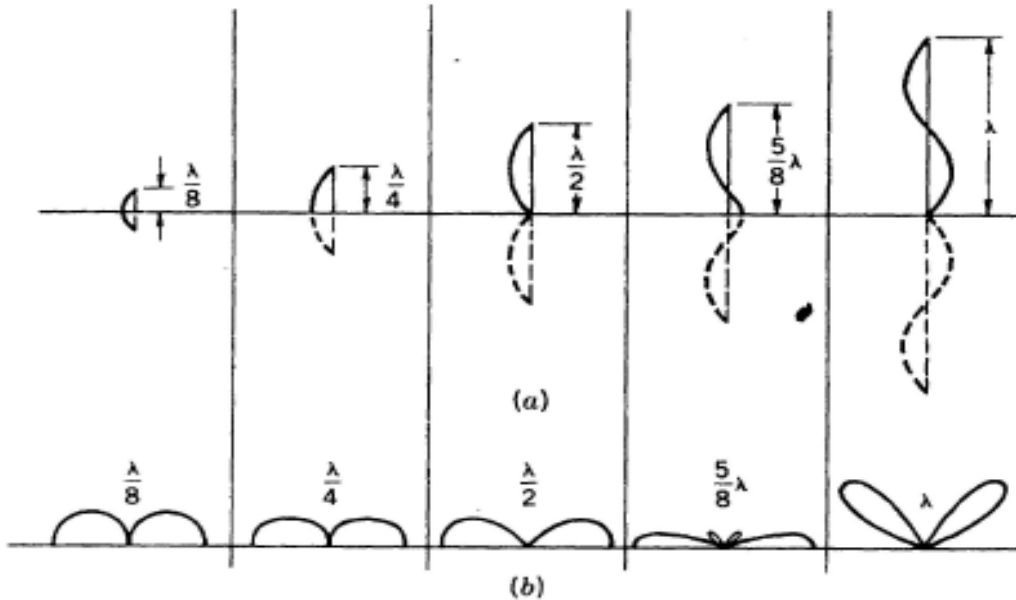
#### ๔.๒ สายอากาศต่อกับพื้นดิน [Grounded Antennas]

ถ้าสายอากาศถูกต่อกับพื้นดิน ผิวดินก็ยังคงเป็นกระจกสะท้อน และกลายเป็นส่วนหนึ่งของระบบการแพร่กระจายคลื่น โดยสายอากาศจินตภาพที่เกิดขึ้นใต้ดิน จะต่อกับสายอากาศบนดินเหมือนกับสายอากาศยาวสองเท่า ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๔ (a) สายอากาศแนวตั้งความยาว  $\lambda/4$  เมื่อต่อกับ พื้นดินจะเกิดสายอากาศจินตภาพใต้ดินที่มีความยาวเท่ากัน การกระจายกระแสและแรงดันของสายอากาศแบบนี้ จะมีคุณสมบัติเหมือนกันกับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๔ (b) โดยทั่วไปจะเรียกสายอากาศแบบนี้ว่า สายอากาศมาร์โคนี่ (Marconi Antenna) กระจายกระแส และแรงดันของสายอากาศมาร์โคนี่

สายอากาศมาร์โคนี่จะได้เปรียบสายอากาศที่ไม่ได้ต่อดินคือ สายอากาศมาร์โคนี่สามารถกระจายรูปคลื่นได้เหมือนกับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นโดยใช้ความสูงแค่ครึ่งเดียว และเมื่อพื้นดินเป็นส่วนหนึ่งของระบบสายอากาศ จึงมีบทบาทสำคัญต่อรูปแบบและคุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นพื้นดินจะต้องเป็นตัวนำที่ดี ถ้าไม่ดีจะต้องทำพื้นเทียมขึ้นมาใช้แทน ในส่วนนี้จะกล่าวถึงตอนหลัง รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมาร์โคนี่จะขึ้นอยู่กับความสูง ดังที่เลือกมาแสดงในภาพที่ ๒-๑๕ ทุกรูปแบบเป็นภาพตัดขวาง มีสายอากาศอยู่ตรงกลาง จะเห็นว่า เมื่อความสูงของสายอากาศเพิ่มทำให้ Directivity ทางแนวนอนยกขึ้นสูง และยังเข้าใกล้แนวตั้งเมื่อเพิ่มความสูงขึ้นอีก



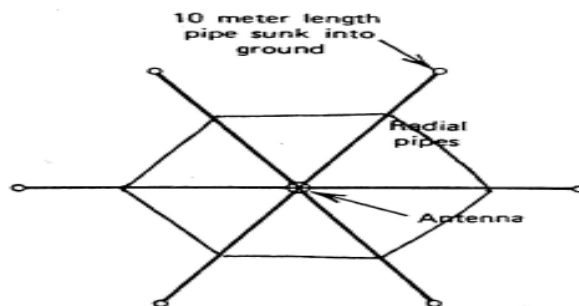
ภาพที่ ๒-๑๔ สายอากาศต่อดิน (a) สายอากาศและจินตภาพ (b) การแพร่กระจาย



ภาพที่ ๒-๑๕ คุณลักษณะของสายอากาศแนวตั้งแบบต่อลงดิน (a) การกระจายกระแสที่ความสูงแตกต่างกัน (b) รูปแบบการแพร่กระจาย

### ๔.๓ ระบบพื้นกราวด์

พื้นดินบนโลกมิได้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีทั่วทั้งหมด ดินบางแห่งเป็นตัวนำที่แย่มากผลก็คือเป็นกราวด์ที่ไม่ดี ดังนั้นก่อนที่จะติดตั้งสายอากาศชนิดลงดิน จำเป็นที่จะต้องปรับให้พื้นดินเป็นตัวนำที่ดี หรือเป็นระบบกราวด์ที่ดีนั่นเอง วิธีการที่ใช้กันมีหลายอย่าง เช่น ตอกเข็มตัวนำ (เช่น แป๊ปน้ำต่อกันยาว 30 m.) ลงไปใต้ดินลึก และขนานกันไป จำนวนหลายๆตัว หรือทำ Ground Mat โดยการวางลวดทองแดง ฝงลึกลงใต้ดิน 15-30 cm. เป็นเส้นรัศมี มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่เสาอากาศ รัศมีแต่ละเส้นต้องยาวอย่างน้อยเท่ากับ  $\lambda/4$  หรือเท่ากับ  $\lambda/2$  ยิ่งดี จำนวนอย่างน้อย ๑๒๐ เส้น ที่กึ่งกลางเส้นรัศมี มีลวดตัวนำต่อโยงเป็นวงถึงกันหมดและที่ปลายรัศมีทุกเส้น ต่อกับเข็มตัวนำ 10 m. ตอกลงใต้ดิน



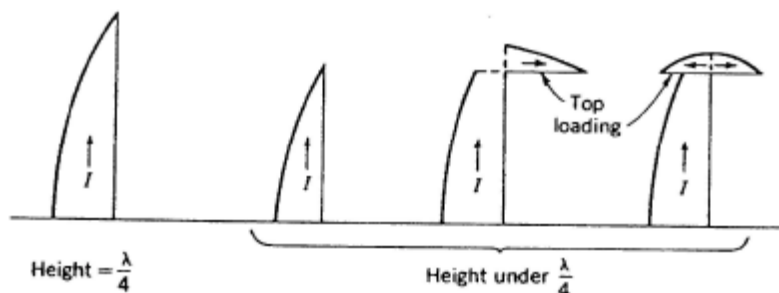
ภาพที่ ๒-๑๖ Ground Mat สำหรับสายอากาศแนวตั้งแบบต่อลงดิน

สายอากาศมาร์โคนี ซึ่งมี Ground Mat ที่ดี จะช่วยเพิ่มความแรงของการกระจายคลื่น เหมาะสำหรับใช้กับวิทยุกระจายเสียงในช่วงความถี่ปานกลาง และจะช่วยปรับปรุงสายอากาศที่สั้น (น้อยกว่า  $\lambda/4$ ) หรือสายอากาศที่ใช้กราวด์พื้นดินที่เป็นตัวนำที่เร็วให้มีคุณสมบัติดีขึ้น อย่างไรก็ตาม สายอากาศที่มีความยาว  $\lambda/4$  กับ  $\lambda/2$  ยังมีพื้นดินที่เป็นตัวนำที่ดีก็ยิ่งจะช่วยปรับปรุงรูปแบบการกระจายคลื่นให้ดียิ่งขึ้น ในบางแห่ง Ground Mat ไม่สามารถทำให้พื้นดินเป็นตัวนำที่เพียงพอ ต้องใช้วิธีราดน้ำเกลือบริเวณพื้นดินช่วย แต่ถ้าจำเป็นต้องตั้งเสาอากาศในบริเวณพื้นที่เป็นหินมากๆ หรือตั้งเสาอากาศบนตึกสูงๆ ซึ่งไม่สามารถทำ Ground Mat ได้ ก็ให้ทำกราวด์ลอยเหนือพื้นด้วยตาข่ายโลหะ

#### ๔.๔ ผลจากความสูงของสายอากาศ

ที่ความถี่ต่ำและความถี่ปานกลาง ความยาวคลื่นมีขนาดยาวมาก ดังนั้นสายอากาศที่  $\lambda/4$  จะสูงหลายร้อยเมตรและไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นสายอากาศที่ใช้จริงจะลดความสูงลง แล้วใช้วิธีชดเชยทางอื่นหากเสาอากาศสั้นกว่า  $\lambda/4$  ผลที่ตามมาก็คือประสิทธิภาพต่ำ ไม่สามารถเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นที่ดี เพราะมีความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นต่ำ อินพุทอิมพีแดนซ์ มีค่าเป็นรีแอกแตนซ์ ที่มีค่าความต้านทานน้อยมาก แต่ค่าความจุสูง ตัวอย่างเช่น อินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศมาร์โคนี ยาว  $\lambda/8$  จะมีค่าประมาณ (8-j500) โอห์มซึ่งค่ารีแอกแตนซ์ความจุที่สูงเช่นนี้ยากที่จะแมทช์กับสายส่ง การนำอินดักแตนซ์มาต่ออนุกรมกับสายอากาศ อาจจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ แต่ส่วนประกอบความต้านทานของอิมพีแดนซ์ก็ไม่เพิ่มขึ้น

วิธีที่ดีในการเพิ่มความต้านทานของการกระจายคลื่น คือการเพิ่มส่วนสูงที่ขาดในแนวนอนบนยอดของเสาอากาศ ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๗ ซึ่งทำให้กระแสที่ฐานของเสาอากาศเพิ่มขึ้นและการกระจายกระแส ก็เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ วิธีนี้เรียกว่า "Top Loading" โดย การเพิ่มขึ้นส่วนในแนวนอนด้านบน ทำให้เสาอากาศมีลักษณะเป็นรูปตัว L กลับหัว หรือตัว T ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๗ และอาจจะมีรูปคล้ายหมวก (Top Hat) ดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๘

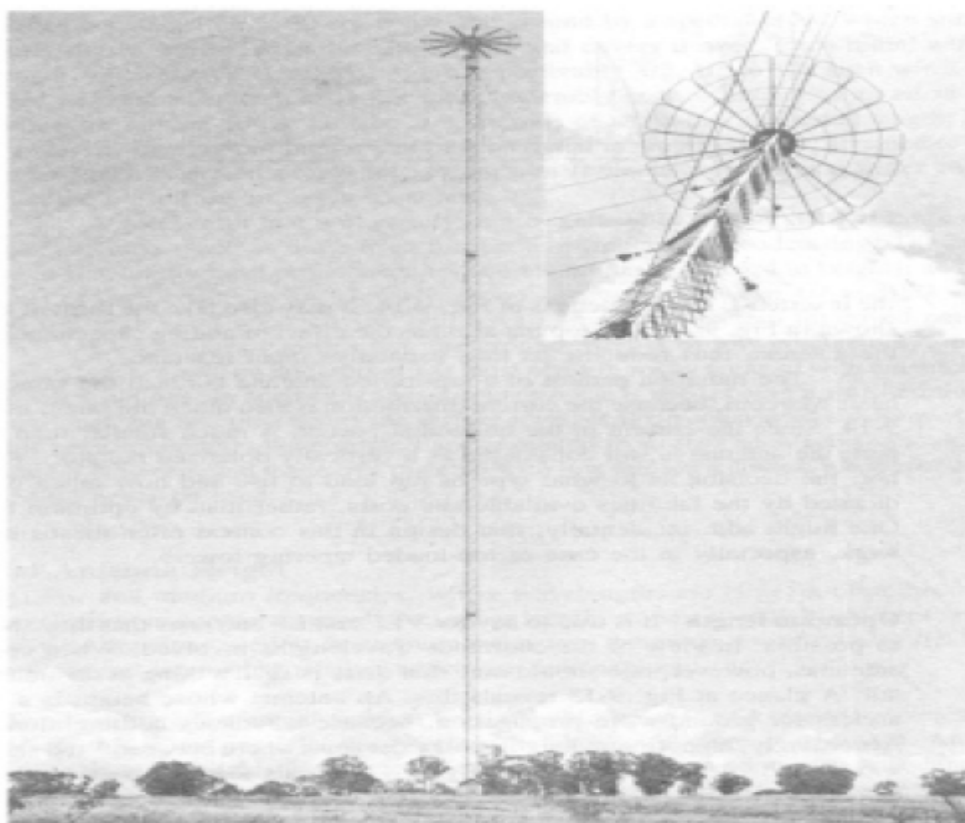


ภาพที่ ๒-๑๗ Top Loading

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ของเสาอากาศแบบ Top Loading เหมือนกับของสายอากาศมาร์โคนี เพราะว่ากระแสของกระแสจะเป็นดังแสดงในภาพที่ ๒-๑๗ และกระแสในส่วนแนวนอนจะน้อยกว่ากระแสในส่วนแนวตั้งมาก จึงยังพิจารณาว่าเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซในแนวตั้ง เสาอากาศแนวตั้งสำหรับความถี่ VLF และ LF จะต้องมี

ความสูงมาก เมื่อพิจารณาถึงความยาวคลื่นอาจสูงมากจนไม่สามารถสร้างได้ในทางปฏิบัติ แต่สำหรับความถี่ย่าน MF สามารถทำให้สูงมากกว่าความยาวคลื่นได้ จึงต้องมาพิจารณาว่าความสูงที่พอเหมาะและไม่ต่ำจนเกินไป ควรจะมีแค่ไหน

ก่อนอื่นก็ต้องมาคิดว่าเราต้องการรูปแบบการแพร่กระจายแบบไหน ดูจากภาพที่ ๒-๑๕ สภาพเงาเงาทิศทาง (Directivity) ทางแนวนอนจะเริ่มยกขึ้นที่ความสูงประมาณ  $5\lambda/8$  และที่  $\lambda/2$  จะติดพื้นดิน ฉะนั้นถ้าต้องการสภาพเงาเงาทิศทาง (Directivity) ทางแนวนอนเหนือพื้นดินเสาอากาศต้องสูง 0.532 m. หากสูงเกินนี้สภาพเงาเงาทิศทาง (Directivity) จะเริ่มชี้ขึ้นฟ้า ค่าความยาวประสิทธิผล (Effective Length) ของสายอากาศไม่ใช่ความยาวจริงทางฟิสิกส์ แต่เป็นความยาวเสมือนที่เป็นผลจากสาเหตุหลายประการคือ ผลของไดโพลเล็กตริกในสายอากาศ, Top Loading และ End Effects อันเนื่องมาจากการที่ตัวสายอากาศมีขนาดความหนาจำกัด ทำให้ความเร็วในการแพร่กระจายภายในตัวสายอากาศช้ากว่าในอวกาศ ประมาณ ๒ - ๘ % ดังนั้น ถ้าคำนวณความยาวคลื่นโดยใช้ความเร็วในอวกาศเป็นพื้นฐาน แล้วนำมาหาความยาว (สูง) ของสายอากาศ เราจะได้สายอากาศที่มีความยาว (สูง) มากกว่า แต่โดยปกติจะใช้ความยาวประสิทธิผล (Effective Length) มาคำนวณหาความยาว (สูง) ของสายอากาศ



ภาพที่ ๒-๑๘ "Top Hat" ของเสาอากาศ

สำหรับสายอากาศที่ความถี่ 30 MHz. ลงมา ค่าความยาวประสิทธิผลสามารถหาได้จากสูตร

$$l_e = 292 / f \quad (11)$$

ในเมื่อ

$l_e$  : ความยาวประสิทธิผล (Effective Length) หน่วยเป็นเมตร (m.)

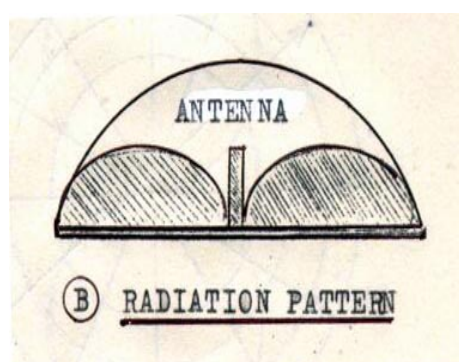
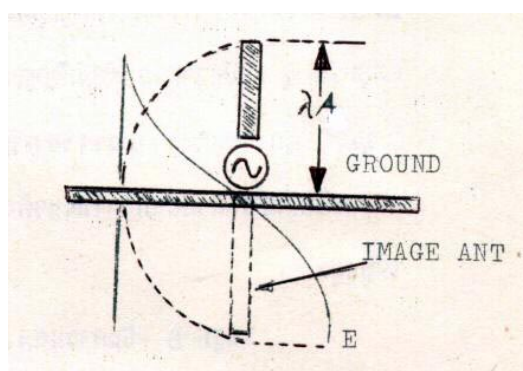
$f$  : ความถี่ (MHz.)

## ๕. ประเภทการใช้งานของสายอากาศ

### ๕.๑ Marconi Antenna (สายอากาศแบบมาโคนี่)

สายอากาศแบบ Marconi จะถูกนำมาใช้งานกับความถี่ต่ำกว่า 2 MHz. และมีความยาวของตัวสายอากาศเพียงหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น ( $\lambda/4$ ) สายอากาศแบบนี้ติดตั้งอยู่กับพื้น แต่สายอากาศแบบนี้ อาจมีความยาวเป็นทวีคูณแบบเลขคี่ (Odd Multiple) เพิ่มขึ้นก็ได้คืออาจจะเป็น ๓, ๕ หรือ ๗ เท่าของความยาว  $\lambda/4$  ที่ได้กำหนดไว้ เพราะว่าสายอากาศแบบ Marconi โดยปกติมีความยาวเพียงครึ่งหนึ่งของแบบ Dipole หรือแบบ Hertz มันจึงต้องการระบบการชักนำอย่างดี ที่พื้น (Ground) หรือฐานของสายอากาศ ในขณะที่สายอากาศแบบ Hertz ไม่ต้องการระบบดังกล่าวนี้

ในรูป ๒-๒๖A เป็นสายอากาศแบบ Marconi ที่ประกอบด้วยสายอากาศกับ Ground ถึงแม้ว่าความยาวของสายอากาศ Marconi มีเพียง  $\lambda/4$  แต่มันทำงานได้เหมือนสายอากาศที่ยาว  $\lambda/2$  เพราะระบบ Ground ทำให้เกิดความยาวเพิ่มขึ้นอีก  $\lambda/4$  ซึ่งเปรียบเสมือนเงาของสายอากาศ (Image Antenna) ผลที่ได้คือสายอากาศแบบ Marconi จะมีกระแสและแรงไฟ Standing Wave เช่นเดียวกับแบบ Hertz Antenna แต่ความต้านทาน ณ จุดต่อของสายส่งกำลังจะมีเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบ Hertz คือมีค่าเพียง 36.6 ohms.

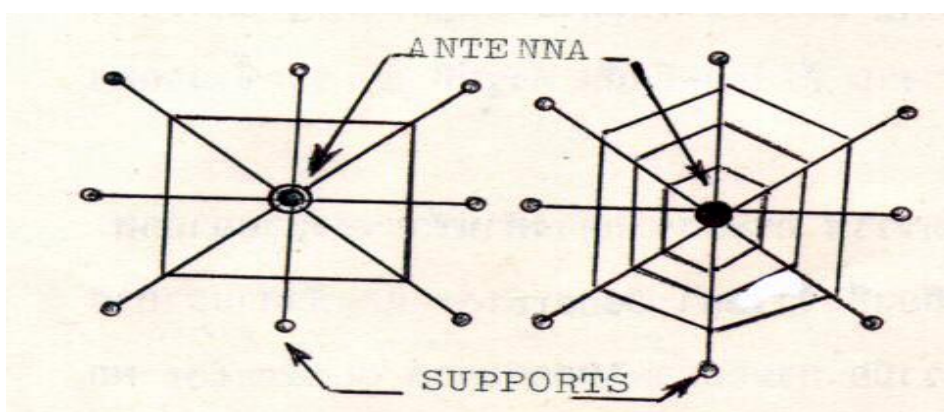


ภาพที่ ๒-๑๙ Radiation Pattern ของสายอากาศ Marconi

สายอากาศแบบ Marconi หากนำมาใช้กับอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ หรือยานพาหนะ ก็จะใช้ตัวถังของยานพาหนะนั้นเป็นระบบ Ground ให้กับสายอากาศ ส่วนรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่น

ตามแสดงในภาพที่ ๒-๒๖ B ถ้าพื้นโลกไม่สามารถเป็นตัวนำที่ดี เช่น พื้นดินที่แห้ง ในกรณีเช่นนี้ เราต้องสร้างระบบ Ground จำลองให้กับสายอากาศ ที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบ Ground Screen

Ground Screen ที่ทำขึ้นมาจะเป็น Ground สำหรับสายอากาศ โดยตัว Screen ประกอบขึ้นด้วยโลหะทำเป็นตารางอยู่ใต้สายอากาศ วางไว้เหนือพื้นดินหรือติดอยู่กับพื้นดิน ในบางครั้ง Screen ที่ทำด้วยโลหะนี้ อาจติดตั้งอยู่กับโครงไม้ที่ตั้งสูงขึ้นมาเหนือพื้นประมาณ ๘-๑๒ ฟุต แล้วเดินสายจากช่องตาข่ายเข้ากับแท่ง Ground ฝังลงไปในพื้นที่ ในทางปฏิบัติจะใช้ Ground Screen ที่มีความยาว  $\lambda/4$  ยื่นออกไปโดยรอบสายอากาศ อย่างไรก็ตามพื้นที่ของ Screen ที่ใหญ่จะทำให้เกิดการชักนำได้ดีขึ้น สายอากาศประเภทนี้ค่า Input Impedance จะได้รับผลกระทบจากตัวนำที่อยู่ใกล้ เช่น ลวดโยงยึดเสาอากาศ อุปกรณ์ทุกอย่างที่มีผลกระทบจาก Induction Field ที่ทำให้เกิดการผิดพลาดของ Field ทำให้กระแสและแรงไฟที่ส่งออกจากสายอากาศเปลี่ยนไป อันเป็นสาเหตุของการเกิดการเปลี่ยนแปลง Input Impedance ของสายอากาศ จึงจำเป็นต้องแก้ไขให้ถูกต้อง เพื่อให้เกิดการ Matching ที่ดี



ภาพที่ ๒-๒๐ Counterpoises (Top View)

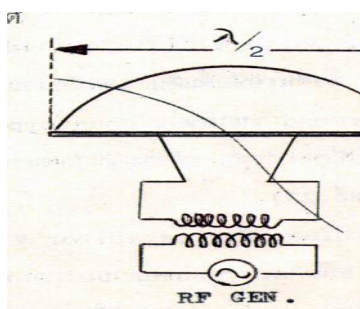
ถ้าหากไม่สามารถสร้าง Ground Screen ให้มีขนาดใหญ่ได้ ให้ใช้วิธีการของ Counterpoise ซึ่งวิธีนี้โครงสร้างประกอบด้วยแท่งโลหะตั้งขึ้นเหนือพื้นดินโดยมีฉนวนกัน ควรมีความอย่างน้อยที่สุดเท่ากัน หรือใหญ่กว่าขนาดของสายอากาศตามภาพที่ ๒-๒๗ ตัว Counterpoise กับพื้นของ Ground รวมตัวกันเปรียบเหมือน Capacitor จากค่าความจุที่เกิดขึ้น กระแสในสายอากาศ จะถูกสะสมในแบบของการ Charge และ Discharge ปลายสายอากาศที่ปกติต่ออยู่กับ Ground ก็เหมือนต่ออยู่กับค่าความจุขนาดใหญ่อันเกิดจาก Counterpoise ถ้าหากว่า Counterpoise ไม่มีฉนวนอย่างดีกันไว้ระหว่าง Ground แล้ว จะทำให้เกิดผลเหมือนการ Leak ของ Capacitor ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการ Loss อย่างมาก ยิ่งกว่าไม่มี Counterpoise เสียอีก ถึงแม้ว่าขนาดและรูปร่างของ Counterpoise จะไม่ได้กำหนดไว้แน่นอนก็ตาม ความยาวที่ยื่นออกไปก็ควรมีความยาวเท่ากันในทุกทิศทาง

จุดต่อระหว่าง Counterpoise กับสายอากาศ ก็ควรอยู่สูงเหนือพื้นประมาณ ๘-๑๒ ฟุต เมื่อติดตั้งสายอากาศในทางนี้ รูปแบบการติดตั้งดังภาพที่ผ่านมาคือ รูปของ

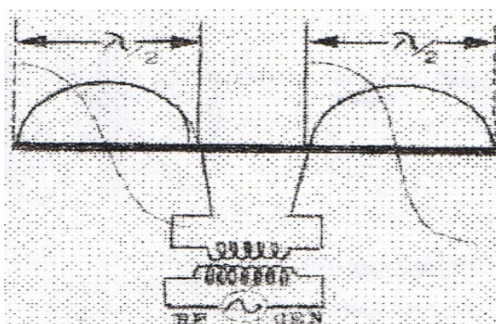
Counterpoise (Top View) และการสร้าง Counterpoise ขึ้นมานี้ เพื่อให้มันเป็น Nonresonant กับความถี่ใช้งาน การทำงานจริงโดยใช้ Ground ที่ดี หรือโดยการใช้ Counterpoise กับสายอากาศแบบ Marconi จะให้ผลเหมือนกันกับสายอากาศแบบ Half Wave

## ๕.๒ Long – Wire Antenna

Long – Wire Antenna เป็นสายอากาศอีกแบบหนึ่งที่ส่งพลังงานออกไปจากตัวเอง ซึ่งมีความยาวเป็น ๒ เท่าหรือมากกว่าของ Half-Wave สายอากาศแบบ Long – Wire นี้อาจเรียกว่า Harmonic Antenna เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ Long – Wire จำเป็นที่จะต้องพูดถึงพื้นฐานการทำงานของสายอากาศ Half-Wave เพราะทั้งสองแบบมีการทำงานที่คล้ายคลึงกัน ดังภาพที่ ๒-๒๑ จากขั้ว บวก-ลบ ที่ได้กำหนดให้กระแสด้านซ้ายของสายอากาศเคลื่อนที่เข้าหา Generator และตัวสายอากาศทางขวามือ กระแสก็จะไหลออกจาก Generator ผลที่ได้ก็คือ การเกิดกระแสเหมือนกับที่ได้กล่าวไว้ในเรื่องสายอากาศ Half-Wave เพราะว่าเป็นสายอากาศ Half-Wave จึงทำให้เกิดกระแสต่ำสุดที่ปลายสาย ส่วนค่าแรงไฟฟ้าที่ปลายสายจะสูงสุดตามภาพที่ ๒-๒๑ Center Fed Half wave Antenna ภาพที่ ๒-๒๒ นั้นมีลักษณะเหมือนกับภาพที่ ๒-๒๑ แต่ความยาวของสายอากาศเพิ่มเป็น ๒ เท่า การทำงานก็เหมือนเดิม ต่างกันที่ทำให้เกิดมีกระแสใน Two Half-Wave ลักษณะทางไฟฟ้าเช่นนี้ถูกเรียกว่า Driven Collinear Array



ภาพที่ ๒-๒๑ Half Wave Antenna

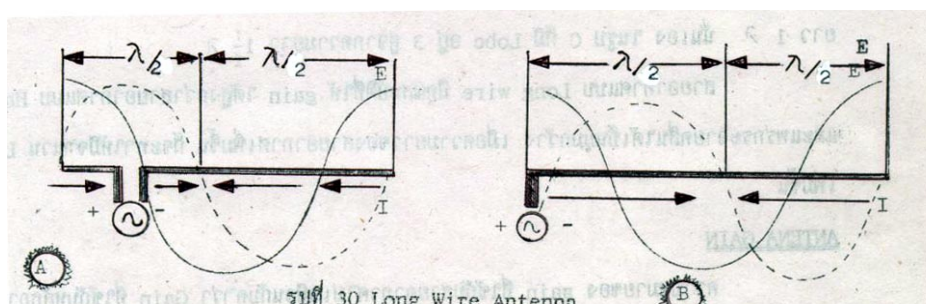


ภาพที่ ๒-๒๒ Two Half Wave Antenna

คำว่า Array หมายถึงกลุ่มของชิ้นส่วนที่จัดแยกกันอยู่ อาจเป็นสายอากาศแต่ละเส้น แต่สามารถรวมกันแพร่กระจายคลื่นให้เป็นรูปแบบตามต้องการได้ ในกรณีนี้ Array ก็คือ Two Half

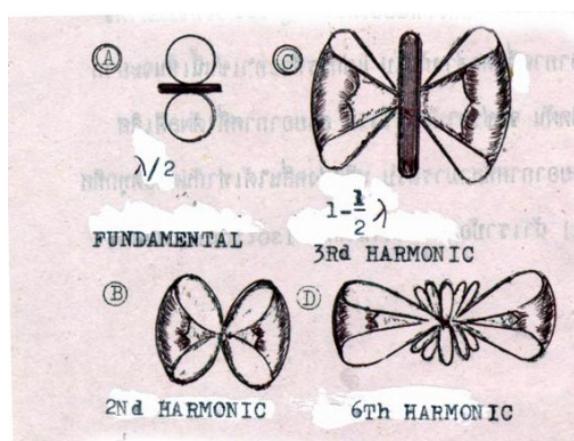


Wave Antenna ที่ทำงานในเฟสเดียวกันกับความถี่เบื้องต้นของมัน ถึงแม้รูปแบบของสายอากาศที่กล่าวมานี้จะเรียกว่า Long Wire แต่กระแสไม่ได้ไหลย้อนกลับในช่วงของจุดติดต่อกันของ Half Wave อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบนี้สามารถทำให้มีคุณสมบัติเป็น Long Wire ได้โดยการปรับ Generator ไปในจุดที่กระแสสูง หรือปรับ Generator ไปยังปลายสาย



ภาพที่ ๒-๒๓ Long Wire Antennas

ภาพที่ ๒-๒๓ คือ Long Wire Antenna จะเห็นได้ว่าตามภาพที่ ๒-๓๐ A กระแสไหลจากด้านซ้ายไปด้านขวาของ  $\lambda/2$  ของสายอากาศ ส่วนในอีกด้านหนึ่งของ  $\lambda/2$  จะมีกระแสไหลย้อนกลับ เมื่อปรับ Generator ไปต่อไว้ที่ปลายสายตามภาพที่ ๒-๓๐B จะได้ทิศทางการไหลของกระแสเข้าสู่กึ่งกลางสายอากาศ จึงเปรียบเสมือนเป็นสายอากาศแบบ Long Wire ถ้าสายอากาศมีความยาวเป็นจำนวนคี่ ของความยาว  $\lambda/2, 3\lambda/2, 7\lambda/2$  ทำให้เกิดมีกระแสสูงสุดที่ตรงกลางสายสามารถต่อใช้งานในแบบ Generator Feed ได้ สายอากาศแบบ Long Wire อาจพิจารณาได้จากจำนวนความยาว  $\lambda/2$  หลายๆช่วงแล้วป้อนกำลังงานเข้าไปให้ต่างเฟสกัน  $180^\circ$  โดยแยกระยะห่างกันเท่ากับ  $\lambda/2$



ภาพที่ ๒-๒๔ Typical Radiation Pattern

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความยาวของสายอากาศ มีผลกระทบกับความเข้มและรูปแบบของการแพร่กระจายของคลื่นช่วยให้ช่างสามารถตัดสินใจเลือกใช้สายอากาศได้ถูกต้องและเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้งาน จากภาพที่ ๒-๒๔ นั้นเป็นการแพร่กระจายคลื่น

ของสายอากาศที่มีความยาวต่างกันรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวมานั้นเรียกว่า Clover Leaf Pattern ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของความเข้มของสนามที่เกิดขึ้น ในส่วนที่ยื่นออกไปเรียกว่า Lobe ในพื้นที่ที่ไม่มี Lobe เป็นส่วนที่ไม่มีพลังงานคลื่นวิทยุ สังเกตได้ว่าเมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น การแพร่กระจายคลื่นจะมากขึ้นไปตามความยาวของตัวสายอากาศ การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ Long Wire จะทำให้เกิด Lobe หนึ่งคู่ต่อทุก ๆ ความยาว  $\lambda/2$  สายอากาศ Long Wire จะมี Lobe ใหญ่เป็นหลักอยู่ ๒ คู่ ส่วนที่เหลือจึงเป็น Lobe ย่อยจากภาพที่ ๒-๓๑ B เห็นได้ว่ามีอยู่ 4 Lobes (๒ คู่) ซึ่งความยาวของสายอากาศเป็น ๒ เท่าของ  $\lambda/2$  หรือความยาว 1  $\lambda$  นั่นเอง ตามภาพที่ ๒-๓๑C มี Lobe อยู่ ๓ คู่ จากความยาว  $3\lambda/2$  สายอากาศแบบ Long Wire มีคุณสมบัติที่ให้ Gain ได้สูงกว่าสายอากาศแบบ Half Wave และแพร่กระจายคลื่นได้เป็นมุมกว้าง เมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้มีจำนวน Lobe ย่อยๆ เพิ่มขึ้น

### ๕.๓ Antenna Gain

ความหมายของ Gain ที่ใช้กับสายอากาศไม่เหมือนกับคำว่า Gain ที่ใช้กับหลักการของการขยาย (Amplifier) เรื่องของสายอากาศ Half Wave ( $\lambda/2$ ) และ Quarter Wave ( $\lambda/4$ ) ที่ได้กล่าวมาแล้ว ไม่ว่าจะมีการ Polarized แบบ Horizontal หรือ Vertical เป็นสายอากาศซึ่งแพร่กระจายคลื่นออกไปแบบมีทิศทาง และมีความแรงคลื่นต่ำสุดที่ตอนปลายของสายอากาศ คุณสมบัติของทิศทางที่เกิดขึ้นนี้ ใช้ได้ทั้งกับสายอากาศเครื่องส่ง และสายอากาศ เครื่องรับสายอากาศทุกชนิดย่อมมีคุณสมบัติเกี่ยวกับทิศทาง ถึงแม้จะมีคุณสมบัติหรือจัดอยู่ในกลุ่มของสายอากาศที่สามารถรับหรือส่งคลื่นได้เท่ากันทุกทิศทาง แต่ควรที่จะมีมาตรฐานการวัดในการเปรียบเทียบทิศทางของสายอากาศที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะทำเช่นนั้นได้ยาก อย่างไรก็ตามสายอากาศมาตรฐานตามอุดมคติที่เรียกว่า “ Isotropic Antenna ” เป็นสายอากาศที่สามารถรับ หรือส่งคลื่นได้เท่ากันตลอดทุกทิศทาง ซึ่งก็คือสายอากาศแบบ Omni Directional ถ้าเราป้อนพลังงานให้กับ Isotropic Antenna พลังงานจะแพร่กระจายไปทุกทิศทาง พลังงานที่แพร่กระจายออกไปนี้ จะถูกรับและบันทึกไว้ที่สถานีรับที่อยู่ห่างออกไป และถ้าเราป้อนพลังงานอันเดิมให้กับสายอากาศ Half Wave เช่นเดียวกับที่ผ่านมา จะได้ผลลัพธ์ออกมาว่าสายอากาศ Half Wave จะมีความแรงของพลังงานในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าสายอากาศ แบบ Isotropic นั่นคือ Gain เกิดขึ้นในสายอากาศแบบ Half-Wave ซึ่ง Gain นี้ จะเกิดขึ้นในเส้นทางตั้งฉากกับสายอากาศ (Broadside) โดยมีการ Loss เกิดขึ้นในทิศทางอื่น หรือที่ปลายของสายอากาศ Gain การขยายของสายอากาศ จะถูกแทนค่าด้วยอัตราเปรียบเทียบของความเข้มของสนาม หรือของกำลังงาน มีหน่วยเป็น dB

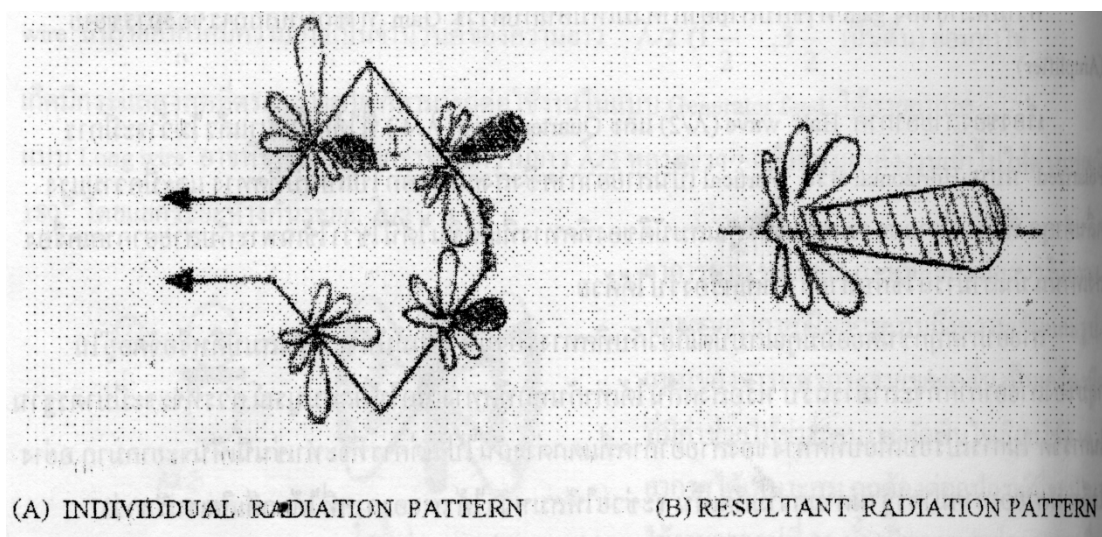
$$\text{Gain (dB)} = 20 \text{ Log X Field Strength Radio}$$

$$\text{Gain (dB)} = 10 \text{ Log X Power Radio}$$

สาเหตุที่ใช้สายอากาศแบบ Half Wave ในการอ้างอิง เพราะที่ไม่มีสายอากาศแบบใดที่มีคุณสมบัติเป็น Isotropic ได้ จึงต้องใช้สายอากาศ Half Wave เป็นมาตรฐาน

## ๕.๔ Rhombic Antenna

Rhombic Antenna พัฒนามาจากสายอากาศ Long Wire สายอากาศ Rhombic ประกอบด้วยตัวนำ ๔ ตัวนำ ต่อกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ตัวนำทุกด้านมีความยาวเท่ากัน มุมที่อยู่ตรงข้ามกับสายส่งกำลัง ถูกต่อไว้ด้วยตัวต้านทาน (Resistor) ตามภาพที่ ๒-๓๒ เพื่อทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียวกัน สายอากาศแบบนี้มีการแพร่กระจาย และรับคลื่นได้ในทิศทางที่ต่อความต้านทานไว้ แต่ถ้าสายอากาศนี้ไม่ได้ต่อตัวต้านทานไว้ การแพร่กระจายคลื่นจะเกิดขึ้นเป็นสองทิศทาง โดยปกติแล้วเราจะต่อตัวต้านทานไว้ เพื่อให้ได้การแพร่กระจายคลื่นสูงสุดในทิศทางพื้นราบเดียวกับสายอากาศเท่านั้น แต่ก็เกิดการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดในแนวตั้งเหนือพื้นราบของสายอากาศด้วยเช่นกัน



ภาพที่ ๒-๒๕ การแพร่กระจายคลื่นของ Rhombic Antenna

จากภาพที่ ๒-๒๕ แสดงถึง ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น จากด้านทั้งสี่ของสายอากาศ (รูป A) และผลรวมของการแพร่กระจายคลื่น (รูป B) ถ้าเราสร้างมุม T ได้ถูกต้อง สอดคล้องกับความยาวของด้านทั้งสี่ของสายอากาศ Rhombic จะทำให้ Lobe (ที่เป็นเงาดำ) เกิดการเสริมกัน และรวมกันมีความเข้มของคลื่นเพิ่มขึ้น มีทิศทางพุ่งไปทางด้าน ที่มีค่าความต้านทานต่อการสร้างสายอากาศ Rhombic นี้จะสร้างขึ้นมาในสายอากาศได้ระดับเดียวกับพื้น และสายอากาศสองด้าน จะถูกป้อนด้วยกระแสที่มีทิศทางตรงข้ามกันแต่มีขั้วต่างกัน จึงหักล้างกันหมดไป ทำให้ไม่มีการแพร่กระจายคลื่นออกไปทางด้านข้างของสายอากาศ การที่จะทำให้สายอากาศนี้ มีสภาพเป็น Non Resonant และมีการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางเดียว ค่าความต้านทานที่นำมาต่อเข้ากับสายอากาศ จะต้องมีการถูกต้องด้วย และเมื่อต้องการ Lobe ไม่ให้ย้อนกลับไปทางด้านหลัง กำลังงานที่สูญเสียไปในค่าความต้านทานที่ต่อนั้น จะต้องน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่ป้อนเข้าสู่สายอากาศเล็กน้อย

ข้อดีของสายอากาศ Rhombic ก็คือ สายอากาศ Rhombic ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการติดต่อสื่อสารระยะไกล ย่านความถี่สูง (HF) และการติดต่อสื่อสาร ระหว่างจุดต่อจุด (Point To Point) เนื่องจากมันเป็นสายอากาศแบบ Non Resonant จึงง่ายต่อการเพิ่มความถี่ใช้งานสูงขึ้นเป็นสองเท่าของความถี่ต่ำสุด และมีประสิทธิภาพดีเพราะการเปลี่ยนแปลงของความถี่สูงขึ้นเป็นสองเท่าของความถี่นี้ เป็นเหตุของการเปลี่ยนแปลงของ Gain ทิศทาง และค่าอิมพีแดนซ์(Z) เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจไม่ต้องคำนึงถึงเลยก็ได้

การสร้างสายอากาศ Rhombic สามารถทำได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบอื่นๆ และการปรับปรุงก็ไม่ยุ่งยาก เพราะเป็น Non Resonant แต่มีข้อเสียคือ ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งสายอากาศใหญ่มาก เหตุเพราะว่า แต่ละเส้นที่ประกอบขึ้นเป็นสายอากาศต้องมีความยาวอย่างน้อยที่สุด  $1-2\lambda$  ต่อความถี่ต่ำสุดที่ใช้งาน และเมื่อมีความต้องการให้ได้ Gain สูงมากขึ้น ทิศทางแน่นอนขึ้น ความยาวของสายอากาศแต่ละด้านต้องยาวเพิ่มขึ้นอาจถึง  $8-12\lambda$  ถ้าใช้งานอยู่ในย่านความถี่ HF ความยาวของสายอากาศแต่ละด้านอาจยาวหลายร้อยฟุต กำลังงานอาจสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ในตัวต้านทานที่ต่ออยู่ แต่ตัวต้านทานนี้มีความจำเป็นต้องใช้ เพราะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นในเส้นทางเดียว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว การที่ได้รับ Gain สูงขึ้นสามารถชดเชยกำลังงานที่สูญเสียไปได้

## ๕.๕ Antenna Arrays

การเลือกใช้สายอากาศขึ้นอยู่กับความต้องการในการแพร่กระจายคลื่นว่า เป็นแบบที่กำหนดทิศทาง (Directional) หรือไม่กำหนดทิศทาง (Non directional) ระบบสายอากาศที่จะได้กล่าวถึงต่อไปคือ สายอากาศที่ประกอบขึ้นด้วยสายอากาศแบบ Half Wave ตั้งแต่สองอันหรือมากกว่าวางอยู่ห่างกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น อาจมีทิศทางเสริมกันหรือหักล้างกัน การจัดสายอากาศเช่นนี้เรียกว่า Antenna Array ในเรื่องของ Array นี้มีด้วยกัน ๒ แบบ คือ Driven Array และ Parasitic Array

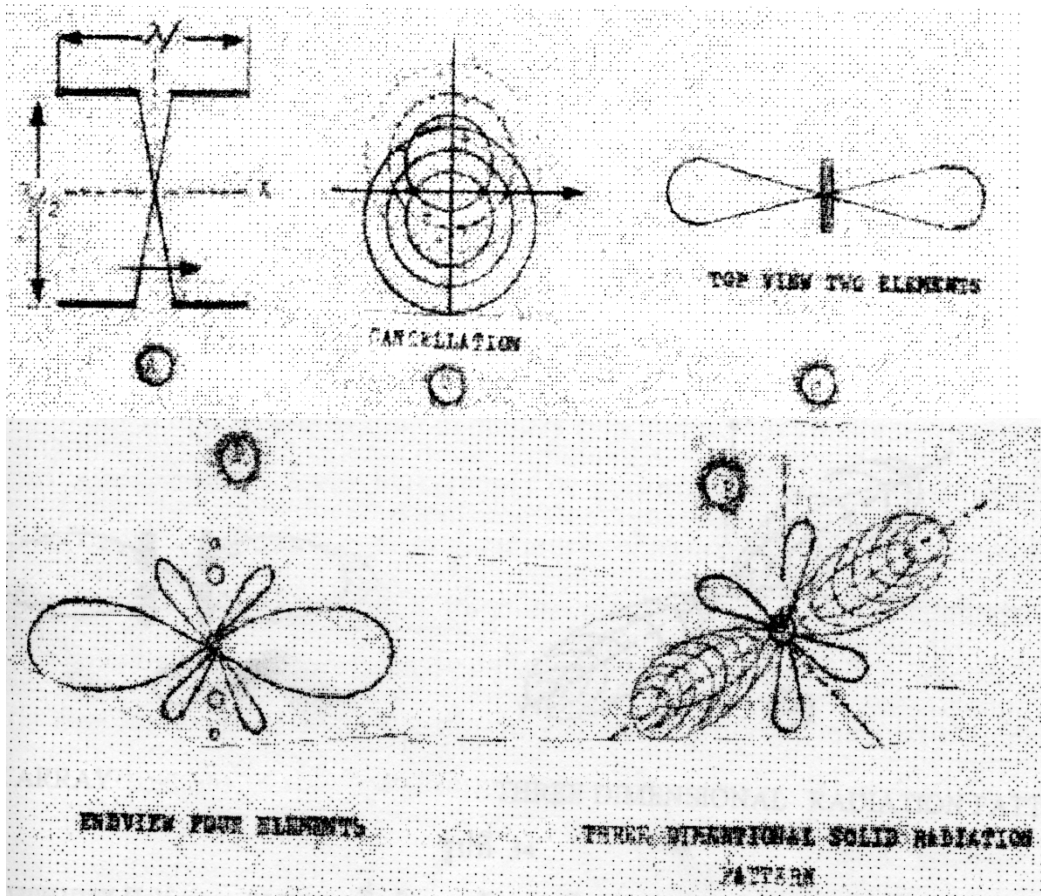
### ๕.๕.๑ Driven Arrays

อุปกรณ์ Driven Arrays ประกอบด้วย Dipole สองตัวหรือมากกว่า ซึ่ง Dipole ทุกตัวจะต่ออยู่กับสายส่งกำลังที่มาจาก Generator Array สายอากาศแบบนี้ สามารถแบ่ง ได้ ๔ แบบ คือ ๑. Broadside Array, ๒. End Fire ๓. Cardioids และ ๔. Collinear Array

#### ๕.๕.๑.๑ Broadside Array

เมื่อสายอากาศ Half Wave สองอันวางขนานกัน มีระยะห่างเท่ากับ  $\lambda/2$  และป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศ Half Wave ทุกอันแบบ In Phase กัน ตามภาพที่ ๒-๒๖A ทำให้การแพร่กระจายคลื่นส่วนใหญ่ออกไปด้านข้าง ถึงแม้ว่าการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละ Dipole เป็นแบบ Non Directional (มองจากปลาย Dipole) แต่คลื่นจะรวมตัวกันทำให้เกิดการแพร่กระจายแบบ Directional ในภาพ B เมื่อคลื่นจาก Dipole 1 เคลื่อนไปถึง Dipole 2 เฟสห่างกันอยู่  $๑๘๐^\circ$  กับพลังงานที่เพิ่งออกจาก Dipole 2 สนามของคลื่นทั้งสอง จะหักล้างกันในแนวที่ระดับ Array อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ราบตั้งฉากกับสายอากาศ และระยะครึ่งทางระหว่าง

สายอากาศนั้น สนามของคลื่นที่เกิดขึ้นจะรวมกันมีกำลังสูงขึ้น ในภาพ C แสดงถึงการมองจากด้านบนลงมาหา Dipole จะเห็นเหมือน Dipole วางซ้อนกันอยู่ ถ้ามี Dipole มากขึ้น ก็จะทำให้มีการกำหนดทิศทางได้ดีขึ้น และพร้อมกันนั้นจะทำให้มี Lobe เพิ่มขึ้น ดังภาพ D และ E โดยที่ Broadside Array จะมี Main lobe ที่มุม  $๙๐^{\circ}$

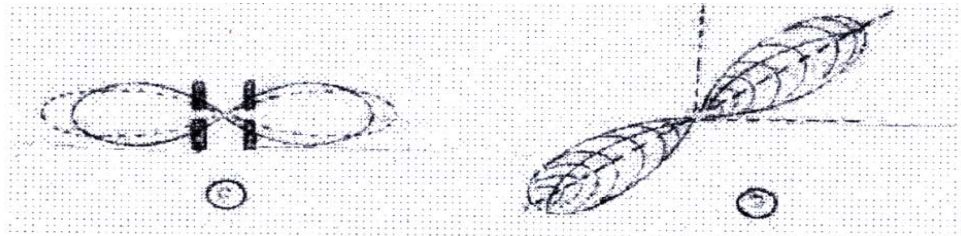
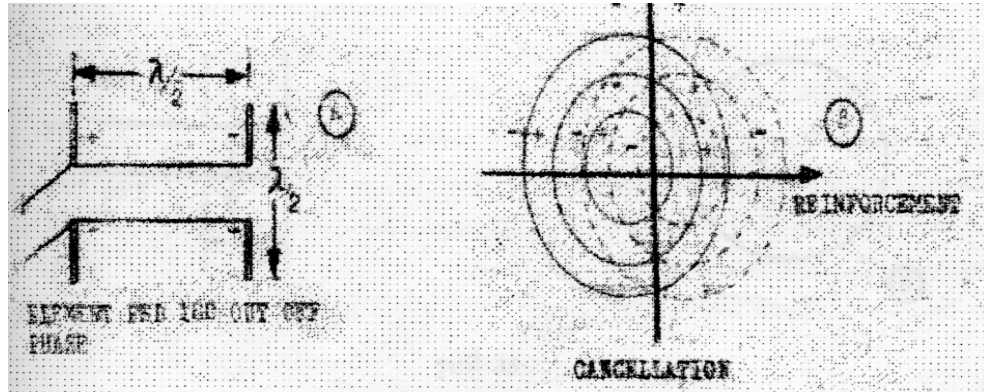


ภาพที่ ๒-๒๖ การแพร่กระจายคลื่นของ Broadside Array

### ๕.๕.๑.๒ End Fire Array

ถ้าสายอากาศ Half Wave วางขนานซึ่งกันและกัน และมีระยะห่างกัน  $\lambda/2$  พลังงานที่ป้อนเข้าไปต่างเฟสกัน  $๑๘๐^{\circ}$  (ภาพที่ ๒-๒๗A) ทำให้คลื่นที่แพร่กระจายออกไป มีความเข้มของสนามเกิดขึ้นสูงสุดในแนวของสายอากาศ Dipole ที่วางเรียงกันอยู่ ในภาพที่ ๒-๒๗ B แสดงถึงแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนออกจากสายอากาศแต่ละอัน โดยมองจากปลายสายเข้าไป เพราะว่าสายอากาศแต่ละอันวางห่างกันอยู่  $\lambda/2$  และแต่ละอันป้อนพลังงานต่างเฟสกัน  $๑๘๐^{\circ}$  ฉะนั้นคลื่นจากสายอากาศอันที่หนึ่ง เคลื่อนที่ไปถึงสายอากาศอันที่สอง จะมีเฟสเดียวกันทำให้เกิดการเสริมกันของคลื่น ทำให้มีความเข้มของสนามเพิ่มสูงขึ้นตามแนวแกนของ Array ส่วนในแนวที่ตั้งฉากกับ Array จะเกิดการหักล้างของคลื่น ในภาพที่ ๒-๒๗ C แสดงถึงลักษณะของรูปคลื่นที่ปรากฏบนสายอากาศตามรูปของเส้นประ เป็นผลรวมของคลื่นจากสายอากาศแบบ End Fire Array

ส่วนในภาพที่ ๒-๒๗ D เป็นลักษณะการรวมตัวของคลื่นที่สมบูรณและแพร่กระจายออกไปในอากาศ โดยที่ End Fire Array จะมี Main lobe ที่มุม  $0^{\circ}$  -  $180^{\circ}$



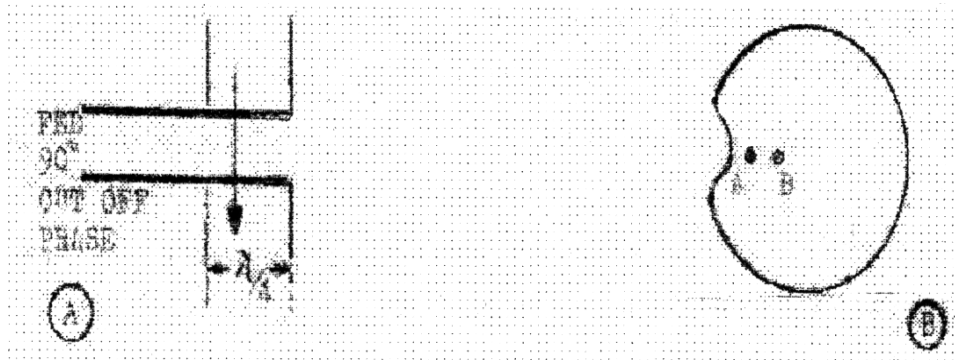
END FIRE ARRAY

THREE DIMENSIONAL RADIATION PATTREN

ภาพที่ ๒-๒๗ การแพร่กระจายคลื่นของ End Fire Array

### ๕.๕.๑.๓ Cardioid Array

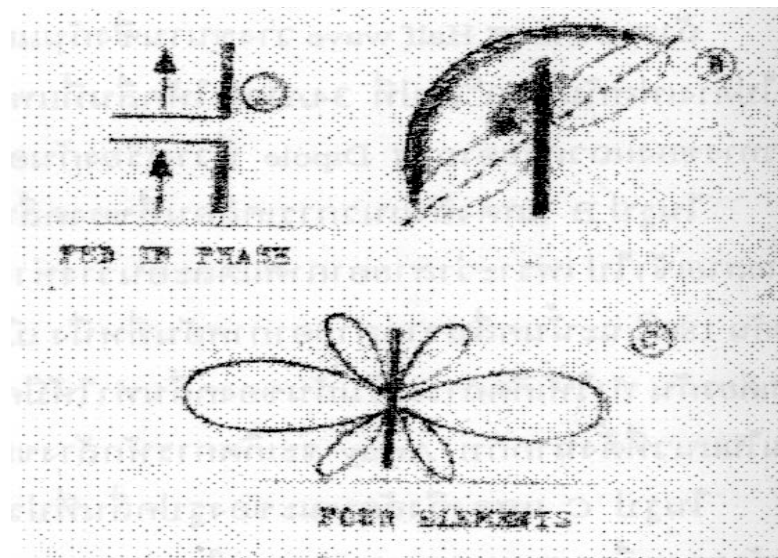
ถ้าสายอากาศ Dipole สองอันวางขนานกันอยู่ และมีระยะห่าง  $\lambda/4$  พลังงานที่ป้อนทำให้ Dipole ทั้งสองต่างเฟสกัน  $90^{\circ}$  การจัดแบบนี้ เรียกว่า Cardioid Array ตามภาพที่ ๒-๒๘ การแพร่กระจายคลื่นของ Cardioid Array จะมีออกไปในเส้นทางเดียว ตามภาพที่ ๒-๒๘ A การป้อนพลังงานให้สายอากาศ A มีเฟสนำอยู่  $90^{\circ}$  (โดยการวางห่างกัน  $\lambda/4$ ) เมื่อเคลื่อนจาก A ไปยัง B ทำให้เกิดการเสริมกับคลื่น B ที่กำลังเคลื่อนตัวมาเนื่องจากต่างเฟสกัน  $90^{\circ}$  และวางห่างกัน  $\lambda/4$  นี้ การเคลื่อนที่จากคลื่น A ไป B เสริมกัน แต่เมื่อคลื่น B เคลื่อนมายัง A มันเกิดการต่างเฟสกัน  $180^{\circ}$  กับคลื่น A ที่เพิ่งหลุดออกไป ฉะนั้นการเคลื่อนของคลื่นไปหาสายอากาศ A จึงหักล้างกัน รูปร่างของคลื่นที่แพร่กระจายไปในทิศทางเดียว คือ พุ่งออกมาไปตามสายอากาศ ที่มีเฟสตาม  $90^{\circ}$  (Dipole B)



ภาพที่ ๒-๒๘ การแพร่กระจายคลื่นของ Cardioid Array

### ๕.๕.๑.๔ Collinear Array

ภาพที่ ๒-๒๙ เมื่อสายอากาศแบบ Half Wave ถูกวางไว้ในแนวเดียวกัน(ปลายต่อปลาย) ดังแสดงในภาพที่ ๒-๒๙ A และเมื่อป้อนกำลังเข้าไป ทำให้เกิดเฟสเดียวกัน เรียกว่า Collinear Array เมื่อมองจากปลาย Array เข้าไป รูปคลื่นเป็นวงกลมเหมือนกันกับใช้ Dipole เพียงอันเดียว การจัด Array ลักษณะนี้ เพื่อที่จะบีบรูปคลื่นแบบโดนัทให้ตีบ หรือแคบเข้าไป เมื่อใช้จำนวน Dipole เพิ่มขึ้น รูปคลื่นก็จะยิ่งเบนลงมา (ภาพที่ ๒-๒๙ B) ส่วนในภาพที่ ๒-๒๙ C เป็นการใส่ Dipole ถึง ๔ อัน ทำให้ลำคลื่นแคบลง และมี Lobe เล็กเพิ่มขึ้น



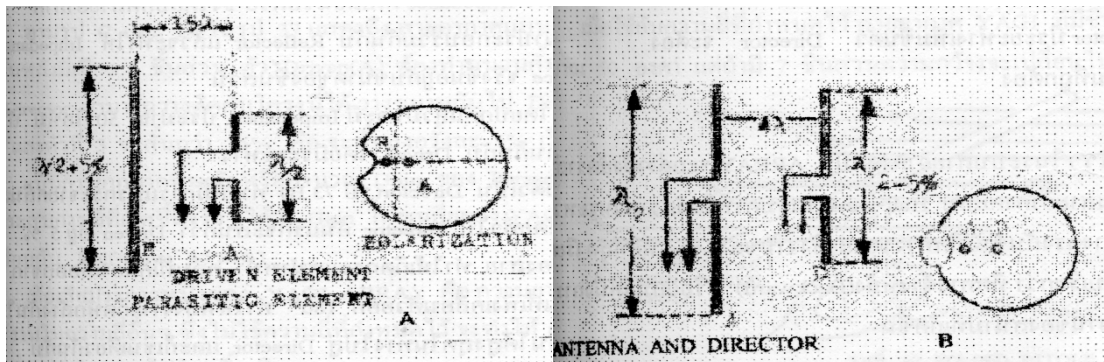
ภาพที่ ๒-๒๙ การแพร่กระจายคลื่นของ Collinear Array

### ๕.๕.๑.๕ Parasitic Array

Parasitic Array หมายถึงระบบสายอากาศที่มีชิ้นส่วน ตั้งแต่สองชุดหรือมากกว่า และชิ้นส่วนอันหนึ่งหรือมากกว่าจะถูกกระตุ้นด้วยสนามพลังงานจากชุด Driven การจัด Array ในลักษณะนี้ เพื่อที่จะกำหนดทิศทางการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ต้องการ

ได้ดียิ่งขึ้น ชั้นส่วนของ Parasitic จะถูกวางขนานกับชั้นส่วนของ Driven คือตัวสายอากาศ Half Wave สำหรับระยะห่างขึ้นอยู่กับความต้องการ เพราะว่ากระแสที่เกิดขึ้นในชุด Parasitic นั้นได้มาจากการเหนี่ยวนำของ EMF และพร้อมกันนั้น Parasitic นี้ก็แพร่กระจายคลื่นออกไปด้วย ในบางจุดคลื่นที่ออกจาก Parasitic มีเฟสเดียวกันกับคลื่นที่ออกจาก Driven โดยตรง แต่ ณ จุดอื่นๆ เฟสอาจต่างกัน  $๑๘๐^{\circ}$  เป็นผลทำให้คลื่นถูกหักล้างกันหมดไป ฉะนั้นจึงสามารถส่งคลื่นไปในทิศทางเดียวกัน การต่างเฟสของกระแสที่เกิดขึ้นในตัว Driven กับที่เกิดขึ้นใน Parasitic ขึ้นอยู่กับระยะห่างในการวาง Driven กับ Parasitic ทั้งยังสัมพันธ์กันกับความยาวของ Parasitic ด้วย ถ้า Parasitic มีความยาว  $\lambda/2$  จะแสดงตัวเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว แต่ถ้าชั้นส่วน ๒ ชั้นต่างก็มีความยาว  $\lambda/2$  และวางไว้ใกล้ชิดกัน ทำให้เกิดกระแสใน Driven กับใน Parasitic ต่างเฟสกัน  $๑๘๐^{\circ}$  ลักษณะเช่นนี้ก็เปรียบเทียบกับการทำงานของ Transformer ที่มีความแตกต่างของเฟสระหว่างขด Primary กับ Secondary อยู่  $๑๘๐^{\circ}$  ผลที่ได้ออกมา ก็เป็นเช่นเดียวกันกับการต่อชั้นส่วนสายอากาศ ที่มีการป้อนกำลังงานที่ต่างเฟสกัน  $๑๘๐^{\circ}$  (Broadside Array) ดังได้กล่าวมาแล้ว

ถ้าชั้นส่วนของสายอากาศถูกวางห่างกัน  $\lambda/4$  คลื่นที่เคลื่อนที่ไปถึง Parasitic จะตามหลังคลื่นใน Driven  $๙๐^{\circ}$  ด้วย ซึ่งต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ ส่วนกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ จะนำกระแสใน Driven อยู่  $๙๐^{\circ}$  ผลที่ได้จาก Parasitic Array ที่กล่าวนี้ ก็จะมีผลในทำนองเดียวกับการป้อนกำลังงานให้กับระบบสายอากาศ โดยมีการต่างเฟสกัน  $๙๐^{\circ}$  ซึ่งรูปแบบการแพร่คลื่นเป็นดังรูป ๒-๓๐ A



ภาพที่ ๒-๓๐ การแพร่กระจายคลื่นของ Parasitic Array

เพราะว่าความเข้มของสัญญาณมีมากที่สุด ในทิศทางที่ออกมาจาก Parasitic ไปทาง Driven ฉะนั้น Parasitic นี้จึงถูกเรียกว่า Reflector (ใช้แทนด้วย R) ซึ่งโดยปกติแล้ว Reflector จะมีความยาวมากกว่า Driven อยู่ ๕% และจะวางอยู่ห่างกัน  $0.15\lambda$  เมื่อวาง Driven และ Parasitic ห่างกัน  $0.15\lambda$  ดังในรูป A แรงไฟฟ้าที่ได้จากการเหนี่ยวนำใน R จะตามหลัง (Lag) แรงไฟฟ้าใน Driven อยู่  $0.15\lambda$  หรือ  $๕๕^{\circ}$  แรงไฟเหนี่ยวนำนี้จะมีปฏิกิริยาต่อ R ที่จุดกึ่งกลาง ซึ่งเปรียบเสมือน R ได้รับการกระตุ้นจากสายส่งกำลังถ้าสนามแม่เหล็กของคลื่นวิทยุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปถึง Driven และมีเฟสเดียวกับสนามแม่เหล็กของคลื่นที่ออกจาก Driven เกิดการรวมตัวกันของคลื่นและมีความสัมพันธ์กันในทางมุม (Phase) ถ้า Reflector มีความยาวมากกว่า  $\lambda/2$  เล็กน้อยเปรียบเหมือนกับการต่อสายส่งกำลังเข้ากับ



Inductor ทำให้กระแสตามตามหลังแรงไฟจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความยาวของ R ถ้า R มีความยาวถูกต้องจะทำให้คลื่นที่แพร่ออกไปจาก R ไปถึง A และมีเฟสเดียวกัน จะได้รูปคลื่นในแบบ Polar Diagram ตามภาพที่ ๒-๓๐A

สนามที่เกิดจาก Reflector จะไปตัดกับสนามที่เกิดจาก Driven และเกิดกระแสเหนี่ยวนำใน Driven แรงไฟที่เกิดขึ้นนี้ทำให้กระแสเปลี่ยนไป และค่า Impedance ก็เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งโดยปกติสายอากาศ Dipole จะมี Impedance = 73 ohms. แต่เมื่อมาประกอบรวมกันกับ Reflector แล้วจะทำให้ค่า Impedance ของ Dipole ลดลงเล็กน้อย ค่า Input Impedance ขึ้นอยู่กับขนาดระยะห่าง รูปร่าง และความยาวของ Reflector โดยปกติแล้ว มันจะมี Impedance ประมาณ 50 ohms. ถ้าตัว Parasitic ที่สร้างขึ้นมาสั้นกว่า Driven วางขนานกันกับ Driven โดยมีระยะห่าง  $0.1\lambda$  (หรือมากกว่าเล็กน้อย) มันจะแสดงเป็น Director ตามภาพที่ ๒-๓๐ B ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นจาก Driven ไปในทิศทางของ Parasitic โดยทั่วไป Driven จะสั้นลง อันละ ๕ % จึงมีคุณสมบัติเป็น Capacitor เพราะว่า Driven มีความยาวน้อยลง ทำให้เกิดกระแสนำของคลื่นที่เคลื่อนที่ออกจาก Parasitic เมื่อไปถึง Driven จะต่างเฟสกับคลื่นที่เพิ่งเคลื่อนตัวออกจาก Driven  $๑๘๐^{\circ}$  ทำให้พลังงานเกิดหักล้างกันหมด ไปในทิศทางที่ไปสู่ Driven และจะมีการแพร่กระจายคลื่นได้สูงสุดในทิศทางไปยัง Director และเช่นเดียวกันกับ Reflector ตัว Director ทำให้ Impedance ของสายอากาศลดลง ถ้าระยะห่างระหว่าง Driven กับ Director เพิ่มขึ้น ตัว Director จะต้องถูกตัดให้สั้นลง เพื่อที่จะทำให้การแตกต่างทางมุม (Phase) มีค่าถูกต้อง

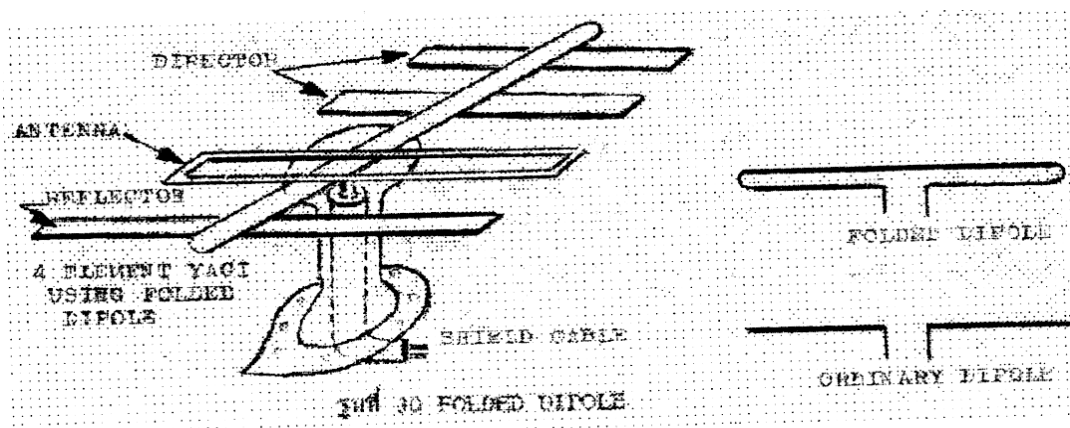
โดยทั่วไปในการควบคุม (Directivity) ในระบบสายอากาศแบบ Array จะกล่าวถึงอัตราส่วนของกำลังงานใน Lobe ที่ดีที่สุดต่อกำลังงานของสายอากาศแบบ Half Wave แบบธรรมดาหรืออัตราส่วนระหว่างกำลังงานใน Lobe ที่ดีที่สุดต่อกำลังในทิศทางตรงกันข้าม ทิศทางของกำลังงานของ Lobe ที่ดีที่สุดเรียกว่าทิศทางข้างหน้า (Forward) และทิศทางตรงกันข้ามเรียกว่าทิศทางหลัง (Backward) หรืออีกนัยหนึ่งการเปรียบเทียบครั้งนี้ คือ การเปรียบเทียบกำลังงานของสนามที่เกิดขึ้นข้างหน้าและข้างหลัง ตามภาพที่ 30 B อัตราส่วนข้างหน้าต่อข้างหลังประมาณ 5:1 เมื่อคำนวณ Gain จะได้ประมาณ 7 dB

### ๕.๕.๑.๖ Yagi Array

สายอากาศแบบ Yagi เป็นที่นิยมใช้กันมากกับเครื่องรับโทรทัศน์ โดยการเปรียบเทียบจากสายอากาศแบบ Parasitic ซึ่งใช้ Reflector กับ Driven จะมีอัตราของความแตกต่าง (Gain) เพียงเล็กน้อย เมื่อเอา Reflector กับ Director มารวมกันไว้ ทำให้สามารถกำหนดทิศทางได้ดีขึ้น ซึ่งการรวมกันนี้เรียกว่า Yagi Array และสายอากาศแบบ Yagi Array ได้ถูกออกแบบให้มี Director หลาย ๆ อัน เพราะ Director แต่ละอันจะช่วยเพิ่ม Gain ส่วนการเพิ่ม Reflector เพียงอันเดียว Reflector ต้องวางอยู่ข้างหลัง Driven และมีระยะห่าง  $0.15\lambda$  ส่วน Director อันแรกวางอยู่ข้างหน้า Driven  $0.1\lambda$  เพื่อที่จะให้ได้ Gain สูงสุดในทิศทางข้างหน้า Director แต่ละตัววางห่างกัน  $0.1\lambda$  ตามลำดับ

ตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบ YAGI สองชนิด ชนิดแรกมี ๗ ชั้นส่วนและชนิดที่มี ๔ ชั้นส่วน ชุด Driven (A) ต้องมีฉนวนกันระหว่างโครงสร้าง แต่สำหรับชุด Reflector และ Director สามารถวางติดกับโครงสร้างได้ วางขนานกันไป Director ตัวที่สองจะสั้นกว่า Driven ๑๐% และตัวที่ ๓ จะสั้นกว่า ๑๕ % คือ จะสั้นลงครึ่งละ ๕ % เรื่อยไปเป็นการวัดหรือคำนวณ Gain ของ Parasitic Array จากแนวระดับหรือพื้นดิน โดยข้อเท็จจริง Gain โดยเฉลี่ยของ Yagi ที่ใช้สามชั้นส่วน จะมีค่าประมาณ 6-7 dB เมื่อเทียบกับ Half-Wave

ข้อเสียของ Yagi Array คือ ความยาวในการปรับชั้นส่วน ถ้าเอา Yagi Array ไปใช้งานความถี่อื่นๆ ซึ่งไม่ใช่ความถี่ที่กำหนดไว้ จะทำให้ Gain ทิศทางการแพร่กระจายคลื่น และรูปร่างของคลื่นเปลี่ยนแปลงไปโดยสิ้นเชิง เมื่อใช้กับความถี่ที่กำหนดไว้ สายอากาศ Yagi ที่มี ๔ ชั้นส่วน จะส่งคลื่นออกไปมีความกว้างประมาณ  $50^{\circ}$  แต่ถ้ามี ๗ ชั้นส่วน ความกว้างจะเปลี่ยนไปเหลือประมาณ  $15^{\circ}$



ภาพที่ ๒-๓๑ Folded Dipole

ระบบสายอากาศที่ใช้ Array จะทำให้ Input Impedance มีค่าต่ำลง อาจเหลือเพียง 1.5 ohms. ฉะนั้นการที่จะทำให้เกิดการ Matching ระหว่างสายอากาศที่มี Impedance ต่ำ กับสายส่งกำลังซึ่งมี Impedance สูง จะต้องใช้วิธีการพิเศษจึงจะได้ผลดี วิธีการหนึ่งสามารถนำมาใช้ได้ดีคือแบบ Delta Matching ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว ส่วนอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันคือแบบ Folded Dipole

Folded Dipole ตามภาพที่ ๒-๓๑ หมายถึง ตัวนำที่มีความยาวหนึ่งช่วงคลื่น ( $1 \lambda$ ) แล้วพับตัวนำนั้นเพื่อให้ความยาวครึ่งช่วงคลื่น ( $\lambda/2$ ) มันจึงเป็นสายอากาศที่มีตัวนำความยาว  $\lambda/2$  อยู่คู่กันโดยมีปลายทั้งสองด้านต่ออยู่ด้วยกัน แรงไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแต่ละเส้นมีค่าเท่ากัน สนามจาก Driven จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นในสายอีกเส้นหนึ่ง กระแสที่เกิดขึ้นเหมือนกันกับกระแสที่มีอยู่ใน Driven Array

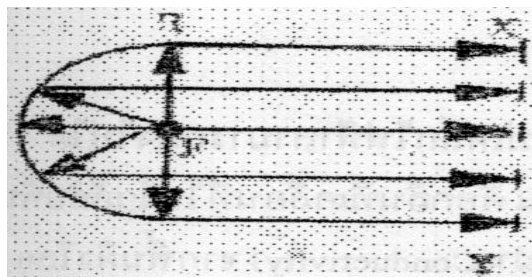
ในสายอากาศ Dipole ธรรมดา ถ้าเรากำหนดให้มีกระแสคงที่ ทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กในอากาศคงที่ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีกำลังงานคงที่เปรียบเทียบในอากาศต่อ ๑ หน่วย ค่าความหนาแน่นของกำลังงานกับกระแส คือ  $R = P/I^2$

พิจารณาเกี่ยวกับ Folded Dipole เมื่อตัวนำแต่ละเส้น มีกระแสเกิดขึ้นเท่ากัน ความเข้มของสนามที่เกิดขึ้นในอากาศย่อมเป็นสองเท่า เป็นเหตุให้ความหนาแน่นของกำลังงานในอากาศต่อตารางเมตรเพิ่มขึ้นเป็น ๔ เท่า เพราะฉะนั้นค่ากำลังงานที่เข้าไป (Input Power) จึงต้องเป็น ๔ เท่า ตามการเพิ่มขึ้นมาเพื่อทำสมการให้เท่ากัน จึงต้องคูณด้วย ๔ ทั้งสองข้าง  $4R = 4P/I^2$  เมื่อตัวนำแต่ละเส้นของ Dipole มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน ค่า Input Resistance มีค่าเป็น ๔ เท่าของ Dipole แบบธรรมดา เมื่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ค่า Impedance เพิ่มขึ้นด้วย ถึงแม้ว่า Input Impedance ของ Driven ที่ประกอบด้วย Parasitic จะมีค่าความต้านทานลดลง ๔ เท่า แต่เมื่อใช้ Folded Dipole ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ๔ เท่า จึงเสมือนกับ การทำให้เกิดการ Matching ที่ดีได้

### ๕.๖ Parabolic Reflectors

โดยปกติ คลื่นแพร่กระจายออกไปเป็นวงกลม เพราะกำลังงานที่หลุดออกไปจะตั้งฉากกับตัวแพร่กระจายคลื่น ในลักษณะเช่นนี้ รูปคลื่นที่ได้จึงไม่แหลมคมหรือไม่ค่อยมีทิศทาง ในทางตรงกันข้ามถ้าให้คลื่นพุ่งออกไปเป็นลำ โดยให้มีทิศทางของคลื่นพุ่งไปทางเดียวซึ่งเรียกว่า “Beam” ใช้กันมากในระบบเรดาร์ โดยการที่ทำให้คลื่นที่ออกไปเป็นวงรอบๆ ถูกเปลี่ยนให้ออกเป็นลำโดยใช้ Parasitic Reflector เมื่อความถี่ของเครื่องส่งสูงขึ้นความยาวคลื่นลดลง คลื่นวิทยุก็จะมี ความยาวคลื่นใกล้เคียงกับคลื่นแสง ระบบ Microwave (ความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเซนติเมตร) สามารถ Focus และสะท้อนได้เช่นเดียวกันกับลำแสง เมื่อลำคลื่นถูก Focus ได้ มันก็สามารถที่พุ่งตรงไปได้ เหมือนกับแสงไฟส่องสว่างของรถยนต์ ในการรวมแสงของไฟหน้ารถยนต์ซึ่งหลอดไฟถูกวางไว้ที่จุดรวมแสง ลำแสงจะพุ่งไปกระทบกับโลหะโค้งสะท้อนกลับ เป็นมุมที่ทำให้ลำแสงรวมตัวพุ่งขนานกันไป

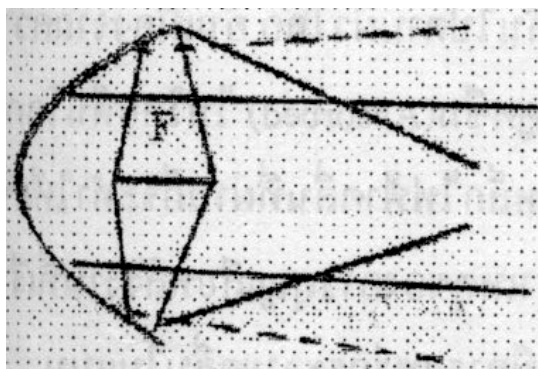
จากผลที่ได้นี้เราก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในระบบ Microwave ได้ แต่มีข้อแตกต่างกันคือ ลำแสงของไฟต้องการตัวสะท้อนที่ผิวเรียบ ส่วนการสะท้อนในระบบ Microwave ตัวสะท้อนจะมีพื้นผิวเช่นใดก็ได้ ตามภาพที่ ๒-๓๒ ตัวแพร่กระจายคลื่นวางอยู่ที่จุด F ซึ่งเป็นจุดรวมคลื่นให้คลื่นพุ่งไปที่ตัวสะท้อน เมื่อกระทบผิวของตัวสะท้อนทำให้เฟสเปลี่ยนแปลงไป  $๑๘๐^\circ$  สะท้อนกลับ โดยที่มุมสะท้อนทำให้ทุกส่วนของ Field ที่ออกมา มีเส้นทางขนานกันทั้งหมด เพราะรูปร่างของ Parabolic จะทำให้ทุกเส้นจากจุด F ไปสู่ Reflector แล้วสะท้อนกลับมายังเส้น XY มีความยาวเท่ากันทุกเส้น ฉะนั้นสนามทั้งหมดจะเคลื่อนที่ถึงเส้น XY พร้อมกัน หลังจากที่ได้สะท้อนกลับมา



ภาพที่ ๒-๓๒ ทิศทางการสะท้อนคลื่น

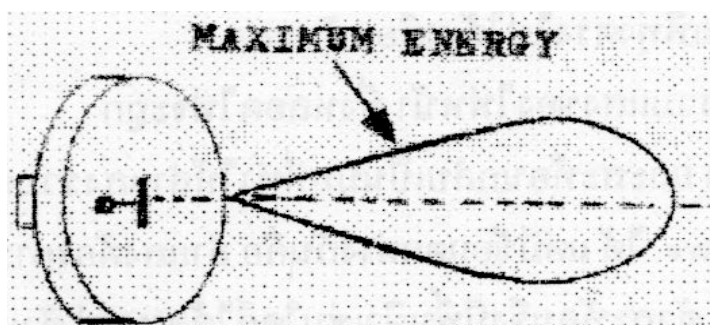
เมื่อเราใช้ Dipole เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น คลื่นที่ออกจากตัว Dipole สามารถที่จะไปสู่อากาศด้วยดีเช่นเดียวกันกับไปสู่ Reflector กำลังที่ไม่ได้ไปสู่ Reflector จะเป็นลำคลื่น

ที่มีมุมกว้าง และจะเป็นตัวทำลายรูปคลื่นที่มีมุมแคบที่สะท้อนมาจากตัวสะท้อน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอาการเช่นนี้ได้ โดยใช้ Parasitic เป็นตัวสะท้อนกับสายอากาศ Half Wave ที่เป็น Driven เมื่อทำเช่นนี้แล้ว พลังงานของคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งตรงไปยัง Parabolic Reflector ก่อน จึงทำให้เกิดการส่งที่มีมุมแคบได้ (Narrow Beam Width) ถ้าบางส่วนของสายอากาศ อยู่นอกจุดรวมแสง (Focal Point) พลังงานจากส่วนนั้น จะไม่สะท้อนกลับมาในเส้นทางขนานส่วนอื่น ๆ ผลที่เกิดเช่นนี้ ส่วนใหญ่แล้ว เกิดจากความยาวทางกายภาพของสายอากาศไม่ถึงครึ่งช่วงคลื่น แต่เพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่น โดยขึ้นส่วนที่มีความยาวขนาดนั้น ก็ต้องมีการแก้ไขอุปกรณ์อื่น ๆ นั่นคือ Parabolic Reflector ซึ่งจะต้องมีขนาดอย่างน้อยที่สุด ๑๐ เท่า ของ Dipole ที่ใช้งานตามภาพที่ ๒-๓๓



ภาพที่ ๒-๓๓ ทิศทางการสะท้อนคลื่น

คลื่นจาก Dipole เมื่อไปกระทบ Parabolic Reflector แล้วจะได้รูปคลื่นมาใหม่ ซึ่งคลื่นนั้น อาจมีมุมแคบในทิศทางหนึ่ง ส่วนในทิศทางอื่นจะมีมุมกว้าง ผลอันนี้เราจะติดตั้ง Dipole แบบ Horizontal เมื่อต้องการความแน่นอนของมุมทิศ แต่ถ้าต้องการความเที่ยงตรงในแนวตั้งก็ติดตั้งในแบบ Vertical



ภาพที่ ๒-๓๔ การแพร่กระจายคลื่นด้วย Parabolic Reflector

ตามภาพที่ ๒-๓๔ เป็นการแพร่กระจายคลื่นด้วย Parabolic Reflector ผลของรูปคลื่น จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัว Reflector โตขึ้น เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นความกว้างของลำคลื่น (Beam Width) จะลดลง

## บทที่ ๓

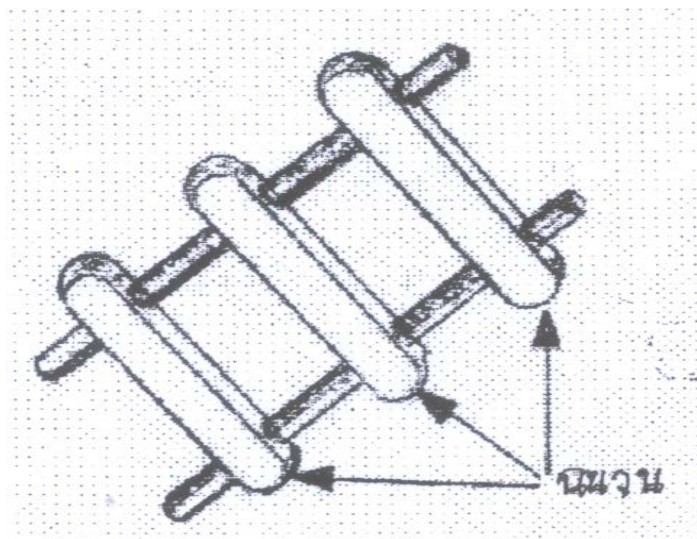
### สายส่งกำลัง (Transmission Line)

โดยทั่วไปสัญญาณที่ออกจากเครื่องส่งเป็นความถี่วิทยุ ซึ่งอาจมีกำลังส่งต่ำหรือสูง และในย่านความถี่ต่ำจนถึงย่านความถี่สูง สัญญาณจากเครื่องส่งนี้จะถูกส่งไปที่ Load หรือ Antenna โดยผ่านทางสายส่งกำลังซึ่งเป็นตัวนำที่สามารถรักษากำลังส่งให้มีการสูญเสียกำลังงานน้อยที่สุด

#### ๑. ประเภทของสายส่งกำลัง

##### ๑.๑ สายคู่ขนานแบบ Parallel Two-Wire Line

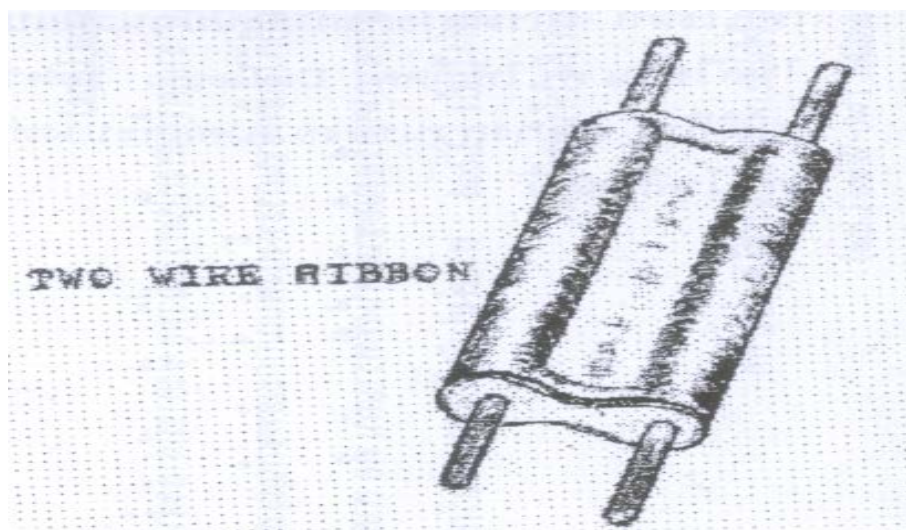
ตามภาพที่ ๓-๑ หรือเรียกว่า “Two-Wire Open” โดยมีลวดตัวนำสองเส้นอยู่ห่างกันจนถึง ๖ นิ้วหรือมากกว่า มีฉนวนเป็นแบบ Bar Insulated ทำด้วย Ceramic หรือ Polystyrene สายแบบนี้นิยมใช้ในการเดินเป็นสายไฟฟ้า โทรศัพท โทรเลข และบางครั้งใช้เป็นสายส่งกำลังระหว่างเครื่องรับ-ส่ง กับ Antenna สายส่งกำลังแบบสายคู่ขนาน มีข้อดีคือ สร้างง่าย ราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ มีการสูญเสียพลังงานการแพร่กระจายคลื่นมาก และได้รับสัญญาณรบกวนมาก เพราะไม่มีการป้องกันหรือการ Shield การสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นเกิดขึ้น เพราะการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวนำ พลังงานบางส่วนจะแพร่กระจายออกไปจากสายส่งกำลังแบบนี้ได้



ภาพที่ ๓-๑ สายคู่ขนานแบบ Parallel Two-Wire Line

### ๑.๒ สายคู่ขนานแบบ Two-Wire Ribbon

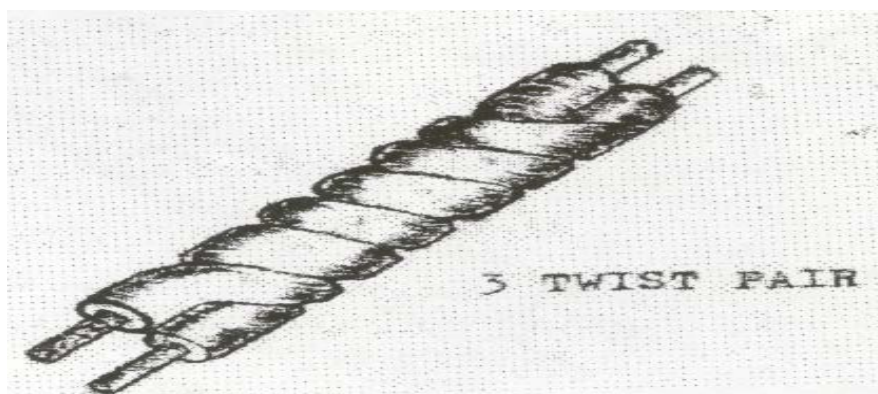
ตามภาพที่ ๓-๒ คุณลักษณะต่างๆ ของสายส่งกำลังแบบนี้ เหมือนกับแบบ Two -Wire Open ต่างกันที่มีการหุ้มด้วยฉนวนที่มีการสูญเสียพลังงานน้อย เช่น โพลีเอทิลีน และทำให้เกิดค่า Dielectric ระหว่างสายทั้งสอง



ภาพที่ ๓-๒ สายคู่ขนานแบบ Two-Wire Ribbon

### ๑.๓ สายคู่ควั่นเกลียว ( Twist Pair)

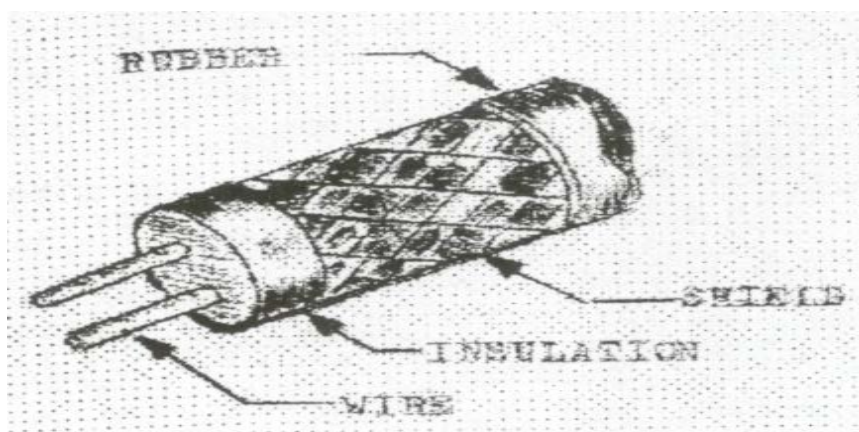
ตามภาพที่ ๓-๓ คือสายคู่หุ้มด้วยฉนวนบิดเป็นเกลียว สามารถอ่อนตัวได้ (Flexible) และไม่มีช่องว่างระหว่างเกลียว สายแบบนี้ ไม่นิยมใช้งานกับความถี่สูง เนื่องจากมีการสูญเสียอย่างมากในฉนวนยางที่หุ้ม และเมื่อเปียกชื้นการสูญเสียกำลังงานก็จะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ ๓-๓ สายคู่ควั่นเกลียว ( Twist Pair)

### ๑.๔ สายหุ้มชีลด์ (Shield Pair)

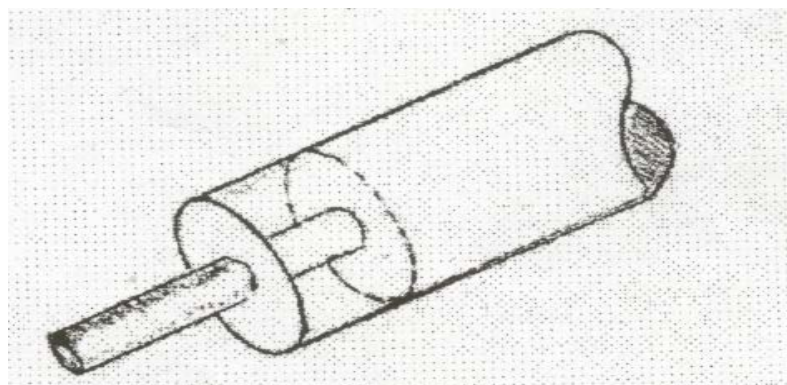
ตามภาพที่ ๑-๔ คือ ลวดตัวนำสองเส้นวางขนานกัน หุ้มด้วยฉนวนโดยรอบ ก่อนที่จะห่อหุ้มด้วยทองแดง ทำหน้าที่ Shield และถูกหุ้มด้วยฉนวนหรือสิ่งอื่นที่สามารถยืดหยุ่นได้ เพื่อป้องกันการเปียกชื้นหรือเสียหาย ข้อดีของสายหุ้มชีลด์ คือ เป็นตัวนำที่สมดุลกับตัว Ground เพราะระยะห่างระหว่างสายจะเท่ากันตลอด และสามารถป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กได้ เนื่องจากมี Shield โดยรอบ



ภาพที่ ๓-๔ สายหุ้มชีลด์ (Shield Pair)

### ๑.๕ Coaxial Line

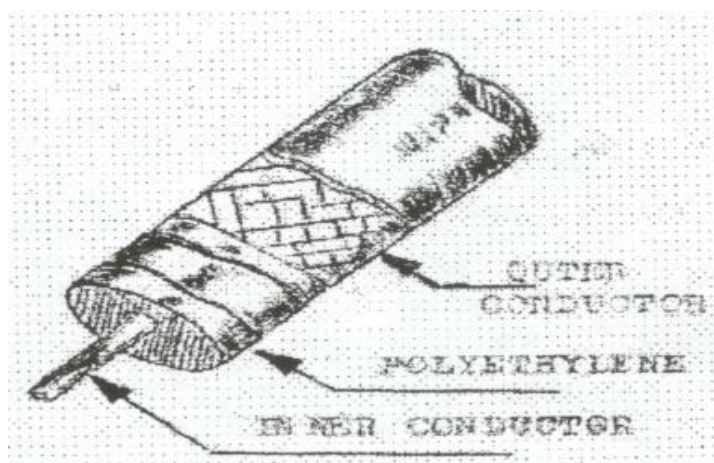
สายส่งกำลังแบบ Coaxial มี ๒ แบบ คือ แบบ Rigid หรือ Air Coaxial กับแบบ Flexible Coaxial Line โครงสร้างของสายส่งกำลังทั้งสองแบบ มีตัวนำสองตัวที่จุดศูนย์กลางร่วมกัน (Two Concentric Conductors)



ภาพที่ ๓-๕ สาย Air Coaxial

สาย Air Coaxial ตามภาพที่ ๓-๕ ประกอบด้วยตัวนำอยู่ตรงกลางหนึ่งเส้น และล้อมรอบด้วยกระบอกตัวนำ โดยมีฉนวนกั้นระหว่างตัวนำภายในกับตัวนำภายนอก ฉนวนดังกล่าวนี้ อาจเป็นแก้วไฟเร็กซ์ โพลีไธลีนหรือวัสดุอย่างอื่น ที่เป็นฉนวนอย่างดีและมีการสูญเสียน้อย ข้อดีของสาย Air Coaxial คือ ลดการสูญเสียในการแพร่คลื่น (Minimize Radiation Loss) ได้อย่างมาก เพราะว่าเมื่อใช้ Coaxial Line จะไม่มีสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้า แพร่กระจายออกไปนอกสนาม แต่จะประสานกันอยู่ภายในที่ว่างของตัวนำทั้งสองและ Coaxial Line ยังสามารถป้องกันการรบกวนจากภายนอกได้ด้วย ข้อเสียของสาย Air Coaxial คือ ราคาแพงต้องรักษาไว้ให้แห้ง เพื่อป้องกันการรั่วซึมระหว่างตัวนำ ถึงแม้ว่าสายแบบนี้จะมีการสูญเสียในการแพร่คลื่นต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านความถี่สูง แต่มีขีดจำกัดในเรื่องความยาวของสาย

การป้องกันความชื้น สามารถทำได้โดยการอัดก๊าซเข้าไปภายใน Air Coaxial ก๊าซที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน ซึ่งจะอัดเข้าไปประมาณ ๓ - ๓๕ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การอัดก๊าซเข้าไปในสายส่งกำลัง เพื่อป้องกันความชื้นนี้ เราจะทำในการติดตั้งครั้งแรก แล้วระวังรักษาความดันนี้ไว้ และไม่ให้ความชื้นเข้าไปในสาย Coaxial หรือ Concentric Cable



ภาพที่ ๓-๖ สาย Flexible Coaxial

สาย Flexible Coaxial ตามภาพที่ ๓-๖ ประกอบด้วยลวดตัวนำอยู่ภายในหุ้มด้วยฉนวน พร้อมกับหุ้มด้วยตัวนำภายนอกที่เป็นโลหะ ฉนวนระหว่างตัวนำภายในกับตัวนำภายนอกนั้น สมัยก่อนทำด้วยยาง ทำให้เกิดการสูญเสียมาก เมื่อใช้งานในย่านความถี่สูง และเกิดความชื้นเมื่อมีอากาศเข้าสู่ภายใน ทำให้มีกระแสรั่วไหลและเกิดการอาร์คของไฟแรงสูง จึงเปลี่ยนมาใช้โพลีไธลีนแทนยาง เพราะว่าโพลีไธลีนสามารถยืดหยุ่นอ่อนตัวได้ ไม่ถูกทำลายด้วยน้ำทะเล น้ำมันหล่อลื่นหรือของเหลวอื่นๆ เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้โพลีไธลีนกับอากาศ เมื่อใช้เป็น Dielectric โพลีไธลีน จะเกิดการสูญเสียมากกว่า แต่สูญเสียจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ Dielectric แบบอื่นๆ สำหรับสาย Flexible Coaxial นี้เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะสามารถอ่อนตัวได้ดี (Flexible)



## ๑.๖ Wave Guide

เป็นสายส่งกำลังที่มีลักษณะเป็นหลอดโลหะข้างในกลวง การส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าผ่าน Wave Guide นั้น จะดีกว่าการส่งพลังงานผ่านที่ว่าง ซึ่งในบทนี้จะไม่อธิบายถึงการทำงานของ Wave Guide

## ๒. ทฤษฎีและหลักการทำงาน

### ๒.๑ การสูญเสียในสายส่งกำลัง

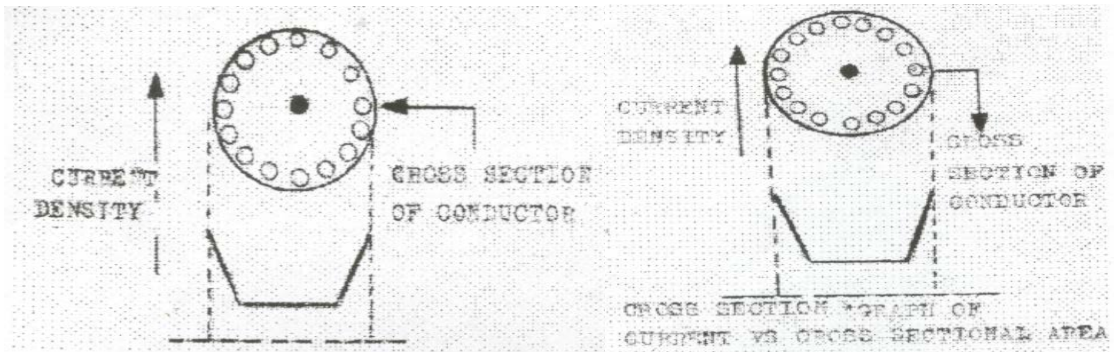
การสูญเสียในสายส่งกำลังมีด้วยกัน ๓ ประเภทใหญ่ๆ คือ Copper Losses Dielectric Losses และ Radiation and Induction Losses

#### ๒.๑.๑ Copper Losses มี ๒ แบบ

แบบแรกเรียก Power Loss ( $I^2 R$  Loss) เพราะหาค่าความต้านทานของตัวนำทุกชนิดมีค่ามากกว่า 0 เมื่อมีกระแสไหลผ่านสายส่งกำลัง ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปแบบของความร้อน การสูญเสียกำลังในลักษณะนี้คือ Power Loss ( $I^2 R$  Loss) การลดค่าความต้านทานสามารถลดค่า Power Loss ได้ ค่าความต้านทานของสายจะเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวกับพื้นที่หน้าตัดของสาย ( $R = L/A$ ) และการทำให้สายสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ จะทำให้ช่วยลดค่าความต้านทานและช่วยลด Power Loss ( $I^2 R$  Loss) ด้วย การใช้สายส่งกำลังที่มีพื้นที่หน้าตัดมากก็เป็นสิ่งที่ต้องการเพราะสามารถช่วยลดการสูญเสียนี้ได้ แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ มีขีดจำกัด เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของสาย จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความต้านทาน (Impedance) ของสาย

อีกแบบหนึ่งของ Copper Loss คือ Skin Effect เมื่อกระแส DC ไหลผ่านตัวนำ การเคลื่อนที่ของ Electrons ผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ จะเป็นแบบเดียวกันซึ่งจะแตกต่างกับ เมื่อป้อนแรงไฟ AC ทำให้เกิดการพองตัวและยุบตัวของสนาม Electrons แต่ละตัว ล้อมรอบ Electrons ตัวอื่นๆ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า "Self Induction" ซึ่งทำให้ Electrons ที่ถูกล้อมรอบเคลื่อนตัวได้ช้าลง ตามภาพที่ ๓-๗ ซึ่งแสดงให้เห็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดต่อการนำกระแส

ความเข้มของเส้นแรงมีมากที่ศูนย์กลาง ทำให้การเคลื่อนที่ของ Electrons ที่จุดนี้น้อยลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อการต่อต้านการไหลของกระแสที่จุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้นกระแสจึงมีน้อยที่จุดศูนย์กลาง แต่ Electrons ส่วนใหญ่จะไหลตามผิวของตัวนำ เมื่อความถี่ที่ป้อนให้สูงกว่า 100 MHz. การเคลื่อนที่ของ Electrons ที่ศูนย์กลางยิ่งน้อยมาก เหมือนกับที่เราสามารถเอาศูนย์กลางออกได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อกรไหลของกระแส นั่นคือพื้นที่หน้าตัดจะมีผลกระทบต่อกระแสน้อยลงเมื่อมีความถี่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานของสายเป็นอัตราส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดและความต้านทานของสายจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ป้อนเข้าไปเพิ่มขึ้น เราสามารถเพิ่มค่าความนำ (Conductivity) ของสายโดยการฉาบหรือเคลือบด้วยเงิน

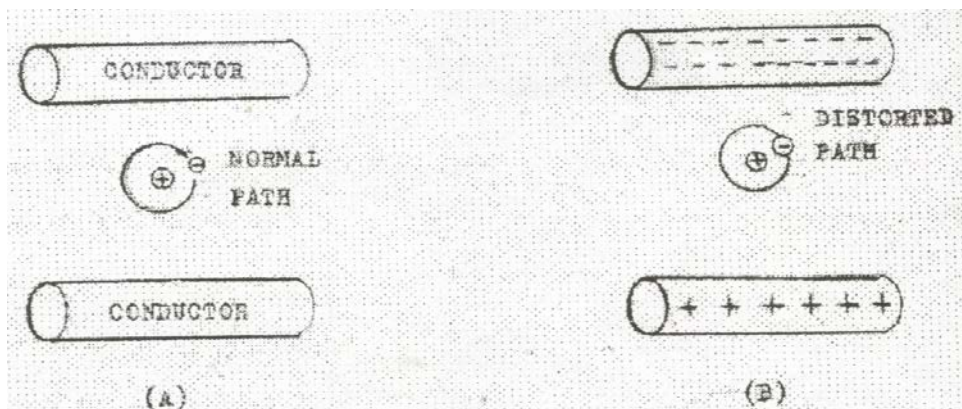


ภาพที่ ๓-๗ แสดงให้เห็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดต่อการนำกระแส

### ๒.๑.๒ Dielectric Losses

Dielectric Losses เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นกับฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างตัวนำทั้งสอง เมื่อความร้อนเกิดขึ้นจะทำให้สูญเสียกำลังงานซึ่งกำลังงานนั้นก็มาจากแหล่งจ่ายตามภาพที่ ๓-๘ A แสดงให้เห็นถึงทางเดินของ Electrons เมื่อไม่มีความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสอง

ส่วนในภาพที่ ๓-๘ B แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางเดินของ Electrons ใน Dielectric ทางเดินของ Electrons เปลี่ยนไป เพราะถูกผลักโดยขั้วลบของลวดตัวนำอันหนึ่ง และถูกดูดโดยลวดตัวนำที่มีขั้วบวกอีกอันหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงทางเดินนี้จะต้องใช้กำลังงานจากแหล่งจ่ายและเป็นการเพิ่มการสูญเสีย แต่โครงสร้างของอะตอมของฉนวนบางชนิด ทำให้เกิด Dielectric ได้ยาก เช่น ฉนวนยาง ต้องใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายมาก ส่วนทางเดินของอะตอมบางชนิดทำให้เปลี่ยนไปได้ง่าย โดยใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้อากาศเป็น Dielectric การสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีน้อยมาก ในกรณีที่ต้องใช้ของแข็ง และให้มีการสูญเสียต่ำ จะต้องใช้ฉนวนที่มีค่า Dielectric ต่ำ โพลีโรลีนเป็นสารที่สามารถยืดหยุ่น และมีการสูญเสียของ Dielectric มากกว่าอากาศ แต่ยังมีน้อยกว่าสารชนิดอื่น ๆ ที่มีราคาถูกพอ



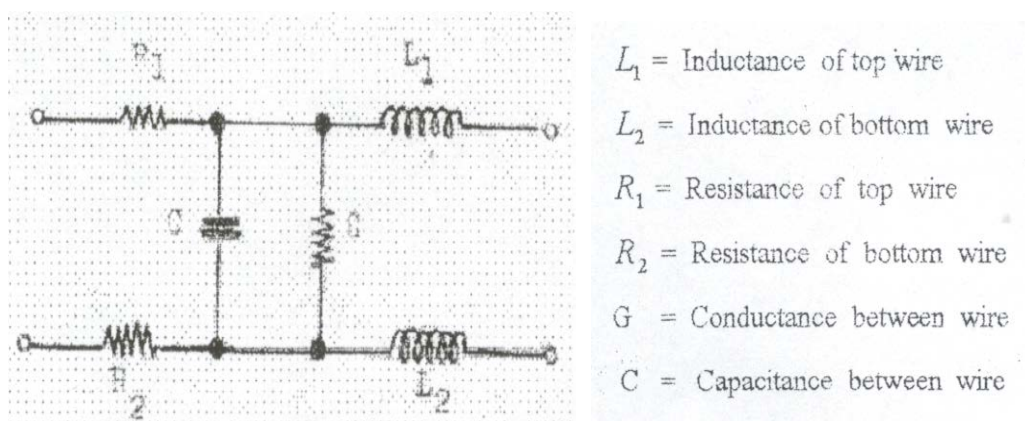
ภาพที่ ๓-๘ Dielectric Losses

### ๒.๑.๓ Radiation and Induction Losses

สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำ เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียในสายส่งกำลังได้ การสูญเสียก็คือสนามไฟฟ้าเกิดการชาร์จรระหว่างตัวนำที่อยู่ใกล้กัน ในขณะที่เดียวกันการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กชักนำให้เกิด EMF (Electro Magnetic Field) ในตัวนำที่อยู่ใกล้กัน ในแต่ละสาเหตุที่กล่าวมา จะทำให้พลังงานสูญเสียไป เราสามารถลดการสูญเสียในแบบ Radiation และ Induction Losses ได้โดยการต่อตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากับความต้านทานของสายส่งกำลังเข้ากับสายส่งกำลังนั้น และทำการ Shield ด้วยวิธีการใช้สาย Coaxial โดยต่อตัวนำภายนอกของสาย Coaxial เข้าร่วมกับ Ground

### ๒.๒ Equivalent Circuit

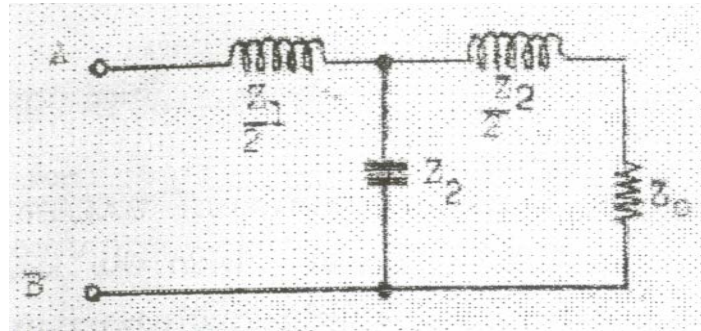
ปลายข้างหนึ่งของสายส่งกำลังสองเส้นนั้น จะต่ออยู่กับ Source หรือเรียกว่า Generator End หรือ Input End ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของสาย ถ้าต่ออยู่กับ Load เรียกว่า Load End หรือ Receiving End คุณสมบัติของสายส่งกำลัง ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสาย ฉะนั้น สายสองเส้นก็เหมือนกับว่าเป็น Capacitor ยาว ๆ ซึ่งค่า  $X_C$  ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ เมื่อมีพลังงานไฟฟ้าผ่าน สายส่งกำลังจึงมีค่า Inductance ซึ่งค่า  $C$  และ  $L$  ที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสาย ส่วนค่า Reactance ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ป้อนเข้าไป เพราะว่าไม่มีอะไรที่เป็น Dielectric ที่สมบูรณ์แบบได้ ทำให้ Electrons เคลื่อนที่จากตัวนำหนึ่งไปอีกตัวนำหนึ่งโดยผ่าน Dielectric ทำให้เกิดค่าความนำ (Conductance) ในสายส่งกำลัง ค่าความนำนี้เปรียบเหมือนกับค่าของกระแสที่ไหลผ่านฉนวน คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายส่งกำลังที่ได้กล่าวมานี้เรียกว่า “Distributed Constant” ถ้าสายนั้นมีสภาพเดียวกัน (แต่ละช่วงมีความยาวคุณสมบัติทางไฟฟ้าเท่ากัน) เราจะสามารถแทนค่าของสายส่งกำลังในช่วงสั้นๆ ได้ดังภาพที่ ๓-๙



ภาพที่ ๓-๙ Equivalent Circuit Of a Two Wire Transmission Line

ค่า R,L,C และ G ในภาพที่ ๓-๙ เรียกว่า Lumped เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ส่วนหนึ่งของสายที่เวลาหนึ่ง ซึ่งค่าต่างๆ นั้นจะเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ เพราะการใช้ความถี่ในบางความถี่ค่าเหล่านั้นจะมีผลต่อวงจร Output หรือวงจร Input ของวงจรต่อไป ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นทำให้ลด Gain การเกิด Distortion หรือ Phase Shift เพื่อป้องกันสาเหตุเช่นนั้น ค่าของ Lumped จะต้องสัมพันธ์กับวงจรในการใช้งาน สิ่งสำคัญก็คือต้องรู้ผลที่เกิดขึ้น โดยเข้าใจการทำงานของวงจรเพื่อสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีค่าถูกต้อง

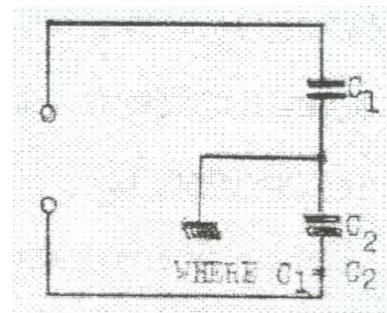
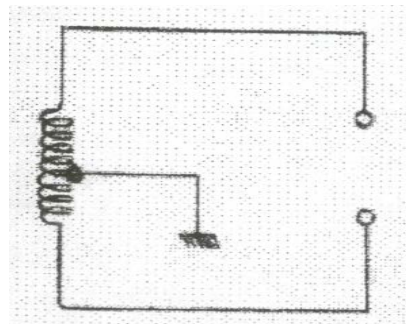
ในวงจร ค่าของความนำและความต้านทานจะมีค่าน้อยมากอาจตัดทิ้งได้ ถ้าตัดค่านี้ออกไป วงจรจะกลายเป็นภาพที่ ๓-๑๐ สังเกตว่าวงจรนี้ถูกต่อด้วยค่าความต้านทานที่ปลายสาย ซึ่งหมายถึงค่า Impedance ของจำนวนส่วนที่ไม่รู้จบของสายส่งกำลัง การต่อก็คือการต่อ Load เข้ากับสาย



ภาพที่ ๓-๑๐ Simple Circuit Terminate With Its Characteristic Impedance

### ๒.๓ Balanced Line

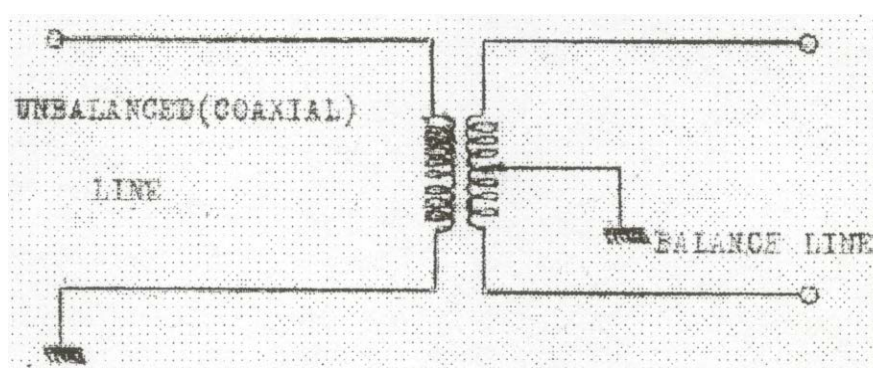
Balanced Line คือสายส่งกำลังที่มีค่า Distribute Capacitance ของตัวนำเส้นหนึ่งเท่ากับตัวนำอีกเส้นหนึ่ง กรณีเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวนำทั้งสองอยู่ห่างจาก Ground เท่ากัน จึงเป็นจุดกลางของความต้านทานของตัวนำทั้งสอง เพื่อให้ตัวนำทั้งสองมีค่าแรงไฟเท่ากับเทียบกับ Ground สายส่งกำลัง Balance Line จึงเหมือนกับ Centre Taper ของ Coil เพื่อให้แรงไฟแต่ละด้านของ Coil เมื่อเทียบกับ Ground มีค่าเท่ากันตามภาพที่ ๑๑



ภาพที่ ๓-๑๑ Balanced Line

## ๒.๔ Unbalance Line

Unbalance Line หมายถึง สายส่งกำลังที่สายด้านหนึ่งมีค่า Distribute Capacitance ไม่เท่ากับอีกด้านหนึ่งเมื่อเทียบกับ Ground ค่าของ Unbalance จะมีมากเมื่อตัวนำเส้นหนึ่งถูกต่อลง Ground สายแบบ Unbalance Line จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการรบกวนได้มากกว่าสายแบบ Balance Line นอกจากจะมีการ Shield สาย Unbalance ที่มีการ Shield ก็คือสาย Coaxial ที่ต่อตัวนำภายนอกลง Ground แต่บางครั้งก็ยังมีความต้องการที่จะถ่ายทอดสัญญาณกันระหว่างสาย Unbalance กับสาย Balance ตามภาพที่ ๑๒ การต่ออุปกรณ์ลักษณะนี้บางครั้งเรียกว่า BALUN เพราะได้มาจากคำว่า Balance to Unbalance



ภาพที่ ๓-๑๒ Unbalance Line

## ๒.๕ ความยาวทางกายภาพ (Physical Length)

ความยาวทางกายภาพของสายส่งกำลังมีหน่วยวัดเป็น นิ้ว ฟุต หรือ เมตร เป็นต้น

## ๒.๖ ความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Length)

ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งกำลังมีหน่วยวัดเป็น ความยาวคลื่น (Wave Length หรือ  $\lambda$ ) ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งกำลังนั้น ขึ้นอยู่กับความยาวทางกายภาพ กับสัญญาณความถี่ ซึ่งได้มาจากสูตร

$$\text{Electrical Length} = \frac{\text{Physical length}}{\text{One wave length}}$$

จากสูตรดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความยาวทางไฟฟ้าของสายที่กำหนดให้เพิ่มขึ้น เพราะว่า Wave Length ลดลง สายส่งกำลังที่ถูกกำหนดว่าความยาวทางไฟฟ้าสั้น

(Electrically Short) คือสายส่งกำลังที่มีความยาวทางไฟฟ้าน้อยกว่า  $\lambda/4$  แต่สายส่งกำลังส่วนใหญ่ จะมีความยาวทางไฟฟ้ามาก (Electrically Long)

Velocity Factor (K) หมายถึง อัตราส่วนความเร็วของพลังงานคลื่นวิทยุเดินทางในสายส่งกำลังต่อความเร็วแสง กระแสที่เคลื่อนไปในสายส่งกำลังจะช้ากว่าความเร็วแสง ดังนั้น ค่า Wave Length ในสายจึงมีค่าน้อยกว่าค่า Wave Length ในบรรยากาศ (Free Space) เมื่อใช้สัญญาณเหมือนกัน สายส่งกำลังแต่ละชนิดจะมีค่า Velocity Factor ไม่เหมือนกัน สายส่งกำลังบางชนิดเราจะไม่คำนึงถึงค่า Velocity Factor เพราะค่าใกล้เคียงกับหนึ่งมาก ซึ่งสูตรต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นผลของ Velocity Factor กับความยาวคลื่น คือ

$$\text{Wave Length } (\lambda) \text{ In Meters} = \frac{500K}{\text{frequency in MHz}}$$

นั่นคือ K หรือ Velocity Factor ย่อมมีผลต่อความยาวทางไฟฟ้าในสายส่งกำลัง

## ๒.๗ Characteristic Impedance

สายที่มีความยาวไม่รู้จักจะประกอบด้วยค่า L และ C ไม่รู้จัก ถ้ามีแรงไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ปลายสายทาง Input ก็จะมีกระแสไหล กระแสนี้จะไหลจนกว่าจะเกิดการเปลี่ยนค่า L และ C เพราะในสายซึ่งแบ่งเป็นหลายส่วนไม่รู้จักกระแสจึงไหลไปไม่สิ้นสุด ถ้าสายยาวไม่รู้จักในแต่ละส่วน มีลักษณะเช่นเดียวกันและมีความยาวเท่ากัน ย่อมต้องมีค่า Impedance เท่ากัน เพราะว่ากระแสเป็นค่าที่กำหนดได้ ฉะนั้นถ้าหากรู้ค่าของแรงไฟและกระแสที่ป้อนเข้าไปในสายส่งกำลัง ก็ทำให้รู้ค่า Impedance ของสายได้โดยใช้กฎของโอห์ม ค่า Impedance ที่ได้มานี้ ไม่ว่าจะวัดที่จุดใดภายในสายส่งกำลังนั้น ค่า  $Z_0$  หรือ Characteristic Impedance จะต้องเท่ากันทุกจุด สำหรับค่า  $Z_0$  หรือ Characteristic Impedance นี้ อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Surge Impedance”

ในภาพที่ ๓-๑๐ ที่ผ่านมาแล้ว ค่า L ที่เกิดขึ้นในสายถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนในแนวระดับของรูปตัว L ส่วนตัว C ซึ่งเป็น Lumped ถูกต่อที่จุดกลางเป็นขาของตัว T สายนี้ถูกต่อไว้ด้วยตัวต้านทานซึ่งมีค่าเท่ากับ Characteristic Impedance ของสายโดยมองจากจุด A และ B เหตุผลที่ต่อความต้านทานนี้ จะได้อธิบายในภายหลัง ส่วนวงจรในภาพที่ ๓-๑๐ นั้น ก็คือวงจรอนุกรม-ขนานของ RLC ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Impedance รวมได้ดังนี้ จากผลของวิธีรวม

$$Z_0 = \frac{Z_1}{2} = \frac{Z_2 \left( \frac{Z_1}{2} + Z_0 \right)}{Z_2 + \frac{Z_1}{2} + Z_0}$$

ทำให้ง่ายขึ้น

$$Z_0 = \frac{Z_1}{2} + \frac{\frac{Z_1 Z_2}{2 + Z_0 Z_1}}{Z_2 + \frac{Z_1}{2} + Z_0} = \frac{Z_1 Z_2 + \frac{Z_1}{2} + \frac{2Z_1 Z_2}{2} + 2Z_0 Z_2}{2\left(Z_2 + \frac{Z_1}{2} + Z_0\right)}$$

เอาตัวหารของเทอมทางขวามือคูณทั้งสองด้าน

$$\begin{aligned} 2Z_0 Z_2 + \frac{2Z_0 Z_1}{2} + 2Z_0^2 &= Z_1 Z_2 + \frac{Z_1^2}{2} + Z_0 Z_1 + \frac{2Z_1 Z_2}{2} + 2Z_0 Z_2 \\ 2Z_0^2 &= 2Z_1 Z_2 + \frac{Z_1^2}{2} \\ Z_0 &= Z_1 Z_2 + \frac{(Z_1^2)^2}{2} \end{aligned}$$

ถ้าสายส่งกำลังดังกล่าวถูกแทนด้วยวงจรเปรียบเทียบเป็นรูปตัว T ดังภาพที่ ๓-๑๐ เมื่อสายส่งกำลังยาวไม่รู้จบ รูปตัว T ถูกคูณแทนค่าลงไปในสายส่งกำลังทุกๆ ส่วนไม่รู้จบด้วย ฉะนั้นค่า Distributed Inductance (L) จึงต้องแทนค่าด้วย N แทนที่จะเป็น ๒ ตามสมการตัวสุดท้าย เมื่อส่วนย่อยของสายเป็นค่าไม่รู้จบ ทำให้เทอมสุดท้ายของสมการ คือ  $Z_0 = \sqrt{Z_1/N}$  จะมีค่าใกล้ศูนย์ เพราะฉะนั้นจะเหลือ  $Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2}$

เพราะว่า  $Z_1$  คือค่า  $X_L$  และ  $Z_2$  คือค่า  $X_C$

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{2\pi F_L \times 1 / 2\pi F C} \\ &= \sqrt{L/C} \end{aligned}$$

จากสูตรสุดท้ายนี้แสดงว่า  $Z_0$  ของสายจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Distributed Inductance (L) ต่อค่า Distributed Capacitance (C) ของสาย การเพิ่มระยะห่างระหว่างสายจะเป็นการเพิ่มค่า L แต่ลดค่า C ทั้งนี้เพราะว่าค่า L ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยตรงของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างสายนั้น ส่วนค่า C ลดลงเพราะว่าระยะห่างระหว่างสายหรือ Plate เพิ่มขึ้น

ดังนั้นเมื่อทำให้ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำของสายเพิ่มขึ้น จะทำให้  $Z_0$  เพิ่มขึ้น เพราะอัตราส่วนของ L/C เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน ถ้าลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายก็เพิ่ม  $Z_0$  ด้วย เพราะวาขนาดของสายมีผลต่อค่า C มากกว่าค่า L นั่นคือเป็นการลดขนาดของแผ่น Plate

ทำให้ค่า C ลดลง พร้อมกันนั้นก็ยังเป็นการเพิ่มระยะห่างของแผ่น Plate ซึ่งเป็นผลให้ค่า C ลดลงและถ้าค่าของตัว Dielectric เปลี่ยนแปลงไปย่อมทำให้ค่า C ระหว่างสายเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย เมื่อค่า Dielectric ลดลงค่า C ก็จะลดลงทำให้  $Z_0$  ของสายเพิ่มขึ้น

การคำนวณหาค่า Characteristic Impedance ( $Z_0$ ) ของสายคู่ยังหาได้จากสูตร

$$Z_0 = \frac{276}{K} \log_{10} \frac{2D}{d}$$

เมื่อให้ D เป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำทั้งสอง

D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเส้นใดเส้นหนึ่ง

K เป็นค่า Dielectric Constant ซึ่งค่า K ของอากาศจะมีค่าเท่ากับ ๑ ส่วน

ค่า  $Z_0$  ของสายแบบพัวตัวนำมีจุดศูนย์กลางร่วมกันนั้นคือสาย Coaxial ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า L และ C แต่ตามลักษณะโครงสร้างของสายซึ่งแตกต่างกันออกไป การเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า L และ C จึงต่างกันออกไปเล็กน้อย ซึ่งมีสูตรที่จะคำนวณหาค่า  $Z_0$  ของ Coaxial ดังนี้

$$Z_0 = \frac{138}{K} \log_{10} \frac{D}{d}$$

เมื่อ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตัวนำอันนอก

d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตัวนำอันใน

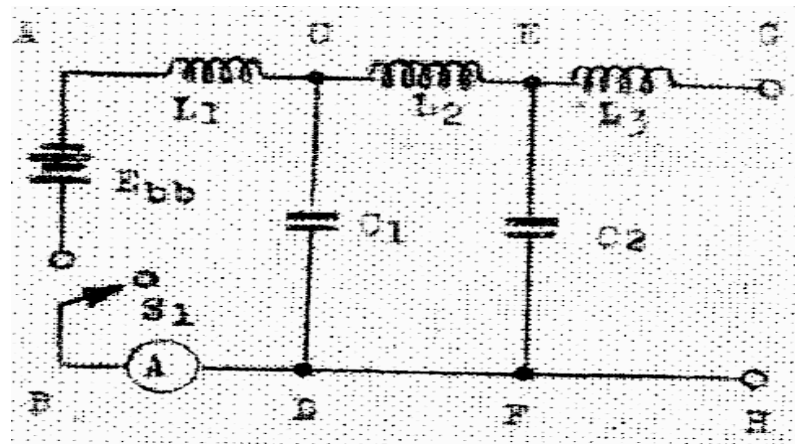
## ๒.๘ การต่อสายส่งกำลัง (Terminating The Line)

ถ้าต่อสายส่งกำลังด้วยค่าความต้านทานที่มีค่าเท่ากับ  $Z_0$  ของสายนั้น กระแสที่ไหลในวงจร จะเท่ากับกระแสที่ไหลในสายที่มีความยาวไม่รู้จบเพราะว่า Impedance ที่ต่อเข้ากับสายมีค่าเท่ากับ Impedance ของ Generator และ Impedance ของสาย ลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีการถ่ายทอดพลังงานสูงสุด จาก Generator สู่อุปกรณ์และจากสายสู่ความต้านทานที่ต่อไว้ หรืออาจกล่าวได้ว่าในสภาพเช่นนี้กำลังทั้งหมดที่ส่งไปตามสายจะถูกใช้งานทั้งหมดใน Load ไม่มีการสูญเสียเลย

ยังมีวิธีการในการต่อปลายสายในแบบอื่นๆ อีก เช่น การต่อแบบปลายสายเปิด หรือแบบปลายสายปิด หรืออาจใช้ Load ที่มีค่าความต้านทานไม่เท่ากับ  $Z_0$  ของสาย

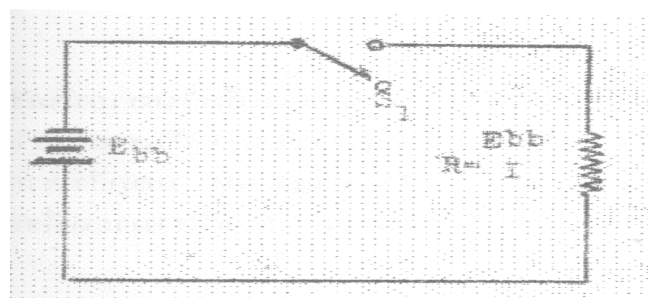
เพื่อให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของสายส่งกำลังเมื่อมี AC ป้อนเข้าไปได้ดียิ่งขึ้น เราจะวิเคราะห์ถึงการป้อนไฟ DC เข้าสู่สายส่งกำลังที่ยาวไม่รู้จบก่อน ความสมบูรณ์ของวงจรดังภาพที่ ๓-๑๓ ในวงจรนี้ไม่ได้แสดงถึงความต้านทานของสายและไม่มีการสูญเสียในสาย





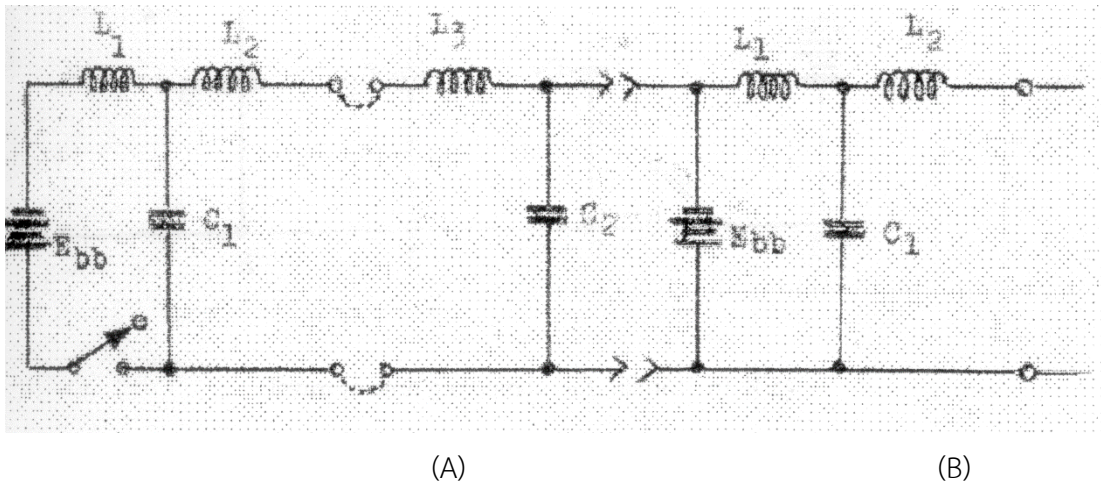
ภาพที่ ๓-๑๓ การป้อนไฟ DC ให้กับสายส่งกำลัง

ในภาพที่ ๓-๑๓ เป็นการป้อนไฟ DC ให้กับสายส่งกำลัง ในขั้นตอนพิจารณาที่  $L_1$ ,  $C_1$  และเครื่องวัดกระแส A ซึ่งต่อกันในแบบอนุกรม เมื่อมีแรงไฟ DC ป้อนให้วงจร  $C_1$  จะเริ่มชาร์จโดยผ่านทาง  $L_1$  คุณสมบัติของ Coil ก็คือ ในขั้นตอนแรกที่มีการป้อนแรงไฟเข้าไป แรงไฟแทบทั้งหมดจะตกคร่อมตัวเอง หรือมีกระแสส่วนน้อยมากผ่านตัวเองออกไปและในขณะเดียวกันแรงไฟส่วนน้อยจะตกคร่อม C ส่วนกระแสจะผ่าน C มากที่สุด แต่ในขณะนั้นจะไม่มีกระแสไหลเพราะปฏิกิริยาของ Coil ซึ่งเป็นเส้นทางชาร์จของ Capacitor จึงทำให้แรงไฟที่ตกคร่อมระหว่างจุด C และ D เป็นศูนย์ แรงไฟที่ปรากฏบนสายจึงเป็นศูนย์ด้วย แรงไฟที่ตกคร่อมสาย จะขึ้นอยู่กับกรชาร์จของ  $C_1$  ซึ่งมันต้องใช้เวลาเพื่อชาร์จผ่านทาง  $L_1$  เมื่อ  $C_1$  เริ่มชาร์จสามารถเห็นได้จาก Ammeter และเมื่อการชาร์จของ  $C_1$  ใกล้เคียงกับค่าแรงไฟที่ป้อนเข้ามา  $C_2$  ก็จะเริ่มชาร์จ โดยมีเส้นทางผ่าน  $L_1$  และ  $L_2$  ก็เช่นกัน ย่อมต้องการเวลาในการชาร์จ เวลาที่ต้องการเพื่อให้ได้แรงไฟที่จุด E และ F เท่ากันกับแรงไฟ ระหว่างจุด C และ D ย่อมเป็นเวลาที่เท่ากัน เพราะคุณสมบัติของสายที่เหมือนกันตลอดความยาว ค่า Reactive จึงเท่ากันตลอดความยาว ของสายด้วยปฏิกิริยาชาร์จ จะเป็นเช่นนี้ไปจนกว่า Capacitor ทุกตัวได้รับการชาร์จ เพราะว่าจำนวน Capacitor ในสายยาวไม่รู้จบ ต้องใช้เวลาในการชาร์จตลอดสายไม่รู้จบด้วย แต่สิ่งสำคัญคือมีกระแสไฟไหลตลอดเวลา และมีค่าที่กำหนดได้ ซึ่งวงจรที่แสดงคุณสมบัติดังกล่าวคือภาพที่ ๓-๑๔



ภาพที่ ๓-๑๔ ตัวอย่างวงจรที่ ๑

ถ้าเราป้อนแรงไฟเข้าไปในสาย และรู้ค่ากระแสที่ไหลผ่านก็จะสามารถคำนวณหา ค่าความต้านทานตามกฎของโอห์มได้ ค่าความต้านทานที่หาได้นี้เราเรียกว่า Characteristic Resistance ของสายหรือที่เรียกว่า Characteristic Impedance แล้วเราต่อแบตเตอรี่ เข้าไป ในช่วงต่อไป ค่าของกระแสที่ได้มาย่อมมีค่าเท่าเดิม ตามภาพที่ ๓-๑๕



ภาพที่ ๓-๑๕ ตัวอย่างวงจรที่ ๒

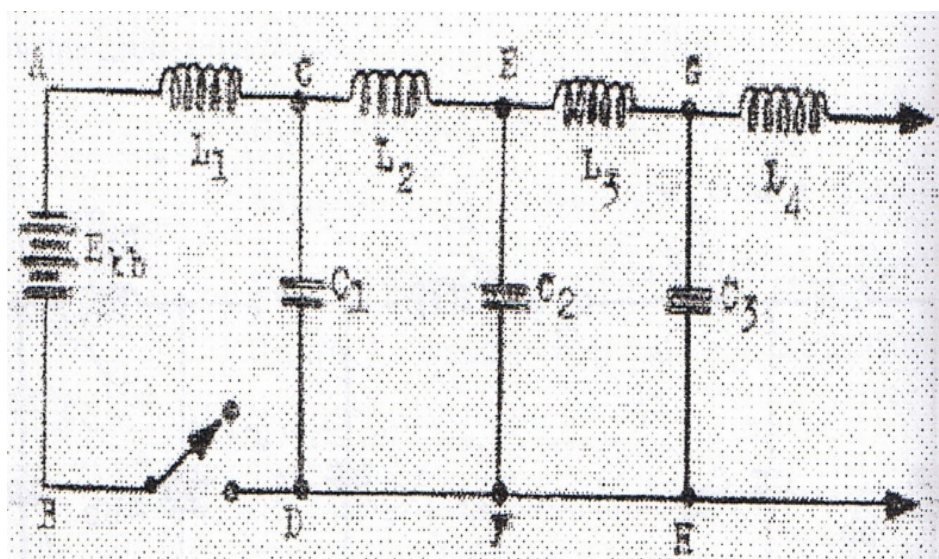
ตามภาพที่ ๓-๑๕ เมื่อต่อสายเข้ากับแบตเตอรี่ จะทำให้มีกระแสไหล ถ้าที่จุด C และ D ในสายถูกตัดขาดเมื่อเรานำ Source มาต่อเข้าไปใหม่ตามภาพที่ ๓-๑๕ B ผลที่ได้คือจะได้ กระแสไหลในวงจรมีค่าเท่ากับในขณะปกติ ในเบื้องต้นการทดลองนี้พิสูจน์ให้เห็นได้ว่า Impedance ของสายที่ยาวไม่รู้จบนั้น เท่ากันหมดตลอดสาย

ถ้านำแบตเตอรี่กลับมาต่อที่จุด A และ B และเอาความต้านทานที่มีค่าเท่ากับ ของสายต่อเข้าที่จุด C และ D ก็จะได้กระแสไหลเท่าเดิม นั่นคือไม่มีการสูญเสียใดๆในสาย แต่ในทาง ปฏิบัติเมื่อสายประกอบด้วยความต้านทานและค่าตัวนำ จะทำให้กำลังงานสูญเสียไปในสาย ในรูปของ ความร้อน

สรุปได้ว่า Characteristic Impedance ( $Z_o$ ) ของสายส่งกำลัง สามารถคำนวณ ได้จากขนาดของโครงสร้างของสาย หรือรู้ค่าของ L และ C ต่อความยาวของสายช่วงหนึ่ง และถ้ารู้แรงไฟ ที่จ่ายเข้าไป และกระแสที่ไหลในสายก็ยังสามารถหาค่าของ L และ C ต่อความยาวของสายช่วงหนึ่ง และถ้ารู้ แรงไฟที่จ่ายเข้าไป และกระแสที่ไหลในสายก็ยังสามารถหาค่าของ  $Z_o$  ได้จากสูตร

$$Z_o = \frac{E \text{ Indicator}}{I \text{ Indicator}}$$

เมื่อมีสนามไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นในสาย จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายนั้นเรียกว่า Propagated ได้กล่าวมาในเบื้องต้นว่า การชาร์จในแต่ละช่วงของสายต้องใช้เวลา ถ้าสายยาวไม่รู้จบ ก็ต้องใช้เวลาอันไม่รู้จบในการชาร์จ เวลาสำหรับสนามที่แพร่กระจาย (Propagated) ออกไปจากจุดหนึ่งของสายไปยังอีกจุดหนึ่งอาจจะคำนวณได้ ถ้ารู้เวลารวมและความยาวทั้งหมดของสายก็สามารถ ที่จะกำหนดความเร็วในการแพร่กระจาย (Velocity of Propagated)



ภาพที่ ๓-๑๖ ตัวอย่างวงจรที่ ๓

ภาพที่ ๓-๑๖ เป็นวงจรที่ใช้คำนวณหาเวลาที่ต้องการสำหรับแรงไฟที่จะผ่านไปในแต่ละช่วงของสายที่ได้กำหนดความยาวไว้ จำนวนการชาร์จซึ่งมีหน่วยเป็น Coulombs สำหรับ  $C_1$  นั้นกำหนดได้

จากสูตร  $Q = CE$

เพราะว่าการชาร์จของ Capacitor ในสายซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ ฉะนั้นการชาร์จจากแบตเตอรี่จะมีจำนวนเท่ากับ

$$Q = IT$$

เมื่อจำนวนการชาร์จเท่ากัน จึงได้สมการใหม่ คือ

$$CE = IT$$

เมื่อ  $C_1$  ถึงค่า CE การชาร์จของ  $C_2$  ยังคงมีค่า 0 เนื่องจากแรงไฟที่ตกคร่อม  $C_1$  จะจ่ายให้กับ  $C_2$  และ  $L_2$  ในเวลาเดียวกันกับที่ชาร์จ  $C_2$  ยังคงมีค่า 0 แรงไฟที่ตกคร่อม  $C_2$  ที่จุด C และ D จะต้องเป็นไปตามกฎของ Kirchoff ทำให้ได้แรงไฟตกคร่อม Inductance ตามสมการ

$$E = L \frac{di}{dt}$$

เปลี่ยนแปลงในเรื่องของเวลาและกระแส จะเท่ากับเวลาและกระแสครั้งสุดท้าย ทำให้ได้สมการใหม่คือ

$$ET = LI$$

$$I = \frac{ET}{L}$$

จากสมการข้างต้นเราได้

$$I = \frac{CE}{T}$$

ได้สมการสมการใหม่

$$\frac{ET}{L} = \frac{CE}{T}$$

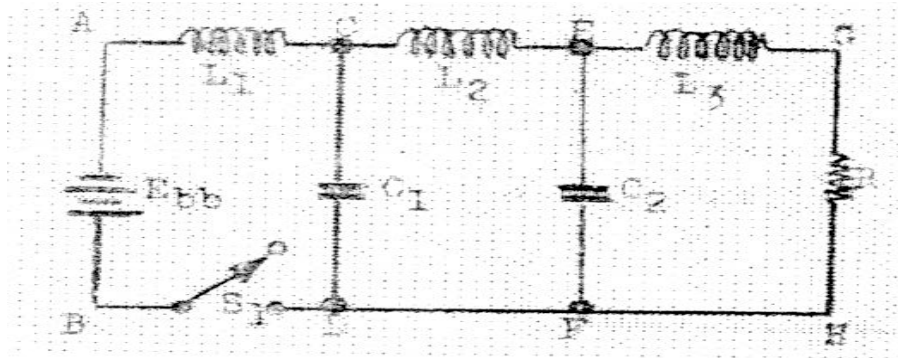
$$T^2 = LC$$

$$T = \sqrt{LC}$$

สังเกตเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปตามสายนั้น มันขึ้นอยู่กับค่า L และ C ค่านี้จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสาย

## ๒.๙ Non Resonance Line

Characteristic Impedance ของสายในแบบ Non Resonance นี้ กำลังงานทั้งหมดที่ส่งเข้าไปในสายจะถูก Absorbed โดยความต้านทานที่เป็น Load และความต้านทานในสาย รูปคลื่นของกระแสและแรงไฟ จะถูกเรียกว่า “Traveling Wave” ซึ่งมันจะเคลื่อนตัวไปด้วยกันและ In Phase จาก Source ไปยัง Load ในสายส่งกำลังที่ใส่ส่งพลังงานคลื่นวิทยุนี้ ส่วนใหญ่จะต่อต้านด้วย ความต้านทานมีค่าเท่ากับ Characteristic Impedance ของสาย สายส่งกำลังแบบ Non Resonance อาจเป็นสายที่มีความยาวไม่รู้จบ หรือเป็นสายที่ต่อต้านด้วยความต้านทานเท่ากับ Characteristic Impedance ของสาย บางทีอาจไม่ต้องคำนึงถึงความยาวของสาย แต่ในสายแบบ Resonance Line ความยาวของสายมีความสำคัญมาก



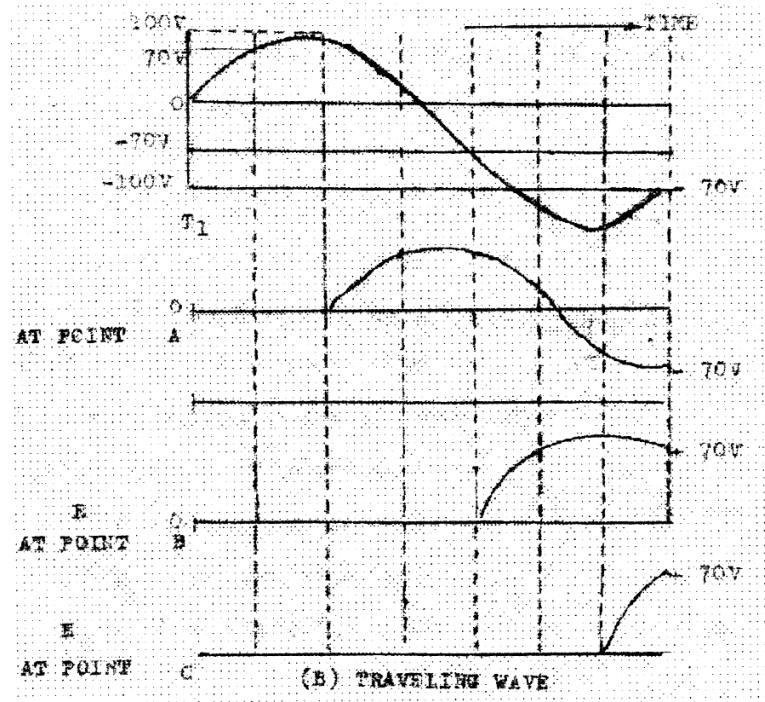
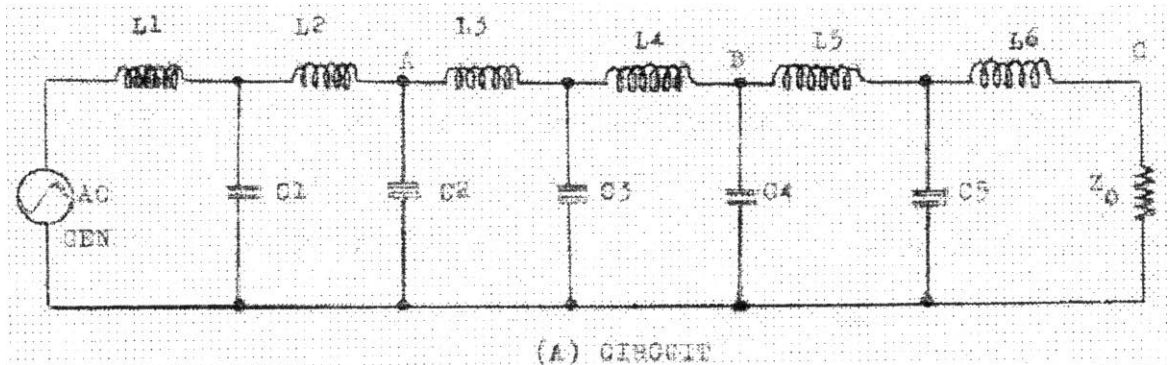
ภาพที่ ๓-๑๗ ตัวอย่างวงจรที่ ๔

ตามภาพที่ ๓-๑๗ ถ้าสวิตช์  $S_1$  ปิด (Close) แรงไฟทั้งหมดจะตกคร่อม  $L_1$  เมื่อเวลาผ่านไปเพียงเล็กน้อย  $C_1$  ก็จะเริ่มทำการชาร์จ ซึ่งในขณะนี้  $C_2$  ไม่สามารถที่จะชาร์จได้เพราะแรงไฟที่ตกคร่อมจุด C และ D ตกคร่อมที่  $L_2$  ก่อนในลักษณะเดียวกันกับที่ตกคร่อม  $L_1$   $C_2$  ไม่สามารถที่จะชาร์จได้จนกว่า  $C_1$  จะชาร์จถึงค่าแรงไฟที่จ่ายเข้าไป เมื่อชาร์จถึงแรงไฟสูงสุด การชาร์จของ  $C_2$  ก็จะเริ่มขึ้น แรงไฟที่ตกคร่อม  $C_2$  วัดได้จากจุด E และ F เพราะว่าผลของแรงไฟที่จุด E และ F นี้เป็นจุดต่อไปให้กับ Load Resistor แรงไฟที่ตกคร่อมที่ Load จึงเท่ากับที่  $C_2$  นั่นคือแรงไฟ Input ได้ถ่ายทอดไปสู่ Load ขณะเมื่อมีการชาร์จนั้นจะมีกระแสไหลผ่าน Ammeter และหลังจากได้ทำการชาร์จเรียบร้อยแล้ว ก็ยังมีกระแสไหลผ่านมิเตอร์ โดยเป็นกระแส DC ผ่านทาง Inductor และ Load Resistor กระแสนี้มีเรื่อยไปเท่าที่  $S_1$  ยังปิด (Closed) อยู่ และเมื่อ  $S_2$  เปิด (Opened) Capacitor ทุกตัวจะ Discharge ผ่าน Resistor ในลักษณะเดียวกันกับเรื่องของ Filter Capacitor ที่ทำการ Discharge ผ่าน Bleeder Resistor

จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ระหว่างการป้อนแรงไฟ AC กับ DC เข้าไปในสายส่งกำลัง ขั้นตอนในการชาร์จที่เกิดขึ้นในสาย เมื่อป้อนแรงไฟ AC เข้าไป สามารถอธิบายได้ตามภาพที่ ๓-๑๘ เมื่อมีแรงไฟป้อนเข้าไปในสายส่งกำลัง พิจารณาในขณะช่วงคลื่นบวกที่เวลา  $T_3$  เป็นจุดเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงแรงไฟของจุด A ณ จุดนี้แรงไฟเริ่มเป็นบวกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ณ เวลาการเกิดของแรงไฟก็จะเหมือนเดิม โดยปรากฏที่จุด B และในเวลา  $T_7$  แรงไฟเช่นเดียวกันนั้น ก็จะเริ่มมีขึ้นที่จุด C ซึ่งเป็นปลายสาย รูปคลื่นจะเคลื่อนไปตามสายเรื่อย ๆ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงแรงไฟในการเคลื่อนตัวไปตามสายจะใช้เวลาเท่ากับเวลาที่ให้แรงไฟ DC เคลื่อนตัวไปตามสายนั้น เวลาที่ให้รูปคลื่นของแรงไฟทั้งสองแบบเคลื่อนไปตามสายในระยะทางทางหนึ่งหาได้จากสูตร  $T = \sqrt{LC}$  เป็นที่น่าสังเกตว่า ทุกขณะที่แรงไฟผลิตออกมาจาก Generator (แรงไฟ AC) แล้วเคลื่อนที่ไปตามสาย ถ้าเราจะเขียนให้เป็นรูปร่างของคลื่น ในแต่ละจุดของแรงไฟที่เกิดขึ้นในสายเป็นเรื่องยุ่งยากมาก แต่สายถูกต่อไว้ ด้วยค่าความต้านทานที่มีค่าเท่ากับ  $Z_0$  พลังงานทั้งหมดที่ผลิตออกมาจาก Source จะถูกนำไปใช้งานในโหลดทั้งหมด

สรุป สำหรับสายแบบ Non resonance Line หรือ Flat Line นี้ ตามทฤษฎี หมายถึงสายนี้มีความยาวไม่รู้จักจบ หรือเป็นสายที่ต่อด้วยความต้านทานเท่ากับ Characteristic Impedance ของสาย พลังงานที่ป้อนเข้าไปในสาย บางส่วนถูกดูดซึม (Absorb) โดยความต้านทานของ

สาย ส่วนที่เหลือจะถูกใช้งานโดย Load Resistance การเปลี่ยนแปลงความยาวของสายไม่มีผลต่อพลังงาน สายชนิดนี้จึงไม่ยุ่งยากต่อการใช้งาน



ภาพที่ ๓-๑๘ Charge Analysis

แรงไฟวงจรเปิด (The Open Circuit Voltage :EOC) หมายถึง แรงไฟที่จุดต่อของแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายแรงไฟอื่น ๆ ในขณะที่ไม่มีกระแสไหล

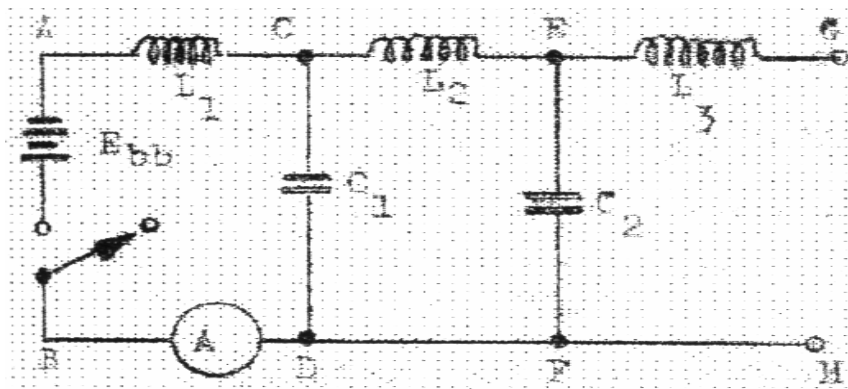
แรงไฟวงจรปิด (The Closed Circuit Voltage) หมายถึง ค่าแรงไฟที่วัดได้ในขณะที่มีกระแสไหลครบวงจร ค่าแรงไฟนี้จะเท่ากับค่าแรงไฟวงจรเปิดลบด้วยแรงไฟที่คร่อมความต้านทานภายในของ Generator (EOC-ERC)

การถ่ายทอดกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Transfer) ความมุ่งหมายส่วนใหญ่ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ต้องการให้มีการถ่ายทอดกำลังงานจากแหล่งผลิตสัญญาณไปยัง Load ให้สูงที่สุด แต่โดยทั่วไปแล้วแหล่งจ่ายกับ Load ไม่ได้ติดตั้งอยู่ด้วยกัน จึงจำเป็นต้องใช้สายส่งกำลัง

เป็นตัวถ่ายทอดสัญญาณ หรือกำลังงาน เพื่อให้ได้การถ่ายทอดกำลังงานสูงสุด ค่า  $Z_0$  ของสายส่งกำลังต้องเท่ากับความต้านทานภายในของ Generator ( $R_G$  หรือ  $Z_i$ ) และสายส่งกำลังต้องเท่ากับความต้านทานของ Load ( $R_L$  หรือ  $Z_L$ ) ของสายส่งถ้าหาก  $R_L$  หรือ  $Z_L$  ไม่เท่ากับ  $Z_0$  แล้วจะทำให้  $R_L$  ไม่สามารถนำเอา Incident Power มาใช้งานได้ทั้งหมด อีกทั้งทำให้เกิดการย้อนกลับ (Reflect) ของกำลังงานจาก  $Z_L$  กลับเข้าไปในสายส่งกำลัง ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เกิดมีการถ่ายทอดกำลังงานได้สูงสุดต้องทำให้  $Z_i = Z_0 = R_L$

### ๒.๑๐ Resonant Transmission Line

Resonant Line หมายถึงสายส่งกำลังที่ถูกต่อด้วยความต้านทานที่มีค่าไม่เท่ากับ  $Z_0$  ของสาย สายแบบ Resonant Line นี้ สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกคือแรงไฟ DC ที่ป้อนเข้า เพื่อให้ง่ายแก่การวิเคราะห์ในขั้นต้น



ภาพที่ ๓-๑๙ แบบของสายส่งกำลังที่มีความยาวจำกัดต่อไว้แบบวงจรเปิด

ตามภาพที่ ๓-๑๙ เป็นแบบของสายส่งกำลังที่มีความยาวจำกัดต่อไว้แบบวงจรเปิด ค่า  $Z_0$  ของสายเท่ากับความต้านทานภายในของ Source ที่ทำเช่นนี้เพื่อที่จะให้การถ่ายทอดกำลังงานได้สูงสุดจากแหล่งจ่ายสู่สาย เนื่องจากเป็นวงจรเปิดค่าความต้านทานจึงมีค่าไม่รู้จัก (Infinite) จึงเหมือนกับว่าสายแบบนี้ที่มีความยาวจำกัดมีคุณสมบัติเหมือนกับสายที่มีความยาวไม่จำกัด (Infinite Length) ที่กล่าวมาแล้ว ข้อแตกต่างของสายแบบนี้ คือความยาวของสายถูกจำกัดไว้

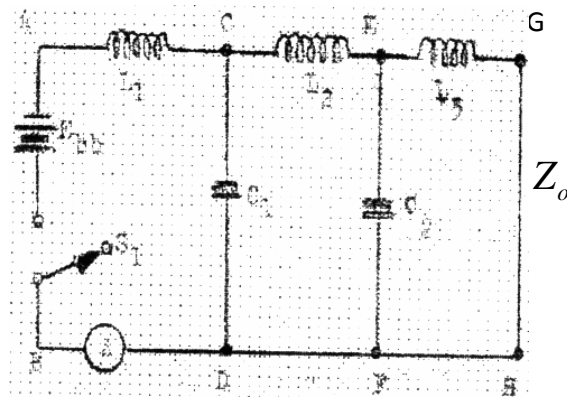
เนื่องจาก  $Z_i$  ของ Source เท่ากับ  $Z_0$  ของสาย ฉะนั้นแรงไฟที่จ่ายเข้าไปจึงถูกแบ่งออกเท่าๆ กันระหว่าง  $Z_i$  กับ  $Z_0$  เมื่อสวิตช์  $S_1$  ถูกปิดกระแสเริ่มไหล Capacitors เริ่มชาร์จผ่าน Inductors เมื่อ Capacitor เปลี่ยนตัวกันชาร์จ แรงไฟจะเคลื่อนไปตามสาย เมื่อ Capacitor ตัวสุดท้ายชาร์จเต็มที แรงไฟที่ตกคร่อม Capacitor ทุกตัวก็จะเท่ากัน ทำให้ไม่มีความต่างศักย์ระหว่าง E กับ G จึงไม่มีกระแสไหลผ่าน  $L_3$  ซึ่งหมายความว่าสนามแม่เหล็กรอบ ๆ Inductor ขยายตัวได้ไม่นาน จะต้องยุบตัวกลับ คุณสมบัติของสนามรอบ ๆ Inductor ก็คือ เมื่อเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็กจะต้องรักษาให้กระแสไหลอยู่ในทิศทางเดิมและเสริมกัน กระแสที่เสริมกันนี้จะไหลผ่านวงจร  $C_3$  ซึ่งเป็นค่า Capacitance ระหว่างปลายเปิดของสาย เพราะว่ากำลังงานในสนามแม่เหล็กเท่ากับ

ใน Capacitor  $C_3$  จึงชาร์จเป็นสองเท่าทำให้แรงไฟตกคร่อม  $C_3$  เท่ากับแรงไฟที่จ่ายให้กับสาย ที่จุด C กับ E ซึ่งไม่มีความต่างศักย์ของแรงไฟ ทำให้สนามแม่เหล็กกรอบ ๆ  $L_2$  ยุบตัวลง  $C_2$  จึงชาร์จเป็นสองเท่า และในทำนองเดียวกันสนามแม่เหล็กกรอบ ๆ  $L_1$  ยุบตัว แรงไฟที่  $C_1$  จึงเพิ่มเป็นสองเท่า ผลรวมที่เกิดจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กกรอบ ๆ Inductor ทุกตัว ทำให้เกิดแรงไฟเท่ากับแหล่งจ่ายเคลื่อนตัวกลับเข้าสู่แหล่งจ่าย การสวนทางกันของแรงไฟที่ได้อธิบายแล้วนั้นเรียกว่า “Reflection” แรงไฟที่สะท้อนกลับ (Reflected Voltage) มีขั้วเหมือนกันกับการชาร์จครั้งแรก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สายส่งกำลังปลายเปิดจะมีขั้ว และแรงไฟจากการสะท้อนกลับเหมือนกับขั้วและแรงไฟ DC ที่จ่ายเข้าไป เมื่อแรงไฟสะท้อนกลับเข้ามาถึงแรงจ่าย ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นก็จะหยุดลงเพราะเกิดการหักล้างของแรงไฟ อย่างไรก็ตามกระแสก็มีการสะท้อนกลับ แต่มีขั้วในทางตรงกันข้าม เพราะเมื่อสนามแม่เหล็กกรอบ Inductor ยุบตัวลง กระแสจะลดลงมาเป็นศูนย์ ขณะที่ Capacitor ทุกตัว กำลังชาร์จอยู่ เป็นเหตุที่เกิดการสะท้อนกลับ กระแสไหลใน Inductor ทำให้การชาร์จ ที่เสริมกันลดลงเป็นศูนย์ เมื่อ  $C_1$  ทำการชาร์จเสร็จแล้ว กระแสก็จะหยุดไหล จึงกล่าวได้ว่าความต้านทานที่จุดรับของสาย (Receiving End) เป็นแบบปลายเปิด

ถ้าป้อนแรงไฟแบบ Sine เข้าไปในสายปลายเปิด แรงไฟ Sine Wave ที่ส่งไปตามสายเรียกว่า “Incident Line” ในทำนองเดียวกัน จะเกิดการสะท้อนกลับซึ่งเรียกว่า “Reflected Wave” ถ้าป้อนแรงไฟ Sine Wave 50 Volts เข้าไปในสายปลายเปิด ค่าแรงไฟของ Incident Voltage คือ 25 Volts เพราะครึ่งหนึ่งของแรงไฟวงจรเปิด (EOC) จะตกคร่อมความต้านทานภายในของ Generator ( $R_g$ ) แรงไฟสะท้อนกลับจะมีค่า 25 Volts ด้วย และเฟสของ Incident Wave กับ Reflected Wave ที่ปลายสายจะอินเฟสกัน ผลรวมของแรงไฟ Incident Wave (25 volts) กับแรงไฟ Reflected Wave (25 volts) ที่ปลายสายนี้จึงเท่ากับ 50 Volts หรือเท่ากับไฟที่จ่ายให้กับสาย กระแสสะท้อนกลับที่ปลายสาย จะมีมุมตรงข้ามกัน (Out Of Phase) เป็นผลทำให้กระแสเป็นศูนย์ เพราะว่าค่าของกระแสระหว่าง Incident Wave กับกระแสของ Reflected Wave เท่ากัน ซึ่งทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไปจากเดิม ค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่างจุด E กับ F จะมีค่าน้อยกว่า  $Z_o$  ของสายอย่างมากมาย กระแสในส่วนนั้นจึงเพิ่มขึ้น จำนวน Electron ที่จ่ายให้สำหรับกระแสที่เพิ่มขึ้นนี้มาจาก  $C_2$  เมื่อ  $C_2$  Discharge ทำให้จุด E เป็นลบน้อยกว่าที่เคยเป็นอยู่  $C_2$  จะ Discharge จนแรงไฟเป็นศูนย์โดยผ่านทาง  $L_3$  เพราะว่าพลังงานที่มีอยู่ใน Capacitor เท่ากับพลังงานที่มีอยู่ใน Inductor กระแสจึงไหลใน Inductor เพิ่มเป็นสองเท่า

กระแสที่ไหลผ่าน  $L_3$  ก็จะมีเหมือนกันกับกระแสที่ไหลผ่านทาง  $L_2$  เพราะ  $C_1$  จะ Discharge ผ่านทาง  $L_2$  ทำให้กระแสที่ผ่าน  $L_2$  เพิ่มขึ้นที่จุด C เมื่อเทียบกับจุด D จะกลายเป็นบวกเพิ่มขึ้นขณะที่  $C_1$  Discharge จนเป็นศูนย์ Volts ดังนั้นจึงเกิดสะท้อนกลับมายังแหล่งจ่าย สภาพของศูนย์ Volts ที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการ Short กันที่จุด G กับ H แรงไฟที่สะท้อนกลับมายังแหล่งจ่าย จะมีขั้วตรงกันข้ามกับแรงไฟที่จ่ายเข้าไป ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นได้ง่ายด้วยความจริงที่ว่า แรงไฟที่ส่งไปตามสายนั้น ที่จุด C จะเป็นลบมากกว่าจุด D ในขณะที่  $C_1$  ยังชาร์จอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อถึงจุด Short Capacitor ทุกตัวจะ Discharge ทำให้จุด C เป็นบวกเมื่อเทียบกับจุด D จึงสามารถพูดได้ว่าแรงไฟที่สะท้อนกลับจากสายส่งกำลังปลายเปิด จะมีค่าแรงไฟเท่ากับแต่มีขั้วตรงกันข้าม





ภาพที่ ๓-๒๐ สายส่งกำลังที่ Shorted ปลายสาย

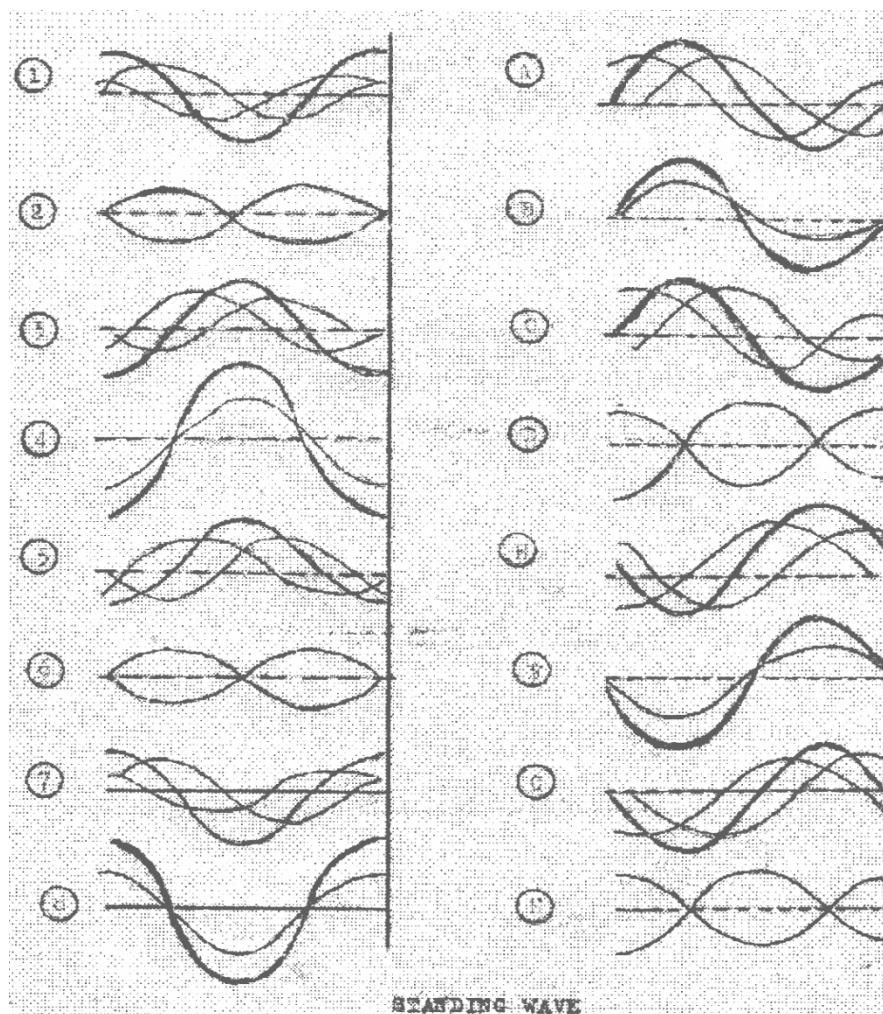
ภาพที่ ๓-๒๐ แสดงให้เห็นถึงสายส่งกำลังที่ Shorted ปลายสายเมื่อปิดสวิตช์ S1 แรงไฟ DC ลบก็จะต่อเข้ากับ  $Z_0$  ของสาย สมมุติว่า  $Z_0$  เท่ากับ  $Z_1$  เพื่อจะได้มีการถ่ายทอดกำลังงานสูงสุด เมื่อวงจรปิด  $C_1$  เริ่มชาร์จผ่านทาง  $L_1$  เช่นเดียวกันกับ Infinite Line เมื่อ  $C_1$  ชาร์จแรงไฟได้ใกล้เคียงกับค่าแรงไฟที่จ่ายเข้าไป  $C_2$  ก็จะเริ่มชาร์จผ่านทาง  $L_2$  เมื่อรูปคลื่นมาถึงจุด E กับ F ก่อนที่จะถึงจุด G กับ H ที่  $Z_0$

กระแสที่เป็น Reflected Current มีเฟสเดียวกับกับ Incident Current เป็นผลให้กระแสเพิ่มเป็นสองเท่าตามสมการ  $\frac{2V}{Z_0}$  เมื่อแรงไฟสะท้อนกลับมายังแหล่งจ่ายไฟจะมีชั่วตรงกันข้ามกัน ทำให้แรงไฟเป็นศูนย์ที่ชั่วแบตเตอร์เพราะการหักล้างกัน แล้วแหล่งจ่ายไฟ DC ก็จะส่งรูปคลื่นของแรงไฟออกไปอีกครั้งซึ่งทำให้กระแสเท่ากับ  $\frac{V}{Z_0}$  ทำให้กระแสรวมเป็น  $\frac{3V}{Z_0}$  เมื่อเกิดการสะท้อนกลับของแรงไฟเป็นครั้งที่สอง กระแสจะเพิ่มขึ้นเป็น  $\frac{5V}{Z_0}$  และจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเช่นนี้ จนกระทั่งสุด

ความสามารถ ที่สายจะรับได้ การที่เกิดค่ากระแสอย่างมากนี้ เพราะถ้าตรวจสอบทางไหลของกระแส DC แล้ว สิ่งที่ต้องต้านการไหลของกระแส ก็คือค่าความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟ , ค่าความต้านทานของลวดตัวนำ และค่าความต้านทานของขดลวดต่อไฟ DC ถ้าต่อแรงไฟ AC กับสายแบบปลายปิด ผลที่เกิดขึ้น ก็คงเป็นเช่นเดียวกับที่อธิบายมาแล้ว

รูปคลื่นทั้งหมดตามภาพที่ ๓-๒๑ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่มีอยู่ระหว่าง Incident Wave กับ Reflected Wave ในสายส่งกำลังแบบปลายเปิด เส้นคำทึบใช้แทนรูปคลื่นของ Standing Wave รูปคลื่น Standing Wave เป็นผลรวมของ Incident Wave กับ Reflected Wave ในช่วงเวลาหนึ่ง ในสายส่งกำลังแบบปลายเปิด ค่าแรงของแรงไฟและเฟสของ Incident Wave กับ Reflected Wave เท่ากันที่ปลายสาย (Receiving End) จากภาพที่ ๓-๒๑ ซึ่งเป็นสายปลายเปิด ค่าแรงไฟของ Incident Wave กับ Reflected Wave อยู่ทางด้านซ้าย ส่วนทางด้านขวาแทน

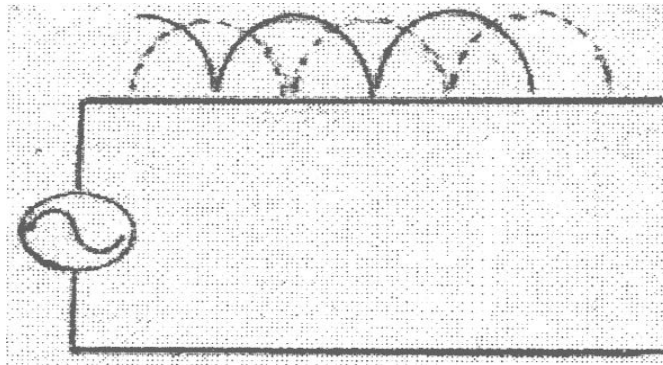
ค่าของกระแส (สำหรับสายส่งกำลังปลายปิดจะตรงกันข้าม) Incident Wave เคลื่อนที่ไปทางขวา แต่ Reflected Wave เคลื่อนที่ไปทางซ้าย



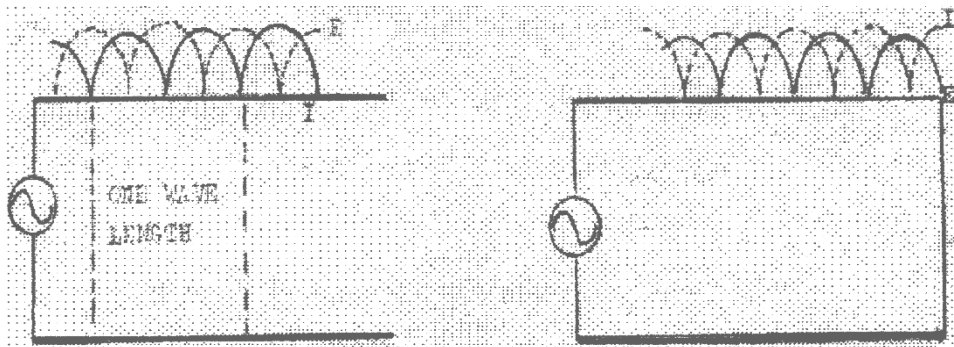
ภาพที่ ๓-๒๑ ความสัมพันธ์ที่มีอยู่ระหว่าง Incident Wave กับ Reflected Wave  
ในสายส่งกำลังแบบปลายเปิด

จากภาพที่ ๒ และ ๖ ในภาพที่ ๓-๒๑ รูปคลื่นที่เกิดจะซ้อนกันทุกจุดในเวลาเดียวกัน ค่าแรงไฟตลอดความยาวของสายเป็นศูนย์ ถ้าพิจารณาต่อไปอีกจะพบว่า ณ จุดที่มีระยะห่างจากปลายสายเป็น  $\lambda/4$  และ  $3\lambda/4$  ค่าของแรงไฟจะเป็นศูนย์ตลอดเวลา เพราะว่าจุดที่ค่าเป็นศูนย์นี้เรียกว่า Standing Wave ถ้าใช้ AC Meter วัดค่าแรงไฟและกระแสในสาย ค่าที่อ่านได้ก็เป็นเพียงค่าของกระแสและแรงไฟไม่อาจจะรู้ชี้วัดได้ (Polarity) แต่ถ้าเราเขียนค่าที่อ่านได้ไปเรื่อย ๆ จะปรากฏรูปคลื่นให้เห็น รูปคลื่นนี้เป็นแบบ Positive Going ดังในภาพที่ ๓-๒๒ ซึ่งเรียกว่า Conventional Picture of Standing Wave

สำหรับสายส่งกำลังปลายเปิด ค่าของกระแสจะเป็นศูนย์และค่าแรงไฟจะสูงสุด ที่จุดปลายสายซึ่งความสัมพันธ์อันนี้สามารถเปรียบเทียบด้วยเฟส ก็จะทำให้เห็นว่ากระแสและแรงไฟ จะมีเฟส ต่างกันอยู่  $90^\circ$  ที่ปลายสายของสายส่งกำลังปลายเปิดจะได้ค่าของกระแสสูงสุดและค่าของแรงไฟเป็นศูนย์



ภาพที่ ๓-๒๒ Conventional Picture of Standing Wave



ภาพที่ ๓-๒๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงไฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงไฟได้แสดงไว้ในภาพที่ ๓-๒๓ เป็นส่วนสำคัญมาก เพราะมันจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ณ จุดต่าง ๆ ตลอดความยาวของสาย ในสายส่งกำลัง จะมีจุดที่มีค่าของแรงไฟและกระแสสูงสุดหรือต่ำที่สุดตำแหน่งของจุดเหล่านี้สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งที่แน่นอน ถ้าหากรู้ความถี่และชนิดของการต่อสายส่งกำลังก็จะสามารถหาความยาวคลื่น (Wave Length) เพื่อกำหนดจุดดังกล่าว

คลื่นจะแพร่กระจายไปในอากาศด้วยความเร็วประมาณ 186,000 miles/s หรือ ประมาณ 300,000,000 m/s ความเร็วของคลื่นจะคงที่ถึงแม้ความถี่จะเปลี่ยนไปในหนึ่งคลื่น ( $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{V(k)}{f} = \frac{300,000,000(k)}{f}$$

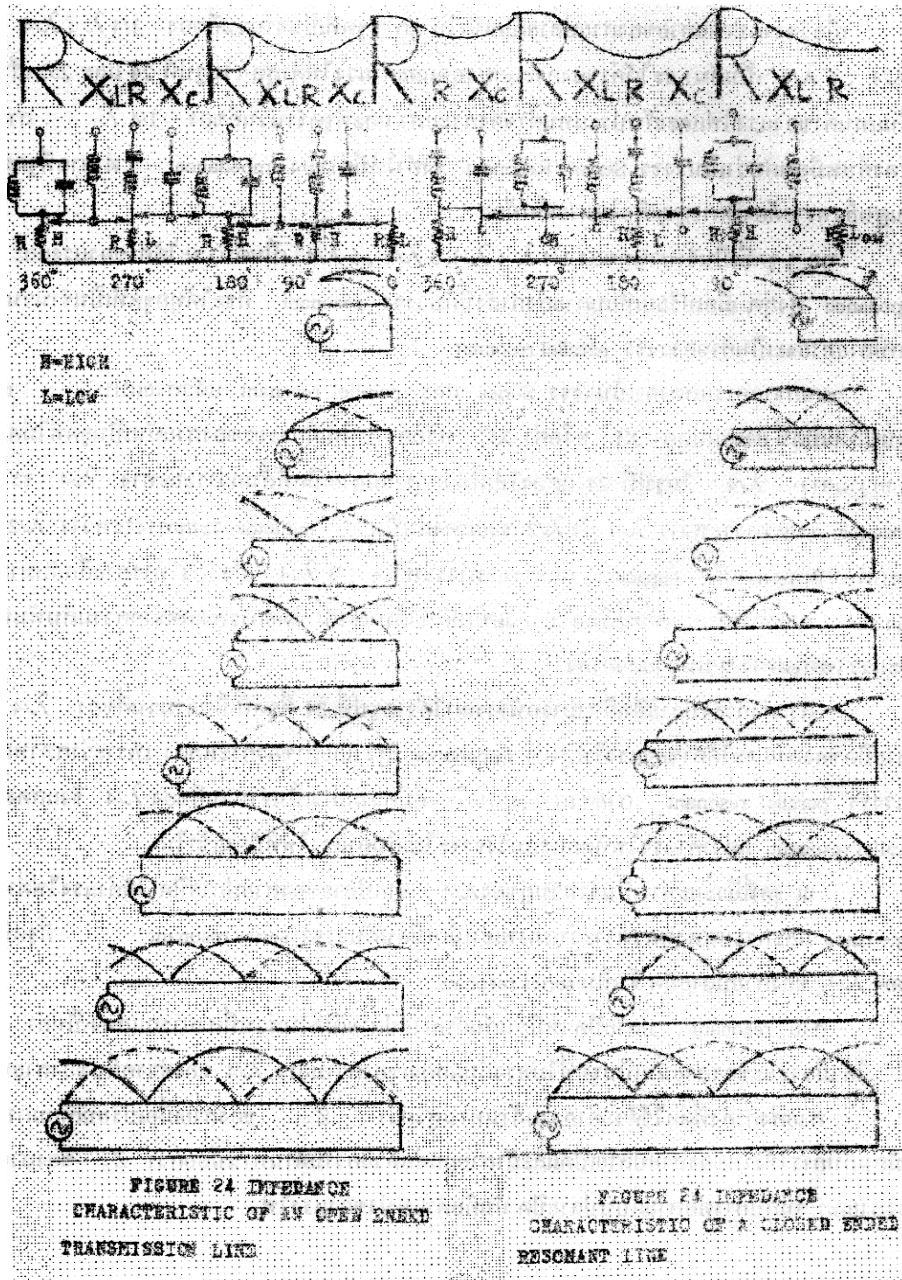
เมื่อ  $\lambda$  คือระยะทางเป็นเมตรจากจุดยอดของคลื่นลูกหนึ่งไปยังยอดของลูกคลื่นถัดไป  $f$  เป็นความถี่ที่มีหน่วยเป็นไซเคิลต่อวินาที และ 300,000,000 m/s คือความเร็วของคลื่นวิทยุ จะต้องจำไว้ว่า คลื่นเดินทางไปในสายได้ช้ากว่าการเดินทางผ่านอากาศ เมื่อจะคำนวณความเร็วคลื่นในสายตัวนำจึงต้องนำค่า  $k$  ซึ่งเป็นค่าคงที่มาใช้คำนวณด้วย  $k$  คือ Constant Factor จะมีค่า 0.975 สำหรับสายคู่ขนาน (Parallel Line) และมีค่า 0.85 เมื่อใช้กับ Coaxial สายแบบ Resonant Line เปรียบเสมือนกับวงจร Tune ทั่ว ๆ ไป มันจะ Resonant เฉพาะความถี่เดียว สายนี้แสดงเป็นค่าความต้านทานสูงหรือต่ำต่อแหล่งจ่าย (Source) ที่จุดที่เป็นผลคูณของ  $\lambda/4$  และยังขึ้นอยู่กับชนิดของการต่อสายส่งกำลังที่ปลายสาย

ที่จุดที่ไม่ได้เป็นผลคูณของ  $\lambda/4$  สายอาจจะแสดงค่าเป็น Capacitor หรือ Inductor ก็ได้เหตุผลอันนี้จะได้อธิบายต่อไป

สาย Resonant Line เปรียบเหมือนวงจร Resonant ซึ่งประกอบด้วย Capacitor และ Inductor ความสำคัญอย่างยิ่งของสาย Resonant Line ก็คือจะเป็นวงจร Resonant ธรรมดาเกิดขึ้นในสายได้ Series Resonant ผลที่ได้คือ ค่าความต้านทานรวมของวงจรต่ำ ทำให้มีกระแสสูง ในวงจรอนุกรมนี้ Parallel Resonant ผลที่ได้คือ ค่าความต้านทานรวมของวงจรสูงทำให้มีกระแสต่ำ ในวงจรขนานนี้

เราอาจจะทำความเข้าใจสาย Resonant Line แบบปลายเปิดได้ดีขึ้น โดยการพิจารณาถึงค่าของกระแส แรงไฟ และความต้านทานที่เกิดขึ้น สายส่งกำลังในภาพที่ ๓-๒๔ และเรื่องของสายส่งกำลัง ที่จะกล่าวต่อไป จะสมมุติว่าไม่มีการสูญเสียกำลังงาน เพราะถ้ามีการสูญเสียเกิดขึ้น จุดที่แสดงว่าแรงไฟหรือกระแสต่ำสุดมันจะไม่เป็นศูนย์จากภาพที่ ๓-๒๔ จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงไฟ กระแสและความต้านทานในระยะต่าง ๆ ของสายแบบปลายเปิด

ค่าความต้านทาน (Impedance) ของสายที่มองจาก Generator ที่จุดต่าง ๆ จากปลายสายเข้ามาได้แสดงไว้เหนือ Impedance Curve ส่วนโค้งที่แสดงไว้เหนือ  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$  ซึ่งมีความสูงต่างกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงความต้านทานของสายที่มีต่อ Generator ในระยะทางต่าง ๆ ตัวอักษรที่เขียนไว้ นั้น จะแสดงถึง Impedance ที่เกิดขึ้นมา โดยสัมพันธ์กับสัญลักษณ์ของวงจร ที่อยู่เหนือสายส่งกำลัง หมายถึงวงจรเปรียบเทียบทางไฟฟ้าของสายส่งกำลัง ที่ความยาวที่กำหนดไว้ ส่วนอัตราส่วนของ  $E$  กับ  $I$  ที่ทำให้เกิด  $Z$  ( $Z=E/I$ ) แสดงไว้เหนือสายส่งกำลังตามระยะ



ภาพที่ ๓-๒๔ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงไฟ กระแสและความต้านทานในระยยะต่าง ๆ ของสายแบบปลายเปิด

เมื่อวัดจากปลายสายของสายปลายเปิดเข้าไปทุกๆจุดที่เป็นจำนวนคี่ของ  $\lambda/4$  เช่น  $\lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$  เป็นต้น จะได้ค่าของกระแสสูงสุดและค่าแรงไฟต่ำสุด ตามภาพที่ ๓-๒๔ เส้นทึบของรูปคลื่นแทนค่าของแรงไฟและเส้นประแทนค่าของกระแส ที่จุดจำนวนคี่ของ  $\lambda/4$  สายส่งกำลังจะแสดงค่าเหมือนกับว่าเป็นวงจร Series Resonant จึงทำให้มีค่าของ Impedance ต่ำมากที่จุดนั้น แต่จะไม่ใช่เป็นศูนย์เพราะว่าต้องมีการสูญเสียในสายเล็กน้อย

ทุกๆ จุดที่เป็นจำนวนคู่ของ  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda$  เป็นต้น จะได้ค่าของแรงไฟและ Impedance สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสายส่งกำลังนี้กับวงจร Resonant ก็จะได้ทุกจุดที่เป็นจำนวนคู่ของ  $\lambda/4$  จากปลายสายจะเป็นค่าของวงจร Parallel Resonant

นอกจากการแสดงค่าเป็นวงจร Series และ Parallel Resonant แล้วสายแบบ Resonant Line ชนิดปลายเปิดนี้ ยังแสดงค่า  $X_L$  หรือ  $X_C$  ได้ เมื่อระยะของสายนั้นเป็นจุดที่ไม่ตรงกับผลคูณของความยาว  $\lambda/4$  ในภาพที่ ๓-๒๔ แสดงให้เห็นว่าสายปลายเปิดที่สั้นกว่าระยะทาง  $\lambda/4$  จะแสดงค่าเป็น Capacitor ระยะทางระหว่าง  $\lambda/4$  ถึง  $\lambda/2$  จะแสดงค่าเป็น Inductor ระยะทางระหว่าง  $\lambda/2 - 3\lambda/4$  ก็จะมาแสดงค่าเป็น Capacitor และระยะทางระหว่าง  $3\lambda/4 - 1\lambda$  ทางสายก็กลับมาแสดงค่าเป็น Inductor และจะเป็นเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป คุณสมบัติที่ได้มานี้ โดยการสังเกตจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงไฟที่จุดต่าง ๆ บนสายส่งกำลัง

สายส่งกำลังชนิดปลายปิด ก็สามารถพิจารณาได้จากภาพที่ ๓-๒๔ โดยจุดที่เป็นจำนวนคู่ของ  $\lambda/4$  จากปลายปิดของสายจะได้ค่าของแรงไฟสูงค่า Impedance สูง และค่าของกระแสต่ำ เพราะว่าสภาพเช่นนี้เหมือนกับวงจร Parallel Resonant สายส่งกำลังปลายปิดที่มีความยาวเป็นจำนวนคู่ของ  $\lambda/4$  จึงแสดงตัวเป็นวงจร Parallel Resonant แต่ว่าค่าแรงไฟที่ตกคร่อมวงจรจะไม่เกินค่าแรงไฟที่ป้อนเข้าไป

ณ จุดที่มีระยะห่างเป็นจำนวนคู่ของ  $\lambda/4$  จากปลายของสายปลายปิด ได้ค่าแรงไฟและ Impedance ต่ำสุด และมีกระแสสูงสุด สภาพเช่นนี้เหมือนกับวงจร Series Resonant จุดที่เป็นจำนวนคู่ของ  $\lambda/4$  ของสายชนิดปลายปิดจึงเป็น Series Resonant สาย Resonant ปลายปิดเหมือนกันกับสายปลายเปิดในส่วนที่สามารถแสดงเป็นค่า  $X_L$  หรือ  $X_C$  ได้ เมื่อระยะของสายนั้นเป็นจุดที่ไม่ตรงกับผลคูณของความยาว  $\lambda/4$  ของช่วงคลื่นของสายนั้น

สายส่งกำลังที่ต่อไว้ด้วยความต้านทานสูงกว่า  $Z_0$  ของสายเมื่อเปรียบเทียบการทำงานแล้วเหมือนกับการใช้งานของสายปลายเปิด และถ้าถูกต่อด้วยความต้านทานน้อยกว่า  $Z_0$  ของสายการใช้งานของสายเหมือนกับการต่อสายแบบปลายปิด นั่นคือตำแหน่งของแรงไฟและกระแสจะสูงหรือต่ำจะเป็นไปเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามแรงไฟและกระแสของ Standing Wave นี้เป็นค่า Peak นั้นจะไม่เป็นสองเท่าของ Incident Wave ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่นำมาต่อกับสาย เช่น ค่าความต้านทานที่นำมาต่อกับสายมีค่ามากกว่า  $Z_0$  หมายถึงความต้านทานที่น้อยกว่าทำให้เกิด Standing Wave ที่มีค่า Peak to Peak ลดลง หรือค่าความต้านทานที่นำมาต่อกับสายมีค่าความต้านทานน้อยกว่า  $Z_0$  หมายถึงความต้านทานที่มากกว่าทำให้เกิด Standing Wave ที่มี Peak-to-Peak ลดลง จากการต่อปลายสายด้วยความต้านทานดังกล่าวนี้ การเปลี่ยนแปลงของ Impedance ก็จะไม่สูงเท่ากับการต่อแบบปลายเปิดหรือปลายปิด ถ้าต่อความต้านทานมากกว่า  $Z_0$  ค่าของ Impedance จะอยู่ในย่านที่เริ่มจาก ค่าสูงที่สุดคือ ค่าความต้านทานที่นำมาต่อไว้เรียกว่า  $Z_{max}$  แล้วจะลดลงไปถึงค่าต่ำสุด(ไม่ถึงศูนย์)เรียกว่า  $Z_{min}$  แต่ถ้าสายส่งกำลังต่อไว้ด้วยความต้านทานน้อยกว่า  $Z_0$  ค่าของ Impedance จะอยู่ในย่านที่เริ่มจากค่าต่ำสุดซึ่งเท่ากับ ความต้านทานที่นำมาต่อ เรียกว่า  $Z_{min}$  แล้วจะเพิ่มขึ้นไปจนค่าสูงสุด (แต่ไม่ใช่ค่า Infinity) เรียกว่า  $Z_{max}$

### ๒.๑๑ Standing Wave Ratio

อัตราส่วนของ  $E_{MAX}$  (Voltage) ต่อ  $E_{MIN}$  (Voltage) ในสายแบบ Resonant เรียกว่า Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) (Power is Reflected) ณ จุดใด ๆ บนสายส่ง กำลังที่  $E_i$  กับ  $E_r$  อินเฟสกัน ทำให้ค่า  $E_{MAX}$  มีค่ามาก แต่ถ้าต่างเฟสกัน ค่า  $E_{MIN}$  ก็จะน้อย ถ้าค่า VSWR มีค่าสูงจะแสดงให้เห็นว่า เกิดการไม่สมดุล (Mismatch) ทาง Impedance เป็นอย่างมาก ค่า VSWR สามารถเปลี่ยนแปลงไปจากหนึ่ง (Unity) เมื่อไม่มีการสะท้อนกลับ(Reflected) ไปจนถึงค่าสูงสุด (Infinity) เมื่อพลังงานทั้งหมดถูกสะท้อนกลับค่าของ  $R_L$  ของ  $Z_0$  จึงเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงการ Mismatch ส่วนสูตร ที่ใช้ในการหา VSWR คือ

$$VSWR = \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

เราสามารถใช้กระแส SWR แทนแรงไฟ SWR ได้ ถ้าสามารถรู้หรือกำหนดค่า  $I_{min}$  และ  $I_{max}$  ได้โดยปกติเราจะใช้ magnetic pickup loop เป็นตัววัดค่า  $I_{min}$  และ  $I_{max}$  แล้วใช้สูตร

$$\text{Current SWR} = \frac{I_{max}}{I_{min}}$$

เมื่อเลือกใช้สายส่งกำลังที่มีความยาวตามที่กำหนดให้ก็สามารถทำงานเป็นค่า Inductance, Capacitance หรือ Resistance ถ้าความถี่ที่ป้อนให้กับสายส่งกำลังเปลี่ยนไป คุณสมบัติของสายส่งกำลังก็จะเปลี่ยนไปด้วยเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ความยาวคลื่นสั้นลง ซึ่งหมายความว่าความยาวของสายต่อความถี่ใหม่ยาวกว่าหนึ่งช่วงคลื่น

The Reflected Coefficient (P) เป็นอัตราส่วนของ E Reflected ต่อ E Incident หรือของ I Reflected ต่อ I Incident เพื่อที่จะกำหนดได้ถูกต้องว่าค่าของ Incident ถูกสะท้อนกลับ (Reflected) มีจำนวนเท่าใด สูตรที่นิยมใช้ในการกำหนดค่าของ Reflected Coefficient คือ

$$P = \frac{SWR^{-1}}{SWR^{+1}} \quad P = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$$

ตัวแปร ของ Standing wave

$E_{MAX}$  = Maximum Amplitude of Voltage of The Standing Wave

$E_{MIN}$  = Minimum Amplitude of Voltage of The Standing Wave

$I_{MAX}$  = Maximum Amplitude of Current of The Standing Wave

$I_{MIN}$  = Minimum Amplitude of Current of The Standing Wave

$Z_{MAX}$  = Maximum Impedance

$Z_{MIN}$  = Minimum Impedance

$E_i$  = Incident Voltage

$E_r$  = Reflected voltage

$Z_0$  = Characteristic Impedance of A Transmission Line

$I_i$  = Incident Current

$I_r$  = Reflected Current

$R_L$  = Load Resistance

$R_g$  = Generator Resistance

SWR = Standing wave Ratio

$\rho$  = Reflected Coefficient

$E_{oc}$  = Open Circuit Voltage

$E_i = \frac{(E_{oc} + Z_o)}{(R_g + Z_o)}$

$\rho = \frac{(SWR - 1)}{(SWR + 1)}$

$E_r = \rho \times E_i$

$I = E_i$

$I_r = \rho \times I_i$

$E_{max} = E_i \times E_r$

$E_{min} = E_i - E_r$

$Z_{max} = E_{max}/I_{min}$

$Z_{min} = E_{min}/I_{max}$

$I_{max} = I_i + I_r$

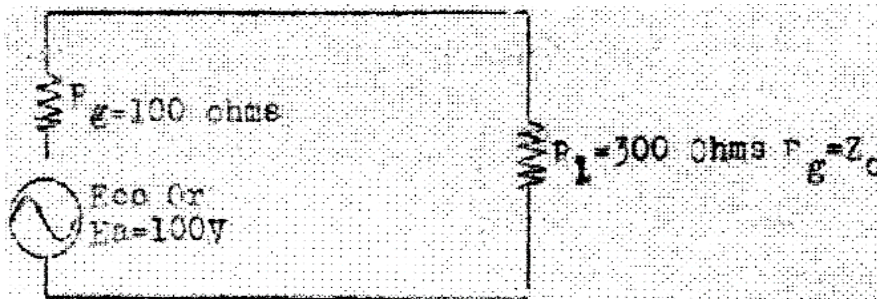
$I_{min} = I_i - I_r$

$SWR = R_L/Z_o$  or  $Z_o/R_L$  (Large number is place in numerator)

$Z_o = E_i$

$SWR = E_{max}/E_{min}$

$SWR = I_{max}/I_{min}$



ภาพที่ ๓-๒๕ Schematic For Problem



ตามภาพที่ ๓-๒๕ เป็นตัวอย่างการต่อสายส่งกำลังซึ่ง RL ไม่เท่ากับ  $Z_0$  จึงทำให้เกิด Standing Wave และ SWR ซึ่งจะหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

วิธีทำ

$$E_i = E_{oc} \times Z_0 / R_g + Z_0 = (100 \times 100) / (100 + 100) \\ = 10,000/200 = 50 \text{ V}$$

$$SWR = R_L / Z_0 = 300/100 = 3$$

$$P = \frac{SWR-1}{SWR+1} = \frac{3-1}{3+1} \\ = \frac{2}{4} = 0.5$$

$$I_i = E_i / Z_0 = 50 / 100 = 0.5 \text{ A}$$

$$R_E = P \times E_i = 0.5 \times 50 = 25 \text{ V}$$

$$I_r = P \times I_i = 0.5 \times 0.5 = 0.25 \text{ A}$$

$$E_{max} = E_i + E_r = 50 + 25 = 75 \text{ V}$$

$$E_{min} = E_i - E_r = 50 - 25 = 25 \text{ V}$$

$$I_{max} = I_i + I_r = 0.5 + 0.25 = 0.75 \text{ A}$$

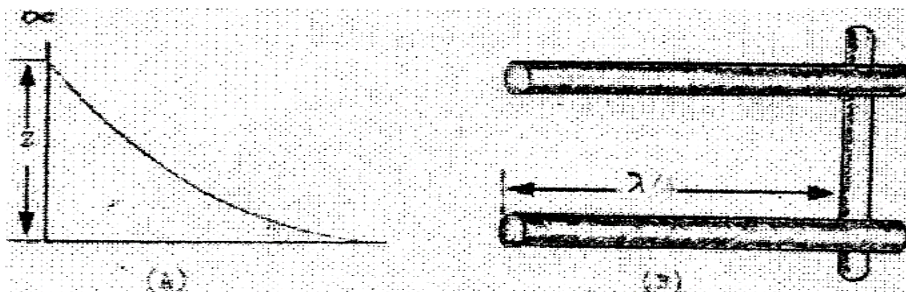
$$I_{min} = I_i - I_r = 0.5 - 0.25 = 0.25 \text{ A}$$

$$Z_{max} = E_{max} / I_{min} = 75 \text{ V} / 0.25 \text{ A} = 300 \Omega$$

(  $Z_{max}$  เท่ากับค่าของ  $R_L$  ที่นำมาต่อ )

$$Z_{min} = E_{min} / I_{max} = 25 \text{ V} / 0.75 \text{ A} = 33.3 \Omega$$

Uses for Transmission Line เพราะว่าสายส่งกำลังแบบ Resonant มีค่าความต้านทานแตกต่างกันอยู่ตลอดสายจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานในเรื่องของ Impedance Matching ดังแสดงตามภาพที่ ๓-๒๖



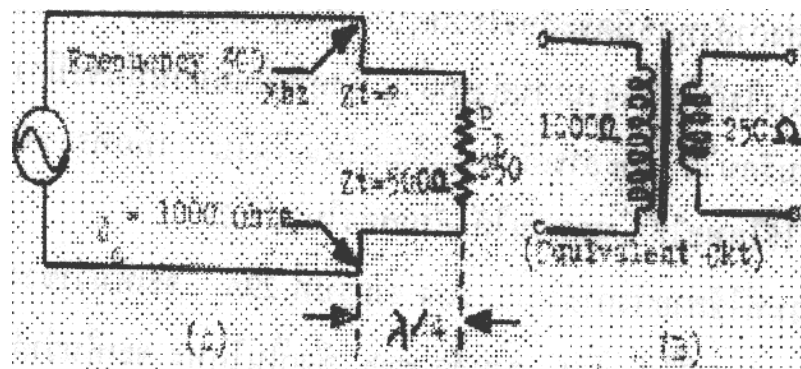
ภาพที่ ๓-๒๖ Impedance Along Quarter Wave Line

ตามภาพที่ ๓-๒๖ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ Impedance ตลอดความยาวของสาย  $\lambda/4$  ตรงปลายที่ Short กันไว้จะได้ค่าของกระแสสูง แรงไฟและความต้านทานต่ำ

เมื่อมีระยะทางกลับเข้า  $\lambda/4$  จากปลายที่ Short ไว้ จะได้ค่ากระแสต่ำ ส่วนค่าแรงไฟและความต้านทานสูง อาศัยคุณสมบัติของความยาว  $\lambda/4$  ของสายนี้ จึงสามารถทำการ Match กับค่าของ Impedance หรือ Resistance โดยทั่วๆ ไปได้

### ๒.๑๒ Matching Transformer

ความยาวช่วงหนึ่งของสายส่งกำลัง สามารถใช้ในการ Match กับ  $Z_0$  ของสายส่งกำลังที่ใช้เป็น Load สายที่มีความยาว  $\lambda/4$  สามารถใช้เป็น Step-Up หรือ Step-Down Transformer ที่ใช้ในวงจรความต่ำ โดยทั่วไปได้



ภาพที่ ๓-๒๗ Quarter Wave Matching Transformer

ตามภาพที่ ๓-๒๗ เป็นการ Matching ระหว่างสายกับ Load ในภาพ A ส่วน B เป็นภาพที่ทำให้ดูง่ายขึ้น ในวงจรค่า  $Z_0$  ของสายคือ 1,000  $\Omega$  ส่วน Load  $R_L$  มีค่า 250  $\Omega$  ปัญหาคือต้องการให้ค่าของ Characteristic Impedance ของสายอีกเส้นหนึ่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  เพื่อให้ต่อระหว่างสายกับ Load แล้วเกิดการ Matching กัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Z_t &= \sqrt{Z_0 \times R_L} \\ &= \sqrt{1000 \times 250} \\ &= 500 \Omega \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นสายที่จะนำมาต่อ จะต้องมี  $Z_0$  ที่ 500  $\Omega$  เพื่อที่จะได้ Match กันระหว่างสายที่มี  $Z_0$  ที่ 1,000  $\Omega$  กับ  $R_L$  250  $\Omega$  อีกขั้นตอนหนึ่งที่น่าจะสำคัญมาก นั่นคือความยาวของสายที่จะนำมาต่อด้วย ต้องมีความยาวเป็น  $\lambda/4$  ฉะนั้น เราจึงต้องหาค่าความยาวของสายที่มี  $Z_0$  ที่ 500  $\Omega$  เมื่อใช้ความถี่ 300  $\Omega$  โดยใช้สูตร

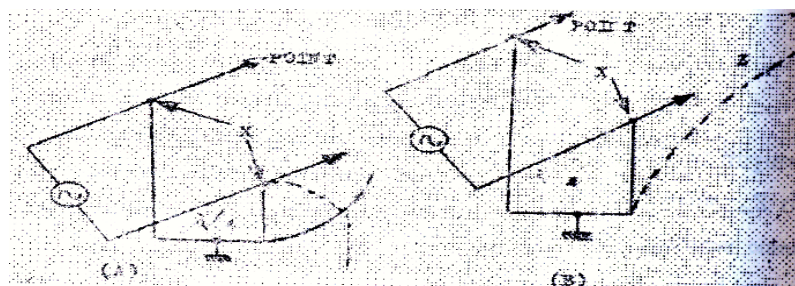
$$\begin{aligned} (\text{Meter}) &= 300 / F(\text{MHz}) \\ &= 300 / 300 \\ &= 1 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$\lambda/4 = 1/4 = 25 \text{ cm.}$$

การ Matching แบบนี้จะต้องใช้สายส่งกำลังที่มีค่า  $Z_0 = 500 \Omega$  (คือ  $Z_t$  ที่นำมาต่อ) และมีความยาว 25 cm. การทำให้ Match เช่นนี้ก็เหมือนกับการทำงานของ Step-Down Transformer คือ Primary 1,000  $\Omega$  กับ Secondary 250  $\Omega$

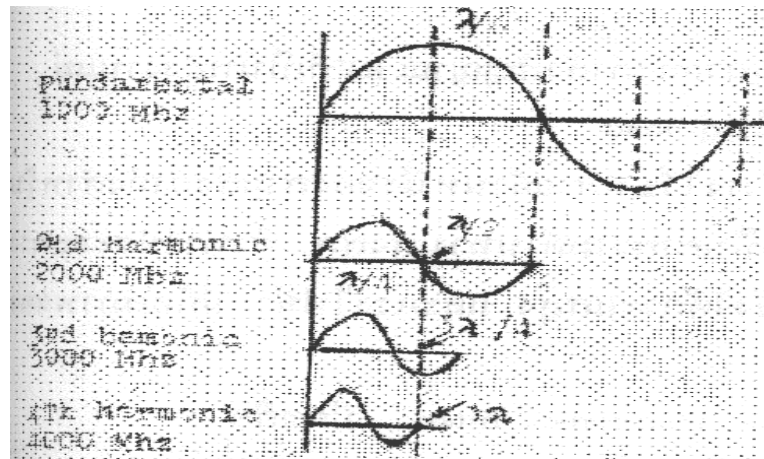
### ๒.๑๓ Metallic Insulator

สายส่งกำลังทุกชนิดจะต้องใช้วัสดุบางชนิดเป็นโครงยึดไว้ส่วนใหญ่ และต้องใช้ อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ในย่านความถี่วิทยุ วัสดุที่เป็นฉนวนนั้น จะมีการ สูญเสียกำลังงานอย่างมาก เนื่องจากมีการสะสมความร้อนไว้และอาจเสียหายได้เมื่อร้อนเกินไป การแก้ปัญหาการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้ สามารถใช้โลหะเป็นฉนวนแทน ตามภาพที่ ๓-๒๘ ฉนวน ที่ใช้สายส่งกำลังยาว  $\lambda/4$  ตามภาพที่ ๓-๒๘ A จะเห็นว่าช่วงความยาว  $\lambda/4$  นั้นต่ออยู่กับสายส่งกำลังที่ จุด X ตามตัว Stub ซึ่งเป็นโลหะจะเห็นได้ว่าตัว Stub ถูกต่อเข้าด้วยกัน จึงทำให้มีค่าความต้านทาน ต่ำสุดและมีกระแสสูงสุด เพราะฉะนั้นที่จุด X จะมีค่า Impedance สูงสุด แรงไฟสูงสุดและกระแส ต่ำสุด พลังงานสัญญาณ RF ที่มาตามสายเมื่อพบกับจุด Impedance สูงสุดนี้ (ตามภาพที่ ๓-๒๘ B) ก็จะไปเคลื่อนต่อไปตามสายส่งกำลังแทนที่จะลัดวงจรลงสู่ Ground ข้อเสียในการใช้โลหะทำเป็นฉนวน แบบนี้คือ ค่าความต้านทานของช่วง  $\lambda/4$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไป ฉะนั้น เครื่องส่งไม่สามารถ Tune ใช้ได้ตลอดย่านความถี่



ภาพที่ ๓-๒๘ Metallic Insulators

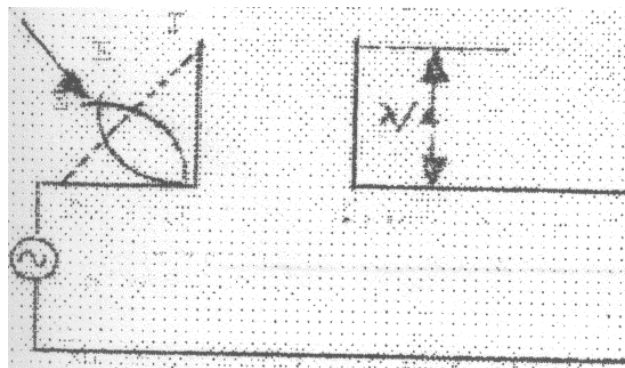
สามารถใช้ฉนวนโลหะ (Metallic Insulator) เป็นชุด Harmonics Filter โดยทำการ Filter ที่ Harmonic คู่ เพราะว่าความยาว  $\lambda/4$  เหมาะกับการใช้งานกับความถี่หนึ่ง โดยเฉพาะเท่านั้น ถ้าความยาวของสายเท่าเดิมเมื่อได้รับ Harmonic ที่ ๒ หรือจำนวน Harmonic คู่ มันจะกลายเป็น Short แทนที่ ตามภาพที่ ๓-๒๘ แสดงให้เห็นถึงความถี่หลัก (Fundamental Freq.) 1,000 MHz. และ Harmonic ที่ ๒, ๓ และ ๔ จุดความต้านทานสูงของความถี่หลัก จะไม่ยอมให้พลังงาน ลงไปทาง Stub ซึ่งยาว  $\lambda/4$  อย่างไรก็ตาม Stub นี้จะกลายเป็น  $\lambda/2$  ต่อ Harmonic ที่ ๒ (2,000 MHz.)



ภาพที่ ๓-๒๙ Harmonic

ทำให้จุดต่อตามภาพที่ ๓-๒๙ มีสภาพเช่นเดียวกับปลายสายของมันเป็น Stub ดังนั้น Harmonic ที่ ๒ (2,000 MHz.) จะผ่านไปทาง Insulator ลง Ground เมื่อเป็น Harmonic ที่ ๓ (3,000 MHz.) ระยะของสายที่เดิมยาว  $\lambda/4$  ก็จะกลายเป็นยาว  $3\lambda/4$  ทำให้เกิดความต้านทานสูง และให้พลังงานของ Harmonic ผ่านไปตามสายส่งกำลัง สำหรับ Harmonic คู่อันดับต่อไป 4,000 MHz. เดิมของ Stub คือ  $\lambda/4$  จะกลายเป็นความยาว  $1\lambda$  เมื่อเป็นเช่นนี้ ก็จะทำให้เกิดความต้านทานต่อพลังงานของ Harmonic คู่ จึงลง Ground ฉะนั้นที่ Harmonic คู่สัญญาณจะถูกทำให้ Short หรือ ตัดออกไป Harmonic ส่วนที่จะผ่านไปตามสายส่งกำลังชุด Filter นี้ ไม่สามารถที่จะตัด Harmonic คี้ออกไป เพราะถ้าหากมันตัด Harmonic คี้ออกไป มันจะตัดความถี่หลัก (Fundamental Freq.) ออกไปด้วย

การ Filter แบบนี้ ก็ยังมีข้อเสียอยู่เช่นกัน เพราะชุด Filter จะเป็นความยาว  $\lambda/4$  ของความถี่หลักที่กำหนดให้ เครื่องส่งจึงไม่สามารถ Tune ได้ตลอดความกว้างของย่านความถี่ การ Filter สัญญาณ Harmonic คู่แบบอื่นทำหน้าที่เช่นเดียวกันกับชุด Metallic Insulator ได้ตามภาพที่ ๓-๓๐ ในเบื้องต้น Electron จะไม่สามารถผ่านช่องว่างที่เปิดไว้

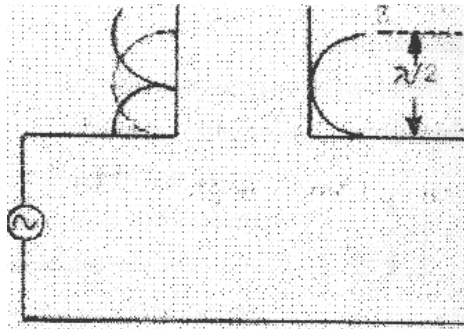


ภาพที่ ๓-๓๐ Series Even Harmonic Filter Generator ไปสู่ Load

ตามภาพที่ ๓-๓๐ Series Even Harmonic Filter Generator ไปสู่ Load เพราะเราไม่ได้พูดถึงเรื่อง Electron เคลื่อนที่ไปในตัวนำ แต่เป็นสายส่งกำลังสัญญาณ RF ที่เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Energy) จากชุด RF Generator ไปสู่ Load

ตามภาพที่ ๓-๓๐ แสดงให้เห็นถึงช่วงสายที่ยาว  $\lambda/4$  วางไว้บนสายด้านหนึ่งของสายส่งกำลังสำหรับความถี่ที่กำหนดไว้ ตรงด้านปลายเปิดของสายยาว  $\lambda/4$  เหมือนกับ Short อยู่บนสาย จึงได้กระแสสูง และแรงไฟฟ้า นี่คือสภาพของความต้านทาน สัญญาณ RF จึงเคลื่อนไปตามสาย

ตามภาพที่ ๓-๓๐ เพื่อจะให้เห็นผลของชุด Series Harmonics Filter มีผลต่อ Fundamental Frequency อย่างไร เมื่อเกิด Harmonic ที่ ๒ ต่อสายซึ่งยาว  $\lambda/4$  จะทำให้ความยาวของสายนั้น กลายเป็น  $\lambda/2$  ซึ่งแสดงตามภาพที่ ๓-๓๑ ที่จุดซึ่งสายยาว  $\lambda/2$  ต่ออยู่จะเป็นจุดที่มีความต้านทานสูงที่สุด จุดนี้จึงกั้นหรือต้าน Harmonic ที่ ๒ ไม่ให้ผ่านไปตามทางสาย เมื่อ Harmonic ที่ ๓ มาพบความยาวของช่วงสายเดิม ซึ่งมีความยาว  $\lambda/4$  ก็จะกลายเป็นความยาว  $3\lambda/4$  ในครั้งนี้ความต้านทานบนจุดต่อของสายจะมีค่าต่ำ ทำให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่น พบกับสภาพ Short ตรงที่ว่างพลังงานจึงสามารถเคลื่อนไปตามสายส่งกำลังได้



ภาพที่ ๓-๓๑ Second Harmonic Frequency

การ Filter แบบนี้ก็ไม่สามารถที่จะใช้ตัดหรือกำจัดสัญญาณ Harmonic ด้ ออกไปได้ เพราะถ้ามันสามารถต้าน Harmonic ด้ได้ มันก็จะสามารถต้าน Fundamental Frequency ด้ด้วย ข้อเสียของ Filter แบบนี้คือสามารถใช้ได้กับความถี่ที่กำหนดไว้เท่านั้น เพราะการ ตัดสายเพื่อให้เกิดการ Filter นั้นตัดไว้ที่ความยาว  $\lambda/4$  ของความถี่เป็นหลักที่จะใช้งาน

## บรรณานุกรม

S. P. Applebaum. 'Adaptive arrays', IEEE trans. Antennas and Propagation , vol. 24, no. 5, pp. 585-598, Sep. 1976.

อาจารย์ ฐานันต์ โดษ. สายส่งและการแพร่กระจายคลื่น (Transmission lines and wave propagation). ขอนแก่น : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ๒๕๓๓.