



# ตำราวิชาเรดาร์

พ.ศ.๒๕๖๗

โดย

กองโรงงาน กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ

กองทัพอากาศ

ดอนเมือง

กรุงเทพมหานคร

## คำนำ

ตำราวิชาเรดาร์ เรียบเรียงขึ้นเพื่อใช้เป็นตำราในการสอบคัดเลือกนายทหารสัญญาบัตร เหล่าทหารสื่อสาร จำพวกทหารสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์

เนื้อหาของตำราเล่มนี้ กล่าวถึงประวัติความเป็นมา หลักการพื้นฐานของระบบเรดาร์ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติงานของเครื่องเรดาร์ การผสมคลื่นเรดาร์ และเรดาร์แบบต่าง ๆ

หวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สอบคัดเลือกรวมถึงผู้สนใจทุกคนและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่มีส่วนในการจัดทำตำราเล่มนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ



# สารบัญ

หน้า

คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่ ๑ บทนำ	๑
๑.๑ กล่าวทั่วไป	๑
๑.๒ ประวัติความเป็นมา	๑
๑.๓ วิวัฒนาการเรดาร์ของ ทอ.ไทยในอดีต	๒
บทที่ ๒ ทฤษฎี และหลักการทํางาน	๓
๒.๑ หลักการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุ	๓
๒.๒ ระบบเรดาร์เบื้องต้น	๕
๒.๓ หลักการทํางานของเรดาร์	๕
๒.๔ Continuous Wave เรดาร์	๖
๒.๕ Pulse เรดาร์	๘
๒.๖ ประโยชน์และการใช้งานของเรดาร์	๑๑
๒.๗ ย่านความถี่เรดาร์	๑๓
๒.๘ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องเรดาร์	๑๔
บทที่ ๓ เรดาร์เบื้องต้นและการทํางานระบบ	๒๒
๓.๑ กล่าวทั่วไป	๒๒
๓.๒ Synchronizer (Timer)	๒๓
๓.๓ ชุดเครื่องส่งเรดาร์	๒๓
๓.๔ ชุดสายอากาศ	๒๙
๓.๕ ชุด Duplexer	๓๔
๓.๖ ชุดเครื่องรับเรดาร์	๓๔
๓.๗ จอเรดาร์	๓๗
๓.๘ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า	๔๑
๓.๙ ระบบเรดาร์พิสูจน์ฝ่าย IFF/SIF	๔๑
บรรณานุกรม	ช

## สารบัญตาราง

ตารางที่ ๒-๑ แสดง ความถี่ในย่านต่าง ๆ

หน้า

๑๓

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ ๑ Echo Ranging Principle	๔
รูปที่ ๒ หลักการทำงานของเรดาร์	๖
รูปที่ ๓ Frequency Spectrum Of A 1 $\mu$ Sec., 1,300 MHz. Pulse At 1,000 PPS.	๙
รูปที่ ๔ Pulse Compression Frequency Separation And Delay – Line Network	๑๐
รูปที่ ๕ Simplified Block Diagram Pulse Compression In PA-Type Transmitter	๑๑
รูปที่ ๖ Pulse Cycle Characteristics	๑๕
รูปที่ ๗ Cycle denotes Elements (Characteristics) Which Are Varied Effect Of Varying Pulse Characteristic	๑๕
รูปที่ ๘ Multiple Time Around Echo	๑๗
รูปที่ ๙ Range Resolution	๑๘
รูปที่ ๑๐ Pulse Characteristics	๑๘
รูปที่ ๑๑ Relative Response (Visibility Factor)	๒๐
รูปที่ ๑๒ First Blind Speed, Knots	๒๐
รูปที่ ๑๓ ส่วนประกอบหลักระบบเรดาร์เบื้องต้น	๒๒
รูปที่ ๑๔ แผนผังของระบบเรดาร์เบื้องต้น	๒๒
รูปที่ ๑๕ The Magnetron	๒๔
รูปที่ ๑๖ Rotating Space Charge In The Oscillating Magnetron	๒๕
รูปที่ ๑๗ Power Amplifier Klystron	๒๕
รูปที่ ๑๘ Klystron	๒๖
รูปที่ ๑๙ A Two Cavity Klystron	๒๖
รูปที่ ๒๐ Traveling Wave Tube	๒๘
รูปที่ ๒๑ Parabolic Antenna	๒๙
รูปที่ ๒๒ Linear Array	๓๐
รูปที่ ๒๓ Planar Array	๓๐
รูปที่ ๒๔ Beam Pattern	๓๒
รูปที่ ๒๕ Fan Beam Pattern ในเรดาร์ค้นหา และ เรดาร์วัดความสูง	๓๒
รูปที่ ๒๖ Basic Duplexing System	๓๓

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ ๒๗	Block Diagram RF A Normal Receiver	๓๔
รูปที่ ๒๘	Superheterodyne Receiver	๓๕
รูปที่ ๒๙	PPI Tube Circuit	๓๗
รูปที่ ๓๐	Electromagnetic And Electrostatic CRT	๓๘
รูปที่ ๓๑	Target As View On RADAR Indicator	๓๘
รูปที่ ๓๒	จอเรดาร์แบบต่างๆ	๓๙
รูปที่ ๓๓	แสดงถึงองค์ประกอบ ของ IFF/SIF	๔๒
รูปที่ ๓๔	ลักษณะของสัญญาณตามแต่ละ Mode	๔๓
รูปที่ ๓๕	ลักษณะของ Reply Pulse	๔๔
รูปที่ ๓๖	แสดงถึงการอ่านรหัส 1 4 7 4	๔๔
รูปที่ ๓๗	IP หรือ ID Mode	๔๕
รูปที่ ๓๘	รหัส Emergency ของแต่ละ Mode	๔๖
รูปที่ ๓๙	แสดงรหัส Radio Failure	๔๖
รูปที่ ๔๐	แสดงรหัส Hijack	๔๖
รูปที่ ๔๑	Antenna Pattern	๔๗
รูปที่ ๔๒	แสดงถึงผลกระทบของ Side Lobes ในเรดาร์ค้นหา	๔๗
รูปที่ ๔๓	แสดงถึงการเกิด Ring Around	๔๘
รูปที่ ๔๔	แสดงถึงวิธีการส่ง P1 P2 P3	๔๘
รูปที่ ๔๕	แสดง TPR	๔๘
รูปที่ ๔๖	การควบคุม ISLS	๔๙
รูปที่ ๔๗	Fruit	๔๙
รูปที่ ๔๘	Overlapping Codes	๕๐
รูปที่ ๔๙	Interleaved Code	๕๐
รูปที่ ๕๐	สาเหตุการเกิด Garble	๕๐

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และ/หรือคำย่อ	ความหมายและ/หรือคำเต็ม
RADAR	Radio Detection And Ranging
CW	Continuous Wave
ATC	Air traffic Control
GCA	Ground Control Approach
MTI	Moving Target Indicator
TWT	Traveling-Wave Tube
ACP	Azimuth Change Pulse
ARP	Azimuth Reference Pulse
STC	Sensitivity Time Control
AVNL	Automatic Video Noise Limiting
IAGC	Instantaneous Automatic Gain control
FTC	Fast Time Constant
AGC	Automatic Gain Control
SIF	Selective Identification Feature
IFF	Identification Friend or Foe
ISLS	Interrogation Side Lobes Suppression

# บทที่ ๑

## บทนำ

### ๑.๑ กล่าวทั่วไป

คำว่าเรดาร์ RADAR ย่อมาจากคำว่า Radio Detection And Ranging เป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้คลื่นวิทยุ ตรวจค้นหาตำแหน่งของเป้าหมาย โดยสามารถอ่านค่าระยะทาง, ทิศทาง ตลอดจนลักษณะของเป้าหมายนั้นๆ ได้ ตัวเครื่องส่งจะสร้างความถี่วิทยุแล้วป้อนเข้าสู่สายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศจะส่งพลังงานความถี่วิทยุออกไปเป็นลำคลื่น แล้วกวาดไปทั่วพื้นที่รัศมีทำการ คลื่นความถี่วิทยุนี้ เมื่อกระทบเป้าหมายจะสะท้อนคลื่นวิทยุกลับมาเข้าเครื่องรับที่มีความไวพิเศษ แม้ว่าคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับอ่อนกำลังลง แต่หลังจากถูกขยายกำลังให้สูงพอก็จะป้อนสัญญาณผ่านระบบต่างๆ แล้วปรากฏบนจอเรดาร์ได้

### ๑.๒ ประวัติความเป็นมา

เรดาร์ได้เริ่มพัฒนาใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ.๑๙๒๒ โดยมี ดร.เอลเบิร์ต เอช เทเลอร์ (Dr.Albart H.Taylor) และดร.ยัง (Dr.Young) สังกัดห้องทดลองของ ทร.สหรัฐอเมริกา ได้ทดลองจนประสบความสำเร็จ จากความคิดครั้งแรกที่สังเกตว่า เมื่อมีเรือแล่นผ่านวิถีทางที่ส่งคลื่นวิทยุออก จะมีสัญญาณบางส่วนสะท้อนคลื่นวิทยุกลับมาเข้าเครื่องรับจึงเป็นการเริ่มต้นค้นหาประโยชน์จากการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุดังกล่าวต่อไป

ปี ค.ศ.๑๙๔๑ ช่วงเวลาดังกล่าวเกิดสงครามโลกครั้งที่สอง อังกฤษต้องใช้เครื่องบินจำนวนมาก ขึ้นไปเตรียมพร้อมอยู่ในอากาศตลอดแนวชายฝั่ง เพื่อเตรียมการขัดขวางการโจมตี จากฝูงบินเยอรมัน ที่มุ่งเข้าทิ้งระเบิดมทานครลอนดอน แต่การนำเครื่องบินขึ้นไปเตรียมพร้อมบนอากาศตลอดเวลานั้น ทำให้อังกฤษประสบปัญหาขาดแคลนเชื้อเพลิง นักบินได้รับความเหนื่อยล้าเกิดความสึกหรอของ เครื่องบินโดยเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก อังกฤษจึงได้จัดระบบการป้องกันภัยทางอากาศใหม่ โดยตั้งสถานีเรดาร์เป็นระยะตลอดชายฝั่ง สถานีเรดาร์เหล่านี้ทราบการเคลื่อนไหวของเครื่องบินข้าศึก ที่เข้ามาแล้วจึงสั่งการไปยังเครื่องบินที่เตรียมพร้อมอยู่ที่พื้นดิน ขึ้นไปสกัดกั้นบนอากาศ วิธีการเช่นนี้ อังกฤษสามารถตรวจพบฝูงบินเยอรมันได้ตั้งแต่ระยะไกลๆ จึงมีเวลาทำลายเครื่องบินข้าศึกลงได้มากขึ้น และลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ลดความเหนื่อยล้าของนักบินและลดความสึกหรอของเครื่องบิน

ต่อมาหลังสงครามโลกครั้งที่สองได้มีการดัดแปลงแก้ไขให้เครื่องเรดาร์มีรัศมีทำการไกลขึ้น สามารถวัดได้ระยะสูงขึ้น จึงมีการสร้างเครื่องเรดาร์แบบใหม่ๆที่ได้แก้ไขจุดอ่อนของแบบเก่าออกมา ใช้งานอยู่ตลอดเวลา ความมุ่งหมายที่ต้องมีการดัดแปลงก็เพื่อ

๑. มีกำลังส่งสูง และได้รัศมีทำการไกลออกไป
๒. สามารถจับเป้าหมายได้แน่นอน
๓. มีความรวดเร็วที่จะได้สัญญาณป้อนแก่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ Data Automation สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
๔. มีความสะดวกในการใช้งาน และง่ายต่อการปรนนิบัติซ่อมบำรุง



๕. มีความแข็งแรง ทนทานต่อการเคลื่อนย้าย
๖. สามารถจัดการรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์ของข้าศึกได้ทุกชนิดทั้ง ECM และ ECCM

### ๑.๓ วิวัฒนาการเรดาร์ของ ทอ.ไทยในอดีต

ทอ.เริ่มนำเรดาร์มาใช้งานครั้งแรกประมาณปี พ.ศ. ๒๕๐๐ โดยติดตั้งที่ ลาดเป็ด จ.ปทุมธานี เป็นเรดาร์ค้นหาแบบ AN/TPS - 1D และเรดาร์วัดระยะสูงแบบ AN /TPS - 10D ซึ่งเป็นเรดาร์ขนาดเล็ก สะดวกในการขนส่งโยกย้าย ต่อมาจึงได้นำเรดาร์แบบดังกล่าวไปติดตั้งใช้งานในกิจการป้องกันภัยทางอากาศหลายแห่ง

เนื่องจากเรดาร์แบบ AN/TPS - 1D และ AN/TPS - 10D เป็นเรดาร์ขนาดเล็กและล่าสมัย ผู้สร้างได้เลิกสร้าง จึงมีปัญหาทางด้านชิ้นส่วนอะไหล่ ทอ.จึงเปลี่ยนเป็นเรดาร์ที่มีขนาดใหญ่ กำลังส่งสูง และทันสมัยขึ้น คือเรดาร์ค้นหาแบบ AN/FPS - 20A และเรดาร์วัดระยะสูงแบบ AN/FPS - 89 โดยได้รับการช่วยเหลือจากประเทศสหรัฐ

เพื่อให้เรดาร์มีประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานดียิ่งขึ้น ทอ.จึงได้ดัดแปลงเรดาร์ค้นหาแบบ AN/FPS - 20A ให้เป็นแบบ AN/FPS - 100A โดยเพิ่มชุด Palamatic Amplifier จึงทำให้มีความไวสูงในการรับ และทำให้การตรวจจับเป้าหมายดีกว่าเดิม นอกจากนี้เรดาร์ค้นหาขนาดใหญ่แบบ AN/100A แล้ว ก็ยังมีขนาดกลาง คือแบบ AN/FPS - 8 ซึ่งใช้ปฏิบัติงานตามสถานีรายงานและเรดาร์แบบเดียวกัน ต่อมาได้รับการดัดแปลงเพื่อให้สะดวกในการเคลื่อนย้ายโดยใช้ชื่อใหม่ว่า AN/MPS - 11 ต่อมา ทอ. ได้จัดซื้อเรดาร์เพิ่มเติมอีกหลายแบบเช่น

- เรดาร์ป้องกันภัยทางอากาศแบบ ๓ มิติ คือ แบบ MARTELLO 743D, แบบ AN / FPS - 130X, แบบ AN / TPS - 78, แบบ AN / TPS - 77 และแบบ RAT31-DL
- เรดาร์เคลื่อนที่ทางยุทธวิธี คือ แบบ GIRAFFE - 180
- เรดาร์ป้องกันฐานที่ตั้ง คือ แบบ GIRAFFE - 40
- เรดาร์ควบคุมการจราจรทางอากาศ คือ แบบ ASR
- เรดาร์ตรวจอากาศ คือ แบบ TVDR - 2500C, TVDR - 3501C และ DWSR - 3501C

## บทที่ ๒

### ทฤษฎีและหลักการทำงาน

#### ๒.๑ หลักการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุ

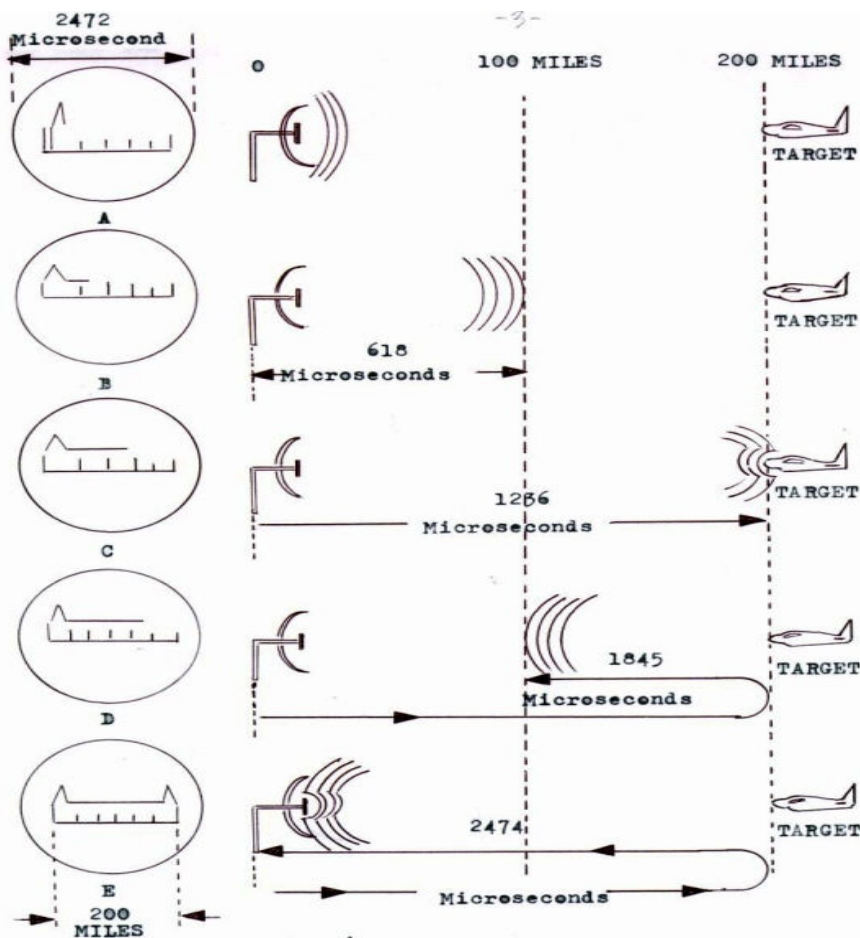
การสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุความถี่สูงมากๆ อาศัยหลักการทางวิทยาศาสตร์ ๓ ข้อ คือ

๑. ความถี่ของคลื่นไมโคร ระหว่าง 1,000 MHz. ถึง 6,000 MHz. สามารถสะท้อนผิวพื้นได้ เช่นเดียวกับการสะท้อนแสง

๒. บรรดาความถี่วิทยุที่ออกจากเครื่องส่งด้วยกำลังสูง สามารถบังคับให้พุ่งออกเป็นลำคลื่นเหมือนลำแสงไฟฉายได้ โดยอาศัยคุณสมบัติของสายอากาศแบบที่มีตัวสะท้อนรูปกึ่งกลม (Parabolic Reflector)

๓. เพราะว่าคลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วของแสง (๑๖๑,๗๕๐ ไมล์ทะเลต่อวินาที) เราจึงอาศัยความเร็วคงที่นี้ เป็นหลักในการคำนวณหาระยะทางของเป้าหมายได้

คลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วแสงคือ ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์บกต่อหนึ่งวินาที หรือเท่ากับ ๑๖๑,๗๕๐ ไมล์ทะเลต่อวินาที ฉะนั้นระยะทาง ๑ ไมล์ทะเลจะใช้เวลาเท่ากับ ๖.๑๘ ไมโครเซคกัน คลื่นพัลส์ของเรดาร์จากสายอากาศพุ่งสู่อากาศคราวใดที่กระทบเป้าหมายจะมีคลื่นพัลส์สะท้อนกลับ จึงหาระยะทางของเรดาร์ได้ โดยการวัดเวลาทั้งขาไปและขากลับรวมกัน ฉะนั้นระยะทาง หนึ่งเรดาร์ไมล์จึงเท่ากับ ๑๒.๓๖ ไมโครวินาทีซึ่งความหมายของหนึ่งเรดาร์ไมล์ คือระยะทาง ๑ ไมล์ทะเลขาไป และ ๑ ไมล์ทะเลขากลับด้วย

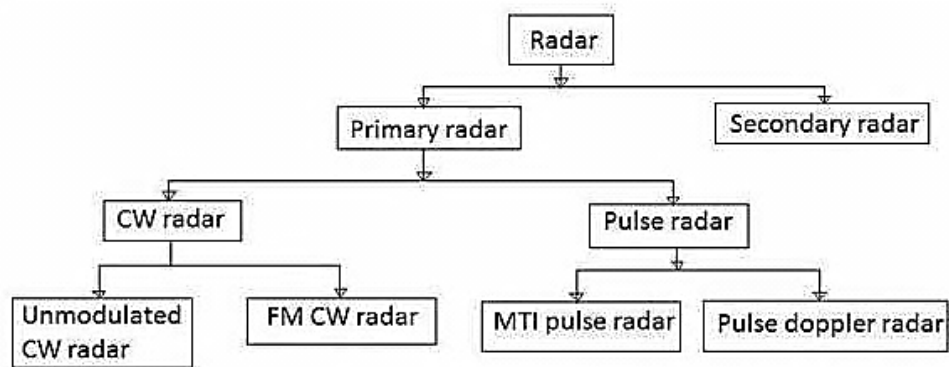


รูปที่ ๑ Echo Ranging Principle

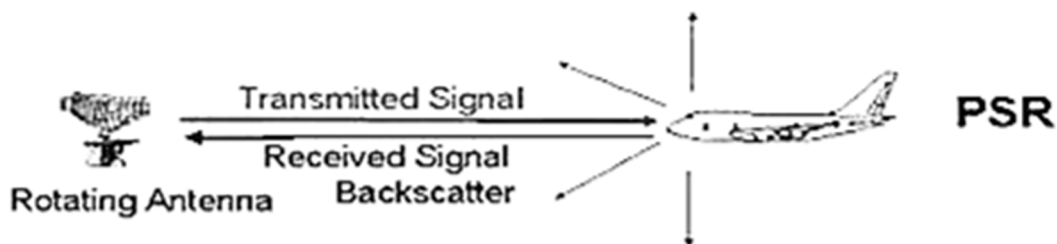
จากรูปที่ ๑ เริ่มจากภาพ A เมื่อส่งคลื่นพัลส์ออกไป ใช้เวลา 618  $\mu$ s. จะได้ระยะทาง ๑๐๐ ไมล์ ทะเลที่ภาพ B ซึ่งเท่ากับครึ่งทางไปสู่เป้าหมายที่หน้าจอ เส้นกวาดเคลื่อนที่ไปเศษ ๑ ส่วน ๔ ของระยะทางทั้งหมดในจอเรดาร์ ที่ภาพ C พัลส์เรดาร์กระทบเป้าหมายที่ห่าง ๒๐๐ ไมล์ใช้เวลา 1,236  $\mu$ s. ตอนนี้เส้นกวาดหน้าจอไปได้ครึ่งทางแล้ว ที่ภาพ D คลื่นสะท้อนกลับใช้เวลา 1,854  $\mu$ s. เส้นกวาดไปได้เศษ ๓ ส่วน ๔ ของหน้าจอ เมื่อคลื่นสะท้อนกลับเข้าสายอากาศรวมเวลาเป็น 2,474  $\mu$ s. เส้นกวาดหน้าจอจะสุดทางพอดี ที่ภาพ E แล้วก็เริ่มส่งพัลส์ลูกใหม่ออกไปอีก รูปดังกล่าวเป็นการอธิบายหลักการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุเท่านั้น

## ๒.๒ ระบบเรดาร์เบื้องต้น

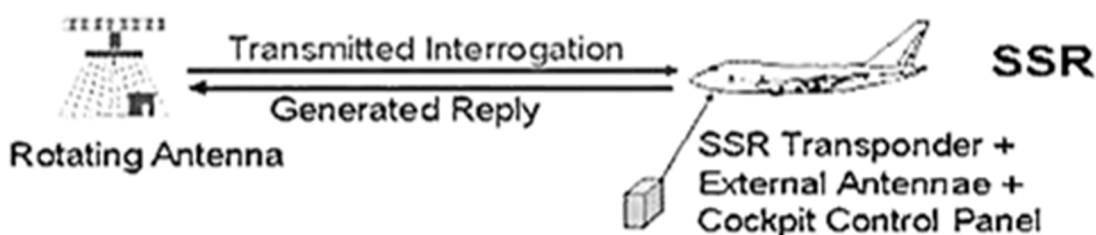
ระบบเรดาร์ แบ่งตามหลักการทำงานสามารถแบ่งได้ ๒ แบบ คือ



๒.๒.๑ Primary Surveillance Radar (PSR) เป็นเรดาร์ที่ส่งคลื่นไปกระทบแล้วสะท้อนกลับมา เช่น Pulse Radar, CW Radar, Pulse Compression

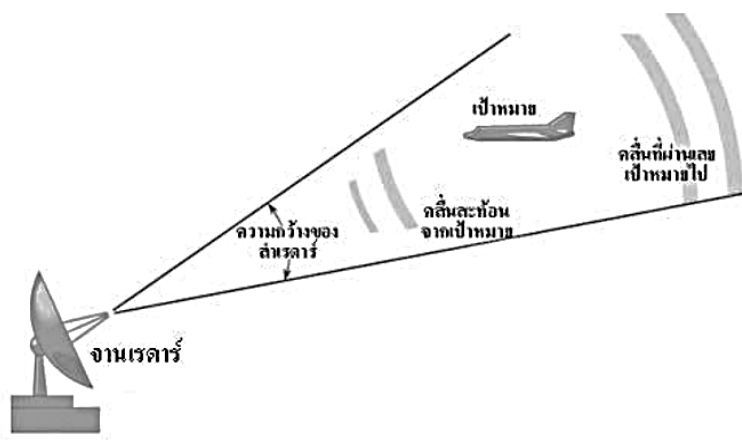


๒.๒.๒ Secondary Surveillance Radar (SSR) เป็นเรดาร์ที่ส่ง Code ไปถามแล้วตอบกลับมา



## ๒.๓ หลักการทำงานของเรดาร์

RADAR (Radio Detection And Ranging) ถ้าแปลตามความหมายของคำ หมายถึง สัญญาณความถี่วิทยุที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งที่อยู่ และระยะทางของเป้าหมาย หรือกล่าวได้ว่า เรดาร์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้คลื่นวิทยุตรวจค้นหาตำแหน่งของเป้าหมาย สามารถที่จะทราบถึง ทิศทาง, ระยะทาง, ความสูงและความเร็วของเป้าหมายที่ต้องการโดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุ

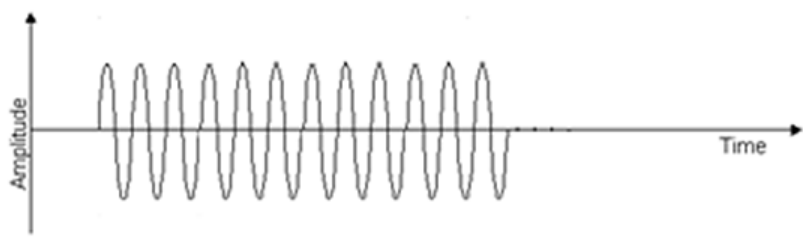


รูปที่ ๒ หลักการทำงานของเรดาร์

หลักการทำงานของ RADAR คือ เครื่องส่ง ส่งคลื่นวิทยุออกไปกระทบวัตถุใดๆ เช่น อากาศยาน เมฆ เรือ หรือภูเขา ส่วนหนึ่งของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องรับเรดาร์ เครื่องรับจะรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาขยาย แล้วส่งไปปรากฏบนจอเรดาร์ เพื่อดูเป้าหมาย ซึ่งการสะท้อนกลับนี้เรียกว่า Echo และวัตถุที่ก่อให้เกิดการสะท้อนเรียกว่า Target ถ้าวัตถุนั้นๆ เป็นเป้าหมายที่ต้องการตรวจหาเรียกสัญญาณนั้นว่า Target Signal แต่ถ้าสัญญาณนั้นเกิดจาก Target ที่ไม่ต้องการเรียกสัญญาณนั้นว่า Clutter Signal

### ๒.๔ CW เรดาร์ (Continuous Wave Radar)

เป็นระบบแรกที่มีมนุษย์ได้คิดค้นเรดาร์ขึ้นโดยอาศัยหลักการ Doppler Effect เรดาร์แบบ CW. มีการส่งคลื่นอย่างต่อเนื่องจึงไม่มีการสูญเสียกำลังงานในการออกอากาศ และไม่เกิด Blind Speed หรือความเร็วบอด เพราะไม่มี PRF เข้ามาเกี่ยวข้อง



หลักการของ Continuous Wave Modulation อาศัยทฤษฎีของ Doppler Effect โดยให้ช่วงสูงของคลื่นคงที่ แต่ความถี่แปรเปลี่ยนไปตามระยะทางระหว่างเครื่องส่ง และเป้าหมาย ตัวอย่างเช่น ถ้ายืนอยู่ที่ชานชาลาสถานีรถไฟเมื่อกำลังจะผ่านสถานี หูเราจะได้ยินเสียงหวูดรถไฟแหลมขึ้น หรือความถี่ที่ได้ยินสูงขึ้นเมื่อรถไฟแล่นผ่านสถานีไปแล้ว หูจะได้ยินเสียงหวูดรถไฟทุ้มลง หรือความถี่ที่ได้ยินต่ำลง

การวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ทำให้ระดับเสียงเปลี่ยนแปลงคืออะไร สมมุติเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงความถี่ 60 Hz. เดินทางด้วยความเร็ว ๓๖๐ ฟุต/วินาที เสียงเดินทางจากจุด T มาถึง T<sub>1</sub> ในเวลา ๑ วินาที ระยะทางทั้งหมดจาก T ถึง O คือ ผู้สังเกตการณ์ยาว ๑,๐๘๐ ฟุต แต่ความเร็วของเสียงเท่ากับ ๑,๐๘๐ ใน ๑ วินาที คือ เสียงวิ่งจาก T จะถึง O ใน เวลา ๑ วินาที หากความยาวคลื่นที่ส่งออกไป ( $\lambda$ ) เท่ากับความเร็วของเสียง (V) ทหารด้วย ความถี่ของสัญญาณ (f)

$$\text{สูตร} \quad \lambda = \frac{V}{f}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าความยาวคลื่น} &= \frac{1080}{60} \\ \lambda &= 18 \text{ ฟุต} \end{aligned}$$

แต่เราสมมุติว่าเสียงความถี่ 60 Hz. เดินทางด้วยความเร็ว 360 ฟุต/วินาที ฉะนั้น จะมีความยาวคลื่นใหม่คือ  $\frac{1080 - 30}{60} = \frac{720}{60} = 12$  ฟุต

$$\begin{aligned} \text{เราจึงหาความถี่ใหม่ ได้โดยใช้สูตรเดิม} \quad f &= \frac{V}{\lambda} \\ \text{แทนค่า หาความถี่ใหม่ได้} &= \frac{1080}{12} \\ &= 90 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

เดิมความถี่นั้น เท่ากับ 60 Hz กลายมาเป็น 90 Hz. สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ Doppler เป็นสัดส่วนตรงกับความเร็วของเครื่องส่งที่เคลื่อนที่เข้ามา ถ้าเครื่องส่งเดินทางออกไปห่างจากผู้สังเกตการณ์ ระยะระหว่าง T กับ O ผู้สังเกตการณ์ห่างกัน 1,080 หากความถี่ช่วงนี้  $\frac{1080}{18} = 60$  Hz. ดังกล่าวแล้วในตอนต้น แต่จาก T ถึง O ระยะทางเท่ากับ (360+1,080 = 1,440 ฟุต) หากความยาวคลื่นของ 60 Hz. เท่ากับ  $\frac{1440}{60} = 24$  ฟุต จะได้ความถี่สมบูรณ์ที่หูได้ยินใหม่ =  $\frac{1080}{24} = 45$  Hz. ซึ่งต่ำกว่า 60 Hz. จึงกล่าวได้ อีกประเด็นว่าความถี่ Doppler เป็นสัดส่วนอ้อมกับความเร็วของเครื่องส่งที่เคลื่อนที่ออกไป ใช้หลักการของ Doppler Effect มาใช้กับเรดาร์ติดตามเป้าหมาย หรือติดตามขีปนาวุธคือ เป็น Frequency Modulation สมมุติว่า T ระยะทางกึ่งกลางจะได้ Center Frequency ถ้าเป้าหมายอยู่ใกล้เครื่องส่ง ความถี่สะท้อนกลับมาจะมากกว่าความถี่ Center Frequency ในทางตรงกันข้าม ถ้าระยะทางระหว่างเป้าหมายกับเครื่องส่งไกลกว่าระยะกึ่งกลาง แล้วความถี่ของคลื่นสะท้อนกลับมาจะน้อยกว่าความถี่ Center Frequency สอบหาความถี่เบี่ยงเบนของ FM (AC) มีหน่วยเป็น MHz. นั้น เท่ากับ ๒ เท่าของความถี่เปลี่ยนแปลงทางบวกหรือทางลบอย่างมากที่สุด ตัวอย่างถ้า Center Frequency เท่ากับ 220 MHz และความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ ๒ เท่า ของการเปลี่ยนแปลงทางบวก หรือทางลบมากที่สุด เท่ากับ 400 KHz. = 0.8 MHz.

จะได้ค่าของความถี่ FM นี้ เปลี่ยนแปลงจาก Center Frequency ระหว่าง 219.6 ถึง 220.4 MHz. ภาคเครื่องรับเรดาร์ก็จะหาระยะทางของเป้าหมายห่างจากเครื่องส่งเป็นฟุตได้

โดยใช้สูตรว่าเวลาที่ใช้เดินทางพบเป้าหมายแล้ว สะท้อนกลับ

$$t = \frac{2d}{V}$$

D = ระยะทางระหว่างเป้าหมายกับเครื่องส่ง มีหน่วยเป็นฟุต

V = ความเร็วของคลื่นวิทยุเดินทาง มีหน่วยเป็นฟุต / วินาที

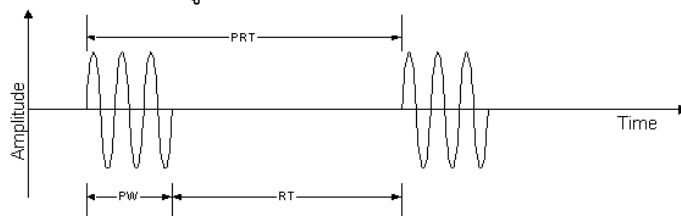
(ประมาณ ๙๘๔,๐๐๐,๐๐๐ ฟุต / วินาที)

$$\text{หรือ } d = \frac{tV}{2}$$

ระยะทางระหว่างเป้าหมายกับเครื่องส่งเรดาร์ (d) เท่ากับ ครึ่งหนึ่งของผลคูณระหว่าง เวลาที่ใช้เดินทางไปกลับ คูณด้วยความเร็วคลื่นวิทยุ หน่วยเป็นฟุต/วินาที

## ๒.๕ Pulse เรดาร์

หลักการของ Pulse Modulation เครื่องส่งจะส่งพลังงานคลื่นวิทยุเป็นห้วงสั้นๆ เรียกว่า “คลื่นพัลส์” นานห้วงละ ๒ - ๓ ไมโครวินาที (๑ ไมโครวินาที เท่ากับเศษ ๑ ส่วนล้านวินาที) เมื่อคลื่นพัลส์กระทบเป้าหมายพลังงานส่วนน้อยๆ (Echoes) จะสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องรับในช่วงเวลาระหว่างห้วงสั้นๆ นั้น เนื่องจากความเร็วของคลื่นวิทยุเท่ากับ ความเร็วของแสงซึ่งคงที่ ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์ต่อวินาที หรือประมาณ ๓๒๗ หลาต่อไมโครวินาที จึงสามารถหาระยะห่างของเป้าหมายจากสถานีส่งได้ หลักการนี้ใช้มากที่สุด เช่น ในระบบเรดาร์ป้องกันภัยทางอากาศ, ระบบควบคุมทางอากาศยุทธวิธี ถ้าส่งเป็นพัลส์คู่หรือขบวนพัลส์จะพบในระบบเรดาร์พิสัยจันทราบ เป็นต้น



Pulse Position คือ การส่งคลื่นพัลส์เป็นห้วงสั้นๆ แบบเฉพาะแบบหนึ่ง ใช้ในกิจการโทรมาตร (Telemeter) และบริษัทควบคุมระยะไกล วิธีการคือ แปรเปลี่ยนความกว้างของพัลส์, จำนวนของพัลส์ที่อยู่ภายในกลุ่มพัลส์ที่กำหนดได้ ตำแหน่งของพัลส์ หรือระยะห่างระหว่างพัลส์ จะแปรเปลี่ยนไปตามสัญญาณที่ป้อนเข้ามาผสมที่มีประมาณไม่จำกัด ข้อดี ของการส่งคลื่นพัลส์แบบนี้คือ ส่งไปได้ระยะทางไกลกว่าส่งคลื่นแบบ PM Pulse Compression คือ การอัดความกว้างของพัลส์ให้แคบลง เมื่อกำลังออกอากาศของเครื่องส่งจำกัด ใช้เทคนิคของการอัดรูปคลื่นพัลส์จะวัดระยะทางได้ละเอียดแม่นยำกว่าส่งคลื่นพัลส์แคบที่มีกำลังออกอากาศค่อนข้างแรง วิธีการคือ การยืดคลื่นพัลส์ให้ห่างออกจากกันก่อนป้อนเข้าสู่ภาคขยายกำลังของเครื่องส่งในเครื่องรับพลังงานส่วนน้อยของคลื่นพัลส์ที่สะท้อนกลับมาจะถูกอัดให้แคบก่อนป้อนเข้าวงจรแยกคลื่นของเครื่องรับ

ตัวอย่าง การอัดคลื่นพัลส์สมมติเรดาร์ถูกออกแบบให้ส่งคลื่นพัลส์กว้าง ๑ไมโครวินาที ความถี่คลื่นวิทยุภายในหัวสั้น ๆ เท่ากับ 300 MHz. ส่งคลื่นพัลส์ด้วยความถี่ ๑,๐๐๐ หัวต่อหนึ่งวินาที กำลังขยายของหลอดจำกัดไว้เท่ากับ ๕ วัตต์

คิดจากสูตร  $P_{av} = P_{pk} \times PRF \times PW$

$P_{av}$  = กำลังออกอากาศของเครื่องเรดาร์โดยเฉลี่ย

$P_{pk}$  = กำลังขยายของหลอดสูงสุด

PRF = ความถี่ของหัวคลื่นพัลส์ต่อวินาที

PW = ความกว้างของคลื่นพัลส์แต่ละหัว

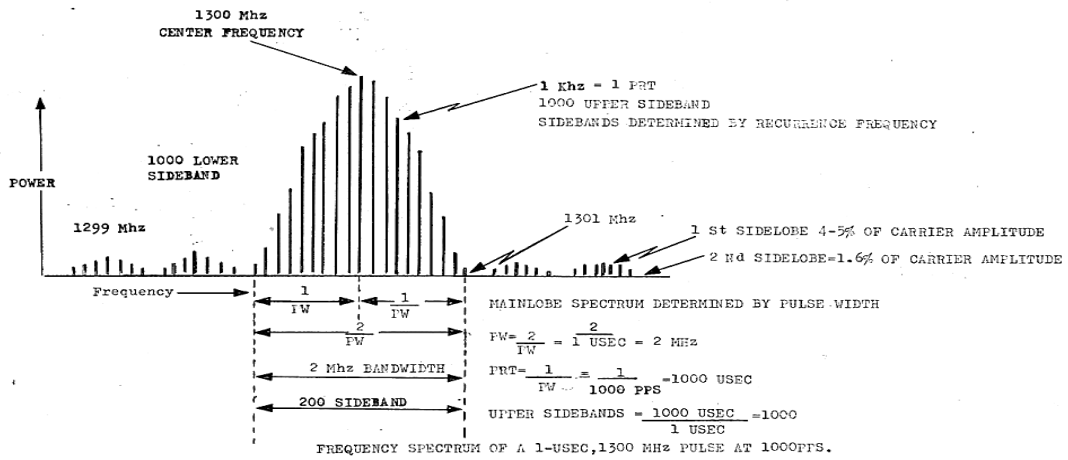
จะได้กำลังออกอากาศของเครื่องเรดาร์โดยเฉลี่ยเครื่องนี้ เท่ากับ ๕,๐๐๐ วัตต์

การที่จะเพิ่มกำลังออกอากาศของเครื่องเรดาร์ดังกล่าว อาจเพิ่ม PRF หรือ PW อย่างไม่อย่างหนึ่งคือถ้าเพิ่ม PRF เป็นสองเท่าก็จะเพิ่มกำลังออกอากาศเป็นสองเท่า แต่หาระยะทางน้อยลงเท่าตัว ทำนองเดียวกันกับเพิ่ม PW จะเพิ่มกำลังออกอากาศ แต่จะลดขีดความสามารถในการชี้ความ แตกต่างระหว่างเป้าหมายต่างๆ

ตัวอย่าง เช่น ถ้าเราส่งคลื่นพัลส์หัวละ ๔ ไมโครวินาทีด้วยกำลังออกอากาศ ๕ ล้านวัตต์ กำลังงานถูกขยายสี่เท่า ถ้ามีเป้าหมายสองเป้าหมายห่างจากสายอากาศ แนวนรัศมีต่างกัน ๑/๔ ไมล์ พลังงานส่วนน้อยในขณะที่สะท้อนกลับจากเป้าหมายแรกยังกำลังเดินทางกลับหาสายอากาศนั้น ด้านนำของคลื่นพัลส์ที่ออกไปจะกระทบเป้าหมายที่สอง ภาคแยกคลื่นของเครื่องรับเรดาร์ไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างเป้าหมายสองเป้าหมาย จึงทำให้มีเพียงจุดสว่างจุดเดียวที่หน้าจอเท่านั้น หลักการอัดพัลส์จะแปลงคลื่นพัลส์ ๑ ไมโครวินาที มาเป็นรูปคลื่นพัลส์ ๔ ไมโครวินาที ก่อนส่งออกอากาศ เมื่อพลังงานส่วนน้อยสะท้อนกลับมา จะถูกแปลงจากรูปคลื่นพัลส์ ๔ ไมโครวินาที มาเป็นรูปคลื่นพัลส์ ๑ ไมโครวินาที

การยืดคลื่นพัลส์ให้กว้างออกใช้หลักการของเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analysis) ตามที่ทราบแล้วว่า แต่ละรูปคลื่นพัลส์ของพลังงานคลื่นวิทยุมีความถี่อยู่ภายในความถี่ เหล่านี้คือ ผลรวมของความถี่ต้น (Fundamental) กับ ความถี่ฮาร์โมนิคของความกว้างพัลส์ เช่น พัลส์กว้าง ๑ ไมโครวินาที, ความถี่วิทยุ 1,300 MHz. ส่ง 1,000 ครั้งต่อวินาที (รูปที่ ๓)





รูปที่ ๓ Frequency Spectrum Of A 1 μsec., 1,300 MHz. Pulse at 1,000 PPS.

ใช้สูตร

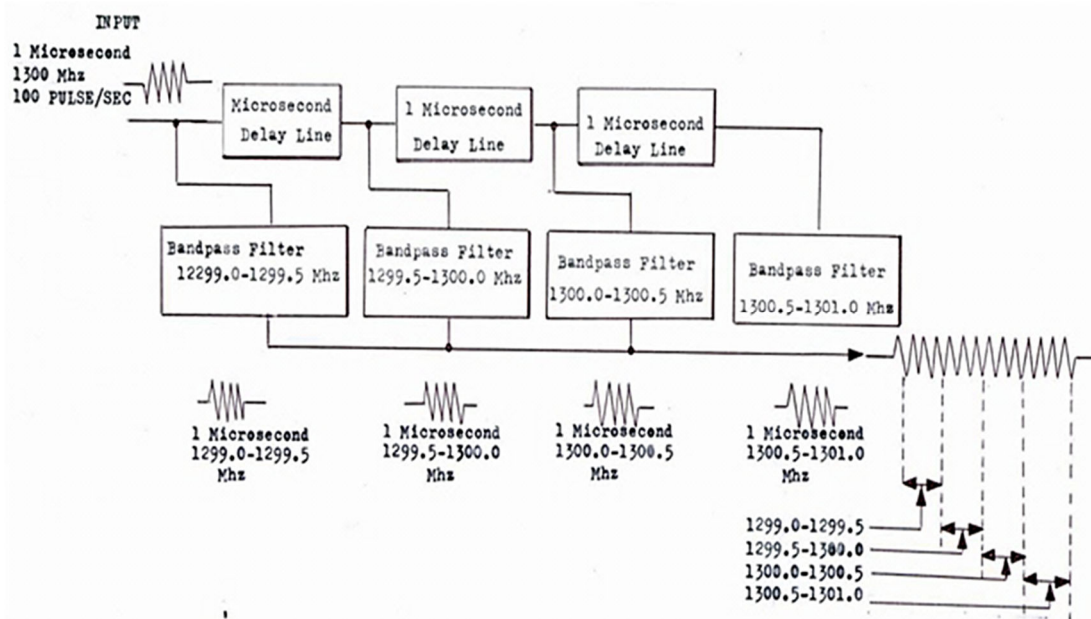
BW = 2/PW

BW = ความกว้างของแถบคลื่น

PW = ความกว้างของคลื่นพัลส์

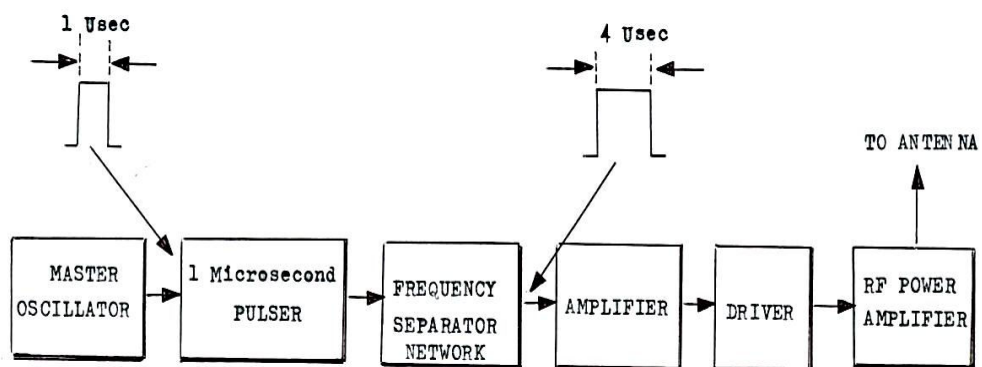
จะเห็นว่าความกว้างของแถบคลื่นของ Main Lobe ที่จะสังเคราะห์ความถี่ 2 MHz จึงเพิ่มความถี่ไปทางมาก 1 MHz. ลดความถี่ไปทางน้อย 1 MHz. จากความถี่กึ่งกลางที่ทำการส่งออกอากาศภายในคลื่นพัลส์กว้าง ๑ ไมโครวินาที ของห้วงคลื่นพัลส์ ความถี่ 1,300 MHz. นั้นจะมีความถี่แผ่ออกตั้งแต่ 1,299 MHz. ถึง 1,301 MHz. จำนวนของแถบข้างคลื่น (Side Band) จะถูกกำหนดโดย PRF และจำนวนฮาร์โมนิคต่าง ๆ จากตัวอย่าง PRF เท่ากับ 1 KHz.(PPS) และความถี่วิทยุกึ่งกลาง (1,300 MHz.) ความถี่ของแถบข้างคลื่นจะมี 1,300 MHz. + 1 KHz. + 1,300 MHz. + 2 KHz. เรื่อย ๆ ไป และ ไป 1,300 MHz. - 1 KHz., 1,300 MHz - 2 KHz. เรื่อย ๆ ไป

ความถี่ต้นของพัลส์หนึ่งๆ คือ ๑/๒ T นั้นจะเกิดจากจำนวนครั้งวงรอบ ฉะนั้นความกว้างของพัลส์ ๑ ไมโครวินาที ความถี่ต้น 500 MHz. ความถี่ฮาร์โมนิคอันแรก คือ 1 MHz. ความถี่ของแถบข้างขยายไปข้างบวก และข้างลบ 1 MHz. จะได้แถบข้างคลื่นด้านบน (Upper Side Band) จำนวน 1,000 แถบคลื่น แถบข้างคลื่นด้านล่าง และแถบคลื่นด้านล่าง (Lower Side Band) จำนวน 1,000 แถบคลื่น อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ความถี่ ด้วยเวลาความถี่เหล่านี้จะปรากฏตลอดเวลา ตลอดคลื่นพัลส์



รูปที่ ๔ Pulse Compression Frequency Separation And Delay - Line Network

คราวนี้มาพิจารณาเรื่องการอัดความกว้างของพัลส์ (รูปที่ ๔) ทำหน้าที่แยกพัลส์ที่เข้ามาใหม่ ยานความถี่ ๔ ย่าน โดยการใช้ Band Pass Filter และชุด Delay Line กลายเป็น พัลส์กว้าง ๔ ไมโครวินาที ส่งด้วยกำลังออก เท่ากับส่งพัลส์กว้าง ๑ ไมโครวินาที จึงทำให้เพิ่มกำลังออกเป็นสี่เท่า เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องรับ ก็ดำเนินการกลับกันคือ อัดพัลส์กว้าง ๔ ไมโครวินาที ให้แคบลง เหลือเพียง ๑ ไมโครวินาที (รูปที่ ๕) เป็นแผนผังของการขยายกำลังของเครื่องส่งที่มีชุดอัดคลื่นพัลส์ ดังกล่าวแล้วคือใช้วงจรขยายคลื่นแถบกว้าง Drivers และชุดขยายกำลังคลื่นวิทยุ



รูปที่ ๕ Simplified Block Diagram Pulse Compression In PA-Type Transmitter

ระบบตรวจจับหลักในปัจจุบันคือ ระบบเรดาร์หลัก การทำงานที่สำคัญคือ การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเป้าหมาย โดยรูปแบบพื้นฐานของการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเรดาร์มีสองแบบ คือ แบบ Pulse และแบบ Continuous Wave (CW) โดยเรดาร์แบบ Pulse จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ออกเป็นช่วงสั้น ๆ (หรือพัลส์-Pulse)และคอยดักจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ทิศทาง และระยะทางของเป้าหมายสามารถคำนวณได้จากมุมของสายอากาศ และระยะเวลาสำหรับสัญญาณ Pulse ในการสะท้อนกลับมาหาเครื่องรับ ส่วนเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง และอาศัยปรากฏการณ์การดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ในการคำนวณหาค่าความเร็วของเป้าหมาย โดยปรากฏการณ์ Doppler คือการที่คลื่นใด ๆ มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นหรือวัตถุที่สะท้อนคลื่นมีการเคลื่อนที่เข้าหา หรือออกจากกัน โดยการเคลื่อนที่เข้าหากันจะทำให้ความถี่สูงขึ้น และการเคลื่อนที่ออกจากกันจะทำให้ความถี่ต่ำลง

การแพร่คลื่นของเรดาร์ทั้งสองแบบ มีข้อดี และข้อเสียต่างกันไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง จึงไม่สามารถคำนวณระยะทางจากเวลาที่ใช้ในการสะท้อนคลื่นได้ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นเรดาร์แบบ Pulse Doppler ขึ้น ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาข้อดีของเรดาร์ทั้งสองแบบเข้าด้วยกันโดยเรดาร์แบบนี้สามารถวัดระยะเป้าหมายได้จากการส่งคลื่นแบบ Pulse และสามารถคำนวณความเร็วเป้าหมายจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นภายในสัญญาณ Pulse ได้อีกด้วย

## ๒.๖ ประโยชน์และการใช้งานของเรดาร์

ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ นี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบ และจุดประสงค์ในการใช้งาน ซึ่งจัดแบ่งได้ ๔ ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไป คือ

### ๒.๖.๑ พื้นสู่พื้น (Surface To Surface)

จุดประสงค์ส่วนใหญ่ใช้ในการติดตามเป้าหมาย และชี้ตำแหน่งของเป้าหมายที่อยู่ภาคพื้น โดยอุปกรณ์จะอยู่ภาคพื้นเช่นกัน เช่น ในระบบ Doppler Radar ที่ใช้ในกิจการตำรวจสำหรับตรวจจับความเร็วของยานพาหนะหรือใช้ในการนำร่องและจัดการจราจรทางน้ำใช้ตามเมืองท่าสำคัญ ๆ ที่มีจราจรทางน้ำมาก และใช้ในสภาพทัศนวิสัยไม่ดี เรดาร์พื้นสู่พื้นนี้มีข้อเสียในด้านระยะทางของเป้าหมายจะถูกจำกัดโดยพื้นผิวของโลกเองรวมถึงสภาวะของภูมิประเทศโดยรอบด้วย

### ๒.๖.๒ พื้นสู่อากาศ (Surface To Air)

ใช้ในการนำร่องอากาศยาน (Air Surveillance Radar) โดยอาจจะกวาดสัญญาณไปรอบ ๆ หรืออาจใช้ติดตามบางตัวโดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังใช้ตรวจสอบสภาพอากาศ (Weather Radar) ใช้จัดการจราจรทางอากาศ (Air Traffic Control) ใช้เป็นเรดาร์แจ้งเตือน (Early Warning Radar) จับเป้าหมายอากาศยาน หรือจรวด ใช้ช่วยในการยิงต่อสู้ป้องกันภัยทางอากาศ ซึ่งเรดาร์ระบบพื้นสู่อากาศนี้อาจติดตั้งพื้นดินบนภูเขา หรือบนเรือก็ได้แล้วแต่จุดประสงค์เนื่องจากระยะทางที่เรดาร์จับได้นั้นเป็นแนวเส้นตรง ดังนั้นเรดาร์ภาคพื้นสู่อากาศจึงมีข้อจำกัดเช่นเดียวกับระบบพื้นสู่พื้น แต่จัดได้น้อยกว่ามาก เพราะเป้าหมายที่ต้องการส่วนใหญ่เป็นอากาศยาน ผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปก็จะเกิดจากสภาพแวดล้อมภูมิประเทศที่อยู่ใกล้ ๆ เป็นส่วนใหญ่ เช่น ภูเขา, ตึกอาคาร, ต้นไม้ต่าง ๆ ซึ่งจะปรากฏบนจอ Indicator ในทางเทคนิค เราเรียกว่าสิ่งที่เกิดขึ้นบน Indicator โดยสาเหตุจากสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า “Ground Clutter”

### ๒.๖.๓ อากาศสู่อากาศ (Air To Air)

ใช้ค้นหาหรือติดตามเป้าหมายที่เป็นอากาศยาน สภาพอากาศ หรือเป้าหมายอื่นๆ ที่อยู่บนอากาศด้วยกัน ซึ่งก็รวมถึงการใช้เป็นเครื่องช่วยที่กำหนด หรือหลีกเลี่ยงการชนระหว่างอากาศยานด้วยกันเอง นอกจากนั้นยังใช้ในการต่อสู้ และโจมตีเป้าหมายบนอากาศยานด้วย เรดาร์อากาศสู่อากาศนี้ยังอาจเพิ่มเครื่องนำทาง (Guidance) เพื่อให้ได้ข้อมูล และทิศทางของข้าศึก เพื่อช่วยในการป้องกันจรวดของข้าศึกที่มุ่งเข้าหา หรือใช้เป็นเครื่องช่วยชี้เป้าหมายให้กับจรวดของฝ่ายเดียวกัน โดยมากจะเป็นระบบ Pulse Doppler Radar

### ๒.๖.๔ อากาศสู่พื้น (Air To Ground)

ใช้ในการกำหนดเป้าหมายภาคพื้น, ทำแผนที่, หาความสูงของอากาศยานเอง, ใช้ในการโจมตีเป้าหมายภาคพื้นใช้กำหนดความเร็วภาคพื้นของอากาศยาน (Ground Speed) ใช้เป็น Side Looking ในการทำแผนที่ที่ค่อนข้างละเอียด และเที่ยงตรง นอกจากนี้ยังใช้ในการหลีกเลี่ยงการชนพื้นดิน หรือหลงฟ้า (Terrain Clearance) ใช้กำหนดข้อมูลให้อากาศยานอยู่ในความสูงคงที่ (Terrain Follow) ให้ข้อมูลทั้งทางมุมทิศ และมุมเงยให้อากาศยาน เมื่อเปรียบเทียบกับภาคพื้น (Terrain Avoidance)

เรดาร์ได้นำมาใช้งานหลาย ๆ ด้าน ทั้งภาคพื้น ในอากาศ และในทะเล เรดาร์ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบเพื่อใช้งานในกิจการทหารในด้านการป้องกัน, แจ้งเตือน และเพื่อความปลอดภัย ส่วนด้านพลเรือนจะมีใช้ในการช่วยความปลอดภัย เช่น การจัดการจราจรทางอากาศ, การร่อนลงของอากาศยาน การเดินเรือ เป็นต้น ขอยกตัวอย่างพอสังเขปดังนี้

- ATC. Radar (Airtraffic Control Radar) ใช้ควบคุมการบิน ช่วยในความปลอดภัยของอากาศยานโดยให้บินอยู่ในเส้นทางที่กำหนด และควบคุมการจราจรบริเวณใกล้สนามบินที่มีการจราจรคับคั่ง
- GCA. Radar (Ground Control Approach Radar) ช่วยในการร่อนลงของอากาศยานในทัศนวิสัยไม่ดี ซึ่งก็รวมถึงระบบ Microwave Landing System และ ATE. Radar Beacon System ซึ่งใช้แทนกันได้ในกรณีเดียวกัน
- Aircraft Navigation ใช้ตรวจสอบสภาพอากาศเพื่อใช้หลีกเลี่ยง หรืออาจใช้เป็น Terrain Avoidance หรือ Terrain Follow และบางอย่างที่ใช้หลักการเดียวกันกับระบบเรดาร์ เช่น Radio Altimeter ไม่ว่าจะเป็น FM/CW หรือ Pulse และ Doppler Navigation
- Ship Safety ใช้แจ้งเตือน และตรวจสอบชายฝั่ง สิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่นทุ่น รวมถึงเรือลำอื่น ๆ ด้วย
- Remote Sensing ใช้ในการส่งสัญญาณระยะไกล ซึ่งอาจเป็นข้อมูลสภาพอากาศ สภาพพื้นผิวโลก เป็นต้น

- Law Enforcement ใช้ในด้านกฎหมาย เช่น ใช้จับความเร็วของยานพาหนะ หรือการบุกรุกสถานที่ เป็นต้น

- Early Warning ใช้แจ้งเตือนอากาศยานที่รุกร้าแนวพรมแดน, จรวดนำวิถีของฝ่ายข้าศึกที่ยิงเข้ามาเพื่อเตรียมการป้องกัน หรือตอบโต้ได้ทันเวลาที่

## ๒.๗ ย่านความถี่เรดาร์

ในทางปฏิบัติ ความถี่เรดาร์อยู่ในย่านไมโครเวฟ แบ่งเป็นย่านต่าง ๆ ดังนี้

Nomenclature	Frequency Range
VHF	30-300 MHz
UHF	300-1,000 MHz
L-BAND	1,000-2,000 MHz
S-BAND	2,000-4,000 MHz
C-BAND	4,000-8,000 MHz
X-BAND	8,000-12,500 MHz
Ku-BAND	12-18 GHz
Ki-BAND	18-27 GHz
Ka-BAND	27-40 GHz

ตารางที่ ๒-๑ แสดง ความถี่ในย่านต่าง ๆ

- ความถี่สูงมาก (VHF 30 - 300 MHz.) การครอบคลุม (Coverage) ดี เครื่องไม่ซับซ้อน สมรรถนะจับเป้าเคลื่อนที่ดี ไม่มีการสะท้อนจากสภาพอากาศ แต่ Resolution ทางแนวระดับไม่ดี และความถี่ย่านนี้ถูกกำหนดให้ใช้ในการบริการวิทยุต่างอื่น ๆ

- ความถี่อุลตรา (UHF 300 - 1,000 MHz.) สิ่งรบกวนภายนอก (Noise) น้อยกว่าย่าน VHF เชื้อถือได้ดีสำหรับเรดาร์เฝ้าตรวจระยะไกล ไม่มีผลจากสภาพอากาศ ความสามารถ MTI ดีแต่มีข้อจำกัดคือ ถูกกำหนดใช้ไปในด้านบริการวิทยุต่างอื่น ๆ มาก

- L- BAND (1,000 - 2,000 MHz.) นิยมใช้กันมากสำหรับเรดาร์เฝ้าตรวจระยะไกลให้ Resolution ทางมุมดี สิ่งรบกวนจากภายนอกน้อย, MTI ดี

- S - BAND (2,000 - 4,000 MHz.) เรดาร์เฝ้าตรวจส่วนใหญ่ใช้ความถี่ต่ำกว่า S-BAND ให้ Resolution ทางมุมดีสายอากาศเล็ก, การรบกวนจากภายนอกต่ำ, MTI ไม่ดี เท่า ย่าน UHF, มักใช้งานตรวจจับและติดตาม บ. ในระยะปานกลาง

- C - BAND (4,000 - 8,000 MHz.) มีลักษณะอยู่ระหว่าง S-BAND กับ X-BAND ใช้ในเรดาร์ช่วยการเดินทางเรือติดตาม และควบคุมอาวุธ

- X - BAND (8 - 12.5 GHz.) นิยมใช้ในเรดาร์ควบคุมอาวุธ และเรดาร์ในกิจการพลเรือน เช่น Civil Marine Radar Airborne Weather Avoidance Radar, Doppler Navigation Radar สายอากาศมีขนาดเล็ก,

น้ำหนักเบาจึงเหมาะที่จะใช้เป็นเรดาร์เคลื่อนที่, ฝ้าตรวจระยะใกล้, ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเรดาร์ฝ้าตรวจระยะไกล, ความกว้างลำคลื่นแคบทำได้ง่าย เช่น ลำคลื่น  $1^\circ$  จากสายอากาศกว้าง ๖ ฟุต

- Ku, Ki และ Ka - BAND (12.5 - 40 GHz.) ขณะนี้ใช้ในการทดลองเท่านั้น เพราะใกล้กับเวฟเลนธ์ของไอน้ำ (22.2 GHz.) สูญเสียจากการดูดซึมสูง กำลังสูง ๆ ทำได้ยาก, ให้ Resolution ดี ทางมุม และทางระยะ

## ๒.๘ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องเรดาร์ (Factors Affecting Radar Performance)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องเรดาร์ ปัจจัยที่เกี่ยวกับความถี่ และความกว้างของคลื่นพัลส์ได้กล่าวแล้ว ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบกำลังออกอากาศ กำลังของคลื่นสะท้อนกลับ และผลสรุปต่าง ๆ อาจแบ่งออกเป็นสองทางคือ ความชำนาญของพนักงานและสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ

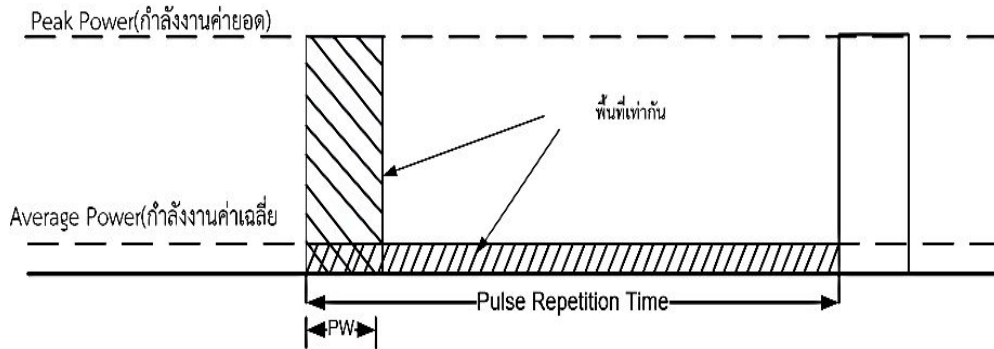
เครื่องส่งเรดาร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง เป็นพลังงานคลื่นวิทยุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในเครื่องส่งมีอุปกรณ์เริ่มจากสวิตซ์นิรภัย ระบบหล่อเย็น ท่อส่งคลื่นเครื่องวัดต่าง ๆ และหลอดวิทยุเช่น Magnetron, Stabilatron, Klystron, Plationotron หรือ TWT = Traveling Wave Tube เป็นต้นซึ่งเป็นอุปกรณ์เกี่ยวข้องกับการสร้างรูปคลื่นวิทยุ ความถี่ของคลื่นวิทยุในการส่ง เรดาร์พื้นดินประมาณ 3,000 MHz. (S-Band) ใช้ Magnetron, Klystron ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ( $\lambda/2$ ) เท่ากับ ๒ นิ้ว

- ความถี่เรดาร์บนเครื่องประมาณ 10,000 MHz. (X-BAND) ครึ่งหนึ่งของความยาว คลื่น ( $\lambda/2$ ) จะเท่ากับ ๐.๖ นิ้ว จะเห็นว่าเครื่องเรดาร์ความถี่สูง จะมีขนาด, น้ำหนักและไฟสูงลดลง แล้วก็จะลดกำลังออกอากาศลงไปด้วย กำลังออกอากาศมาก เรดาร์ก็มีรัศมีทำการไกล แต่เครื่องส่งเรดาร์จะพักการส่งนานกว่า ขณะทำการส่งขณะนั้นกำลังเฉลี่ยการออกอากาศของหนึ่งวงรอบจึงต่ำมาก เมื่อเทียบกับกำลังออกอากาศสูงสุด ขณะส่งคลื่นพัลส์ มีสูตรการคำนวณหา กำลังเฉลี่ย คือ

$$P_{av} = P_{pk} \times P_w \times PRF$$

เพราะว่า PRF = 1 / PRT

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\text{Average power}}{\text{Peak Power}} = \frac{\text{Pulse width}}{\text{Pulse Recurrence Time}}$$



รูปที่ ๖ Pulse Cycle Charateristics

ตามรูปที่ ๖ สมมุติกำลังออกอากาศสูงสุด ๑,๐๐๐ วัตต์ และกำลังออกอากาศเฉลี่ย เท่ากับ ๑๐๐ วัตต์ จะมีผลอะไรเกิดขึ้น ถ้า Pulse Width และ Pulse Recurrence Time เท่าเดิม แต่เพิ่มกำลังออกอากาศสูงสุดเป็น ๒,๐๐๐ วัตต์ คำตอบคือ กำลังออกอากาศเฉลี่ยจะเป็น ๒ เท่า ทำนองเดียวกัน ถ้าให้กำลังออกอากาศสูงสุดคงที่ ๑,๐๐๐ วัตต์ แต่เพิ่มความกว้างของคลื่นพัลส์เท่าตัว ก็จะได้กำลังออกอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเท่าตัว และถ้าเพิ่มกำลังออกอากาศสูงสุดกับ Pulse Recurrence Time ทั้งคู่เป็นสองเท่าแล้ว กำลังออกอากาศเฉลี่ยจะคงที่ สรุปผลของการแปรเปลี่ยนคุณลักษณะของคลื่นพัลส์ แสดงไว้ในรูปที่ ๗

PRF	PULSE WIDTH	PEAK POWER	AVERAGE POWER	MAXIMUM POWER
↑	→	→	↑	↓
→	→	↑	↑	→
→	↑	→	↑	→
→	↓	↑	→	→

INCREASE     
 NO CHANGE     
 DECREASE

รูปที่ ๗ Cycle denotes Elements (Charateristics ) Which Are Varied Effect Of Varying Pulse Charateristic

จากรูปที่ ๗ จะเห็นว่ากำลังออกอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้นได้ โดยการเพิ่ม กำลังออกอากาศสูงสุด หรือ Pulse Widthหรือ PRF = Pulse Recurrence Frequency ผลของการพัฒนาเครื่องเรดาร์ตลอดมา สรุปได้ว่าเครื่องเรดาร์ที่ใช้งานดีต้องมีกำลังออกอากาศเฉลี่ยมาก การเพิ่ม Pulse Width จะต้องคิดถึงว่า Magnetron และ PFN = Pulse - Forming Network มีการหล่อเย็น และพัลส์กว้างพอตามลำดับ แม้การเพิ่ม Pulse Width เป็นการเพิ่มกำลังออกอากาศเฉลี่ยของเรดาร์ก็จริง แต่จะลดขีดความสามารถในการแยกเป้าหมายที่อยู่ในระยะทาง และทิศทางที่เท่ากันกับขณะที่ยังไม่เพิ่ม Pulse Width ระบบตรวจจับหลักในปัจจุบันคือ ระบบเรดาร์หลัก การทำงานที่สำคัญคือ การสะท้อนคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าจากเป้าหมาย โดยรูปแบบพื้นฐานของการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเรดาร์มี ๒ แบบ ได้แก่

แบบ Pulse และแบบ Continuous Wave (CW) โดยเรดาร์แบบ Pulse จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นช่วงสั้น ๆ (หรือพัลส์-Pulse) และคอยดักจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ทิศทาง และระยะทางของเป้าหมายสามารถคำนวณได้จากมุมของสายอากาศ และระยะเวลาสำหรับสัญญาณ Pulse ในการสะท้อนกับมาหาเครื่องรับ ส่วนเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่องและอาศัยปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ในการคำนวณหาความเร็วของเป้าหมาย โดยปรากฏการณ์ Doppler คือการที่คลื่นใด ๆ มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นหรือวัตถุที่สะท้อนคลื่นมีการเคลื่อนที่เข้าหา หรือออกจากกัน โดยการเคลื่อนที่เข้าหากันจะทำให้ความถี่สูงขึ้น และการเคลื่อนที่ออกจากกันจะทำให้ความถี่ต่ำลงดังที่กล่าวมาแล้ว ในบทที่ ๒

การแพร่คลื่นของเรดาร์ทั้ง ๒ แบบ มีข้อดี และข้อเสียต่างกันไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง จึงไม่สามารถคำนวณระยะทางจากเวลาที่ใช้ในการสะท้อนคลื่นได้ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นเรดาร์แบบ Pulse Doppler ขึ้น ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาข้อดีของเรดาร์ทั้ง ๒ แบบเข้าด้วยกันโดยเรดาร์แบบนี้สามารถวัดระยะเป้าหมายได้จากการส่งคลื่นแบบ Pulse และสามารถคำนวณความเร็วเป้าหมายจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นภายในสัญญาณ Pulse ได้อีกด้วย

Duty cycle คือ อัตราส่วนของ  $P_{av} / P_t$ ,  $T / T_r$  หรือ  $T_{fr}$

$P_{av}$  = Power Average ของเรดาร์

$P_t$  = Transmitter Power ค่า peak

$T$  = Pulse Width หรือ Pulse Duration คือ ระยะเวลาในการส่ง Pulse เครื่องส่ง หรือความกว้างของ Pulse เครื่องส่ง

$T_f$  = PRT = Pulse Repetition Time คือ ระยะเวลาทั้งหมดใน 1 Cycle ของการส่งและรับ

$F_r$  = PRF = Pulse Repetition Frequency คือ ความถี่ของ Pulse ที่เครื่องส่งสามารถส่งออกไปในเวลา ๑ วินาที เช่น เรดาร์เครื่องหนึ่งมี PRF = 800 cps. หมายความว่าเครื่องเรดาร์นั้นสามารถส่ง Pulse ได้ ๘๐๐ ลูก ใน ๑ วินาที

Resting Time = คือ เวลาที่เครื่องรับทำงาน

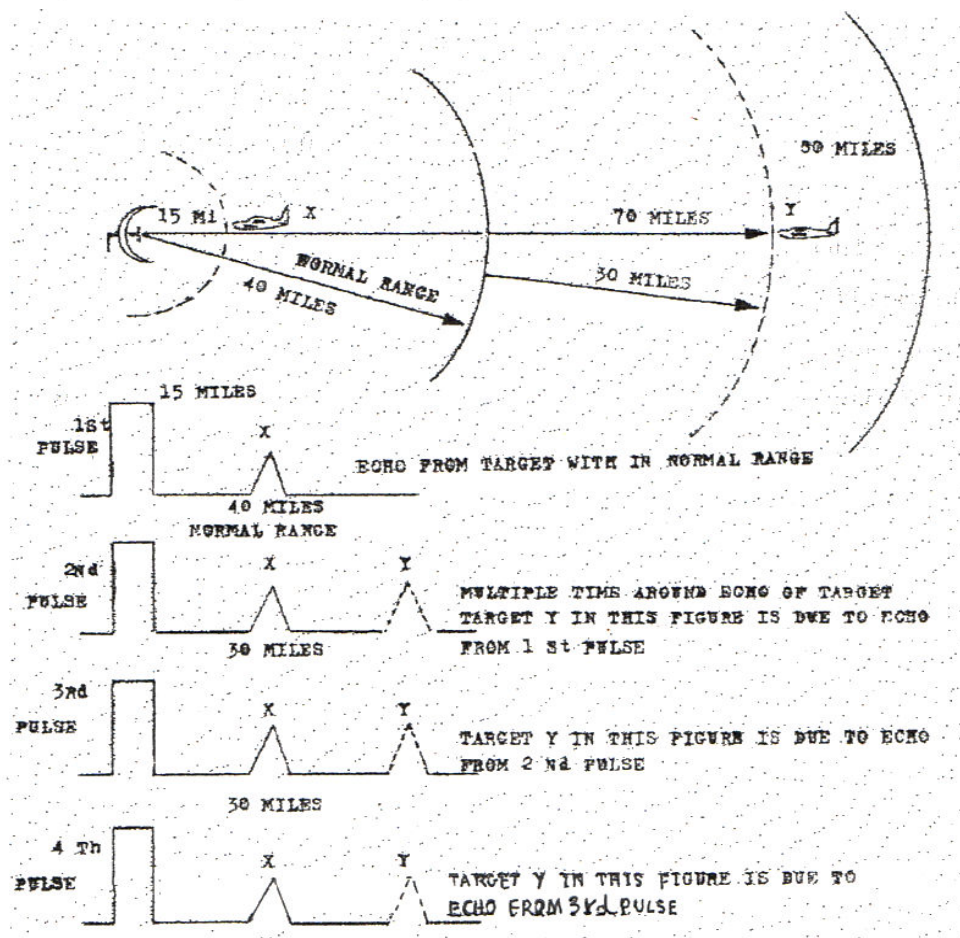
ตัวอย่าง Pulse เรดาร์อาจมี Duty Cycle 0.001 หรือน้อยกว่าแต่ CW เรดาร์ซึ่งส่งตลอดเวลา มี Duty Cycle เท่ากับ Unity หรือกล่าวได้ว่า  $P_{av}$  เพิ่มขึ้นสองเท่า ถ้า PRF เพิ่มขึ้นสองเท่าด้วย หรือ Duty Cycle ลดลงครึ่งหนึ่ง ถ้ากำลังออกอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า หรือเพิ่ม PRF สองเท่าจะลดระยะทางไกลลงร้อยละ 50

Multiple Time around Pulse หรือเป้าผี บางทีเรียก “Second Time around Pulse”

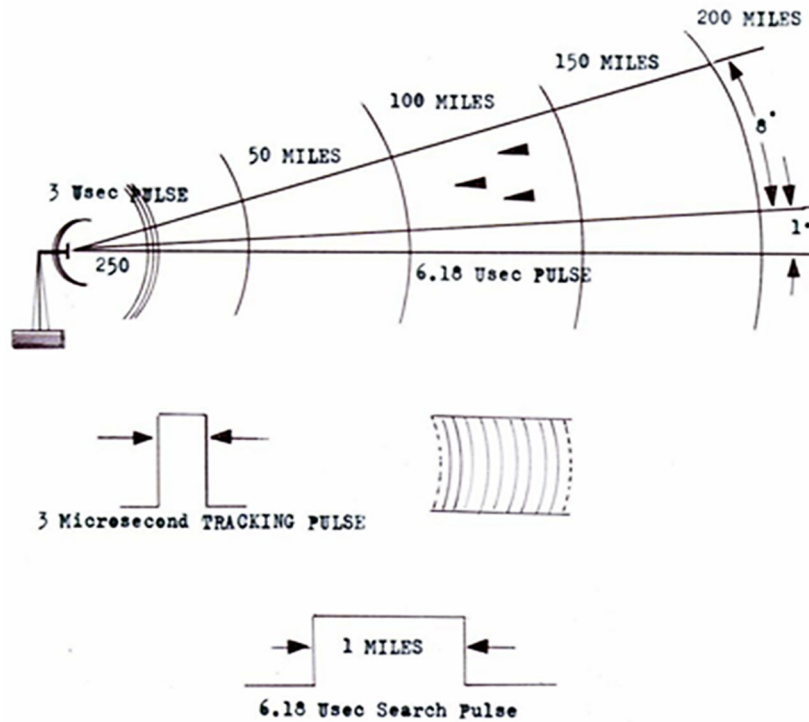


ตัวอย่าง ตามรูปที่ ๘ มีเป้าหมายสองเป้าคือ X และ Y เป้า คือ เครื่องบินหนึ่งเครื่อง อยู่ห่างพัลส์ลูกแรก ๑๕ ไมล์ เป้าคือ เครื่องบินเครื่องที่อยู่ห่างสถานีเรดาร์ ๗๐ ไมล์ ซึ่งไกลเกินระยะกวาดของเรดาร์ไป ๓๐ ไมล์ เป้าหมายไม่มีในจอเรดาร์หลังจากปล่อยพัลส์ลูกแรกออกไป เพราะเครื่องส่งไม่มีเวลาเดินทางไป-กลับพอที่จะถึง ๗๐ ไมล์ อย่างไรก็ตามพอพัลส์ลูกสองปล่อยออกไป จะมีเป้า Y บนจอระยะห่าง ๓๐ ไมล์ สิ่งนี้เรียกว่า “Multiple Time Around Pulse” หรือ เป้าผี ซึ่งคลื่นพัลส์สะท้อนกลับมาหลังจากเสียเวลาไปตามเวลาของพัลส์ลูกที่สอง สามเรื่อย ๆ ไป สรุปแล้วเป้าผีจะเท่ากับระยะทางปกติเต็มจอเรดาร์ บวกกับ ระยะทางของพัลส์ถัดไปเรื่อย ๆ สรุปแล้วเป้าผีจะเกิดขึ้นถ้าระยะทางของเป้าหมายมากกว่าเวลาของแต่ละพัลส์ คือ ใช้ความถี่ของ PRF สูงเกินไปกว่าระยะเวลากวาดที่หน้าจอ

Range Resolution คือ ขีดความสามารถของเรดาร์ในการแยกเป้าหมายที่มีระยะทางและทิศทางใกล้เคียง ๆ กันวิธีการแยกเป้าหมายได้ละเอียดก็คือ ใช้คลื่นพัลส์แคบ แต่มีสัญญาณสะท้อนกลับอ่อนกำลังลง ตัวอย่างพิจารณาเครื่องบินเล็ก ๆ สองเครื่องบินใกล้กัน ถ้าคลื่นสะท้อนกลับจากเครื่องบินทั้งคู่ใหญ่มาก จะเห็นเป้าหมายเดียวบนจอใหญ่แทนที่จะเห็นเป็นจุดสว่างสองจุด

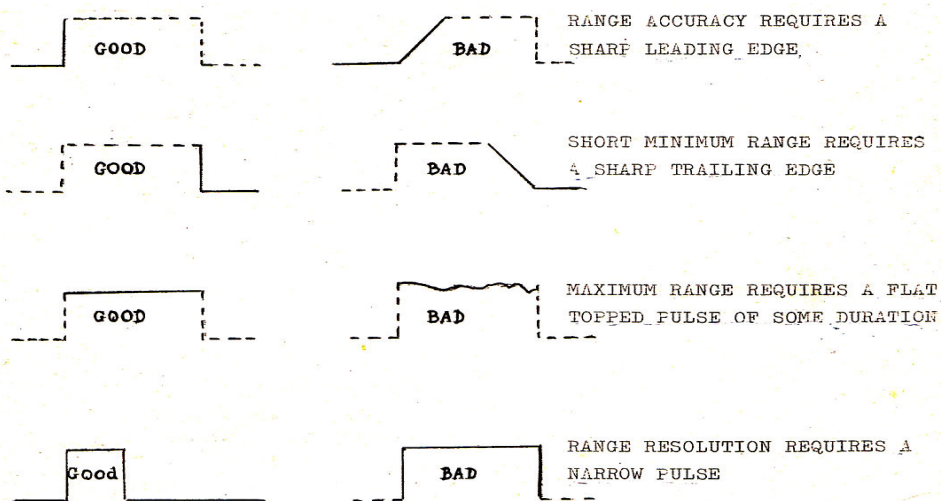


รูปที่ ๘ Multiple Time Around Echo



รูปที่ ๙ Range Resolution

ตามรูปที่ ๙ ใช้คลื่นพัลส์กว้าง 0.3  $\mu$ s. ความกว้างของลำคลื่น ๑ องศา พนักงานเรดาร์ จะแยกเป้าออกเป็นเครื่องบิน ๓ เครื่อง และติดตามเป้าหมายใกล้เข้ามาจนถึงระยะห่างเพียง ๒๕๐ ฟุต แต่ถ้าใช้คลื่นพัลส์กว้าง 6.18  $\mu$ s. (กว้าง ๑ ไมล์) ทั้งยังมีลำคลื่นกว้างจะอ่านเป้าหมายไม่ออกว่ามีเครื่องบินเข้ามากี่เครื่อง การติดตามเป้าหมายจะหลุดหายไปเมื่อระยะห่าง ๑ ไมล์ เครื่องรับก็จะถูกชุด Duplexer ตัดการทำงาน



รูปที่ ๑๐ Pulse Characteristics

Time Modulator and Pulse Forming Network (PFN) ชุดนี้จะต้องสร้างคลื่นพัลส์ที่มีลักษณะตามรูปที่ ๑๐ เช่น

- ขอบหน้าชันหรือตั้งฉาก (Steep or Sharp Leading Edge) ความมุ่งหมาย เพื่อวัดระยะทางได้แน่นอน
- ส่วนบนของคลื่นพัลส์จะต้องราบเรียบ เพื่อให้สามารถตรวจจับเป้าหมายได้ระยะไกลสุด
- สร้างคลื่นพัลส์กว้าง เมื่อต้องการกำลังออกอากาศสูง หรือสร้างคลื่นพัลส์แคบสำหรับแยกเป้าหมายได้ละเอียด และติดตามได้ระยะทางใกล้ขีด
- รูปคลื่นพัลส์ต้องมีขอบหลังชัน เพื่อจับเป้าหมายระยะใกล้ได้ดี

ความเร็วบอด (Blind Speed) เมื่อ บ.บินด้วยความเร็วเท่าไรก็ตาม เรดาร์แบบ Pulse MTI จะจับเป้าหมายไม่ได้ระยะทางหนึ่ง ๆ เหตุจากกการตอบสนองของ Single Delay Line Canceller เป็นศูนย์ ถ้า  $F_D T$  เป็น 0.2 หรือ N

$$F_D = \frac{N}{T} = N \cdot f_r$$

$$N = 0, 1, 2, \dots$$

$$T = \text{Delay Time} = 1 / f_r$$

$$f_r = \text{Pulse Repetition Frequency}$$

$$F_D = \text{Doppler Frequency}$$

Delay Line Canceller ไม่เพียงแต่ตัด DC. Component ที่เกิด Clutter (N=0) เท่านั้น ยังทำการลบเป้าหมายเคลื่อนที่ ที่เกิดจากผลของความถี่ Doppler ที่เท่ากับ ความถี่ PRF หรือคูณด้วยก็เท่าของความถี่ PRF ความเร็วของเป้าหมายที่ไปตรงกับ Zero MTI. Response นั้น ถูกเรียกว่า “ความเร็วบอด” (Blind Speed)

ใช้สูตรว่า

$$n = \frac{n\lambda}{2T} = \frac{n\lambda f_r}{2} \quad N = 1, 2, 3, \dots$$

เมื่อ n = จำนวนความเร็วบอดที่เท่าใด (n<sup>th</sup> blind speed)

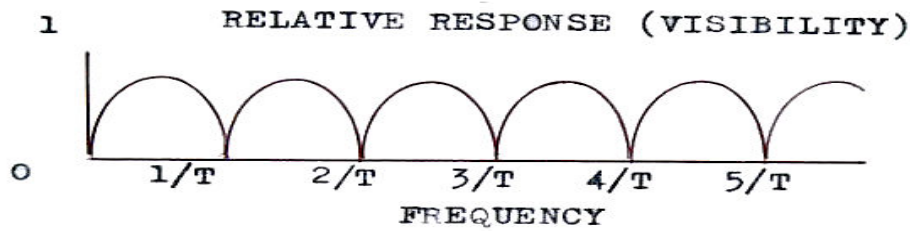
$\lambda$  = ความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตร

$f_r$  = ความเร็วของเครื่องบินเป็นน็อต

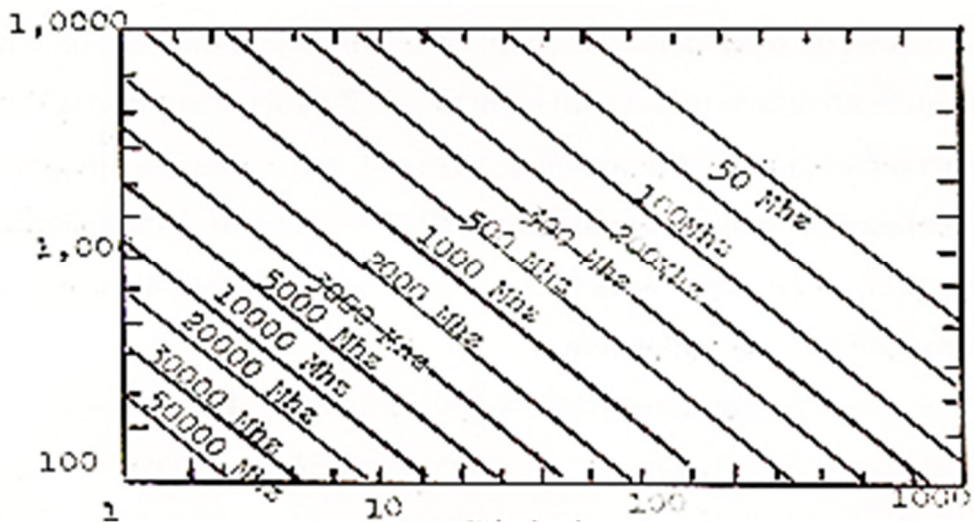
หรือความถี่ในการส่งคลื่นพัลส์ออกไป (Pulse Repetition Frequency)

$$\text{สูตรสำเร็จหาค่าของ Blind Speeds คือ} \quad n = \frac{n\lambda f_r}{102}$$

Blind Speeds จะเกิดขึ้นเมื่อใช้เรดาร์แบบ Pulse MTI คือ จับเครื่องบินหรือเป้าหมายไม่ได้แต่จะไม่เกิดขึ้นกับการใช้เรดาร์แบบ CW เพราะว่า Pulse เรดาร์จะมีจุดบอดถ้าความเร็วของเป้าหมายตรงกับ Radial Velocity



รูปที่ ๑๑ Relative Response (Visibility Factor)



รูปที่ ๑๒ First Blind Speed, Knots

เพราะว่า MTI ต้องทำตามที่มีความยาวคลื่นอย่างยาว (ความถี่ต่ำ) หรือให้มี PRF ที่ หรือกระทำทั้งคู่ จึงเกิดปัญหาจับเป้าหมายไม่ได้ เนื่องจากที่ Blind Speed เกิดขึ้นแล้วหลีกเลี่ยงยาก เรดาร์ความถี่ต่ำ ๆ มีข้อเสียที่ล่าคลื่นโต อ่านทิศทางคลาดเคลื่อน การปรับเปลี่ยน PRF ให้มีความถี่ย่านกว้างก็เป็นของยาก และมีผลกระทบเกี่ยวกับ Unambiguous Range ( $R_{unamb} = cT / 2$ ) ตามรูปที่ ๑๒

ถ้า Blind Speed แรกเท่ากับ ๖๐๐ น็อต, เรดาร์ก็ใช้ความถี่ 300 MHz. (UHF) ระยะทางจับเป้าหมายไม่ได้ ก็คือ ๑๓๐ ไมล์ทะเล ถ้าเรดาร์ใช้ความถี่ 3,000 MHz (S-BAND) ระยะทางจับเป้าหมายไม่ได้ ก็คือ ๑๓ ไมล์ทะเล และเรดาร์ใช้ความถี่ 10,000 MHz (X-BAND) ระยะทางจับเป้าหมายไม่ได้ ก็คือ ๔ ไมล์ทะเลแต่ บ. ไอพ่นของสายการบินพาณิชย์มีความเร็ว ๖๐๐ น็อต บ.ของทหารอาจสูงกว่าก็อาจจะมี Blind Speed เกิดขึ้นในเรดาร์แบบ Pulse MTI ได้

วิธีแก้ไข Blind Speed จึงกำจัดให้ลดลงด้วยการใช้คลื่นพัลส์ซ้อน ๆ กัน (Staggered PRF)

Angles คือ เป้าหมายผีที่ตัวเอง โดยยังไม่ได้ส่งคลื่นออกไปมาบางที่ เรียก Phantoms, Ghost, Pixies, Radar Flying Sourcers หรือจานผี แต่ที่นิยมเรียกกันมาก คือ “Angles” สาเหตุที่จับเป้าผีได้ คือ เรดาร์กวาดไปพบฝูงนกนางนวลที่มีขนาดเป้าหมายเรดาร์ (Radar Cross Section) ขนาด ๐.๐๑ ตารางเมตร ระยะทาง ๑๐ ไมล์ทะเลจะมีคลื่น สะท้อนกลับได้ เป้าผีอาจเกิดจากเป้าใหญ่ทาง Side Lobes ต่าง ๆ เกิดจาก Second-Time Around Echoes หรือการรบกวนที่มาจากเรดาร์

เครื่องอื่น ๆ ทำให้เกิดกระพริบเรืองแสงบนจอเรดาร์ได้ทั้งที่ไม่น่าจะมีวิธีแก้ไขก็คือ ใช้พนักงานเรดาร์ที่มีความชำนาญ

ที่ตั้งสถานีเรดาร์ มีผลกระทบต่อการทำงานของเรดาร์มากกว่าภายในตัวเครื่องเรดาร์เอง ฉะนั้นสถานที่ตั้งสถานีเรดาร์ควรจะอยู่ที่โล่ง

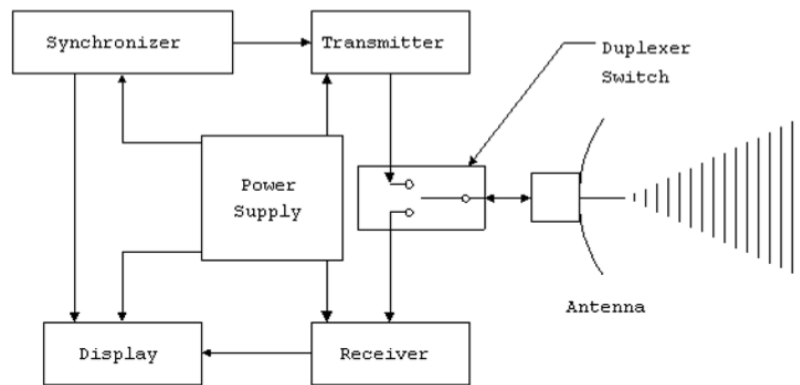
การปรับแต่งเรดาร์พื้นดิน ต้องให้ทิศทาง 0 องศาตรงกับทิศเหนือโลกจริง เรดาร์บนเรือหรือบนอากาศยาน ต้องปรับแต่งหัวเรือ หรือหัวเครื่องบินตรงกับระบบไจโร ฐานเรดาร์พื้นดินต้องปรับระดับน้ำ เพื่อป้องกันมุมยกคลาดเคลื่อน

## บทที่ ๓

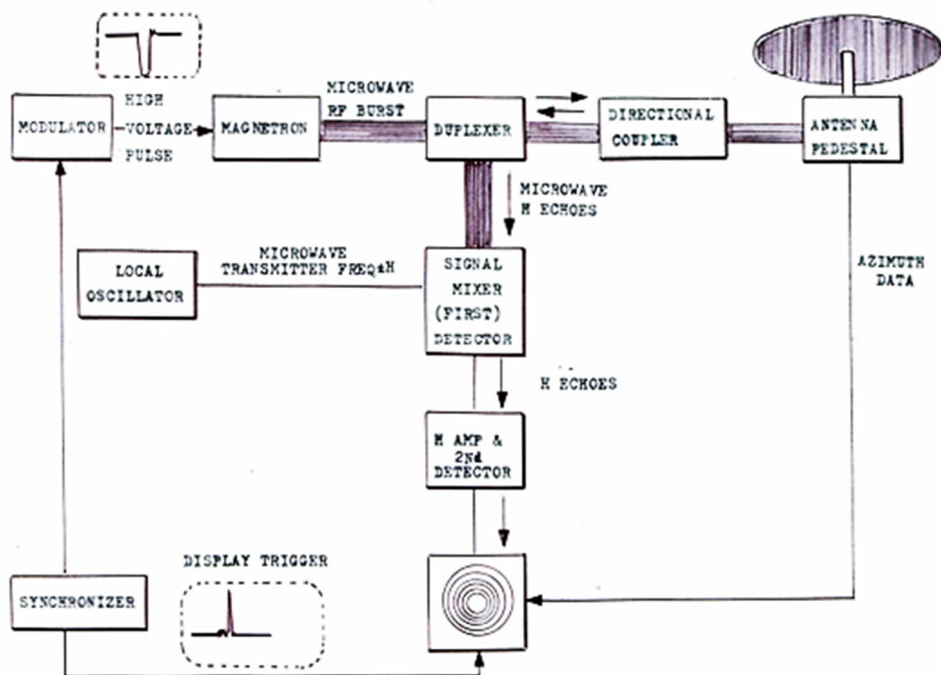
### เรดาร์เบื้องต้นและการทำงานของระบบ

#### ๓.๑ กล่าวทั่วไป

เครื่องเรดาร์ไม่ว่าแบบง่าย ๆ หรือแบบซับซ้อนอย่างไรก็ตาม จะต้องประกอบด้วยชุดต่าง ๆ อย่างน้อย ๖ ชุด ดังนี้ ชุด Synchronizer หรือ Timer, Transmitter (ชุดเครื่องส่ง), Duplexer, Antenna (ชุดสายอากาศ), Receiver (ชุดเครื่องรับ), Display (ชุดจอเรดาร์) และชุดจ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ ๑๓ ส่วนประกอบหลักกระบบเรดาร์เบื้องต้น



รูปที่ ๑๔ แผนผังของระบบเรดาร์เบื้องต้น

### ๓.๒ Synchronizer (Timer)

เป็นหัวใจของเครื่องเรดาร์ เพราะว่าเป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระยะทาง บางทีเรียก “Master Timer, Timer, Trigger Generator หรือ Keyer” เป็นต้น หลักการของเรดาร์ คือ วัดระยะเวลาที่คลื่นวิทยุเดินทางจากจุดเริ่มต้น และถูกสะท้อนกลับมายังจุดเริ่มต้น Synchronizer จะกำหนดพลังงานคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกไปตามเวลาที่คล่องจองกัน ระหว่างส่งออกไปและรับเข้ามาแล้วไปปรากฏบนจอเรดาร์พร้อม ๆ กันกับที่มีสัญญาณ Trigger ไปป้อนสู่ Transmitter Modulator

วงจรภายใน Synchronizer ที่สร้างสัญญาณ Trigger ก็ครั้งต่อวินาที แล้วไปป้อน Transmitter Modulator เรียกว่า “Master Oscillator” แล้วยังเป็นสัญญาณ Synchronizer ที่จอเรดาร์และระบบต่าง ๆ ที่เหลือใน Transmitter ด้วย ความถี่ของ Master Osc. จะเป็นตัวกำหนด Pulse Repetition Freq.(PRF) ของเรดาร์ทั้งระบบ เช่นที่ Range Marker และคลื่นกวาดของจอเรดาร์ คลื่นกวาด (Sweep Signal) จะเป็นตัวบอกระยะไกลที่สุด หรือระยะทางที่ให้เรดาร์ทำงาน พร้อมทั้งต้องทำงานสัมพันธ์กับ RF.Pulse วิธีช่วยให้พนักงานเรดาร์หาระยะทางของเป้าหมาย จากจุดเริ่มกวาด คือปรับ Range Marker ให้ปรากฏเป็นช่วง ๆ ละ ๕, ๑๐ หรือ ๒๐ ไมล์ เพื่อจ่ายต่อการวัดระยะที่หน้าจอเรดาร์

### ๓.๓ ชุดเครื่องส่งเรดาร์ Transmitter Modulator

ชุดนี้ประกอบด้วยวงจรสร้างรูปคลื่นพัลส์สำหรับส่งออกมา และวงจรส่งความถี่วิทยุเครื่องเรดาร์ บางแบบจะแยก Transmitter กับ Modulator แล้วต่อกันด้วยเคเบิลที่ยอมให้พัลส์แรงไฟสูงผ่านเมื่อมีสัญญาณ Trigger จากชุด Synchronizer จะไปกระตุ้นชุด Transmitter Modulator ให้ส่งคลื่นวิทยุที่มีแรงไฟสูงมากออกมาเป็นห้วงสั้น ๆ ซึ่งอาจจะเป็นแรงไฟสูงถึง ๑๕,๐๐๐ โวลท์ หรือมากกว่านั้น ฉะนั้นการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องเรดาร์ต้องระวังอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูง เพราะอาจเป็นอันตรายถึงกับเสียชีวิตได้

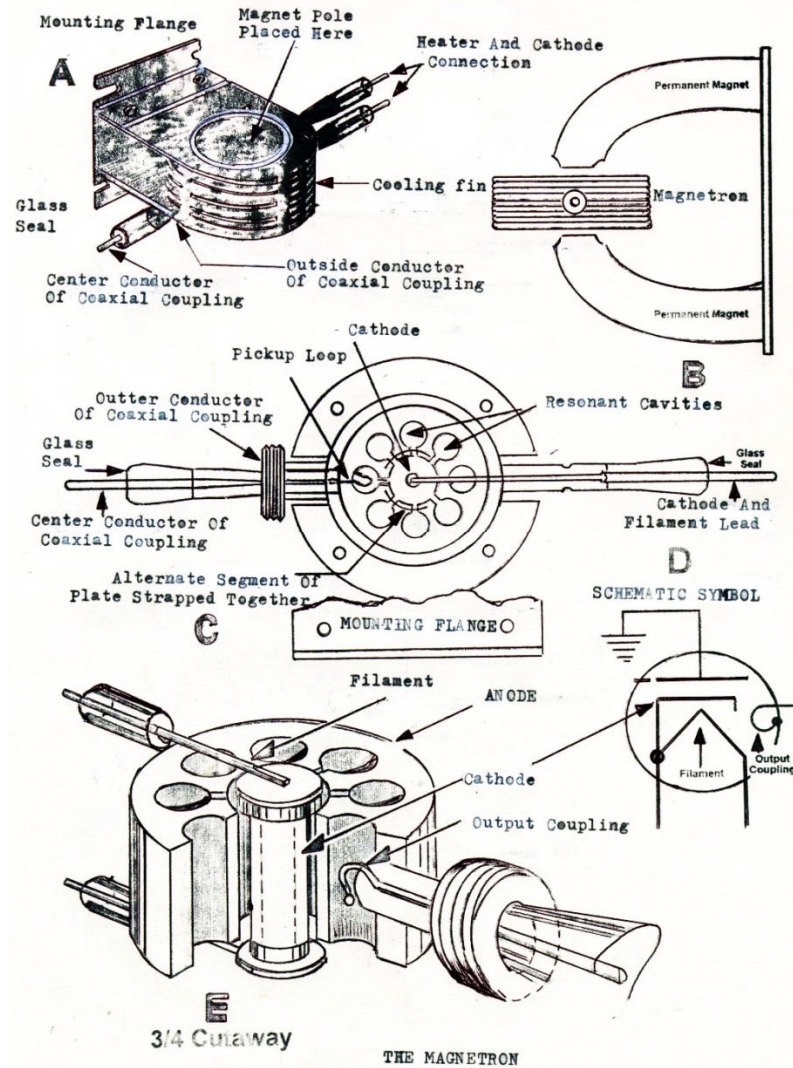
ความกว้างของรูปคลื่นพัลส์ ช่วงเวลาของแต่ละรูปคลื่นขึ้นอยู่กับระบบเรดาร์แต่ละแบบที่ไม่เหมือนกัน กรณีที่ใช้เครื่องเรดาร์ค้นหาระยะทางไกล ต้องใช้ความกว้างของรูปคลื่นพัลส์ระหว่าง ๒ ถึง ๕๐ ไมโครวินาที เพื่อให้สัญญาณมีกำลังสูงสำหรับเครื่องเรดาร์ค้นหาระยะทางไกล, เรดาร์เฝ้าติดตามชิปนาวธ, เรดาร์บังคับการยิงและเรดาร์ควบคุมการบินจะต้องใช้รูปคลื่นที่มีพัลส์แคบประมาณ ๑ ไมโครวินาที หรือน้อยกว่าเพื่อวัดระยะได้แน่นอน

เรดาร์แบบแรก ๆ ใช้ความถี่ประมาณ 100 MHz. มีปัญหาเกี่ยวกับหลอดเครื่องส่งคือ มีอายุการใช้งานสั้น เพราะร้อนจัดและขั้วต่อสายต่อภายในหลอดก็มีปัญหาเกี่ยวกับการเดินทางของอิเล็กตรอน (Transit Time) และค่า Impedance ต่าง ๆ ที่ลดกำลังออกอากาศ ยิ่งใช้ความถี่สูงขึ้นด้วย เช่น เรดาร์ค้นหาในย่านความถี่ 1,250 - 1,350 MHz. (L-Band) และเรดาร์วัดระยะสูงใช้ความถี่ในย่าน 2,700 - 2,900 MHz. (S-Band) เป็นต้น จะใช้หลอดเครื่องส่งแบบโบราณไม่ได้เลย จึงต้องพัฒนาหลอดเครื่องส่งมาเป็นหลอด Magnetrons, Klystrons, Carcinotrons, Traveling wave tubes, amplitrans และ Broad-Band Twystron (2.9-3.1 GHz.)

๓.๓.๑ หลอดแมกนีตรอน

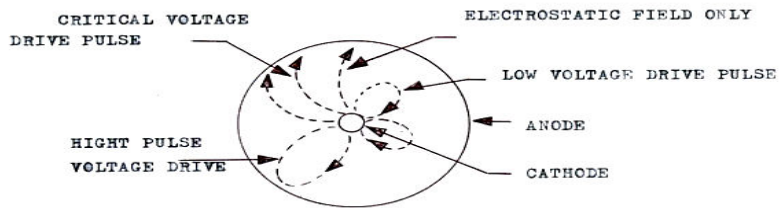
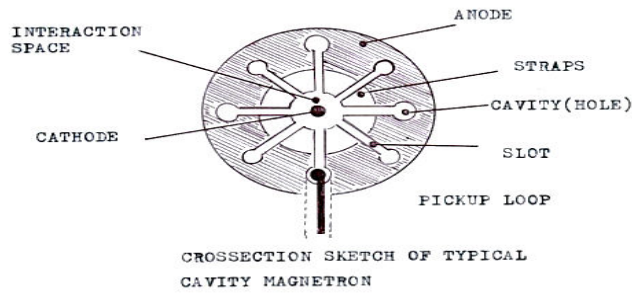
เป็นหลอดไดโอดที่มีหลาย ๆ แอโนด รูปร่างที่ ๑๕ สร้างความถี่สูงที่มีศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ความถี่ขึ้นอยู่กับขนาดของหลอด Cavities ต่าง ๆ อิเล็กตรอนวิ่งออกจาก แคโทดที่อยู่กึ่งกลางมาสู่อานโนดเป็นรูป Cycloid รูปร่างที่ ๑๖ อิเล็กตรอนดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แต่ให้พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ Cavity หลอดแมกนีตรอนจะสร้างความถี่สูงได้ต้องประกอบด้วยสนามทั้งสาม คือ สนามไฟฟ้าสถิตย์ กระแสสลับ, สนามไฟฟ้าสถิตย์ กระแสตรง, สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ประโยชน์ของ Straps มีไว้ป้องกันการเปลี่ยน Mode

หลอด Magnetron จะถูกกระตุ้นให้สร้างรูปคลื่นทันที ที่ได้รับพัลส์แรงไฟสูงช่วงสั้น ๆ ที่เข้ามาแล้วระเบิดพลังงานคลื่นวิทยุกำลังสูง สำหรับส่งออกอากาศ

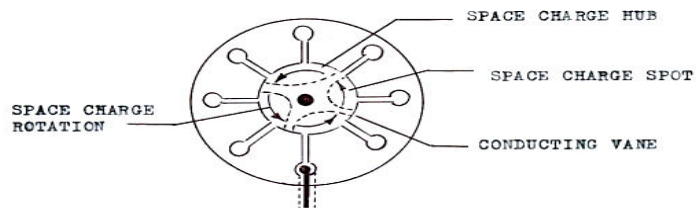


รูปที่ ๑๕ The Magnetron



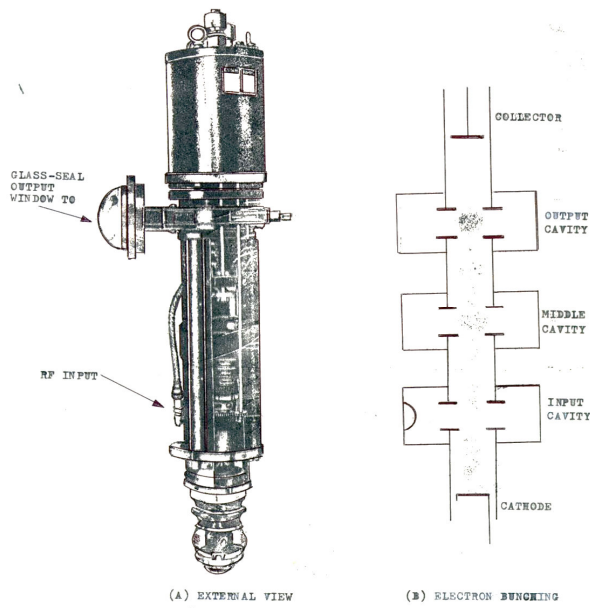


ELECTRON PATHS IN THE MAGNETRON INTERACTION SPACE.

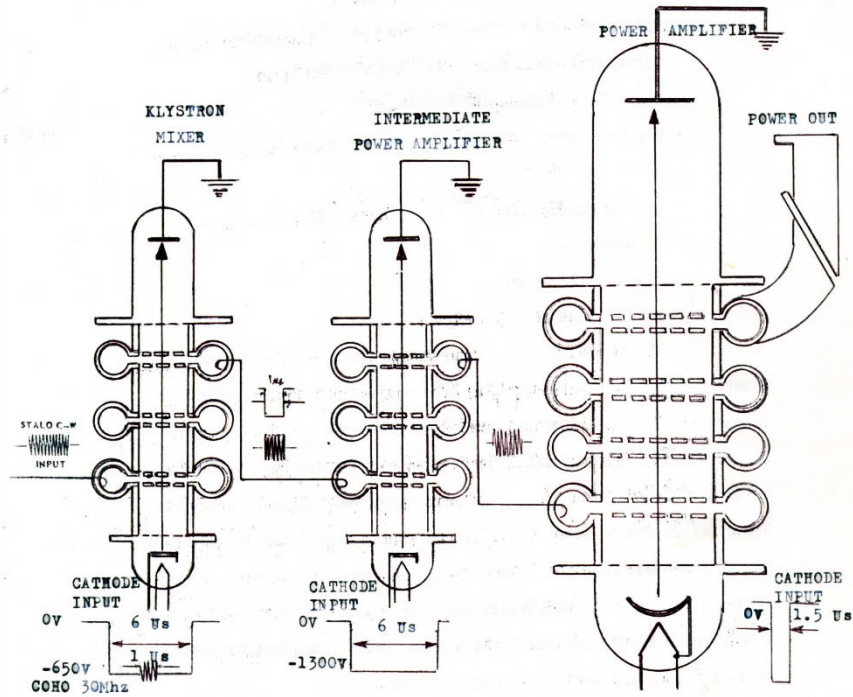


ROTATIGE SPACE CHARGE IN THE OSCILLATING MAGNETRON

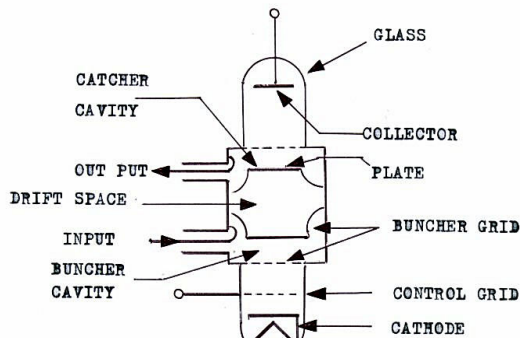
ရုပ်ပုံ ၁၆ Rotating Space Charge In The Oscillating Magnetron



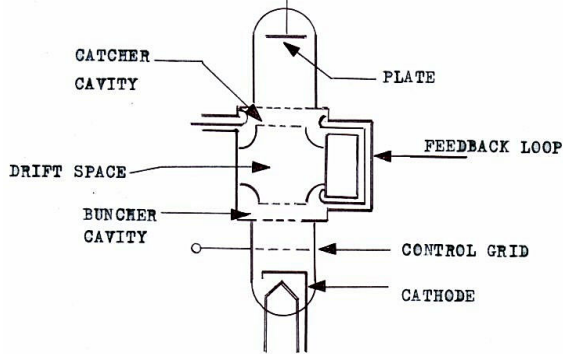
ရုပ်ပုံ ၁၇ Power Amplifier Klystron



រូបទី ១៤ Klystron



A TWO CAVITY KLYSTRON (AMPLIFIER)



រូបទី ១៥ A Two Cavity Klystron

### ๓.๓.๒ หลอด Klystron

สัญลักษณ์ตามรูปที่ ๑๗ ลักษณะมีหลายเควิตี้ใช้สำหรับงาน ขยาย, สร้างรูปคลื่น, หรือผสมคลื่นก็ได้ บางทีก็เรียกว่า “Positive Grid Amplifier” เครื่องเรดาร์ที่ใช้หลอด Klystron นั้นจะต้องได้รับความถี่ที่ต้องการส่งมาจากวงจรสร้างรูปคลื่นที่มีความถี่คงที่ที่สุด แล้วผ่านวงจรกันชน (Buffer), Mixer และ IPA มาก่อนแล้วผ่านวงจร Modulator จึงนำมาขยายที่หลอด Klystron จึงจะได้กำลังออกอากาศได้สูงสุด ข้อเสียของหลอด Klystron คือปรับแต่งยาก ข้อดีกว่าของหลอด Klystron คือ

- ชั่วโหม่งในการทำงานนานกว่าหลอดแมกนีตรอน
- สัญญาณ COHO ใช้ประโยชน์ได้ทั้งในระบบเครื่องส่ง และเครื่องรับแบบ MTI
- ไม่จำเป็นต้องมีวงจร AFC เพราะไม่มีปัญหาเรื่อง Frequency Drift
- ใช้ขยายความถี่สูง ๆ ได้ดีการรบกวนมีน้อย, กำลังส่งสูง ข้อยุ่งยากในการผสมคลื่นมีน้อย มี Phase Coherence ดี

- ใช้งานปกติมีกำลังส่งสูงสุด และกำลังส่งโดยเฉลี่ยดีกว่าหลอดแมกนีตรอน

- หลอด Klystron มีความถี่คงที่เป็นผลให้ระบบ MTI (Moving Target Indicator) ทำงานได้สมบูรณ์ส่วนประกอบของหลอด Klystron มีดังนี้คือ

- ปืนยิงอิเล็กตรอน = Cathode กริดบังคับ + Accelerating Grid ซึ่งอาจเรียกว่า “Beam Source” ก็ได้ มีศักย์เป็นบวก
- Drift Tube เป็นท่อสำหรับลำอิเล็กตรอนผ่าน
- Buncher Cavity ส่วนสำหรับผสมคลื่นแบบ Velocity Modulated มีศักย์เป็นลบ
- Catcher Cavity เป็นส่วนที่จะรับกำลังงาน จากลำอิเล็กตรอน
- Collector
- Coupling Loops

การทำงานของหลอด Klystron

เมื่อลำอิเล็กตรอนหลุดจากแคโทดพุ่งไปหา Collector กริดบังคับทำหน้าที่ปรับศูนย์เพลิง (Focus Electrode) ด้วยอิเล็กตรอนช่วงบวกของสัญญาณจะถูกกริดเร่ง (Accelerating Grid) เพิ่มความเร็วปะทะอยู่ที่กริดเร่ง พอกริดเร่งเปลี่ยนขั้วเป็นลบ ตามวงรอบของวงจรจำนวนอิเล็กตรอนที่ตามมาจะช้าลงทันที ส่วนที่ตามหลังมาก็จะออรวมกันเป็นกลุ่ม ทำให้อิเล็กตรอนพุ่งมาเป็นห้วง ๆ ผ่านไปตาม Drift Tube จนถึง Catcher Cavity กลุ่มอิเล็กตรอนที่เป็นห้วง ๆ จะเกิด Oscillate ใน Cavity สอดคล้องกับความถี่ Resonant ในการถ่ายทอดกำลังงานออกไปใช้งานโดยผ่าน Coupling Loop ใน Catcher Cavity ถ้าใช้หลอด Klystron เป็นวงจร Oscillator จำเป็นต้องการวงจร Feed Back ขึ้นมาโดยมี Phase ของการ Feed Back เข้า Buncher Cavity ขึ้นอยู่กับความยาวของสาย Coaxial ที่ Coupling ระหว่างวงจร Cavity ทั้งสอง

Traveling-Wave Tube (TWT) หลอดนี้ใช้งานขยายแถบคลื่นกว้าง, กำลังออกพอประมาณ, มีคลื่นรบกวนต่ำเพราะมีประสิทธิภาพต่ำในเครื่องเรดาร์ป้องกันภัยทางอากาศ รูปที่ ๒๐

เป็นรูปตัดแสดงโครงสร้างภายใน ของ TWT, TWT ก็เหมือนกับหลอดขยายกำลังคลื่นวิทยุอื่น ๆ มีระบบพลังงาน ๒ ส่วน คือ

๑. พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงของอิเล็กตรอนจากปืนยิงอิเล็กตรอน พุ่งผ่านไปตามความยาวของหลอด ไปหาคอลเล็กเตอร์

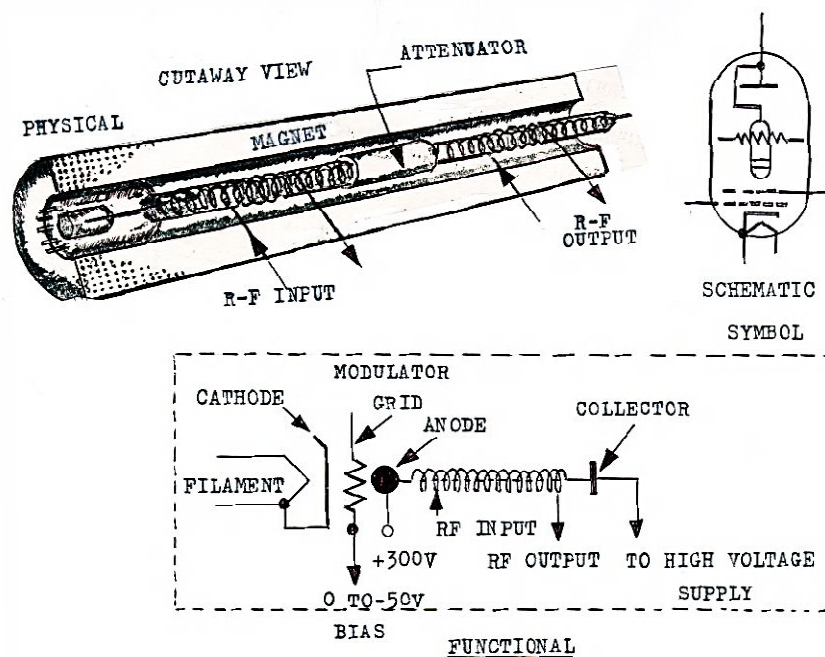
๒. พลังงานคลื่นวิทยุถูกป้อนเข้าท่อส่งคลื่นใกล้กับปืนยิงอิเล็กตรอนผ่านย่านปฏิกิริยาภายในและนำออกมาใกล้คอลเล็กเตอร์ที่ท่อส่งคลื่นที่มี  $Z_0$  แบบ Non-resonant จึงไม่มี Standing Wave อิเล็กตรอนจึงพุ่งไปทางเดียว สนามไฟฟ้าแนวเดียวกับทางยาวของ TWT

- สนามแม่เหล็ก TWT ทำหน้าที่ปรับศูนย์เฟส (Focus)

- ขดลวดชะลอคลื่นจะลดความเร็วของคลื่นวิทยุ ที่พุ่งผ่านขดลวดนี้

ซึ่งอยู่ภายใน TWT คลื่นวิทยุออกมาจึงมีลักษณะเป็นห้วง ๆ ฉะนั้น TWT จึงมีความร้อนภายในหลอดมาก เนื่องจากการเสียดทานระหว่างคลื่นวิทยุ กับขดลวดชะลอคลื่นดังกล่าว ที่ทำหน้าที่แทนควิตันนั่นเอง ผลก็คือทำให้เพิ่มแถบคลื่นใช้งานได้กว้างขึ้น

- Attenuator ภายใน TWT มีประโยชน์ในการเพิ่มเกณฑ์การขยายของหลอด นอกเหนือจากเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่คอลเล็กเตอร์



รูปที่ ๒๐ Traveling Wave Tube

Twystron เป็นคำผสมกันระหว่าง TWT กับ Klystron คือ เป็นหลอดขยายคลื่นไมโครกำลังสูงมาก เพราะเป็นการรวมภาคอินพุตสัญญาณเข้าของหลอด Klystron กับภาคเอาต์พุตทางสัญญาณออกของ Traveling-Wave Tube หลอด Twystron จึงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และมีแถบคลื่นใช้งานกว้าง

ส่วนประกอบที่สำคัญในการส่งคลื่นวิทยุออกอากาศนี้ คือ ระบบระบายความร้อน และระบบอัดอากาศในท่อส่งคลื่น จะต้องมียุณหภูมิและมีความกดดันอากาศคงที่ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงไฟกระชอกในท่อส่งคลื่นภายในระบบอัดอากาศจะต้องมีชุดปั๊มลม, ชุดกรองอากาศ และชุดกรองความชื้น (Dehydrator) ชุดต่าง ๆ ดังกล่าวจะต้องมีการตรวจสอบเสมอ

### ๓.๔ ชุดสายอากาศ

ปกติจะทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสู่อากาศ หรือรับคลื่นจากอากาศสายอากาศที่ดีจะต้องมี Characteristic Impedance ( $Z_0$ ) เท่ากับสายส่งกำลังหรือท่อส่งคลื่น และต้องมีชุดสะท้อนคลื่น (Reflector) มาประกอบกับ สายอากาศเพื่อเพิ่มกำลังรับ-ส่งสัญญาณ และช่วยให้หาทิศทางและมุมเงยของเป้าหมายได้แน่นอน ระบบสายอากาศที่สมบูรณ์จะต้องประกอบด้วยชุดขับเคลื่อน และชุดควบคุมการขับเคลื่อนในสายอากาศที่เป็นทิศทางจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- มุมของลำคลื่นที่ส่งออกไป ( Beam Angle)
- เฟอร์เซ็นต์ของ Side Lobe ที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ประมาณ ๑๐ %
- กำลังการขยายของสายอากาศ
- รูปแบบของจานสายอากาศ (Reflector)

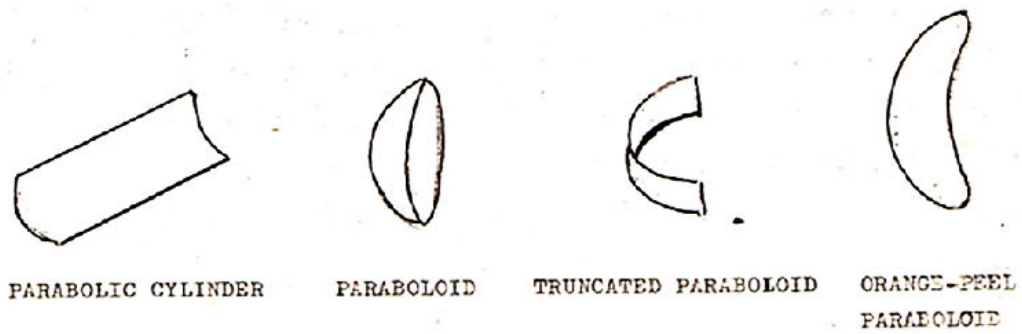
ระบบสายอากาศที่มีการขับเคลื่อนจะประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

- จานสายอากาศ (Reflector)
- ตัวป้อนกำลังงาน และรับกำลังงานจากสายอากาศ (Feed Horn)
- ข้อต่อในการส่งผ่านกำลังงานในส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotary Joint)
- อุปกรณ์ตัดต่อกำลังงานเพื่อแยกการส่ง และรับกำลังงาน (Duplexer)
- ระบบ SYNCHRO และ / หรือ ACP (Azimuth Change Pulse)

Reflector ทำหน้าที่สะท้อนกำลังงานที่ส่งจาก FeedHorn ออกไปสู่บรรยากาศให้ได้รูปแบบและทิศทางตามต้องการรวมถึงการรวบรวมสัญญาณที่สะท้อนกลับเข้ามาในระบบเรดาร์ส่วนมาก Reflector จะเป็นแบบที่มีพื้นผิวราบเรียบ เพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นเป็นไปอย่างคงที่และได้รูปแบบตามต้องการ

จานสายอากาศที่นิยมใช้ทั่วไปจะเป็นแบบ PARABOLIC ซึ่งมีอยู่ ๔ แบบ ด้วยกัน คือ

- PARABOLIC CYLINDER
- PARABOLOID
- TRUNCATED PARABOLOID
- ORANGE-PEEL PARABOLOID



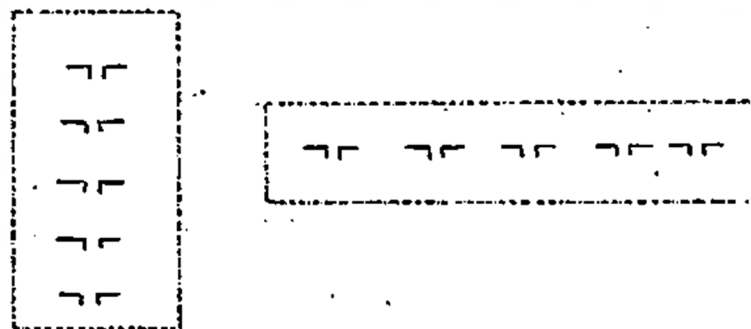
รูปที่ ๒๑ Parabolic Antenna

สายอากาศแบบ Parabolic มีการนำมาใช้งานโดยทั่วไป การกระจายกำลังอาศัยการป้อนกำลังงานจาก Feed Horn ป้อนเข้าที่จุดศูนย์รวมของจานสายอากาศ คลื่นสัญญาณที่สะท้อนออกไปจะเป็นแนวขนานซึ่งกันและกัน และจะตั้งฉากกับแนวแกนของสายอากาศ หมายถึงว่า พลังงานที่สะท้อนออกไปมีความสัมพันธ์ทางมุมเดียวกันนอกจากสายอากาศแบบ Parabolic ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสายอากาศอีกหลายชนิดที่นำมาใช้งานเช่นเดียวกัน เช่น สายอากาศแบบ Lens และสายอากาศแบบ Array เป็นต้น

สายอากาศแบบ Array เป็นสายอากาศอีกแบบหนึ่งซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน สายอากาศแบบ Array จะประกอบด้วยตัวแพร่กระจายคลื่น (Element) หลาย ๆ อันนำมาวางเรียงกันในระยะเท่า ๆ กันใช้ความสัมพันธ์ทางมุม (Phase) และ Amplitude ของสัญญาณป้อนให้กับตัวแพร่กระจายคลื่นแต่ละอันเพื่อควบคุมการแพร่กระจายคลื่นให้ได้รูปแบบของคลื่นที่กระจายออกไปตามต้องการ สายอากาศแบบ Array ที่ใช้ทั่วไปมี ๒ แบบ คือ

- Linear Array

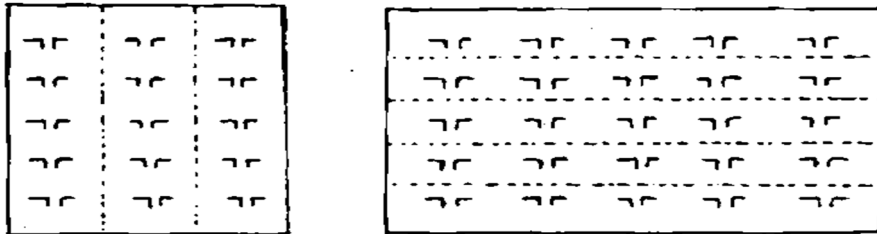
Linear Array เป็นการนำเอาตัวแพร่กระจายคลื่น (Element) หลาย ๆ อันนำมาจัดวางเรียงกันเป็นแนวเส้นตรง ในระยะเท่า ๆ กันในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง



รูปที่ ๒๒ Linear Array

### - Planar Array

Planar Array ประกอบด้วย Linear Array ตั้งแต่ ๒ ชุดขึ้นไป นำมาจัดวางเรียงกัน หรือซ้อนกัน หรือใช้ Linear Array หลาย ๆ อันจัดวางเรียงผสมกันขึ้นอยู่กับารออกแบบ หรือ จุดประสงค์ในการใช้งาน



รูปที่ ๒๓ Planar Array

**Lens Antenna** นิยมใช้กับเรดาร์คลื่นสั้น (Short - Wave) โดยอาศัยคุณสมบัติของ Lens ทำหน้าที่รวมคลื่นเข้าด้วยกันที่จุด Focus เหมือนกับการรวมตัวของแสงเมื่อผ่าน Lens

**FeedHorn** เป็นตัวป้อนและรับกำลังงานจากจุดศูนย์รวมของจานสายอากาศการติดตั้ง Feed Horn จำเป็นที่จะต้องปรับแต่งให้กำลังที่ส่งออกพุ่งเข้าจุดศูนย์รวมของจานสายอากาศพอดี เพื่อให้ได้กำลังงานและทิศทางที่ถูกต้องถ้า Feed Horn ติดตั้งอย่างไม่ถูกต้องแล้วกำลังงานที่จานสายอากาศที่ส่งออกจะไปจ่ามุมทิศที่แพร่กระจายคลื่นก็ผิดพลาด ทำให้การจับเป้าหมายอาจผิดพลาด

**Rotary Joint** ระบบเรดาร์ทั่วไป จานสายอากาศจะเคลื่อนที่ตลอดเวลาอาจเป็นไปในลักษณะของการหมุนรอบตัวหรือระดก ขึ้น-ลง ซึ่งการส่งกำลังงานออกไปหรือรับเข้ามาจำเป็นที่จะต้องส่งผ่านออกสู่จานสายอากาศดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ Rotary Joint ซึ่งเป็นส่วนต่อที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษให้มีการสูญเสียกำลังงานน้อยที่สุดในส่วนของข้อต่อนี้ขณะจานสายอากาศกำลังเคลื่อนที่

**ระบบ Synchro และ/หรือ ACP (Azimuth Change Pulse)** เป็นระบบที่มีขึ้นเพื่อให้สายอากาศทำงานสัมพันธ์กับระบบ Electronic ทั้งหมด โดยเฉพาะทางมุมทิศ และเวลาให้เริ่ม ณ ที่เวลาหรือตำแหน่งเดียวกัน มิฉะนั้นเส้นกวาดบนจอเรดาร์จะมีมุมทิศที่ผิดพลาดแตกต่างกับ มุมทิศของสายอากาศจริง

**ระบบ Synchro** ใช้ Synchro Motor ต่อทางกลกับการหมุนไปของสายอากาศ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณ AC. ซึ่งมีความแตกต่างทางมุมสายอากาศหมุนไป ๑ รอบ ก็จะได้สัญญาณ AC. 1 Cycle หรือ ๓๖๐ องศา ซึ่งสามารถนำสัญญาณนี้ไปกำหนดมุมทิศได้

**ระบบ ACP** เป็นการใช้ Shaft Encoder ซึ่งกำหนดข้อมูลของมุมทิศใน ๑ รอบไว้พร้อมแล้ว เพียงแต่นำไปต่อทางกลกับการหมุนของสายอากาศก็จะได้ข้อมูล (Data) เป็น Digital มาใช้งานและยังมี ARP ซึ่งเป็น Pulse กำหนดจุดเริ่มต้นของแต่ละรอบคือ North Mark ใช้ร่วมอยู่ด้วย

**Antenna Gain** กำลังการขยายของสายอากาศ (Ant. Gain) เป็นการจัดกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางที่กำหนด

$$G = \frac{4\pi Ae}{\lambda^2} = \frac{4\pi Pa A}{\lambda^2}$$

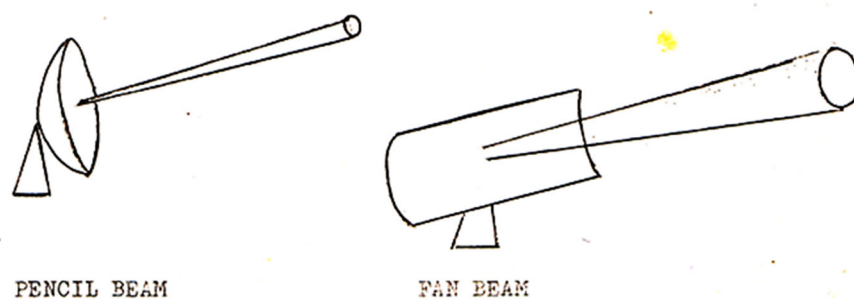
$\lambda$  = Wave Length

A = Physical Area of Antenna

Pa = Antenna Aperture Efficiency

Ae = Pa A

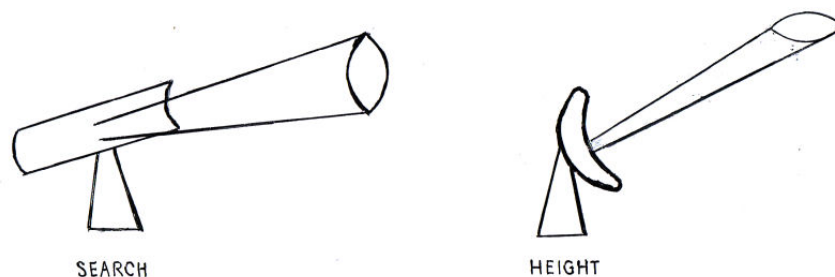
**กระสวยลำคลื่น (Beam)** กระสวยลำคลื่นในการส่งออกอากาศมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน และอุปกรณ์ โดยทั่วไปจะเป็นแบบ Fan Shape และ Pencil Beam



รูปที่ ๒๔ Beam Pattern

Pencil Beam Pattern จะมีความกว้างของ Beam น้อยมาก ในการใช้งานจะใช้วัดทั้งทางด้านมุมทิศ และความสูงในเวลาเดียวกัน เช่น Target – Tracking Radar ใช้ในการควบคุมการยิง เป็นต้น

Fan Beam Pattern ความกว้างของ Beam จะมาก ใช้ในเรดาร์ค้นหาระยะไกล เพื่อให้จับเป้าหมายได้มาก



รูปที่ ๒๕ Fan Beam Pattern ในเรดาร์ค้นหา และ เรดาร์วัดความสูง

ความกว้างลำคลื่นทางระดับ

$$\phi = 68 \lambda \text{ เรเดียน}$$

$$\phi = \text{มุมของความกว้างของลำคลื่น}$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่น}$$

$$d = \text{Ant. Aperture}$$



- ในเรดาร์ค้นหา (Search) จะมีความกว้างของกระสวยลำคลื่น (Beam) ทางแนวตั้ง (Vertical) กว้างและมีความกว้างทางแนวระดับ (Horizontal) แคบ เพื่อให้มีพื้นที่ในการจับเป้าหมายในแต่ละมุมที่สายอากาศกวาดไปมา และการแยกเป้าหมายใกล้เคียงในระดับเดียวกันได้ดี

- ในเรดาร์วัดความสูง (Height) จะมีมุมทางแนวตั้ง (Vertical) แคบ และ มุมทางระดับ (Horizontal) กว้างเพื่อการวัดความสูงที่แน่นอน

อัตราการหมุนของสายอากาศ (Rotation Rate) มีหน่วยเป็น องศาต่อวินาที หรือ รอบต่อนาที

$$\text{อัตราการหมุนของสายอากาศ} = \frac{360^\circ}{\text{Scan Time}}$$

เมื่อ Scan Time คือ เวลาที่ใช้ไปในการกวาด ๑ รอบ (๓๖๐ °)

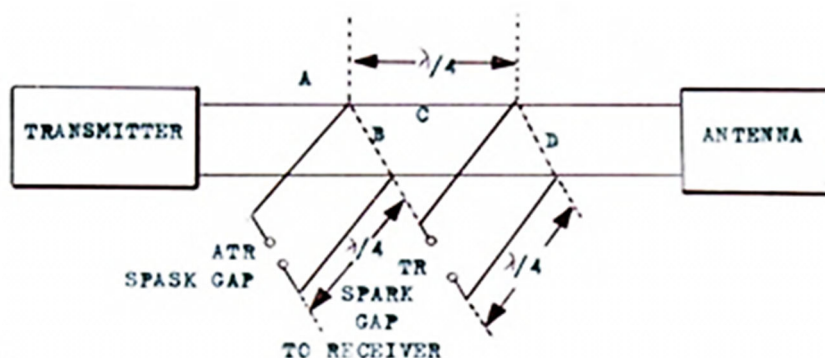
#### ตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{AZ. Beam Width, } \emptyset &= 1^\circ \\ \text{Scan Time} &= 10 \text{ sec.} \\ \text{R Max.} &= 243 \text{ NMI} \\ \text{PRT} &= 2 \text{ R / C} \\ &= 3 \text{ Msec.} \\ \text{PRF} &= 333 \text{ PPS.} \\ \text{ดังนั้นอัตราการหมุน} &= \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ / \text{sec.} \end{aligned}$$

$$\text{จำนวน Pulse ต่อ การหมุนสายอากาศ ๑ รอบ} = \text{PRF} \times \text{Scan Time}$$

$$\text{จำนวนลำคลื่น ต่อ การหมุนสายอากาศ ๑ รอบ} = \frac{360^\circ}{\emptyset} = 360 \text{ ลำคลื่น}$$

**Radome** คือฝาครอบสายอากาศทำด้วยพลาสติกที่มีเนื้อวัสดุแข็ง และหนาเป็นพิเศษ ทำหน้าที่ป้องกันสายอากาศจากลมแรง, หิมะ และความชื้นของสายอากาศ ขนาดของ Radome ขึ้นอยู่กับชนิดของเรดาร์ และการใช้งาน ตัวอย่างเช่น Radome ของเรดาร์ที่ติดตั้งบนลำตัว บ.แบบโบอิง ๗๐๗ ของ ทอ.อเมริกา ระบบ AWACS (Air Borne Warning Air Craft System) สูง ๖ ฟุต, เส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๑ ฟุต Radome ของเรดาร์ภาคพื้นบางแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลางถึง ๑๓๐ ฟุต เป็นต้น



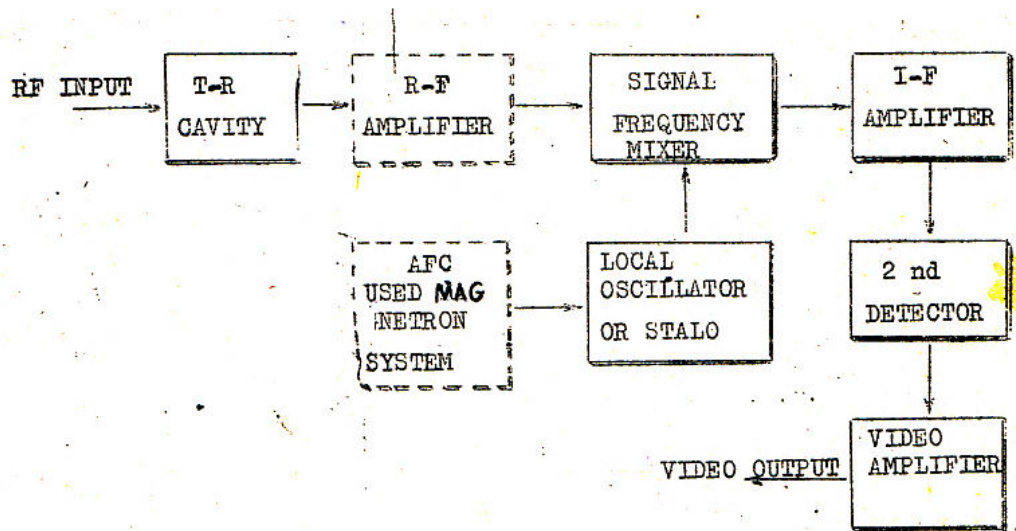
รูปที่ ๒๖ Basic Duplexing System

### ๓.๕ ชุด Duplexer

ทำหน้าที่เป็น Electronic Switch ขณะทำการส่ง จะยอมให้พลังงานความถี่วิทยุที่มีกำลังแรงมากออกจากสายอากาศ แต่ไม่ให้พลังงานความถี่วิทยุที่มีกำลังแรงมากนั้นเข้าไปในเครื่องรับขณะทำการส่ง Spark Gap ทั้งคู่จะ fire เป็นเหตุให้ลัดวงจรที่ Transmit Receive และที่ Antitransmit-Receive ตรวจจับความยาวคลื่นขนาด  $\lambda/4$  แต่ไม่ลัดวงจรคือ มี Characteristic Impedance สูงสุดที่ปลายสายทั้งคู่ เป็นกำลังสะท้อนป้อนแก่สายอากาศ โดยที่ไม่มีการสูญเสียกำลัง และไม่พลังงานเข้ามาในสายส่งกำลังของเครื่องรับแต่ขณะที่ทำการรับสัญญาณสะท้อนกลับมานั้นเป็นสัญญาณที่มีกำลังอ่อนมากจึงไม่พอที่จะเกิด fire ที่ Spark GAP ได้ สภาพดังกล่าวที่วงจร ATR จึงเหมือนกับเปิดวงจรตลอดปลายส่งกำลังที่  $\lambda/4$  แต่ลัดวงจรที่จุด AB ซึ่งเท่ากับเปิดวงจรที่ CD สัญญาณที่เข้ามาจึงเหมือนลัดวงจรก่อนเข้าเครื่องส่งแต่เปิดเส้นทางเข้าเครื่องรับ โดยไม่มีการสูญเสียกำลัง

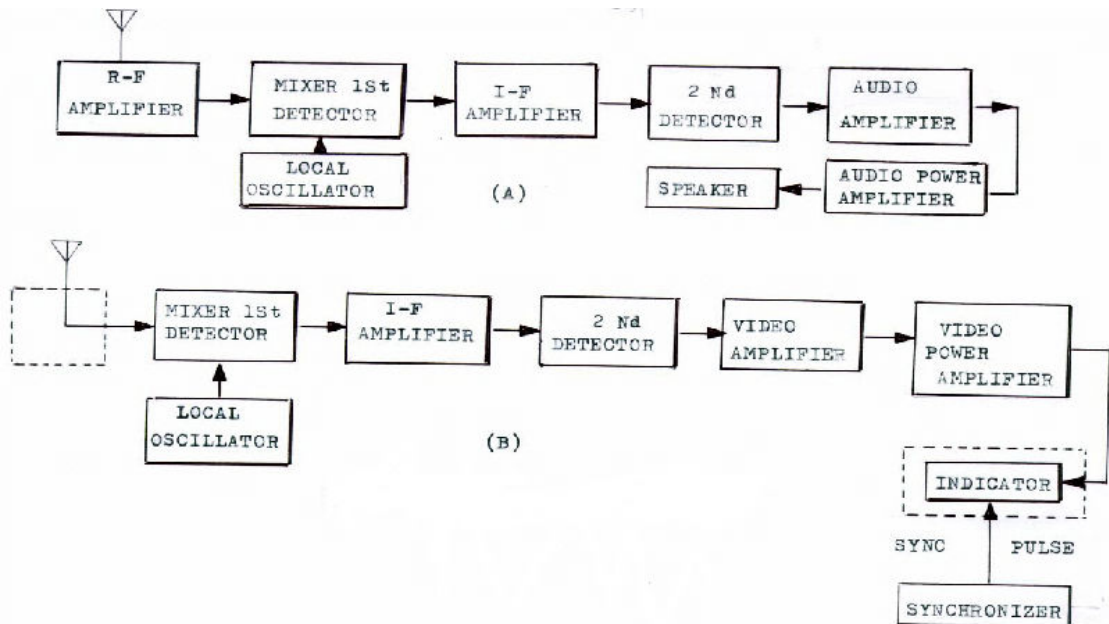
### ๓.๖ ชุดเครื่องรับเรดาร์

คือ เครื่องมือในการรับสัญญาณกำลังอ่อน ๆ ที่สะท้อนกลับมาเข้าสายอากาศได้ สัญญาณอ่อน ๆ นี้ อาจจะมีเพียง ๒-๓ ไมโครโวลต์ แล้วถูกขยายอย่างมากจนได้รูปของ Video Pulse ไปป้อนที่จอเรดาร์ แผนภูมิเครื่องรับเรดาร์จะต้องมีลักษณะอย่างน้อยตาม รูปที่ ๒๗ ซึ่งล้วน เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ธรรมดาคล้ายกับเครื่องรับวิทยุ หรือโทรทัศน์ แต่เรดาร์ต้องการวงจรพิเศษต่อการรบกวนต่าง ๆ เช่น วงจร Sensitivity Time Control (STC), Detector Balance Bias (DBB), Automatic Video Noise Limiting (AVNL), Fast Time Constant, Instantaneous Automatic Gain Control (IAGC) และวงจร Sidelobe Suppression เป็นต้น

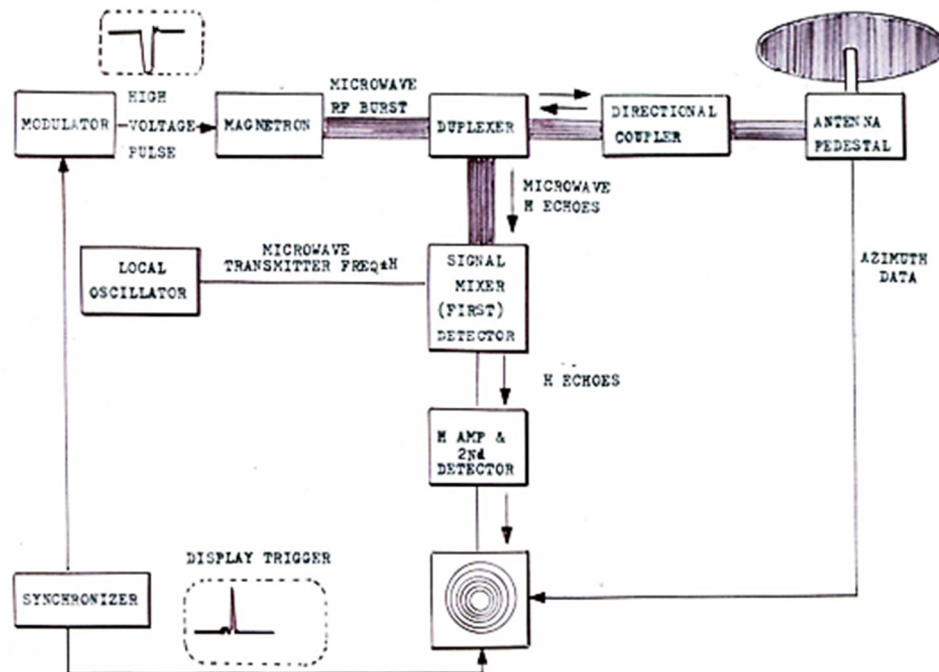


รูปที่ ๒๗ Block Diagram RF A Normal Receiver

เครื่องรับมีลักษณะเป็นแบบ Superheterodyne เหมือนเครื่องรับโทรทัศน์ ดูแผนผังตามรูปที่ ๒๘



รูปที่ ๒๘ Superheterodyne Receiver



รูปที่ ๑๔ แผนผังของระบบเรดาร์เบื้องต้น

ตามรูปที่ ๑๔ จะเห็นว่าเครื่องรับเรดาร์ต่อกันกับชุด Synchronizer โดยผ่านจอร์เนตอร์ทั้งนี้เพื่อใช้จอร์เนตอร์รับส่งสัญญาณ Sync.Pulse และ TR.Switch จะปิดเส้นทางเข้าเครื่องรับจากการทำงานของเครื่องส่งทุกครั้งในห้วงเวลาสั้น ๆ เท่ากับความกว้างของ Pulse ที่ส่งออกอากาศ เพราะพลังความถี่สูงอาจเล็ดลอด หรือทะลักเข้ามาทำให้การจับเป้าหมายระยะใกล้มีขีดจำกัดวิธีการลดขีดจำกัดนี้คือสร้างคลื่นประตูช่วงรับคลื่น (Receiver Gate) ให้ทำงานคล้องจองกับชุดสร้างสัญญาณ Trigger ในชุด Timer คุณสมบัติที่ต้องการ ๔ ประการของเครื่องรับเรดาร์คือ Reliability, Sensitivity, Bandwidth และ Selectivity ตลอดจน Recovery Time

- Reliability ความเชื่อถือได้ปกติแล้วเครื่องเรดาร์จะต้องทำงานได้ตลอดเวลาจะหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุง ก็ต้องทำตามข้อกำหนดการซ่อมบำรุงเท่านั้นหากต้องหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุงนอกข้อกำหนดการบ่อยๆหมายถึงมีชั่วโมงเฉลี่ยการใช้งานต่ำ (MTBF = Mean Time Between Function) หรือมีชั่วโมงเฉลี่ยการซ่อมบำรุง (MTTR = Mean Time to Repair) สูง แสดงว่าเครื่องมีสภาพไม่น่าไว้วางใจ การออกแบบและการประกอบชิ้นส่วนในชุดต่าง ๆ ไม่ทนทานทั้งทางวงจรไฟฟ้าและชิ้นส่วนเคลื่อนไหวทางกลศาสตร์ เป็นต้น ยิ่งกว่านั้นเครื่องเรดาร์ที่ติดตั้งใช้งานในพื้นที่มีความร้อนจัด หนาวจัด, ความชื้นสูง ฯลฯ ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เครื่องเรดาร์ชำรุด และมีปัญหาขัดข้องได้ ทั้งที่ช่างซ่อมบำรุงก็ได้ทำการซ่อมบำรุงตามกำหนดการที่กำหนดไว้แล้วก็ตามอาจช่วยได้มากถ้ามีการตรวจและควบคุมคุณภาพตามระยะเวลาดำเนินการตามแผนการตรวจซ่อมระดับโรงงานที่ กวก.ส.ทอ.บ.นอ. กำหนดไว้ให้อย่างกวัดขันและต่อเนื่อง

- Sensitivity ความไวในการรับสัญญาณและอัตราส่วนของสัญญาณต่อคลื่นรบกวน (Signal To Noise Ratio) ต้องมีความสัมพันธ์กัน คลื่นรบกวนที่เกิดจากสภาพอากาศและสัญญาณรบกวนต่างๆ (Interference) รวมทั้ง Fluctuation Noise (คลื่นรบกวนจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ หรือวัตถุซึ่งตัวนำในวงจรต่างๆ) และ Avoidable noise ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของรีเลย์ มอเตอร์ เย็นเนอเรเตอร์ แหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าที่กรองไม่เรียบ ตลอดจนการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ต่างๆ ปัจจุบันเครื่องรับสมัยใหม่ใช้ Paramatic Amplifier แก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแล้วปรับปรุงความไวของเครื่องรับได้ผลดียิ่งขึ้น

- Band Width and Selectivity คือ การสนองต่อความถี่ (Frequency Response) คิดจากจุด 0.707 ของค่าสูงสุดของความถี่แตกต่างระหว่างจุด คือความกว้างแถบคลื่น (Bandwidth) และการเลือกรับ (Selectivity) จะเพิ่มขึ้นถ้าความกว้างแถบคลื่นลดลง มีผลให้แยกเป้าหมายได้ละเอียดขึ้น คือเป้าหมายที่ปรากฏบนจอไม่พร่า

สูตรหาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของพัลส์ และความกว้างของแถบคลื่นในวงจรขยายคือ

$$BW = \frac{Fr}{Q}$$

BW = ความกว้างของแถบคลื่นภาพหน่วยวงจรต่อวินาที

Q = คุณภาพของวงจร

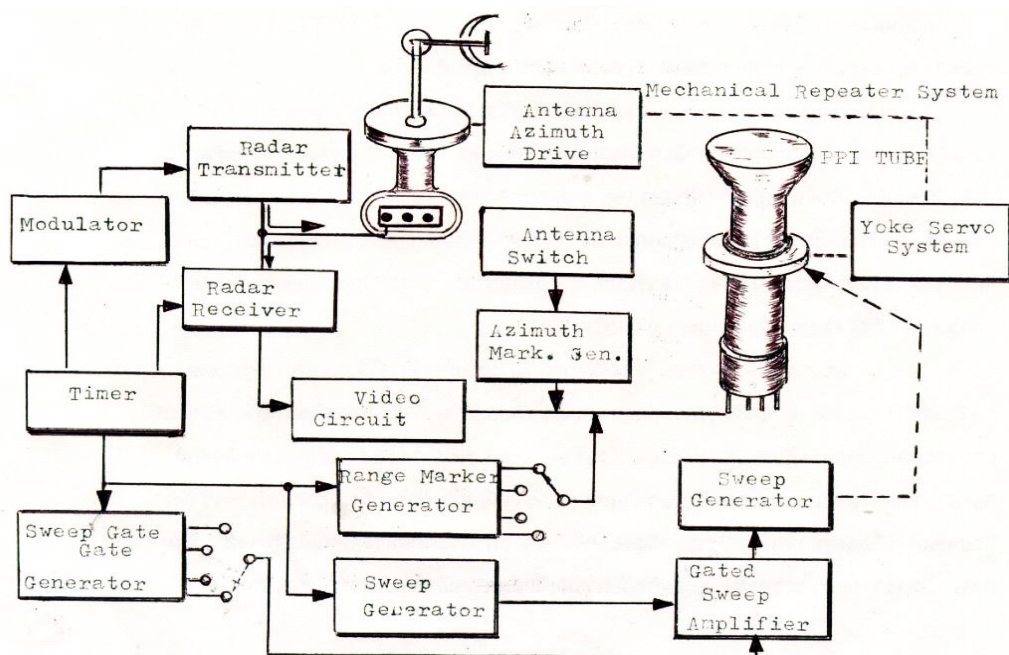
Fr = ความกว้างของความถี่ตอบสนอง (Frequency Response) ในวงจรขยาย

- Recovery Time คือ เวลาที่วงจรเครื่องรับเรดาร์ ต้องการปรับตัว หรือคืนสู่สภาพทำงานปกติ หลังจากที่ได้รับสัญญาณแรงๆ จากเครื่องใกล้เคียง เครื่องเรดาร์ที่ออกแบบดีจะมี Recovery สั้นมาก วงจรสำหรับลดสัญญาณแรงๆ ที่เข้ามาได้แก่ วงจรปรับเกณฑ์การขยายโดยอัตโนมัติ (AGC = Automatic Gain Control) วงจรรักษาเวลาคงที่โดยรวดเร็ว (FTC = Fast Time Constant) และ วงจรปรับเกณฑ์การขยายโดยอัตโนมัติชนิดนับปล้น (IAGC = Instantaneous Automatic Gain control) วงจรดังกล่าวจะตัดสัญญาณรบกวน เช่น Ground Clutter หรือรักษาระดับของ Noise ไว้

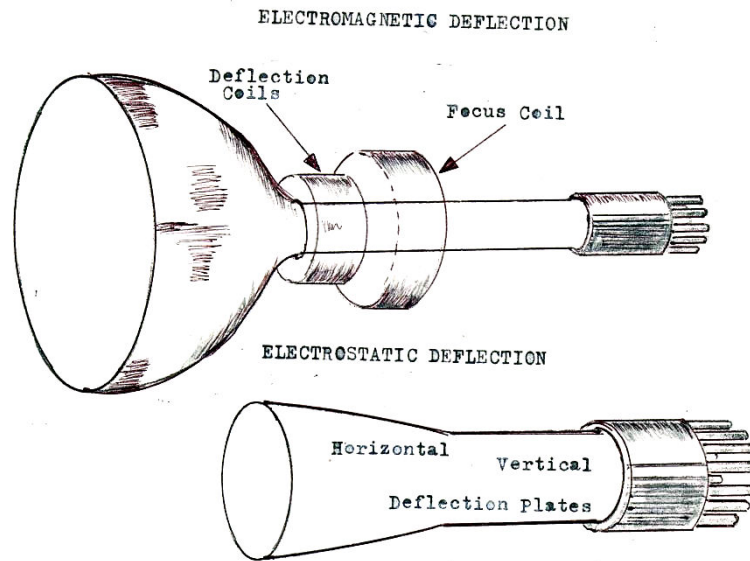
### ๓.๗ จอเรดาร์

เป็นชุดแสดงออกของสัญญาณภาพที่หลอดภาพ (CRT) จะมีภาพทุกครั้ง ที่มีการจับเป้าหมาย เข้ามาที่สายอากาศ หลอดภาพที่ทำหน้าที่เป็นจอเรดาร์บนอากาศยานมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา มักใช้หลอดภาพแบบ Electrostatic ถ้าติดตั้งบนเรือใหญ่หรือสถานีเรดาร์พื้นดิน ก็มักจะใช้หลอดภาพแบบ Electromagnetic ที่จอเรดาร์จะเป็นจุดสั่งการและควบคุมการใช้งานของเครื่องเรดาร์ ช่างซ่อมจะตรวจสอบการทำงานของเครื่องเรดาร์หรือค้นหาจุดเสียเพื่อทำการซ่อมบำรุง ก็ต้องเริ่มต้นที่จอเรดาร์ก่อน

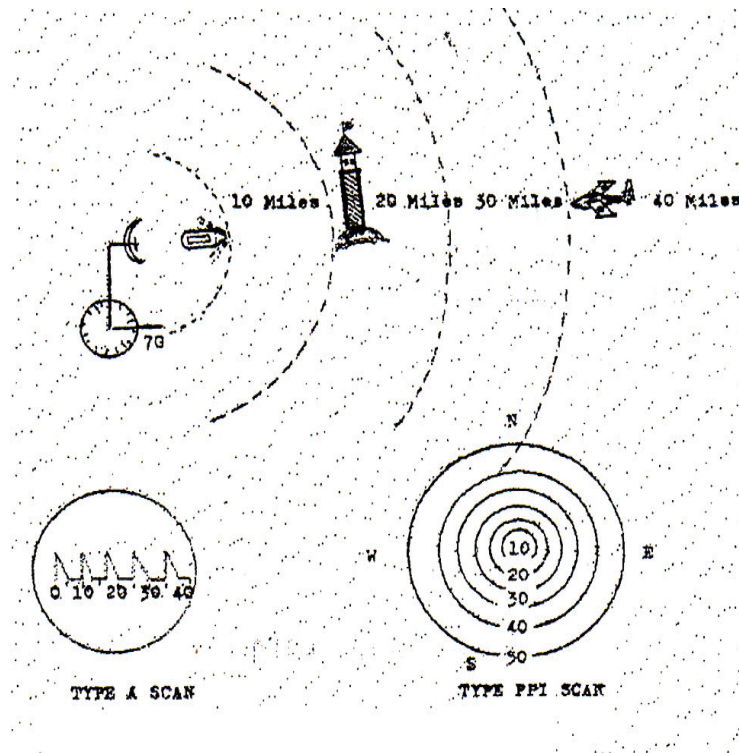
ตามรูปที่ ๒๙ แสดงการต่อร่วมกันของจอเรดาร์กับชุดต่าง ๆ ของระบบเรดาร์ค้นหาที่ใช้ จอเรดาร์แบบ PPI ออกแบบสร้างไว้ให้พนักงานเรดาร์ ได้อ่านตำแหน่งของเป้าหมาย, จำนวนของเป้าหมาย, ระยะทาง, ความเร็ว, ทิศทาง และ ระยะสูงไม่ว่าจะเป็นอากาศยานของฝ่ายเดียวกันหรือฝ่ายข้าศึกก็ตาม ไม่ว่าจะใช้จอเรดาร์แบบ Electrostatic หรือ แบบ Electromagnetic ภาพที่หน้าจอจะถูก Point หรือกวาดโดยลำอิเล็กตรอนที่ถูกบังคับจุดศูนย์เพลิง (Focus) ให้คมชัดที่สุด ลำอิเล็กตรอนนี้จะไม่ให้อยู่กับที่ ที่หน้าจอเพราะจะทำให้จอใหม่เป็นจุดดำได้ ตามรูปที่ ๒๒ แสดงจอเรดาร์กับเป้าหมาย ทั้งสามที่อยู่ภายในลำคลื่นของสายอากาศ โดยอ่านระยะทางและทิศทางได้ ส่วนล่างของรูปเป็นจอเรดาร์แบบ A และแบบ PPI Scan



รูปที่ ๒๙ PPI Tube Circuit



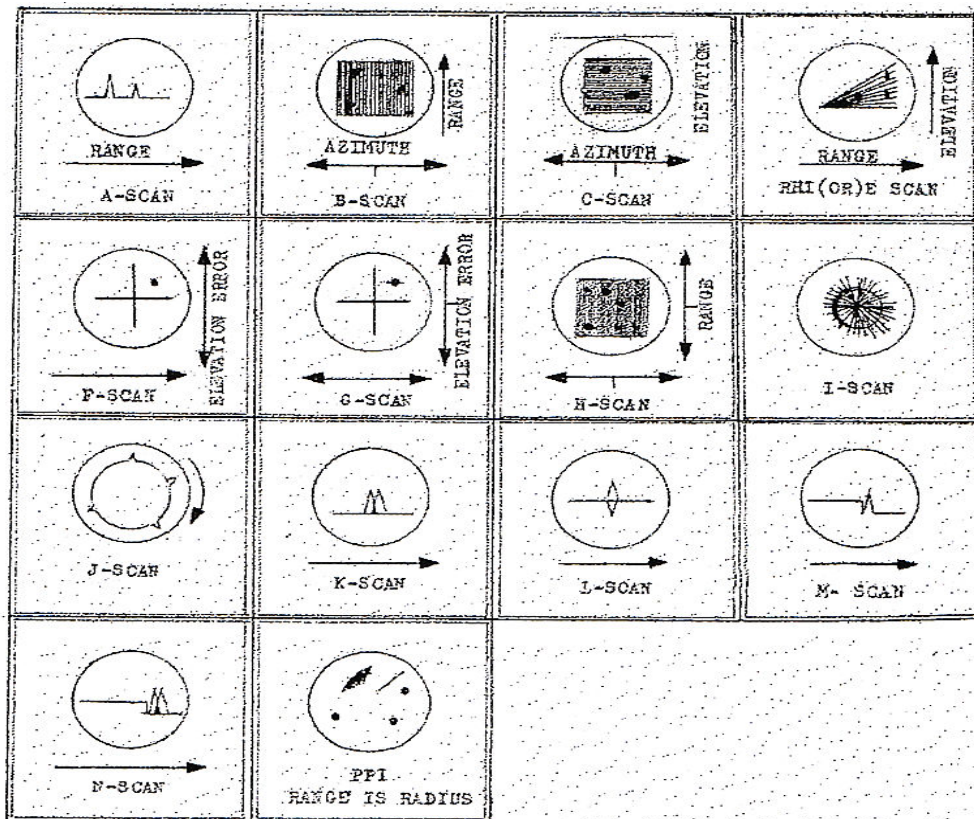
รูปที่ ๓๐ Electromagnetic And Electrostatic CRT



Type A Scan

Type PPI Scan

รูปที่ ๓๑ Target As View On RADAR Indicator



รูปที่ ๓๒ จอเรดาร์แบบต่างๆ

จอเรดาร์แบบต่าง ๆ ดูได้ จากรูปที่ ๓๒ ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละแบบดังนี้ คือ

- A-Scan เป็นจอเรดาร์อ่านระยะทาง เส้นกวาดทางแนวอนมีความสว่างค้างไม่นาน จุดสว่างกระโดดทางแนวตั้งขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณที่สะท้อนกลับมา การแสดงออกของเป้าหมายเป็นแบบ Deflection Modulated โดยการเริ่มส่ง Pulse ออกจากรดาร์ด้วยความเร็วคงที่ จุดสว่างหน้าจอจะเคลื่อนที่จากด้านซ้ายมือด้วยความเร็วคงที่ของ Pulse เมื่อสุดหน้าจอทางด้านขวามือจะถูกกลับแสงแล้วกระโดดมาเริ่มต้น Pulse ทางด้านซ้ายมือของจอเรดาร์ใหม่อย่างรวดเร็ว พร้อมกันกับการส่ง Pulse ลูกใหม่ออกไปเช่นนี้ซ้ำแล้วซ้ำเล่า แต่ถ้า Pulse ที่ส่งออกไปจากเครื่องเรดาร์นั้น กระแทกกับเป้าหมายจะทำให้จุดสว่างที่หน้าจอกระโดดขึ้นไปทางแนวตั้งกระโดดขึ้นมาน้อย ขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณที่รับเข้ามา ระยะทางระหว่างจุดสว่างกระโดดทางแนวตั้งของจุดเริ่มต้นส่ง Pulse ทางซ้ายมือ กับจุดสว่างกระโดดแนวตั้งอีกครั้งเมื่อ Pulse กระแทกเป้าหมายแล้วสะท้อนกลับมาวัดทางแนวอนของจอเรดาร์จะอ่านระยะทางของเป้าหมายแต่ไม่ทราบทิศทางนอกจากหันสายอากาศให้ตรงเป้าหมายจึงจะได้สัญญาณสะท้อนกลับมาเข้มที่สุด

- B-Scan เป็นจอเรดาร์ใช้อ่านระยะทางและทิศทาง มีเส้นกวาดทางแนวตั้ง เริ่มจากฐานล่างเรียกว่า "Beam-Line" มีความสว่างค้างบนจอานาน เส้นกวาดแต่ละเส้นคือ จำนวน Pulse ที่ส่งออกไปการแสดงออกของเป้าหมายบนจอเป็นแบบ Intensity Modulation คือเมื่อสัญญาณสะท้อนกลับเข้าเครื่องรับก็จะถูกขยายและป้อนเข้าบังคับความเข้มของแสงที่หน้าจอ ตำแหน่งของจุดสว่างที่หน้าจอจะแสดงว่าเป้าหมายอยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาของเส้นแนวตั้งตรงกลางจอ ส่วนสูงของจุดสว่าง



ห่างจากฐานของ Beam-Line จะอ่านระยะทางของเป้าหมาย การจับเป้าหมายระยะใกล้ แล้วการอ่านจากจอเรดาร์แบบ B-Scan จะได้รายละเอียดของเป้าหมายหลาย ๆ เป้า ได้ดีกว่าจอเรดาร์ แบบ PPI

- C-Scan เป็นจอเรดาร์ใช้อ่านระยะทางและทิศทางมีเส้นกวาดทางแนวนอน มีความสว่างค้างบนจอจนนาน เส้นกวาดแต่ละเส้นเป็นจำนวน Pulses ที่ส่งออกไป การแสดงออกของเป้าหมายบนจอเป็นแบบ Intensity Modulation คือเมื่อมีสัญญาณสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องรับก็จะมีจุดเรืองแสงหน้าจอพร้อมทั้งแสดงทิศทางตามแนวนอนและมุมยกตามแนวตั้ง ใช้มากเป็น Remote Control Indicator หรือจอเรดาร์ควบคุมการยิงอาวุธ

- RHI หรือ E-Scan เป็นจอเรดาร์ใช้อ่านระยะทาง (Range) และ ความสูง (Height) สำหรับช่วยนำทางเครื่องบินร่อนลงสนามในสภาพอากาศปิด มีความสว่างค้างบนจอ เส้นกวาดกระดกขึ้นลงทางด้านขวามือ เส้นกวาดแต่ละเส้นเป็นจำนวน Pulse ที่ส่งออกไป การแสดงออกที่หน้าจอเป้าหมายเป็นแบบ Intensity Modulation คือ เมื่อมีสัญญาณสะท้อนกลับเข้ามา เข้าเครื่องรับก็จะมีจุดเรืองแสงไปตามแนวเส้นกวาด อ่านระยะทาง ตามแนวเส้นกวาดทางแนวนอนและอ่านมุมยกตามแนวตั้ง

- F-Scan หรือ Error Indicator ใช้เป็นเครื่องเรดาร์ช่วยการยิงอาวุธบนอากาศยาน มีเส้นตรงสองเส้นตัดกันตามแกน X และแกน Y จุดสว่างบนหน้าจอคือ เป้าหมายแสดงว่าพลาดไปทางซ้าย - ขวา, บน หรือตรงกลางเป้าหมายพอดีจุดสว่างจะอยู่ที่จุดตัดของเส้น X และ Y

- G-Scan ดัดแปลงมาจาก F-Scan เพียงแต่เป้าหมายมีปีกออกสองข้าง ความยาวของปีกที่เป้าหมายมากขึ้น แสดงว่าเป้าหมายมีระยะห่างน้อยลง เป็นอัตราส่วนกลับกัน

- H-Scan ใช้อ่านระยะทาง, ทิศทาง และมุมยก ระยะทางวัดไปตามแนวตั้งของเส้นกวาดไปมาทางแนวนอนคล้าย B-Scan คล้องจองกันกับกวาดไปมาของสายอากาศ จุดสว่างแผดแสงเป้าหมายจุดซ้ายบอกระยะทาง และทิศทางของเป้าหมาย จุดขวาบอกมุมยก

- I-Scan จอเรดาร์ที่ใช้ร่วมกันกับสายอากาศที่กวาดเป็นรูปกรวยแหลมเป้าหมายปรากฏเป็นวงกลมแนวรัศมีจะบอกระยะทาง ส่วนที่สว่างจัดของวงกลมจะบอกทิศทาง

- J-Scan ดัดแปลงมาจาก A-Scan แต่เส้นกวาดจะหมุนเป็นวงกลมใกล้ขอบจอ แทนที่จะกวาดไปตามแนวนอน ข้อดีก็คือได้เส้นกวาดยาวขึ้น แม้จะใช้จอเรดาร์ขนาดเล็กก็ตาม เส้นกวาดเกิดจากการป้อนคลื่นรูป SINE ต่างเฟสกัน ๙๐ องศา ที่ Vertical และ Horizontal Deflection Plate และคลื่นรูป Sine นั้น จะต้องควบคุมความถี่ให้คงที่ที่สุด

- K-Scan ดัดแปลงมาจาก A-Scan สามารถอ่านระยะทางได้ แล้วก็ยังอ่านทิศทางได้ โดยใช้ Lope Switch ของสายอากาศ ทำให้เกิด PIP คู่บนจอ ถ้าสัญญาณจากสายอากาศซ้ายและขวาแรงเท่า ๆ กัน แล้ว PIP ทั้งคู่จะทับกัน แสดงว่าเป้าหมายอยู่ตรงหน้าพอดี

- L-Scan คล้ายๆกับ K-Scan ต่างกันที่ PIP ของเป้าหมายหันหลังชนกัน

- M-Scan ดัดแปลงมาจาก A-Scan จุดหรือชั้นบอกระยะทาง สอดใส่ไว้ในเส้นกวาด เมื่อ PIP ของเป้าหมาย และยอดแหลมบอกระยะทางตรงกัน ระยะทางอ่านได้จากเลขบอก หรือหน้าปิดบอกไว้

- N-Scan เป็นการผสมกันระหว่าง K-Scan และ M-Scan มียอดแหลมบอกระยะทางเหมือน M-Scan เพื่ออ่านระยะทางได้ถูกต้อง

- PPI-Scan คือจอเรดาร์แบบ Plan Position Indicator สามารถอ่านระยะทางและทิศทางสัมพันธ์กับพื้นโลก สายอากาศจะหมุนรอบตัวกวาดด้วยลำคลื่นแคบทางแนวราบและคลื่นกว้างทาง

แนวตั้งตลอดทางที่กวาดคลื่นจะส่ง Pulse ออกอากาศจำนวนมาก เมื่อกระทบเป้าหมายจะปรากฏที่จอเรืองแสงเป็นเวลานาน

### ๓.๘ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power Supply)

เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับการทำงานของระบบเรดาร์ทั้งหมด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบการใช้งานของเรดาร์ กล่าวคือ ระบบเรดาร์จะต้องมีระบบพลังงานที่เหมาะสมต่อการใช้งานและการติดตั้ง เช่น หากเป็นเรดาร์เคลื่อนที่ควรต้องมีแหล่งผลิตพลังงานภายในของตนเอง ซึ่งจะมีกำลังน้อยส่งผลให้ระยะเวลาการตรวจจับเป้าหมายลดลง หากเป็นเรดาร์ขนาดใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และต้องการรัศมีตรวจจับระยะไกลจำเป็นต้องมีแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่เช่นกัน นอกจากนี้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ายังเป็นปัจจัยในเสถียรภาพการทำงานของระบบเรดาร์ที่ต้องปฏิบัติงานตลอดเวลาอีกด้วย

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับสถานีเรดาร์ อาจได้มาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line) แล้วเข้าเครื่องแปลงความถี่ (Frequency Converter) ในกรณีที่เครื่องเรดาร์ต้องการกระแสไฟฟ้าสลับ ชนิด 60 Hz. ขนาดแรงดันไฟฟ้า 120/208 3 เฟส 4 สาย แล้วยังต้องมีเครื่องย่นตัวทำไฟขนาดไม่เกิน 400 KW. ๒ เครื่อง หรือขนาด 250 KW. ๓ เครื่อง เป็นการสำรองในกรณีที่กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขัดข้อง

แผนผังของระบบเบื้องต้นนั้น แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นผังสี่เหลี่ยมอันเดียวแต่ภายในนั้นจะต้องมีการจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรต่าง ๆ ของเรดาร์และต้องมีกระแสไฟฟ้าและแรงดันระดับต่าง ๆ

### ๓.๙ ระบบเรดาร์พิสูจน์ฝ่าย IFF/SIF

ตอนต้นสงครามโลกครั้งที่ ๒ แผนยุทธศาสตร์หลักของฝ่ายพันธมิตรคือ ตั้งรับเครื่องบินข้าศึก เพราะเหตุว่าสถานการณ์ของฝ่ายพันธมิตรยังอ่อนแอมากจะส่งเครื่องบินออกปฏิบัติการก็ต่อเมื่อ มีรายงานจากเรดาร์ชายฝั่งที่ทำหน้าที่แจ้งเตือนภัยว่ามีเครื่องบินศัตรูลวงล้ำเข้ามาแต่คลื่นเรดาร์สะท้อนกลับไม่มีเครื่องหมายบอกว่าเป็นเครื่องบินนั้น ๆ เป็นฝ่ายใดจึงได้ติดตั้ง Beacon แก่เครื่องบินพันธมิตรทุกเครื่องเพื่อวิเคราะห์ออกว่าคลื่นสะท้อนกลับเป็นฝ่ายเดียวกันหรือฝ่ายข้าศึก เรดาร์ Beacon บนเครื่องบินจะส่งคลื่น Pulse ตอบทันทีที่ได้รับคลื่น Pulse จากสถานีเรดาร์ชายฝั่ง คลื่น Pulse ตอบจะเข้าเครื่องรับเรดาร์ภาคพื้นปรากฏที่จอเรดาร์สว่างกว่าคลื่นสะท้อนกลับธรรมดา พนักงานเรดาร์ก็ทราบได้ว่าเป้าหมายนั้น ๆ เป็นเครื่องบินฝ่ายเดียวกัน ถ้ามีแต่คลื่นสะท้อนกลับธรรมดา ๆ ก็อ่านความหมายว่าเป็นเครื่องบินข้าศึก

วิธีการพิสูจน์ฝ่ายแบบนี้ เรียกชื่อว่า “IFF = Identification Friend or Foe” ระบบนี้ทำงานโดยสายอากาศของระบบ IFF จะติดตั้งอยู่บนสายอากาศของเรดาร์ค้นหาและจะใช้จอเรดาร์ร่วมกัน มีเครื่องรับ-ส่งบนพื้นดิน ซึ่งเรียกว่า “Interrogator Responder” จะสร้างสัญญาณถามเป็น Pulse คู่มือหลาย Mode ต่างกัน ด้วยความถี่ 1,030 MHz. บนเครื่องบินก็จะมีชุดรับ-ส่ง เรียกว่า “Transponder” จะทำการ Decode สัญญาณของ Interrogator ว่าเป็น Mode ใด แล้วก็ส่งสัญญาณตอบเป็น Reply Pulse กลับไปยังภาคพื้นด้วยความถี่ 1,090 MHz. ทางด้าน Interrogator ก็จะทำให้การแสดงผลของ Reply Pulse และส่งไปปรากฏบนจอเรดาร์ และเนื่องจากระบบ IFF การรับ-ส่งต่าง ความถี่กันจึงไม่มี Clutter เกิดขึ้น IFF จะให้ข้อมูลได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นและเพื่อควบคุมจำนวนของ

เครื่องบินที่มีมากขึ้นทุกวันอีกทั้งมีความเร็วสูงขึ้นอีกด้วย จึงได้มีการพัฒนาระบบ IFF โดยให้มีการเลือกรหัสตอบได้หลายๆ รหัสซึ่งเรียกว่า “SIF = Selective Identification Feature” แล้วเรียกชื่อเสียใหม่ว่า “ระบบIFF/SIF”

หน้าที่ของเรดาร์พิสูจน์ฝ่าย คือ

๑. บอกให้พนักงานของหอบังคับการสามารถแยกความแตกต่างของเครื่องบินที่กำลังบินอยู่ และอยู่ในรัศมีของ Radar ที่จับได้

๒. ในทางทหาร IFF/SIF ทำให้พนักงานสามารถรู้ได้ว่าเครื่องบินลำใดเป็นพวกเดียวกันและลำใดเป็นฝ่ายตรงข้าม

ความสัมพันธ์ระหว่าง IFF กับ เรดาร์ค้นหา

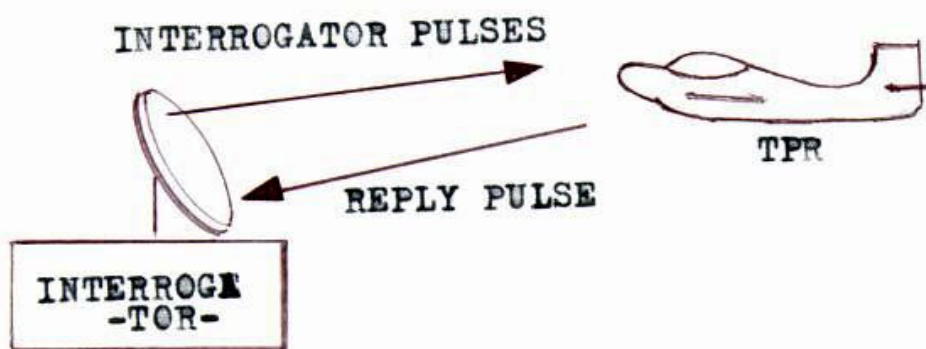
๑. ใช้ Display เดียวกัน

๒. สายอากาศแยกกันโดยของ IFF จะติดอยู่บนสายอากาศของเรดาร์ค้นหา

**องค์ประกอบของระบบ IFF/SIF** มีอยู่ด้วยกันสองส่วนคือ Interrogator และ Transponder

- Interrogator เป็นเครื่องรับ-ส่งที่ติดตั้งอยู่บนภาคพื้นมีหน้าที่ผลิตสัญญาณถาม (Interrogation Pulses) ด้วยความถี่ 1,030 MHz. และรับด้วยความถี่ 1,090MHz.

- Transponder เป็นเครื่องรับ-ส่งที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องบิน เมื่อถูกถามจาก Interrogator ก็ส่งสัญญาณตอบเป็นรหัสด้วยความถี่ 1,090 MHz. (โดยรับจาก Interrogator ด้วยความถี่ 1,030 MHz.)



รูปที่ ๓๓ แสดงถึงองค์ประกอบ ของ IFF/SIF

### **ลักษณะของสัญญาณถาม (Interrogation Format)**

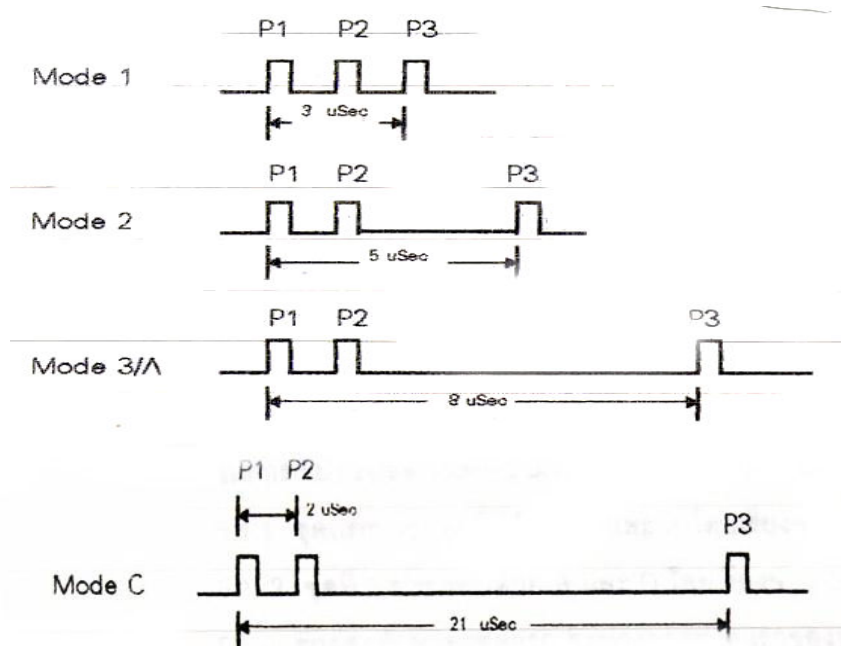
สัญญาณถามจะประกอบด้วย P1, P2 และ P3 โดยช่องห่างของ P1 และ P3 จะเป็นตัว กำหนดว่าเป็น Mode ไต ซึ่งแบ่งออกเป็นดังนี้

Mode 1	P1 - P3	ห่างกัน	3	uSec
Mode 2	P1 - P3	ห่างกัน	5	uSec

Mode 3/A P1 - P3 ห่างกัน 8 uSec

Mode C P1 - P3 ห่างกัน 21 uSec

ส่วน P2 จะเกิดขึ้นหลังจาก P1 2  $\mu$ Sec (รายละเอียดจะอธิบายในเรื่องของ ISLS Technic) ส่วนความกว้างของแต่ละ Pulse จะเท่ากับ 0.8  $\mu$ Sec



รูปที่ ๓๔ ลักษณะของสัญญาณตามแต่ละ Mode

วัตถุประสงค์ของแต่ละ Mode เพื่อเป็นการสะดวกแก่พนักงานที่จะแยกแยะเป้าหมายได้ในการทำงานของแต่ละ Mode ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดวัตถุประสงค์ของแต่ละ Mode ดังนี้

Mode 1 ใช้พิสูจน์ว่าเป็นเครื่องบินของฝ่ายใดฝ่ายหนึ่ง รวมทั้งบอกภารกิจของเครื่องบินในการปฏิบัติงานด้วย (Security Identification = SI)

Mode 2 ใช้บอกเป็นลักษณะเฉพาะของเครื่องบินเป็น C-130 หรือ F-16 A/B จะใช้เฉพาะทางทหารเท่านั้นให้ชื่อว่า (Personal Information = PI หรือ IP)

Mode 3/A ใช้ในการควบคุมจราจรทางอากาศ เช่น เป็นเครื่องบินที่ใช้โดยสารภายในประเทศหรือต่างประเทศ หรือเป็นเครื่องบินทหาร ให้ชื่อว่า (Traffic Information = TI)

Mode C ใช้ในกรณีต้องการทราบความสูงของเครื่องบิน

Mode 4 ใช้ในกรณี การบินซึ่งเป็นความลับทางทหาร

ลักษณะของสัญญาณตอบ (Reply Pulse Code)

Transponder เป็นองค์ประกอบอีกอันหนึ่งของระบบ IFF มีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณตอบ (Reply Code) เมื่อถูกถามโดย Interrogator แต่ละ Mode ลักษณะของสัญญาณตอบประกอบด้วย

- Framing pulse (F1 - F2) ซึ่งอยู่ห่างกัน 20.3  $\mu$ Sec ทุก Mode

- รหัส ๔ กลุ่ม A, B, C, D จะอยู่ภายใน Framing Pulse ซึ่งแต่ละกลุ่มจะอยู่ในรูปของเลขฐาน 8 (0-7) คือ

กลุ่ม A ประกอบด้วย A1 A2 A4

กลุ่ม B ประกอบด้วย B1 B2 B4

กลุ่ม C ประกอบด้วย C1 C2 C4

กลุ่ม D ประกอบด้วย D1 D2 D4

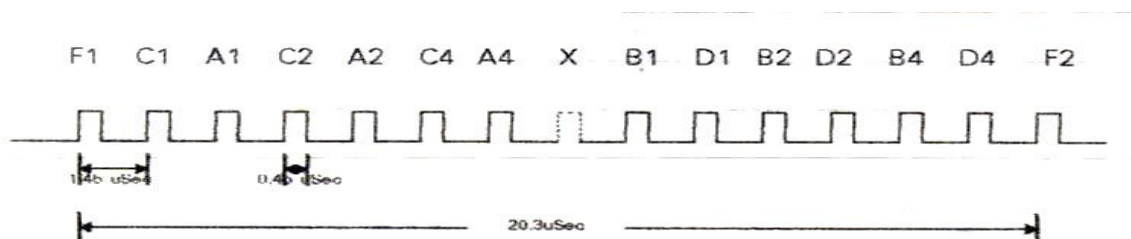
- ทุก Pulse จะมีความกว้าง 0.45  $\mu$ Sec และมีช่วงห่างกัน 1.45  $\mu$ Sec แล้วถูกส่งออกด้วยความถี่ 1,090 MHz.

การเรียง Pulse Code ในการเรียง Pulse Code จะไม่เรียงตามลำดับอักษรแต่จะแบ่งออกเป็น ๒ ชุดคือ

๑. ชุดแรกประกอบไปด้วย C และ A โดยเรียงจาก C1 A1 C2 A2 C4 A4

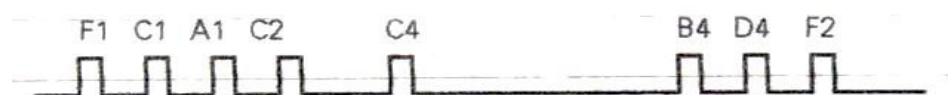
๒. ชุดที่ ๒ ประกอบด้วย B และ D โดยเรียงจาก B1 D1 B2 D2 B4 D4

ช่วงสุดท้ายของชุดแรกจะห่างจากช่วงแรกของชุดที่ ๒ 2.9  $\mu$ Sec และเป็นที่ยอมรับ Pulse X ซึ่งจะใช้ในกรณีที่เครื่องบินลำนั้นไม่มีคนบังคับอยู่บนเครื่องบิน (Unmanned Aircraft)



รูปที่ ๓๕ ลักษณะของ Reply Pulse

การอ่านรหัสในการเรียงรหัสที่เครื่องส่งออกมานั้นจะเรียงตามที่แสดงในรูปที่ ๓๕ แต่ในการอ่านรหัสจะอ่านเรียงตามลำดับ กลุ่มอักษร คือกลุ่ม A, B, C และ D นั่นคือ อ่านของกลุ่ม A ก่อนแล้วไปกลุ่ม B, C และ D ตามลำดับ



รูปที่ ๓๖ แสดงถึงการอ่านรหัส 1 4 7 4

รหัสของแต่ละ Mode เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการถาม-ตอบ แตกต่างกันไปดังนั้นความจำเป็นที่จะใช้จำนวนรหัสก็ขึ้นอยู่กับความจำเป็นเหล่านั้นด้วย จึงได้มีการกำหนดจำนวนรหัสแตกต่างกันออกไปในแต่ละ Mode คือ

Mode 1 จะประกอบด้วยกลุ่มรหัส A คือ A1, A2, A4 และกลุ่ม B คือ B1 และ B2 เท่านั้น และจะมี Pulses สูงสุดได้แค่ 5 Pulse จะมี Code ได้ทั้งหมดจำนวน 32 Code ( $2^5$ ) 00-73

Mode 2 และ Mode 3 จะประกอบด้วยกลุ่มรหัส A, B, C, D ครบ ซึ่งจะมี Pulse สูงสุดได้ 12 Pulse และจะมีจำนวน Code สูงสุดได้ 4096 Code ( $2^{12}$ ) ตั้งแต่ 000-7777

Mode C จะใช้รหัสเหมือนกับ Mode 2, 3 เว้นแต่ว่าหากความสูงเพิ่มขึ้นทุก ๆ 100 ฟุต จะไม่ใช่ D1 (Mode C จะใช้ร่วมกับ Air Data Converter)

### วิธีการตั้งรหัส (Method of Coding)

เนื่องจากความจำเป็นและความสำคัญของการถาม และตอบนั้นต่างกัันดังนั้นในการเลือกตั้งรหัสก็จะขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านั้นด้วยคือ

Mode 1 และ Mode 3/A จะตั้งรหัสโดยเลือกตั้งที่ Control Box ซึ่งจะอยู่ใกล้กับนักบินและหากมีความจำเป็นก็สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการบิน

Mode 2 การตั้งรหัสจะเลือกทำที่ตัวเครื่อง Transponder ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวเครื่องบินในระหว่างทำการบินไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้

Mode C ไม่มีการตั้งรหัส รหัสจะขึ้นอยู่กับความสูงของเครื่องบินขณะนั้น

Mode 4 จะถูกแยกไปใช้ร่วมกับชุด Computer ต่างหาก

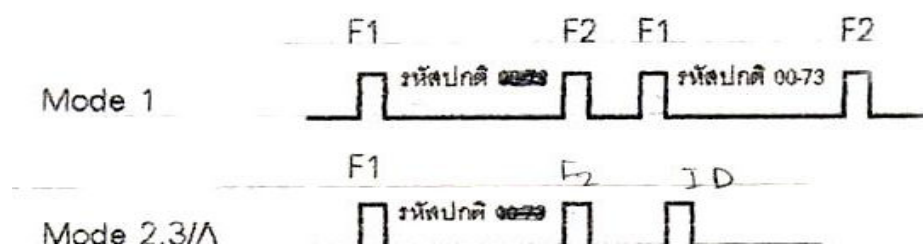
Spacial Reply Codes นอกเหนือจากรหัสตอบแต่ละ Mode ซึ่งทำให้รู้ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องบินในสภาวะปกติแล้วยังมีรหัสพิเศษซึ่งได้ถูกส่งออกจาก Transponder ในสภาวะอื่น ๆ คือ

- IP หรือ ID = Identification of Position
- Emergency code
- Radio Failure
- Hijack IP หรือ ID

ในกรณีที่พนักงานหอบังคับการบินต้องการทราบตำแหน่งของเครื่องบินที่ปรากฏบนจอเรดาร์หลาย ๆ เครื่องว่าเป็นเครื่องที่ตนกำลังติดต่ออยู่ก็สามารถร้องขอให้นักบินกด Switch IP ที่อยู่บน Control Box สัญญาณ IP หรือ ID ก็จะส่งออกมามีลักษณะดังนี้

Mode 1 จะมีรหัสตอบออกมาเพิ่มอีก ๑ ชุด (รหัสปกติ) เป็นเวลา ๒๐ - ๓๐ วินาที

Mode 2 และ Mode 3/A จะมีรหัสตอบปกติ ๑ชุด ตามด้วย Pulse ID หลังจาก F2 4.35  $\mu$ Sec PW.0.45  $\mu$ Sec และปรากฏอยู่เป็นเวลา ๒๐ - ๓๐ วินาที



รูปที่ ๓๗ IP หรือ ID Mode

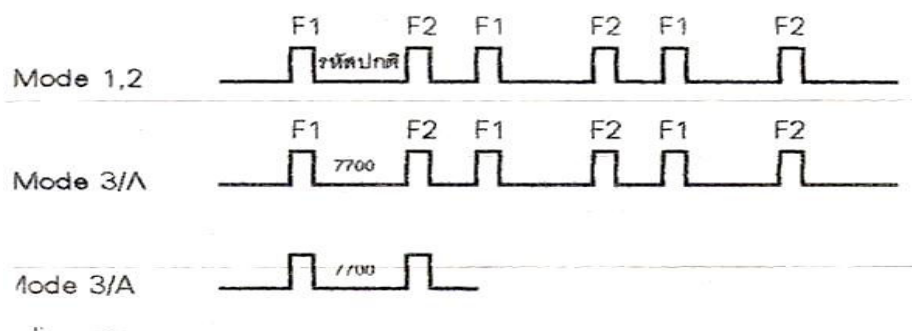
รูปที่ ๓๗ ลักษณะของสัญญาณ IP หรือ ID Mode ของแต่ละ Mode บางรุ่นจะใช้รหัสและเหมือนกันกับ Mode 2, 3/A

### Emergency Code

ในกรณีเกิดสภาวะฉุกเฉินหรือเครื่องบินขัดข้อง นักบินจำเป็นจะต้องบอกให้ทางภาคพื้นทราบ เพื่อหาทางแก้ไขได้ทันโดยที่นักบินจะต้องหมุน Master S.W. ที่ Control Box ไปตำแหน่ง Emergency สัญญาณ Emergency ก็จะถูกส่งออกจาก Transponder ซึ่งก็จะแตกต่างกันออกไปในแต่ละ Mode คือ

Mode 1 และ Mode 2 สัญญาณ Emergency จะประกอบด้วย Code ตามปกติ ๑ ชุดและตามด้วย Framing Pulse (F1 - F2) อีก ๓ ชุด

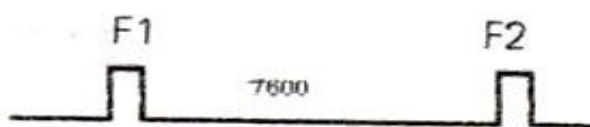
Mode 3/A เมื่อนักบิน S.W. ไปตำแหน่ง Emer. สัญญาณ Emer. ก็จะไปโดยรหัสของ Mode 3/A จะถูกเปลี่ยนเป็น 7700 และตามด้วย Framing Pulse อีก ๓ชุด หรือนักบินอาจจะตั้งรหัสของ Mode 3/A เป็น 7700 เลยก็ได้ นั่นคือ 7700 ของ Mode 3/A คือ Emergency กรณีที่นักบินติดตัวออกรหัส Emer. ก็จะถูกส่งออกมา



รูปที่ ๓๘ รหัส Emergency ของแต่ละ Mode

### Radio Failure code

ในกรณีที่ระบบติดต่อสื่อสารขัดข้องหมายถึงนักบินไม่สามารถติดต่อหอบังคับการบินหรือที่ใดๆ ได้นักบินจำเป็นที่จะต้องให้ทางด้านเรดาร์ทราบถึงข้อขัดข้อง โดยนักบินเลือกตั้งรหัส 7600 ใน Mode 3/A และเมื่อ Transponder ถูกถามด้วย Mode 3/A ก็จะตอบเป็นรหัส 7600 ซึ่งทางภาคพื้นก็จะสามารถทราบได้ว่าขณะนี้ระบบติดต่อสื่อสารขัดข้องและเพื่อให้แน่ใจพนักงานภาคพื้นอาจจะทดสอบโดยร้องขอให้นักบินแสดงตำแหน่งของ บ.โดย IP แล้วสังเกตดูว่าสัญญาณ IP เกิดขึ้นจริง



รูปที่ ๓๙ แสดงรหัส Radio Failure

### Hijack Code

เช่นเดียวกับกรณีอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้ว นักบินจำเป็นต้องกระทำการใด ๆ เพื่อให้ทางด้านภาคพื้นทราบที่กำลังเกิดอะไรขึ้นบนเครื่องบิน Hijack หรือการจี้เครื่องบิน ก็อาจเป็นอีกกรณีหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นรหัสที่ใช้บอกให้ทราบในกรณี Hijack ก็คือ 7500 ของ Mode 3/A ซึ่งอาจจะมี S.W. ที่ลับเมื่อกด S.W. นั้นรหัส 7500 ก็จะถูกตั้งอยู่ใน Mode 3/A ทันที



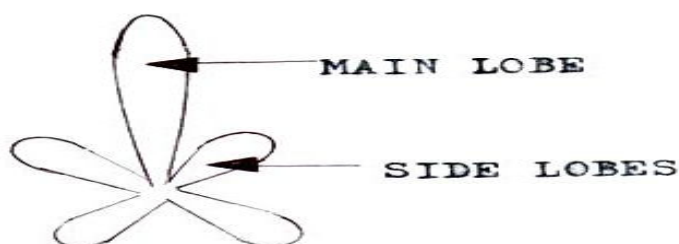
รูปที่ ๔๐ แสดงรหัส Hijack

### ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ IFF

ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งนี้เนื่องมาจากการส่งของ Interrogator และ Transponder ทางด้าน Interrogator ทำให้เกิดปัญหาเรียกว่า “Ring around” ส่วนทางด้าน Transponder ทำให้เกิดปัญหา Fruit และ Garbling Code

### RingAround

การแพร่กระจายคลื่นของ Interrogator เป็นแบบทิศทาง (Direction) แต่เราไม่สามารถที่จะทำให้การแพร่กระจายคลื่นนั้นไปในทิศทางหนึ่งทั้งหมดได้จะมีบางส่วนที่กระจายออกด้านข้างและบางส่วนก็ออกด้านหลังกระสวยลำคลื่นใหญ่ เรียกว่า “Main Lobes” ซึ่งสัญญาณ Main และ Side Lobes จะมีข้อมูลข่าวสารที่เหมือนกันจะต่างกันว่า Main Lobes มีกำลังมากกว่า Side Lobes



รูปที่ ๔๑ Antenna Pattern

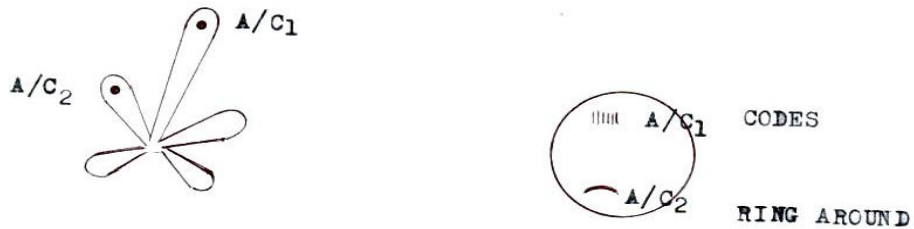
Side Lobes มีผลกระทบต่อระบบ Radar เป็นอย่างมาก โดยในเรดาร์ค้นหา Side Lobes จะทำให้เกิดการผิดพลาดทางข้อมูลที่ได้ คือเป้าหมายที่ถูกจับได้โดย Side Lobes จะทำให้เกิดการผิดพลาดทางด้านมุม





รูปที่ ๔๒ แสดงถึงผลกระทบของ Side Lobes ในเรดาร์ค้นหา

Side Lobes ในระบบ IFF ก็เช่นเดียวกันคือ Transponder ก็จะรับเอาสัญญาณที่รับจาก Side Lobes มีจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อเครื่องบินเข้าใกล้สถานีมากขึ้นจึงทำให้เกิด Ring Around

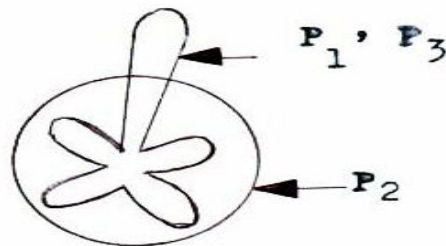


รูปที่ ๔๓ แสดงถึงการเกิด Ring Around

**ISLS Technic**

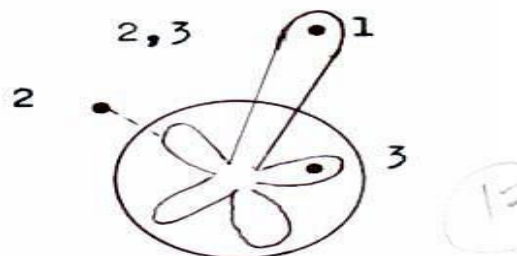
Ring Around ทำให้พนักงานไม่สามารถอ่านรหัสได้ และยังทำให้พนักงานสับสนอีกด้วยจึงจำเป็นต้องกำจัด Ring Around เสียโดยวิธีใช้ Technic ที่เรียกว่า

“ISLS = Interrogation Side Lobes Suppression” ซึ่งวิธีนี้แยกปฏิบัติเป็นสองส่วน คือ ทางด้าน Interrogator (ภาคพื้น) แยก P2 ออกจาก P1, P3 โดย P2 ส่งออกแบบ Omni (ทุกทิศทาง) และ P1, P3 ส่งแบบ Direction (เป็นทิศทาง) โดยให้ P2 มีกำลังส่งสูงกว่ากำลังงานของ Side Lobes แต่จะต้องน้อยกว่ากำลังงานจาก Main Lobes ดังนั้น P2 เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “SLS Pulse” ส่งหลังจาก P1 2  $\mu$ S.



รูปที่ ๔๔ แสดงถึงวิธีการส่ง P1 P2 P3

เมื่อเครื่องบิน บินอยู่ในรัศมีของ Directional TPR<sub>1</sub> ก็จะรับเอาสัญญาณ P1-P3 ได้มากกว่า P2 เมื่อเครื่องบินอยู่นอกรัศมี Direction Ant. เครื่อง 2, 3 ก็จะรับสัญญาณของ P2 ได้มากกว่า P1, P3 หรือในบางตำแหน่งรับได้เท่ากัน

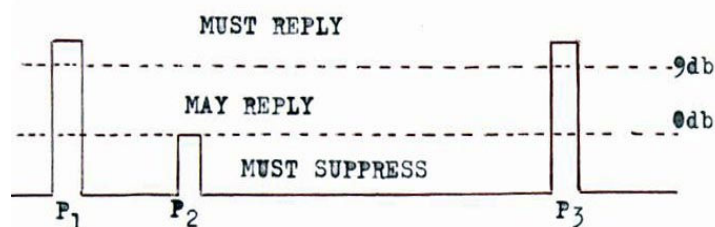


รูปที่ ๔๕ แสดง TPR

รูปที่ ๔๔ แสดงถึง TPR รับ P1 P2 P3 ที่ตำแหน่งต่างกัน

- ทางด้าน Transponder

เพื่อไม่ให้ Transponder ตอบเนื่องมาจากสัญญาณจาก Side Lobes อันเกิดปัญหา Ring Around จึงต้องกำหนดให้ Transponder ตอบก็ต่อเมื่อได้รับ P1 P3 มากกว่า P2 อย่างน้อย 9 dB



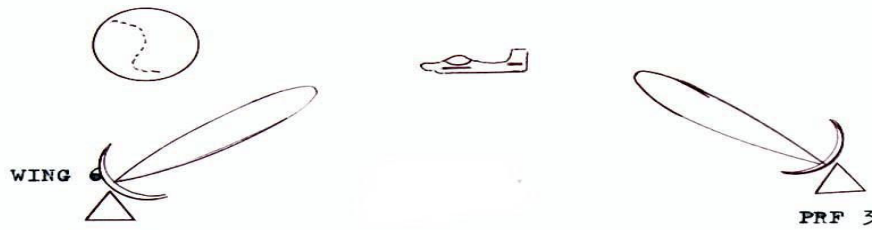
รูปที่ ๔๖ การควบคุม ISLS

### Fruit

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ IFF นอกเหนือจาก Ring Around อันเนื่องมาจากการส่งของ Interrogator แล้วทางด้าน Transponder ก็ทำให้เกิดปัญหาได้เหมือนกันในขณะทำการส่ง Reply Codes ดังนั้นความถูกต้องของ Reply Codes มีปรากฏอยู่ คือ

- Transponder ต้องรับด้วยความถี่ 1,030 MHZ
- Transponder ต้องส่งด้วยความถี่ 1,090 MHZ
- Transponder จะต้องมีการส่งที่เพียงพอ

ไม่มีการถามจาก Interrogator ที่มี PRF ต่างกัน พร้อมกันเนื่องจากสัญญาณ Reply Codes ถูกส่งแบบ Omni (ทิศทาง) เมื่อ TRF ถูกถามมันก็จะตอบสนองสัญญาณ Code ออกไปยัง Interrogator ตัวอื่นด้วย ถ้าหาก Interrogator มี PRF ที่ต่างกันก็จะทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า “ Fruit ”

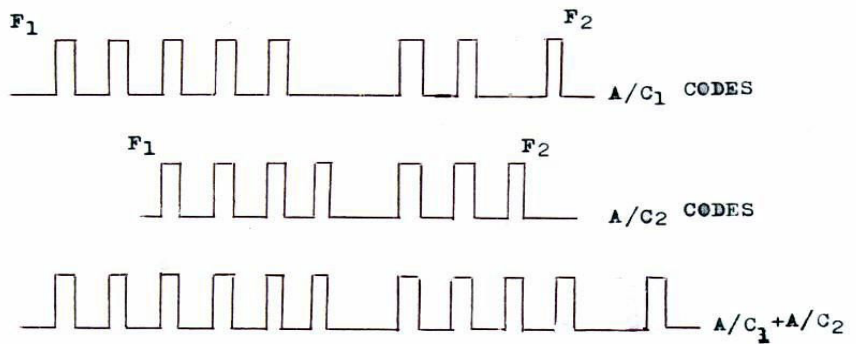


รูปที่ ๔๗ Fruit

**Garbing**

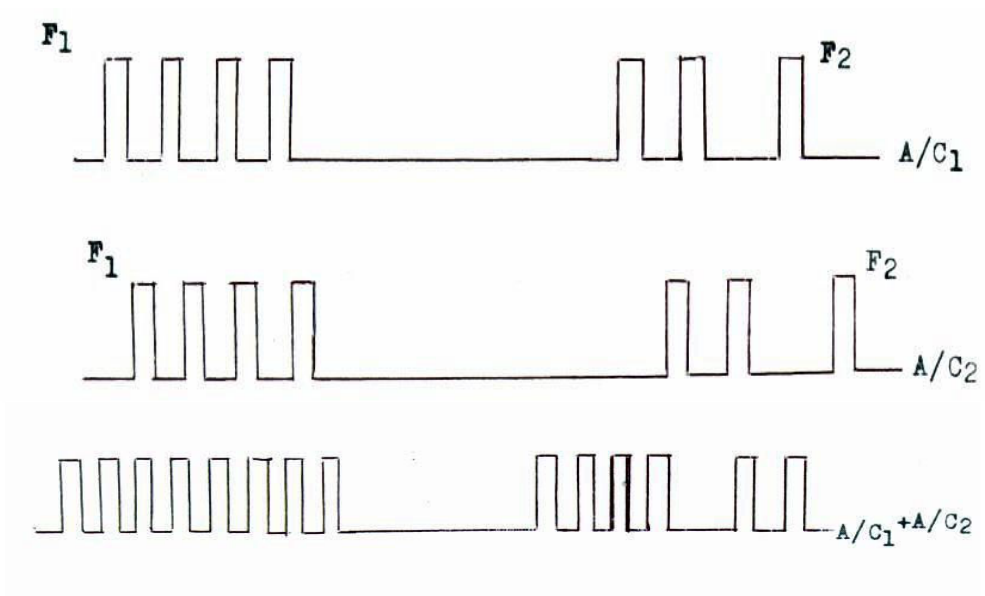
เมื่อเครื่องบิน ๒ ลำ บินอยู่ในทิศทางเดียวกัน (Same Bearing) และอยู่ห่างกันภายใน 1.7 Nautical Mile ได้ส่งสัญญาณตอบออกมาพร้อมกันแล้ว Code ที่ส่งออกมานั้นเกิดการรวมกันซึ่งจะทำให้ Code ที่ปรากฏบนจอเรดาร์ผิดพลาดไป การรบกวนของ Code มีอยู่ด้วยกัน ๒ ลักษณะ คือ

Overlapping เกิดเนื่องจาก Pulse Code ของทั้งสองนั้นทับกัน คือมีช่วงห่างของ Pulse Code 1.45  $\mu$ sec (ตำแหน่งของ Pulse Code)

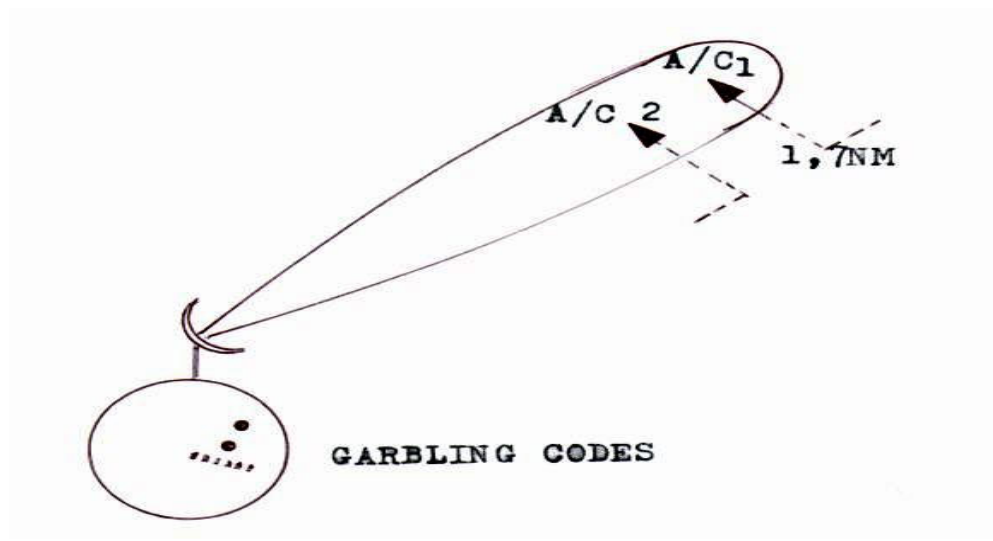


รูปที่ ๔๘ Overlapping Codes

Interleaved Codes จะเกิดในกรณีที่ Pulse Code ของทั้งสองรวมกันแบบแทรกกัน คือ ตำแหน่งของ Pulse ไม่ใช่ 1.45  $\mu$ Sec



รูปที่ ๔๙ Interleaved Code



รูปที่ ๕๐ สาเหตุการเกิด Garble

## บรรณานุกรม

- กวก.สอ.ทอ. ตำราสอบคัดเลือกนายทหารชั้นประทวนเป็นนายทหารสัญญาบัตร เหล่าทหารสื่อสาร  
วิชาเรดาร์. กรุงเทพฯ: ๒๕๕๑.
- ข้อมูลจากเว็บไซต์. [Online]. 2018. Available from: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)
- ข้อมูลจากเว็บไซต์. [Online]. 2018. Available from: [www.elprocus.com/radar-basic](http://www.elprocus.com/radar-basic)
- ข้อมูลจากเว็บไซต์. [Online]. 2018. Available from: <http://en.Radar-Wikipedia.org>