ระบบเรดาร์สำหรับกรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ
Radar system for Naval Electronics

กรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ กองโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ 2
กรมอู่ทหารเรือ ป้อมพระจุลจอมเกล้า กองทัพเรือ
ร่วมกับภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คำนำ

ตำราเล่มนี้จัดพิมพ์เป็นรูปเล่มจากการปรับปรุงตำราเรียนของหนังสือชุดวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้แปลจากหนังสือ Fundamentals of Electronics, Navpers 9340 A ของสหรัฐนำวี โดยกรมยุทธศึกษาทหารเรือได้พิมพ์ขึ้น ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2519 โดยผ่านการทดลองใช้กับนักเรียนจ่าทหารเรือ พรรคพิเศษ เหล่าทหารช่างยุทธโยธา (อิเล็กทรอนิกส์) ของโรงเรียนอิเล็กทรอนิกส์เป็นเวลา 1 ปีการศึกษา หลังจากนั้นจึงปรับปรุงแก้ไขเนื้อหา ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นโดยมีเป้าหมายเพื่อใช้เป็น ตำราประกอบการเรียนการสอนวิชา ระบบเรดาร์ เนื้อหาในเล่มมีจำนวน 9 บท ซึ่งครอบคลุมรายละเอียดของวิชาทั้งหมด ประกอบด้วย : หลักการทำงานของเรดาร์ ประเภทของเรดาร์ องค์ประกอบการทำงานของเรดาร์ ระบบสายอากาศ เครื่องส่งเรดาร์ เครื่องรับเรดาร์ จอแสดงผลเรดาร์ ระบบพิสูจน์ฝ่าย และการสงครามอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากจะใช้เป็นตำราประกอบการเรียนการสอนแล้ว ของกรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือแล้ว ยังสามารถใช้เป็นตำราประกอบการเรียนวิชาระบบเรดาร์ ในหน่วยงานที่ใช้อุปกรณ์เรดาร์ในการทำงาน รวมทั้งเป็นตำราสำหรับผู้สนใจทั่ว ๆ ไปได้อีกด้วย

ขอขอบคุณนักเรียนจ่าทหารเรือ พรรคพิเศษ เหล่าทหารช่างยุทธโยธา (อิเล็กทรอนิกส์) ที่ได้เสนอแนะข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงตำราเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นจากการทดลองใช้ที่ผ่านมา และขอขอบคุณภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุนการเรียบเรียงตำราเพื่อใช้ในหลักสูตร

นาวาโท บรรเทิง ตุ้มสุข

สารบัญ

สารบัญ 2
บทที่ 1 หลักการทำงานของเรดาร์ 4
บทนำ 4
หลักการทำงานของเรดาร์ 5
ระยะ ทิศทาง ความสูง ซึ่งสัมพันธ์กับระบบเครื่องเรดาร์ 7
ประโยชน์จากการใช้งานระบบเรดาร์และบริภัณฑ์ 9
บทที่ 2 ประเภทของเรดาร์ 12
บทนำ 12
ประเภทการใช้งานของเรดาร์ 12
การใช้งานของเรดาร์ 19
บทที่ 3 องค์ประกอบการทำงานของเรดาร์ 23
บทนำ 23
อัตราทวนซ้ำ (REPETITION FREQUENCY :PRF) 23
ความกว้างของพัลส์ส่ง PULSE WIDTH (PW) 25
ความถี่ของเรดาร์ (RADAR FREQUENCY) 27
กำลังส่งของเรดาร์ (RADAR POWER) 30
ความเร็วของรอบสายอากาศ (ANTENNA SCAN RATE) 33
ข้อจำกัดการตรวจจับอื่น ๆ ของเรดาร์ 35
บทที่ 4 ระบบสายอากาศเรดาร์ 40
บทนำ 40
หลักการของสายอากาศเรดาร์ (PRINCUPER OF RADAR ANTENNA) 40
คุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์ 41
ข้อควรระวังของสายอากาศ (ANTENNA SAFETY PRECAUTIONS) 48
บทที่ 5 เครื่องส่งเรดาร์ 49
บทนำ 49
ชนิดและหน้าที่ของเครื่องส่งเรดาร์แบบของเครื่องส่งเรดาร์ 49
UP/DOWN CONVERTOR 65
ข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องส่ง HPO,MOPA 66

เรดาร์ DUPLEXER 66
ชนิดของ DUPLEXER 68
FERRITE CIRCULATOR 70
บทที่ 6 เครื่องส่งเรดาร์ 71
บทนำ 71
ความต้องการของเครื่องรับ GAIN 71
สัญญาณรบกวน 71
TUNE 72
DISTORTION 72
BLOCKING 73
หน้าที่ของเครื่องรับ 73
การควบคุมสัญญาณต่าง ๆ ในเรดาร์ 82
บทที่ 7 จอแสดงผลเรดาร์ 87
บทนำ 87
หน้าที่ของจอแสดงผลเรดาร์ 87
ประโยชน์ของจอแสดงผลเรดาร์ 87
หลักการทำงานของจอแสดงผลเรดาร์ 88
บทที่ 8 ระบบพิสูจน์ฝ่าย 90
บทนำ 90
หลักการทำงานของระบบพิสูจน์ฝ่าย 90
ส่วนประกอบของระบบพิสูจน์ฝ่าย 91
ลักษณะของสัญญาณถามและสัญญาณตอบในระบบพิสูจน์ฝ่าย 93
ข้อจำกัดต่าง ๆ ในระบบ IFF 96
ระบบพิสูจน์ฝ่ายสมัยใหม่ 99
บทที่ 9 การสงครามอิเล็กทรอนิกส์ 101
บทนำ 101
ความสำคัญของการทำสงครามอิเล็กทรอนิกส์ 101
ความหมายของการทำสงครามอิเล็กทรอนิกส์ 101
SIGNAL INTELLIGENCE (SIGINT) 102
ประโยชน์ของการใช้ SIGNAL INTELLIGENCE 102

1 หลักการทำงานของเรดาร์
Principles of radar

บทนำ

เรดาร์เป็นคำย่อของ Radio Detection and Ranging เรดาร์ คือ เครื่องประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจจะใช้ค้นหาปรากฏการณ์ของวัตถุต่าง ๆ เช่น เครื่องบิน หรือ เรือ ไม่ว่าจะอยู่ ในความมืด หมอก หรือพายุ เพื่อที่จะแสดงปรากฏการณ์เหล่านั้น เรดาห์อาจจะใช้กำหนดทิศทางและระยะทาง (Direction) และระยะห่าง (Range) ในระบบเรดาห์แบบพิเศษยังกำหนดความสูง (Elevation) และความเร็ว (Speed) อีกด้วย มันเป็นพัฒนาการทางวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่อย่างหนึ่งซึ่งเกิดจากสงครามโลกครั้งที่ 2

พัฒนาการของเรดาร์ เกิดขึ้นจากความจำเป็นเหมือนสิ่งประดิษฐ์ที่ยิ่งใหญ่ทั้งหลายนั่นก็คือความต้องการค้นหาข้าศึกก่อนที่ข้าศึกจะค้นพบเรา หลักการเบื้องต้นต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับหน้าที่ และความสัมพันธ์อย่างง่าย ๆ และดูเหมือนว่ากรณีที่ประสบกับความยุ่งยากสลับซับซ้อนเข้าไปในวงจรไฟฟ้า ของเรดาร์อาจจะแก้ปัญหาแยกแยะและทำความเข้าใจได้ โดยใช้ตรรกะวิทยาเกี่ยวกับหน้าที่ของวงจรต่าง ๆ ตามลำดับ

ค.ศ. 1886 Heinrich Rudolf Hertz (ผู้คิดค้นคลื่นวิทยุ) ได้ค้นพบคุณสมบัติสะท้อนของคลื่นวิทยุ

ค.ศ. 1922 NRL (U.S.Naval Research Laboratory) ได้สาธิตการตรวจจับตำแหน่งของเรือโดยใช้ RADAR

ค.ศ. 1935 กองทัพอังกฤษสามารถใช้ RADAR ตรวจจับเครื่องบินได้

ค.ศ. 1954 RADAR ถูกนำไปใช้ในการพยากรณ์อากาศในอเมริกาเป็นครั้งแรก

ค.ศ. 1977 สหรัฐฯ เริ่มมีการใช้เครื่องบินติดตั้งระบบ RADAR พิสัยไกล

ค.ศ. 2011 รัสเซียสามารถพัฒนา RADAR ซึ่งตรวจจับขีปนาวุธที่อยู่ห่างออกไปถึง 6,000 กิโลเมตร

หลักการทำงานของเรดาร์

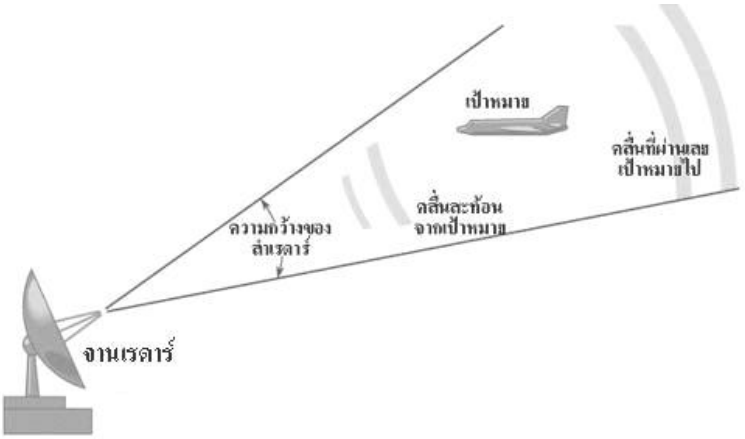
หลักการทำงานของเรดาร์คล้ายคลึงกับการทำงานของเสียงสะท้อน หรือการสะท้อนคลื่น

1. การสะท้อนคลื่นเสียง

ถ้าบุคคลหนึ่งตะโกนเข้าไปที่หน้าผา หรือพื้นที่ผิวสะท้อนคลื่นเสียงอย่างใดอย่างหนึ่งเขาจะได้ยินเสียงตะโกนของเขากลับมาในทิศทางจากหน้าผา แท้จริงแล้วอะไรทำให้เกิดเสียงนั้น ต้นกำเนิดเสียงเกิดขึ้นโดยเสียงตะโกนผ่านอากาศไปกระทบกับหน้าผา ที่นั่นคลื่นเสียงจะสะท้อนกลับ และบางส่วน จะกลับไปยังจุดเดิม ซึ่งบุคคลนั้นสามารถได้ยินเสียงสะท้อน บางครั้งเราอาจจะได้ยินเสียงสะท้อนหลังจากเวลาที่ได้ตะโกนไปแล้ว เพราะว่า คลื่นเสียงเดินทางผ่านอากาศประมาณ 1,100 ฟุตต่อวินาที บุคคลซึ่งอยู่ไกลจากหน้าผามากกว่าจึงต้องใช้เวลานานกว่า

ถ้าบุคคลหนึ่งอยู่ห่างจากหน้าผา 2,200 ฟุตต่อวินาที เมื่อเขาตะโกนไปแล้วประมาณ4 วินาทีผ่านไป เขาจึงจะได้ยินเสียงสะท้อน นั่นก็คือใช้เวลา 2 นาที เพื่อให้คลื่นเสียงไปถึงหน้าผาและ 2 วินาที สำหรับการกลับมาของเสียง

ถ้าสร้างอุปกรณ์บังคับทิศทางในการส่งและรับคลื่นเสียง ด้วยหลักการของเสียงสะท้อนพร้อมด้วยความรู้ของความเร็วแสงของคลื่นเสียง จะทำให้สามารถใช้กำหนดทิศทาง ระยะทางและความสูงของหน้าผา ดังภาพที่ 1-1

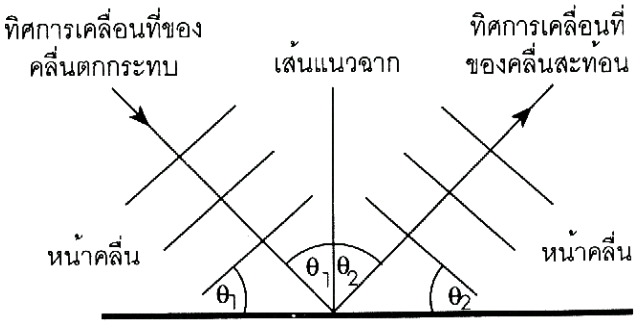


ภาพที่ 1-1 หลักการของเสียงสะท้อนพร้อมด้วยความรู้ของความเร็วแสงของคลื่นเสียง

เครื่องส่งเสียงซึ่งสามารถจ่ายพัลส์ของพลังงานเสียง สามารถจะอยู่ที่จุดโฟกัสของรีเฟลตเตอร์ (Reflector) ซึ่งจะแผ่รังสีบีมส์ (Beam) ของเสียง เครื่องรับเสียงอาจจะเป็นไมโครโฟนบังคับทิศทางอย่างสูงอยู่ทางด้านในของรีเฟลตเตอร์ (ณ จุดโฟกัส และหันหน้าเข้าหารีเฟลตเตอร์) เพื่อเพิ่มผลผลิตในการบังคับทิศทางไมโครโฟน ต่อผ่าน แอมปลีไฟร์ไปยังลำโพง

2. การสะท้อนของคลื่นวิทยุ

เครื่องเรดาร์ทั้งหมดทำงานเหมือนกับหลักการของคลื่นเสียงที่ได้อธิบายมาแล้วมากที่สุด อย่างไรก็ตามคลื่นวิทยุ เอ็กซ์ตรีมลี่ ไฮท์ฟรีเควนซี่ (Extremely High Frequency) ถูกใช้แทนคลื่นเสียง พลังงานที่ส่งออกจากสถานีเรดาร์ ดังรูปที่ 1-2 คล้ายกับส่งออกโดยเครื่องส่งวิทยุธรรมดา



ภาพที่ 1-2 การสะท้อนของคลื่นวิทยุ

สถานีเรดาร์มีลักษณะพิเศษดีเลิศอย่างหนึ่ง แตกต่างจากวิทยุ คือ รับสัญญาณของตัวมันเอง โดยจะส่งพัลส์สั้น ๆ และรับคลื่นสะท้อนของมัน แล้วส่งพัลส์ใหม่ และรับคลื่นสะท้อนตัวนั้นอีกโดยเกิดส่งออกและกลับมาของคลื่นซ้ำ ๆ จำนวน 60 ถึง 4,000 ครั้ง ต่อวินาที โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่อง ถ้าคลื่นส่งออกส่งไปในที่ว่าง จะไม่มีพลังงานสะท้อนกลับมายังรีซีพเวอร์ คลื่นและพลังงานที่เกิดขึ้น จะเดินทางไปในที่ว่างอย่างง่ายดายและสูญหายไป

อย่างไรก็ตาม ถ้าคลื่นกระทบกัน วัตถุอย่างหนึ่ง เช่น เครื่องบินดัง เรือ สิ่งก่อสร้างหรือภูเขา ส่วนหนึ่งพลังงานก็จะถูกส่งกลับมาเป็นคลื่นสะท้อน ถ้าวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่โดยเปรียบเทียบกับความยาวเสี้ยวคลื่นของพลังงานทรานสมิทเตอร์ เสียงสะท้อนแรง (แต่เป็นเพียงส่วนหนึ่งของพลังงาน ทรานสมิทเตอร์) จะกลับมายังสายอากาศ ถ้าวัตถุมีขนาดเล็กพลังงานจะสะท้อนกลับมาน้อยและเสียงสะท้อนจะอ่อน

คลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วของแสง ประมาณ 182,000 ไมล์บกต่อวินาที หรือ 162,000 ไมล์ทะเลต่อวินาที คลื่นวิทยุสามารถเดินทางรอบโลกในเวลาประมาณ 21,370 ไมล์ทะเล คลื่นวิทยุสามารถเดินทางรอบโลกในเวลาประมาณ 114,400 μs (ไมโครวินาที) หรือน้อยกว่า 1/7 ของวินาที การเดินทางรอบโลก 15 รอบ ใช้เวลา 2 วินาทีกว่า ๆ จำนวนนี้ คือ 2,000,000 μs พิจารณาถึง ดวงจันทร์ระยะทางจากพื้นโลกประมาณ 206,000 ไมล์ทะเล (240,000 ไมล์บก) สัญญาณเรดาร์เดินทางจากโลกไปยังดวงจันทร์และสะท้อนกลับมาโลกใช้เวลาประมาณ 2 1/2 วินาที

คลื่นวิทยุแบบคลื่น UHF และ SHF ส่วนใหญ่ได้รับผลสำแดงเพียงเล็กน้อยจากบรรยากาศแถบโมสเฟียของโลก และเดินทางเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามมันเป็นไปได้ที่จะวัดเวลาการเดินทางไปกลับระหว่างพัลส์ส่งและพัลส์รับด้วยความถูกต้องมากที่สุดถึง 1/10 ล้านวินาที ($1-10^{-7}$) รูปร่าง เวลา และการแสดงของพัลส์เหล่านี้เป็นผลสำเร็จได้ด้วยจำนวนของวงจรพิเศษและอุปกรณ์ต่าง ๆ

สายอากาศบังคับทิศทางถูกใช้โดยบริภัณฑ์ส่งเรดาร์และรับพลังงานในบีมส์แคบ ๆ ซึ่งกำหนดพอใช้ได้ ดังนั้นเมื่อทำการรับสัญญาณสายอากาศสามารถจะหมุนจนกระทั่งรับสัญญาณได้สูงที่สุด ทิศทางของเป้าจึงถูกกำหนดโดยตำแหน่งของสายอากาศ

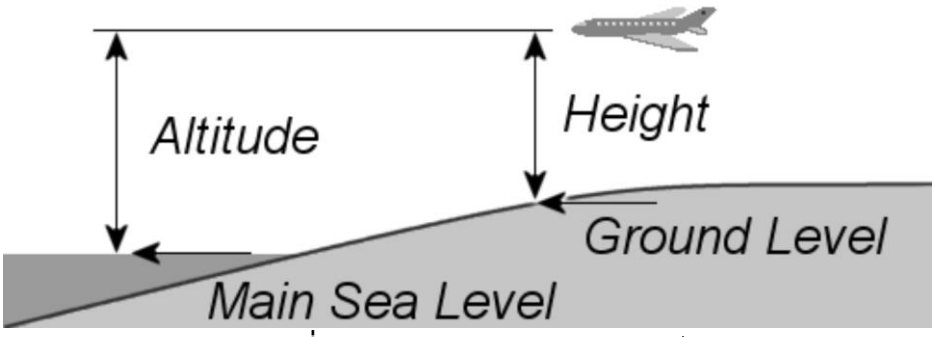
สัญญาณสะท้อนโดยเครื่องรับเรดาร์จะปรากฏเป็นเครื่องหมายแสงสว่าง เรียกว่า บรอลสซิลสโคป โดยที่สโคปนี้จะทำเครื่องหมายด้วยสเกลเป็นไมล์ (หลา) หรือองศา หรือทั้งสองอย่าง เนื่องจาก ตำแหน่งของสัญญาณของสโคป จะทำให้ผู้สังเกตการณ์สามารถจะบอกระยะทางและแบริ่งของ เป้าที่ค่าคงที่ได้

ระยะ ทิศทาง ความสูง ซึ่งสัมพันธ์กับระบบเครื่องเรดาร์

1. การกำหนดระยะของเรดาร์

การกำหนดระยะของเรดาร์ หมายถึง เพื่อกำหนดระยะทางและทิศทางของหน้าผาจะต้องทำการอย่างใดอย่างหนึ่งกับทรานสมิทเตอร์ (Transmitter) จนกระทั่งเส้นเดินทางของบีมส์เสียงทรานสมิทเตอร์ และเสียงสะท้อนรีซีฟเวอร์ใกล้ที่จะทับกันมากที่สุด ซึ่งอาจจะทับกันสนิท

ถ้าสามารถใช้รีเฟลตเตอร์แบบเดียวกันทั้งทรานสมิทเตอร์และรีเฟลตเตอร์ ดังที่ใช้ในแบบเรดาห์ เมื่อกระทำการอย่างใดอย่างหนึ่งจนกระทั่งได้รับค่าสูงสุดของเสียงสะท้อนระยะทางแนวราบไปยังหน้าผาสามารถคำนวณได้โดยการคูณ 1/2 ของเวลาที่สูญเปล่าไปในหน่วยวินาทีกับความเร็วแสงของเสียง จะได้เป็นระยะทางที่แท้ตามความยาวของเส้น RA ดังภาพที่ 1-3



ภาพที่ 1-3 การกำหนดระยะของเรดาร์

ถ้ารีเฟลตเตอร์มีสแกลเป็นรูปวงกลมซึ่งทำเครื่องหมายเป็นองศาและถ้ามันหมุนไปพร้อมกับเข็มทิศอย่างถูกต้อง ทิศทางหรือ แอซิมัท (Azimuth) ของหน้าผาสามารถหาได้ดังนั้น ถ้ามุมแสดงที่สเกลเป็น 45 องศา หน้าผาก็จะอยู่ห่างจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือจากตำแหน่งของรีซีพเวอร์

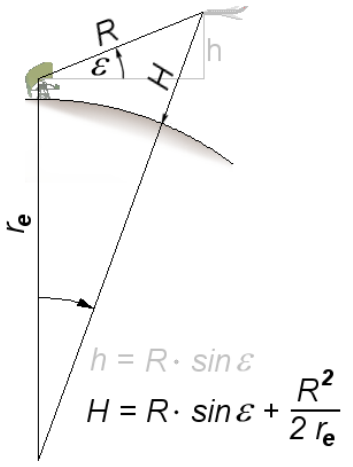
2. การหาทิศทางของเรดาร์

การหาทิศทางของเรดาร์ หรือเรียกอีกอย่างว่าการให้รายละเอียดของมุมทิศ (BEARING RESOLUTION) ของระบบเรดาร์จะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของลำคลื่นจากสายอากาศ การให้รายละเอียด (RESOLUTION) ของขนาดอุปการณ์เรดาร์ หมายถึง ความสามารถในการแสดงว่ารูปร่างของเป้าหมายขนาดใหญ่ การที่จะแสดงรายละเอียดของเป้าหมายขนาดใหญ่ ๆ ได้ดีนั้น จะต้องใช้ลำคลื่นที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าพื้นที่ของเป้าหมายมาก ๆ และระยะเวลาของพัลส์จะต้องสั้นมาก ๆ

การจัดหามุมทิศของเป้าหมายโดยเรดาร์นั้นจะบอกในรูปของตำแหน่งเชิงมุม โดยที่มุมวัดนี้จะวัด โดยเทียบกับทิศทางเหนือจริง (TRUE NORTH) ซึ่งจะให้ค่าเป็นมุมทิศจริง (TRUE BEARING) หรืออาจวัดเทียบกับตำแหน่งของเรือหรืออากาศยานที่ติดตั้งเรดาร์นั้น ซึ่งจะได้มุมแบบRELATIVE BEARING ก็ได้การวัดมุมที่สัญญาณเอคโค่สะท้อนกลับมา

3. การหาความสูงของเรดาร์

เพื่อกำหนดความสูงของเรดาร์ ดังภาพที่ 1-4 สายอากาศของทรานสมิทเตอร์และรีซีพเวอร์จะถูกกระดกขึ้นจากตำแหน่งของแนวนอน ขณะที่ยังชี้อยู่ในทิศทางเดิมครั้งแรกจะยังคงได้ยินเสียงสะท้อน แต่เวลาว่าจะเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย เมื่อมุมมองความสูงเพิ่มขึ้นมุมจะถูกค้นพบได้เมื่อไม่ปรากฏเสียงสะท้อน นี่ก็คือ มุมซึ่งเสียงผ่านไปเหมือนยอดของหน้าผา ดั้งนั้น จึงไม่สะท้อนกลับมายังรีซีพเวอร์ เราสามารถจะคำนวณโดยการใช้อัตราส่วนของตรีโกณมิติ



ภาพที่ 1-4 การกำหนดความสูงของเรดาร

ประโยชน์จากการใช้งานระบบเรดาร์และบริภัณฑ์

นักวิทยาศาสตร์ของกองทัพเรือเป็นผู้ริเริ่มในการค้นคว้าการใช้ประโยชน์ของเรดาร์ทางปฏิบัติการใช้ประโยชน์ที่สำคัญที่สุด คือการค้นหา และการทำลายข้าศึก ด้วยอาวุธอันนี้ยังคงเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของกองทัพเรือในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ของเรดาร์ในด้านอื่น ๆ อีกดังนี้

เรดาร์กำหนดความเร็วบนไฮจ์เวบต่าง ๆ เพื่อควบคุมการจราจร

เรดาร์พยากรณ์อากาศ

เรดาร์เดินเรืออากาศพาณิชย์

เรดาร์รักษาความปลอดภัยของยวดยานทางอากาศและเรือสินค้าต่าง ๆ ให้พ้นจากอันตรายจากการชนกันเมื่อไม่มีเรดาร์เอกเทศที่สามารถให้ข่าวสารตามความต้องการสำหรับทั้งกองทัพได้หมด จึงต้องออกแบบเรดาร์หลาย ๆ ชั้น หลาย ๆ แบบ แต่ละแบบของเรดาร์เหล่านี้ หรือการแบ่งพวกมีข้อจำกัด และความสามารถตามความประสงค์ซึ่งสร้างขึ้นเรดาร์ใช้บนเรือแบ่งโดยทั่วไปเป็น 3 พวก คือ เรดาร์ค้นหา เรดาร์ควบคุมการยิงและเรดาร์แบบพิเศษ

เรดาร์ค้นหาแบ่งออกเป็น 2 อย่างคือ เรดาร์ค้นหาแบบอากาศและเรดาร์ค้นหาทางผิวพื้น บริภัณฑ์เหล่านี้ใช้เพื่อเตือนภัยล่วงหน้าและสำหรับการเดินเรือทั่วไป เรดาร์ค้นหาผลิตการค้นหาด้วยระยะทางสูงสุดโดย ไม่คำนึงถึงองศาที่ถูกต้องและให้รายละเอียดต่าง ๆ มากนักเรดาร์การควบคุมการยิง ส่วนเดียวกันกับระบบควบคุมการยิง จะใช้หลังจากได้ตำแหน่งของเป้าโดยเรดาร์ค้นหาแล้ว เรดาร์แบบพิเศษ ใช้สำหรับความมุ่งหมายหลายประการ ซึ่งรวมทั้งการจดจำหรือแยกแยะว่าข้าศึกหรือพวกเดียวกัน (IFF) การควบคุมภาคพื้นดินและการควบคุมการเข้าไปใกล้เรือบรรทุกเครื่องบิน (GCA และ CCA ตามลำดับ) อัตราระยะทางหรือความเร็วและการค้นหาความสูง

1. เรดาร์ค้นหา (Search Radar)

เรดาร์ค้นหาใช้สำหรับข่ายการเตือนภัยล่วงหน้า ไม่ต้องการระยะทางหรือทิศทางมากนักแต่ต้องการความสามารถที่จะแสดงตำบลของเป้าด้วยระยะทางไกลพบสมควร ดังนั้นเรดาร์ค้นหานี้ตามปกติต้องออกแบบให้มีพาวเวอร์สูง บีมส์มีมุมกว้าง และพัลส์วิลธ์ (Pulse widths) ยาวพอสมควร ความสามารถในการแสดงทิศทางและระยะที่ถูกต้อง (Resolution) ไม่ค่อยดีเหมือนเรดาร์ที่ใช้ในกิจการอื่น เช่น เรดาร์การยิง

บริภัณฑ์เรดาร์ในแต่ละแบบได้ออกแบบตามความมุ่งหมายที่กำหนด เรดาร์ค้นหาทางอากาศไม่สามารถเพียงพอสำหรับการค้นหาผิวพื้นหรืออื่น ๆ แต่ละแบบเหล่านี้อาจจะใช้ในกรณีฉุกเฉินเป็นเรดาร์ควบคุมการยิง แต่ไม่สามารถให้ส่วนประกอบของทิศทาง ระยะ และตำแหน่งมุมด้วยองศาที่ถูกต้องเหมือนกันกับเรดาร์ที่ออกแบบไว้เพื่อความมุ่งหมายนี้ได้โดยเฉพาะได้

2. เรดาร์ค้นหาทางอากาศ (Air Search Radar)

หน้าที่หลักของเรดาร์ค้นหาทางอากาศ คือ ค้นหาและแสดงระยะทางและทิศทางของเป้าเครื่องบินในระยะไกล รอบทิศทาง (306 องศา) เพื่อให้ได้การสั่งระยะทางเกล โดยการจางหายน้อยที่สุด พัลส์กว้าง (2-4 μs) และพาวเวอร์ค่ายอดสูงเพื่อช่วยการค้นหาเป้าเล็ก ๆ ในระยะทางระยะไกล การทบทวนห้วงคลื่น (PRT) มีอัตราต่ำเพื่อให้มีผลในการวัดระยะทางได้สูงสุด บีมส์ของลำคลื่นทางแนวตั้งต้องกว้างเพื่อช่วยในการค้นหาเป้าจากผิวพื้นสัมพันธ์กับมุมทางสูงได้ผลดี และชดเชยระดับการโคลงของเรือ ความกว้างของบีมส์แนวนอนปานกลาง เพื่อให้การวัดทิศทางและระยะได้ผลพอสมควร ขณะที่ค้นหาไปรอบ ๆ 360 องศา

3. เรดาร์ค้นหาทางผิวพื้น (Surface Search Radar)

หน้าที่หลักของเรดาร์ทางผิวพื้นคือ ค้นหาแสดงระยะทางและทิศทางอันถูกต้องของเป้าทางผิวพื้นรอบ 360 องศา ภายในระยะทางระดับสายตาของสายอากาศเรดาร์

เมื่อระยะทางสูงสุดของเรดาร์ค้นหาทางผิวพื้นถูกจำกัดโดยเส้นขอบฟ้า ความถี่สูง (X-Band) จึงถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับสูงสุดจากเป้าที่มีพื้นที่สะท้อนกลับน้อย เช่น เสากระโดงเรือ หรือกล้องเทอรีสโคปของเรือดำน้ำ แบนด์วิคซ์ของพัลส์แคบ (0.37 -2 μs) เพื่อให้เกิดองศาของการวัดระยะและทิศทางได้ในระยะใกล้ อัตราทบทวนพัลส์ (PRF) สูง (600 - 1,000) เพื่อให้มองเห็นเป้าในจอได้ชัดเจนที่สุด พาวเวอร์ค่ายอดปานกลาง เพื่อให้สามารถค้นหาเป้าเล็ก ๆ ในระดับเส้นสายตาได้บีมส์ทางแนวตั้งกว้าง 10 - 30 องศา เพื่อชดเชยระดับการโคลงของเรือตนเอง และเพื่อค้นหาเครื่องบินที่บินอยู่ในความสูงต่ำ ๆ บีมส์ทางแนวนอนแคบ (1-3 องศา) เพื่อให้ได้การวัดระยะทางและแบริ่งมีความถูกต้อง

4. เรดาร์ควบคุมการยิง (Fire Control Radar)

หน้าที่หลักของเรดาร์ควบคุมการยิง คือ รับสัญญาณตัวเดิมที่ค้นหา และกำหนดจากเรดาร์ผิวพื้น และแสดงระยะทางแบริ่งพร้อมทั้งตำแหน่งมุมอันถูกต้องในระยะยิง สายอากาศมีความสามารถที่จะอยู่ในตำแหน่งระดับคงที่ เพื่อชดเชยระดับการโคลงของเรือตนเอง ความถี่ที่ใช้จะใช้ความถี่สูงเพื่อให้บีมส์แคบลง โดยเทียบกับสายอากาศขนาดเล็ก ค้นหาเป้าด้วยพื้นที่สะท้อนเล็ก ๆ และให้รายละเอียดสำหรับเป้าทั้งหมด พัลส์วิคซ์แคบมาก ทำให้การวัดระยะทางใกล้ ๆ ได้ผลดีเลิศอัตราของพัลส์ทบทวนสูงทำให้เห็นการแสดงเป้าได้ชัดเจน เมื่อความกว้างของพัลส์วิคซ์แคบเมื่อไม่ต้องการระยะทางไกลจึงใช้พาวเวอร์ค่ายอดต่ำ ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้เล็กลง โดยรักษาพาวเวอร์ค่าเฉลี่ยต่ำ บีมส์คลื่นแคบทั้งทางแนวตั้งและทางแนวนอน ทำให้ได้แบริ่งและตำแหน่งโดยถูกต้อง

5. เรดาร์เครื่องบิน (Airborne Radar)

บริภัณฑ์เรดาร์สำหรับเครื่องบินเป็นแบบเหมือนกับที่ใช้บนบกหรือใช้ในเรือโดยทั่ว ๆ ไป เว้นแต่ขนาดต้องเล็กกว่าเท่านั้น เรดาร์ค้นหาและเรดาร์ควบคุมการยิงใช้ในเครื่องบินทั้งสองอย่าง เรดาร์เครื่องบินทำให้สามารถเพิ่มระทางค้นหาโดยขยายระยะทางได้มากขึ้น เพราะเส้นระดับสายตาจะมากขึ้น เมื่อเครื่องบินอยู่ในระยะสูง

ข่าวเรดาร์ที่รับบนเครื่องบิน อาจจะถ่ายทอดโดยเครื่องส่งวิทยุไปยังสถานที่อื่น ๆ บนเรือหรือที่ไหนก็ได้ ดังนั้นจึงจะทำให้ระยะทางเพิ่มขึ้น

6. บริภัณฑ์ช่วยเหลือ (Auxiliary Equipment)

ความต้องการที่จะแยกเป้าที่รับได้ว่าเป็นพวกเดียวกันหรือข้าศึกเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ ระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง สำหรับการแยกแยะว่าเป็นพวกเดียวกันหรือศัตรู (Identification, Friend) ระบบ IFF จึงใช้เพื่อจุดประสงค์มีบริภัณฑ์ช่วยเหลือนี้สามารถที่จะบอกได้ว่าลักษณะของเป้าหมายที่ได้รับโดยเรดาร์นั้นเป็นมิตรหรือศัตรูได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว

บริภัณฑ์ระบบ IFF ประกอบด้วยรูป 2 กลุ่ม ซึ่งแต่ละรูปมี 2 ยูนิท โดยที่ยูนิททั้งสองนั่นคือ

6.1 ทรานสมิทเตอร์ - รีซีพเวอร์ อยู่ในเรดาร์

6.2 รีซีพเวอร์ -ทรานสมิทเตอร์ อยู่ในยานของพวกเดียวกัน

กลุ่มของทรานสมิทเตอร์ - รีซีพเวอร์จะเป็น Recognition set และ รีซีพเวอร์ - ทรานสมิทเตอร์ จะเป็น Identification และเป็น Transponder ด้วย

เมื่อพนักงานเรดาร์ได้รับเป้าที่ไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นพวกเดียวกันหรือศัตรูเขาก็จะเปิดกลุ่มแรก (Identification) ทำงาน เครื่องส่งสัญญาณก่อนจะส่งเป็นแบบพัลส์มีลักษณะเป็นโค๊ต (Challenging pulses) เครื่องรับของ Transponder จะรับพัลส์เหล่านี้ และกระตุ้นสัญญาณตอบโต้อัตโนมัติตามที่พนักงานของพวกเดียวกันทราบได้ว่าเป็นมิตร เครื่องส่งของ Transponder จะปล่อยสัญญาณตอนนี้ ซึ่งจะถูกรับของ Identification และจะส่งไปปรากฏบนจอเรดาร์เพื่อ การพิจารณาจอที่แสดงอาจเป็นจอเดียวกับจอเรดาร์หรืออาจจะแยกต่างหาก

7. ข่าวสารที่ผลิตได้โดยเรดาร์ (Information Produced by Radar)

เรดาร์เพิ่มความสามารถของการเดินเรือ โดยช่วยให้เกิดพาวเวอร์ใหม่และความสามารถต่อความรู้สึกของมนุษย์ โดยไม่ต้องคำนึงถึงสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่น ความมืด หมอก พายุ หรือ ควัน เรดาร์แสดงให้เห็นการปรากฏตำแหน่งที่วัตต์เกินกว่าระยะทางการมองเห็นธรรมดา แสดงระยะทางและแบริ่งด้วยความถูกต้องแน่นอน เรดาร์ใช้ในการค้นหาสิ่งที่อยู่ในความมืดรอบ ๆ เครื่องบิน เรือ ผืนแผ่นดิน เมฆ และอันตรายเกี่ยวกับการเดินเรือต่าง ๆ

2 ประเภทของเรดาร์
Type of radar

บทนำ

การสังเกตการณ์ครั้งแรกของคลื่นวิทยุสะท้อนได้กระทำขึ้นในสหรัฐอเมริกาใน ค.ศ. 1532 โดย Dr.A.H.Taylor ณ สถาบันวิจัยของฐานทัพเรือ ดร.เทเลอร์สังเกตุได้ว่าเรือที่ผ่านระหว่างทรานสมิทเตอร์และรีซีพเวอร์จะสะท้อนคลื่นบางส่วนไปยังทรานสมิทเตอร์ ระหว่าง ค.ศ. 1523-1530 หลักการอันนี้ได้ทำการค้นคว้าก้าวหน้าไปมาก เพื่อค้นหาวัตถุซึ่งปกติจะถูกพรางโดย ควัน หมอก ฯ โดยความร่วมมือระหว่างช่วงเวลาเดียวกันนี้ DR.Bfett และ DR.TUVE แห่ง Carnegie institute published ได้รายงานการสะท้อนของพัลส์ส่งจากชั้นไฟฟ้าในแอทโมสเฟียข้างบน สิ่งนี้ได้ชักนำให้เกิดการประยุกต์หลักการในการค้นหาเครื่องบินประเภทต่างๆ และได้มีการทดลองต่อไปอย่างอิสระด้วยความสุดยอด ใน ค.ศ.1936 กองทัพบกสหรัฐอเมริกาได้ค้นพบพัฒนาการของเรดาร์เตือนภัยสำหรับฝั่งทะเลชายแดน ในปลาย ค.ศ. 1940 อังกฤษได้พัฒนาเรดาร์ถึงจุดที่สามารถทำให้เครื่องบินของข้าศึกตกลงมาเป็นจำนวนมาก ด้วยปืนที่ควบคุมด้วยระบบเรดาร์อย่างถูกต้อง ในต้นปี ค.ศ.1941 อังกฤษและอเมริกาได้ร่วมกันพัฒนาการของเรดาร์ และได้พัฒนาเกี่ยวกับเคาน์เตอร์ด้วย จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1941 จึงสามารถใช้ประโยชน์เรดาร์ได้อย่างใหญ่หลวงในการวิจัยหลายประเภท และศูนย์พัฒนาการทั่วประเทศ

ประเภทการใช้งานของเรดาร์

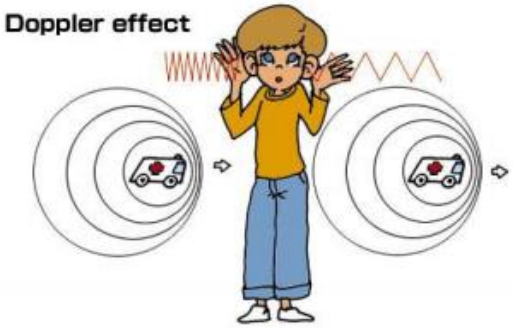
1. เรดาร์แบบ CW (Continuous Wave Radar)

คอนตินิวอัส-เวฟ ที่ใช้ค้นหาเป้า โดยใช้หลักของ MFEKCT ความถี่ของคลื่นสะท้อนเรดาร์จะเปลี่ยนไปเมื่อวัตถุซึ่งรีเฟลก คลื่นสะท้อนถอยห่างออกไปจากทรานสมิทเตอร์เรดาร์ การเปลี่ยนแปลงในความถี่นี้เรียกว่า Doppler effect ผลแสดงที่คล้ายคลึงกันนี้เหมือนกับระดับเสียงของรถไฟที่วิ่งเข้ามาใกล้หูจะมีระดับสูง ผลแสดงตรงข้าม (ระดับเสียงลดลงจะเกิดขึ้น เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ห่างออกไปจากผู้ฟัง

เรดาร์ที่ใช้ประยุกต์ผลสำแดงนี้จึงวัดความแตกต่างของความถี่ระหว่าง ทรานสมิทเตอร์และพลังงานสะท้อน ดังนั้นจึงสามารถใช้ค้นหาความเร็วและเป้าเคลื่อนที่ได้ วิธีการนี้จะทำงานได้ดีกับเป้าที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่จะไม่ได้ผลเมื่อเป้าเคลื่อนที่ช้าหรืออยู่กับที่ ดังนั้นเรดาร์แบบ CW จึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน

1.1 การเกิด Frequency Doppler

Frequency Doppler หมายถึงปรากฏการณ์ที่เมื่อเราส่งความถี่หนึ่งไปกระทบวัตถุที่เคลื่อนที่แล้วรับความถี่ที่สะท้อนกลับมาความถี่นั้นจะเปลี่ยนไป



ภาพที่ 2-1 การเกิด Frequency Doppler

ระยะห่างระหว่างเสาอากาศกับเป้าหมาย สามารถคำนวณได้จากช่วงเวลาระหว่างการส่งคลื่น จนถึงการรับคลื่นที่สำท้อนกลับมา สำหรับการคำนวณ ทิศทางและความสูงของเป้าหมาย หาได้จากทิศทางของเสาอากาศ ในขณะที่จับเป้าหมายได้ และลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น ๆ ว่ามีการเคลื่อนไหวอย่างไร เช่น ห่างออกไป หรือใกล้เข้ามา โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของคลื่นความถี่ที่ส่งออกไป กับคลื่นความถี่สะท้อนกลับมา เรียกว่า ปรากฏการณ์ดอปเปอร์ (Doppler effect) จากภาพที่ 2-1 จะสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเรายืนอยู่ข้างถนนแล้วมีรถพยาบาลเปิดสัญญาณฉุกเฉินวิ่งผ่านเราจะได้ยินความถี่เสียงนั้นแตกต่างกันออกไป ตามระยะใกล้ไกล)

1.2 หลักการทำงานของเรดาร์แบบ CW

ความถี่ของเสียงกระทบกับเสียงจะมีความถี่อะไรก็ตามจะเกิดความถี่เปลี่ยนไปในเรดาร์ ถ้าส่งความถี่ (F_0) ไปกระทบเป้าที่เคลื่อนที่ความถี่ที่รับ (f_0) จะเปลี่ยนไป ถ้าวัตถุวิ่งเข้าหาความถี่รับ (f_0) จะสูงขึ้น ถ้าวัตถุวิ่งออกความถี่ที่รับ(f_0) จะต่ำลง นั่นคือ fd = ผลต่างของ F_0 กับ f_0

1.2.1 การหาความเร็ววัตถุ

การหาความเร็ววัตถุสามารถหาได้จาก

$$F_d = \frac{V_t \times F_0}{V_s}$$

เมื่อ F_d คือ Doppler Frequency (Hz)

f_0 คือ Receiver Frequency (Hz)

V_t คือ Target Velocity 3×10^8 (m/Sec.)

$V_S = C$ คือ ความเร็วของวัตถุ

เมื่อสัญญาณสะท้อนกลับมายังเรดาร์ จะได้

$$F_d = 2V_t \times \frac{F_0}{V_s}$$

เมื่อ $$V_t = \frac{F_d \times V_s}{2 \times F_0}$$

F_d คือ Doppler Frequency (Hz)

F_0 คือ Transmitter Frequency (Hz)

f_0 คือ Receiver Frequency (Hz)

V_t คือ Target Velocity 3×10^8 (m/Sec.)

$V_S = C$ คือ ความเร็วของวัตถุ

ตัวอย่างที่ 2.1 ถ้าเรดาร์ส่งที่ความถี่ 10 GHz เครื่องเรดาร์จับความเร็วรถยนต์ได้ความถี่ fd เท่ากับ 2 kHz จงหาความเร็วรถยนต์

วิธีทำ จากสูตร $F_d = 2V_t \times \frac{F_0}{V_s}$

ข้อมูลที่ทราบคือ $fd = 2kHz$ และ $V_s = 3\times10^8$

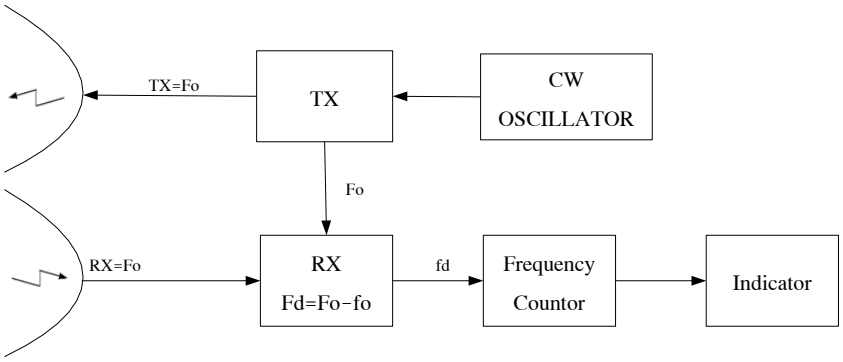
หาความเร็วรถยนต์ได้จาก $V_t = \frac{F_d}{F_0} \times \frac{V_s}{2}$

$$= \frac{2\times10^3}{1\times10^{10}} \times \frac{3\times10^8}{2} \text{ m/s}$$

$$= \frac{2\times10^3}{1,000} \times \frac{3\times10^8}{2\times10^{10}} \times 60 \times 60 \text{ Km/h}$$

$$= 108 \text{ Km/h}$$

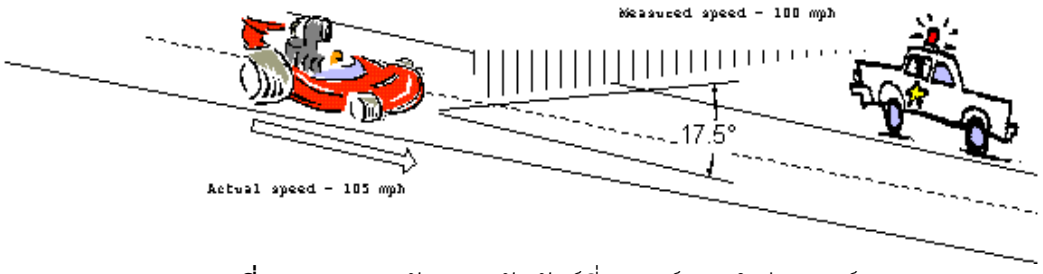
1.3 Block Diagram ของเรดาร์แบบ CW



ภาพที่ 2-2 CW Radar Block Diagram

จากภาพที่ 2-2 Block Diagram แสดงการทำงานของเรดาร์แบบ CW โดย CW Oscillator จะผลิตความถี่เรดาร์แบบต่อเนื่อง (FO) ส่งให้กับภาคเครื่องส่ง (Transmitter) เพื่อขยายสัญญาณให้สูงขึ้นและส่งออกด้วยสายอากาศส่ง เมื่อสัญญาณเรดาร์ (RX) กระทบวัตถุและสะท้อนกลับทางสายอากาศรับเข้าที่เครื่องรับซึ่งจะนำความถี่ส่งและความถี่รับมาหักล้างออกเป็นความถี่ผลต่าง หรือ fd จากนั้นจะส่งให้กับ ส่วนของ Frequency Counter เพื่อแปลง fd เป็นความเร็วแล้วแสดงผลในภาค Indicator

การประยุกต์ใช้งานของเรดาร์แบบ CW ได้แก่ เครื่องวัดความเร็วของกระสุนปืนหรือตรวจจับความเร็วของตำรวจอย่างไรก็ตามการวัดความเร็วของเรดาร์นี้จะวัดความสัมพัทธ์กับเรดาร์หรือความเร็วที่วิ่งเข้าหาหรือวิ่งออกจากเรดาร์โดยตรงเท่านั้นจึงจะได้ความเร็วที่ถูกต้องหากวัตถุวิ่งที่มุมต่างออกไปจะอ่านได้ค่าความเร็วไม่ถูกต้องเช่นตาม ภาพที่ 2-3 นั่นคือ รถวิ่งด้วยความเร็ว 105 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แต่เรดาร์ตรวจจับความเร็วของตำรวจทำมุมห่างออกไป 17.5 องศาทำให้เรดาร์อ่านความเร็วได้ 100 กิโลเมตรต่อชั่งโมง ซึ่งเป็นความเร็วสัมพัทธ์ที่รถยนต์กระทำต่อเรดาร์



ภาพที่ 2-3 ผลการวัดความสัมพัทธ์ที่รถยนต์กระทำต่อเรดาร์

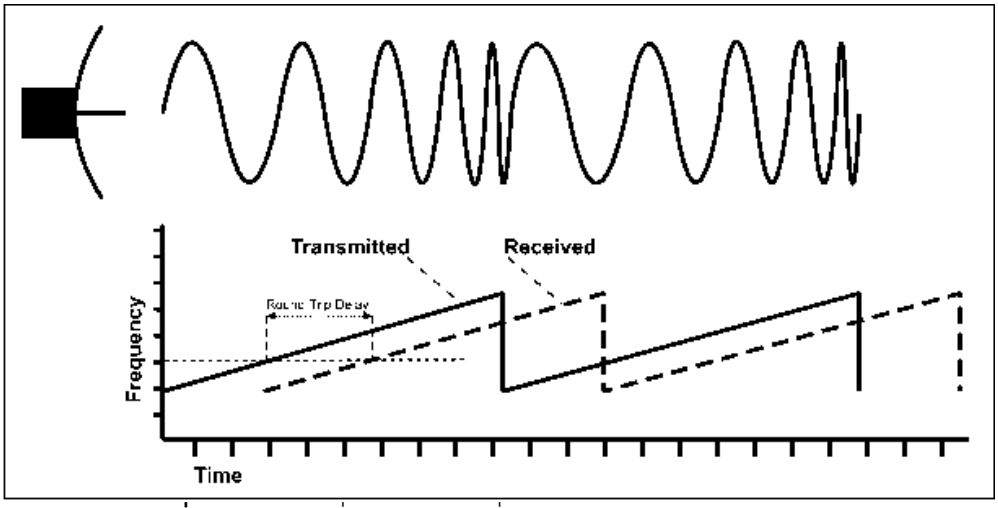
2. เรดาร์แบบ FM-CW (Frequency Modulation - Continuous Wave)

ฟรีเควนซี่ – เมดูเลชั่น (FM) พลังงานเครื่องส่งจะแปรผันต่อเนื่องและเป็นช่วงเวลาเท่า ๆ กัน ตลอดแบรนด์ความถี่ที่กำหนด ความถี่ชั่วขณะของพลังงานจะถูกแผ่รังสีโดยสายอากาศ ดังนั้นความแตกต่างจากความถี่ชั่วขณะก็จะถูกรับโดยสายอากาศ

เรดาร์แบบ FM-CW เป็นเรดาร์ที่ใช้วัดความสูงของเครื่องบินกับภูมิประเทศ (Geographic Level) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Altitude Meter (Geographic Level) ซึ่งแตกต่างการวัดความสูงโดยใช้ Barometer ซึ่งใช้วัดความสูงเทียบกับระดับน้ำทะเล (Sea Level) ในปัจจุบันเทคโนโลยี ทางด้าน Signal Processor สูงขึ้นทำให้สามารถแก้บัญหาการเกิด Doppler เนื่องจากเป้าเคลื่อนที่ได้ ทำให้พัฒนาเป็นเรดาร์แบบ LPI (Low Probability of Intercept Radar) ซึ่งเป็นเรดาร์กำลังงานต่ำยากต่อการถูกตรวจพบ

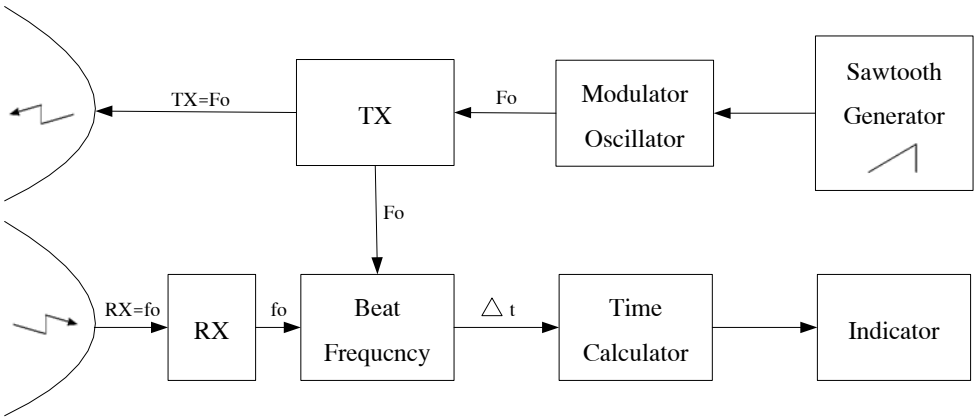
2.1 หลักการทำงานของเรดาร์แบบ เรดาร์แบบ FM-CW

หลักการทำงาน ของ FM เรดาร์ทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนความถี่ส่งแล้วนำผลต่างระหว่างความถี่รับและส่งมาเปรียบเทียบกับผลต่างของเวลาในช่วงความถี่จะนำมาหาระยะ (เรดาร์ชนิดนี้ใช้เฉพาะ วัดระยะห่างของวัตถุที่อยู่กับที่เพราะถ้าวัตถุเคลื่อนที่จะทำให้เกิด Frequency Doppler)



ภาพที่ 2-4 การเปลี่ยนของความถี่ส่งแปลผันตามค่าของ Saw-tooth

2.2 Block Diagram ของเรดาร์แบบ FM-CW



ภาพที่ 2-5 FM Radar Block Diagram

จากภาพที่ 2-5 สามารถอธิบายการทำงานของเรดาร์แบบ FM-CW โดย Saw-tooth Generator ทำหน้าที่ผลิตรูปคลื่นฟันเลื่อยทำการมอทดูเลทกับตัวความถี่จาก CW Oscillator เป็นความถี่เรดาร์ซึ่งความถี่จาก CW Oscillator จะแปลผันจากต่ำไปสูงตามค่าของ Saw-tooth สัญญาณของความถี่เรดาร์ (F_0) ที่ได้จะส่งไปให้ภาคเครื่องส่ง (TX) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ให้สูงขึ้นและทำการส่งออกอากาศไปโดยความถี่ของการส่งจะสูงขึ้นด้วยอัตราที่คงที่

เมื่อสัญญาณเรดาร์ไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมายังเรดาร์ (f_0) ผ่านเข้ามาที่เครื่องรับขยายสัญญาณให้สูงขึ้นและส่งต่อให้กับ Beat Frequency ทำการเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณที่ส่งปัจจุบัน (F_0) กับความถี่ส่งแรกที่รับกลับเข้ามา (f_0) เพื่อหาค่าเวลาการเปลี่ยนแปลงระหว่างความถี่ที่ส่งปัจจุบันกับความถี่ที่รับกลับเข้ามา Δt เราสามารถนำค่านี้มาคำนวณหาระยะห่างของวัตถุจากเรดาร์ได้จาก

$$R = \frac{C \times \Delta t}{2}$$

เมื่อ R คือ ระยะจากเรดาร์ถึงวัตถุ

C คือ ความเร็วแสง 300×10^8 เมตรต่อวินาที

Δt คือ ระยะเวลาที่เดินทางไปและกลับ

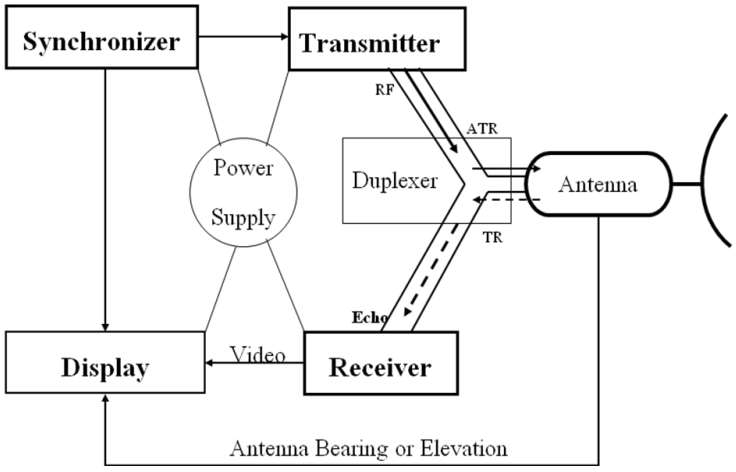
3. เรดาร์แบบ Pulse Modulator

Pulse Modulator เป็นเรดาร์ทีใช้กันแพร่หลายมากที่สุด หลักการทำงานโดยการส่งความถี่แบบห้วงพัลส์ เมื่อพัลส์ไปกระทบวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาช่วงเวลาตั้งแต่ส่งออกไปจะถึงสะท้อนกลับมาถึงเครื่องรับจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาระยะทาง

3.1 หลักการทำงานของเรดาร์แบบ Pulse Modulator

พัลส์ - โมดูเลชั่น (PM) ในวิธีการนี้ พลังงานความถี่วิทยุจะถูกส่งออกไปเป็นพัลส์สั้น ๆ ซึ่งระยะเวลาของพัลส์ประมาณ 0.1 ถึง 50 μs ถ้าเครื่องส่งถูกปิดก่อนที่พลังงานสะท้อนกลับจากเป้า รีซีฟเวอร์ก็สามารถที่จะสามารถที่จะแยกพัลส์ส่งและพัลส์รับได้ พลังจากคลื่นสะท้อนทั้งหมดกลับมาแล้วทรานสมิทเตอร์ ก็สามารถที่จะส่งอีกสลับกันเรื่อย ๆ ไป Output ของรีซีพเวอร์ถูกประยุกต์เข้าที่อินติเกเตอร์ (Indicator) ซึ่งจะวัดเวลาหยุดพักระหว่างพลังงานแสงและคลื่นที่สะท้อนกลับมา เพราะว่าพลังงานเดินทางด้วยอัตราความเร็วคงที่ ครึ่งหนึ่งของเวลาพักระหว่าง Output พัลส์และพัลส์สะท้อนทำให้สามารถวัดระยะการเดินทางของพัลส์ไปยังเป้าหมายได้ เพราะว่าวิธีการนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความถี่ของทรานสมิทเตอร์และสัญญาณที่กลับมา หรือการเคลื่อนที่ของเป้า ประสบการณ์ยุ่งยากต่างๆ เหมือนวิธีการ CW และ FM-CW จึงไม่เกิดขึ้น ดังนั้นวิธีการพัลส์โมดูเลชั่น จึงใช้ในกิจการทหารเกือบทั้งหมด

3.2 Block Diagram ของเรดาร์แบบ Pulse Modulator



ภาพที่ 2-6 Pulse Modulator Block Diagram

3.2.1 Synchronizer หรือ Timer

Synchronizer ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณ Trigger เพื่อกระตุ้นให้ส่วนต่าง ๆ ของระบบเรดาร์ทำงานสัมพันธ์ถูกต้อง เช่น ในภาคเครื่องส่งจะมี Trigger มากระตุ้นให้ส่วนของ Modulator ทำงานผลิตพัลส์ลบส่งให้หลอดแมกนีตรอนผลิตอาร์เอฟพัลส์ออกอากาศไปและรับสัญญาณสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องรับและแปลงเป็นสัญญาณวิดีโอส่งให้กับภาพแสดงจะมีเวลาส่วนหนึ่งเสียไประหว่าง การเดินทางของคลื่นจากเครื่องส่งไปสายอากาศจนกลับมาถึงภาคแสดง ในส่วนของภาคแสดงจะถูกกระตุ้นด้วย Trigger เช่นกันแต่จะมีเวลาต่างออกไปเช่นอาจจะมาก่อนวิดีโอเตรียมพร้อมให้มีการแสดงภาพพร้อมกันที่ระยะศูนย์

3.2.2 Transmitter (ภาคเครื่องส่ง)

Transmitter ทำหน้าที่ผลิต RF High Power ส่งให้กับสายอากาศโดยได้รับ Trigger มาจาก Synchronizer เพื่อให้เริ่มการทำงาน

3.2.3 Duplexer

Duplexer ทำหน้าที่แยกการรับและส่งเรดาร์โดยใช้สายอากาศเดียวกัน โดยใช้ปิดเครื่องรับขณะทำการส่งและใช้เปิดเครื่องรับหลังจากการส่งสิ้นสุด

3.2.4 Antenna

Antenna ทำหน้าที่ส่งและรับพลังงาน RF โดยเปลี่ยนพลังงาน RF เป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และรับพลังงานคลื่นแม่เหล็กที่สะท้อนวัตถุต่าง ๆ กลับมาเปลี่ยนเป็นพลังงาน RF ส่งผ่าน Duplexer ไปให้กับภาค Receiver นอกจากนี้ข้อมูลตำแหน่งสายอากาศจะถูกส่งไปยังภาคแสดงด้วยเพื่อให้ผลของภาพแปลความหมายตรงกับตำแหน่งสายอากาศจริง

3.3.5 Receiver

ภาคเครื่องรับทำหน้าที่รับสัญญาณสะท้อนผ่านสายอากาศและ Duplexer ทำการขยายให้สูงขึ้นทำการดีมอดูเลตแปลงเป็นสัญญาณวิดีโอส่งให้กับภาค Display

3.3.6 Display

ทำหน้าที่แสดงภาพกราฟฟิกส์ เพื่อแปลความหมายเป็นระยะทิศทางหรือความสูงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของเรดาร์และความต้องการการแสดงภาพ

การใช้งานของเรดาร์

ในการทำงานของเรดาร์ประเภทใด ๆ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้งานเน้นหนักเฉพาะไปในด้านนั้นแล้วจึงออกแบบการทำงานให้เป็นไปตามต้องการโดยการนำค่ากำหนดต่าง ๆ มาเป็นองค์ประกอบเช่น

1. เรดาร์ค้นหา (Search Radar)

เรดาร์ค้นหาเป็นเรดาร์สำหรับใช้เพื่อการค้นหาที่เป็น เรือวัตถุใด ๆ ทั้งบนพื้นน้ำและบนอากาศในการออกแบบต้องกำหนดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ให้เหมาะสมซึ่งอาจแยกได้เป็น

1.1 เรดาร์ค้นหาทางอากาศ (Air Search Radar) หน้าที่หลักของเรดาร์ค้นหาทางอากาศ คือ ค้นหาและแสดงระยะทางและทิศทางของเป้าเครื่องบินในระยะไกล รอบทิศทาง (360 องศา) เพื่อให้ได้การสั่งระยะทางไกล ๆ โดยการจางหายน้อยที่สุด มีคุณสมบัติทั่วไป คือ

1.1.1 ใช้ความถี่ต่ำ (Low Frequency) เพื่อลดการจากหายของสัญญาณเนื่องจากสภาวะอากาศรวมทั้งด้วยความถี่ที่ต่ำทำให้อุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดใหญ่รองรับการส่งกำลังงานได้สูง

1.1.2 พัลส์กว้าง (2-4 μs) และพาวเวอร์ค่ายอด (High Power) จะมีค่าสูงเพื่อเพื่อช่วยการค้นหาเป้าเล็กๆในระยะทางระยะไกล ๆ

1.1.3 การตรวจจับระยะไกล (Long Range) เพื่อใช้ในด้านการเตือนภัยทางอากาศหรือป้อนค่าระบบเครื่องควบคุมการยิง

1.1.4 ความถี่ PRF มีค่าต่ำเพื่อให้ได้ PRT ที่ยาวสามารถรอรับสัญญาณสะท้อนกลับได้นานและไกล

1.1.5 ความเร็วรอบสายอากาศมีค่าต่ำ (Low ASR) เนื่องจากต้องรอรับสัญญาณสะท้อนกลับที่นานจากค่า PRF ต่ำ

1.1.6 สายอากาศมีขนาดใหญ่ (Big Antenna) เนื่องจากใช้ความถี่ต่ำจึงไม่สามารถใช้ติดตั้งในเรือขนาดเล็กได้ บีมส์สายอากาศทางแนวตั้งมีค่าสูงตั้งแต่ผิวน้ำจนถึงมุมประมาณ 70 องศา เพื่อคอบคุมการตรวจจับเป้าอากาศยาน

1.2 เรดาร์ค้นหาทางพื้นผิว (Surface Search Radar)

หน้าที่หลักของเรดาร์ทางผิวพื้น คือ ค้นหาแสดงระยะทางและทิศทางอันถูกต้องของเป้าทาง ผิวพื้นรอบ 360 องศา ภายในระยะทางระดับสายตาหรือขอบฟ้าของสายอากาศเรดาร์ มีคุณสมบัติทั่วไป คือ

1.2.1 ใช้ความถี่สูง (High Frequency) จึงถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับสูงสุดจากเป้าที่มีพื้นที่สะท้อนกลับน้อย เช่น เรือ เสากระโดง หรือกล้อง เทอรีสโคปของเรือดำน้ำ

1.2.2 พัลส์วิดมีค่าแคบ (0.37 -2 μs) เพื่อให้จับเป้าในระยะใกล้ๆได้และสามารถแยกเป้าทางระยะได้

1.2.3 กำลังงานส่งออกมีค่าปานกลาง (Medium Power) เนื่องจากใช้ตรวจจับเป้าภายใต้ขอบฟ้าเพื่อให้สามารถค้นหาเป้าเล็ก ๆ ได้

1.2.4 ความถี่ PRF มีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าทวนซ้ำที่สูงหรือให้ได้การ Update การเปลี่ยนเป้าที่ดี

1.2.5 ความเร็วรอบสายอากาศมีค่าปานกลาง (Medium ASR) เนื่องจากต้องผลการเปลี่ยนแปลงของเป้า

1.2.6 สายอากาศมีขนาดเล็ก (Small Antenna)เนื่องจากใช้ความถี่สูงสามารถใช้ติดตั้งในเรือขนาดเล็กได้ บีมส์ทางแนวตั้งกว้าง 10 - 30 องศา เพื่อชดเชยระดับการโคลงของเรือตนเอง และเพื่อค้นหาเครื่องบินที่บินอยู่ต่ำ ๆ บีมส์ทางแนวนอนแคบ (1-3 องศา) เพื่อให้ได้การวัดระยะทางและแบริ่งดีถูกต้อง

2. เรดาร์ควบคุมการยิง (Fire Control Radar)

2.1 เรดาร์ค้นหา(Search Radar)

หน้าที่หลักของเรดาร์ทางผิวพื้นคือ ค้นหาแสดงระยะทางและทิศทางอันถูกต้องของเป้าทางผิวพื้นรอบ 360 องศา ตั้งแต่เป้าพื้นน้ำจนถึงเครื่องบินหรืออาวุธปล่อยเพื่อส่งต่อเป้าให้กับTracking Radar หรือป้อนค่าให้กับปืนเพื่อยิงเป้าพื้นน้ำ เรดาร์ค้นหามีคุณสมบัติทั่วไป คือ

2.1.1 ใช้ความถี่สูง (High Frequency) เพื่อการสะท้อนของวัตถุหรือเป้าขนาดเล็กได้ดี และอุปกรณ์มีขนาดเล็ก

2.1.2 กำลังงานส่งออกมีค่าปานกลาง (Medium Power) เนื่องจากใช้ในการตรวจจับเป้าขนาดเล็กในระยะปานกลาง (Medium Range) หรือระดับสายตา

2.1.3 ความถี่ PRF มีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าทวนซ้ำที่สูงหรือให้ได้การ Update การเปลี่ยนเป้าที่ดีความเร็วรอบสายอากาศมีค่าสูง (High ASR) เนื่องจากต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงของเป้าเช่นเครื่องบินหรืออาวุธปล่อยที่มีความเร็ว

2.1.4 สายอากาศมีขนาดเล็ก (Small Antenna) เนื่องจากใช้ความถี่สูง สามารถใช้ติดตั้งในเรือขนาดเล็กได้ บีมส์สายอากาศทางแนวตั้งกว้างเพื่อคอบคุมเป้าตั้งแต่พื้นน้ำจนถึงการตรวจจับเป้าอากาศยานทางมุมสูงมุมทางแนวนอนแคบเพื่อความถูกต้องทางแบริ่งสะท้อนที่ดี

2.2 เรดาร์ติดตามเป้า (Tracking Radar)

หน้าที่ของ Tracking Radar คือทำการหันติดตามเป้าเพื่อให้ได้ความถูกต้องทั้งระยะและทิศทางที่ถูกต้องสำหรับป้อนค่าให้กับระบบอาวุธเช่นปืนหรืออาวุธปล่อย เรดาร์ติดตามเป้ามีคุณสมบัติทั่วไป คือ

2.2.1 ใช้ความถี่สูง (High Frequency) เพื่อการสะท้อนของวัตถุหรือเป้าขนาดเล็กได้ดีอุปกรณ์มีขนาดเล็ก

2.2.2 กำลังงานส่งออกมีค่าปานกลาง (Medium Power) เนื่องจากใช้ในการตรวจจับเป้าขนาดเล็ก ในระยะปานกลาง (Medium Range) หรือระดับสายตา

2.2.3 ความถี่ PRF มีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าทวนซ้ำที่สูงหรือให้ได้การ Update การเปลี่ยนเป้าที่ดีสายอากาศชี้คงที่ติดตามเป้าสามารถหมุนติดตามเป้าได้ 360 องศาและมุมแนวตั้งสูงสุดเพื่อคอบคุมการติดตามเป้าให้ได้ทุกทิศทาง

2.2.4 สายอากาศมีขนาดเล็ก (Small Antenna)เนื่องจากใช้ความถี่สูง บีมส์สายอากาศแคบเพื่อความถูกต้องของทิศทางทั้งแนวตั้งและแนวนอน

2.3 เรดาร์เดินเรือ (Navigation Radar)

เรดาร์เดินเรือจะใช้ความถี่สูง (High Frequency) จึงถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับสูงสุดจากเป้าที่มีพื้นที่สะท้อนกลับน้อย เช่น เรือ ทุ่นสัญญาณต่าง ๆ ความถี่สูง เช่น ย่าน X band ช่วยทำให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ลงสามารถติดตั้งบนเรือขนาดเล็กได้ เรดาร์เดินเรือ มีคุณสมบัติทั่วไป คือ

2.3.1 พัลส์วิดมีค่าแคบ (0.07 -1.0 μs) เพื่อให้จับเป้าในระยะใกล้ ๆ ได้และสามารถแยกเป้าทางระยะได้

2.3.2 กำลังงานส่งออกมีค่าต่ำ 4-25 KW เนื่องจากใช้ตรวจจับเป้าภายใต้ขอบฟ้าเพื่อให้สามารถค้นหาเป้าเล็ก ๆ ได้เพื่อจุดประสงค์หลักเพื่อความปลอดภัยในการเดินเรือกำลังส่งยังมีผลต่อขนาดของเครื่อง หากเป็นเล็กต้องลดกำลังส่งลงในเรือใหญ่มีพื้นที่มากพอทีจะติดตั้งเครื่องใหม่มากกว่ากำลังที่มากจะทำให้จับเป้าได้ไกลกว่าและสามารถที่จะทะลุผ่านฝนหรือหมอกได้ดีกว่า

2.3.3 ความถี่ PRF มีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าทวนซ้ำที่สูงหรือให้ได้การ Update เป้าที่ดีในการใช้งานจะมีการเปลี่ยนค่า PRF ตามระยะที่เหมาะสม

2.3.4 ความเร็วรอบสายอากาศมีค่าปานกลางประมาณ 24- 30 รอบต่อนาที เนื่องจากต้องผลการเปลี่ยนแปลงของเป้า

2.3.5 สายอากาศมีขนาดเล็ก (Small Antenna) เนื่องจากใช้ความถี่สูง สามารถใช้ติดตั้งในเรือขนาดเล็กได้ บีมส์ทางแนวตั้งกว้าง 20 - 30 องศา เพื่อชดเชยระดับการโคลงของเรือตนเองบีมส์ทางแนวนอนแคบ (0.7- 4 องศา) เพื่อให้ได้การวัดระยะทางและแบริ่งดีถูกต้อง

2.4 เรดาร์ควบคุมทางอากาศ (Air Control Radar)

เรดาร์ควบคุมทางอากาศ ทำหน้าที่ตรวจอากาศยานรอ 0 3+บนสนำมบิน เพื่อควบคุมความปลอดภัยให้เดินอากาศหรือการควบคุมจราจรทางอากาศตามปกติคอบคุมเนื้อพื้นที่รอบสนำมบิน โดยหลักทั่วไปจะมีคุณลักษณะและการทำหน้าที่ในการค้นหาเช่นเดียวกับ Air Search Radar แต่ระยะตรวจจับใกล้กว่าซึ่งมีผลให้สามารถใช้ความถี่ของ PRF และรอบสายอากาศที่มีค่าสูงกว่าเพื่อการ Update เป้า

3 องค์ประกอบการทำงานของเรดาร์ The function of the radar

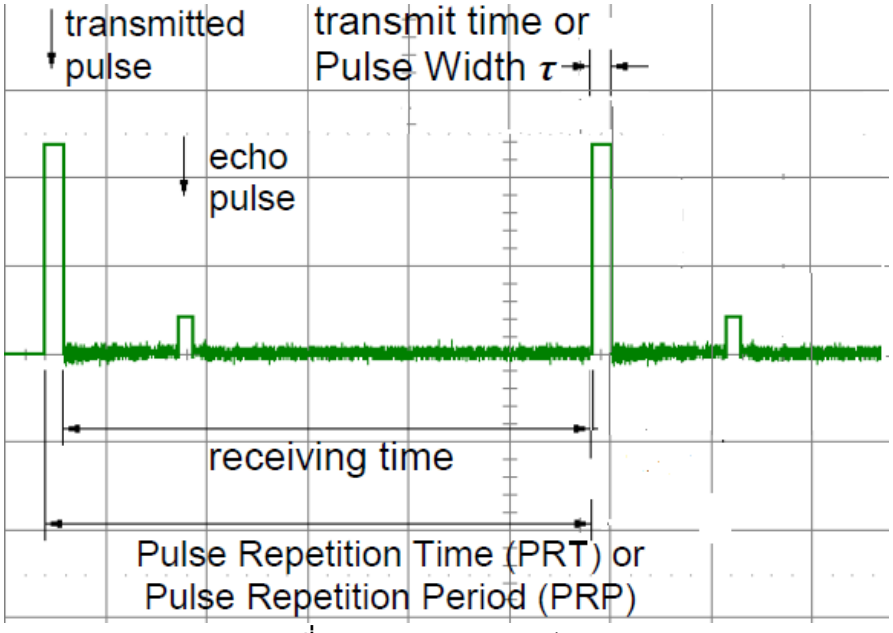
บทนำ

การใช้งานส่วนใหญ่ของระบบเรดาร์โดยเฉพาะระบบเรดาร์ในเรือเกือบทั้งหมด จะใช้หลักการของพัลส์ - โมดูเลชั่น ซึ่งผู้เรียนมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในหลักของการทำงานของ พัลส์ – โมดูเลชั่น ว่าต้องมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในด้านคุณสมบัติลักษณะเฉพาะที่มีผลต่อการทำงานของระบบเรดาร์ การกำหนดค่าที่ใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานของระบบเรดาร์นั้น ๆ

อัตราทวนซ้ำ (Repetition Frequency :PRF)

1. ความหมายของ Pulse Repetition Frequency (PRF)/Pulse Repetition Time (PRT)

อัตราทวนซ้ำ Pulse Repetition Time (PRT) หมายถึง อัตราการส่ง RF Pulse เรดาร์ต่อหน่วยของเวลา เช่น 1000 ครั้งต่อวินาที (1000 Hz) ซึ่งระยะความห่างของการส่งแต่ละครั้งจะถูกเรียกว่า Pulse Repetition Time (PRT) โดยค่าของ PRF และ PRT เป็นค่าส่วนกลับซึ่งกันและกัน นั่นคือ PRF= 1/PRT หรือ PRT = 1/PRF โดยสามารถแสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ระยะเวลาการรับ

2. การกำหนดระยะไกลสุด

ในการทำงานของเรดาร์แบบ พัลส์-โมดูเลชั่น จะทำการส่งอาร์เอฟพัลส์ ออกอากาศไปและรอรับสัญญาณสะท้อนกลับมาแล้วทำการหาเวลาที่เสียไปในการคำนวณหาระยะ การรอรับสัญญาณการสะท้อนกลับจะกระทำหลังจากที่เรดาร์สิ้นสุดการส่งจนถึงเวลาที่ส่งใหม่และถูกเรียกว่าเวลาหยุดรับ (Listening Time หรือ Receiving Time) ภาพที่ 3-1 หากนานเกินไปจะมีผลต่อการนับจำนวน หรือการตรวจจับสัญญาณเพื่อความเชื่อถือที่ถูกต้อง

การ Update หากมีจำนวนมากหรือถี่เกินไปจำให้ระยะการรอรับสัญญาณสั้นเกินไป นั่นคือระยะเวลาความหากของการส่งแต่ละครั้ง (PRT) เป็นตัวกำหนดระยะไกลสุดของเรดาร์

$$\text{ระยะไกลสุดของเรดาร์ } \frac{PRT}{12.2\mu\sec.} \text{ ไมล์}$$

ตัวอย่าง 3-1 ถ้าหากเรดาร์เครื่องหนึ่งมีความถี่ PRF เท่ากับ 1000 Hz จะมีระยะไกลสุดเท่าใด

$$PRT = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{1000Hz}$$

$$= \frac{1\times10^{6}}{1000\times10^{6}}\sec ond$$

$$= 1000\mu\sec ond$$

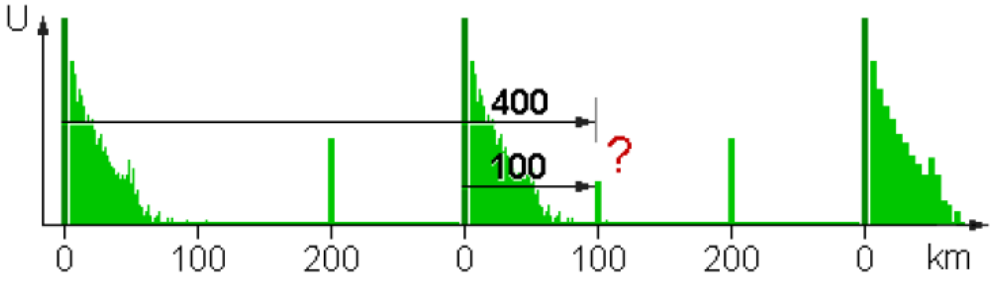
$$\text{ระยะไกลสุดของเรดาร์ } = \frac{PRT}{12.2\mu Sec.}$$

$$= \frac{1000}{12.2} = 81.96$$

3 การ Up Date เป้า

ในการส่งเรดาร์แต่ละครั้งจะได้รับข้อมูลเป็นสัญญาณสะท้อนกลับของเป้าต่าง ๆ หากมีจำนวนการส่งมากจะทำให้ได้รับผลของข้อมูลจำนวนมากตามไปด้วยนั่น หมายถึง หากมีการเปลี่ยนแปลง ของเป้าเช่นเครื่องบินจะได้รับการปรับปรุงข้อมูล (Up Date) ตามค่าของความถี่ PRF แต่การกำหนดให้มีค่า PRF ที่สูงกว่าเพื่อการ Up Date เป้าจะทำให้มีผลกระทบโดยตรงต่อระยะไกลสุดของเรดาร์ด้วย ดังนั้น การจะกำหนดค่าของความถี่ของ PRF ไว้ที่เท่าไรขึ้นอยู่กับประเภทและการใช้งานของระบบเรดาร์

4. Ambiguous Range ระยะที่ถูกต้องของเรดาร์



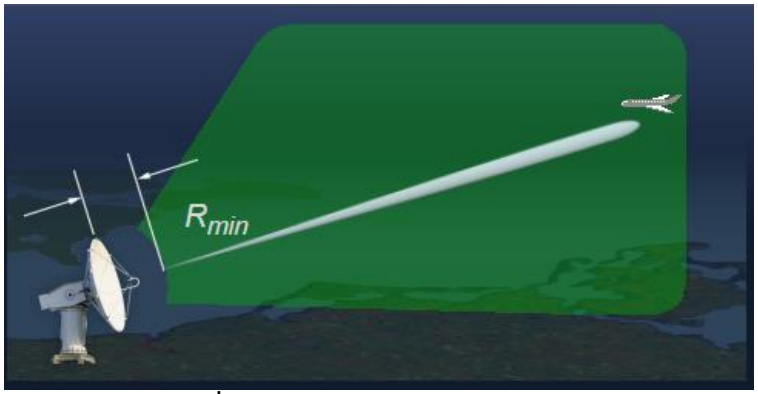
ภาพที่ 3-2 การเกิดระยะที่ไม่ถูกต้องของเรดาร์

Ambiguous Range หมายถึง ระยะที่ไม่แน่นอนเชื่อถือไม่ได้เนื่องจากการสะท้อนของเป้า ในการส่งครั้งแรงที่มีความแรงไปปรากฏที่การรับหลังจากการส่งครั้งที่ 2 ตามภาพที่ 3-2 การส่งของเรดาร์แต่ละครั้งห่างกัน 300 กิโลเมตร ในภาพจะมีเป้าจริงอยู่ที่ระยะ 200 กิโลเมตรและที่ 400 กิโลเมตร ดังนั้น หลังจากการส่งครั้งแรกจะปรากฏสัญญาณสะท้อนกลับที่ระยะ 200 กิโลเมตร แต่ด้วยความแรงของสัญญาณเป้าที่ระยะ 400 กิโลเมตรจะเกิดที่ระยะ 100 กิโลเมตรหลังจากส่งครั้งที่ 2 แต่ความจริงเป็นสัญญาณสะท้อนที่เกิดจากการส่งครั้งแรก เมื่อเป็นเช่นนี้จะเป้าในจอที่ระยะ 100 กิโลเมตรด้วยจึงถูกเรียกว่าระยะ Ambiguous Range เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในระบบเรดาร์ แต่ถ้าเราเปลี่ยนช่วงความห่างของการส่งแต่ละครั้งไม่เท่ากัน (Stager PRF) จะทำให้เป้าที่ระยะ 400 กิโลเมตร จะปรากฏที่หลังการส่งครั้งที่ 2 มีระยะไม่เท่ากัน (น้อยกว่าหรือมากกว่า 100 กิโลเมตร) แต่เป้าที่ระยะ 200 กิโลเมตรยังปรากฏระยะเดิมรวมทั้งระยะอื่น ๆ ภายในช่วงระหว่างการส่งครั้งแรกกับครั้งที่ส่อง (Unambiguous Range) เป้าที่เกิดขึ้นไม่แน่นอนจะถูกระบบเรดาร์กำจัดออกไป

ความกว้างของพัลส์ส่ง Pulse Width (PW)

1. ความหมายของ Pulse Width (PW)

Pulse Width หมายถึง ความกว้างของพัลส์ส่งเรดาร์ซึ่งภายในบรรจุความถี่ของเรดาร์ที่ทำการส่ง โดยที่การส่งนั้นเริ่มตั้งแต่ขอบหน้าของพัลส์จนถึงของหลังของพัลส์ส่ง



ภาพที่ 3-3 ระยะใกล้สุดของเรดาร์

2. การกำหนดระยะใกล้สุด

ในขณะที่เรดาร์ทำการส่งอยู่ภายในระยะความกว้างของ PW ด้วยเวลาการส่งที่สั้นและรับที่ยาวจึงสามารถที่จะใช้สายอากาศเดียวกันได้โดยใช้ Duplexer เป็นสวิทซ์เลือกระหว่างการรับและส่งไปยังเครื่องส่งและเครื่องรับ ดังนั้นกำลังงาน RF จากเครื่องส่งจะส่งผ่าน Duplexerไปยังสายอากาศเครื่องรับจะถูกปิดอยู่จนสิ้นสุดการส่งแล้วสายอากาศจึงต่อมายังเครื่องรับ ดังนั้น ในระหว่างการส่งอยู่เรดาร์จะไม่สามารถรับสัญญาณได้จนกว่าจะสิ้นสุด จะต้องมีเวลาการเปลี่ยนแปลงสายอากาศจากส่งมาเป็นการรับ โดย Duplexer ซึ่งเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำงานได้เร็วกว่า แต่ก็ยังมีเวลาในการคืนตัวของอุปกรณ์ Recovery Time ดังนั้น ระยะใกล้สุดที่เรดาร์ไม่สามารถจับเป้าได้คือ

$$R\min = \frac{C\left(PW \times \text{Recovery time}\right)}{2}$$

เมื่อ $C =$ ความเร็วแสงเท่ากับ 3×10^{8} เมตร/วินาที

$PW =$ ความกว้างของพัลส์ส่ง

$\text{Recovery time} =$ เวลาคืนตัวของ Duplexer

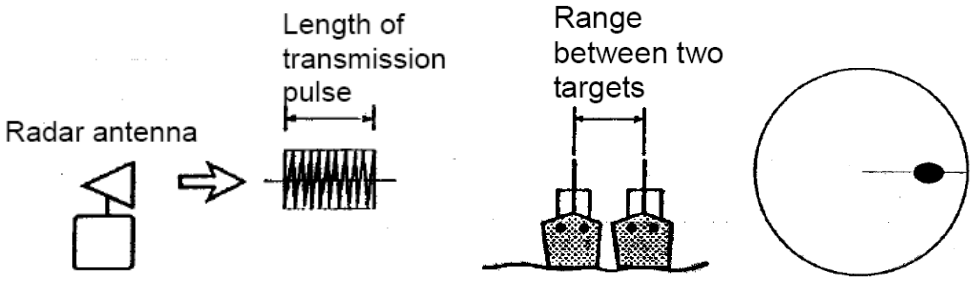
หรือ ระยะใกล้สุด $= \left(PW + \text{Recovery time}\right)\times 150$

3. การแยกเป้าทางระยะ (Range Resolution)

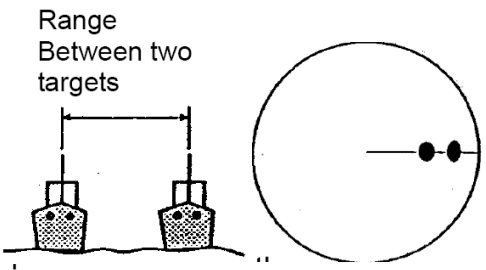
พัลส์ของเรดาร์ที่ส่งออกไปมีความกว้างเท่ากับ PW เมื่อสัญญาณเรดาร์ส่งไปกระทบเป้าขอบแรกจะเริ่มสะท้อนกลับมาเรื่อยไปจนถึงของสุดท้ายสิ้นสุดพัลส์ส่งระหว่างขอบแรกและขอบหลังของสัญญาณที่สะท้อนกลับเป็นเวลาที่เสียไปเท่ากับ $\frac{PW \times C}{2}$

ดังนั้น ในช่วงเวลาดังกล่าวหากมีเป้าสองเป้าอยู่ใกล้กันน้อยกว่า ความกว้างของ PW เรดาร์จะไม่สามารถแยกเป้าที่อยู่ในแบริงเดียวกันได้ Range Resolution

$$\text{Range Resolution} \geq PW \times 150 \text{ เมตร}$$



ภาพที่ 3-4 เป้าสองเป้าที่ห่างกันน้อยกว่าความกว้างของ PW



ภาพที่ 3-5 เป้ามีระยะห่างกันเกินกว่าความกว้าง PW

จากภาพที่ 3-4 เป้าสองเป้าที่ห่างกันน้อยกว่าความกว้างของ PW หรือความกว้างของพัลส์ส่งทำให้ไม่สามารถแยกเป้าได้เนื่องจากขอบหลังของพัลส์ส่งยังไม่พ้นจากเป้าแรกแต่ขอบหน้าของพัลส์ส่งไปกระทบเป้าที่สองแล้วทำให้สัญญาณสะท้อนของทั้งสองเป้ารวมต่อกันทำให้มองเห็นเป็นเป้าเดียวกันแต่ในภาพที่ 3-5 เป้ามีระยะห่างกันเกินกว่าความกว้าง PW ขอบหลังของพัลส์ส่งสิ้นสุดจากเป้าแรกไปแล้วจึงจะไปกระทบเป้าที่สอง จึงทำให้สามารถมองเห็นแยกเป็นสองเป้าได้

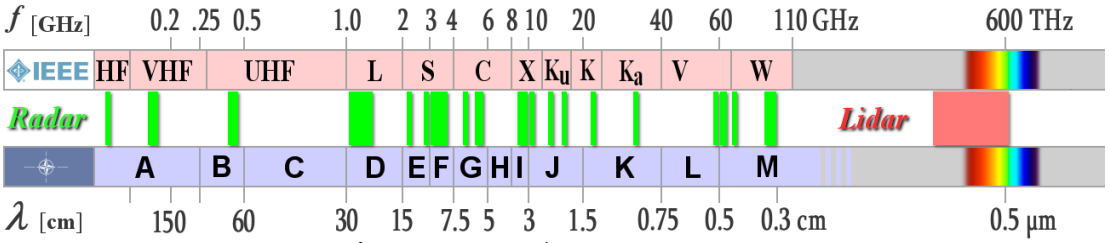
4. กำลังงานค่าเฉลี่ย

ตามที่กล่าวมาแล้วว่าพัลส์วิด คือ ค่าความกว้างของพัลส์ส่งในส่วนเรดาร์แบบพัลส์มอทดูเลเตอร์มีการส่งและหยุดภายในช่วง PRT กำลังงานที่ถูกใช้ไปเฉลี่ยในหนึ่ง PRT จะถูกเรียกว่ากำลังงานค่าเฉลี่ย ดังนั้นหากพัลส์กว้างค่าเฉลี่ยกำลังงานจะสูงขึ้นเมื่อค่าเฉลี่ยกำลังงานสูงขึ้นทำให้เกิดกลุ่มกำลังงานที่ให้มีผลทำให้ระดับสัญญาณสะท้อนกลับใหญ่ขึ้นจะได้ระยะที่ไกลมากขึ้นด้วย แต่การที่จะทำให้พัลส์ส่งกว้างขึ้นจะมีมีโดยตรงต่อระยะใกล้สุดด้วย

ความถี่ของเรดาร์ (Radar Frequency)

1. ย่านความถี่ของเรดาร์

ในการเลือกใช้ความถี่ของเรดาร์ได้แบ่งออกเป็นย่านต่าง ๆ โดยในปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองรูปแบบได้แก่ Old Microwave Band ซึ่งเป็นชื่อเรียกการใช้งานทั่วไป และ NATO Frequency ซึ่งเรียกชื่อใช้งานในกลุ่ม NATO หรือประเทศแถบยุโรป



ภาพที่ 3-5 ย่านความถี่ของเรดาร์

ย่านความถี่ของเรดาร์แบ่งออกเป็น 8 แบบได้แก่

1. UHF Band ใช้ในเรดาร์ที่ระยะไกลมาก ๆ เช่น Warning Radar ใช้พลังงานสูง และใช้ สายอากาศที่มีขนาดใหญ่

2. L Band ใช้มากที่สุดในเรดาร์ค้นหาระยะไกล เนื่องจากมีการลดทอนในชั้นบรรยากาศ Atmosphere ต่ำและไม่มีการลดทอนจาก Rain Clutter

3. S Band เป็นความถี่ที่ใช้ในเรดาร์ระยะปลานกลาง ใช้ในเรดาร์ควบคุมเครื่องบิน แต่มีปัญหาด้าน Blind Speed ในระบบ MTI

4. C Band ใช้ในเรดาร์ค้นหาระยะปานกลาง มีขนาดที่เล็กลงเนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้น เริ่มมีปัญหากับชั้นบรรยากาศ Atmosphere

5. X Band เป็นย่านความที่ใช้งานกว้างขวางมากที่สุดเนื่องขนาดเล็ก ในการใช้งานมีปัญหาเรื่องการลดทอนใน Atmosphere สูงทั้งด้าน Rain Clutter และมีข้อดีในด้านการแยกแยะเป้า (Resolution) ได้ดี

6. Ku Band ใช้งานในเรดาร์ Weapon Navigation System ใช้กับการสอนทางไกลผ่านดาวเทียม

7. K Band เป็นย่านความถี่ที่ไม่ค่อยพบเห็นการใช้งานเนื่องจากมี่การลดทอนของ Atmosphere สูงมากโดยเฉพาะความถี่ประมาณ 23.6 GHz จะถูกดูดกลืนโดยหมอกควันไม่สามารถใช้งานได้เลย

8. Ka Band ใช้งานในด้าน High accuracy Navigation

2. คุณลักษณะของความยาวคลื่นเรดาร์

ความถี่ (f) ของเรดาร์คือหน่วยของเวลาการกลอกตัวของคลื่นต่อหน่วยวินาที (Hz) ซึ่งจะมีค่าส่วนกลับของเวลา นั่นคือ

$$f = \frac{1}{T}$$

จากสมการสามารถอธิบายได้ว่า ความถี่มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น กล่าวคือ ความถี่ (f) มีค่าเท่ากับความเร็ว (v) ของคลื่นหารด้วยความยาวคลื่น λ (lambda)

$$f = \frac{V}{\lambda}$$

โดยที่ $f =$ ความถี่ของคลื่นในเวลาหนึ่งวินาที

$V =$ ความเร็วแสงเท่ากับ 300×10^8 เมตรต่อวินาที

$\lambda =$ ความยาวคลื่น คือ ระยะการเดินทางของคลื่นในเวลาหนึ่งไซเกิล

3. ขนาดอุปกรณ์

การใช้งานของเรดาร์มีหลายประเภทขึ้นอยู่กับการใช้งานในส่วนหนึ่งซึ่งต้องเลือก คือ ย่านความถี่ซึ่งได้กล่าวมาแล้วมาแล้วข้างต้นในความถี่ที่ใช้งานนั้นเกี่ยวข้องกับขนาดอุปกรณ์ด้วย เนื่องจากตัวผลิตความถี่ สายส่งหรือสายอากาศต้องทำงานสัมพันธ์กัน เช่น ขนาดโครงสร้างหลอดแมกนีตรอนมีขนาดใหญ่ผลิตความถี่ต่ำ การส่งกำลังงานผ่านสายส่งหรือท่อเวฟไกด์ต้องมีขนาด 0.53 - 0.8 ความยาวคลื่นเป็นต้น

ตัวอย่าง 3-2 หากเปรียบเทียบความถี่เรดาร์ระหว่างความถี่ 3 GHz และความถี่ 10 GHZ จะเป็นดังนี้

เมื่อ ความถี่ 3 GHz $\lambda = \frac{V}{F}$

$$\lambda = \frac{3\times10^{8}}{3\times10^{9}} = \frac{1}{10} \text{ เมตร}$$

$$= \frac{100}{10} = 10 \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อ ความถี่ 10 GHz $\lambda = \frac{V}{F}$

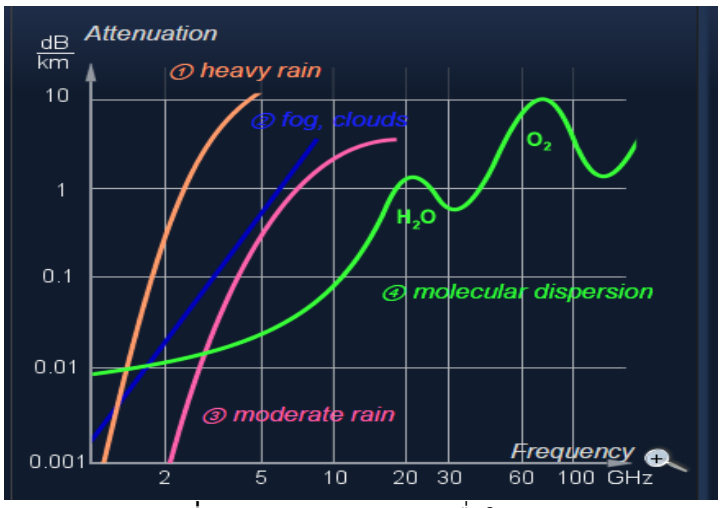
$$\lambda = \frac{3\times10^{8}}{10\times10^{9}} = \frac{3}{100} \text{ เมตร}$$

$$= \frac{300}{100} = 3 \text{ เซนติเมตร}$$

จะเห็นได้ว่าในเรดาร์ที่ใช้ความถี่ต่ำจะมีความยาวคลื่นมากเช่นที่ความถี่ 3 GHz จะมีความยาวคลื่น เท่ากับ 10 เซนติเมตร ซึ่งจะขนาดอุปกรณ์ที่ใหญ่กว่าเมื่อมีขนาดใหญ่ย่อมรองรับกำลังงานส่งได้สูงสามารถจับได้ระยะไกล ๆ ในขณะที่ถ้าเรดาร์ใช้ความถี่ 10 GHz จะมีความยาวคลื่น 3 เซนติเมตร จะทำให้มีขนาดอุปกรณ์ที่เล็กกว่าทำให้รับกำลังงานส่งได้น้อยกว่าระยะการตรวจจับจะน้อยกว่า

4. การลดทอนเนื่องจากความถี่

ในการแพร่คลื่นของเรดาร์ที่ใช้ในย่านต่าง ๆ นั้นความถี่ที่ต่ำกว่าจะมีการลดทอนในอากาศ น้อยกว่าในขณะที่ความที่ที่สูงกว่าจะมีการลดทอนในอากาศที่สูงกว่าจากรูปที่ 3-6 แสดงการลดทอนของคลื่นความถี่ต่าง ๆ ในอากาศ



ภาพที่ 3-6 การลดทอนของคลื่นในอากาศ

จากภาพที่ 3-6 ในเส้นสีเขียวแสดงให้เห็นว่าการลดทอนของคลื่นถูกลดทอนโดยการแพร่กระจายของโมเลกุลในอากาศ ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 GHZ จะมีการลดทอนน้อยกว่า 0.01 dB/km และที่ความถี่ 10 GHz จะมีการลดทอน เกือบ 0.1 dB/km ในขณะความถี่ประมาณ 23.6 GHz จะมีการลดทอนมากกว่า 1 dB/km เนื่องจากละอองน้ำในอากาศ และเมื่อภาวะอากาศมี เมฆ หมอกหรือฝนตกยิ่งทำให้การลดทอนของสัญญาณหรือคลื่นเรดาร์มากขึ้น ดังนั้นในการเลือกใช้งานย่านความถี่ต้องเลือกตามความเหมาะสมหากต้องการจับได้ระยะไกลการจางหายน้อย ต้องใช้ย่านความถี่ต่ำเช่น L band (1-2 MHz) อุปกรณ์มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถติดตั้งในเรือขนาดเล็กได้ ในขณะที่ถ้าใช้ความถี่สูงถึงจะมีผลการกระทบจากอากาศ เมฆ หรือฝน มากกว่า เช่น จากภาพที่ 3-6 ความถี่ 5 MHz ในสภาวะฝนตกหนัก (Heavy Rain) การลดทอนจะมีมากกว่า 10 dB/km ดังนั้น ในการใช้งานเรดาร์หากต้องการตรวจจับเป้าในสภาวะที่มีฝนหากจำเป็นต้องใช้ความถี่สูงต้อง เพิ่มกำลังส่งให้สูงพอที่จะผ่านฝนทั้งไปและกลับ

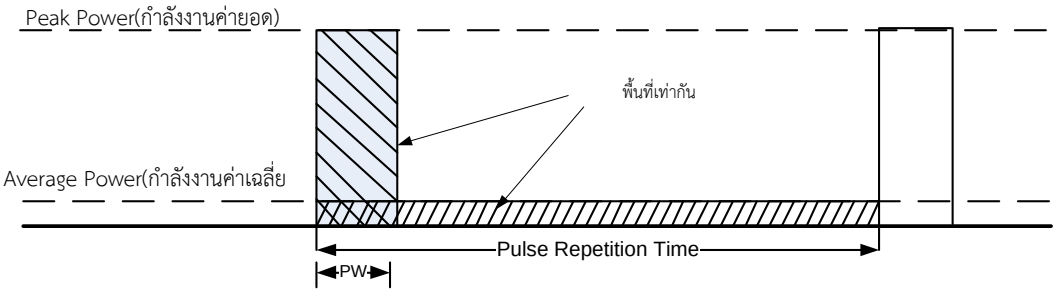
กำลังส่งของเรดาร์ (Radar Power)

1. ความต้องการของ Radar Power

ด้วยหลักการของระบบเรดาร์ คือ หลักการหาระยะวัตถุด้วยการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ นั่นคือ เรดาร์ต้องส่งกำลัง RF ซึ่งสายอากาศจะเปลี่ยนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกอากาศไป และรับสัญญาณสะท้อนกลับเข้ามา การที่เป้าอยู่ที่ระยะไกล ๆ จะต้องส่งกำลังงานที่สูงมากเพื่อ จะมีสัญญาณท้อนกลับมาพอที่เครื่องรับเรดาร์จะสามารถจับสัญญาณสะท้อนกลับนั้นได้

2. กำลังค่ายอด (Peak Power)

กำลังงานที่ส่งออกไปจะเป็นกลุ่มของ RF Pulse ที่มีความกว้างของการส่งคือค่าความกว้างของ Pulse Width (PW) ค่าสูงสุดของกำลังงานที่ส่งถูกเรียกว่ากำลังงานงานค่ายอด (Peak Power)ตามภาพที่ 3-7 สามารถอธิบายได้ว่าค่าความกว้างของ PW ระดับของกำลังงานค่ายอดเป็นตัวแปลที่สำคัญต่อระยะไกลสุดของเรดาร์เนื่องจากหากมีค่าสูงสัญญาณสะท้อนจะกลับมาแรงซึ่งจะสามารถสะท้อนเป้าเล็ก ๆ ที่อยู่ไกล ๆ ได้ และเป็นสำหรับกำหนดการออกแบบของอุปกรณ์ว่าสามารถที่จะทนการทำงานได้



ภาพที่ 3-7 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังงานเรดาร์

3. กำลังส่งค่าเฉลี่ย (Average Power)

เครื่องส่งเรดาร์จะจ่ายพลังงานอาร์เอฟ ในรูปพัลส์ที่สั้นมากและจะถูกปิดระหว่างพัลส์ กำลังงานที่ใช้ประโยชน์ของเครื่องส่งถูกบรรจุอยู่ในพัลส์ที่แพร่กระจายของกำลังงานค่ายอดของระบบกำลังงาน ตามปกติวัดค่าเฉลี่ยต่อความสัมพันธ์ของช่วงเวลาเพราะว่าเครื่องส่งถูกหยุดพักสำหรับเวลาที่ยาวนานโดยเทียบกับเวลาทำงาน กำลังงานเฉลี่ย (Average Power) ถูกแจกจ่ายระหว่างการทำงาน 1 ไซเกิล โดยเกี่ยวข้องกับกำลังงานค่ายอดระหว่างเวลาส่ง

ความสัมพันธ์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกำลังงานค่าเฉลี่ยที่สิ้นเปลืองต่อช่วงความยาวของเวลาและกำลังงานค่ายอดที่พัฒนาระหว่างการส่ง เวลาทั้งหมดของการทำงาน 1 ไซเกิล คือส่วนกลับของ PRF แฟกเตอร์จำนวนคงที่อย่างอื่น ความกว้างของพัลส์(PW) มาก กำลังงานค่าเฉลี่ยจะมีค่าสูงและการทบทวนพัลส์ (PRT) เป็นเวลานาน กำลังงานค่าเฉลี่ยจะมีค่าต่ำ ดังนั้น

$$\frac{Average\ Power}{Peak\ Power} = \frac{Pulse\ Width}{Pulse\ \text{Re}petition\ Time}$$

เมื่อ $Average\ Power$ คือ กำลังงานค่าเฉลี่ย

$Pulse\ Width$ คือ ความกว้างของพัลส์

$Peak\ Power$ คือ กำลังงานค่ายอด

$Pulse\ \text{Re}petition\ Time$ คือ เวลาการทบทวนพัลส์

4. Duty Cycle

ไซเกิลการทำงานของเครื่องส่งเรดาร์สามารถจะอธิบายในเรื่องของเศษส่วนของเวลารวมทั้งหมด ซึ่งพลังงานอาร์เอฟถูกแพร่รัศมี เวลาอันสัมพันธ์นี้เรียกว่า Duty Cycle และอาจแสดงได้ดังนี้

$$Duty\,Cycle = \frac{Pulse\ Width}{Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time}$$

เมื่อ $Pulse\ Width$ คือ ความกว้างของพัลส์

$Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time$ คือ เวลาการทบทวนพัลส์

ตัวอย่างที่ 3-3 ค่า Duty Cycle ของเรดาร์ที่มี PW = 2 ไมโครเซกัลป์ และ PRF = 500 Hz

$$PRT = \frac{1}{PRF}$$

$$= \frac{1}{500} \text{ วินาที}$$

$$PRT = 500 = 2000 \text{ ไมโครเซกัล}$$

$$Duty\,Cycle = \frac{Pulse\ Width}{Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time}$$

$$= \frac{2\times10^{6}}{2000\times10^{6}}$$

$$= 0.001$$

ตัวอย่างที่ 3-4 กำหนดให้เรดาร์มี Peak Power = 200 KW ดังนั้นช่วงเวลา 2 ไมโครเซกัลป์ของกำลังงานค่ายอด 200 KW ที่จ่ายให้กับสายอากาศ เวลาที่เหลือจากการส่ง 1998 ไมโครเซกัล กำลังงานทางออกจะมีค่าเป็นสูญ โดยที่

$$Average = PeakPower \times Duty\,Cycle$$

$$= \left(200\times10^{3}\right)\times 0.001$$

$$= 200 \text{ วัตต์}$$

ด้วยเหตุที่กำลังส่งของเรดาร์ค่าของ Peak Power จะมีค่าสูงและแคบมาก ในการตรวจสอบกำลังส่งเรดาร์จึงวัดอ้างอิงจากค่า Average Power โดยใช้อุปกรณ์ Power Sensor ร่วมกับ Power Meter แล้วคำนวณหาค่า Peak Power ดังนี้

$$Peak\ Power = \frac{Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time \times Average\ Power}{Pulse\ Width}$$

ตัวอย่างที่ 3-5 กำหนดค่า $Average\,Power = 1Kw.\ Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time = 1000Hz$ $Pulse\ Width = 1.2\mu Sec.$ จะค่า Peak Power เท่าไร

$$PRT = \frac{1}{PRF}$$
$$= \frac{1}{1000}$$
$$= \frac{1}{1000} \times \frac{10^6}{10^6} Sec.$$
$$= 1000\mu Sec.$$

จากสมการ $$\frac{Average\,Power}{Peak\,Power} = \frac{Pulse\ Width}{Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time}$$

จะได้ $$Peak\ Power = \frac{Average\,Power \times Pulse\ \text{Re}\,petition\ Time}{Pulse\ Width}$$

$$Peak\ Power = \frac{1000 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^3}{1.2 \times 10^{-6}}$$
$$= \frac{1000 \times 10^3}{1.2} = 833333.3 \text{ วัตต์}$$

$$Peak\ Power = 833.3 \text{ กิโลวัตต์}$$

ความเร็วของรอบสายอากาศ (Antenna Scan Rate)

ในระบบเรดาร์ค้นหาของเรดาร์จำเป็นต้องให้สายอากาศเรดาร์หมุนกวาดรอบตัว 360 องศา ความเร็วของการหมุนมีค่าแตกจ่างกันไปเรดาร์ควบคุมการยิงต้องการรอบการหมุนของสายอากาศเร็วเพื่อต้องการ Update เป้า หากหมุนสายอากาศช้าจะไม่สามารถตามเป้าได้ทัน สำหรับเรดาร์ตรวจการณ์ระยะไกลต้องหมุนช้าเพื่อรอรับสัญญาณสะท้อนกลับก่อนที่สายอากาศจะหมุนเลยไป ถ้าเรดาร์แบบหนึ่งมีความเร็วรอบสายอากาศ 20 รอบต่อนาที และมีค่า PRF เท่ากับ 1000 ครั้งต่อวินาทีทำให้ในหนึ่งรอบสายอากาศเรดาร์จะใช้เวลา 60 วินาทีหารด้วย 20 รอบต่อนาทีจะได้เท่ากับ 3 วินาที ดังนั้น ในหนึ่งรอบสายอากาศเครื่องส่งของเรดาร์จะทำการส่งได้เท่ากับค่า PRF คูณด้วยเวลาการหมุนหนึ่งรอบหรือเท่ากับ3 คูณด้วย 1000 เท่ากับ 3000 ครั้ง ในการการแพร่คลื่นของสายอากาศถูกออกแบบให้เป็นแบบบังคับทิศทางโดยมีมุมทางแนวตั้งกว้างเพื่อค้นหาเป้าตั้งแต่พื้นน้ำจนถึง 70 องศา ส่วนบีมส์แนวนอน (Horizontal Beam Width) แคบเพื่อกำหนดทิศทางของเป้าในการที่เรดาร์หมุนผ่านเป้าแต่ละครั้งจะมีโอกาสที่เรดาร์จะส่งคลื่นไปกระทบเป้าเป็นจำนวนกี่ครั้ง (Hits per Scan) ขึ้นอยู่กับค่าของบีมส์ของสายอากาศ ค่า PRF และความเร็วของรอบสายอากาศ

$$Hits/Scan = \frac{\beta \times PRF}{RPS \times 360}$$
$$= \frac{\beta \times PRF \times 60}{RPM \times 360}$$
$$= \frac{\beta \times PRF}{6RPM}$$

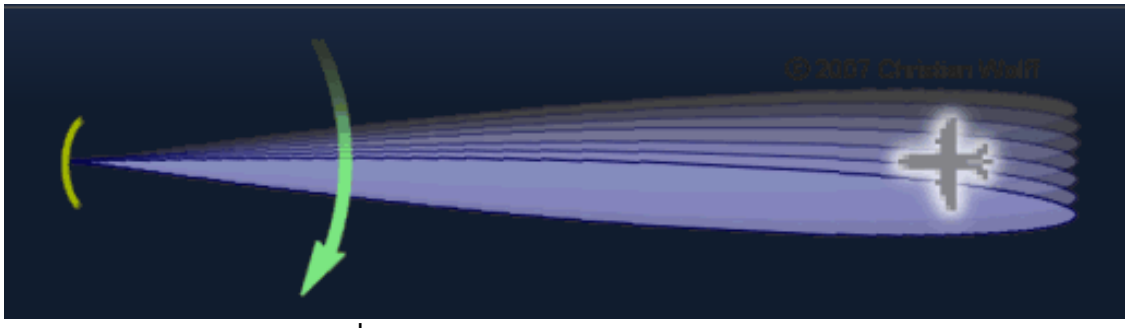
เมื่อ RPM คือ จำนวนการหมุนของสายอากาศในหนึ่งนาที

β คือ บีมสายอากาศด้านแนวนอน

ตัวอย่างที่ 3-6 ถ้าบีมส์ของสายอากาศกว้าง 12 องศา จะมีผลทำให้โอกาสที่เรดาร์จะกระทบเป้าจำนวนกี่ครั้ง

$$Hits/Scan = \frac{\beta \times PRF}{RPS \times 360}$$
$$= \frac{12 \times 1000}{6 \times 360} = 10$$

หากบีมส์สายอากาศ (β) กว้างจะมีช่วงเวลาตั้งแต่ขอบหน้าจนถึงของหลังนานสัมพันธ์กับรอบสายอากาศรูปที่ ในขณะเดียวกันหากเรดาร์มีความถี่ PRF ผ่านเป้านานจะทำให้ได้ค่า Hits per Scan มาก ในกรณีถ้าหากสายอากาศหมุนเร็วจะได้การ Update เป้าแต่ละรอบดีอย่างเช่นเรดาร์ควบคุมการยิงทำให้ Hits per Scan จะลดลงอาจแก้ไขด้วยการเพิ่มค่า PRF แต่ระยะตรวจจับจะลดลงตามไปด้วย สำหรับเรดาร์ตรวจการณ์ระยะไกลที่ต้องใช้ค่า PRF ต่ำจะแก้ไขด้วยการใช้รอบสายอากาศที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งตามปกติค่า Hits per Scan มีค่าไม่น้อยกว่า 10



ภาพที่ 3-8 บีมส์สายอากาศและ Hits per Scan

ข้อจำกัดการตรวจจับอื่น ๆ ของเรดาร์

1. คุณลักษณะของเป้า Radar Cross Section

Radar Cross Section (RSC) หมายถึงการวัดความสามารถในการสะท้อนคลื่น และการตรวจจับเป้าของเรดาร์ การวัดความสามารถการสะท้อนคลื่นมีหน่วยเป็นตารางเมตร เป้าที่มี RSC ใหญ่จะสามารถถูกตรวจจับได้ง่ายค่าของ RSC ขึ้นอยู่กับ ปัจจัยหลัก 6 ประการได้แก่

1.1 ชนิดของวัตถุเป้า วัตถุที่เป็นโลหะย่อมสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าไม้หรือยาง

1.2 รูปร่างของวัตถุ รูปร่างที่แบนราบสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าที่เป็นวัตถุทรงกลม

1.3 วัตถุที่ผิวเรียบ วัตถุที่มีผิวเรียบจะสะท้อนคลื่นไม่กระจัดกระจาย

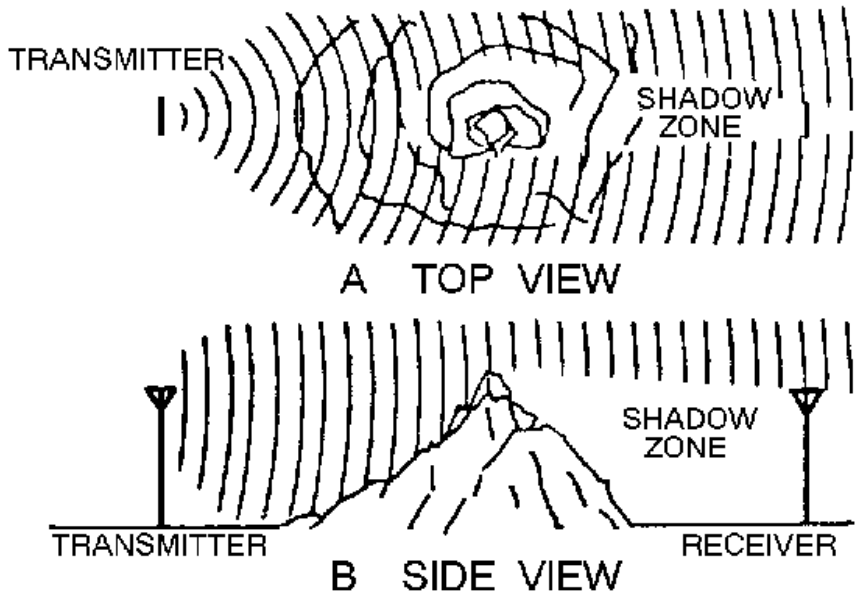
1.4 วัตถุมีขนาดใญ่ ขนาดวัตถุที่ใหญ่กว่าจะสะท้อนคลื่นได้ดีกว่า

1.5 ทิศทางของคลื่น หากตั้งฉากจะสะท้อนคลื่นกลับไปหาเรดาร์ได้หากไม่ตั้งฉากจะไม่สะท้อนกลับไปหาเรดาร์

1.6 ความถี่ของเครื่องส่ง ความถี่ที่สูงกว่ามีผลต่อขนาดของการสะท้อนคลื่นได้ดีกว่า

2. Shadow Zone

เป้าหรือวัตถุใด ๆ ที่ถูกบดบังหรือด้านหลังสิ่งกีดขวางจะไม่สามารถสะท้อนคลื่นกลับมาหรือจับเป้าได้



ภาพที่ 4-9 การสะท้อนคลื่นกลับมาหรือจับเป้าได้

3. ความโค้งของโลก

เนื่องจากโลกมีลักษณะทรงกลมระหว่างเรดาร์เป้าและวัตถุเป้าจะถูกบดบังโดยความโค้งของโลกสามารถคำนวณได้ตามค่าด้านล้างทั้งนี้อาจมีปัจจัยผลการทบกับสะภาพอากาศที่จะทำให้ระยะเพิ่มขึ้นหรือลดลง

4. ระยะไกลสุดของเรดาร์ (D)

$$D = \ Maximum\ Range$$

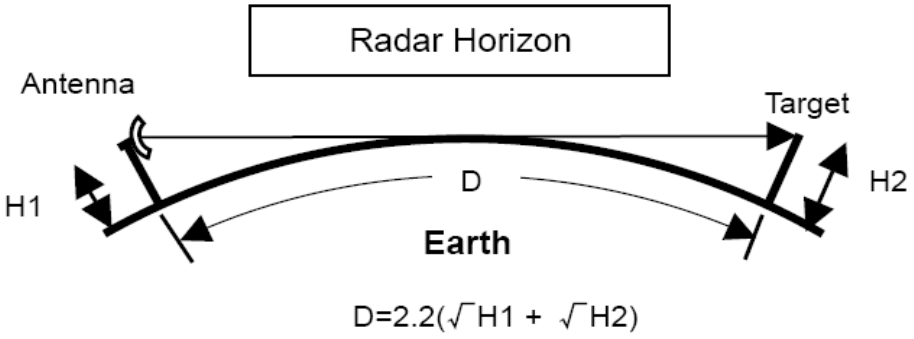
$$D = 1.1414\left(H_t + H_0\right) Status\ miles$$

$$D = 1.23\left(H_t + H_0\right) Nautical\ Miles$$

$$D = 1.25\left(H_t + H_0\right) Nautical\ Miles$$

เมื่อ H_t คือ ความสูงของสายอากาศเป็นฟุต

H_0 คือ ความสูงของเป้า



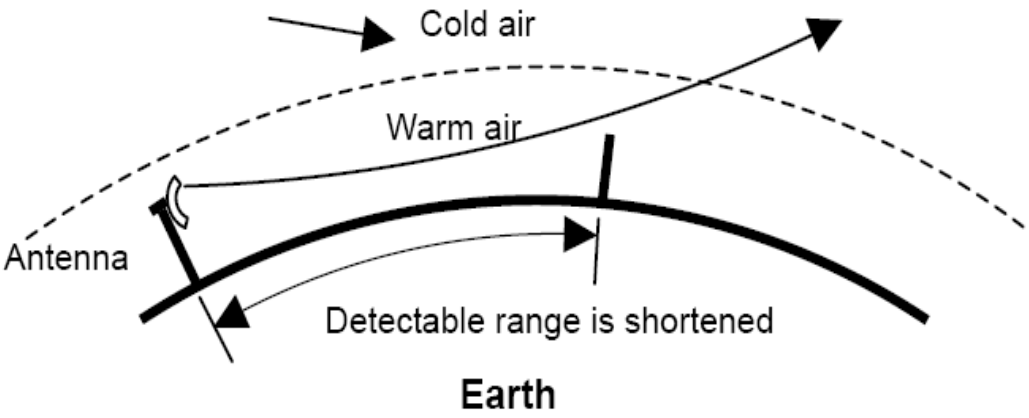
ภาพที่ 3-10 ความโค้งของโลก

5. การหักเหของคลื่น

เมื่อคลื่นเดินทางผ่านอากาศไปยังเป้าต้องอากาศที่มีความชื้นและความหนำแน่นของอากาศ ไม่เท่ากัน เช่น ในคลื่นแสงเมื่อใส่หลอดกาแฟหรือช้อนลงในแก้วน้ำจะมองเห็นเหมือนกับว่าหลอดกาแฟหรือช้อนนั้นหักงอเนื่องจากความหนำแน่นของน้ำและอากาศมีค่าไม่เท่ากันคลื่นจะหักเหผ่านตัวกลางที่มีความหนำแน่นมากกว่า

5.1 fraction Sub Re

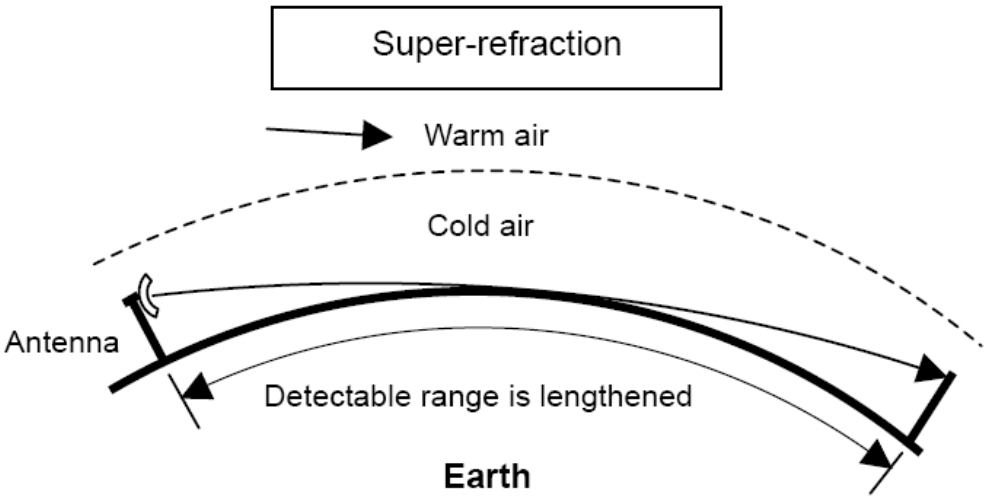
การในงานเรดาร์บางครั้งพบว่าความสามารถในการตรวจจับเป้าของเรดาร์ลดลงทั้งที่ระบบเรดาร์ทำงานปกติซึ่งจะสังเกตได้ชัดเจนเช่นในเวลาค่ำ สภาพอากาศที่ผิวพื้นหรือน้ำทะเลร้อนกว่าอากาศด้านบนทำให้ความหนำแน่นของบริเวณพื้นผิวด้านล่างมีความหนำแน่นน้อยกว่าด้านบนคลื่นจะหักเหเบนขึ้นด้านบนจะมีผลทำให้ระยะการตรวจจับของเรดาร์ลดลงในสภาวะนี้จะถูกเรียกว่า Sub Refraction ตามภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 การเกิดสภาวะ Sub Refraction

5.2 Super Refraction

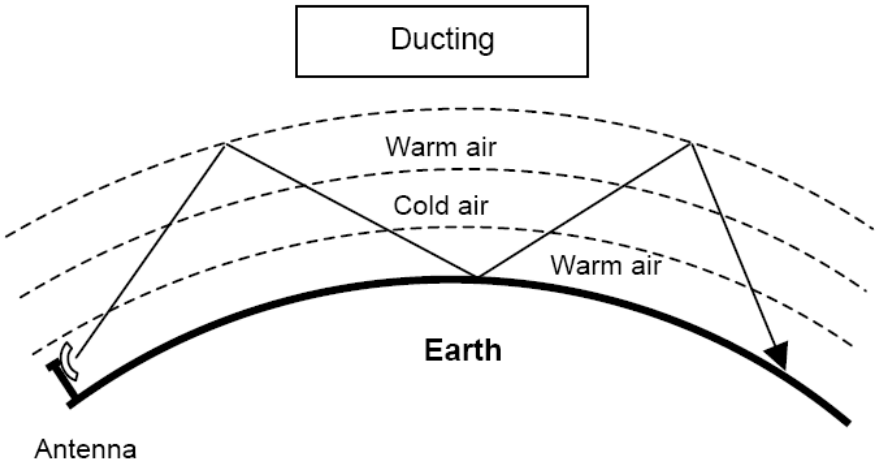
ในบางครั้งจะเกิดสะภาพอากาศด้านบนมีความร้อนมากกว่าบริเวณผิวพื้นหรือน้ำทะเล เช่น ในตอนเช้าน้ำทะเลคายความเย็นหมดแล้วเริ่มมีแสงแดดเข้ามาทำให้อากาศด้านบนเย็นกว่าด้านล่าง ทำให้ความหนำแน่นของบริเวณพื้นผิวด้านล่างมีความหนำมากว่าด้านบนคลื่นจะหักเหเบนลงด้านล่างจะมีผลทำให้ระยะการตรวจจับของเรดาร์เพิ่มขึ้นจะเรียกสภาวะนี้ว่า Super-Refraction ภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 การเกิดสภาวะ Super Refraction

5.3 Duct

อีกสภาวะหนึ่งความหนำแน่นของอากาศเหนือพื้นผิวและด้านบนมีค่าน้อยน้อยกว่าตรงกลาง เมื่อคลื่นเรดาร์ถูกส่งผ่านเข้าไปในพื้นที่ตรงกลางคลื่นจะสะท้อนกลับไปมาที่ขอบระหว่างความหนำแน่นที่น้อยกว่าด้านล่างและด้านบน คลื่นจะถูกผลักให้เดินอยู่ตรงกลางตลอดเวลาเหมือนเดินทางเข้าไปในท่อ จะทำให้เรดาร์สามารถจับได้ระยะที่ไกลมากกว่าสภาวะอื่น ๆ และเรียกสภาวะนี้ ว่า Ducting ตามภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 การเกิดสภาวะ Ducting

6. การถูกรบกวน

6.1 การกวนจากธรรมชาติ (Sea Clutter/Rain Clutter)

ในระบบเรดาร์การกวนจากธรรมชาติเกิดขึ้นได้ในสองกรณีซึ่ง ได้แก่ การกวนโดยความถี่และการทำงานของระบบเรดาร์ เช่น การฟ้าร้องฟ้าฝาจะมีสัญญาณกวนเข้าไปในเครื่องรับ ในกรณีที่สองเมื่อเกิดสภาวะที่มี เมฆ หรือฝน จะเกิดการสะท้อนกลับมายังเรดาร์ซึ่งอาจมีระดับสูงกว่าเป้าที่ต้องการตรวจจับทำให้มองไม่เห็นเป้านั้นจึงถูกเรียกว่า Rain Clutter และเมื่อทะเลมีคลื่นในระยะใกล้จะมีมุมสะท้อนที่ทำให้สัญญาณเรดาร์สะท้อนกลับมายังเรดาร์ด้วยระยะที่ใกล้มาก สัญญาณสะท้อนจะมีค่าแรงเหนือระดับปกติทำให้เห็นแต่สัญญาณที่สะท้อนของคลื่นทะเลนั้นจะถูกเรียกว่า Sea Clutter

6.2 การกวนจากการสร้างขึ้น (ECM/Chaff)

ได้แก่ในสภาวะสงครามอิเล็กทรอนิกส์มีการต่อต้านการตรวจจับของเรดาร์ด้วยเครื่องก่อนกวน ECM (Electronic Counter Measurement) เข้าเครื่องรับทำให้มองไม่เห็นเป้า ซึ่งเรียกว่า Noise Jammer หรือทำการหลอกลวงการตรวจจับเป้าของเรดาร์ให้แปลความหมายผิดไป เช่น Deception Jammer หรือ Chaff

7. กำลังส่งของเรดาร์

กำลังส่งของเรดาร์หากมีค่าสูงจะทำให้สัญญาณสะท้อนกลังมีค่าแรงทำให้มองเป็นเป้าได้ชัดเจนมากกว่า หรือ มีกำลังมากพอที่จะสะท้อนเป้าเล็ก ๆ ระยะไกล ๆ กลับมายังเรดาร์ได้

8. ความไวเครื่องรับ (Sensitivity)

ความไวของเรดาร์ คือ ความสามารถในการรับสัญญาณสะท้อนกลับที่ค่าต่ำที่สุดได้ หากระบบเรดาร์ยิ่งมีความไวสูงจะสามารถรับสัญญาณสะท้อนจากเป้าที่อยู่ไกล ๆ ได้นั่นหมายการเพิ่มระยะตรวจจับด้วย ความไวของเครื่องรับมีผลโดยตรงจากการที่เครื่องรับสัญญาณสะท้อนของเป้าระดับต่ำ ๆ เข้ามาแล้วทำการขยายให้มากขึ้น จนพอต่อความต้องการ ในการขยายของสัญญาณนั้นอาจจะขยายสัญญาณรบกวน (Noise) ต่าง ๆ เข้ามาด้วยสิ่งหนึ่งที่จะแสดงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรับ คือ ความสามารถที่เลือกขยายสัญญาณเฉพาะที่ต้องการไม่ขยายสัญญาณรบกวน และแสดงค่าออกในรูปของ Noise Figure

4 ระบบสายอากาศเรดาร์ Antenna radar system

บทนำ

สายอากาศ (Antenna) มีหน้าที่ในการรวมและกำหนดทิศทางของคลื่นเรดาร์ที่ถูกส่งออกไป โดยให้การสะท้อนทางกายภาพของจากเรดาร์ในแบบต่าง ๆ เช่น Parabolic, Parabolic Cylinder, Cass grain และ Planar Array เป็นต้น โดยเสาอากาศแบบต่าง ๆ เหล่านั้นสามารถปรับรูปร่างของแนวคลื่น (Beam shape) ให้เป็นไปตามที่ต้องการทั้งภาครับและภาคส่ง ทั้งนี้สัญญาณเรดาร์จะต้องสแกนให้ครอบคลุมห้วงอากาศที่ต้องการตรวจจับเป้าหมาย สำหรับเทคนิคการสแกนมีหลายประเภท โดยวิธีการกลศาสตร์ (mechanical scan) และทางอิเล็กทรอนิกส์ (electrical scan) ดังนั้น รูปร่างและขนาดของเสาอากาศจะแตกต่างกันออกไป ตามบทบาท และเทคโนโลยีของเรดาร์

หลักการของสายอากาศเรดาร์ (PRINCUPER OF RADAR ANTENNA)

สายอากาศเรดาร์แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ สายอากาศแบบส่งคลื่นรอบตัว (OMNI-DIRECTIONAL) และแบบส่งคลื่นเป็นทิศทาง (DIRECTIONAL) สายอากาศแบบส่งคลื่นรอบตัว จะมีการส่งคลื่นวิทยุออกไปทุกทิศทุกทางในเวลาเดียวกันดังความหมายของชื่อ สายอากาศแบบนี้มีการใช้น้อยในระบบเรดาร์สมัยใหม่ แต่ส่วนมากจะใช้ในอุปกรณ์วิทยุทั่ว ๆ ไป ในระบบ IFF (Identification Friend of Foe) ในอุปกรณ์เครื่องรับของระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ (COUNTER MEASURE) เพื่อตรวจหาสัญญาณเรดาร์ของฝ่ายตรงข้าม สำหรับสายอากาศแบบส่งคลื่นเป็นทิศทางนั้นจะส่งกำลังงานคลื่นวิทยุออกไปในลักษณะเป็นลำคลื่น (LOBES หรือ BEAMS) ตรงออกไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสายอากาศ ซึ่งในขณะนั้น ซึ่งบางครั้งรูปแบบของลำคลื่นอาจจะเกิดลำคลื่นเล็ก ๆ แพร่ออกมาด้วย แต่ลำคลื่นเล็ก ๆ เหล่านี้ปกติแล้วจะมีกำลังงานต่ำและไม่มีผลกระทบต่อลำคลื่นหลัก ซึ่งลำคลื่นหลัก (Main Lobe) อาจมีความกว้างเป็นมุม 1 องศา หรือ 2 องศา ถึงหลาย ๆ องศาแล้วแต่วัตถุประสงค์ ของเรดาร์ในแต่ละประเภทกำลังงานของลำคลื่นหลักจะถูกจำกัดให้อยู่ในมุมไม่กี่องศา ไม่ว่าจะใช้การส่งในแนวดิ่ง (VERTICAL PLANE) หรือในแนวระดับ (Horizontal PLANE) หรือทั้งสองระนาบ ส่วนคลื่นที่เป็นลำเล็ก ๆ (MINOR LOBE) จะถูกจำกัด ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ลำคลื่นหลักมีกำลังงานสูงสุด

คุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์

สายอากาศเรดาร์มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความเป็นทิศทาง (DIRECTIVITY) ซึ่งหมายถึงความคมของลำคลื่นที่ส่งออกจากสายอากาศนั้น

ถ้าลำคลื่นแคบในแนวระดับหรือแนวดิ่ง ก็ตามเราจะเรียนสายอากาศนั้นว่าเป็นสายอากาศที่มีความเป็นทิศทาง สูงในแนวระนาบนั้นและในทางกลับกัน ถ้าลำคลื่นกว้างในแนวระนาบใด ก็จะถือว่าสายอากาศมีค่าความเป็นทิศทางต่ำในแนวระนาบนั้น ๆ ด้วย เช่น ถ้าสายอากาศที่ส่งลำคลื่นแคบ ๆ ในแนวระดับ (HORIZONTAL) และมีลำคลื่นในแนวดิ่ง (VERTICAL)กว้างก็กล่าวไว้ว่าสายอากาศนั้นมีความเป็นทิศทางในแนวระดับ (HORIZITAL DIRECTIVITY) สูงและมีความเป็นทิศทางในแนวดิ่งต่ำ (VERTICAL DIRECTIVITY) สายอากาศที่มีความเป็นทิศทางสูง จะทำให้เกิดคลื่นที่แคบ ซึ่งทำให้สามารถใช้กำลังส่งต่ำกว่าในระยะทางเท่ากัน เนื่องจากกำลังงานของลำคลื่นไม่กระจัดกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้างและนำไปสู่สมบัติประการที่สองของสายอากาศ ที่เรียกว่าอัตราการขยายกำลัง (POWER GAIN) และมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับค่าของทิศทาง (DIRECTIVITY)

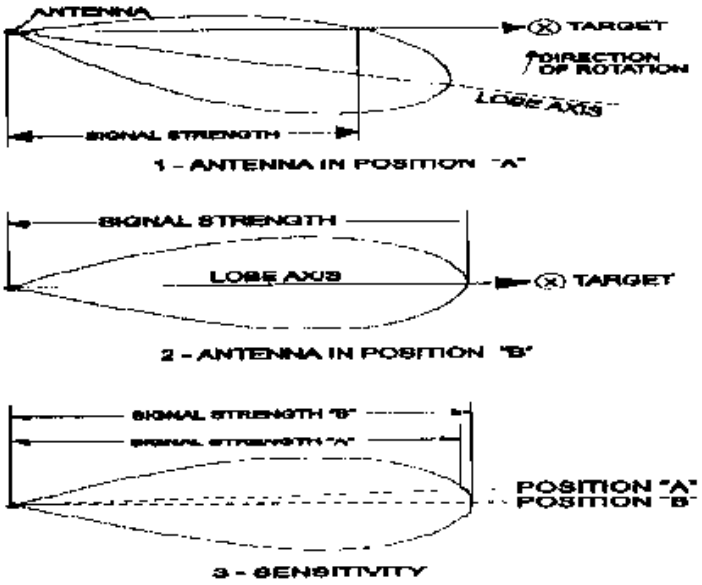
POWER GAIN เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่จุดใดจุดหนึ่งของลำคลื่นที่ส่งจากสายอากาศหารด้วย กำลังงาน ณ จุดเดียวกันที่ส่งออกจากสายอากาศแบบไดโพลเดี่ยว (SINGLE DIPOLE) ที่ติดตั้ง ในตำแหน่งเดียวกันและป้อนด้วยสัญญาณอย่างเดียวกันกับสายอากาศที่ต้องการทราบอัตราการขยาย (GAIN) นั้น สายอากาศที่มีค่าความเป็นทิศทางสูงก็จะมีอัตราการขยายกำลังสูง และสายอากาศทีมี ความเป็นทิศทางต่ำก็จะมีอัตราการขยายกำลังต่ำ ส่วนสายอากาศไดโพลที่ไม่มีตัวสะท้อนคลื่น (REFLECTOR) นั้นจะมีอัตราการขยายกำลังเท่ากับหนึ่ง แต่ถ้านำสายอากาศไดโพลหลาย ๆ ชุดมาต่อขยายกัน ก็จะทำให้มีอัตราการขยายกำลังมากกว่าหนึ่งซึ่งค่าที่แท้จริงจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นทิศทางของไดโพลที่ขนานกันนั้น

การให้รายละเอียดทางมุมทิศ (Bearing Resolution) ของระบบเรดาร์จะขึ้นอยู่กับความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศ การให้รายละเอียด (Resolution) ของอุปกรณ์เรดาร์ หมายถึงความสามารถของเครื่องเรดาร์ ในการตรวจรับและแสดงภาพของเป้าหมายขนาดเล็ก ๆ หรือความสามารถในการแสดงรูปร่างของเป้าหมายขนาดใหญ่ การที่จะแสดงรายละเอียดของเป้าหมายขนาดใหญ่ ๆ ได้ดีนั้นจะต้องใช้ลำคลื่นที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าพื้นที่ของเป้าหมายมาก ๆ และระยะเวลาของพัลส์จะต้องสั้นมาก ๆ

การจัดหามุมทิศของเป้าหมายโดยเรดาห์นั้นจะบอกในรูปของตำแหน่งเชิงมุม โดยที่มุมที่วัดนี้จะวัดโดยเทียบกับทิศเหนือจริง (True north) ซึ่งจะให้ค่าเป็นมุมทิศจริง (True bearing) หรืออาจวัดเทียบกับตำแหน่งของเรือหรืออากาศยานที่ติดตั้งเรดาร์นั้น ซึ่งจะได้มุมแบบ Relative bearing ก็ได้ การวัดมุมที่สัญญาณเอคโค่สำท้อนกลับมา ทำได้โดยใช้คุณสมบัติเรื่องทิศทาง (Directional) ของสายอากาศ

ระบบสายอากาศ หรือ สายอากาศเรดาร์ จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ตัวแพร่กระจายคลื่นตัวสะท้อนคลื่น และตัวนำคลื่น (Director) เพื่อทำให้เกิดลำคลื่นแคบไปในทิศทางใด ทิศทางหนึ่งเท่านั้น รูปร่างของสัญญาณที่ถูกสร้างตามลักษณะนี้จะเกิดเป็นลำคลื่นที่มีกำลังงานสูงสุด เป็นลำแคบ ๆ พุ่งออกไปในทิศทางที่ต้องการรูปร่างของลำคลื่นที่ได้จากระบบสายอากาศจะเหมือนดัน ในขณะทำการส่งและการรับสัญญาณ จึงสามารถใช้สายอากาศเดียวกันนี้ทั้งการส่งและการรับหรือทั้งสองอย่างก็ได้

สายอากาศในแบบง่ายที่สุด ที่สามารถวัดหามุมหรือมุมทิศ (Bearing) คือ แบบที่ส่งคลื่นเป็นลำคลื่นเดียว (Single lobe) แล้วติดตั้งสายอากาศบนแท่นฐานที่หมุนได้ ทำให้ลำคลื่นส่งสามารถกวาดไปได้ทั่วบริเวณที่ต้องการตรวจรับ จนกระทั่งเกิดสัญญาณเอคโค่สำท้อนกลับมา ก็ทำให้การปรับตำแหน่งของสายอากาศเพื่อให้รับสัญญาณได้แรงที่สุด

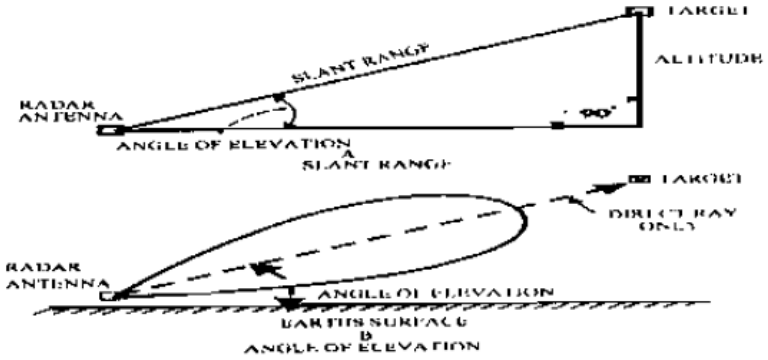


ภาพที่ 4-1 มุมของลำคลื่น

จากภาพที่ 4-1 แสดงรูปแบบในขณะการรับคลื่นของสายอากาศเรดาร์ทั่ว ๆ ไป ตามภาพจะแสดงถึงความแรงของสัญญาณที่รับได้ เมื่อสายอากาศและเป้าหมายทำมุมในตำแหน่งต่างกันจะเห็นว่าสัญญาณที่รับได้จะแรงที่สุดเมื่อแนวแกนกลางของลำดับคลื่นส่งตรงไปยังเป้าหมายพอดี ความไวในการรับสัญญาณ (Sensitivity) ของระบบจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว่างของมุมของลำคลื่นส่ง พนักงานเรดาร์จะปรับตำแหน่งของสายอากาศให้ได้รับสัญญาณได้แรงที่สุด ถ้าความแรงของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปมากในขณะที่สายอากาศหมุนหรือกวาดผ่านเป้าหมาย ที่มีขนาดเล็ก ๆ จะทำให้สามารถหาตำแหน่งของเป้าหมายได้แม่นยำยิ่งขึ้น จากภาพที่ 4-1 ความแรงของสัญญาณ A และ B จะแตกต่างกันน้อย แต่ถ้าให้ลำคลื่นส่งแคบลงอีกจะทำให้มีความแรงแตกต่างกันมากขึ้น และความแม่นยำจะเพิ่มขึ้น

ปัจจัยในการระบุตำแหน่งของวัตถุในอากาศอีกประการหนึ่งคือ ค่าของมุมเงยหรือความสูงของวัตถุนั้นก็ได้ ถ้าหาค่าใดค่าหนึ่งได้ก็จะสามารถหาค่าของอีกตัวหนึ่งได้ โดยใช้สูตรพื้นฐานในวิชาตรีโกณมิติ

วิธีหาค่าของมุมเงย หรือความสูงของเป้าหมายแสดงตามภาพที่ 4-2A ระยะห่างแบบเอียงหาได้จากระยะทางของเป้าหมายที่แสดงให้เห็นทางจอเรดาร์ มุมเงยจะได้จากระบบสายอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4-2B ระยะสูงจะเท่ากับระยะเอียง (Slant range) คูณด้วยค่าของมุมเงยของสายอากาศ



ภาพที่ 4-2 มุมเงยของลำคลื่น

สำหรับเครื่องเรดาร์ที่สายอากาศ สามารถทำมุมเงยได้นั้นจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่คำนวณระยะสูงของเป้าหมายออกได้ แต่ในเครื่องเรดาร์ที่สายอากาศไม่มีการเคลื่อนไหวทางมุมเงย (Air search) ก็จะต้องใช้แผ่นแผนที่แสดงค่าความสูงไว้ประกอบเมื่อต้องการทราบความสูงของเป้าหมาย

ระบบเครือข่ายเรดาร์แจ้งเตือน (Early warning nets) นั้น จะไม่คำนึงถึงความเที่ยงตรงในเรื่องของระยะทางและมุมของเป้าหมายมากนักแต่จะเน้นไปในด้านความไกลของการตรวจจับมากกว่า นั่นคือ ระบบเรดาร์เหล่านี้จะถูกออกแบบให้มีกำลังสูง ๆ ลำคลื่นส่งกว้างและมีพัลส์ส่งกว้าง (มีช่วงเวลาในการส่งนาน) การให้รายละเอียดของเป้าหมาย คือความสามารถในการบอกตำแหน่งเชิงมุมและระยะห่างจะไม่แม่นยำเท่ากับระบบเรดาร์ที่ใช้ในการกิจอื่น เช่น เรดาร์ควบคุมการยิงระบบอาวุธ (Fire control radar)

เรดาร์ค้นหาทางอากาศ (Air search) จะใช้ในการตรวจจับและแสดงตำแหน่งของอากาศยานที่เป็นเป้าหมาย ในระยะไกลด้วยมุม 360 องศา รอบตัวเพื่อค้นหาเป้าหมายตั้งแต่ระดับพื้นดินและสูงขึ้นไปในอากาศด้วยจะต้องสามารถปฏิบัติการได้อย่างต่อเนื่อง และมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ความถี่ค่อนข้างต่ำ ย่าน P หรือ L band, 30-1000 mc) เพื่อให้สัญญาณไปได้ไกลโดยมีการลดทอนต่ำมีพัลส์ส่งกว้าง (Wide pulse width: 2-4 μS) และกำลังสูง (High peak power) เพื่อให้สามารถตรวจจับเป้าหมายที่มีขนาดเล็กและอยู่ในระยะห่างมาก ๆ ได้ จะใช้การส่งซ้ำในอัตราต่ำ ๆ (Low pulse repetition rate) เพื่อให้ได้ระยะทางไกลที่สุด ลำคลื่นส่งในแนวดิ่งมีความกว้างมาก เพื่อให้ตรวจจับเป้าหมายได้ที่ความสูง

ตั้งแต่ระดับพื้นราบไปจนระยะสูงมากๆ ในอากาศและชดเชยอาการที่เรือเอียงหรือโยนตัวขึ้นลงตามคลื่น (Compensate for the pitch and roll of the ship) ลำคลื่นส่งในแนวระดับจะกว้างปานกลาง เพื่อให้รายละเอียดทางมุมทิศของเป้าหมายในระยะ 360 องศา รอบตัวได้ดีพอสมควร

เรดาร์ค้นหาทางภาคพื้น (Surface search radar) ใช้สำหรับหาตำแหน่งทิศทางและระยะห่างของเป้าหมายทางภาคพื้นเป็นมุม 360 องศารอบตัว โดยจะค้นหาเป้าหมายในแบบระยะสายตา (line of sight) ของสายอากาศ เนื่องจากระยะทางไกลสุดของเรดาร์ห่างทางภาคพื้น จะถูกจำกัดด้วยความโค้งของผิวโลก (Radar horizon) จึงต้องใช้ความถี่ส่งผ่านสูงมาก (x-band) เพื่อให้สามารถตรวจจับส่วนประกอบเล็ก ๆ ของเป้าหมายได้ เช่น ส่วนประกอบของหัวเรือ หรือ กล้องเปอร์ริสโคปของเรือดำน้ำ เป็นต้น และจะต้องใช้พัลส์ส่งแคบ (Narrow pulse width of 0.37-2 μS) เพื่อให้ใช้ค้นหาหรือตรวจจับเป้าหมายในระยะใกล้ ๆ ได้ และให้รายละเอียดและความแม่นยำด้านระยะทางได้ดี ใช้อัตราส่งคลื่นซ้ำสูง (high pulse repetition rate, 600-1000) เพื่อตรวจจับวัตถุเป้าหมายขนาดเล็ก ในระยะระดับสายตา (line-of-sight) ได้ดี มีลำคลื่น ในแนวดิ่งกว้าง 10 - 30 องศา เพื่อชดเชยการเอียงหรือโยนตัวของเรือ และเพื่อตรวจจับอากาศยานที่บินต่ำ ๆ ได้ลำคลื่นแคบในแนวระดับ 1-3 องศา เพื่อการวัดมุมได้เที่ยงตรงและ ได้รายละเอียดทางมุมดีขึ้น

ระบบเรดาร์ที่จะบอกมุมของเป้าหมายได้จะต้องทราบทิศทางที่ส่งลำคลื่นออกไปวิธีที่ใช้ได้จากการใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนที่มุมได้ 360 องศา และมีอุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังงานคลื่นเรดาร์ผ่านสายอากาศ ท่อนำคลื่น จานสะท้อนคลื่น ตัวนำคลื่นหรือตัวป้อนคลื่น (Feed horn)

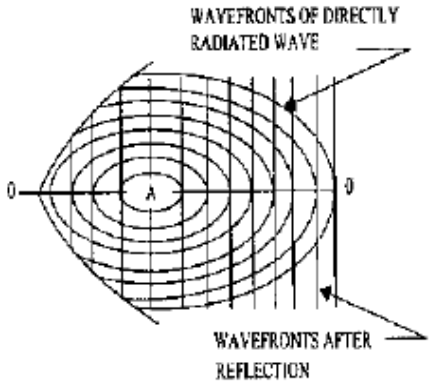
สายอากาศแต่ละแบบจะต้องมีขีดความสามารถในการรวบรวมกำลังงานและส่งเป็นลำคลื่นออกไปในอากาศ และต้องสามารถรับสัญญาณและเปลี่ยนรูปพลังงานส่งให้ภาครับทำงานได้

ในทางปฏิบัติแสดงให้เห็นว่าจานรูปพาราโบลาทีปรับแต่งจุดป้อนสัญญาณให้เหมาะสมจะสามารถส่งคลื่นและรับคลื่นสะท้อนกลับเพื่อป้อนให้ภาครับรับได้ดี

ถ้าจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลามีขนาดใหญ่เพียงพอจนทุกจุดบนจานมีระยะห่างจากจุดโฟกัสหลายเท่า ของความยาวคลื่นแล้วทำให้เกิดสภาวะ Quasi-Optical ทำให้ได้ลำคลื่นมีขนาดแคบ (Narrow beam) ขนาดของจานสะท้อนคลื่นที่ใช้ในทางปฏิบัติกับความถี่ไมโครเวฟจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ถึง 20 เท่าของความยาวคลื่นนั้นจะทำให้เกิดลำคลื่นที่กว้างประมาณ 5 องศา

ทฤษฎีเกี่ยวกับ Quasi-optical มักนำมาใช้เสมอ ๆ ในการอธิบายหลักการของเรดาร์ คำว่า Quasi หมายถึง คล้ายกับ หรือ เหมือนกับ เมื่อกล่าวถึงคลื่นไมโครเวฟที่เกิดจากเครื่องส่งเรดาร์ความถี่สูง แสดงสภาวะเป็นคลื่น Quasi-optical นั้นจะหมายความว่าคลื่นเรดาร์ที่มองไม่เห็น นั้นมีการแสดงปฏิกิริยาเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่ตามองเห็นได้ นั่นคือ ในการวางแผนสร้างอากาศยาน ที่มีคุณสมบัติครบถ้วนดันกล่าว จึงสามารถใช้สิ่งต่อไปนี้มาช่วยได้คือ (1) ตัวกลางในการแพร่คลื่นหรือการส่งคลื่น (Radiator of Feed) ซึ่งเปรียบได้กับหลอดไฟในกระบอกไฟฉาย (2) จานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา (Parabola Reflector) ซึ่งเทียบได้กับกรวยฉาบเงินหรือตัวสะท้อนในกระบอกไฟฉาย และ (3) วิธีที่จะทำให้ลำคลื่นกวาดไปทางมุมราบหรือมุมเงย ตามภารกิจใช้งานของระบบเรดาร์นั้น ๆ

ตัวแพร่คลื่น (Radiator) อาจจะเป็นไปทั้งไดโพล (Dipole) หรือปลายท่อนำคลื่นที่ปกติ เรียกว่า กรวยส่งคลื่น (Feed horn) ที่ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งจุดโฟกัส (Focal point) ของ จานสะท้อนคลื่นรูปพาลาโบลา คลื่นที่เดินทางออกจากจุดนี้ไปกระทบตัวสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาและเกิดการสะท้อนออกไปในรูปลำคลื่นแคบ ๆ คล้ายกับลำแสงของไฟฉาย



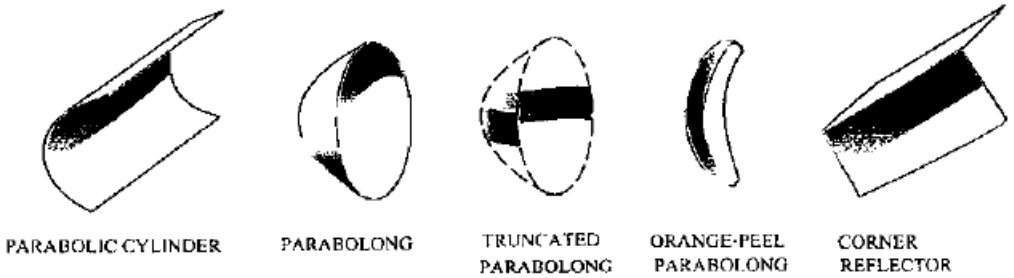
ภาพที่ 4-3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบพาลาโบลา

จากภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึง หน้าคลื่นในแบบทรงกลมที่เดินทางออกจากตัวแพร่คลื่น (Radiator) A ที่จุดโฟกัสของตัวสะท้อนแบบคลื่นรูปพาราโบลา เมื่อคลื่นกระทบผิวของตัวสะท้อนคลื่นมันจะสะท้อนตรงออกไป และรวมตัวกันเป็นลำคลื่นของกำลังงาน ตามภาพที่ 4-3 จะแสดง ให้เห็นคลื่นทรงกลมจากข้างหน้าของตัวแพร่คลื่นที่เสริมกำลังกลับคลื่นที่เดินทางออกจากตัวสะท้อนคลื่น แต่ในสายอากาศผ่านไมโครเวฟอาจจะไม่จริงเสมอไป เนื่องจากจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา ส่วนใหญ่จะมีตัวสะท้อนคลื่นอีกชิ้นหนึ่งวางไว้ด้านหน้าของตัวส่งคลื่น (Radiator) เพื่อสะท้อนคลื่นกลับมายังจานรูปพาราโบลา ก่อนที่จะส่งเป็นลำคลื่นตรงออกไปอย่างแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้คลื่นรูปทรงกลมที่ไม่ได้โฟกัสออกไปในแนวลำคลื่น

ภาพที่ 4-4 ลำคลื่นของจานสะท้อนคลื่นแบบพาลาโบลา

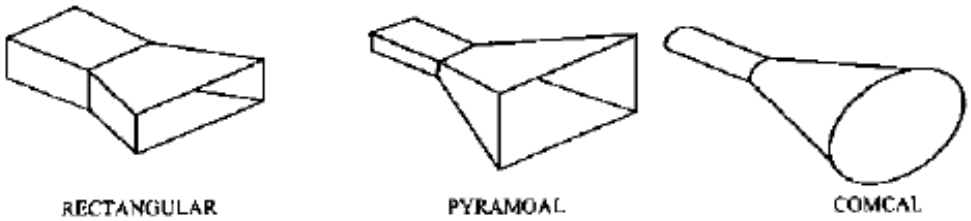
จากภาพที่ 4-4 แสดงรูปลำคลื่นในแนวราบ (Horizontal) และแนวดิ่ง (Vertical) ที่เกิดจากตัวสะท้อนรูปพาราโบลา (Parabola Reflector) คลื่นที่สะท้อนออกไปจะเป็นคลื่นกำลังงานวิทยุ (RF) ที่แคบมาก ดังนั้นจานสะท้อนคลื่นแบบพาราโบลาจะมีความแม่นยำสูงและมีค่าความเป็นทิศทาง (Directivity) สูง

ตัวสะท้อนแบบพาราโบลานี้สามารถสร้างได้หลายรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 4-5 รูปร่างของตัวสะท้อนจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของลำคลื่นวิทยุ (RF) จานสะท้อนรูปพาราโบลาที่สมบูรณ์จะทำให้เกิดลำคลื่นทีมีความกว้างในแนวราบและแนวดิ่งเท่ากัน ส่วนรูปทรงพาราโบลาในแบบอื่น จะให้ลำคลื่นกว้างในแนวระนำบหนึ่งและแคบในอีกระนาบหนึ่ง ตัวสะท้อน จะรวมกำลังงานให้แคบในแนวระนาบ เนื่องจากตัวสะท้อนคลื่นถูกตักออกไปทำให้มีความแคบในแนวดิ่ง ดังนั้นลำคลื่นจะกระจายออกในแนวดิ่งแทนที่จะถูกโฟกัสเพื่อใช้ในการตรวจจับทางมุมทิศได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 4-5 จานสะท้อนของคลื่น

ลำคลื่นที่กว้างในแนวดิ่ง (Wide vertically) จะใช้ในการตรวจจับอากาศยานที่ความสูงในระดับต่าง ๆ โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (Tilt angle) ของสายอากาศ ตัวสะท้อนคลื่นแบบ Truncated parabolic สามารถใช้เป็นแรดารวัดความสูงได้ การติดตั้งในแบบนี้ตัวสะท้อนคลื่นจะถูกยึดในลักษณะที่รูปทรงพาราโบลาอยู่ในแนวดิ่ง เนื่องจากจานสะท้อนจะแคบในแนวราบ ลำคลื่นจะกระจายออกในแนวราบ โดยไม่ถูกโฟกัสให้รวมกันจึงเกิดลำคลื่นรูปร่างคล้ายพัด(Fan shape beam) ซึ่งใช้สำหรับการจัดการมุมยกได้อย่างแม่นยำและเนื่องจากลำคลื่นมีความกว้างมากในแนวนอน ทำให้สามารถกวาดได้พื้นที่เป็นบริเวณกว้างกว่า โดยใช้เวลาน้อยกว่าลำคลื่นที่มีลักษณะคล้ายปลายดินสอ (Pencil like)



ภาพที่ 4-7 พวยส่งคลื่น

ข้อควรระวังของสายอากาศ (Antenna Safety Precautions)

คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายจากสายอากาศของเครื่องเรดาร์กำลังส่งสูง มีอันตรายต่อบุคคลหรือวัสดุอุปกรณ์ ที่เข้าไปสัมผัสกับลำคลื่น ในระยะใกล้กับสายอากาศ

วัสดุประเภท น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันหล่อลื่น วัตถุระเบิด พลุส่องแสง หรือเครื่องอาวุธยุทโธปกรณ์ ที่ใช้ชนวนไฟฟ้านั้น ไม่ควรนำเข้ามาในระยะรัศมี 50 ฟุตของสายอากาศเรดาร์กำลังส่งสูง ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จะต้องแน่ใจว่าได้หยุดการทำงานของเครื่องส่งเรดาร์และต้องควบคุมอย่างระมัดระวังตลอดเวลาที่มีวัสดุอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ภายในรัศมี 50 ฟุตนั้น

พื้นที่อันตรายภายใต้รัศมีสายอากาศของระบบเรดาร์ที่อาจเป็นอันตรายต่อบุคคลจะต้องมีการติดป้ายเตือนอันตรายให้เห็นอย่างเด่นชัด เจ้าหน้าที่ซ่อมบำรุงที่จะปฏิบัติงานกับสายอากาศเรดาร์จะต้องตรวจสอบว่าไม่มีไฟแรงสูงจากภาคส่งตลอดเวลาที่การซ่อมบำรุงกำลังดำเนินการอยู่

สายอากาศเรดาร์ที่ติดตั้งบนเรือ โดยมากมักติดตั้งบนจุดที่สูงที่สุดของเรือ หรือบนแท่นขนาดเล็กที่เสากระโดงเรือและสายอากาศเรดาร์นั้นก็มีขนาดใหญ่พอสมควร ซึ่งส่วนมากจะยื่นเลยออกไปนอกฐานที่ตั้ง จึงควรระมัดระวังถ้าสายอากาศมีการหมุน อาจถูกกระแทกลงมาได้ โดยที่สายอากาศที่หมุนได้รอบตัวมักมีสวิทซ์สำหรับการหยุดการหมุนจึงควรใช้สวิทซ์ เพื่อหยุด การหมุนเสียก่อนที่จะปฏิบัติงานกับส่วนประกอบอื่นใดของสายอากาศเรดาร์

5 เครื่องส่งเรดาร์ Radar Transmitter

บทนำ

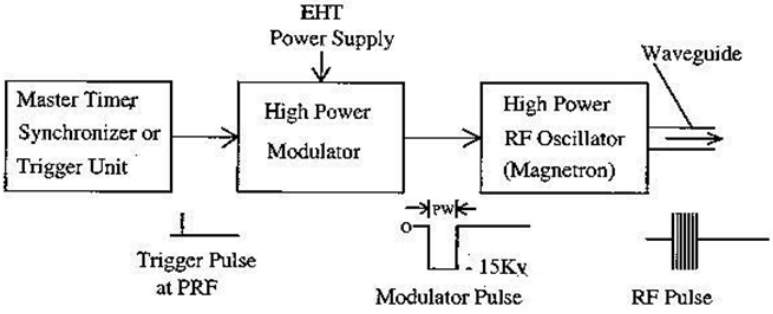
เครื่องส่งเรดาร์ (Radar Transmitter) มีหน้าที่ผลิตคลื่นอาร์เอฟที่มีกำลังและความถี่สูงเพื่อส่งไปยังสายอากาศเป็นกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกอากาศไป โดยจะมีการกำหนดทิศทางที่แน่นอน เมื่อคลื่นนั้นไปกระทบกับเป้าและสะท้อนกลับยังสายอากาศและเครื่องรับของเรดาร์ระยะเวลาที่เสียไปของคลื่นที่เดินไปและกลับจะนำมาคำนวณหาระยะทาง เพื่อให้ทราบตำแหน่งของเป้า ในการสะท้อนคลื่นของเป้าหากเป้ามีขนาดเล็กการสะท้อนย่อมมีน้อยเมื่อมีระยะห่างสัญญาณสะท้อนอาจมีระดับต่ำจนเครื่องรับ ไม่สามารถจับสัญญาณนั้นได้ ด้งนั้น หากต้องการให้เรดาร์จับได้ระยะไกล ในส่วนหนึ่งของระบบเรดาร์ต้องให้เรดาร์มีกำลังส่งที่สูงขึ้น เช่น ในระบบเรดาร์เดินเรือต้องการตรวจจับเป้าภายในระยะขอบฟ้าสำหรับปลอดภัยในการเดินกำลังส่งตามปกติใช้ความถี่ย่าน X Band กำลังส่ง 25 KW แต่ถ้าหากเป็นเรดาร์ตรวจการณ์ทางอากาศ ที่ต้องการตรวจจับเครื่องบินที่มีพื้นที่การสะท้อนคลื่นเรดาร์ต่ำ (Low Radar Cross Section) ให้ได้ในระยะไกล ๆ กำลังส่งของเรดาร์อาจเป็นหลายร้อยกิโลวัตต์ จนถึงหลายเมกะวัตต์ ส่วนการจะใช้เทคนิคใดในการสร้างเครื่องส่งขึ้นอยู่กับชนิดของเรดาร์ และการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต

ชนิดและหน้าที่ของเครื่องส่งเรดาร์แบบของเครื่องส่งเรดาร์

ในการใช้งานของเครื่องส่งเรดาร์สามารถที่จะกำหนดเป็นสองรูปแบบคือชนิดที่เป็นแบบพัลส์แคบ (Narrow Pulse) หรือประเภทที่ใช้หลอดแมกนีตรอนและประเภทใช้พัลส์กว้าง (Wide Pulse) หรือแบบไม่ใช้หลอดแมกนีตรอน

1. เครื่องส่งแบบ High Power Oscillator (HPO)

High Power Oscillator ได้แก่ เครื่องส่งชนิดที่ใช้หลอดแมกนีตรอนเป็นเครื่องส่งที่นิยมใช้มากที่สุด เช่น เรดาร์เดินเรือและเรดาร์ค้นหาทั่วไปโดยมีหลักการทำงานในเบื้องต้นตามภาพที่ 5-1 เนื่องจากไม่ค่อยมีเรื่องยุ่งยากซับซ้อน



ภาพที่ 5-1 HPO Transmitter

1.1 เครื่องส่งแบบ High Power Oscillator (HPO) ประกอบด้วย

1.1.1 Master Timer Synchronizer หรือ Trigger Unit เป็นหัวใจของระบบเรดาร์ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณ Trigger หรือความถี่ PRF เพื่อกำหนดให้แต่ละส่วนทำงานร่วมจังหวะ ตัวอย่างเช่นป้อน กับเครื่องส่งเพื่อผลิตอาร์เอฟพัลส์ ในขณะเดียวกันจะต้องส่งให้กับภาคการแสดง (Display) ในส่วนของสองอุปกรณ์นี้จะมีเวลาในการประมวลผลต่างกันตัวอย่างเช่นหลังเครื่องส่งผลิตอาร์เอฟพัลส์ต้องเดินทางสายส่งไปยังสายอากาศและเสียเวลาเดินทางกลับเช่นกันแต่การวัดระยะจะคำนวณเวลาจากสายอากาศถึงเป้า ในส่วนของภาคการแสดงก็ต้องได้รับสัญญาณ Trigger เพื่อนำมาทำกระบวนการเตรียมการสร้างภาพ ให้พร้อมกับสัญญาณสะท้อนของเป้าที่รับเข้ามาจากเครื่องรับให้ได้ระยะศูนย์ตรงกันดังนั้นในการใช้งานเวลาของ Trigger ของแต่ละส่วนจะไม่พร้อมกัน

1.1.2 Radar Modulator ในส่วนนี้นอกจากจะรับ Trigger ที่มีค่าอัตราส่งเท่ากับความถี่ PRF ในภาคจะทำหน้าที่ผลิตพัลส์ลบสูง (Modulator Pulse) โดยมีการกำหนดความกว้างของพัลส์เท่ากับความกว้างของ Pulse Width (ในปัจจุบันความกว้างของพัลส์วิดท์มีค่าตั้งแต่ 0.065 – 10.0 μ Second) พัลส์ลบสูงค่าที่ได้อาจเป็น – 15 KV. ถึง – 50KV หรือค่าอื่นแล้วแต่ความต้องการของหลอดแมกนีตรอนซึ่งอยู่ในภาค High RF Oscillator เช่น หากมีกำลังส่งต่ำไฟก็จะต่ำ หากกำลังสูงพัลส์นี้จะสูงตามไปด้วย ในภาค High Power Oscillator จะมีหลอดแมกนีตรอน ทำหน้าที่ผลิต RF Pulse ส่งออกอากาศโดยผ่านท่อ Wave Guide

ในการใช้งานในปัจจุบันเครื่องส่งที่ใช้หลอดแมกนีตรอนยังแบ่งออกเป็นเครื่องส่งแบบ Line Pulse Modulator ซึ่งใช้งานกับเรดาร์ที่มีกำลังส่งสูงและแบบ MOS FET Modulator ซึ่งใช้งานกับเรดาร์ที่กำลังส่งไม่สูงมากนักเช่น เรดาร์เดินเรือเป็นต้น อย่างไรก็ตามหากต้องการให้มีกำลังส่งที่สูงมากขึ้นเพื่อต้องจากจับได้ไกลจะต้องใช้ไฟแรงสูงและอุปกรณ์ที่ทนต่อไฟแรงสูงมาก

2. เครื่องส่งแบบ Line Pulsing Modulator

เครื่องส่งแบบ Line Pulsing Modulator เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและการดูแลรักษาน้อยสามารถที่จะทำให้มีพัลส์สูงหลาย ๆ สิบกิโลวัตต์และสามารถขับหลอดแมกนีตรอน มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ มีรูปแบบการใช้งานจำนวน 2 รูปแบบคือแบบอนุกรม (Serial) และแบบขนาน (Parallel) ดังภาพที่ 5-2

2.1 เครื่องส่งแบบ Line Pulsing Modulator มีส่วนประกอบดังนี้

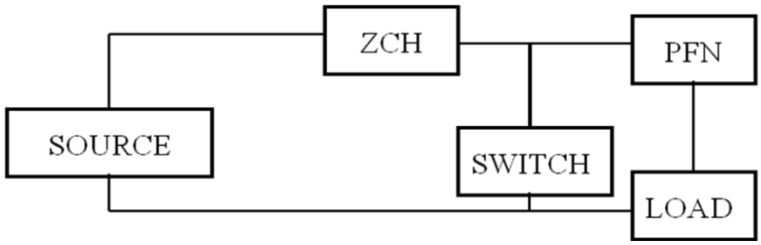
2.1.1 Source ทำหน้าที่ จ่ายไฟสูงให้กับชิ้นส่วนเก็บไฟใน Modulator

2.1.2 Zch ทำหน้าที่เป็น Impedance รวมในทางผ่านประจุใยงานเก็บไฟ

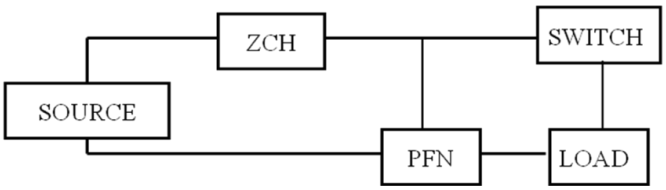
2.1.3 Switch ได้แก่หลอด Thyratron หรือ SCR ใช้เพื่อให้ใยงานประจุไฟเมื่อสวิทซ์เปิดและคายประจุ ใยงานเก็บไฟเมื่อสวิทซ์ทำงาน

2.1.4 Pulse Forming Network ทำหน้าที่เก็บไฟสูงเพื่อสร้าง High Voltage Pulse กำหนด Pulse Width จ่ายให้กับ Load

2.1.5 Load ได้แก่ ขด Primary ของ Pulse Transformer ซึ่งจะทำการส่งต่อกำลังให้กับหลอดแมกนีตรอนผ่านทางขด Secondary



SERIAL LINE PULSE MODULATOR

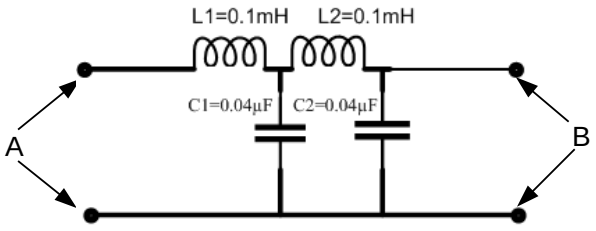


PARALLEL LINE PULSE MODULATOR

ภาพที่ 5-2 Line Pulsing Modulator

2.1.6 สายส่งจำลอง

ลักษณะพิเศษบางอย่างของสายส่ง เช่น ไทม์ดีเลย์ พัลส์เชบปลิ่ง และการสะสมพลังงาน สามารถ ที่จะใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ในเครื่องเรดาร์ ความยาวทางฟิกสิกส์ของสายจริง ๆ ตามความต้องการสำหรับการประยุกต์ที่เฉพาะเจาะจงอาจจะมากเกินกว่าที่จะใช้งานได้ ในกรณีนี้สายส่งจำลองอาจจะ สร้างขึ้นโดยขั้นแรกจะทำการ กำหนดค่า L และ C ในสายจริง และ รวมค่าส่วนประกอบเหล่านี้ลงในสายส่งจำลอง ดังนั้นสายจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับสายจริง การสร้างสายส่งจำลองแสดงใน ภาพที่ 5-3 ค่ารวมของ L และ C ที่ใช้ ใช้แทนค่าของ L และ C ที่เกิดขึ้นจริงในสาย



ภาพที่ 5-3 การสร้างสายส่งจำลอง

สายส่งจำลองจะผลิตดีเลย์ แคแรคเตอร์ริสติก เหมือนกันกับสายจริง โวลท์เตจที่ประยุกต์ให้กับไลน์เทอร์มินัล ณ จุด A จะไปปรากฏที่ เทอร์มินัล ณ จุด B ดีเลย์โดยเวลาที่ไปกลับซึ่งกำหนด โดยค่าของ L และ C ไทม์ดีเลย์อาจจะคำนวณได้โดยการใช้สูตร

$$Td = N\sqrt{LC}$$

เมื่อ Td คือ Delay Time ดีเลย์ไทม์เป็น นาที

N คือ จำนวนไลย์เซคชั่น

L คือ อินดัคแตนซ์ เป็น เฮนรี ต่อ เซคชั่น

C คือ แคแปซิแตนซ์ เป็นฟาราด ต่อเซคชั่น

ตัวอย่างที่ 5.1 จากสายส่งจำลองซึ่งแสดงในภาพที่ 5-3 จะมีดีเลย์ไทม์เท่ากับเท่าใด

$$\begin{aligned} Td &= 2\sqrt{\left(1\times10^{-4}\right)\times\left(4\times10^{-8}\right)} \\ &= 2\sqrt{4\times10^{-12}} \\ &= 4\times10^{-6} \\ &= 4\mu Second \end{aligned}$$

EMF ซึ่งประยุกต์ให้แก่เทอร์มินัล ทางเข่าของสายจะไม่ปรากฏ ณ เทอร์มินัลทางออกจนกว่าเวลาจะผ่านพ้นไป 4 ไมโครเซกกัน

เมื่อสายแสดงคุณสมบัติเป็นเหมือนวงจรขนาน Rch วิธีการที่จะกำหนดคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์จะสามารถกำหนดโดยใช้สูตร

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

เมื่อ Z_0 คือ เป็นคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ ในหน่วยโอห์ม (ohms)

L คือ เป็นอินดัคแตนซ์ต่อเซคชั่นในหน่วยเฮนรี่ (henrys)

C คือ เป็นแคแปซิเตอร์ในหน่วยฟาราด(Farads)

ตัวอย่างที่ 5.1 จากสายส่งจำลองซึ่งแสดงในภาพที่ 5-3 จะมีกำหนดคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์เท่าใด

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{1\times10^{-4}}{4\times10^{-8}}} \\ &= \sqrt{0.25\times10^{-4}} \\ &= 5\times10 \\ &= 50ohms \end{aligned}$$

ข้อสังเกต สถานะของเซคชั่นจะไม่เปลี่ยนค่า Z_0 เมื่ออัตราส่วนของ L และ C ไม่เปลี่ยนแปลง สายจะคล้ายกับสายส่งคู่ขนาน และกำหนดด้วยความถี่สูง เมื่อสายประกอบด้วยอินดัคแตนซ์และค่าแปซิแตนซ์ ก็จะทำให้เกิดวงจรกรอง (Filter) ขึ้น ณ ความถี่สูงมาก ๆ สแควซ์เวฟพัลส์ เริ่มจะเกิดความเพี้ยน

2.1.6.1 การประจุสายส่งปลายเปิด

วงจรประจุ DC ของสายส่งจำลองปลายเปิดแสดงในภาพที่ 5-4 a Rch คือค่ารีซอสซ์แตนซ์ภายในต้องกำหนด Z_0 ของสายปลายเปิด สามารถหาได้โดยใช้สูตร

$$Z_0 = \sqrt{\frac{1\times10^{-4}}{1\times10^{-8}}}$$

$$=10^2$$

$$=100ohms$$

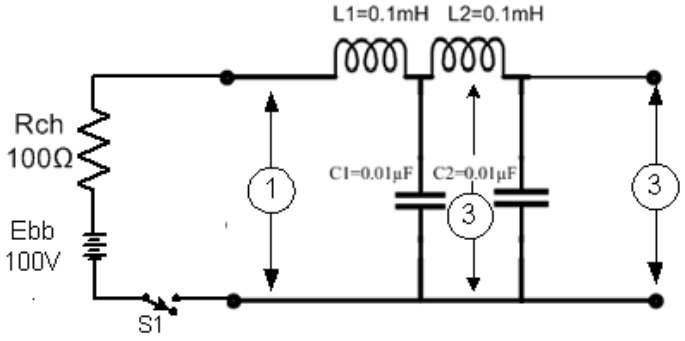
ไทม์ดีเลย์ (Td) สำหรับการเดินทางโดยเที่ยวเดียวคือ

$$Td = 2\sqrt{\left(1\times10^{-4}\right)\times\left(1\times10^{-8}\right)}$$

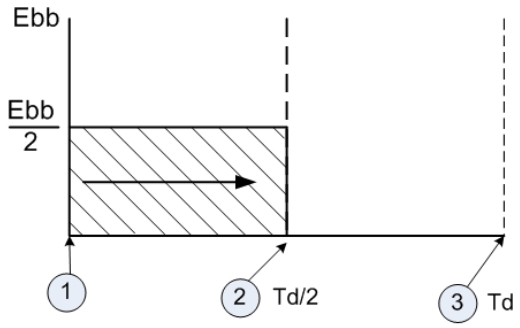
$$=2\times10^{-6} = 2\mu Second$$

การประจุ DC ตามลำดับจะเริ่มต้นเมื่อ S_1 ถูกปิด เมื่อ $Z_0 = Rch$ ครึ่งหนึ่งของ Ebb จะถูกประยุกต์เข้าที่สาย ณ จุด (1) เซคชั่นแรกของสายประกอบด้วย L_1 และ C_1 จะประยุกต์เท่ากับ $Ebb/2$ Ebb/2 (50 V.) ณ $Td/2$ หรือ 1 ไมโครเซกัน ดังภาพที่ 5-4 b ณ เวลานี้จะวัดได้ 50 V. ณ จุด (1) และ (2) แต่โวลเตจ ณ จุด (3) จะเท่ากับศูนย์โวล 2 ไมโครเซกัลป์ หลังจาก Ebb ถูกประยุกต์ให้กับวงจรเซคชั่นที่สองของสาย L_2 และ C_2 ประยุกต์เท่ากับ $Ebb/2$ หรือ 50 V. ณ ชั่วขณะนี้จะวัดได้ 50 V. ณ จุด (1) (2) และ (3) คลื่นโวลท์เตจซึ่งเดินทางจากเทอร์มินัลทางเข้าไปยังเทอร์มินัลทางออกของสายเรียกว่า The Incident Wave

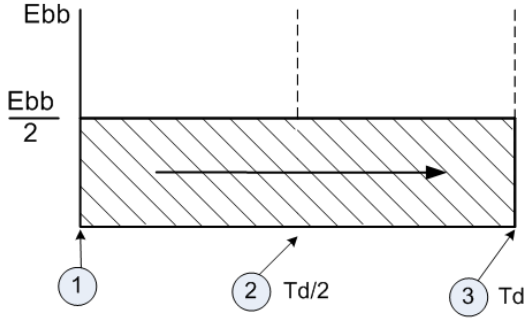
ขณะเมื่อสายประจุเท่ากับ $Ebb/2$ กระแสไฟประจุจะไหลผ่าน L_1 และ C_1 เวลาชั่วขณะ C2 จะประจุเท่ากับ 50 V. สนำมแม่เหล็กรอบ L_2 จะยุบตัวเพิ่มประจุให้กับ C_2 เท่ากับ Ebb หรือ 100 V. ณ เวลาชั่วขณะนี้โวลท์เตจที่จุด (3) จะวัดได้ 100 V. นี่คือการเริ่มต้นของรีเฟลคเต็ดเวฟ (Reflected Wave) สายปลายเปิดขณะนี้ทำหน้าที่เหมือนต้นกำเนิด 100 V. และรีเฟลคเต็ดเวฟจะเดินทางไปยังเทอร์มินัลทางเข้า เพิ่มประจุบสายจาก 50 V. เป็น 100 V. หลังจาก 3 ไมโครเวกัลป์ จะวัดที่จุด (1) ได้ 50 V. ขณะเมื่อวัดจุด (2) ได้ 100 V. และจุด (3) ได้ 100 V. ภาพที่ 5-4 d หลังจาก 4 ไมโครเซกัลป์จะวัดได้ที่จุด(1), (2) และ (3) ได้เท่ากับ 100V. และสายจะประจุเต็มเท่ากับ Ebb เวลารวมทั้งหมดที่ต้องการประจุให้สายเท่ากับ Ebb จะเป็นสองเท่าของการเดินทางเที่ยวเดียว หรือ 2 Td ประจุ ในสายปลายเปิดและมีโวลท์เตจสูงสุดเท่ากับ Ebb และกระแสไฟเท่ากับศูนย์



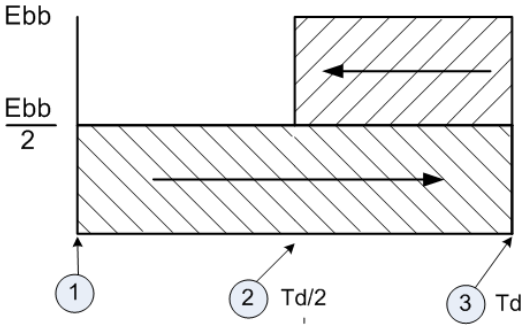
(a.)



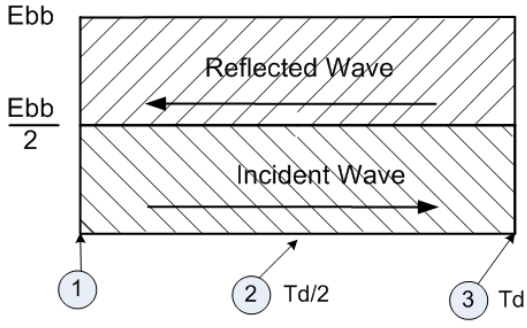
(b.) E line at 1μSec.



(c.) E line at 2μSec.

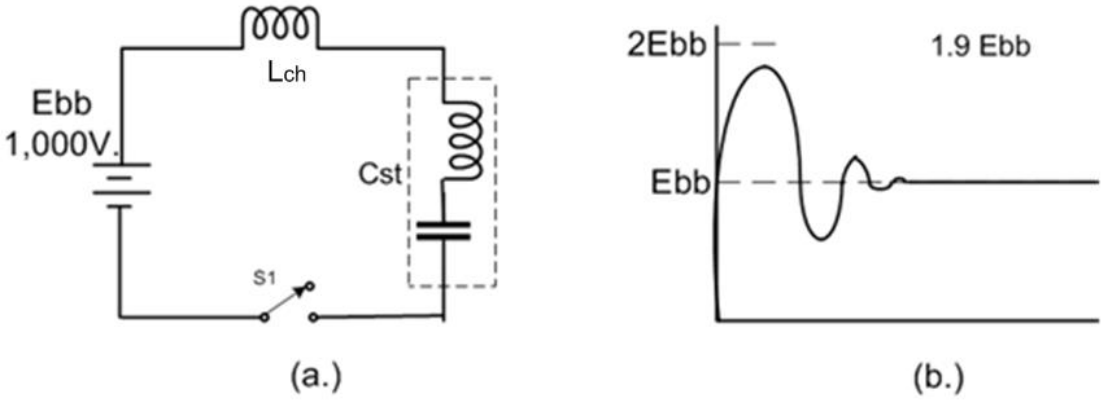


(d.) E line at 3μSec.

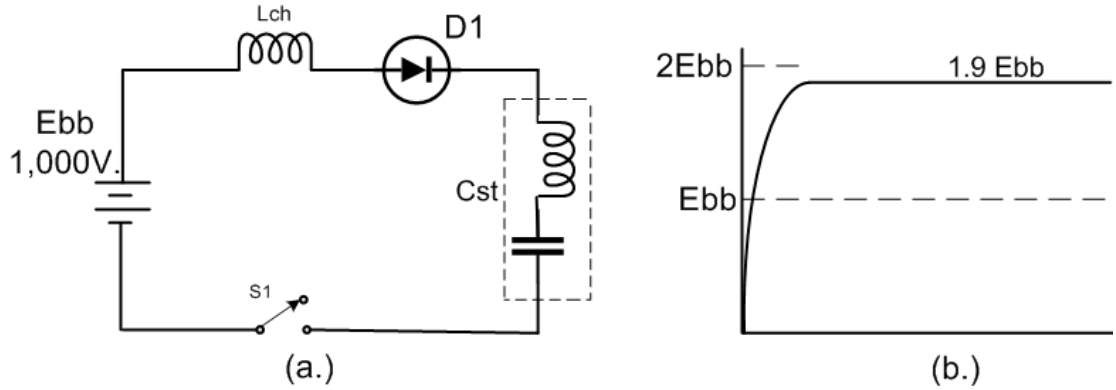


(b.) E line at 4μSec.

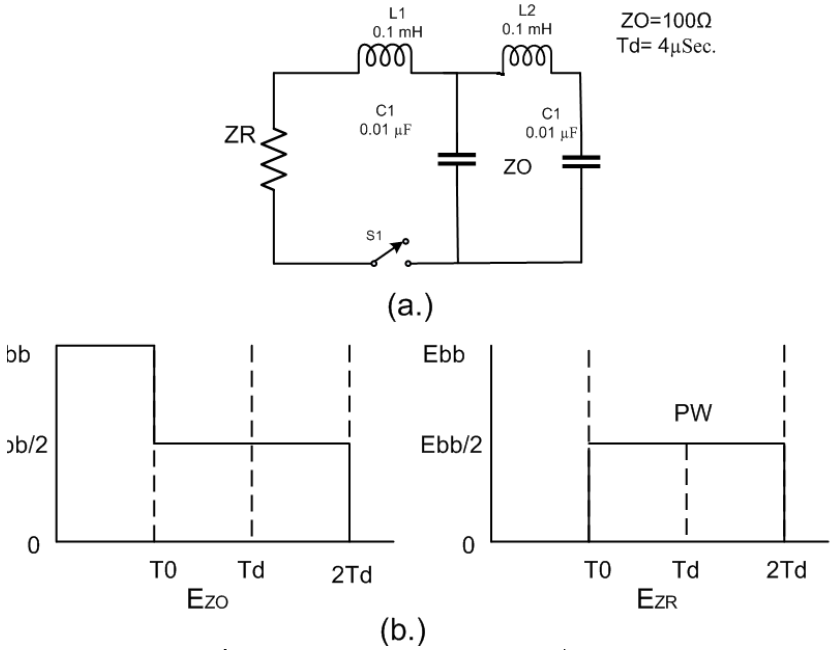
ภาพที่ 5-4 วงจรการประจุไฟกระแสตรงสำหรับสำหรับสายส่งเปิดปลาย



ภาพที่ 5-5 วงจรการประจุกระแสไฟตรงเรโซแนนท์



ภาพที่ 5-6 การประจุกระแสไฟตรงเรโซแนนท์ด้วยไดโอด



ภาพที่ 5-7 การคายประจุของสายเมื่อ $Z_0 = Z_R$

มันมีความจำเป็นที่ Z_0 และ Rch จะต้องเท่ากัน ถ้าสายประเต็มหลังจากหนึ่งอินซิเด้นท์และ รีเฟลคเต็ดเวฟ ถ้า Rch มากกว่า Z_0 โวลเตจที่ประยุกต์ให้กับสายจะน้อยกว่า $Ebb/2$ และจะต้องการ อินซิเด้นท์และ รีเฟลคเต็ดเวฟ จำนวนมากเอจะประจุสายให้ได้เท่ากับ Ebb ถ้า Rch น้อยกว่าค่าของ Z_0 โวลเตจที่ประยุกให้กับสายจะมากกว่า $Ebb/2$ และสายจะออสซิเลทเหนือและล่วงของค่า $Ebb/2$ ก่อนที่จะประจะจุให้ได้เท่ากับค่า Ebb

สายลัดปลายจะประจุในลักษณะอย่างเดียวกับกันเหมือนในภาพที่ 5-7 ในสายลัดปลายอินซิเด้นท์ และ รีเฟลคเต็ดเวฟ จะเป็นคลื่นกระแสไฟแทนที่จุเป็นคลื่นโวลเตจ เมื่อสายลัดปลายประจุเต็มแล้ว กระแสจะสูงสุดและโวลเตจต่ำสุด

2.1.6.2 การประจุดีซีเรโซแนนท์

วิธีการอย่างอื่นของการประจุสายส่งจำลอง ได้แสดงดังภาพที่ 5-5a ในวงจรนี้สายส่งจำลองจะใช้เพื่อสะสมประจุ และตั้งชื่อว่า Cst กระแสไฟประไหลผ่านอินดัคเตอร์อนุกรม Lch อินดัคแตนซ์ของ Lch จะต้องมากกว่าอินดัคแตนซ์ที่ปรากฏใน Cst

เมื่อ S_1 ถูกปิด Cst จะเริ่มต้นประจุให้ได้เท่ากับ Ebb กระแสไฟประจุของ Cst ไหลผ่าน Lch ผลิตสนำมแม่เหล็ก เมื่อ Cst ถูกประจุเท่ากับ Ebb สนำมรอบ ๆ Lch ยุบตัว และเพิ่มประจุบน Cst ให้ได้ประมาณ 1.9 Ebb ดังภาพที่ 5-5b ณ จุดนี้สนำมรอบ ๆ Lch ได้ยุบตัวหมดแล้ว และ Cst จะคายประจุผ่านต้อนกำเนิด เมื่อ Cst และ Lch ประกอบเป็นเรโซแนนท์อนุกรม โวลเตจที่ตกคร่อม Cst จะเป็นรูปของไซน์เวฟซุด (Damped Sine Wave) โดย Ebb จะเป็นระดับอ้างอิงความถี่ของการออสซิเลทจะเกิดขึ้นกับค่าของ Lch และ Cst เวลาของการซุด (Damping Time) จุขึ้นอยู่กับการสูญเสีย I^2R ของวงจร ประโยชน์ของวิธีการประจุสายต่างๆในขนาดประจุของ Cst ปรากฏใน T_1 ใน ภาพที่ 5-5b ถ้า ณ เวลาชั่วขณะนี่ Cst Cst ถูกปลดออกทางผ่านประจุและต่อเข้ากับโหลด มันสามารถจะแจกจ่ายโวลเตจซึ่งมากกว่า Ebb ถึง 95 % ระบบนี้ต้องการเวลาที่แน่นอนมาก ถ้า S_1 ถูกเปิดโดยอัตโนมัติ T_1 Cst จะได้รับประจุเท่ากับ 1.9 Ebb

ในภาพที่ 5-6a สวิทซ์ถูกแทนที่โดยไดโอด D_1 Cst ประจุผ่าน D และ Lch เมื่อ Cst ถูกประจุให้เท่ากับ Ebb สนำมรอบๆ Lch ยุบตัวประจุ Cst ให้ได้ประมาณ 1.8 Ebb ประจุบน Cst จะน้อยกว่าประจุที่ได้ในภาพที่ 5-6b เนื่องจากโวลเตจตกคร่อม D_1 Cst จะไม่สามารถคายประจุเนื่องจากไดโอด D1 และขณะนี้จะรับประจุ 1.8 Ebb จนกระทั่งจะได้รับทางคายประจุ

2.1.6.3 การคายประจุของสายปลายเปิด

จากภาพที่ 5-7a แสดงรูปร่างของเคลื่อนที่ผลิต เมื่อสายส่งเทียบคายประจุให้กับโหลดซึ่งมีอิมพีแดนท์ Z_R เหมาะส่วนกับแคแรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ Z_0 ของสาย สมมุติให้สาย Z_0 ได้รับประจุโวลเตจ ค่า Ebb แล้ว และ S_1 เปิดวงจร ณ เวลานี้โวลท์เตจทางสายเท่ากับ Ebb และโวลท์เตจโหลดเท่ากับศูนย์ S_1 ถูกปิดวงจร ณ เวลา T_0 ภาพที่ 5-7b ณ เวลาชั่วขณะนี้โวลท์เตจ ทางสาย E_{ZO} จะตกลงเท่ากับ $Ebb/2$และโวลท์เตจโหลด (E_{ZR})จะสูงขึ้นเท่ากับ $Ebb/2$ การเปลี่ยนแปลงนี้เท่ากันเพราะว่า Z_0 เท่ากับ Z_R การคายประจุตามลำดับของสายคล้ายคลึงกับการประจุตามลำดับ อินซิเด้นท์เวฟที่ประกฎจากเวลา T_0 ถึง T_d เป็นการคายประจุของสายครึ่งหนึ่ง รีเฟลคเต็จเวฟที่ปรากฏจาเวลา T_d ถึง $2T_d$ เป็นคายประจุที่สมบูรณ์ของสาย เมื่อ Z_R เท่ากับ Z_0 โวลท์เตจเอ๊าท์พุท (E_{ZR})จะเป็นพัลส์ที่มีแอมปลิจูดเท่ากับ $Ebb/2$และพัลส์วิดซ์ (PW) เท่ากับ $2T_d$

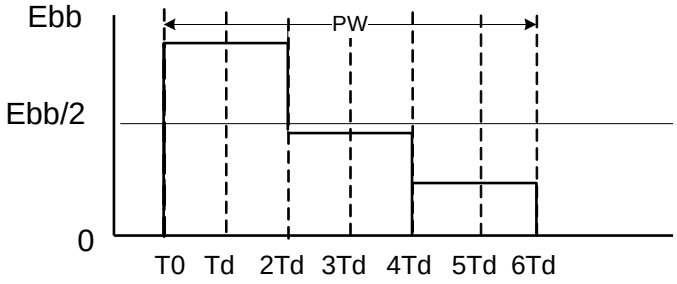
เมื่อโหลดอิมพีแดนซ์มากกว่าไลน์อิมพีแดนซ์จะปรากฏอินซิเด้นท์และรีเฟลคเต็จเวฟจำนวนมากก่อนที่สายจะคายปรุจุสมบูรณ์ พัลส์ที่ปรากฏคร่อมโหลดอิมพีแดนซ์ แสดงในภาพที่ 5-8

ข้อสังเกต

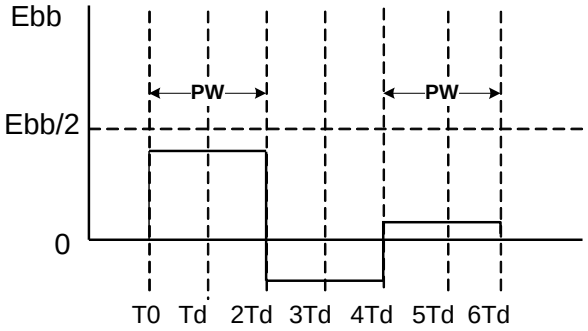
พัลส์วิดธ์ จะมากกว่าเวลาปกติ $2T_d$

เมื่อโหลดอิมพีแด้นซ์น้อยกว่าไลน์อิมพีแด้นซ์ โวลท์เตจจะน้อยกว่าโวลท์เตจทางสาย และหลังจากเวลาคายประจุของ $2T$ สายจะประจุอีกครั้งในขั่วตรงข้าม พัลส์ทางออกผลลัพธ์แสดงใน ภาพที่ 5-9 ข้อควรจำอีกครั้งเวลาการคายประจุรวมมากกว่า $2T_d$

สายส่งจำลองมีใช้มากมายในเครื่องรับและเครื่องส่งเรดาร์ ในเครื่องรับเรดาร์ใช้เพื่อจ่ายการควบคุมไทม์ดีเลย์ สำหรับทริกเกอร์และสัญญาณวิดีโอ ในเครื่องส่งเรดาร์ใช้เป็นพัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ทเวริค (PFN) เพื่อสะสมและปล่อยพลังงานโวลท์เตจสูง ในรูปของพัลส์ไปยังแมกนีตรอน (ทานสมิทเตอร์มาสเตอร์ออสซิลเลเตอร์เพาเวอร์แอมปลิไฟร์)



ภาพที่ 5-8 กำลังดันห้วงเมื่อ $Z_R > Z_O$



ภาพที่ 5-9 กำลังดันห้วงเมื่อ $Z_R < Z_O$

2.1.7 สวิทช์ชิ่งดีไวซ์ (Switching Devices)

หลังจากพัลส์ทานฟอร์มมิ่งเนเวิรคได้รับการประจุแล้ว ต้องใช้วิธีบางอย่างเพื่อให้พัลส์ฟอร์มมิ่งเนทเวิรคคายประจุไหลผ่านโหลด สวิทช์จะต้องมีความสามารถที่จะจัดการกับพัลส์ที่มีความถี่ทวนซ้ำสูง (PRF) และให้กระแสไหลผ่านซึ่งอาจจะเกิน 100 แอมแปร์ สวิทช์ยังจะต้องแจกจ่ายการควบคุมเวลาปิดและเปิดด้วยความถูกต้องอีกด้วย

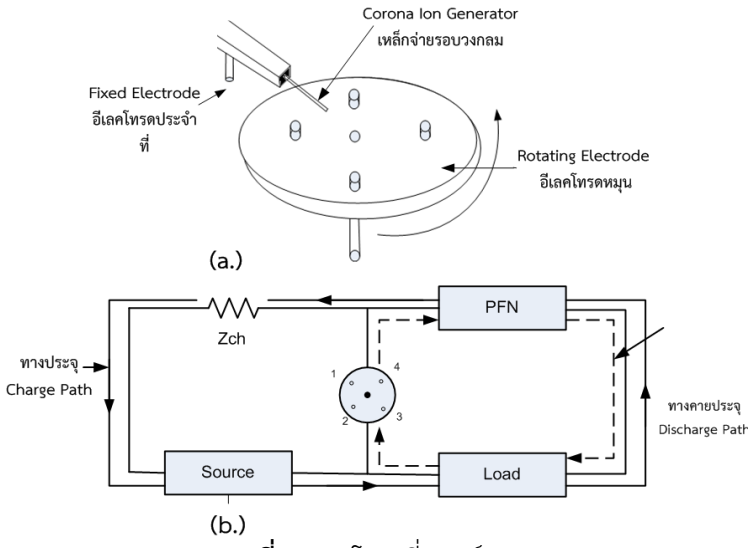
วิธีการอย่างของสวิทช์ชิ่งแสดงในภาพที่ 5-10a การอาร์คครั้งหนึ่งจะถูกผลิตขึ้นเมื่ออิเล็คโทรด หมุนผ่านเข้าไปใกล้อีเล็คโทรดประจำที่แต่ละครั้ง จำนวนของอิเล็คโทรดหมุนและความเร็วของการหมุนจะเป็นตัวกำหนดจำนวนการอาร์คต่อวินาทีในชั่วขณะถ้าความเร็วของการหมุนเป็น 6,000 รอบต่อนาที (600 รอบต่อนาที) และจำนวนของอิเล็คโทรดเป็น 4 สวิทช์จะเปิดและปิด 400 ครั้งต่อวินาที

วงจรมอทดูเลเตอร์ที่ใช้โรตารี่สปาร์คแก็บสวิทช์ แสดงในภาพที่ 5-10b. พัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์คประจุเท่ากับต้นกำเนิดโวลท์เตจ เมื่ออิเล็คโทรดประจำที่อยู่ระหว่างอิเล็คโทรดหมุน 1 และ 2 พัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์คคายประจุผ่านโหลดเมื่อมีอาร์ค ระหว่างอิเล็คโทรดประจำที่ และอิเล็คโทรด หมุนหมายเลข 2 ไซเกิลจะรักษาการทบทวนระหว่างแต่ละเซทของอิเล็คโทรดหมุน โรตารีสปาร์คแก็ป ไม่ค่อยใช้งาน เพราะมีอายุสั้นและเวลาการไฟร์อิ่งไม่แน่นอน เวลาไฟร์อิ่งอาจจะแปลผันได้เพราะการผุกร่อนของอิเล็คโทรด อุณหภูมิของอากาศ ความกดอากาศและความชื้น

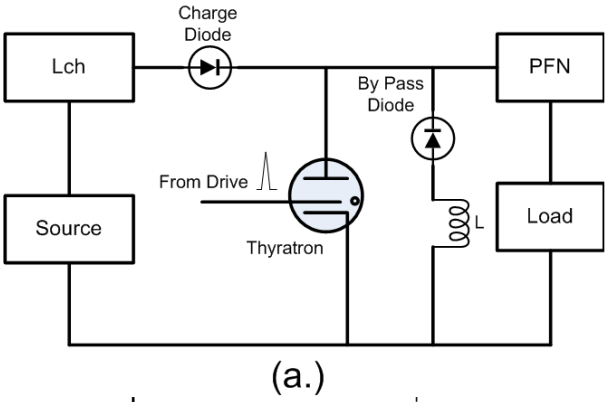
วิธีการสวิทช์ชิ่งที่ดีแสดงว่าในภาพที่ 5-11 ในกรณีนี้หลอดไฮโดรเยนไธราทรอน ถูกใช้เป็นสวิทช์ ชิ่งดีไวซ์ ระหว่าง T_1 ดังภาพที่ 5-12 หลอดไธราทรอนไม่คอนดัคท์ และ พัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์ค (ไลน์) จะประจุโดยผ่าน L_{ch} และไดโอด พัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ทเวริค จะประจุประมาณ 1.8 ของต้นกำเนิดโวลท์เตจ ณ จุดเริ่มต้นของ T_2 ทริกเกอร์พัลส์ซึ่งร่วมกับมาสเตอร์ไทเมอร์ ทริกเกอร์จะถูกประยุกต์เข้าไปที่ กริดของหลอดไธราทรอน หลอดไธราทอนจะถูกขับให้คอนดัคท์ ทำให้สายคายประจุไปยังโหลด เมื่อไลน์อิมพิแดนซ์ Z_0 ของสายใกล้ที่จะเหมาะส่วนกับโหลดอิมพิแดนซ์ Z_R ครึ่งหนึ่งของไลน์ โวลท์เตจจะตกคร่อมโหลด

ณ จุดสุดท้ายของ T_2 ตามปกติจะกำหนดให้โหลดอิมพิแดนซ์ Z_R มีค่ามากกว่าอิมพิแดนซ์ Z_0 เล็กน้อยมีผลทำการคายประของ PFN เร็วกว่าปกติเล็กน้อยและกำลังตกคร่อม PFN จะเป็นขั้วตรงข้ามเป็นลบทำให้หลอดไธราทรอนจะดีไอออไนซ์ จากนั้นไลน์โวลท์เตจจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่า 1.8 Ebb จะเริ่มรอรับสัญญาณ ทริกเกอร์ใหม่อีกครั้ง ความกว้างของพัลส์ปรากฏว่าคร่อมโหลดถูกกำหนดโดยดีเลย์ไทม์ สองเซกชั่นของสาย

ถ้ามีอิมพิแดนซ์ไม่เหมาะส่วนเล็กน้อย $Z_R < Z_0$ ระหว่างพัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์ค และโหลดสายจะประจุใหม่อีกครั้งอย่างน้อย ๆ ในทิศทางตรงกันข้าม ดังภาพที่ 5-9 ประจุตรงกันข้ามนี้จะเพิ่มกระแสที่ไหลผ่าน L_{ch} เป็นเหตุให้พัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์คโวลท์เตจเพิ่มขึ้นระหว่างไซเกิลประจุปกติ พัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์คค โวลท์เตจ จะรักษาการเพิ่มขึ้นระหว่างแต่ละไซเกิลจนกระทั่งเบรกดาวน์ของโหลดหรือการไธราทรอน

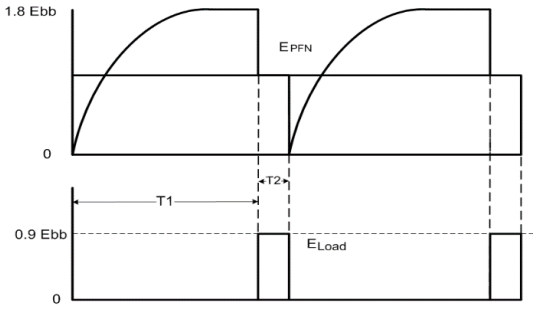


ภาพที่ 5-10 โรตารี่สปาร์คแกป



(a.)

ภาพที่ 5-11 วงจรมอทดูแตอร์ที่ใช้ไธราทรอนสวิทซ์



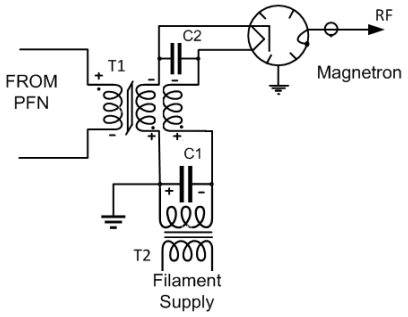
(b.)

ภาพที่ 5-12 สายและกำลังดันโหลดสำหรับการทำงานสองไซเกิล

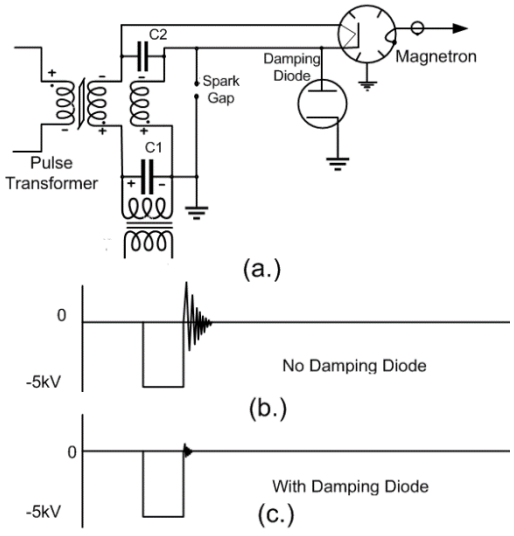
บายพาสไดโอดและอินดัคเตอร์ L ต่ออยู่ในแบบขนานกับหลอดไธราทรอน เพื่อป้องกันการประจุกลับทางของสายบายพาสไดโอดจะคอนดัคท์แจกจ่ายทางของการค่ายประจุผ่านอินดัคเตอร์ กระแสไฟคายประจุจะผลิตสนำมแม่เหล็กรอบ L_1 เมื่อมีกระแสไฟคายประจุหยุดลงสนามรอบ ๆ L_1 จะยุบตัว เป็นเหตุให้เกิดการประจุที่มีขั้วถูกต้องเล็กน้อยในพัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ทเวริค

2.18 พัลส์ ทรานสฟอร์เมอร์ (Pulse Transformer)

โหลดต่ออยู่กับไลน์ หรือ สโตเรจ จะประยุกต์กับพัลส์ทรานสฟอร์เมอร์ หรือ แมกนีทรอน (มาสเตอร์ ออสซิลเลเตอร์ เพาเวอร์ แอมปลิไฟร์) พัลส์ทรานสฟอร์เมอร์ใช้เพื่อ สเตฟ ไฮท์ โวลเตจพัลส์จากพัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์ค และแจกจ่ายอิมพีแดนซ์ แมชชิ่ง ระหว่างแมกนีทรอน และไลน์พัลส์ฟอร์มิ่ง ทรานสฟอร์เมอร์ ต้องออกแบบอย่างวิกฤต เพราะส่วนประกอบความถี่สูงในพัลส์ทางออก โดยที่ แกนประกอบด้วยวัสดุแผ่นบาง ๆ ที่มีการเป็นแม่เหล็กต่ำโดยปกติใช้ ซิลิกอนสตีล การคัปปลิ้งที่ใกล้กันระหว่างขดไพรมารี่และเซคกันดารี่จะลดทอนการรั่วไหลของอินดัคแตนซ์ เพื่อให้ได้ขอบหน้าของพัลส์ทางเข้าชัน แคแปซิแตนซ์ของขดลวดภายในต่ำ เป็นข้อกำหนดเพื่อป้องกันการออสซิลเลทความถี่สูง การคัปปลิ้งที่ชิดกันที่ได้รับระหว่างขดไพรมารี่และเซคกันดารี่ กระทำได้โดยพันไพรมารี่ทับลงบน เซคกันดารี่ และโดยการใช้ขาของแกนอันเดียวกันทั้งสองขด ขดเซคกันดารี่ตามปกติจะพับแบบ ไพรมารี่ (Bifilar) หมายถึง 2 ไบฟิลลาร์เซคกันดารี่ แสดงในภาพที่ 5-13 ขดเซคกันดารี่ทำขึ้นด้วยคอนดัคเตอร์หุ้มฉนวน 2 เส้น พันเคียงกันจนกระทั้งได้รับโวลเตจอย่างเดียวกัน เหนี่ยวนำในแต่ละขดไบฟิลลาร์ไวน์ดิ้งทำหน้าที่เหมือนขดเซคกันดารี่ 2 ขด ไบฟิลลาร์ไวน์ดิ้งปราศจากผลสำแดงต่อวงจรไฟจุดไส้



ภาพที่ 5-13 ไบฟิลาร์ เซกัลป์ดารี



ภาพที่ 5-14 อุปกรณ์ป้องกันซึ่งกับหลอดแมกนีตรอน

2.19 อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device)

สถานะของโวลเตจเกินกำหนดมีโอกาสเกิดขึ้นในพัลส์ฟอร์มมิ่งเน็ตเวิร์ค ได้ สายจะประจุโวลเตจสูง กว่าปกติ และพัลส์ที่เป็นลบสูงเกินกำหนดจะถูกประยุกต์ไปยังหลอดแมกนีทรอนการเกิดโวลเตจเกิน กำหนดบ่อยครั้ง อาจจะทำให้เกิดการอาร์ค และทำความเสียหายให้หลอดแมกนีทรอน จึงใช้สปาร์ทแก็ป (Spark Gap) ต่อคร่อมพัลส์ทรานสฟอร์เมอร์ทางด้านเซคกันดารี่เพื่อป้องกันพัลส์ดวลเตจที่สูงเกิน กำหนดประยุกต์ไปยังหลอดแมกนีทรอนดังภาพที่ 5-14 ความกว้างของแก็ปตามปกติจะปรับแต่งให้ได้ค่าของโวลเตจที่กำหนด ซึ่งจะเกิดการอาร์คเมื่อโวลเตจเกินกำหนด

แคปซิแตนซ์สะพัด และอินดัคแตนซ์ที่รั่วไหลในวงจร พัลส์ทรานสฟอร์เมอร์เซคกันดารี่จะผลิตการออสซิเลทอนุกรม (Serial) หลังจากได้ประยุกต์เมนพัลส์ไปแล้วดังภาพที่ 5-14b ส่วนลบของรูปคลื่นนี้จะผลิตเอ๊าทพุทปลอมจากหลอดแมกนีทรอน ซึ่งสามารถจะลบล้างระยะทางของเป้าใกล้ ๆ การออสซิเลทนี้จะไม่ผลิตระหว่างพัลส์ เนื่องจากการแจกจ่ายชั้นท์อิมพิแดนซ์ต่ำเนื่องจากการคอนดัคท์ของหลอดแมกนีทรอน แดมปิ้ง ไดโอด (Damping Diode) ถูกต่อขนานกับหลอแมกนีทรอนเพื่อลดทอนผลสำแดงของการออสซิเลทเหล่านี้ เมื่อเมนพัลส์ลบถูกประยุกต์ไปยังคาโทดของหลอดแมกนีทรอนแดมปิ้ง ไดโอดไม่คอนดัคท์ แดมปิ้งไดโอดจะคอนดัคท์ระหว่างช่วงบวกของการออสซิเลท ภาพที่ 5-14c ขนาน (Shunt) หลอดแมกนีทรอนด้วยอิมพีแดนซ์ต่ำเป็นเหตุให้การออสซิเลททรุดลงอย่างเร็วมาก

3. เครื่องส่งแบบ MOSFET Switch Modulator

เครื่องส่งแบบ MOSFET Switch Modulator มีการใช้งานในเรดาร์เดินเรือในปัจจุบันที่มีขนาดกำลังส่งไม่เกิน 25 KW หรือ 30 KW. เนื่องจากยังใช้กำลังดันไฟไม่สูงมากและอุปกรณ์ MOSFET ยังมีข้อจำกัดเรื่องกระแสและกำลังดันสูงสุดที่สามารถทำได้

3.1 เครื่องส่งแบบ MOSFET Switch Modulator มีส่วนประกอบดังนี้

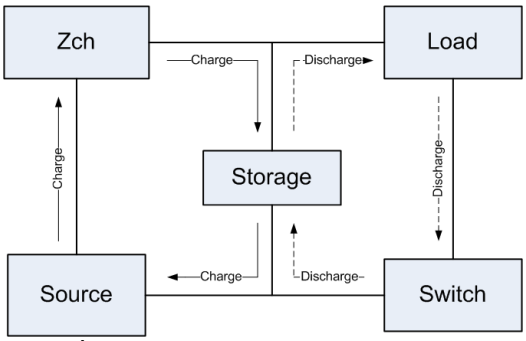
3.1.1 Source ทำหน้าที่ จ่ายไฟสูงให้กับชิ้นส่วนเก็บไฟใน Modulator

3.1.2 Zch ทำหน้าที่เป็น Charge Impedance รวมในทางผ่านประจุใยงานเก็บไฟ

3.1.3 Switch ได้แก่ MOSFET ทำหน้าที่สวิทช์คายประจุ ใยงานเก็บไฟการจะคายประจุนานเท่าไรขึ้นอยู่กับการให้ MOSFET ทำงานตามความกว้างของพัลส์วิด

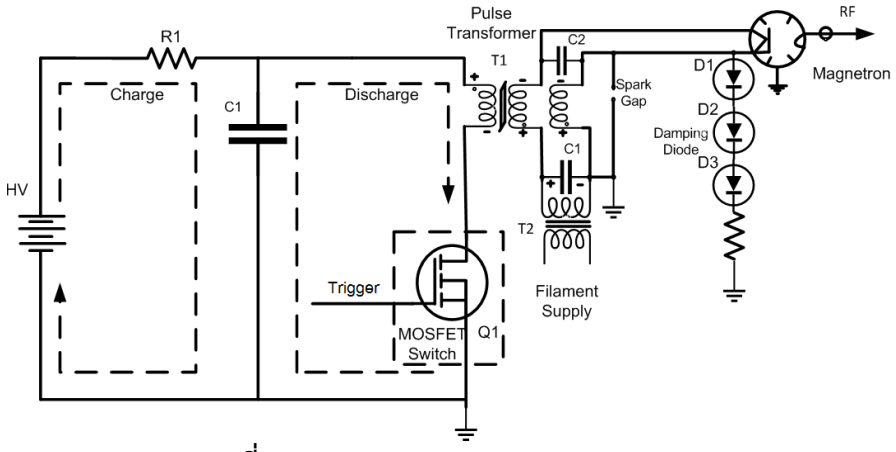
3.1.4 Storage ทำหน้าที่เก็บไฟสูงเพื่อเพื่อจ่ายให้กับโหลดในการทำงาน Storage ไม่ได้เป็นตัวกำหนดพัลส์วิดท์ (PW) ความกว้างของพัลซ์วิดท์ขึ้นอยู่กับเวลาการคายประจุ

3.1.5 Load ได้แก่ ขด Primary ของ Pulse Transformer ซึ่งจะทำการส่งต่อกำลังให้กับหลอดแมกนีตรอนผ่านทางขด Secondary



ภาพที่ 5-15 MOSFET Switch Modulator

จากภาพที่ 5-15 สามารถอธิบายได้ว่า ในการทำงานแหล่งกำเนิด (Source) จะประจุกำลังงานไว้ที่ Storage ผ่าน Charge Impedance เมื่อประจุเต็มแล้ว MOSFET ซึ่งทำหน้าที่ สวิทช์จะได้รับทริกเกอร์ให้มันทำงานปิดวงจร (Conduct) กำลังงานและคายประจุกำลังงานที่ประจุไว้ใน Storage ผ่านโหลดค่าความกว้างพัลส์วิดขึ้นอยู่กับเวลา Conduct ของสวิทช์ จากภาพที่ 5-16 กำลังดัน Ebb ประจุ $C1$ ผ่าน Zch $(R1)$ เมื่อ $C1$ประจุเต็มสวิทช์ $S1$ จะปิดวงจรคายประจุ ผ่านขดไพมารี่ของทรานฟอร์เมอร์ T1 และคับปลิ่งผ่านขเซกัลดารีให้กับหลอดแมกนีตรอน



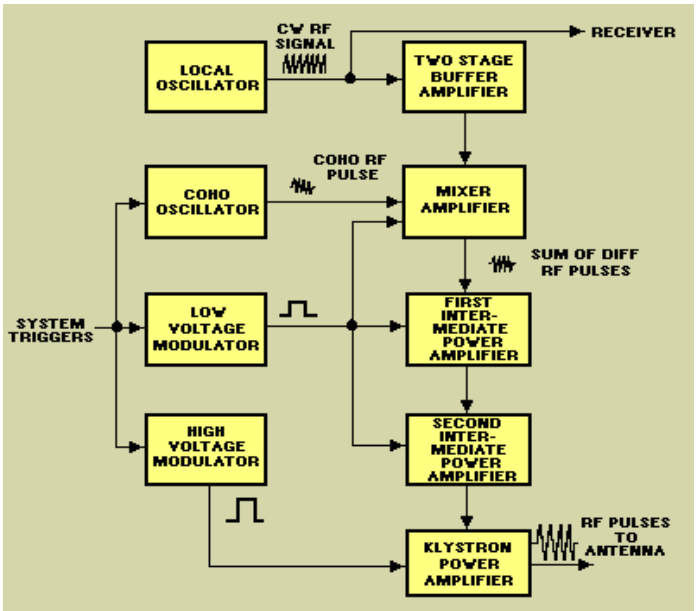
ภาพที่ 5-16 MOSFET Switch Modulator Diagram

จากภาพที่ 5-16 สามารถอธิบายได้ว่า แสดงตัวอย่างของวงจร MOSFET Switch Modulator โดยมี $C1$ ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุกำลังงาน (Storage) กำลังดัน HV จะประจุกำลังดันผ่าน $R1$ ให้กับ $C1$หลังจากประจุเต็มแล้ว MOSFET Q1 จะได้รับทริกเกอร์ทำให้มันคอนดัก (Conduct) เป็นสวิทช์ปิดวงจรคายประจุ $C1$ ผ่านขดไพมารี่ของ Pulse Transformer $T1$ คับปลิ่งกำลังดันไฟสูงผ่านทางขดเวกัลดารี่ให้กับหลอดแมกนีตรอน ระยะเวลาการคายประจุของ $C1$ เท่ากับเวลาที่ MOSFET คอนดักหรือเท่ากับความกว้างของพัลส์วิด กำลังดันที่ออกจาก Pulse Transformer จะเป็นพัลส์ลบจ่ายเข้าที่คาร์โทดของหลอดแมกนีตรอนและครบรอบลงกลาวด์ที่ตัวหลอด transformer $T2$ ทำหน้าที่

จ่ายไฟจุดไส้ให้กับหลอดแมกนีตรอนผ่านขดไบฟิลลาร์ของพัลทรานฟอร์เมอร์ $C2$ และ $C3$ ช่วยลดกระแสรั่วไหลที่เกิดจาความต่างศักดิ์ในขดไบฟิลลาร์ Spark Gap ทำหน้าที่ป้องกันไฟเกินที่จะเป็นอันตรายต่อแมกนีตรอน ไดโอด D1-D3 ทำหน้าที่เป็นไดโอดแดมปิ้งป้องกับการเกิดของขดลวดในพัลซ์ทรานฟอร์เมอร์และลิมิตกระแสโดย $R2$

4. เครื่องส่งแบบ Master Oscillator Power Amplifier (MOPA)

ด้วยเหตุที่เครื่องส่งแบบที่ใช้หลอดแมกนีตรอนต้องการกำลังส่งสูงต้องใช้ไฟแรงสูงที่มีอันตรายจึงมีการพัฒนาให้เป็นแบบ Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) โดยมีหลักการทำงานเบื้องต้นคือ จะทำการผลิตอาร์เอฟพัลส์ที่ระดับต่ำ ๆ ก่อนแล้วค่อยทวีกำลังให้สูงขึ้นหลาย ๆ ทอดต่อ ๆ กัน (Chain Amplifier) ในเรดาร์แบบนี้จะมีพัลส์ที่กว้างมากกว่าแบบที่ใช้แมกนีตรอนเนื่องจากเวลาการตอบสนองขอบหน้าและหลังพัลส์ที่อาจต้องเสียไปในส่วนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณในแต่ละช่วง (Transit Time) จึงต้องทำให้กว้างไว้ซึ่งจะมีผลเรื่องการแยกเป้าทางระยะแต่ก็สามารถแก้ไขโดยใช้เทคนิค pulse Compression อย่างไรก็ตามเรดาร์แบบนี้สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ง่ายกว่าแบบแมกนีตรอนซึ่งมีความจำเป็นในเรดาร์ทางทหารที่ต้องการป้องกันการก่อกวนจากข้าศึกจึงเป็นทางเลือกที่ดี



ภาพที่ 5-17 การทำงานของ MOPA Transmitter

จากภาพที่ 5-17 แสดงตัวอย่างบล๊อคไดอะแกรมของ MOPA Transmitter

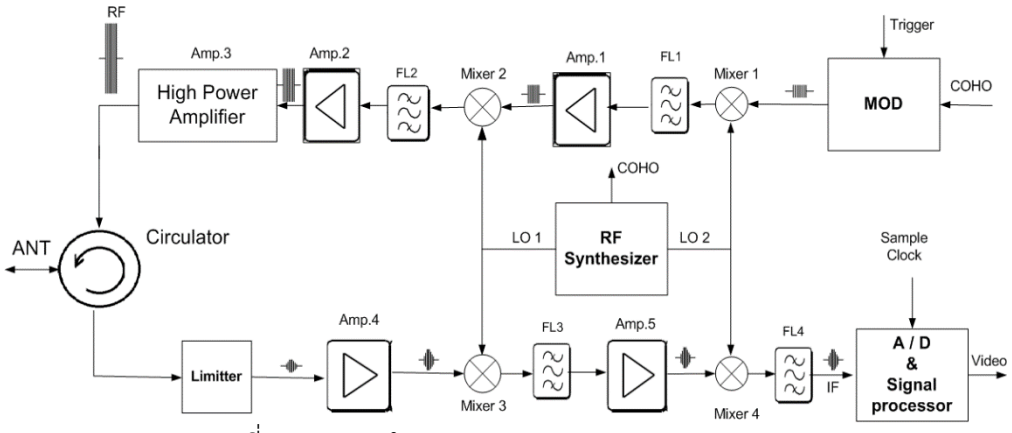
4.1 เครื่องส่งแบบ Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) มีส่วนประกอบดังนี้

4.1.1. Local oscillator มีหน้าที่สร้างสัญญาณ CW RF ซึ่งอาจสร้างขึ้นโดย Frequency Synthesizer ทำหน้าที่ผลิตความถี่หลักของเรดาร์ส่งให้กับภาคเครื่องส่งและภาคเครื่องรับของเรดาร์ COHO(Coherent Oscillator) เป็นตัวผลิตความถี่พื้นฐานสำหรับการเริ่มทำงานของเรดาร์ (ปกติเป็นความถี่เดียวกับ IF) เพื่อส่งให้กับ Modulator หรือ pulse Strength

4.1.2 Pulse Strength ทำหน้าที่รับสัญญาณ Trigger และความถี่ COHO เข้ามา และทำการ Modulate ออกเป็น COHO Pulse เช่น Chirp Pulse (มอทด้วยความถี่ FM : Frequency Modulate) หรือแบบเฟสโค้ด(Phase Code) ความกว้างของ Pulse ประมาณ 0.1- 120 μ Second การทำให้พัลส์กว้างจะทำให้มีผลต่อการแยกเป้าแต่จะสามารถแก้ไขโดยการใช้เทคนิคของ Pulse Compression ในภาคเครื่องรับที่บีบให้พัลส์ที่กว้างแคบลง หลังจากนั้นจะส่งต่อให้กับภาค Mixer เพื่อทำการผสมกับความถี่ Local oscillator ได้เป็นความถี่ใหม่เป็นความถี่ Local oscillator+ COHO ได้เป็น RF Pulse ที่เป็นความถี่ส่งของเรดาร์ จากนั้นจะส่งต่อให้กับแอมปลิไฟร์ (Amplifier) แบบต่าง ๆ ให้มีกำลังส่งสูงเท่าที่ต้องการ เช่น Solid State Amplifier, TWT(*Traveling-Wave Tube*, Power Klystron หรือ (CFA)Cross Field Amplifier

Up/down Convertor

ในระบบเรดาร์เราจำเป็นต้องเข้าใจพื้นฐานการทำงานของวงจรมิกเซอร์ (Mixer) โดยหลักการแล้วเมื่อเรานำความถี่สองความที่มาผสมกันที่มิกเซอร์จะความถี่ออกเป็นสี่ความถี่ได้ความถี่ดั้งเดิมสองความถี่และความถี่ผลบวกกับความถี่ผลต่าง การบวนการของการผสมความถี่แล้วนำความถี่ผลบวกไปใช้จะถูกเรียกอีออย่างหนึ่งว่า UP Convertor จะทำให้เกิดขึ้นในภาคเครื่องส่งและถ้าหากนำค่าผลต่างของความถี่ไปใช้จะถูกเรียกว่า Down Convertor ซึ่งการทำในภาคเครื่องรับ



ภาพที่ 5-18 การทำงานของ Frequency Synthesizer

จากภาพที่ 5-18 Frequency Synthesizer ผลิตความถี่ COHO และความถี่ Local 1,2 ความถี่ COHO จะถูกกระตุ้นด้วย Trigger และเป็นความถี่ Chirp Pulse หลังจากนั้นจะผสมกับความถี่ (Mixer) กับ Local 2 แล้วเลือกเอาความถี่ผลบวก (Up Convertor) โดย Filter (FL1) จากนั้นขยายสัญญาณให้สูงขึ้นด้วยแอมปลิไฟร์(Ampl.1)ส่งต่อให้กับ Mixer 2 ผสมกับความถี Local 2 (LO1) และเลือกความถี่ผลบวกด้วย FL2 เป็นความถี่ RF ส่งของเรดาร์แล้วทำการขยายให้มีกำลังสูงพอที่ต้องการส่งผ่าน Circulator (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในเรื่อง Duplexer) เพื่อส่งออกอากาศ ในการรับสัญญาณสัญญาณ RF ที่สะท้อนจากเป้ากลับเข้าทางสายอากาศ ผ่าน Circulator และLimiter แล้วทำการขยายสัญญาณให้สูงขึ้นด้วย Amp. 4 แล้วส่งให้กับ Mixer 3 (down Convert) ผสมกับความถี่ Local 1(LO1) ทำการเลือกความถี่ผลต่างโดย Filter3 (FL3) จากนั้นขยายสัญญาณให้สูงขึ้นเพื่อส่งต่อให้กับ Mixer 4 (Down Convertor) ผสมกับความถี่ Local 2(LO2และเลือกความถี่ผลต่างโดย Filter4 (FL4) ซึ่งจะได้เป็นความถี่ IF ของเรดาร์ซึ่งจะเป็นความถี่เดียวกับความถี่ COHO จากนั้นจะส่งให้กับภาค Signal Processor ทำการกำจัดสัญญาณอื่นๆออกให้เหลือแต่สัญญาณวิดีโอ ส่งให้กับจะภาพหรือส่วนอื่นต่อไป

ข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องส่ง HPO,MOPA

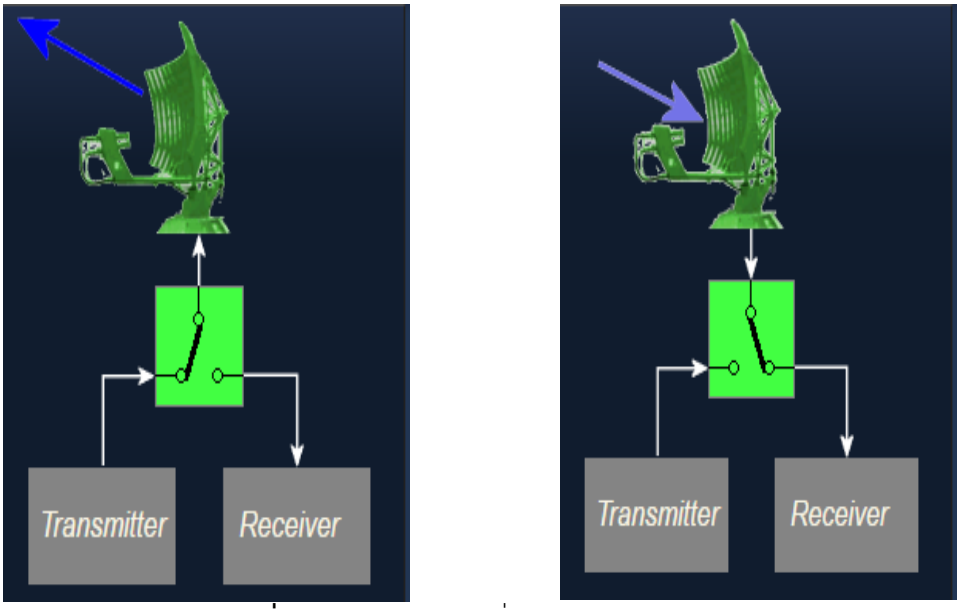
ตารางที่ 4-1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องส่ง HPO,MOPA

รายละเอียด	เครื่องส่ง HPO	เครื่องส่ง MOPA
ขนาดเครื่อง	เล็กกว่า	มากกว่า
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า
ความต้องการใช้แรงดัน	ต่ำกว่า	สูงกว่า
เสถียรภาพ	น้อยกว่า	มากกว่า
Phase coherence	น้อยกว่า	มากกว่า
ผลิตคลื่นที่ซับซ้อนได้ สำหรับการส่งแบบ Pulse Compression	ได้	ไม่ได้
ผลิตกำลังไฟฟ้า	ต่ำกว่า	สูงกว่า

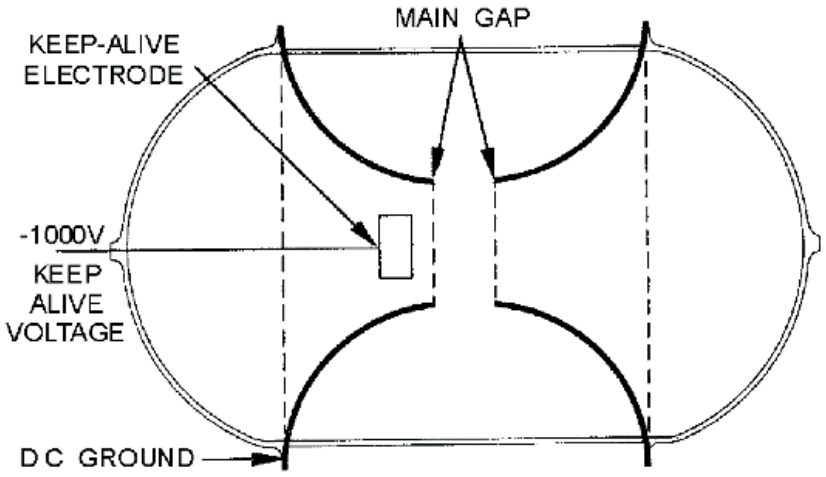
เรดาร์ Duplexer

ด้วยเหตุที่ระบบเรดาร์ทำการส่งชั่วขณะตลอดค่าความกว้างพัลส์วิท และหยุดเพื่อทำการรับ ดังนั้นจึงไม่จะเป็นต้องมีสายอากาศรับและส่งแยกออกจากกันแต่จะมี Duplexer เป็นสวิทซ์โดยทำการต่อเครื่องส่งไปยังสายอากาศขณะทำการส่งและทำการต่อสายอากาศไปยังเครื่องรับดังภาพที่ 5-19 ในระหว่างทำการส่งอาจมีกำลังงานบางส่วนกลับเข้ามาทำลายเครื่องรับจะมีอุปกรณ์ป้องกันเครื่องรับที่เรียกว่าหลอด TR (Transmit-receiver) ลักษณะของหลอด TR เป็นหลอดบรรจุแกส ภายในมี Keep Alive Voltage

ซึ่งไฟประมาณ -1000 โวลต์ ตามปกติในการรับสัญญาณอาร์เอฟระดับต่ำๆจะสามารถผ่านเข้ามาได้ หากมีระดับสูงจนอาจเป็นอันตรายต่อเครื่องรับหลอดจะเกิด Ionization ช็อตสัญญาณไม่ผ่านเข้าเครื่องรับได้ ในปัจจุบันมีการพัฒนาเป็น TR Limiter หรือ Diode limiter ซึ่งไม่ต้องมีไฟเลี้ยง Keep Alive Voltage ในช่วงเวลาการรับจะมีอุปกรณ์ป้องกันไม่ให้สัญญาณที่รับเข้ามาเข้าไปในเครื่องส่ง เพราะสัญญาณที่รับเข้ามาเป็นพลังงานที่อ่อน จะทำให้ถูกดูดกลืนหมด เรียกว่า ATR (ANTI-TRANSMIT –RECEIVER)



ภาพที่ 5-19 การทำหน้าที่ Duplexer ของเรดาร์



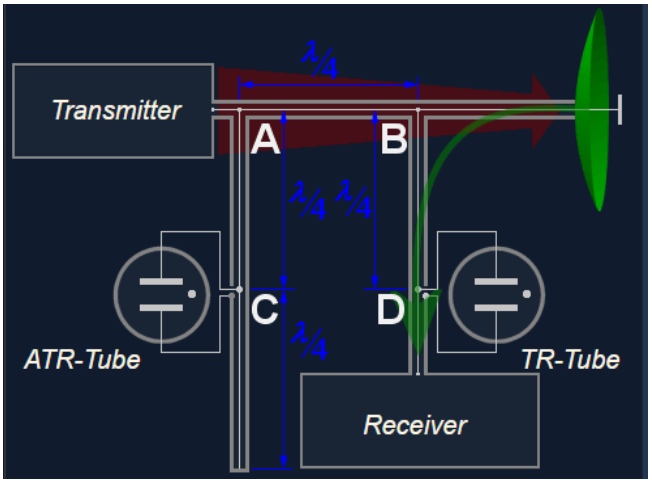
ภาพที่ 5-20 หลอด TR (Transmit-receiver)

ชนิดของ Duplexer

1. Branch Duplexer

Branch Duplexer ทำหน้าที่สลับต่อจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศขณะทำการส่ง และต่อสายอากาศไปยังเครื่องรับขณะทำการรับ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์จะเป็นสายแมทไลย์ ที่ลัดวงจรด้วย หลอดแก๊สหรือพินไดโอด ที่ทำงานย่านความถี่สูงเช่นอุปกรณ์ของเรดาร์

ในสายส่งที่ความถี่สูงหากปิดที่ปลายสายจะปรากฏค่ากำลังดันและความต้านทานมีค่าต่ำสุดส่วนกระแสมีค่าสูงสุด ที่จุด $\lambda/4$ กำลังดันและความต้านทานจะมีค่าสูงสุดส่วนกระแสมีค่าต่ำสุด โดยที่ค่าของกำลังดันและกระแสมีค่าตรงข้ามกันต่างเฟสกัน 90 องศา ในขณะที่ปลายเปิดกำลังดันและความต้านทานมีค่าสูงสุดส่วนกระแสมีค่าต่ำสุด ในที่จุด $\lambda/4$ กำลังดันและความต้านทานจะมีค่าต่ำสุดส่วนกระแสมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกับสายปลายปิด



ภาพที่ 5-21 duplexer with quarter-wave co-axial stubs using TR- and ATR- Tube

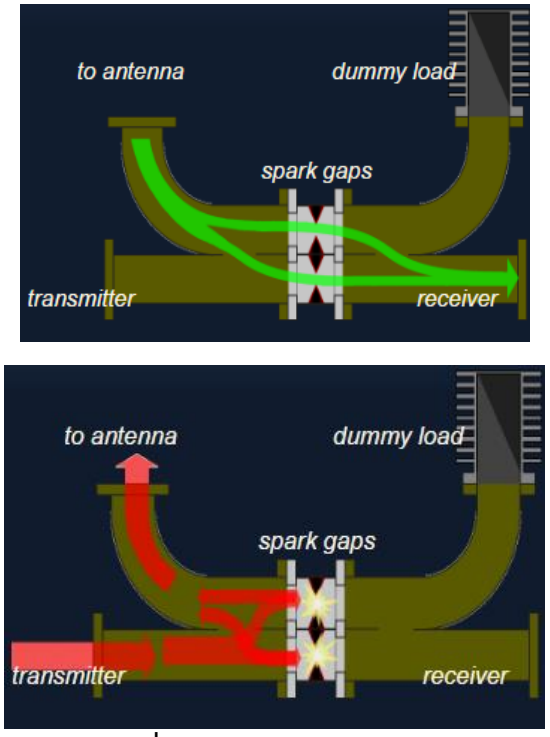
จากภาพที่ 5-21 แสดงตัวอย่างการทำงาน Duplexer ชนิดสายส่งเสี่ยวคลื่นที่ หลอด TR และ ATR ภาพที่ 5-21 สายความยาวครึ่งคลื่นปิดปลายหรือที่เรียกว่า Stub ถูกต่อขนานกับสายส่งโดยมีหลอด ATR วางไว้ตรงกลางหรือที่ $\lambda/4$ จากปลายปิด จาก Stub ชุดแรกห่างออกไป $\lambda/4$ จะเป็นสายต่อเข้าเครื่องรับโดยที่จุด $\lambda/4$ จะมีหลอด TR คั่นอยู่ ระหว่างที่ทำการส่งกำลังงานจากเครื่องส่งจำทำให้เกิด กานอาร์คที่หลอด ATR ที่จุด C และหลอด TR ที่จุด D ด้วยการอาร์คดังกล่าวทำให้เสมือน ช๊อตปลายที่ Stub $\lambda/4$ มีผลทำให้เสมือนการสะท้อนเปิดวงจรจากหลอด ATR ที่จุด A และหลอด TR ที่จุด B จะเป็นการเชื่อมต่อวงจรของสายส่ง กำลังงานทั้งหมดจะถูกส่งไปยังสายอากาศ เมื่อไม่ทำการส่งกำลังงานทั้งหมดสามารถจะผ่านสะท้อนยังปลายเปิดของ ATR Stub หรือเข้าไปยังเครื่องรับ

ข้อเสียของ Duplexer แบบนี้คือแบนด์วิดท์ที่แคบ (5% only) เนื่องจากเกิดค่า Stub จะเปลี่ยน เมื่อเปลี่ยนความถี่ กำลังงานที่ส่งได้มีข้อจำกัด การส่งต่อสัญญาณของเครื่องส่งและเครื่องรับมีค่าต่ำกว่าแบบอื่น ๆ

2. Balance Duplexer

การใช้ $\lambda/4$ (Stub) Duplexer มีปัญหาเรื่องแบนด์วิดท์ที่แคบเนื่องจากความถี่มีผลต่อความยาวของ Stub ในทางปฏิบัติเป็นไปไม่ได้ที่จะกำหนดให้ใช้เพียงความถี่ใดความถี่หนึ่งเพราะเนื่องจากอาจถูก Jammer จำเป็นต้องใช้แถบความถี่ที่กว้างกว่าจึงต้องใช้ Duplexer ที่สามารถทำงานที่แถบความถี่ที่กว่ากว่าด้วยเช่นการใช้ Balance Duplexer ดังภาพที่ 5-22 มีหลักการทำงานคือ จากทางเข้าของกำลังจากเครื่องส่งกำลังงานจะถูกแบ่งโดย –3dB hybride ออกเป็นสองส่วนเท่ากันกำลังงานส่วนแรกจะข้ามช่องของ hybride ออกไปมีเฟสเลื่อนออกไป 90 องศา ทั้งสองส่วนของกำลังงานจะเข้าไปทำให้ Spark gaps ทำงานปิดท่อเวฟไกด์กำลังงานทั้งหมดจะสะท้อนกลับ กำลังงานถูกแบ่งที่ –3dB hybride อีกครั้งในส่วนนี้จะผ่านช่อง hybride อีกครั้งและเลื่อนเฟสออกไป 90 องศา ท่ามกลางการกำหนดทิศทางของการส่งเกิดขึ้นทำให้เฟสถูกเลื่อนไป 180 องศาและส่วนของกำลังงานจะชดเชยซึ่งกันและกัน ทำให้กำลังงานทั้งสองส่วนจะมีเฟสเดียวกันและรวมกันในทิศทางเดียวกันไปยังสายอากาศด้วยกำลังงานทั้งหมด

ในระหว่างการรับระดับของกำลังงานจาก Echo ไม่แรงพอที่จะทำให้เกิดการอาร์คคร่อมที่ Spark Gaps ทั้งสองส่วนของสัญญาณจะผ่าน Spark Gaps เข้ามา สัญญาณ Echo จะเกิดขึ้นอีกครั้งที่ Hybride และจะรวมกันเป็นเฟสเดียวกัน กำลังงานจะสูญเสียใน Duplexer ประมาณ 0.5- 1.5 dB



ภาพที่ 5-22 Balance Duplexer

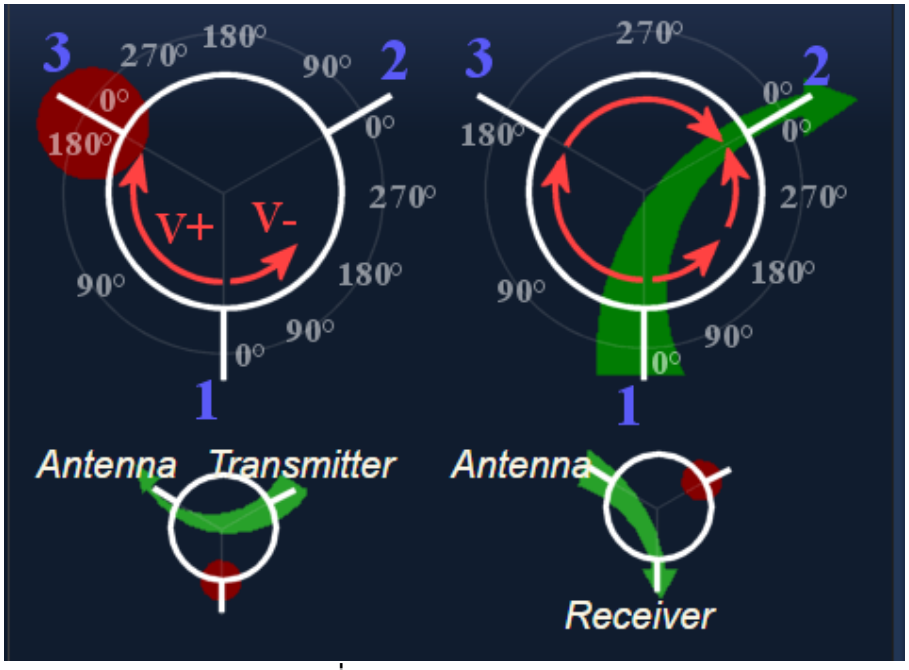
Ferrite Circulator

หลักการทำงานของ Ferrite Circulator คล้ายกับการทำงานของประตูหมุนที่มีทางเข้าสามทาง และกำหนดให้สามารถหมุนได้ทาง การหมุนนี้อาศัยการกระทำปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กของ Ferrite สัญญาณไมโครเวฟเข้าที่ช่องทางหนึ่งจะถูกอนุญาตให้หมุนไปออกในช่องถัดไป กำลังงานจากเครื่องส่งจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปออกในช่องของสายอากาศ Circulator ทั้งหมดถูกจะมีส่วนประกอบของ Ferrite ในการประยุกต์ใช้งานในเรดาร์

การทำงานที่ Ferrite Circulator ครั้งแรกกำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วนที่ทางเข้าที่ 1 แต่ความเร็วการเดินทางของคลื่นจะต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของ Ferrite ที่ช่องต่อที่ 3 ทั้งสองสัญญาณจะมีเฟสหรือขั้วตรงข้ามกันและหักล้างกันหมดไป ในช่องต่อที่ 2 สัญญาณจะมีเฟสเดียวกันและกลับมารวมกันเป็นสัญญาณเดิมอีกครั้ง

ด้วยโครงสร้างของ Ferrite Circulator ถูกกำหนดให้หมุนไปทิศทางเดียวด้วยการเลือกของช่องต่อ ถ้าเครื่องส่งถูกต่อกำลังงานจะไปออกที่ช่องต่อสายอากาศในขณะที่สัญญาณ Echo จะไปเข้าที่เครื่องรับ ในการใช้งานขณะทำการส่งอาจเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานจากสายอากาศกลับเข้ามาที่ Circulator และเข้าเครื่องรับที่มีความแรงจนทำให้เครื่องรับเสียหายได้จึงต้องมีหลอด TR หรือ Diode Limiter ป้องกันกำลังงานไม่ให้แรงเกินไปผ่านเข้าไปยังเครื่องรับได้

Ferrite Circulator สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันต่อต้านการเกิด Reflection ในกรณีที่ ช่องต่อที่ 3 ถูกปิดกำลังงานจะสะท้อนกลับมาออกที่ช่องที่ 2 และถูกดูดกลืนเป็นความร้อนด้วย Terminator ในขณะนี้เหมือนกับว่าสัญญาณจากช่องที่ 1 ผ่านไปยังช่องที่ 2



ภาพที่ 5-23 Ferrite Circulator

6 เครื่องรับเรดาร์
Radar Receiver

บทนำ

ในการทำงานของระบบเรดาร์เครื่องส่ง (Radar Transmitter) จะส่งกำลังงานค่ายอด (Peak Power) ขนาดเป็นพันวัตต์ออกจากสายอากาศแต่จะมีกำลังงานเพียง 2-3 ไมโควัตต์เท่านั้น ที่สะท้อนจากเป้ากลับมายังเครื่องรับเรดาร์ (Radar Receiver) เรดาร์จึงต้องมีเครื่องรับที่ความไว (Sensitivity) เพียงพอที่จะรับสัญญาณอ่อนๆ และจะทำการแอมปลิไฟร์ให้ได้ระดับตามความต้องการ เพื่อแสดงปรากฏการณ์

ความต้องการของเครื่องรับ Gain

ความต้องการของเครื่องรับ คือ เครื่องรับจะต้องทำหน้าที่รับสัญญาณสะท้อนของเป้าที่เป็นอาร์เอฟพัลส์ระดับต่ำผ่านเข้ามาทางสายอากาศสายนำคลื่น และเครื่องรับ ด้วยระดับสัญญาณที่ต่ำจำเป็นต้องมีการขยายให้มีขนาดสูงขึ้นจนถึงระดับที่ต้องการอัตราการขยายตั้งแต่ระดับทางเข้าจนถึงระดับที่ต้องการจะเรียกว่าเกณฑ์ (Gain) เมื่อเกณฑ์สูงจะทำให้เรดาร์สามารถรับสัญญาณสะท้อนต่ำ ๆ ได้ความสามารถที่รับสัญญาณระดับต่ำ ๆ เรียกว่าความไวของเครื่องรับ (Sensitivity) หรือความสามารถของเครื่องรับในการตรวจจับได้ Minimum Signal Detectable (MSD)

สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (Noise) เป็นคำศัพท์ที่เรียกขึ้นในเครื่องเสียงทางการสื่อสาร การเกิดสัญญาณรบกวนเป็นกำลังดันจะถูกขยาย (Amplifier) และป้อนให้กับลำโพง ในระบบเรดาร์กำลังดันของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการแสดงภาพของเรดาร์โดยจะจะมีผลทำให้ระยะการตรวจจับเป้าของเรดาร์ลดน้อยลง สัญญาณรบกวนอาจเกิดสภาพแวดล้อมภายนอกที่รับเข้ามาโดยสายอากาศหรือเกิดขึ้นภายในเครื่องรับ

การขยายสัญญาณของเครื่องรับหากมีการขยายในส่วนของ Noise เข้าไปด้วยจะไม่ก่อประโยชน์อะไรเปรียบเทียบได้กับในเครื่องขยายเสียงหากเกิดสัญญาณรบกวนใดๆเข้ามาถึงแม้จำทำการขยายออกลำโพงให้ดังเพียงไรก็อาจฟังไม่รู้เรื่องเท่ากับเสียงเบาแต่ไม่มีสัญญาณรบกวน ในระบบเครื่องรับเรดาร์จึงต้องออกแบบให้เครื่องรับขยายเฉพาะสัญญาณที่ต้องการ ตัวชี้วัดที่บ่งบอกว่าเครื่องรับมีประสิทธิภาพในการขยายสัญญาณเมื่อเทียบกับการขยายสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) แสดงค่าสัญญาณรบกวน มีหน่วยเป็น Noise Figure หากมีค่าต่ำสุดแสดงว่ามีประสิทธิภาพดีที่สุด

ค่า Noise Figure สามารถหาได้จาก

$$NF = 10\log F$$

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_0/N_0}$$

เมื่อ NF คือ Noise Figure

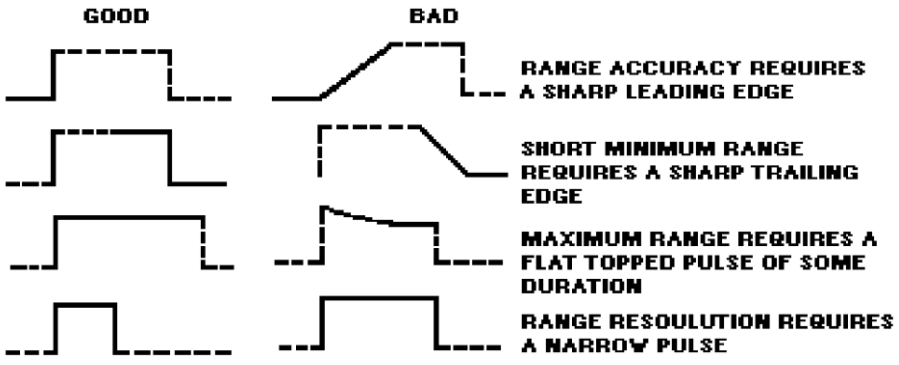
F คือ noise factor Ratio

Tune

ในการรับของเรดาร์จะต้องรับสัญญาณความถี่ที่ส่งออกไปเท่านั้น ความถี่ที่ใช้งานเป็นความถี่ที่สูง ในการออกแบบเครื่องขยายสัญญาณกระทำได้ยากจึงใช้หลักการทำงานแบบ Super Heterodyne คือ นำความถี่อาร์เอฟมาผสมกับความถี่ของ Local Oscillator ให้ได้ความถี่ผลต่างออกมาเป็นความถี่ปานกลางเรียกว่าความถี่ IF (Intermediate Frequency) เพื่อทำการขยาย (IF Amplifier)ได้ง่ายขึ้น จากนั้นนำมาดีเทคเตอร์เป็นสัญญาณวิดีโอป้อนให้กับจอภาพ ในความต้องการที่จะรับเฉพาะความที่ที่ส่งออกไปเท่านั้นจำเป็นต้อง Tune ให้ Local Oscillator ทำความถี่มีผลต่างกับความถี่ส่งเท่ากับความถี่ IF เสมอ

Distortion

ในระบบเรดาร์ Pulse Modulation ต้องการส่งที่พัลส์แคบและขอบหน้า (Rise Time) และขอบหลัง (Fall time) ชันมากที่สุด ในทางปฏิบัติอุปกณ์แต่ละชนิดจะมีค่าการหน่วงเวลา (Transit time) การเริ่มต้อนและสิ้นสุดการทำงานเช่น ในพัลส์ทรานฟอร์เมอร์หลอดแมกนีตรอน หลอด TR หรือวงจรขยายในเครื่องรับเรดาร์มีผลทำให้ขอบหน้าและขอบหลังของคลื่นลาดเอียงผิดเพี้ยนไป (Distortion) จะมีผลต่อระยะที่ถูกต้อง (Range Accuracy) ของเป้าระยะใกล้สุด (Minimum Range) และระยะไกลสุดของเรดาร์



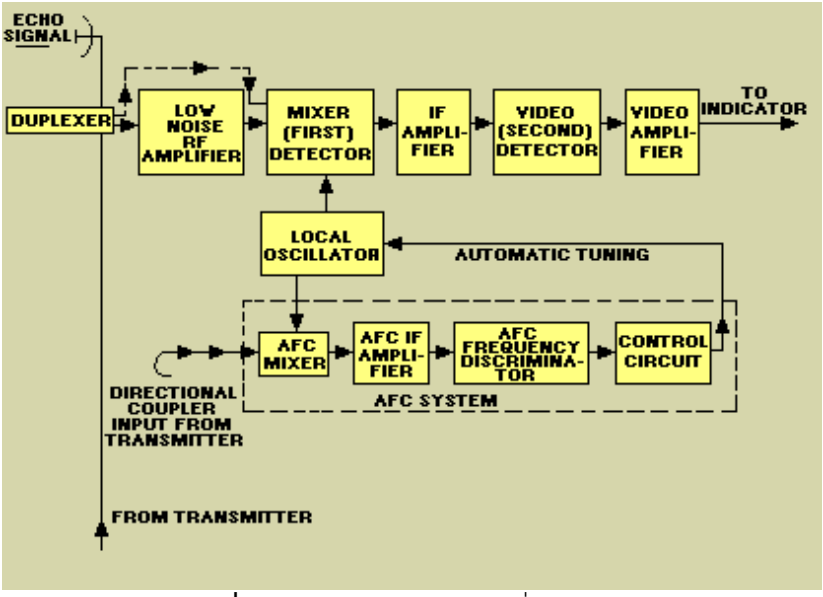
ภาพที่ 6-1 ผลกระทบจากรูปร่างของพัลส์

Blocking

สิ่งหนึ่งที่เครื่องรับเรดาร์ต้องการนอกเหนือจากความไวเครื่องรับที่ต้องการรับสัญญาณสะท้อนของเป้าระดับต่ำที่สุดเข้ามาได้ นั่นคือความสามารถในการรับต่ำสุดได้หลังจากการรับสัญญาณสะท้อนระดับแรง ๆ มาแล้วให้ได้ทันทีเพราะสัญญาณแรงๆที่รับเข้ามาจะทำให้แอมปริไฟล์ถึงจุดอิ่มตัว (Saturate) ชั่วคราว ขณะเป้าที่อยู่ด้านหลังขนาดเล็กจะไม่ถูกขยายหรือมองไม่เห็น (Blocking) เครื่องรับเรดาร์ควรจะมีความสามารถในการแยกผลต่างของการขยายสัญญาณสูงสุดและต่ำสุดว่ามีความต่างกันเท่าไรกำหนดค่าเป็น Dynamic Range

หน้าที่ของเครื่องรับ

หน้าที่ของเครื่องรับคือการที่มุ่งหวังในการรับการสะท้อนของเป้า ปัจจัยที่สำคัญของเครื่องรับ คือ การทำงานแบบซุปเปอร์เฮทเทอไรดายน์ (supper-heterodyne) ซึ่งมีบล๊อคไดอะแกรมพื้นฐาน ดังภาพที่ 6-2



ภาพที่ 6-2 บล๊อคไดอะแกรมเครื่องรับเรดาร์

ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องรับเรดาร์

1. สายอากาศ (Antenna)

ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงาน HIGH RF POWER เป็น พลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งออกอากาศในขณะเครื่องทำการส่งและทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับการสะท้อนกลับเข้ามาของเป้าเป็นกำลังงานอาณ์เอฟ ที่มีระดับกำลังงานต่ำส่งผ่านส่ายสัญญาณไปยัง Duplexer และเครื่องรับ โดยทั้งการรับและส่งจะเป็นแบบบังคับทิศทางเพื่อส่งตำแหน่งที่แน่นอนไปยังภาคแสดง (Display) แบบและคุณสมบัติของสายอากาศ

2 DUPLEXER

DUPLEXER ทำหน้าที่เป็นสวิทช์สลับในการส่งกำลังงาน RF จากเครื่องส่งไปยังสายอากาศขณะทำการส่ง และต่อสายอากาศไปยังเครื่องรับขณะทำการรับ

3. เครื่องขยายสัญญาณย่าน RF (Low Noise RF Amplifier)

สัญญาณสะท้อนเป้าเปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กจากสายอากาศเป็นกำลังงานอาร์เอฟระดับต่ำผ่าน Duplexer (TR Limiter)เข้าทำการขยายสัญญาณให้สูงขึ้น(RF Amplifier) เพื่อส่งให้กับภาค Mixer ในการขยายสัญญาณจะต้องมีอัตราการขยายสัญญาณรบกวนต่ำหรือมีค่า Noise Figure ต่ำตามปกจะใช้แบบ Solid state Amplifier หรือแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือชนิดที่ใช้ Tunnel Diode และ Parametric Amplifier แต่ในเรดาร์ระบบเรดาร์เก่าๆ อาจยังการใช้หลอด TWT(Traveling-wave Tube) ในภาคแรกของ Low Noise Amplifier อย่างไรก็ตามการใช้ Solid state Amplifier จะให้ผลเกณฑ์การขยายที่สูงกว่าและสัญญาณรบกวนต่ำ บางระบบของเรดาร์อาจไม่มีการขยายในส่วนนี้เนื่องจากความถี่สูงการขยายสัญญาณทำได้ยาก แต่ในระบบเรดาร์เดินปัจจุบันมีการนำ RF AmplifierLocal Oscillator และ Mixer ไว้ในชุดเดียวกันเรียกว่า MIC (Microwave Integrate Component)

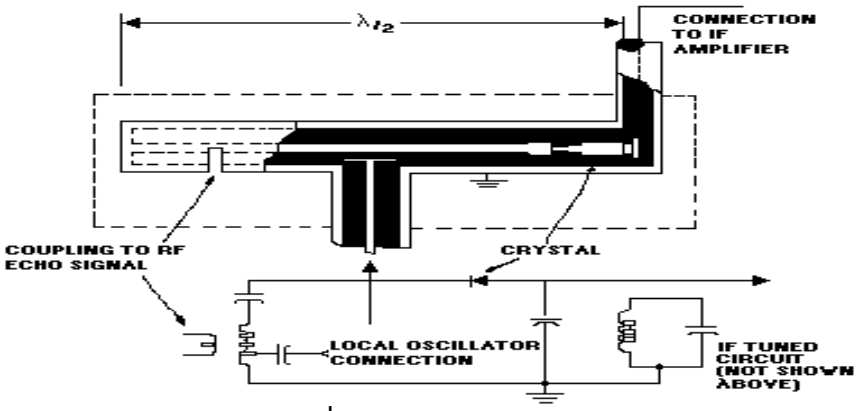
4. เครื่องผสมสัญญาณ (Mixer)

เครื่องผสมสัญญาณ Mixer หรือ First Detector ใช้หลักการของ Super heterodyne คือ ผสมความถี่ระหว่าง RF กับ Local Oscillator ซึ่งจะทำให้เกิดความถี่เป็น 4 ความถี่ได้แก่ความถี่เดิม คือ ความถี่ของ Local และความถี่ RF แล้วไดความถี่ใหม่เป็นความถี่ผลบวกและผลต่างในเครื่องรับจะนำความถี่ผลต่างมาใช้เรียกว่าถี่ IF (Intermediate Frequency) ระหว่าง 15 – 60 MHz เพื่อให้สามารถขยายสัญญาณได้ง่ายขึ้น ปกติในการใช้งานจะใช้ Point-contract Diode ทำหน้าที่เป็น Mixer แต่เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมากในเทคโนโลยีปัจจุบันกำลังถูกแทนที่ด้วย Schottky-barrier Diode เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนต่ำกว่า Mixer มีใช้งานอยู่ 2 แบบ ได้แก่

4.1 Single end Mixer หรือ Unbalance Mixer

การ Mixer กระทำบนสายส่งแบบ Coaxial ความยาวครึ่งคลื่นในส่วนนี้ Crystal Diode จะทำหน้าที่เหมาะส่วนระหว่าง Local Oscillator (LO) และสัญญาณ RF Echo ความถี่ของ Local จะเข้าทาง Main Probe ในส่วนของโคแอกเชียล สัญญาณ RF Echo จะถูกป้อนเข้าทาง Main Slot ซึ่งตามปกติส่วนนี้จะถูกสอดไว้ทางท่อเวฟไกด์ในภาค Duplexer ผลของการกระทำของสองสัญญาณที่เข้ามาจะทำให้เกิดความถี่ผลบวกและผลต่างความถี่อื่นจะถูกตัดทิ้งไปเลือกเอาเฉพาะความถี่ผลต่าง IF Frequency มาใช้ ข้อดีของ Unbalance Mixer คือความออกแบบที่ง่ายส่วนที่

เป็นข้อเสีย คือ ไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนของ Local Oscillator ได้ทำให้ยากต่อการดีเทกสัญญาณระดับต่ำ ๆ ถ้าสัญญาณรบกวนนี้ผ่านเข้าไปยัง Mixer ดังแสดงในภาพที่ 6-3



ภาพที่ 6-3 Single end Mixer

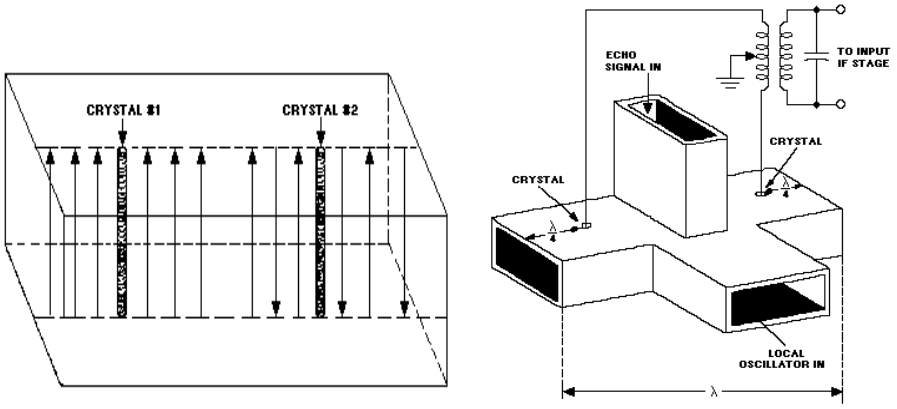
4.2 Balance Mixer หรือ Hybrid Mixer

Balance Mixer หรือ Hybrid Mixer ประกอบด้วยท่อ Wave Guide รูป T (Magic – T) มีทางเข้าสองด้านคือส่วนที่เป็นสัญญาณ RF Echo (ด้านB) และ LO (ด้าน D) ทางออกอยู่แกนทั้งสองด้าน(ด้าน A และ C) ของ Magic-T ความยาวเท่ากับ λ ซึ่งมีคริสตัลมิกเซอร์ (Crystal Mixer) วางอยู่ปลายทั้งสองจุดห่างจากปลายปิดทั้งสองข้างที่ $\lambda/4$ หรือจุดที่สนามไฟฟ้าสูงสุด และคริสตัลมิกเซอร์ทั้งสองตัวว่างห่างกัน $\lambda/2$ โดยมีการทำงาน ดังนี้

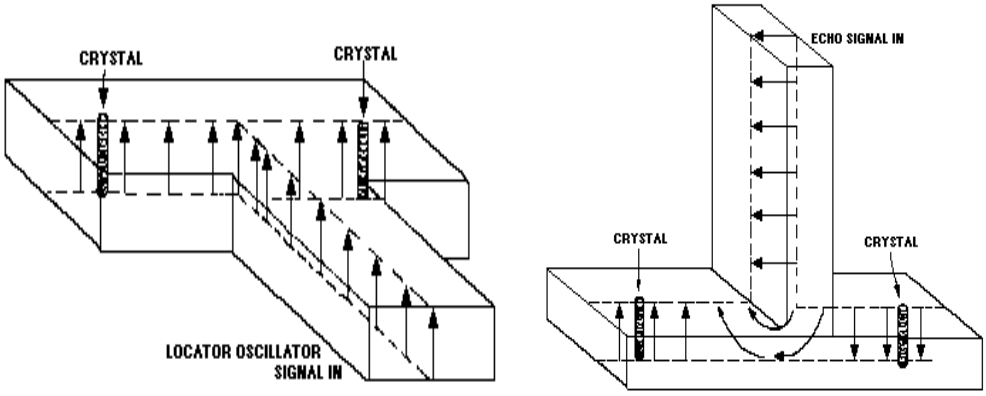
1. สัญญาณ RF Echo ที่เข้ามาจะออกที่แกนทั้งสองด้านและมี Phase ต่างกัน 180 องศา ดังภาพที่ 6-4 นั่นคือหากทาง A เป็นบวกด้าน C จะเป็นลบ หรือถ้าด้าน A เป็นลบด้าน C จะเป็นบวก

2. สัญญาณ LO เข้าทางด้าน D ออกที่ด้าน A และ C ทั้งสองด้านจะมี Phase เดียวกันมีค่าเป็นบวกและลบสลับกันตามความถี่

3. Out Put ของสัญญาณจะออกจากคริสตัลทั้งสองตัวจะผ่านเข้ามารวมกันที่ Balance Transformer เมื่อมีความแตกต่างระหว่างเฟสของสัญญาณสะท้อนที่ป้อนให้กับคริสตัลทั้งสอง และเนื่องจากความถี่ LO ที่ป้อนให้กับคริสตัล (ด้าน D) อยู่ในเฟสเดียวกัน จะเกิดสถานการณ์เมื่อสัญญาณทั้งคู่ป้อนให้กับคริสตัลตัวที่ 1 จะอยู่ในเฟสเดียวกัน และที่สัญญาณทั้งสองที่ป้อนให้กับคริสตัลตัวที่ 2 จะต่างเฟสกัน 180 องศา นั่นคือสัญญาณ IF เฟสที่หนึ่งจะผลิตโดยคริสตัลตัวที่ 1 และสัญญาณ IF ของเฟสตรงข้ามจะผลิตคร่อมคริสตัลตัวที่ 2 เมื่อสัญญาณเหล่านั้นป้อนให้กับบาลานซ์เอ๊าท์พุททรานสเฟอร์เมอร์ มันจะรวมกันเมื่อเอ๊าซ์พุทเหมือนกันมันจะหักล้างหมดไปที่ บาลานซ์เอ๊าท์พุททรานสเฟอร์เมอร์ นั่นคือการที่จะกำจัดเสียงสัญญาณรบกวน เสียงของสัญญาณรบกวนซึ่งสนองโดย LO (ด้าน D) ถูกป้อนในเฟสเดียวกันกับที่ป้อนให้กับคริสตัลแต่ละตัว นั่นคือเสียงรบกวนจะถูกหักล้างกันหมดไปที่บาลานซ์เอ๊าท์พุททรานสเฟอร์เมอร์ ดังภาพที่ 6-5



ภาพที่ 6-4 การทำงานของ Balance Mixer หรือ Hybrid Mixer

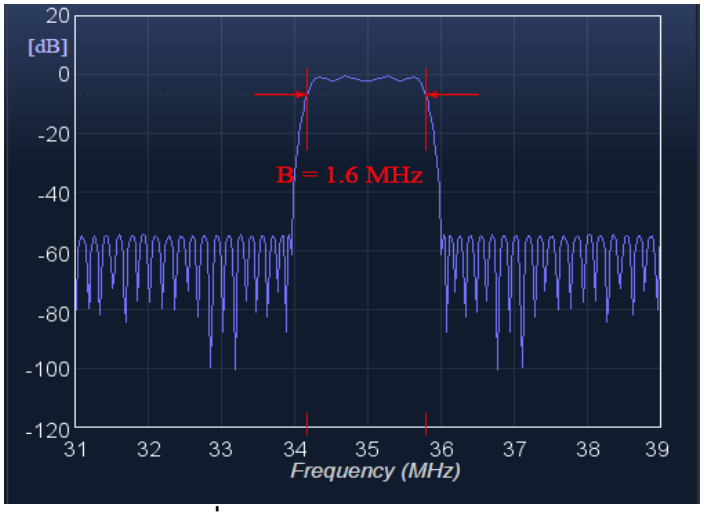


ภาพที่ 6-5 Balance Transformer เมื่อมีความแตกต่างระหว่างเฟสของสัญญาณสะท้อน

5. เครื่องขยายสัญญาณย่านความถี่ปานกลาง (IF Amplifier)

IF Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก Mixer ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็น Band Pass Filter และส่วนที่เป็นแอมร์ปลิไฟร์ ในส่วนที่เป็น Band Pass filter ทำหน้าที่กรองเอาความถี่ผลต่างของสัญญาณอาร์เอฟที่รับเข้ากับความถี่ของ Local Oscillator เป็นความถี่ปานกลางหรือเรียกว่าความถี่ IF ในเรดาร์ของแต่ละระบบจะใช้ต่างกันเช่น 15 30 45 หรือ 60 MHz แล้วแต่เหมาะสมของชนิดของเรดาร์และความถี่ RF

ในการทำงานของเรดาร์แบบพัลส์มอทดูเลเตอร์ถูกสร้างจากการนำพัลส์ ดังรูป 6-6 Rectangular มามอทกับสัญญาณอาร์เอฟ การเกิดรูปคลื่นแบบ Rectangular ที่มีความกว้างพัลส์ที่แคบและชันได้ต้องเกิดจากการผสมของความถี่ฮาร์โมนิคต่าง ๆ จำนวนมาก เมื่อเมื่อเป็นสัญญาณอาร์เอฟแล้วก็จำเป็นต้องมีค่าความถี่นั้นอยู่ในเครื่องรับเพื่อให้การดำรงค์ความเป็นรูปคลื่นที่ชั้นครื่องรับต้องยอมความถี่ผ่านออกไปด้วยโดยการกำหนดแถบกว้างของความถี่หรือแบนด์พาส ถ้าความถี่ใดไม่ตรงอยู่ในแถบความถี่จะถูกกำจัดออกไป ตามปกติจะมีค่าประมาณ 1/PW การใช้งานในระบบเรดาร์อาจจำเป็นต้องดูทั้งระยะใกล้และไกลจึงมีการเปลี่ยนค่า PW ให้แคบสำหรับความต้องการระยะใกล้สุดและการแยกเป้าทางระยะส่วนการต้องการ PW ที่กว้างสำหรับกำลังค่าเฉลี่ยที่สูงสามารถตรวจจับได้ระยะไกล

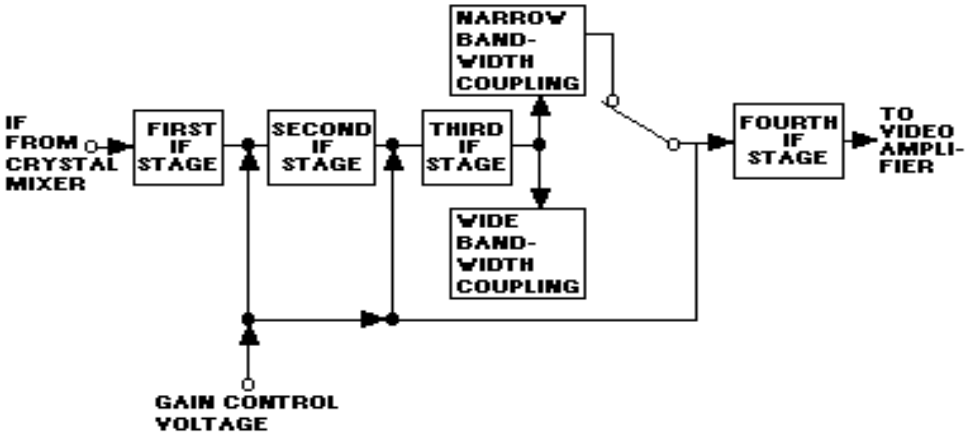


ภาพที่ 6-6 Receiver Band Width

ด้วยความต้องของ IF Amplifier ทำหน้าขยายสัญญาณของ Echo ให้สูงขึ้นพอที่จะส่งต่อไปยังภาคอื่นจนถึงการแสดงภาพจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณต่อกันหลาย ๆ ทอดซึ่งมีรูปแบบต่างกันมีแบบที่นิยมใช้ 2 แบบ คือ

5.1 Linear IF Amplifier

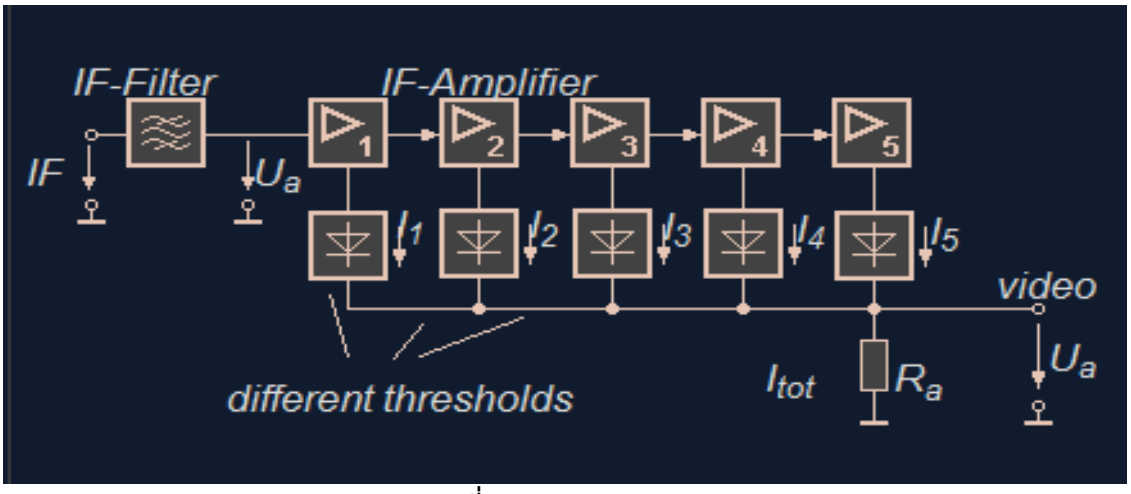
Linear IF Amplifier เป็นแบบที่นำอุปกรณ์ขยายสัญญาณเช่นทานซิสเตอร์ FET หรือ ICนำมาต่อ ๆ กัน (State) ให้เกณฑ์การขยายที่สูงขึ้น ก่อนหน้า ระหว่างตัวขยายสัญญาณอาจมีตัวกรองความถี่ (Band Pass Filter) กั้นอยู่อาจมีตัวเดียว (Signal Tune) สองตัว (Double Tune) หรือ แบบต่อกันหลาย ๆ ชุด (Stagger Tune) ซึ่งเป็นการจูนหลายๆ State เพื่อทำให้ Band Width กว้าง มีผลทำให้ตอบสนองพัลเล็ก ๆ แคบ ๆ เพื่อประโยชน์ในการแยกแยะเป้าในระยะใกล้หรือทำให้ Band width แคบเพื่อ Gain การขยายที่สูง ดังภาพที่ 6-7 เป็น IF Amplifier แบบ 4 State ระหว่าง State จะมีส่วนควบคุมเกณฑ์ ระหว่างส่วนสุดท้ายมี Narrow/wide แบนด์พาส เพื่อกำหนดแถบความถี่ให้ผ่านและเกณฑ์การขยาย Linear IF Amplifier สัญญาณทางเข้าทุกสัญญาณจะมีการขยายเท่ากันทุกสัญญาณ จะให้เกณฑ์เท่ากันหมด ซึ่งมีข้อเสียคือสัญญาณใกล้ๆจะถูกขยายมากเกินไปทำให้เกิดอาการของเป้าที่เรียกว่า Sea Clutter หากลดเกณฑ์การขยายลงเป้าเล็ก ๆ ระยะไกลจะหายไปจึงจำเป็นต้องมีวงจร Swept Gain หรือ STC (Sensitivity Time Control) เพื่อลดเกณฑ์การการขยายของเป้าในระยะใกล้ ๆ ทางออกของ Linear IF Amplifier จะถูกป้อนต่อให้ภาค Detector เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณวิดีโอ



ภาพที่ 6-7 Linear Amplifier

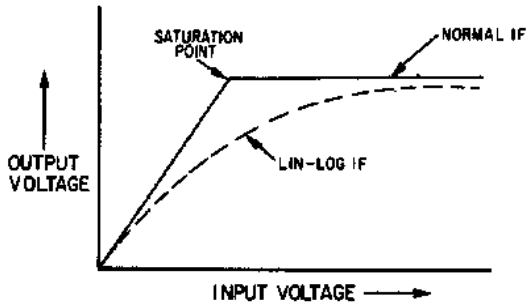
5.2 IF Log Amplifier

IF Log Amplifier เป็นวงจรที่ทำหน้าขยายสัญญาณที่ให้ค่าแบบ Logarithmic การขยายของสัญญาณจะไม่คงที่เข้ามามีระดับต่ำเกณฑ์การขยายจะสูงแต่หากสัญญาณที่เข้ามามีระดับสูงเกณฑ์การขยายจะต่ำตามภาพที่ 6-8 สัญญาณเข้ามาจะผ่านฟิลเตอร์และ Amplifier ลำดับ 1-5 ถ้าสัญญาณมีระดับต่ำ Diode 1-5 จะ Detect สัญญาณที่ออกจาก Amplifier แต่ละตัวเป็นสัญญาณวิดีโอรวมกันออกไปซึ่งจะเป็นค่าเกณฑ์ขยายสูงสุด แต่สัญญาณที่เข้ามาระดับสูงจนทำให้ Amplifier ลำดับแรก ๆ ถึงจุด Saturate ในลำดับต่อไปจะค่า Saturate ทั้งหมดไม่มีการขยายเพิ่มขึ้นและผลรวมการ Detect สัญญาณที่ออกมาจะทำให้เกณฑ์การขยายของ Log Amplifier มีค่าลดลงทาง logarithmic เป้าที่ระยะไกล ๆ และมีระดับต่ำจึงถูกขยายสูงและมองเห็นได้ง่ายกว่าแบบ Linear Amplifier แต่เป้าของระยะใกล้ ๆ ที่มีระดับแรงเกณฑ์จะถูกลดลง



ภาพที่ 6-8 Log Amplifier

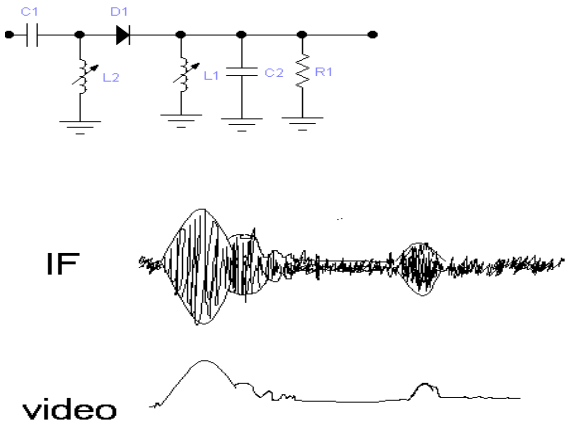
จากภาพที่ 6-9 จะเห็นได้ว่าเกณฑ์การขยายของ Linear Amplifier จะมีค่าคงที่ในส่วนของ Log Amplifier ในช่วงแรกระดับสัญญาณทางเข้าต่ำเกณฑ์การขยายจะมีค่าคงที่แต่เมื่อจุด Saturation เกณฑ์การขยายจะไม่เพิ่มขึ้นมากนัก



ภาพที่ 6-9 กราฟแสดงเกณฑ์การขยายของ Linear Amplifier

6. เครื่องตรวจจับ

Detector หรือ Second Detector ทำหน้าที่เปลี่ยน IF Echo จาก IF Amplifier ให้เป็นสัญญาณวิดีโอเพื่อส่งให้กับภาคแสดงภาพ (Display Unit) จากภาพที่ 6-10 สัญญาณ IF จะผ่านฟิลเตอร์ C_1 และ L_2 โดย D_1 จะเรียงกระแสให้ความถี่ช่วงบวกผ่านออกไปและฟิลเตอร์ C_2 และ L_1 จะกรองความถี่ IF นั้นออกไปเหลือเฉพาะกรอบของสัญญาณซึ่งเป็นสัญญาณวิดีโอ



ภาพที่ 6-10 Detector

7. เครื่องกำหนดความถี่ (Local Oscillator)

Local Oscillator เป็นตัวผลิตความถี่ให้กับ Mixer ได้แก่หลอด Reflect Klystron GUNN Diode หรือ Solid State Oscillator โดยปกติจะถูกควบคุมความถี่โดย วงจร AFC (Automatic Frequency Control) เพื่อควบคุมให้ความถี่ IF คงที่เนื่องจากความถี่ของ Magnetron เปลี่ยนแปลง IF Amplifier ในเรดาร์บางระบบอาจใช้ Crystal Oscillator และ Phase Lock Loop Oscillator เป็นตัวผลิตความถี่คงที่ แต่จะมี AFC ปรับแต่งความถี่ของหลอดแมกนีตรอนแทน

8. เครื่องขยายสัญญาณ วิดีโอ (Video Amplifier)

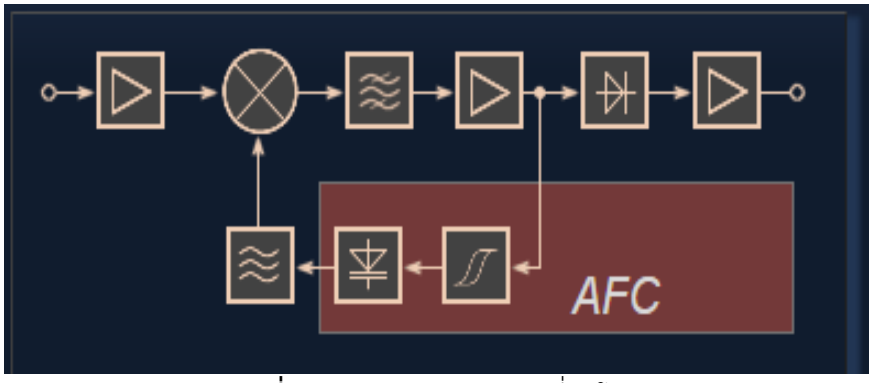
Video Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก Second Detector ให้สูงขึ้นเพื่อขับผ่านสาย สัญญาณส่งต่อไปยัง Radar Indicator หรือ Radar display ความต้องการของ Video Amplifier ต้องเกณฑ์การขยายตลอดย่านความถี่เนื่องด้วยวิดีโอประกอบด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแคบๆ ต่อเนื่องกันตามการสะท้อนของเป้านั้นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนั้นจะประกอบฮาร์โมนิคจำนวนมาก Video Amplifier จำเป็นแบนด์วิทที่กว้างพอที่จะตอบสนองความถี่หล่านั้น

9. เครื่องปรับความถี่อัตโนมัติ AFC (Automatic Frequency Control)

ในการทำงานของระบบเรดาร์เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งด้วยสภาพแวดล้อมหรือด้วยคุณสมบัติของอุปกรณ์เช่นแมกนีตรอนหรือ LO ความถี่อาจเซไปทำให้เกิดผลต่างของความถี่ RF Echo และ LO ที่ Mixer ไม่เท่ากับความถี่ IF มีผลทำให้ไม่สามารถผ่าน IF Band Pass ไปได้ มีผลทำให้เป้าของเรดาร์ลดลงหรือไม่มีเป้าจำเป็นต้องปรับแต่งความถี่ของ LO หรือที่แมกนีตรอน (Tuning) แล้วแต่การออกแบบของเรดาร์ให้ผลต่างความถี่เท่ากับ IF ในการปรับแต่งความถี่ (Tuning) สามารถเป็นทั้งแบบด้วยมือ(Manual) หรือแบบอัตโนมัติ (AFC: Automatic Frequency Control) โดยมีตัวอย่างการทำงานคือ

9.1 การควบคุมความถี่ของ Local Oscillator

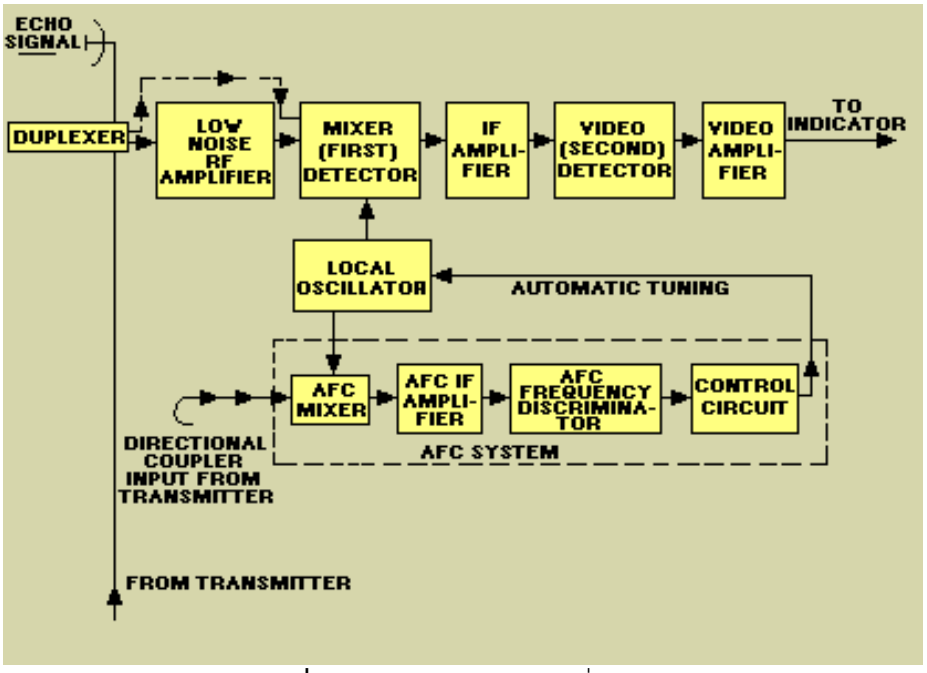
จากภาพที่ 6-10 ขณะเรดาร์ทำการส่งผ่าน Duplexer กำลังงานส่วนหนึ่งจะผ่านหลอด TR Limiter แต่ไม่แรงพอที่จะทำอันตรายต่อเครื่องรับจนถึง Mixer ซึ่งจะทำการผสมความถี่กับ LOได้ความถี่ IF Pulse ของการส่งจากนั้นจะผ่านภาค Amplifier ส่านหนึ่งจะส่งให้กับภาค Second Detector อีกส่วนหนึ่งจะส่งให้กับภาค Frequency Discriminator เพื่อตรวจสอบความถี่ ถ้าความถี่ผลต่างมากกว่าความถี่ IF จะส่งค่าสัญญาณไปยัง Control Circuit เพื่อควบคุมกำลังดันไปปรับแต่งความถี่ LO ให้สูงขึ้น แต่ถ้าหากความถี่ผลต่างน้อยกว่าความถี่ IF จะส่งค่าสัญญาณไปยัง Control Circuit เพื่อควบคุมกำลังดันไปปรับแต่งความถี่ LO ให้ต่ำลงจนได้ความถี่ของ IF ในการควบคุมความถี่แบบนี้จะทำการ Tune เฉพาะเวลาส่งหลังจากสิ้นสุดการส่งแล้วกำลังดันจะสะสมไว้ที่คาปาซิเตอร์และรักษากำลังดันที่ถูกต้องนั้นไว้ตลอดเวลาการรับจนกว่าจะมีการ Tune ใหม่ในรอบการส่งต่อไป



ภาพที่ 6-11 การควบคุมความถี่อัตโนมัติ

9.2 การควบคุมความถี่ด้วยนำความถี่ของแมกนีตรอนมาปรับแต่งความถี่ LO

หลักการทำงานดังภาพที่ 6-12 สามารถอธิบายได้ว่ากำลังงาน RF ที่ออกจากเครื่องส่งหรือแมกนีตรอนจะส่งผ่านท่อเวฟไกด์ กำลังงานส่วนหนึ่งจะถูก Coupling เข้ามาที่ AFC Mixer ทางเข้าอีกทางหนึ่งเป็นความถี่ LO ซึ่งตามปกติจะปรับแต่งให้มีความถี่สูงกว่าแมกนีตรอนและผลต่างเท่ากับความถี่ IF ความถี่ที่ได้จะส่งต่อให้กับ IF Amplifier เพื่อขยายสัญญาณให้สูงขึ้น แล้วส่งต่อให้กับ AFC Frequency Discriminator เพื่อทำหน้าที่ตรวจสอบความถี่ IF ถ้าความถี่ผลต่างมากกว่าความถี่ IF จะส่งค่าสัญญาณไปยัง Control Circuit เพื่อควบคุมกำลังดันไปปรับแต่งความถี่ LO ให้สูงขึ้น แต่ถ้าหากความถี่ผลต่างน้อยกว่าความถี่ IF จะส่งค่าสัญญาณไปยัง Control Circuit เพื่อควบคุมกำลังดันไปปรับแต่งความถี่ LO ให้ต่ำลงจนได้ความถี่ของ IF และด้วยความถี่นี้จะเท่ากับความถี่ที่เกิดความถี่จากหลอดแมกนีตรอนส่งออกอากาศและสะท้อนกลับเข้าทาง Duplexer , Low Noise RF Amplifier และ Mixer (First Detector) เนื่องจากเป็นต้นกำเนิดสัญญาณและ LO ตัวเดียวกันนั่นเท่ากับว่าเรดาร์รับความถี่ส่งได้ถูกต้องหรืออยู่ในตำแหน่ง

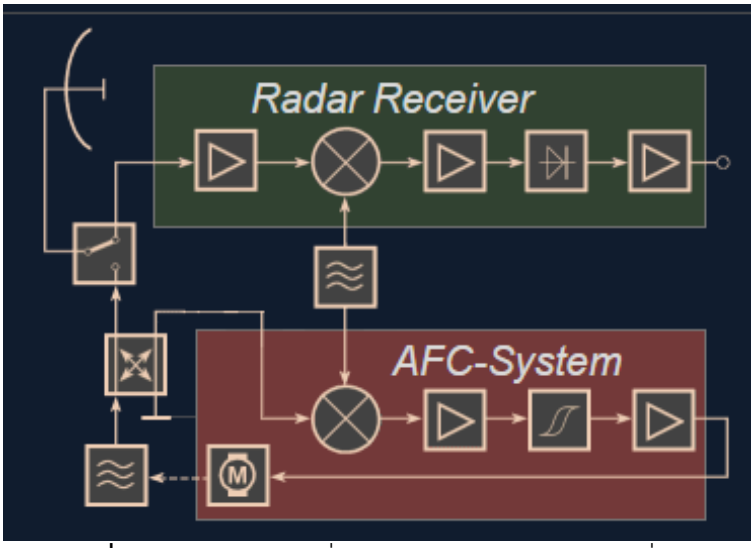


ภาพที่ 6-12 การควบคุมความถี่อัตโนมัติ

9.3 การควบคุมถี่อัตโนมัติแบบปรับแต่งความถี่แมกนีตรอน

ในเรดาร์บางรูปแบบจะกำหนดให้ใช้ LO แบบให้ความถี่คงที่ STALO (Stable Local Oscillator) ในการปรับความถี่โดยปรับจูนที่หลอดแมกนีตรอนตามภาพที่ 6-13 เป็นรูปแบบการควบคุมถี่อัตโนมัติแบบปรับแต่งความถี่แมกนีตรอน การทำงานเมื่อแมกนีตรอนผลิตกำลังงาน RF ผ่าน

ท่อเวฟไกด์ออกมากำลังงานส่วนหนึ่งจะถูก Coupling ออกมาผสมกับ LO ที่ AFC Mixer ผ่านการขยายสัญญาณให้สูงขึ้นส่งต่อให้ Frequency Discriminator เพื่อตรวจสอบความถี่ IF ถ้าความถี่ผลต่างมากกว่าความถี่ IF จะส่งค่าสัญญาณไปยัง Control Circuit เพื่อควบคุมกำลังดันไปปรับแต่งความถี่แมกนีตรอน ให้สูงขึ้น แต่ถ้าหากความถี่ผลต่างน้อยกว่าความถี่ IF จะส่งค่าสัญญาณไปยัง Control Circuit เพื่อควบคุมกำลังดันไปปรับแต่งความถี่แมกนีตรอนให้ต่ำลงจนได้ความถี่ของ IF ความถี่นี้จะเท่ากับความถี่ของ IF Echo ด้านบนเนื่องจากการใช้แหล่งกำเหนิดความถี่เดียวกัน

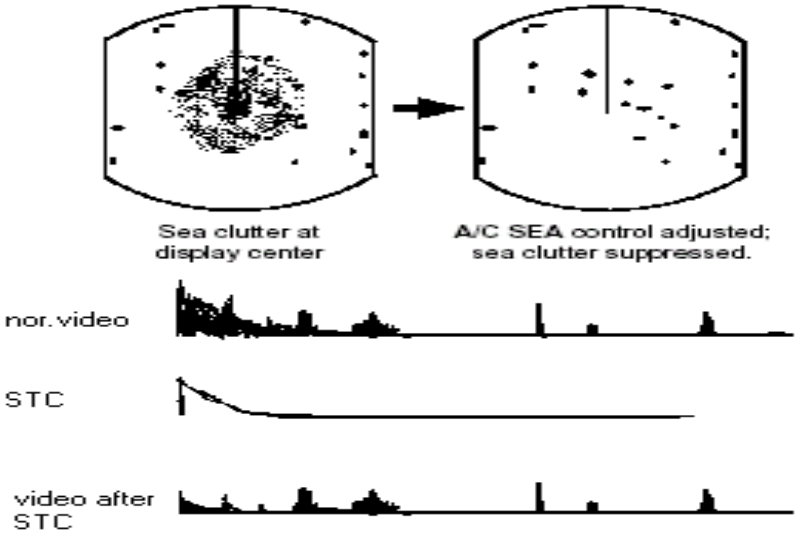


ภาพที่ 6-13 การควบคุมถี่อัตโนมัติแบบปรับแต่งความถี่แมกนีตรอน

การควบคุมสัญญาณต่าง ๆ ในเรดาร์

1. STC (Sensitivity Time Control) หรือ Sea Clutter

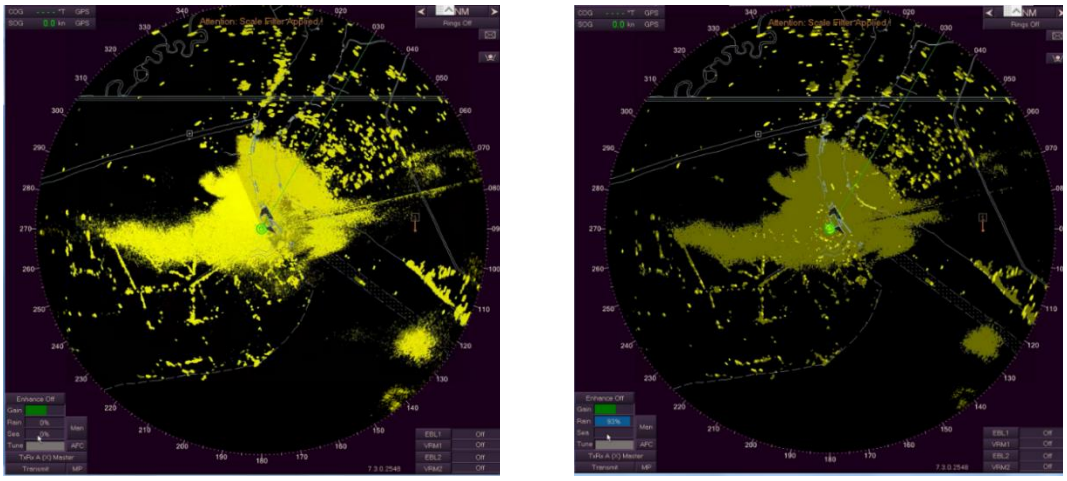
ในการใช้งานในระบบเรดาร์จะพบว่าเป้าระยะใกล้ ๆ มีระดับสัญญาณแรงเกินไปจนทำให้สะท้อนคลื่นของทะเลในระยะใกล้เนื่องจากมุมของสันคลื่นทำมุมกับทิศทางการแพร่คลื่นของสายอากาศทำให้ระดับของสัญญาณสูงกว่าการแสดงภาพปกติ (The shold) มีผลทำให้สัญญาณสะท้อนของคลื่นทะเลบดบังเป้าที่อยู่บริเวณนั้น (Sea Clutter) จึงต้องทำการลดเกณฑ์ของเครื่องรับในระยะใกล้ ๆ ให้ลดลงจนระดับของ Sea Clutter ต่ำกว่าระดับ Threshold จึงจะสามารถมองเห็นเป้าอื่นที่ระดับสูงกว่า Sea Clutter โดยใช้หลักการ Time Constant ของค่า RC Time สร้างเป็นสัญญาณ STC เพื่อลดเกณฑ์ของเป้าในระยะใกล้ๆจากค่าลดเกณฑ์สูงสุดเอียงลาดลดลงไปตามระยะที่ต้องการขึ้นอยู่กับค่าของ Sea Clutter มีระดับสูงมากเท่าไร ดังภาพที่ 6-14



ภาพที่ 6-14 แสดงภาพยังไม่ปรับ STC และแสดงภาพเมื่อปรับแล้ว

2. FTC (Fast Time Constant) หรือ Rain Clutter

ใช้ควบคุมสัญญาณ Video ของเรดาร์ขณะเมื่อเกิดฝนตกสัญญาณเรดาร์จะสะท้อนคลื่นฝนกลับเข้ามาแสดงในจอภาพ เช่นเดียวกับ Sea Clutter แต่ Rain Clutter เกิดขึ้นทุกระยะที่มีฝนระดับการสะท้อนคลื่นของฝนจะมีระดับสูงกว่าระดับ Threshold ทำให้ไม่สามารถมองเห็นเป้าที่อยู่บริเวณนั้นได้ถึงแม้เป้านั้นจะมีความแรงของการสะท้อนมากกว่า FTC ทำงานโดยใช้หลักการของการให้สัญญาณวิดีโอผ่านวงจร Differentiator ทำให้เหลือเฉพาะแต่ขอบหน้าของสัญญาณหรือส่วนที่มีระบบความแรงของสัญญาณเปลี่ยนแปลง เช่น ของหน้าของกลุ่มฝนหรือขอบหน้าของเป้าที่ทับซ้อนมากับกลุ่มของการสะท้อนจากคลื่นฝน ทำให้สามารถมารถมองเห็นเป้าในกลุ่มฝนได้แต่การปรับค่าของ STC มากเกินไปจนอาจมองไม่เห็นเป้าจริงที่ต้องการได้ ดังภาพที่ 6-15 การเกิด Sea Clutter และการแก้ไขโดยใช้ CTC ตามภาพที่ 6-15



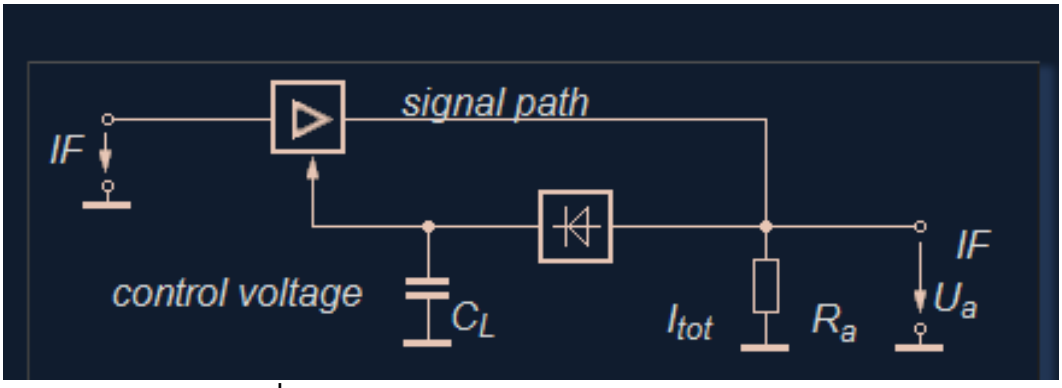
Normal Video Rain Clutter Control

ภาพที่ 6-15 Rain Clutter Control

3. การควบคุมเกณฑ์ (Gain Control)

การใช้งานของเรดาร์บางครั้งต้องการดูเป้าระยะไกลต้องเพิ่มเกณฑ์ให้สูงเพื่อมองเห็นเป้าเล็ก ๆระยะไกลๆได้แต่เมื่อใช้ระยะใกล้ๆเกณฑ์อาจมากเกินไปทำให้แยกเป้าไม่ออกจึงต้องมีการปรับเกณฑ์การขยาย (Gain Control) ให้เหมาะสมซึ่งสามารถปรับได้ที่ IF Amplifier หรือในส่วนของ Video Amplifier แล้วแต่การออกแบบของเรดาร์ การปรับเกณฑ์ของเป้าสามารถกระทำได้สองวิธี คือ ปรับด้วยมือ (Manual Gain Control) และปรับแบบอัตโนมัติ (Automatic Gain Control)

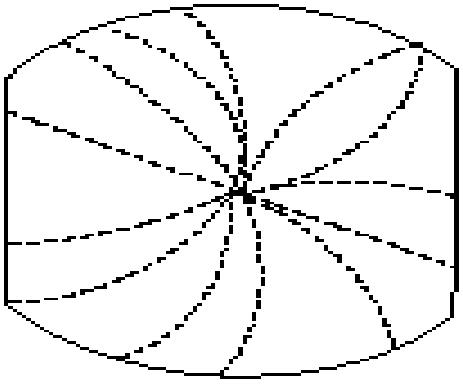
ระดับความแรงของสัญญาณของเป้าไม่ได้เป็นเฉพาะเป้าที่อยู่ในระยะใกล้ ๆ เท่านั้นที่มีระดับสูงกว่าค่าอ้างอิง (Threshold) ในการแสดงภาพทำให้บดบังเป้าที่อยู่บริเวณนั้น เป้าที่สะท้อนจากเมฆหรือฝนตกก็เช่นกัน ระบบเรดาร์จะใช้ Automatic Gain Control (AGC) ควบคุมระดับของสัญญาณวิดีโอ ดังภาพที่ 6-16 จะแสดงตัวอย่างการทำงานของ AGC ในภาค IF Amplifier โดยใช้สัญญาณที่ออกจากแอมปริฟรายผ่านไดโอดแล้วสะสมไว้ที่คาปาซิเตอร์ (C) แล้วนำมาเป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณไปลดเกณฑ์การขยายของแอมปริฟรายผลที่ได้ระดับสัญญาณจากเป้าที่สะท้อนอยู่ใกล้ๆหรือสะท้อนจากฝนจะลดลงอยู่ใกล้ Threshold ทำให้สามารถเห็นเป้าอื่น ๆ บริเวณนั้นได้ ในการทำงานของ AGC อาจควบคุมที่ภาค RF Amplifier หรือภาค IF Amplifier ก็ได้



ภาพที่ 6-16 Automatic gain control block diagram

4. IR (Interference Reject)

การใช้งานของเรดาร์ปัญหาที่พบได้อย่างหนึ่งคือมีการใช้เรดาร์ที่มีความถี่เดียวกันบริเวณใกล้กันทำให้ส่งสัญญาณเข้ามากวนในเครื่องรับของเรดาร์เราโดยตรงหรือเกิดจากการสะท้อนของเป้าจากเรดาร์ใด ๆ ที่ความถี่ตรงกันที่เข้ามาทำให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวน (UN-Synchronize Echo หรือ Interference) เข้ามาในจอภาพ สามารถกำจัดให้หมดไปด้วยการใช้ IR (Interference Rejection) โดยอาจมีการเลือกว่าจะใช้ค่าใดขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณรบกวน ดังภาพที่ 6-17 จะแสดงตัวอย่างสัญญาณรบกวนและการใช้ IR

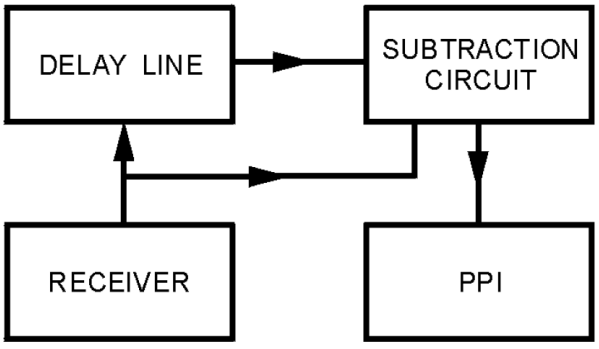


ภาพที่ 6-17 Radar interference

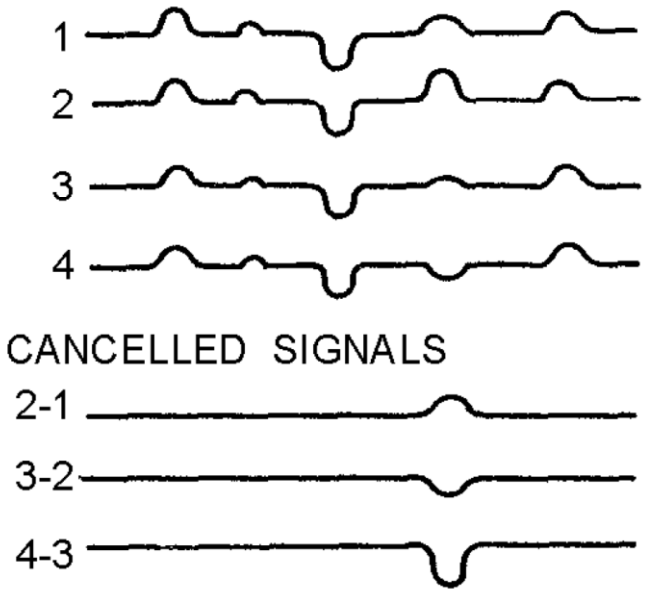
5. MTI (Moving Target Indicator)

Moving Target Indicator (MTI) ทำหน้าที่กำจัดเป้าที่ไม่ต้องการหรือเป้าไม่เคลื่อนที่ (Clutter) ออกไปให้เหลือการแสดงเฉพาะเป้าที่เคลื่อนที่ (Moving Target Indicator: MTI) การปรากฏของเป้า ไม่เคลื่อนที่ทั้งหลายทำให้ยากต่อการมองเห็นของเป้าเคลื่อนที่ในจอเรดาร์ เป้าทีไม่ต้องการได้แก่ เป้าที่เกิดจากการสะท้อนของเป้าทางบก เช่น แผ่นดิน ต้นไม้ ภูเขา หรือ เป้า ที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่นรอบตัวเรือ (Sea Clutter) เป้าที่เกิดจากฝน (Rain Clutter)

เป้าที่อยู่กับที่จะมีเฟสของสัญญาณที่สะท้อนเข้ามาที่เครื่องรับเท่ากันทุก PRT แต่เป้าที่เคลื่อนที่ที่จะมีเฟสต่างกันเปลี่ยนไปทุกการส่งหรือการรับเข้ามาหลักการนี้จะนำมาใช้ในการแยกระหว่างเป้าไม่เคลื่อนที่และเป้าที่เคลื่อนที จากภาพที่ 6-18 แสดงบล็อกไดอะแกรม Canceller ใช้ในการกำจัดเป้าอยู่กับที่ สัญญาณวิดีโอจาก Receiver จะป้อนให้กับ Delay Line หน่วงเวลาไว้ 1 PRT สัญญาณจะถูกนำมาหักล้างกันที่ Subtraction Circuit สัญญาณที่เหมือนกันจะหักล้างกันหมดไปสัญญาณที่ต่างกันส่งให้กับจอภาพ ดังภาพที่ 6-19 แสดงสัญญาณวิดีโอ PRT ที่ 1 ถึง 4 สัญญาณที่เป็นเป้าไม่เคลื่อนที่จะมีเฟสและแอมพลิจูดคงที่ เป้าที่เคลื่อนที่จะมีเฟสและแอมรพลิจูดไม่คงที่ เมื่อนำวิดีโอ PRF ที่ 2-1, 3-2 หรือ 4 – 3 จะเห็นได้ว่าเป้าเคลื่อนที่เท่านั้นที่มีสัญญาณออกจาก Subtraction Circuit



ภาพที่ 6-18 แสดงบล็อกไดอะแกรม Canceller



ภาพที่ 6-19 การจำเป้าไม่เคลื่อนที่โดย Caceller

6 TD (Moving Target Detector)

TD (Moving Target Detector) ทำหน้าที่ในการเลือกแสดงเป้าที่เคลื่อนที่โดยใช้หลักการ Doppler Filter กล่าวคือ เมื่อเราส่งคลื่นเรดาร์ไปกระทบเป้าหรือวัตถุที่เคลื่อนที่ความถี่ของคลื่นสะท้อนกลับจะมีความถี่เปลี่ยนไปต่างจากความถี่เดิมหรือเรียกว่าความถี่ Doppler ความถี่ Doppler นี้จะมีค่าเปลี่ยนไปตามความเร็วของของวัตถุและความถี่ที่ใช้ ดังนั้น Doppler Filter จะทำการกรองย่านความถี่ของ Doppler ที่เกิดขึ้นว่าความถี่ที่เกิดขึ้นเป็นเป้าจากอะไร เช่น คนเดิน เมฆฝน รถวิ่ง เฮริคอบเตอร์ หรือเครื่องบิน

7 จอแสดงผลเรดาร์ Display on radar

บทนำ

การแสดงผลเรดาร์ (Display on radar) กระบวนการที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่จะนำเสนอข้อมูลเรดาร์ไปยังผู้ใช้งานเรดาร์ ระบบเรดาร์ส่งพัลส์หรือคลื่นอย่างต่อเนื่องของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่สะท้อนออกเป้าหมายที่กำหนดไว้ และกลับไปที่ระบบเรดาร์ จากนั้นจะแปลงรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับทั้งหมดที่เป็นสัญญาณอะนำล็อกอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน หรือ แรงดันไฟฟ้าที่สามารถแปลงจากนั้นไปที่หน้าจอแสดงผล

ระบบที่ทันสมัยมักจะใช้การจัดเรียงของจอแสดงผลแรสเตอร์สแกนบางส่วนในการผลิตภาพแผนที่ที่เหมือนกับต้นฉบับ ในการพัฒนาจอเรดาร์จึงต้องมีการพัฒนาจอแสดงผลที่มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เรดาร์เดินเรือ เรดาร์การบิน ฯลฯ

หน้าที่ของจอแสดงผลเรดาร์

จอแสดงผลเรดาร์มีหน้าที่หลัก 5 ประการ ได้แก่

1. เรดาร์ Display ทำหน้าที่แสดงระยะของเป้าห่างจากฐานส่งของเรดาร์ ได้แก่ Antenna
2. เรดาร์ Display ทำหน้าที่แสดงทิศทางของเป้า (Bearing หรือ Azimuth) จากฐานส่งของเรดาร์
3. เรดาร์ Display ทำหน้าที่ในการแยกแยะว่าเป้าที่ปรากฏนั้นเป็นอะไรขึ้นอยู่กับความสามารถของพนักงานเรดาร์
4. เรดาร์ Display ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานใน function ต่าง ๆ ของเรดาร์จากพนักงาน (man machine interface) อันได้แก่
    - 4.1 ควบคุมการทำงานของเครื่องส่งโดยการเลือก pw. และ Prf.
    - 4.2 ควบคุมการทำงานของเครื่องรับ เช่น ftc stc bandwidth gain control
    - 4.3 ควบคุมการแสดงภาพให้เกิดความเหมาะสม
5. เรดาร์ Display ทำหน้าที่ในการตรวจสอบการทำงานของระบบเรดาร์ตัวเองได้ในระบบใหม่ ๆ (performance test) ได้แก่ การตรวจสอบ เครื่องส่ง เครื่องรับ และ video processor

ประโยชน์ของจอแสดงผลเรดาร์

จอแสดงผลเรดาร์สามารถแสดงข้อมูล ได้แก่

1. ระยะทางของเป้า (rang)

2. ทิศทางของเป้า (bearing) โดยรอบจอ 360 องศา ซึ่งจะแสดงเป็นแบบ ทิศสัมพันธ์กับตัวเรือ (relative bearing) หรือ สัมพันธ์กับทิศเหนือจริง (true bearing)

3. การเคลื่อนที่ของเป้า ซึ่งได้แก่ ระยะ arpa (automatic radar ploting aid) ซึ่งจะได้ ข้อมูลดังต่อไปนี้

3.1 ทิศทางของเป้าเคลื่อนที่ (course)

3.2 ความเร็วของเป้าเคลื่อนที่ (speed)

3.3 ระยะใกล้ที่สุดที่เรือเป้าและเรือเราผ่านกัน(cpa=closest point of approach)

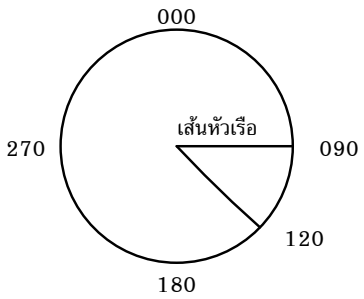
3.4 เวลาที่จะใช้งานถึงระยะใกล้สุดที่ผ่านกัน (tcpa = time closest point of apporach)

หลักการทำงานของจอแสดงผลเรดาร์

1. North up

North up เป็นการแสดงภาพที่สัมพันธ์กับทิศเหนือจริง (ทิศทางของไยโร) ตลอดเวลา

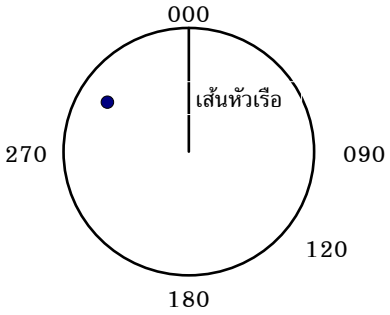
ตัวอย่างที่ 7-1 ให้ค่าไยโรมีค่า 090 เมื่อไยโรเปลี่ยนค่าจาก 090 เป็น 120 เส้นหัวเรือจะเปลี่ยนไป
ชี้ที่ 120



2. Head up

Head up หรือ เรียกว่า relative bearing เป็นการแสดงภาพที่สัมพันธ์กับหัวเรือตลอดเวลาจะไม่มีระบบของไยโรเข้ามาเกี่ยวข้อง

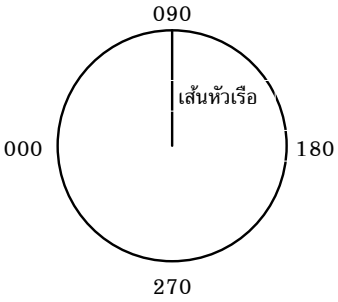
ตัวอย่างที่ 7-2 ให้ค่า ไยโรมีค่า 090 แต่เส้นหัวเรือชี้ที่ 000 เมื่อมีเป้าปรากฏที่ทางซ้าย 45 องศา เราจะรู้ค่าbearing ของเป้าได้โดยการนำ 090 - 045 จะได้ bearing คือ 45 องศา



3. Course up

Course up เป็นการแสดงภาพที่ต้องทำต่อจาก mode north up เมื่อเลือกการทำงาน mode course up เส้นหัวเรือจะชี้ที่ 000 แต่จากเรือมีการเปลี่ยนทิศทางเส้นแสดงหัวเรือจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของหัวเรือจริง ๆ แต่สัญญาณภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงจะใช้ประโยชน์ในการเดินเรือในร่องน้ำ (ทิศทางของไยโร) ตลอดเวลา

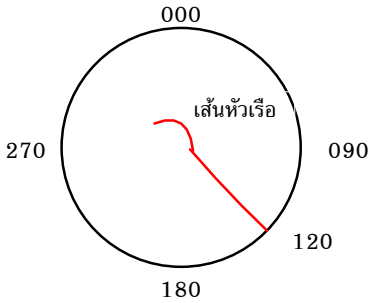
ตัวอย่าง 7-3 ให้ไยโรมีค่า 090 เส้นหัวเรือยังคงชี้ที่มุม 000 แต่ตัวเลขที่วง circle จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของไยโรที่ส่งมาให้เช่น 090



4. True motion

True motion เป็นการแสดงภาพที่สัมพันธ์กับทิศเหนือจริงและจุดศูนย์กลาง (ตัวเรือ) มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเรือจริง

<u>ตัวอย่างที่ 7-4</u> ให้ค่าไยโรมีค่า 090 เมื่อไยโรเปลี่ยนค่าจาก090 เป็น 120 เส้นหัวเรือจะเปลี่ยนไป ชี้ที่ 120



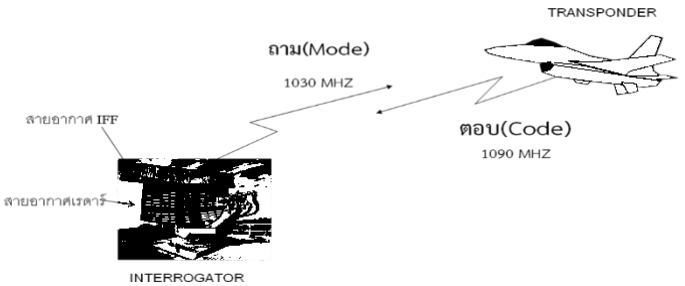
8 ระบบพิสูจน์ฝ่าย IDENTIFICATION FRIEND OR FOE (IFF)

บทนำ

ตั้งแต่มีการประดิษฐ์เรดาร์ขึ้นมาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 ใช้สามารถตรวจหาอากาศยานหรือเครื่องบินบนท้องฟ้าได้ แต่สิ่งที่ต้องการตามมาที่ต้องการทราบเพิ่มขึ้นนั่นคือแล้วอากาศยานหรือเครื่องบินนั้นเป็นของใครเป็นฝ่ายเราหรือฝ่ายข้าศึกจนถึงสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงได้ สร้างเครื่องมือขึ้นมาเรียกว่าเครื่องพิสูจน์ฝ่าย (Identification friend or Foe: IFF) ด้วยการ นำมาใช้ทำงานร่วมกับระบบเรดาร์โดยการนำสายอากาศของเครื่องพิสูจน์ฝ่าย ยึดติดกับสายอากาศของเรดาร์หมุนไปด้วยกันและแสดงผลบนจอพร้อมกับระบบเรดาร์เพื่อจะได้พิสูจน์ว่าเครื่องบินเป็นฝ่ายใดจึงอาจถูกเรียกว่าบริภัณฑ์ช่วยเหลือเรดาร์หรือ Secondary Surveillance Radar (SSR) ในกิจการบินพลเรือนก็ต้องการพิสูจน์ทราบว่าอากาศยานนั้นเป็นของสายการบินใดเช่นกัน จึงจำเป็นต้องมีรหัสแสดงตนเช่นกันคือระบบ Selective Identify Feature

หลักการทำงานของระบบพิสูจน์ฝ่าย

ระบบพิสูจน์ฝ่ายต่างจากระบบเรดาร์ คือ จะไม่ใช้หลักของการสะท้อนคลื่นแต่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ซึ่งเรียกว่าเครื่องถาม (Interrogator) มีหน้าที่ส่งสัญญาณถาม (Code) ที่เรียกว่า Mode ไปถามเครื่องตอบ (Transponder) และเครื่องตอบ ส่งรหัส (SIF Code) ของตัวเองกลับไปยัง Interrogator ซึ่งเรียกว่าสัญญาณ Reply เมื่อ Interrogator รับสัญญาณตอบจาก Transponder จะนำสัญญาณนั้นผ่านเครื่องถอดรหัส (Decoder) เพื่อทำการพิสูจน์ฝ่ายตามภาพที่ 8-1 ในการถามและตอบของเครื่องพิสูจน์ฝ่ายเพื่อไม่เกิดสัญญาณกวนกันระหว่างรับและส่งจะใช้ความถี่รับและส่งต่างกัน กล่าวคือ Interrogator จะส่งด้วยความถี่ 1030 MHz และรับด้วยความถี่ 1090 MHz ส่วน Transponder จะส่งด้วยความถี่ 1090 MHz และรับด้วยความถี่ 1030 MHz จากตารางที่ 8-1 ข้างล่างแสดงคุณลักษณะของ Interrogator และ Transponder แสดงตัวอย่างการทำงานดังภาพที่ 8-1



ภาพที่ 8-1 แสดงการทำงานถามตอบของระบบพิสูจน์ฝ่าย

ตารางที่ 8-1 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติของระบบพิสูจน์ฝ่าย

	Interrogator AN / UPX – 27	Transponder AN / UPX – 72
Frequency	L Band	L Band
TX Frequency	MHz (± 2 MHz)	1090 MHz (± 3 MHz)
RX Frequency	MHz	MHz
Power Transmitter	KW.	W.
Sensitivity	-97 dB V	-80 dB V To – 90 dB V
Antenna	Directional/ Omni	Omni

ส่วนประกอบของระบบพิสูจน์ฝ่าย

ระบบพิสูจน์ฝ่ายประกอบด้วยการทำงานของ 2 ส่วนคือ การถาม (Interrogator) และการตอบ (Transponder Set) มีหลักการทำงานดังต่อไปนี้

1. การถาม Interrogator ตามปกติจะติดตั้งอยู่ร่วมกับระบบเรดาร์ทางภาคพื้นดิน โดยจะมีสายอากาศติดอยู่ส่วนบนของสายอากาศเรดาร์และใช้สัญญาณร่วมจังหวะ (Trigger) ร่วมกันทำให้สามารถสามารถแสดงภาพพร้อมกับเป้าของเรดาร์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

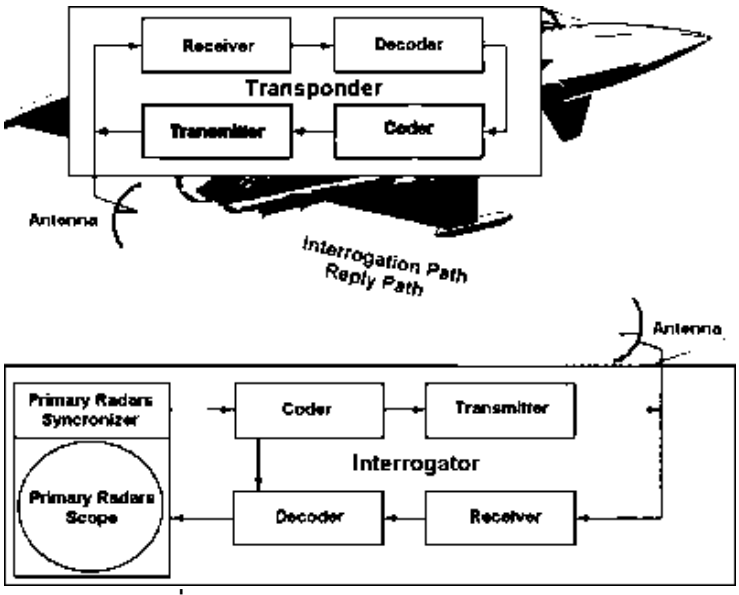
1.1 เครื่องส่ง (Transmitter) ทำหน้าที่รับสัญญาณ Mode นำมามอท ด้วยความถี่ 1030 MHz แล้วทำการขยายให้มีกำลังสูงขึ้นส่งให้กับระบบสายอากาศ การทำงานของเครื่องส่งประกอบไปด้วย

1.1.1 Coder ทำหน้าที่ รับสัญญาณร่วมจังหวะการทำงาน (Trigger) มาจากระบบเรดาร์ และสร้างสัญญาณที่เรียกว่า Mode เป็นรูปแบบของพัลส์ซึ่งมีระยะห่างไม่เท่ากันแล้วส่งไปให้ภาคเครื่องส่ง

1.1.2 ระบบสายอากาศ (Antenna Set) จะมีสองส่วนคือ แบบบังคับทิศทาง (Directional หรือ SUM Antenna) ใช้ส่งสัญญาณ Mode (SUM) ติดตั้งหมุนไปพร้อมกับสายอากาศของเรดาร์ทำให้มีทิศทางตรงกันส่วนอีกสายอากาศเป็นแบบไม่บังคับทิศทาง (Omni Antenna หรือ DIF Antenna) ใช้ส่งสัญญาณ ISLS (Interrogator Side Lobe Suppression)เพื่อลดปัญหาการเกิดเป้าลวงเป็นวงกลม (Ring Around Target)

1.2 เครื่องรับ (Receiver) ทำหน้ารับสัญญาณตอบจาก Transponder ด้วยความถี่ 1090 MHz ทำการขยายสัญญาณแล้วแปลงสัญญาณอาร์เอฟ ออกเป็นสัญญาณวิดีโอ (Detect) ส่งให้กับภาค Video Decoder

1.3 เครื่องถอดรหัส (Video Decoder) ทำหน้าที่ถอดรหัสสัญญาณตอบกลับมาจาก Transponder ว่าตรงกับรหัสที่ตั้งไว้หรือไม่ หากตรงกันแสดงว่าเป็นฝ่ายเดียวกันและจะให้สัญญาณผ่านออกไปแสดงบนจอของเรดาร์แต่ถ้าไม่ตรงจะไม่ให้สัญญาณผ่านออกไปและแสดงว่าเป็นข้าศึก



ภาพที่ 8-2 ส่วนประกอบของระบบพิสูจน์ฝ่าย

2. การตอบ Transponder Set มีหน้าที่ตอบการถามของ Interrogator ตามปกติจะติดตั้งอยู่บนเครื่องบินมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

2.1 สายอากาศ (Antenna) เป็นแบบ Omni ทำหน้าที่ในการรับส่งสัญญาณอาร์เอฟกับ Interrogator

2.2 เครื่องรับ (Receiver) ทำหน้าที่รับสัญญาณการถามจาก Interrogator ด้วยความถี่ 1030 MHz ผ่านสายอากาศแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณวิดีโอส่งให้กับภาค Decoder

2.3 เครื่องถอดรหัส (Decoder) ทำหน้าที่ตรวจสอบสัญญาณที่รับเข้ามาว่าเป็นสัญญาณหลักที่ส่งมาจากสายอากาศแบบบังคับทิศทาง (SUM Antenna) หรือมาจาก ISLS ของ Interrogator (ส่งโดยสายอากาศแบบ Omni) โดยนำสัญญาณทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน หากระดับสัญญาณของ SUM สูงกกว่าแสดงว่าส่งมาจากทิศทางที่ถูกต้องแล้วจึงจะทำการตรวจสอบ Mode การถามอีกครั้งว่าตรงกันหรือไม่หากกตรงกันจะส่งต่อให้กับภาคเข้ารหัส (Encoder)

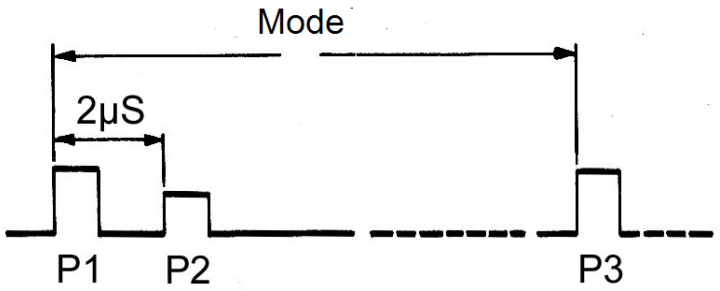
2.4 ภาคเข้ารหัส (Encoder) ทำหน้าที่เปลี่ยนรหัสตัวเลขจากหน้าเครื่องเป็นรูปแบบของพัลส์ (Reply Code) สัมพันธ์กับ Mode ที่ถูกถามมา

2.5 ภาคเครื่องส่ง (Transmitter) ทำหน้าที่รับ Reply Code จาก Encoder มอทด้วยความถี่ 1090 MHz ทำการขยายกำลังให้สูงขึ้นแล้วส่งให้สายอากาศต่อไป

ลักษณะของสัญญาณถามและสัญญาณตอบในระบบพิสูจน์ฝ่าย

1. ลักษณะของสัญญาณถาม (Mode) ใน Interrogator

ลักษณะของสัญญาณถาม (Mode) ใน Interrogator จะประกอบด้วย Pulse จำนวน 3 Pulse ดังภาพที่ 8-3 ได้แก่ P1 , P2 และ P3 แต่ละ Pulse กว้าง $0.9\mu Sec.$ ระยะห่างระหว่าง P2 และ P3 ห่างกัน $2\mu Sec.$ โดยระยะความห่างระหว่าง P1 และ P3 กำหนดตามค่าของ Mode การถามของ Interrogator ตามตารางที่ 8-2 สัญญาณถาม Mode (P1 และ P3) จะถูกส่งออกทางสายอากาศบังคับทิศทาง ส่วน P2 ใช้สำหรับส่ง ISLS (Interference Side Lobe suppression) ออกทางสายอากาศไม่บังคับทิศทาง (Omni-directional)



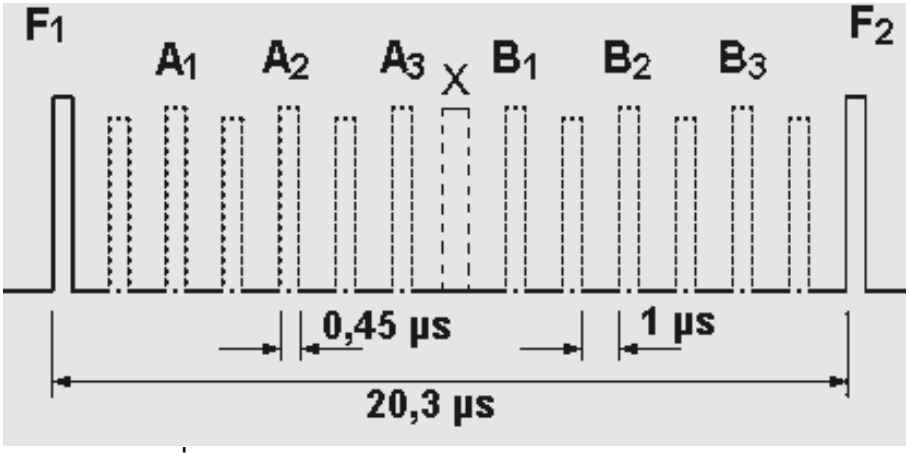
ภาพที่ 8-3 รูปแบบของสัญญาณถาม

ตารางที่ 8-2 ระยะห่างของ Mode และการใช้งาน

Time P1 – P3 (μSec)	MODE	ใช้ใน กิจการด้าน	ประเภทการใช้งาน
3	1	ทหาร	ยุทธการ
5	2	ทหาร	ยุทธการ
8	3	ทหาร	ใช้ควบคุมจราจรทางอากาศ
8	A	พลเรือน	ใช้ควบคุมจราจรทางอากาศ
17	B	พลเรือน	ใช้เฉพาะ UK
21	C	พลเรือน/ทหาร	ใช้ถามความสูง
25	D	พลเรือน	Not Used
-	4 (Secure Mode)	ทหาร	ใช้ในกลุ่มประเทศ Nato
	S (Selective)	พลเรือน	ใช้ควบคุมจราจรทางอากาศ

2. ลักษณะของสัญญาณตอบ (Reply Code)

2.1 สัญญาณตอบปกติ (NORMAL REPLY) ของเครื่องตอบ ประกอบด้วยพัลส์จำนวน 15 พัลส์ ดังภาพที่ 8-4 โดยพัลส์ที่ 1 เรียกว่า Start pulse (F1) พัลส์สุดท้ายที่ 15 เรียกว่า Stop Pulse (F15) และเรียก F1 และ F15 รวมกันเรียกว่า Bracket ข้อมูลรหัส (information) มีจำนวน 13 พัลส์ ได้แก่ ABCD ทั้งหมดยกเว้น X พัลส์ (ใช้เพื่อแสดงว่าไม่มีผู้ขับขี่ยาน No Pilot) แต่ละพัลส์กว้าง $0.45\mu Sec.$ ห่างกัน $1.45\mu Sec.$ รวม F1 และ F2 ห่างกัน $20.3\mu Sec.$ ข้อมูลรหัส (Code) สามารถมีได้ทั้งหมด 0000 – 7777_8 = 4096 Code โดยตัวเลข 0 – 7 แสดงถึงตัวเลขในฐานแปดค่าของสัญญาณตอบรหัสในในแต่ละตำแหน่งแสดงตามตารางที่ 8-3



ภาพที่ 8-4 แบบของสัญญาณตอบปกติใน Mode 2 และ 3/A

ตารางที่ 8-3 ค่าของสัญญาณตอบรหัสในในแต่ละตำแหน่ง

A	B	C	D	หมายเหตุ
A1 = 1000	B1 = 100	C1 = 10	D1 = 1	**ตัวอย่าง Code 3215 มาจาก**
A2 = 2000	B2 = 200	C2 = 20	D2 = 2	**3000+200+10+5 หรือ**
A3 = 4000	B4 = 400	C4 = 40	D4 = 4	**A1,A2,B2,C1, D1,D4**

โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

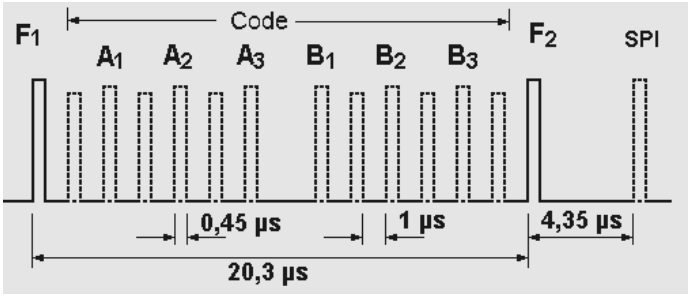
Mode 1 มี 32 Code ประกอบด้วย 2 Groups A และ B (ยกเว้น B4)

Mode 2 , 3/A มีค่า 2^{12} = 4096 Code เกิดจาก 4 Groups ABCD

Mode C มีค่า 2^{11} = 2048 Code ประกอบด้วย 4 Groups ABCD (ยกเว้น D1)

2.2 สัญญาณตอบพิเศษ (SPECIAL REPLAY) ของเครื่องตอบ แบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่

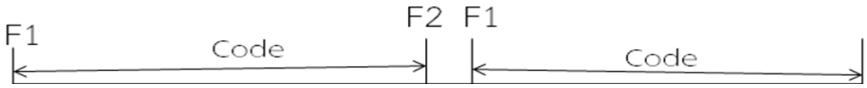
2.2.1 Identification of Position (I / P Replay) หรือ Special Identification (SPI) จะใช้สำหรับแสดงเป้าที่ต้องการรู้ตำแหน่ง ใน PPI โดยการกดปุ่มแสดงตน Ident. (Identification) ที่ Transponder ซึ่ง Transponder จะผลิตสัญญาณ I/ P ระยะห่างจาก F2 เป็นเวลา 20 วินาที ดังภาพที่ 8-5



ภาพที่ 8-5 แบบสัญญาณแสดงตนปกติใน Mode 2 และ 3/A

จากภาพที่ 8-5 สามารถอธิบายการทำงานของโหมดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.2.1.1 Mode 1 ประกอบด้วย Normal Replay จำนวน 2 ชุด โดยมีระยะห่างระหว่างกันคือ 4.35 $\mu Sec.$



ภาพที่ 8-6 รูปแบบสัญญาณแสดงตนปกติใน Mode 1

2.2.1.2 Mode 2 และ 3 /A ประกอบด้วย 1 Normal Reply และ 1 Repetition Start Pulse F3 โดยห่างจาก F2 = 4.35 $\mu Sec.$ ดัง ภาพที่ 8-6

2.2.1.3 Mode C ไม่มี I / P

2.2.2 การตอบในสภาวะฉุกฉิน (Emergency Reply)

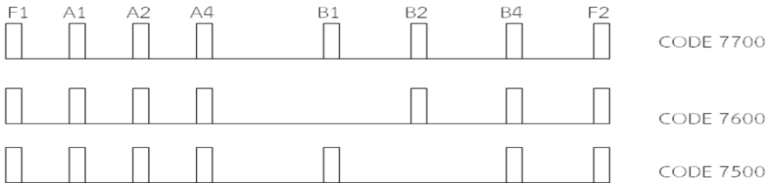
2.2.2.1 การแจ้งฉุกเฉินทางทหาร (Military Emergency or $4X$) ใช้ในกรณีฉุกเฉินทางยุทธวิธี โดยใช้ทั้ง Mode 1, 2, 3 ประกอบด้วย 1 Normal Reply และ 3 Empty Bracket

ภาพที่ 8-7 แสดงแบบสัญญาณแจ้งเหตุ Military Emergency or $4X$

Code 7700 เป็นการบอกเหตุขัดของของเครื่องบินพลเรือน (Civil Emergency) ใช้สำหรับ Mode A หรือ 3 แจ้งเหตุเครื่องยนต์ขัดข้อง

Code 7600 เป็นการแจ้งเหตุ การสื่อสารขัดข้อง

Code 7500 เป็นการแจ้งเหตุ HI- Jack



ภาพที่ 8-8 แสดงแบบสัญญาณแจ้งเหตุรหัส 7700 7600 และ 7500

การแสดงของภาพในจอ PPI ของ Video Decoder AN/UPX – 59A ของที่กองทัพเรือมีใช้จะแสดงที่หลังสัญญาณเป้าของเรดาร์มีลักษณะเป็น

Code 7700 มี ขีด 4 ขีด ห่างกัน 1 ไมล์

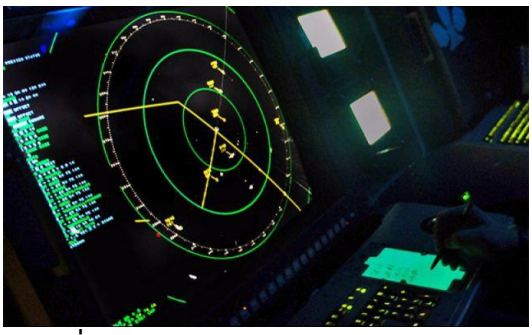
Code 7600 มีขีด 3 ขีด ห่างกัน 1 ไมล์

Code 4X Emergency มีขีด 4 ขีด ห่างกัน 2 ไมล์

Combine Emergency 5 Slashes 1 Mile + 1 Slash 2 Miles

Passive Decode 1 Slash

LAW Video 1 Bracket Code



ภาพที่ 8-9 รูปแบบการแสดงภาพบนจอเรดาร์

ข้อจำกัดต่าง ๆ ในระบบ IFF

1. ข้อจำกัดด้าน PRF เนื่องจากระบบ IFF ในสากลจะใช้ระยะไกลสุดไม่เกิน 200 ไมล์คิดเป็นเวลาที่ใช้ในการถามและตอบคือ

$$200 \times 12.2 \mu Sec. = 2440 \mu Sec.$$

หรือ $$PRF = \frac{1}{PRT}$$

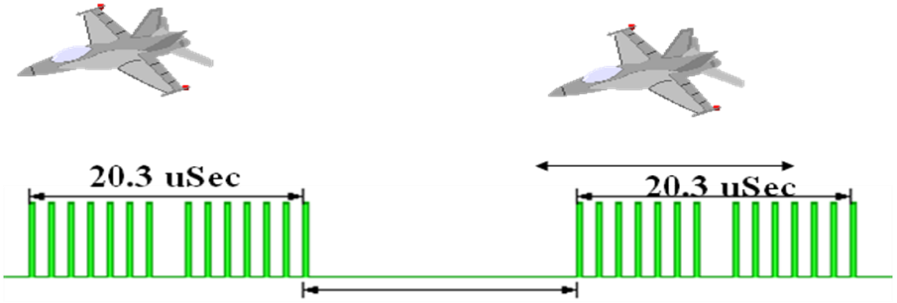
$$= \frac{1}{2440 \mu Sec.0}$$

$$= 409 Hz$$

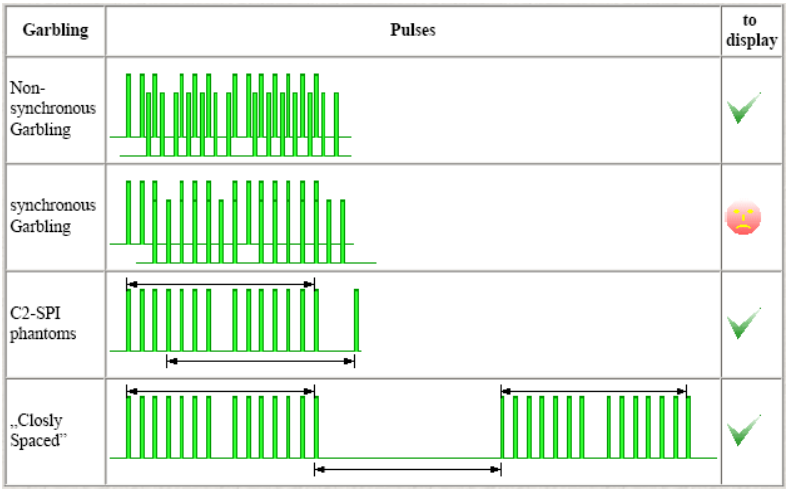
2. สำหรับองค์การ ICAO (International Civil Aviation Organization) กำหนดมาตรฐานของ PRF เท่ากับ 450 Hz เพื่อให้ระบบ IFF ทำงานรวมกับเรดาร์ได้เนื่องจากระบบจะต้องนำ Trigger มาจากเรดาร์เพื่อเริ่มการทำงาน หากความถี่ PRF ของเรดาร์มีค่ามากกว่า Interrogator จะต้องหาร PRF นั้นลงให้น้อยกว่า 450 Hz

3. สัญญาณตอบใน 1 PRT โดยที่ PRF 450 Hz PRT = 2200 $\mu Sec.$ สัญญาณ Reply ความยาว = 20.3 $\mu Sec.$ เพราะฉะนั้นจะตอบได้สูงสุด 2200/20.3 = 100 ครั้ง ในทางระยะหรือเมื่ออยู่ในแบริงเดียวกันไม่เช่นนั้นสัญญาณตอบจะซ้อนกันไม่สามารถอ่านโค้ดได้

4. ระยะใกล้สุดระหว่าง Transponder ต้องมากกว่า 20.3 $\mu Sec.$ (1.6 N.M.) ตามภาพที่ 8-10 เพราะจะทำให้ Reply ซ้อนกัน “ GARBLING “ หรือเรียกว่าเครื่องบินบินใกล้กัน อาจทำให้ไม่สามารถอ่าน Code ได้ จากภาพที่ 8-11a สามารถอธิบายได้ว่าหากสัญญาณตอบอยู่ใกล้กันแต่พัลส์อยู่ระหว่างกัน Decoder ยังสามารถอ่านโค้ดได้แต่ถ้าเป็นตามภาพที่ 8-11b มีการทำซ้อนกันจะไม่สามารถอ่านโค้ดได้ ในภาพที่ 8-11c มีการทับซ้อนกันแต่ระยะห่างของ F2 ของลำหลังอยู่ที่ 4.35 $\mu Sec.$ ทำให้ Decoder อาจอ่านโค้ดได้ และในภาพที่ 8-11d ถ้าอยู่ใกล้กันแต่ไม่ทับซ้อนกันสามารถทำงานได้



ภาพที่ 8-10 ระยะห่างของเครื่องบินต้องห่างกันเกินกว่า 1.6 ไมล์จึงจะไม่เกิด Garbling



ภาพที่ 8-11 ทผลการเกิด Garbling ในระบบพิสูจน์ฝ่าย

5. จำนวนการถามและการตอบมากที่สุดใน 1 รอบสายอากาศสามารถหาได้โดยกำหนดโดยค่าบีมส์ของสายอากาศ ค่า PRF และความเร็วของรอบการหมุนของสายอากาศจำนวนของการถามตอบคำนวณหาค่าเช่นเดียวกับค่า Hit / Scan (ปกติประมาณ 10 – 30) เนื่องจากการตอบแต่ละครั้งต้องใช้อย่างน้อย 2 PRT จึงจะ Decode ได้ (ปกติ 5 –6 ครั้ง) ซึ่งในการใช้งานของ Interrogator ปกติจะทำการถามทุก Mode คือ Mode 1, 2, 3/A และ Mode C นั้นคือในแต่ละรอบสายอากาศจะต้องมีการถามตอบไม่ต่ำกว่า 8 ครั้ง

$$Hit / Scan = \frac{\beta \times PRE}{6RPM}$$

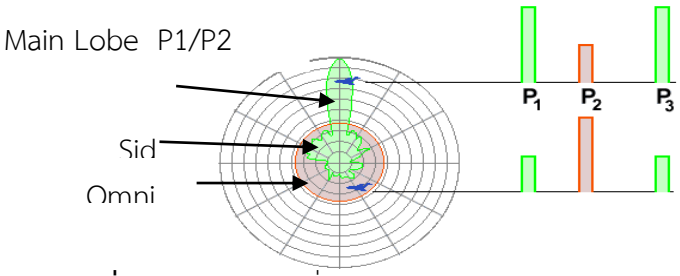
ระบบ Synchronizer กับ เรดาร์

6. ระยะทางที่แสดง ในระบบการรับของเรดาร์จะถือว่าเวลาตั้งแต่ของแรกของพัลส์ส่งเป็นระยะที่ศูนย์แต่ในระบบพิสูจน์ฝ่ายนับตั้งแต่ได้รับสัญญาณ Trigger เรดาร์เข้ามาต้องขบวนการสร้างการทำงานต่าง ๆ ทั้งใน Interrogator เองหรือที่ Transponder ต้องเสียเวลาไปจำนวนหนึ่งสัญญาณตอบที่ได้จะเกิดหลังจากเป้าเรดาร์เกินไป จึงต้องมีการส่งสัญญาณที่ เรียกว่า Pre-trigger ซึ่งเกิดก่อนที่เรดาร์จะเริ่มทำการส่งประมาณ -80 $\mu Sec.$ ตามปกติสัญญาณตอบของระบบพิสูจน์ฝ่ายจะอยู่หลังเป้าเล็กน้อยเพื่อให้มองเห็นทั้งเป้าของเรดาร์กับสัญญาณตอบของระบบพิสูจน์ฝ่าย

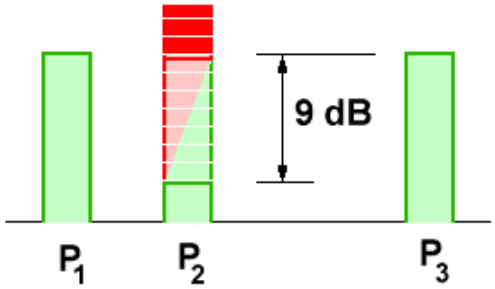
7. ตำแหน่งของเป้าทาง Bearing เช่นเดียวกันเป้าที่เกิดจากเรดาร์จากเครื่องบินลำเดียวกันจะต้องเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันสายอากาศของระบบพิสูจน์ฝ่าย จึงต้องติดทับไปบนสายอากาศเรดาร์และหมุนพร้อมกันไปด้วยกัน

8. Ring Around เนื่องจากความถี่ค่อนข้างต่ำ

เกิดจากความถี่ที่มีการส่งด้วยสายอากาศแบบ Multi-Dipole ทำให้มี Side Lobe มากทำให้ Transponder รับและตอบตลอดเวลาจึงปรากฏสัญญาณตอบเป็นวงกลม (Ring Around) จึงมีการให้ Interrogator ส่ง P1 และ P2 ในสายอากาศแบบ SUM (Directional หรือ Main Lobe) ภาพที่ 8-12 และส่ง P2 ในสายอากาศแบบ Omni-directional (DIF) ตามภาพที่ 8-13 Side Lobe เพื่อให้ Transponder ตรวจว่าจะต้องตอบเฉพาะส่วนที่เป็น Main Lobe คือ P1 และ P3 ต้องมีค่ามากกว่า P2 อย่างน้อย 9 dB ตามภาพที่ 8-13



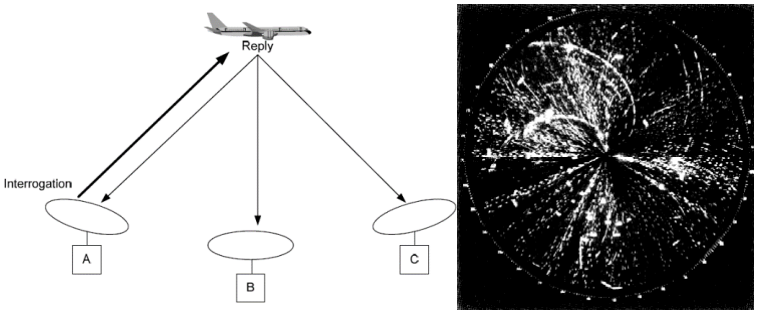
ภาพที่ 8-12 การแพร่คลื่นของ Interrogator



ภาพที่ 8-13 การเปรียบเทียบสัญญาณของ Transponder

9. การเกิด FRUIT (False Replies Unsynchronized to Interrogator Transmission)

เนื่องจากมี Interrogator หลายตัวอยู่ใกล้กันเช่นตัว A ถามเครื่องบินจะตอบโดย Transponder สัญญาณตอบนั้นจะเข้ามาที่เครื่อง B และ C เป็นสัญญาณรบกวน ภาพที่ 8-14



ภาพที่ 8-14 การเกิด FRUIT ในระบบพิสูจน์ฝ่าย

ระบบพิสูจน์ฝ่ายสมัยใหม่

ในการใช้งานของระบบพิสูจน์ฝ่ายใน Mode 1, 2,3/A และ C นี้เริ่มใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975 และถูกเรียกว่าระบบ IFF Mark X ต่อมาในการใช้งานทางปฏิบัติของการพิสูจน์ฝ่ายเกิดปัญหาว่าขณะการใช้งานหาก Transponder ซึ่งติดบนเครื่องบิน ถูกถามไม่ว่าเป็นฝ่ายใดหากตรง Mode จะต้องตอบดังนั้นถ้าข้าศึกถามและตอบกลับไปข้าศึกก็สามารถถอดรหัสของ Transponder ของเครื่องบินนั้นได้และทำลายเครื่องบินของแล้วใช้รหัสเดิมบินเข้ามาทำลายฝ่ายเราเป็นสิ่งที่ต้องป้องกัน ทางประเทศ NATO จึงต้องปรับปรุงเป็นระบบพิสูจน์ฝ่ายที่เรียกว่า IFF Mark XII โดย การเพิ่ม Mode 4 (Secure Mode) เข้ามาหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Crypto Mode โดยหลักการทำงานจะเปลี่ยนใหม่ให้ Interrogator เป็นผู้กำหนดรหัสส่ง $\left(Crypto = 2^{32} code\right)$ และ Transponder เป็นผู้ถอดรหัสและแปลความหมายส่งกลับ หากความหมายตรงกันทั้งไปและกลับจะถือว่าเครื่องบินลำนั้นเป็นฝ่ายเดียวกัน

ในการใช้งานของ Mode 4 ยังพบปัญหาที่ตามมาในการรบเครื่องบินต้องออกหลายลำในการกำหนดรหัสระหว่าง Interrogator และ Transponder จะต้องตรงกันแล้วจะทราบได้อย่างไรว่าเป็นเครื่องบินลำใดจึงเพิ่ม Mode ใหม่เป็น Mode 5 มีรหัสประจำเครื่อง 2^{24} รหัสซึ่ง Interrogator สามารถถามพร้อมกันทุกลำหรือเฉพาะลำได้และการตอบจะบอกชื่อและตำแหน่งของเครื่องบินนั้นๆ

ในทางพลเรือนก็ประสบปัญหาในการแสดงตนเช่นกัน เนื่องจากเครื่องบินจะต้องถูกควบคุมความปลอดภัยในการเดินอากาศ เช่น ในสนำมบินใด ๆ ต้องการทราบว่าเครื่องที่เข้ามานั้นเป็นสายการบินใดจากเดิม Mode A ของพลเรือนสามารถมีรหัสได้สูงสุด 4096 รหัส เมื่อเครื่องบินบินระหว่างประเทศทั่วโลกรหัสที่มีอยู่จึงไม่พอใช้ ในขั้นต้นองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO: International Civil Aviation Organization) จะเป็นผู้กำหนดรหัสของเครื่องบินแต่ละลำของสายการบินต่างๆทั่วโลกว่าเมื่อบินผ่านเขตของสนำมบินใดต้องเปลี่ยนรหัสไปตามที่ ICAO กำหนดเป็นเรื่องที่ยุ่งยากมากจึงเปลี่ยนมาเป็นการใช้ Mode S (Selective Mode) โดยกำหนดให้เครื่องบินแต่ละลำต้องขึ้นทะเบียนกับ ICAO และกำหนดรหัสประจำเครื่องได้จำนวน 2^{24} บิท (16,77,214 Code) ส่วนการถามตอบเป็นลักษณะเดียวกันกับ Mode 5 ของทางทหาร ปัจจุบันกำลังมีความพยามให้เครื่องบินทุกลำของพลเรือนใช้ Mode นี้

ในปัจจุบันกองทัพเรือยังคงใช้ระบบ IFF Mark X เป็นบางส่วนในระบบใหม่ๆจะเป็น IFF Mark XII ซึ่งประกอบด้วย Mode 1, 2,3/A, C และ S แต่การแสดงผลของสัญญาณตอบจะไม่เป็นสัญญาณเป็นขีดหลังเรดาร์แล้ว แต่รหัสที่ตอบกลับมาจะถูกถอดเป็นรหัสตัวเลขขึ้นแสดง หลังเป้าเรดาร์แทนแบบเดิม

9 การสงครามอิเล็กทรอนิกส์ Electronic War Fare

บทนำ

การสงครามอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic War Fare) หมายถึง การปฏิบัติการทางทหารเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อค้นหามาใช้ประโยชน์ ลดหรือป้องกันการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของข้าศึก และดำรงการใช้แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของฝ่ายเดียวกันให้ดำรงอยู่ ดังนั้น ผู้ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าจะเป็นผู้ที่ได้เปรียบและเป็นฝ่ายคุกคามของอีกฝ่ายหนึ่ง

ความสำคัญของการทำสงครามอิเล็กทรอนิกส์

ในต้นสงครามโลกครั้งที่ 1 กองทัพรัสเซียต้องพ่ายแพ้ต่อเยอรมันที่สนำมรบ Tannenberg โดยจอมพล Hindenburg เนื่องจากเยอรมันสามารถดักรับการสื่อสารโดยไม่มีการเข้ารหัสได้ ในช่วงต้นของสงครามโลกครั้งที่ 2 การสื่อสารโดยทั่วไปจึงจำเป็นต้องเข้ารหัส โดยที่เยอรมันใช้ Enigma Ultra เป็นรหัสในการสื่อสาร และ ญี่ปุ่น ใช้ Purple code (Magic หรือ Cryptography) เป็นรหัสในการสื่อสาร

ในสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพอังกฤษเริ่มมีการใช้การรบกวนการสื่อสารของเยอรมันไม่ให้ใช้ได้ทาง กองทัพเยอรมันแก้ไขสถานการณ์นี้ โดยการเพิ่มขนาดกำลังส่งของคลื่นวิทยุจนสูงกว่าสัญญาณรบกวนและสามารถรับสัญญาณของฝ่ายตนเองได้ นั่นหมายถึงการที่มีการเข้าตีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยอังกฤษและทำการป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์โดยเยอรมัน

การตื่นตัวในการทำสงครามอิเล็กทรอนิกส์เริ่มครั้งแรกเมื่อ สงคราม 6 วันระหว่างประเทศอิสราเอลกับกลุ่มประเทศอาหรับ ซึ่งอิสราเอลใช้เทคนิค การควบคุมการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของฝ่ายเดียวกันเพื่อไม่ให้ข้าศึกจับสัญญาณของฝ่ายตนได้ในขณะเดียวกันก็คอยจับและค้นหาทิศทางของสัญญาณ ของข้าศึก การหลบหลีกสัญญาณเรดาร์ของเครื่องบินทำให้สามารถชนะสงครามด้วยเวลาเพียง 6 วัน

ครั้งที่สองในสงครามอ่าวระหว่างประเทศสหรัฐอเมริกากับประเทศอิรัก มีการพัฒนารูปแบบเพิ่มขึ้น กล่าวคือสหรัฐอเมริกาใช้เทคนิคเพิ่มขึ้นคือควบคุมการแพร่คลื่นการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของฝ่ายข้าศึกหรือประเทศอิรัก ทำให้ประเทศอิรักไม่สามารถใช้การสื่อสารหรือเรดาร์ใด ๆ ต่อต้านการบุกของสหรัฐอเมริกาได้เลย

ความหมายของการทำสงครามอิเล็กทรอนิกส์

การสงครามอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic War Fare) หมายถึง การปฏิบัติการทางทหารเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าทเพื่อค้นหามาใช้ประโยชน์ ลดหรือป้องกันการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของข้าศึก และดำรงการใช้แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของฝ่ายเดียวกันให้ดำรงอยู่

ดังนั้น ผู้ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่าจะเป็นผู้ที่ได้เปรียบ และเป็นฝ่ายคุกคามของอีกฝ่ายหนึ่ง การทำสงครามอิเล็กทรอนิกน์จุดมุ่งหมายของการทำสงครามแบ่งออกเป็น 3 จุดมุ่งหมาย ได้แก่

1. มาตรการสนับสนุนทางอิเล็กทรอนิกส์ (ESM)

หลักการทำงานของเรดาร์ คล้ายคลึงกับการทำงานของเสียงสะท้อน หรือการสะท้อนคลื่น

2. มาตรการต่อต้านทางอิเล็กทรอนิกส์ (ECM)

หลักการทำงานของเรดาร์ คล้ายคลึงกับการทำงานของเสียงสะท้อน หรือการสะท้อนคลื่น

3. มาตรการตอบโต้การต่อต้านทางอิเล็กทรอนิกส์ (ECCM)

หลักการทำงานของเรดาร์ คล้ายคลึงกับการทำงานของเสียงสะท้อน หรือการสะท้อนคลื่น

SIGNAL INTELLIGENCE (SIGINT)

SIGNAL INTELLIGENCE หมายถึง การรวบรวม การประเมินค่า แยกแยะ การแปลความหมายและนำมาใช้ประโยชน์ในข่าวสาร ด้านยุทธการและเทคนิค พื้นที่ปฏิบัติการข่าวสาร ที่เกี่ยวข้องโดยตรงหรืออาจเกี่ยวข้องกบการสงครามอิเล็กทรอนิกส์

ประโยชน์ของการใช้ SIGNAL INTELLIGENCE

1. ได้รู้ถึงการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของข้าศึกในรูปแบบต่าง ๆ ชนิดของอุปกรณ์ ลักษณะและวิธีการใช้สถานที่ติดตั้ง
2. ได้รู้ถึงขีดความสามารถของข้าศึก
3. สามารถทราบถึงการเคลื่อนไหวการเคลื่อนกำลังของข้าศึก
4. เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างเราและข้าศึกสามารถที่จะ

4.1 แยกสัญญาณที่ตรวจจับได้ว่าเป็นฝ่ายใด

4.2 ประเมินศักย์ภาพของแต่และฝ่ายในการทำสาครามในรูปแบบการคนกับอาวุธหรือการใช้สงครามอิเล็กทรอนิกส์

5. แหล่งของการเก็บรวบรวมข้อมูล SIGNAL INTELLIGENCE