# ตำราฝึกงานในหน้าที่
# จำพวกทหารสารสนเทศ
# และสงครามอิเล็กทรอนิกส์

## ลชทอ.๒๗๑๓๐

## ลชทอ.๒๗๑๕๐

## ลชทอ.๒๗๑๗๐

ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น

กองสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์
สำนักนโยบายและแผน
กรมเทคโนโลยีสารสนเทศ
และการสื่อสารทหารอากาศ

# คำนำ

วิชาสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ ถือเป็นวิชาหนึ่งที่มีความสำคัญยิ่ง เป็นพื้นฐานสำคัญในการนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในระบบและอุปกรณ์เทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนต่างๆ ในปัจจุบันของกองทัพอากาศ ได้แก่ ระบบสื่อสารโทรคมนคม ระบบเครื่องช่วยเดินอากาศ ระบบวิทยุสื่อสาร และระบบเรดาร์ เป็นต้น

ดังนั้น คณะผู้จัดทำ จึงได้รวมรวมและจัดทำตำราสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ขึ้น เพื่อให้ ผู้ปฏิบัติงานได้ศึกษาด้วยตนเอง ซึ่งจะทำให้เข้าใจวิชาพื้นฐาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในเทคโนโลยีหรืออุปกรณ์ขั้นสูงต่างๆ ได้ต่อไป

คณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณเจ้าของเนื้อหา และข้าราชการทุกท่านที่ได้ร่วมกัน จัดทำตำราสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา จนสามารถนำไปใช้ ในการทำงานได้เป็นอย่างดี และหากมีข้อผิดพลาดบกพร่องประการใดในตำราเล่มนี้ คณะผู้จัดทำ ต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

กสอ.สนผ.ทสส.ทอ.

กันยายน พ.ศ.๒๕๖๕

# สารบัญ

**คำนำ** ก
**สารบัญ** ข
**สารบัญรูปภาพ** ค
**บทที่ ๑ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์** ๑
๑. ความเป็นมา หรือ กล่าวทั่วไป ๑
๒. ทฤษฎี ๑๑
๓. การบำรุงรักษา ๑๖
๔. การใช้งาน ๑๗
**บทที่ ๒ ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ทอ.** ๑๙
๑. พื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคม ๑๙
๒. ระบบโทรคมนาคม ทอ. ๒๕
๓. ระบบวิทยุไมโครเวฟ ทอ. ๓๔
**บทที่ ๓ ระบบเครื่องช่วยเดินอากาศ ทอ**. ๓๙
๑. บทนำ ๓๙
๒. หลักการทำงานของเครื่องช่วยเดินอากาศภาคพื้นและภาคอากาศ ๔๒
๓. แนวโน้มเครื่องช่วยเดินอากาศในอนาคต ๗๓
**บทที่ ๔ ระบบวิทยุสื่อสาร ทอ.** ๗๔
๑. บทนำ ๗๔
๒. หลักการทำงานระบบวิทยุสื่อสาร ๑๐๓
๓. ระบบวิทยุสื่อสารภาคพื้น ๑๑๘
๔. ระบบวิทยุสื่อสารภาคอากาศ ๑๓๔
๕. แนวโน้มระบบวิทยุสื่อสารในอนาคต ๑๔๗
**บทที่ ๕ ระบบเรดาร์ ทอ.** ๑๕๐
๑. บทนำ ๑๕๐
๒. หลักการทำงานของเรดาร์ ๑๕๒
๓. ระบบป้องกันทางอากาศ ๑๖๖
๔. ระบบเรดาร์พิสูจน์ฝ่าย IFF/SIF ๑๖๘
๕. การประเมินค่าเรดาร์ ๑๗๐

# สารบัญรูปภาพ

**รูปที่** หน้า
รูปที่ ๑.๑ วงจรแสงสว่าง ๑
รูปที่ ๑.๒ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ๑
รูปที่ ๑.๓ วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ๒
รูปที่ ๑.๔ เส้นทางระบบไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าถึงบ้านเรือน ๒
รูปที่ ๑.๕ วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ๑ เฟส ๓
รูปที่ ๑.๖ ระบบสายไฟภายในบ้าน ๓
รูปที่ ๑.๗ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ๔
รูปที่ ๑.๘ ฟิวส์ชนิดต่างๆ ๔
รูปที่ ๑.๙ การทำงานของสวิตซ์ ๕
รูปที่ ๑.๑๐ ส่วนประกอบของสะพานไฟ ๕
รูปที่ ๑.๑๑ สวิตซ์อัตโนมัติหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ ๖
รูปที่ ๑.๑๒ สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ๖
รูปที่ ๑.๑๓ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ๗
รูปที่ ๑.๑๔ มัลติมิเตอร์ ๘
รูปที่ ๑.๑๕ ตัวต้านทาน ๘
รูปที่ ๑.๑๖ ตัวเก็บประจุ ๙
รูปที่ ๑.๑๗ ไดโอด ๙
รูปที่ ๑.๑๘ ทรานซิสเตอร์ ๙
รูปที่ ๑.๑๙ หม้อแปลง ๑๐
รูปที่ ๑.๒๐ วงจรรวม IC ๑๐
รูปที่ ๑.๒๑ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวต้านทาน ๑๑
รูปที่ ๑.๒๒ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ๑๒
รูปที่ ๑.๒๓ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ๑๓
รูปที่ ๑.๒๔ กฎของโอห์ม ๑๕
รูปที่ ๒.๑ แสดงการทำงานของระบบโทรคมนาคม ๒๐
รูปที่ ๒.๒ แสดงการสื่อสารข้อมูลทิศทางเดียว ๒๑
รูปที่ ๒.๓ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน ๒๑
รูปที่ ๒.๔ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางพร้อมกัน ๒๑
รูปที่ ๒.๕ แสดงสัญญาณแบบดิจิทัล ๒๒
รูปที่ ๒.๖ แสดงสัญญาณแบบแอนะล็อก ๒๒
รูปที่ ๒.๗ สายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวน UTP (Unshielded Twisted Pair) ๒๒
รูปที่ ๒.๘ สายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวน (Shielded Twisted Pair) ๒๓
รูปที่ ๒.๙ สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) ๒๓
รูปที่ ๒.๑๐ ใยแก้วนำแสง ๒๓
รูปที่ ๒.๑๑ ระบบคลื่นวิทยุไมโครเวฟ ๒๔
รูปที่ ๒.๑๒ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ๒๔

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)


**รูปที่** หน้า

รูปที่ ๒.๑๓ วิวัฒนาการของระบบโทรคมนาคมกองทัพอากาศ ๒๕

รูปที่ ๒.๑๔ ขอบเขตการพัฒนายุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ.๒๕๖๑ - ๒๕๘๐) ๒๗

รูปที่ ๒.๑๕ องค์ประกอบหลักของการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ๒๙

รูปที่ ๒.๑๖ การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ๓๐

รูปที่ ๒.๑๗ เครือข่ายโทรคมนาคม ทอ.รองรับเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการยุทธ (CIS Network) และเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน (SIS Network) ๓๐

รูปที่ ๒.๑๘ เครือข่ายโทรคมนาคมกองทัพอากาศในปัจจุบัน ๓๒

รูปที่ ๒.๑๙ แสดงรูปแบบเบื้องต้นของการสื่อสารระบบไมโครเวฟ ๓๕

รูปที่ ๒.๒๐ แสดงการสื่อสารไมโครเวฟชนิดตั้งบนพื้นดิน ๓๖

รูปที่ ๒.๒๑ แสดงโครงสร้างของ Parabolic Reflector ๓๗

รูปที่ ๓.๑ แสดงความสัมพันธ์ ทิศทาง , Track และ Heading ๔๑

รูปที่ ๓.๒ ชุดเครื่องรับและแสดงผลระบบ ADF ๔๓

รูปที่ ๓.๓ Fixed Compass Card ๔๓

รูปที่ ๓.๔ Rotatable Compass Card ๔๓

รูปที่ ๓.๕ Single-Needle Radio Magnetic Indicator ๔๔

รูปที่ ๓.๖ Dual-Needle Radio Magnetic Indicator ๔๔

รูปที่ ๓.๗ การลงสนามบินด้วยเครื่องช่วยเดินอากาศ ILS ๔๕

รูปที่ ๓.๘ สถานี Localizer ๔๖

รูปที่ ๓.๙ การแพร่กระจายคลื่น ของ Localize ๔๖

รูปที่ ๓.๑๐ สถานี Glide Slope ๔๖

รูปที่ ๓.๑๑ การแพร่กระจายคลื่น ของ Glide Slope ๔๗

รูปที่ ๓.๑๒ การแพร่กระจายคลื่น ของ Marker Beacon ๔๗

รูปที่ ๓.๑๓ การทำงานของระบบ ILS ภาคอากาศ ๔๘

รูปที่ ๓.๑๔ การบินเข้าโดยใช้ระบบ Localizer ๔๙

รูปที่ ๓.๑๕ การแสดงผลเครื่องวัดบนอากาศยานโดยใช้สถานี Localizer ๔๙

รูปที่ ๓.๑๖ การบินเข้าและแสดงผลเครื่องวัดบนอากาศยานโดยใช้ระบบ Glide Slope ๕๐

รูปที่ ๓.๑๗ สถานี VOR ๕๑

รูปที่ ๓.๑๘ หลักการแพร่สัญญาณระบบ VOR ๕๓

รูปที่ ๓.๑๙ หน้าปัด แสดงข้อมูลของ VOR บนเครื่องบิน ๕๔

รูปที่ ๓.๒๐ การแสดงผลการบินตรงกับ Course ๕๔

รูปที่ ๓.๒๑ การแสดงผลการบินไม่ตรงกับ Course ๕๕

รูปที่ ๓.๒๒ การแสดงผลระบบ VOR ใช้งานไม่ได้ ๕๕

รูปที่ ๓.๒๓ Mobile TACAN ๕๖

รูปที่ ๓.๒๔ การรับสัญญาณ TACAN บน อากาศยาน ๕๙

รูปที่ ๓.๒๕ TACAN Transceiver ๕๙

รูปที่ ๓.๒๖ การรับส่งสัญญาณ TACAN ๖๑

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)


**รูปที่** หน้า

รูปที่ ๓.๒๗ การให้ข้อมูลของระบบ TACAN ๖๑

รูปที่ ๓.๒๗ Horizontal Situational Indicator (HSI) ๖๒

รูปที่ ๓.๒๘ การรับส่งสัญญาณ DME ๖๓

รูปที่ ๓.๒๙ การวัดระยะทางแบบ Slant Distance ๖๔

รูปที่ ๓.๓๐ DME Indicator ๖๖

รูปที่ ๓.๓๑ Inertial Navigation Unit Frontispiece ๖๖

รูปที่ ๓.๓๒ Gymbal ๖๗

รูปที่ ๓.๓๓ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยาน ๖๗

รูปที่ ๓.๓๔ GPS Navigation ๖๙

รูปที่ ๓.๓๕ เครือข่าย ระบบ GPS ๖๙

รูปที่ ๓.๓๖ GPS Master Control and Monitor Station Network ๗๐

รูปที่ ๓.๓๗ Block Diagram ของเครื่องรับ GPS ๗๑

รูปที่ ๓.๓๘ ตำแหน่งการติดตั้ง Antenna ๗๒

รูปที่ ๔.๑ การกระจายพลังงานของคลื่น ๗๕

รูปที่ ๔.๒ การหักเหของคลื่น ๗๖

รูปที่ ๔.๓ การเดินทางของคลื่นในบรรยากาศ ๗๖

รูปที่ ๔.๔ การแผ่พลังงานของหน้าคลื่น ๗๗

รูปที่ ๔.๕ การเลี้ยวอ้อมสันเขาของคลื่น ๗๗

รูปที่ ๔.๖ คลื่นสะท้อนจากสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ ๗๘

รูปที่ ๔.๗ ระบบการสื่อสารในแนวสายตา หรือ Line-of-Sight ๘๐

รูปที่ ๔.๘ สเปคตรัมของแสงที่มองเห็นได้ ๘๑

รูปที่ ๔.๙ ความยาวคลื่น ๘๑

รูปที่ ๔.๑๐ การแพร่กระจายคลื่นของย่านความถี่ ELF, VLF และ LF ๘๓

รูปที่ ๔.๑๑ ภาพการสะท้อนของคลื่นกลับไปกลับมาระหว่างพื้นโลก
กับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ๘๕

รูปที่ ๔.๑๒ ระยะทางในการติดต่อสื่อสารกับความสูงของสายอากาศทั้งด้านรับและด้านส่ง ๘๖

รูปที่ ๔.๑๓ การใช้งานย่านความถี่ ในลักษณะของแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) ๘๖

รูปที่ ๔.๑๔ การสะท้อนของคลื่น ๘๘

รูปที่ ๔.๑๕ การหักเหของคลื่น (Refraction) ๘๘

รูปที่ ๔.๑๖ การโน้มรอบวัตถุ ๘๙

รูปที่ ๔.๑๗ Forward Tilt ๙๑

รูปที่ ๔.๑๘ คลื่นตกกระทบชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ ๙๒

รูปที่ ๔.๑๙ การแพร่กระจายคลื่นตรง ๙๒

รูปที่ ๔.๒๐ คลื่นสะท้อนพื้นดิน ๙๔

รูปที่ ๔.๒๑ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ๙๕

รูปที่ ๔.๒๓ ชั้นบรรยากาศที่ถูกแบ่งออกตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ๙๖

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

**รูปที่** หน้า
รูปที่ ๔.๒๔ ความผันผวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ๙๗
รูปที่ ๔.๒๕ ภาพแสดงเส้นทางการแพร่คลื่นฟ้าผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และย่านกระโดด ระยะทางที่คลื่นฟ้าสามารถเดินทางไปได้นั้น ขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์เหนือพื้นโลก ๙๘
รูปที่ ๔.๒๖ ภาพแสดงของเส้นทางวงรอบใหญ่ (Great Circle Path) ๙๙
รูปที่ ๔.๒๗ การสื่อสารด้วยคลื่นฟ้าระยะไกล ๑๐๐
รูปที่ ๔.๒๘ การพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้า กรณีมุมส่งออกหรือ TOA คงที่ ๑๐๑
รูปที่ ๔.๒๙ การพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้า กรณีระยะทางที่ต้องการติดต่อคงที่ ๑๐๒
รูปที่ ๔.๓๐ องค์ประกอบการสื่อสารวิทยุอย่างง่าย ๑๐๓
รูปที่ ๔.๓๑ ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องส่งแบบ AM ๑๐๔
รูปที่ ๔.๓๒ การมอดูเลตคลื่นต้นแบบให้เป็นคลื่น AM ๑๐๕
รูปที่ ๔.๓๓ แถบความถี่และแบนด์วิดท์ของคลื่น AM ๑๐๖
รูปที่ ๔.๓๔ ภาพแสดงการมอดูเลชั่นแบบ AM ซึ่งยังคงรูปร่างของ Envelope เดิม ๑๐๖
รูปที่ ๔.๓๕ ภาพแสดงเอาต์พุตของเครื่องส่งระบบ AM ที่มอดูเลตกับสัญญาณเสียง ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นลง ๑๐๗
รูปที่ ๔.๓๖ การมอดูเลชั่น ๑๐๘
รูปที่ ๔.๓๗ เครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอร์โรดายน์ ๑๐๙
รูปที่ ๔.๓๘ หลักการทำงานเครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอร์โรดายน์ ๑๑๐
รูปที่ ๔.๓๙ การมอดูเลชั่น ๑๑๑
รูปที่ ๔.๔๐ แบนด์วิดท์ของคลื่น FM ๑๑๒
รูปที่ ๔.๔๑ Block Diagram ของภาครับวิทยุแบบ FM ๑๑๓
รูปที่ ๔.๔๒ Crystal Oscillator ๑๑๖
รูปที่ ๔.๔๓ บล็อกไดอะแกรมเครื่องรับ SSB ๑๑๗
รูปที่ ๔.๔๔ การแบ่งส่วนของภูมิภาคในการกำหนดตารางคลื่นความถี่ของ ITU ๑๑๘
รูปที่ ๔.๔๕ แสดงเครื่องรับและเครื่องส่งวิทยุควบคุมการบินแบบ Single Channel ที่ใช้งานใน ทอ. ๑๒๑
รูปที่ ๔.๔๖ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel ๑๒๒
รูปที่ ๔.๒๗ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel-Multi Band-Multi Mode กับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ๑๒๒
รูปที่ ๔.๔๘ เครื่องวิทยุซิงเกิลไซด์แบนด์ที่มีใช้งานในกองทัพอากาศ ๑๒๔
รูปที่ ๔.๔๙ การติดต่อสื่อสารในระบบสื่อสารยุทธวิธี ๑๒๘
รูปที่ ๔.๕๐ วิทยุ VHF/FM Base Station ๑๒๘
รูปที่ ๔.๕๑ วิทยุ VHF/FM Vehicle ๑๒๙
รูปที่ ๔.๕๒ วิทยุแบบ Hand-Held ๑๓๐
รูปที่ ๔.๕๓ ภาพการทำงานพื้นฐานของระบบวิทยุทรั้งค์ ๑๓๑
รูปที่ ๔.๕๔ แสดงภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายผ่านระบบวิทยุทรั้งค์ ๑๓๒

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)


**รูปที่** หน้า

รูปที่ ๔.๕๕ ตัวอย่างการจัดแผนความถี่ในระบบวิทยุทรั้งค์ของประเทศไทย ๑๓๒

รูปที่ ๔.๕๖ การนำระบบโทรคมนาคมเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยระบบวิทยุทรั้งค์ ๑๓๓

รูปที่ ๔.๕๗ Carbon Microphone ๑๓๗

รูปที่ ๔.๕๘ dynamic microphone ๑๓๘

รูปที่ ๔.๕๙ Dynamic Loundspeakers ๑๓๙

รูปที่ ๔.๖๐ Electromagnetic Loudspeaker ๑๓๙

รูปที่ ๔.๖๑ Headset ๑๔๐

รูปที่ ๔.๖๒ การปฏิบัติการใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO : Network Centric Operation) ๑๔๘

รูปที่ ๔.๖๓ การปฏิบัติการที่ใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางเครือข่าย (Radio Centric Network) ๑๔๘

รูปที่ ๕.๑ Echo Ranging Principle ๑๕๒

รูปที่ ๕.๒ การแบ่งระบบเรดาร์ ๑๕๓

รูปที่ ๕.๓ Primary Surveillance Radar (PSR) ๑๕๓

รูปที่ ๕.๔ Secondary Surveillance Radar (SSR) ๑๕๔

รูปที่ ๕.๕ หลักการทำงานของเรดาร์ ๑๕๔

รูปที่ ๕.๖ CW เรดาร์ (Continuous Wave Radar) ๑๕๕

รูปที่ ๕.๗ Pulse เรดาร์ ๑๕๕

รูปที่ ๕.๘ ส่วนประกอบหลักระบบเรดาร์เบื้องต้น ๑๖๐

รูปที่ ๕.๙ Parabolic Antenna ๑๖๒

รูปที่ ๕.๑๐ Linear Array ๑๖๒

รูปที่ ๕.๑๑ Planar Array ๑๖๓

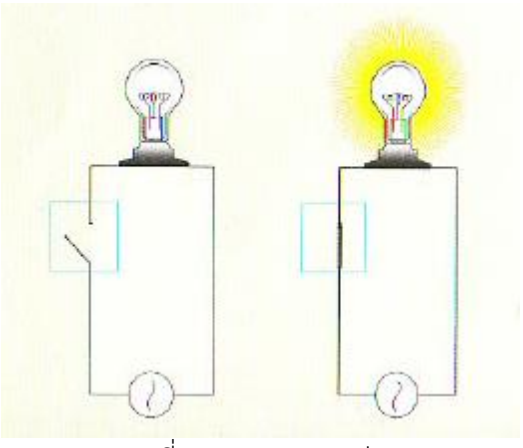
รูปที่ ๕.๑๒ Beam Pattern ๑๖๔

รูปที่ ๕.๑๓ Fan Beam Patternในเรดาร์ค้นหา และ เรดาร์วัดความสูง ความกว้างลำคลื่นทางระดับ ๑๖๔

รูปที่ ๕.๑๔ แสดงถึงองค์ประกอบ ของ IFF/SIF ๑๗๐

# บทที่ ๑
# ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์

## ๑. ความเป็นมาหรือกล่าวทั่วไป



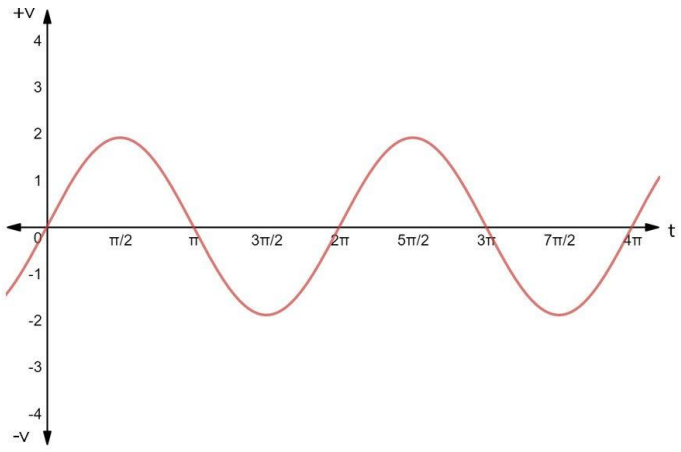
รูปที่ ๑.๑ วงจรแสงสว่าง

พื้นฐานสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ ถือว่าเป็นวิชาหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการศึกษาเกี่ยวกับความรู้ต่างๆในด้านไฟฟ้าสื่อสาร และอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในชีวิตประจำวัน ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในการดำเนินชีวิต โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการเกิดของกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับแรก

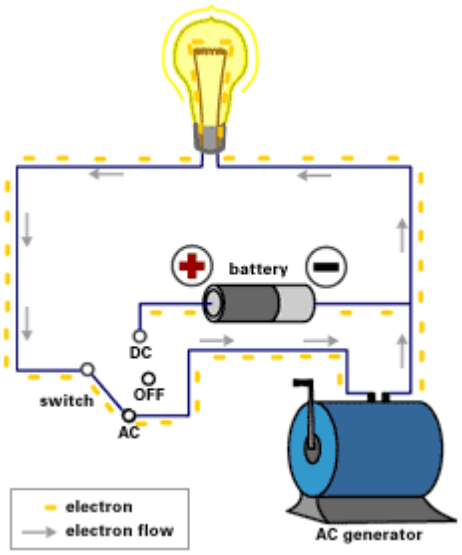
ไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าไปยังที่ต้องการใช้กระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นได้จากแรงกดดัน ความร้อน แสงสว่าง ปฏิกิริยาเคมี และอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งนี้ ไฟฟ้ากระแสแบ่งเป็น ๒ ประเภท ดังนี้

**๑.๑ ไฟฟ้ากระแสสลับ** (Alternating Current : AC) เป็นไฟฟ้าที่มีทิศทางการไหลของกระแสสลับไปสลับมา และขนาดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ไฟฟ้ากระแสสลับได้นำมาใช้ภายในบ้านกับงานต่าง ๆ เช่น ระบบแสงสว่าง

เครื่องรับวิทยุ โทรทัศน์ พัดลม เป็นต้น โดยเชื่อมต่อร่วมกันระหว่างองค์ประกอบทางไฟฟ้าในลักษณะวงจรปิด เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง

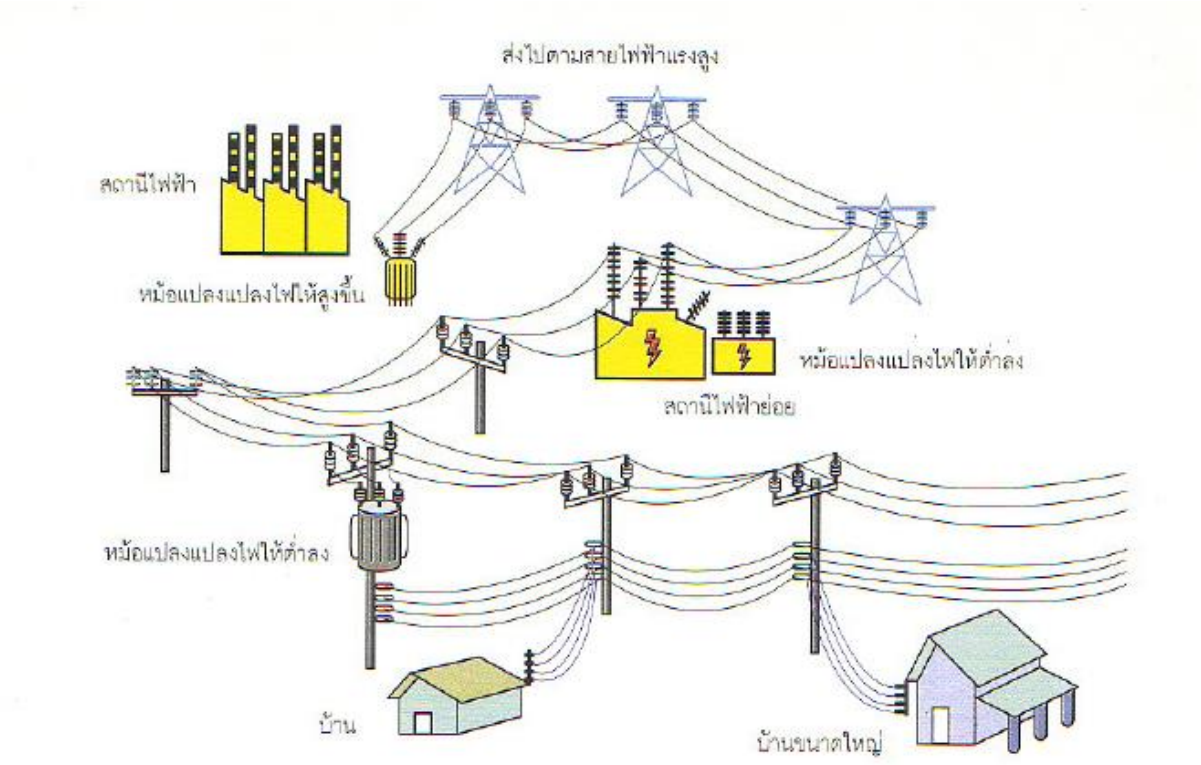



รูปที่ ๑.๒ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

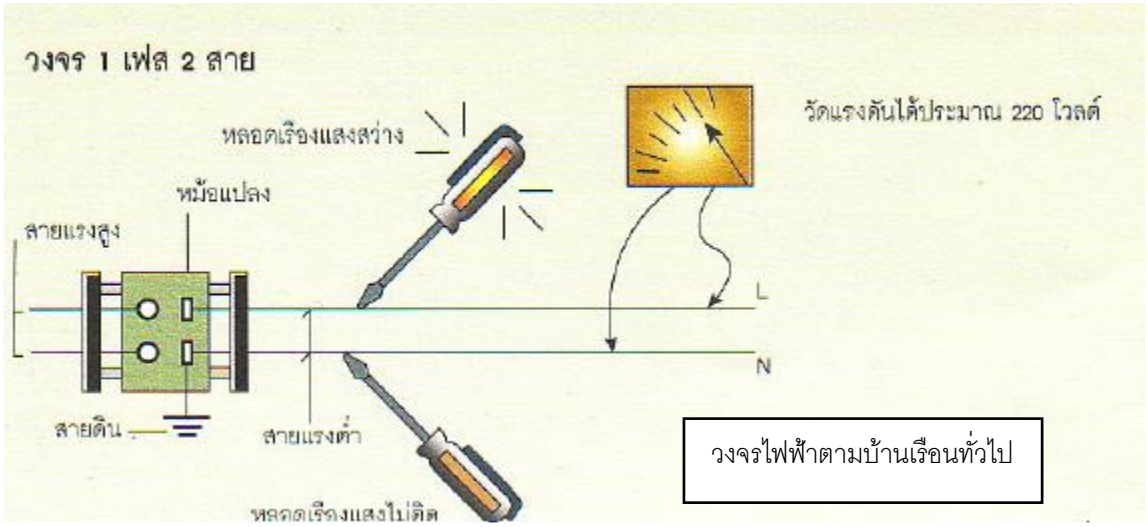



รูปที่ ๑.๓ วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

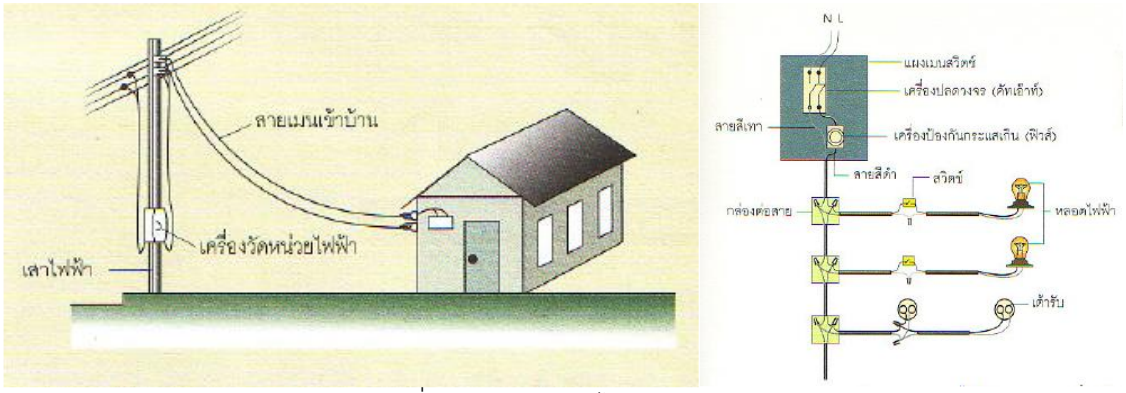
ทั้งนี้ระบบไฟฟ้าตามบ้านเรือนทั่วไปเป็นระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบ ๑ เฟส มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ ๒๒๐ VAC ๕๐ Hz ประกอบด้วยสาย ๒ เส้น คือ สายเส้นที่มีไฟ เรียกว่า สาย Line(L) และอีกเส้นที่เหลือไม่มีไฟ เรียกว่า สาย Neutral(N) มีทิศทางการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าไปสู่บ้านเรือนทั่วไป ดังภาพ




รูปที่ ๑.๔ เส้นทางระบบไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าถึงบ้านเรือน




รูปที่ ๑.๕ วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ๑ เฟส

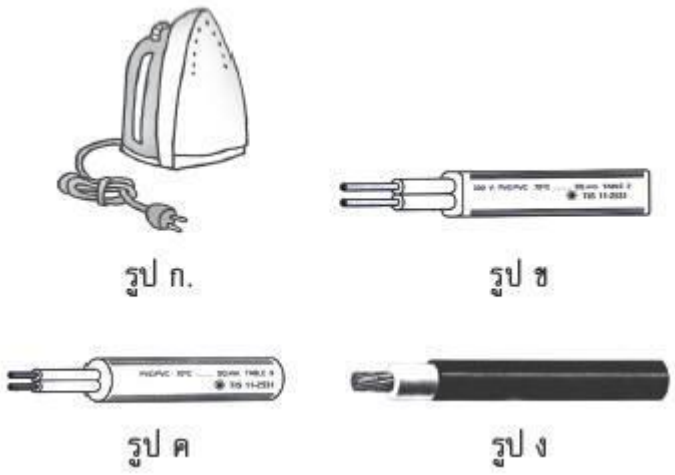



รูปที่ ๑.๖ ระบบสายไฟภายในบ้าน

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย

- **สายไฟ** เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งพลังงานไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยกระแสไฟฟ้าจะนำพลังงานไฟฟ้าผ่านไปตามสายไฟจนถึงเครื่องใช้ไฟฟ้า สายไฟทำด้วยสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า (ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดี) ได้แก่

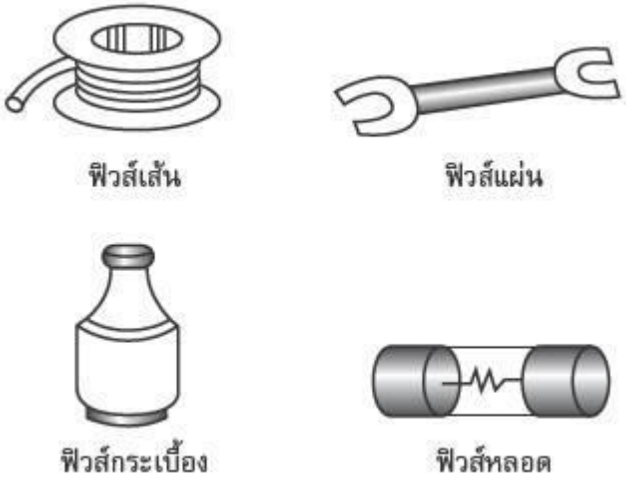
- สายไฟแรงสูง ทำด้วยอะลูมิเนียม เพราะอะลูมิเนียมมีราคาถูก และน้ำ หนักเบากว่าทองแดง
- สายไฟทั่วไป (สายไฟในบ้าน) ทำด้วยโลหะทองแดง เพราะทองแดงมีราคาถูกว่าโลหะเงิน




รูปที่ ๑.๗ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

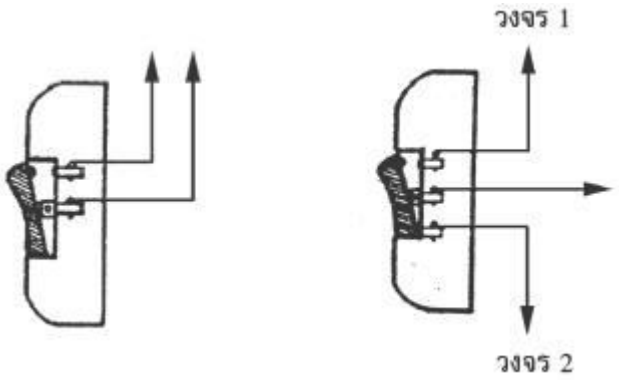
ก. สายทนความร้อน มีเปลือกนอกเป็นฉนวนที่ทนความร้อน เช่น สายเตารีด
ข. สายคู่ ใช้เดินในอาคารบ้านเรือน
ค. สายคู่ มีลักษณะอ่อน ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น วิทยุ โทรทัศน์
ง. สายเดี่ยว ใช้เดินในท่อร้อยสาย

- **ฟิวส์** เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้ามามากเกินไป ถ้ามีกระแสผ่านมามากฟิวส์จะตัดวงจรไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ฟิวส์ทำด้วยโลหะผสมระหว่างตะกั่ว กับดีบุกและบิสมัทผสมอยู่ ซึ่งเป็นโลหะที่มีจุดหลอดเหลวต่ำ มีความต้านทานสูง และมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามความต้องการใช้งาน



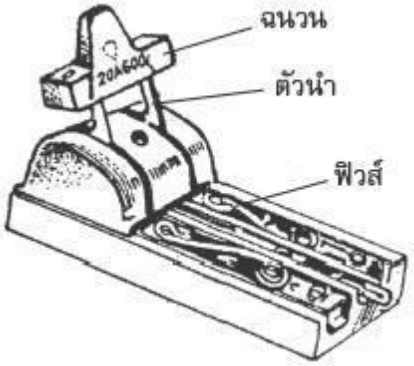

รูปที่ ๑.๘ ฟิวส์ชนิดต่างๆ

- **สวิตช์** เป็นอุปกรณ์ที่ตัดหรือต่อวงจรไฟฟ้าในส่วนที่ต้องการ ทำหน้าที่คล้ายสะพานไฟโดยต่ออนุกรมเข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้า สวิตช์มี ๒ ประเภท คือ สวิตช์ทางเดียว และสวิตช์สองทาง




รูปที่๑.๙ การทำงานของสวิตซ์

- **สะพานไฟ** เป็นอุปกรณ์สำหรับตัด หรือต่อวงจรไฟฟ้า ประกอบด้วย ฐาน และคันโยกที่มีลักษณะเป็นขาโลหะ ๒ ขา ซึ่งมีที่จับเป็นฉนวน เมื่อสับคันโยกลงไปในช่องที่ทา ด้วยตัวนำ ไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจากมาตรไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่วงจรไฟฟ้า และเมื่อยกคันโยกขึ้นกระแสไฟฟ้าจะหยุดไหล

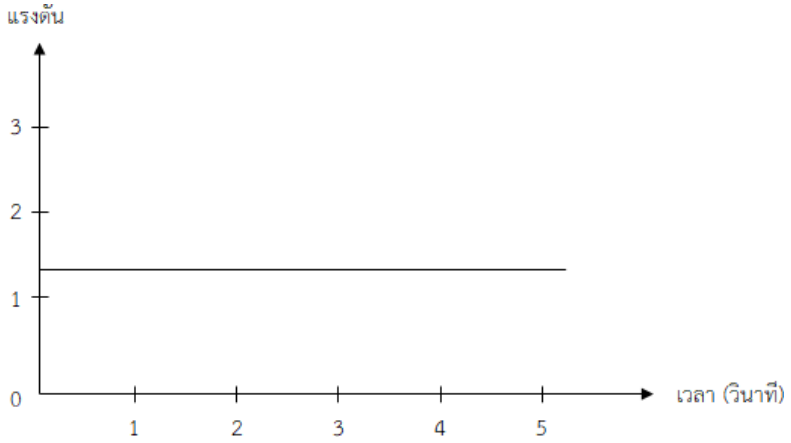



รูปที่ ๑.๑๐ ส่วนประกอบของสะพานไฟ

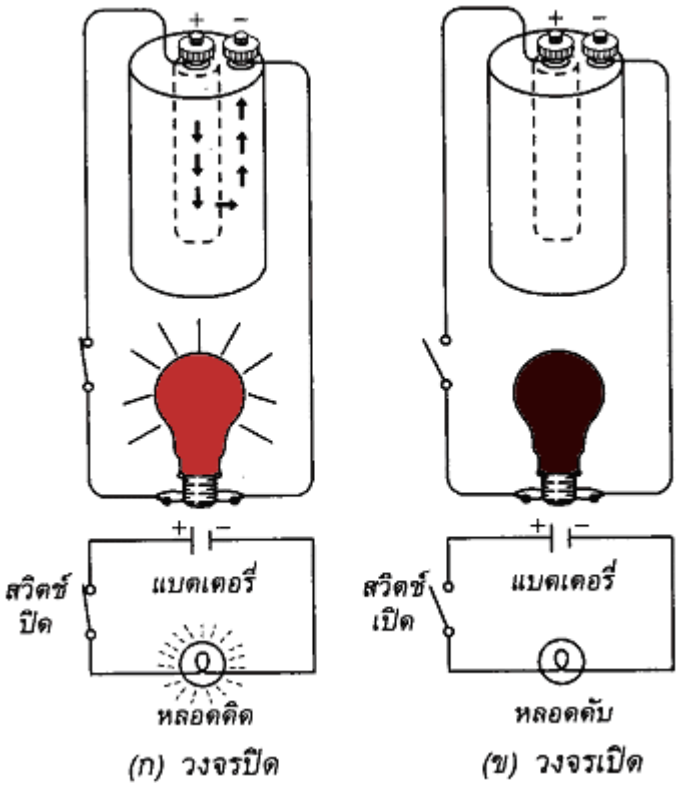
- **สวิตซ์อัตโนมัติหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (circuit breaker)** : เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้จำกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวงจร เมื่อกระแสเกินค่าจำกัด เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลสู่วงจรอีกจนกว่าจะกดปุ่มทำงานใหม่ ปัจจุบันใช้แทนสวิตซ์ฟิวส์กันมาก เนื่องจากสามารถต่อวงจรเข้าไปใหม่ได้ทันที ในขณะที่ฟิวส์ต้องสลับเปลี่ยนตัวใหม่เข้าไปแทน หลักการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าในวงจรไหลเข้ามามากๆ สนามแม่เหล็กจะดึงสวิตซ์ให้ตัดวงจรออก และบางแบบจะมีตัวป้องกันกระแสเกินขนาดด้วยความร้อนต่อร่วมมาด้วยโดยอาศัยการที่มีกระแสไหลผ่านความต้านทานของตัว ไบเมตอลลิก (bimetallic) โดยที่ไบเมตอลลิก เป็นโลหะที่ขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและหดตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำลง เมื่อกระแสไหลผ่านมากจะเกิดความร้อนมาก ตัวไบเมตอลลิกจะขยายตัวดึงให้สวิตซ์ตัดวงจรออก เราใช้ตัวอักษรย่อแทนเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วย CB

รูปที่ ๑.๑๑ สวิตซ์อัตโนมัติหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์

**๒.ไฟฟ้ากระแสตรง** (Direct Current : DC) เป็นไฟฟ้าที่มีทิศทางการไหลของกระแสและขนาดคงที่ตลอดเวลา แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่รู้จักกันดี เช่น แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย การเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ต้องใช้ตัวแปลงไฟ (Adapter)




รูปที่ ๑.๑๒ สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง




รูปที่ ๑.๑๓ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

**๑.๓ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์**

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้าที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า โดยใช้ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์ชนิดหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้น ทำให้อุปกรณ์นั้นมีการใช้งานหรือมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นนั้นเอง ทั้งนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควรรู้จัก ประกอบด้วย

- **มัลติมิเตอร์** (Mutimeter) เป็นเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดปริมาณไฟฟ้าได้หลากหลายชนิด เช่น แรงดัน, กระแส, ความต้านทานและสามารถใช้กับไฟกระแสตรง (DC) หรือไฟกระแสสลับ (AC) ได้ การแสดงผลของมัลติมิเตอร์จะมีด้วยกัน ๒ แบบ คือ มัลติมิเตอร์แบบเข็ม(Analog Multimeter) และมัลติมิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Multimeter)

รูปที่ ๑.๑๔ มัลติมิเตอร์

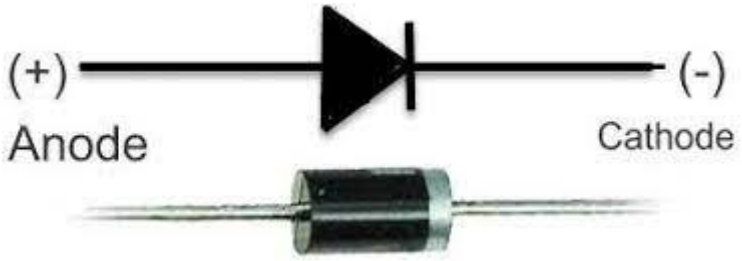
- ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าความต้านทานมากกระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านตัวต้านทานได้น้อย แต่ถ้าความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านตัวต้านทานได้มาก

รูปที่ ๑.๑๕ ตัวต้านทาน

- **ตัวเก็บประจุ** (Capacitor or Condenser) มีคุณสมบัติในการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการที่มีแผ่นโลหะสองแผ่นวางอยู่ใกล้ๆ กัน แต่ไม่แตะถึงกัน โดยมีแผ่นไดอิเล็กตริก ซึ่งมีลักษณะเป็นฉนวนกั้นอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

รูปที่ ๑.๑๖ ตัวเก็บประจุ

- **ไดโอด** (Diode) ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ มีขนาดเล็ก มีขั้วต่อออกมาใช้งาน ๒ ขั้ว มีคุณสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ทางเดียวเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าตรงขั้ว และจะไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากลับขั้ว




รูปที่ ๑.๑๗ ไดโอด

- **ทรานซิสเตอร์** (Transistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิด ๓ ตอนต่อชนกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ทรานซิสเตอร์ต้องสร้างให้ตัวนำตอนกลางแคบที่สุด มีขาต่อออกมาใช้งาน ๓ ขา

รูปที่ ๑.๑๘ ทรานซิสเตอร์

- หม้อแปลง (Transformer) มีลักษณะเป็นขดลวดทองแดงอาบน้ำยาที่พันอยู่บนแกนตั้งแต่ ๒ ชุดขึ้นไป ทำหน้าที่ผ่านแรงดันไฟฟ้า จากขดลวดชุดหนึ่งไปยังอีกชุดหนึ่งโดยการเหนี่ยวนำทางเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ ๑.๑๙ หม้อแปลง

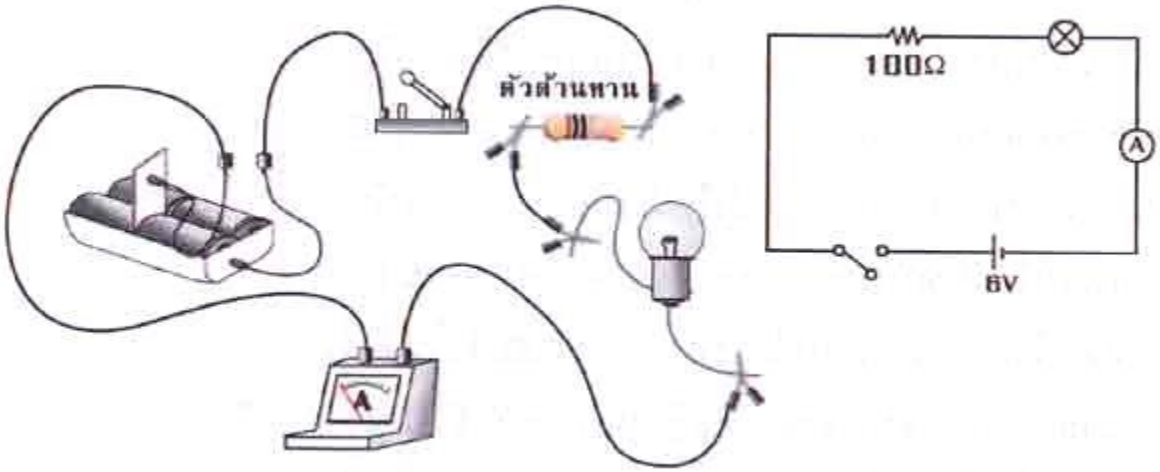
- วงจรรวม IC (Integrated Circuit) เป็นอุปกรณ์รวมการทำงานของทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีซิสเตอร์และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ เข้ารวมเป็นชิ้นเดียวกัน และมีขาออกมาภายนอกสำหรับป้อนแหล่งจ่าย มีหลายชนิดแล้วแต่หน้าที่การทำงาน

รูปที่ ๑.๒๐ วงจรรวม IC

**๒. ทฤษฎี**

**๒.๑ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรง**

วงจรไฟฟ้าเป็นเส้นทางเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า การเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นได้จะต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับเส้นลวดตัวนำ และอุปกรณ์ไฟฟ้าหนึ่ง หรือสองชนิด เช่น สวิตช์ ต้านทาน มัลติมิเตอร์ หรือหลอดไฟฟ้า เป็นต้น กระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากแหล่งกำเนิดไปโดยรอบวงจรที่ต่อเชื่อมกัน



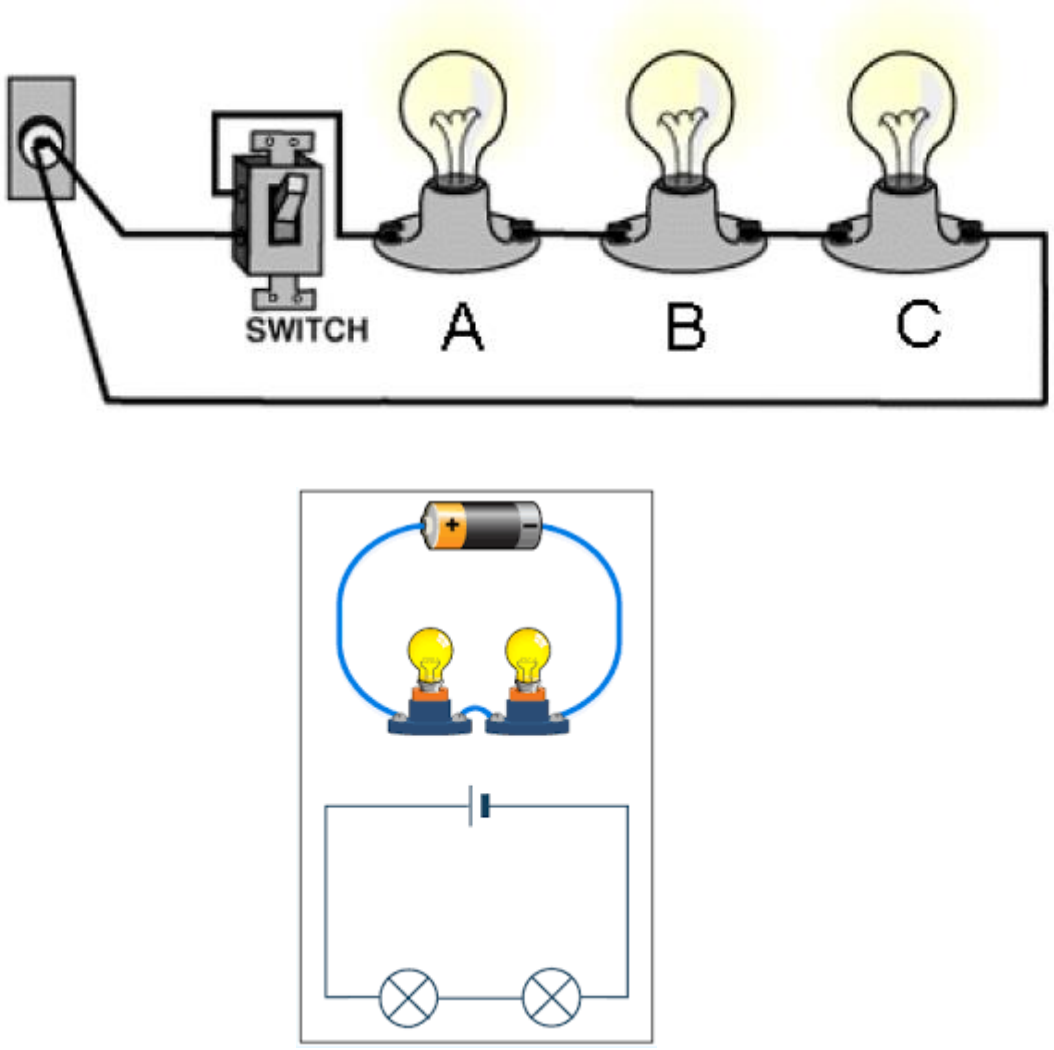

รูปที่ ๑.๒๑ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวต้านทาน

ในทางสากลนิยมใช้สัญลักษณ์เป็นตัวแทนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้วาดง่ายและทำความเข้าใจได้ในเวลาอันรวดเร็ว โดยใช้สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงไว้ดังตาราง

| ชื่อ | สัญลักษณ์ |
|---|---|
| 1. เซลล์ไฟฟ้า | |
| 2. แบตเตอรี่ | |
| 3. สายไฟ | |
| 4. สวิตช์ | |
| 5. ความต้านทาน | |
| 6. แอมมิเตอร์ | A |
| 7. โวลต์มิเตอร์ | V |
| 8. หลอดไฟฟ้า | |

ทั้งนี้การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงมี ๒ ลักษณะ ดังนี้

- **การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม** เป็นวงจรที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกันกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ โดยตรง มีรูปแบบเป็นวงจรเดียว ข้อเสียของการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอนุกรมก็คือ ถ้าอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งเสียก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรหยุดไหลไม่สามารถใช้อุปกรณ์อื่นได้

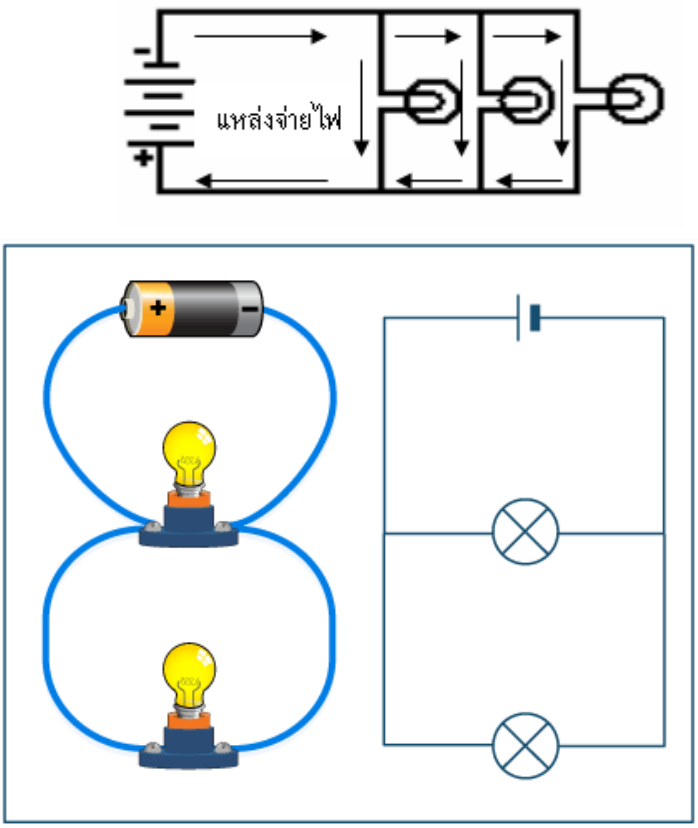



รูปที่ ๑.๒๒ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

**สรุปลักษณะสำคัญของการต่อความต้านทานแบบอนุกรม**

1. สามารถหาค่าความต้านทานได้โดยการรวมกัน ดังนั้นความต้านทานรวมจะมีค่ามากขึ้น
2. ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวเท่ากับกระแสไฟฟ้าในวงจร
3. ความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองของตัวต้านทานจะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของตัวต้านทานจะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของตัวต้านทานแต่ละตัว

- **การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน** เป็นการต่อวงจรไฟฟ้าที่แยกอุปกรณ์แต่ละชนิดในการเชื่อมต่อกันกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า มีลักษณะของรูปแบบวงจรหลาย ๆ วงจร ในวงจรรวม ข้อดีของการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแบบขนานก็คือ ถ้าอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งเสีย หรือชำรุด อุปกรณ์อื่นก็ยังมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้




รูปที่ ๑.๒๓ การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

การต่อหลอดไฟฟ้า 2 หลอด ที่ต่อโดยให้ขั้วทั้งสองของหลอดไฟฟ้าหลอดหนึ่งคร่อมขั้วทั้งสองของอีกหลอดหนึ่ง เราเรียกว่า การต่อแบบขนาน กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดที่ไหลเข้าไปในวงจรจะถูกแบ่งให้ไหลเข้าไปในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ด้วยปริมาณที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความต้านทานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้ามีความต้านทานสูง ก็จะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลอย่างน้อย แต่ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้ามีความต้านทานต่ำ จะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละอันรวมกันแล้วจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแหล่งกำเนิด เราใช้หลักการและความสัมพันธ์จากกฎของโอห์ม มาคำนวณหาความต้านทาน และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเมื่อต่อหลอดไฟฟ้าแบบขนานได้

**สรุปสาระสำคัญของการต่อความต้านทานแบบขนาน**

1. ความต้านทานรวมของวงจรมีค่าน้อยลง และน้อยกว่าความต้านทาน ตัวที่น้อยที่สุดที่นำมาต่อขนานกัน
2. ปริมาณกระแสไฟฟ้ารวมของวงจรมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสไฟฟ้าของวงจรย่อย
3. ความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองของตัวต้านทานแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน และเท่ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน

**ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้สำหรับระบบสื่อสารอิเล็กทรอนนิกส์**

**ตัวนำไฟฟ้า (conductor)**

สสารที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมันเองได้ง่าย

**ความนำไฟฟ้าหรือความเป็นสื่อไฟฟ้า (conductance)**

ความสะดวกสบายต่อการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในวงจร

**ฉนวนไฟฟ้า (insulator)**

วัตถุที่มีคุณสมบัติด้านต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า อาจจะกล่าวได้ว่าสสารนั้น ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

**กำลังไฟฟ้า (electric power)**

อัตราการผลิตหรือใช้พลังงานทางทไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยเวลา

**วัตต์ (watt)**

หน่วยวัดกำลังไฟฟ้า ใช้อักรย่อตัวพิมพ์ใหญ่ W แทน กำลังไฟฟ้ามีจะเป็นอักษรบอกพลังงานไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละตัวในการทำงาน อย่างเช่น หลอดไฟ 1,000 วัตต์ เครื่องปิ้งขนมปัง 1,000 วัตต์

**วงจรเปิด (open circuit)**

สภาวการณ์ที่ทางเดินไฟฟ้าเกิดขาดวงจร เกิดวงจร หรือไม่ตลบวงจรทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไม่ได้

**การลัดวงจร (short circuit)**

สภาวการณ์ที่เกิดมีการลัดวงจรทางเดินของกระแสไฟฟ้า อันเนื่องมาจากรอยต่อของสายต่างๆ พลาดถึงกัน มีกระแสไฟฟ้ารั่วต่อถึงกัน เป็นต้น

**แอมแปร์ (ampere)**

หน่วยการวัดค่าอัตราการไหลของไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำ เราจะใช้อักษรย่อตัวพิมพ์ใหญ่ A หรือ amp แทน ปกติแล้วหน่วยแอมแปร์นี้นิยมใช้ระบุขอบของการใช้กระแสไฟฟ้าด้านสูงสุดในการทำงานของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นอย่างปลอดภัย อย่างเช่น เต้าเสียบ 15 แอมแปร์ ฟิวส์ 30 แอมแปร์

**โวลต์ (volt) หรือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า**

หน่วยวัดแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าหรือแรงดันที่ทำให้เกิดมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในตัวนำไฟฟ้า เราใช้ตัวย่อแทนแรงดันไฟฟ้าด้วย V, E หรือ EMF ปกติจะใช้ E และ EMF แทนแรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าหรือ electromotive force (ซึ่งเป็นอีกนิยามหนึ่งของคำว่า โวลต์) เช่นเดียวกับคำว่า แอมแปร์แรงดันซึ่งระบุไว้ที่ตัวอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตการใช้แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานได้โดยปลอดภัย เช่น มอเตอร์ 220 โวลต์ เครื่องเป่าผม 110 โวลต์ เราจะต้องใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าตามที่ระบุไว้เท่านั้น

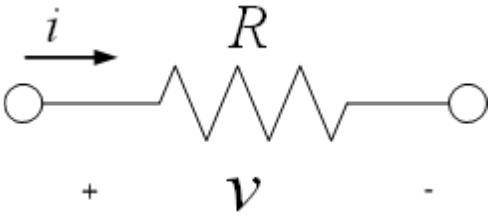
**เฮิร์ตซ์ (hertz)**

หน่วยความถี่มีค่าเป็นรอบต่อวินาที การที่อิเล็กตรอนวิ่งไปในทิศทางหนึ่งแล้ววกกลับมาสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นก็มีอิเล็กตรอนวิ่งออกมาจากแหล่งจ่ายไฟไปในทิศทางหนึ่งวกกลับมา โดยทิศทางการวิ่งของอิเล็กตรอนทั้ง 2 ครั้งวิ่งสวนทางกัน (หรือพูดอีกนับหนึ่งก็คือ วิ่งสลับไปสลับมานั้นเอง) เราเรียกว่า 1 รอบ ความถี่ของระบบไฟฟ้าบ้านเราใช้ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ใช้สัญลักษณ์ $H_Z$

**ความต้านทาน**

เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ขององค์ประกอบหรืออุปกรณ์ซึ่งกำหนดการไหลของกระแสไฟฟ้าใช้สัญลักษณ์แทนด้วย R และมีหน่วยเป็นโอห์มใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวโอเมก้า ( Ω ) ความต้านทานจะพยายามต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ความต้านทานเป็นได้ทั้งผู้ทำงานให้หรือขัดขวางการทำงานให้ผู้ใช้ไฟ มันทำงานให้ในขณะที่ใช้มันเป็นฉนวนหรือใช้ควบคุมวงจร ตัวอย่างเช่น เทปพันสายไฟ เต้าเสียบที่ทำจากพลาสติก จะป้องกันอันตรายให้กับผู้ใช้ไฟได้ และใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ (rheostat) ปรับความสว่างของหลอดไฟฟ้า แต่มันจะขัดขวางการทา งานเมื่อผู้ใช้ไฟ ใช้สายไฟเส้นเล็ก และยาวมากๆ หรือมีสนิมตามจุดสัมผัสต่างๆ ของตัวนา จะเป็นสาเหตุของการเพิ่มค่าความต้านทานทำให้เกิดความร้อนมากเกินไป พร้อมทั้งเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปในสายตัวนำด้วย

**กฎของโอห์ม (Ohm's Law)**




รูปที่ ๑.๒๔ กฎของโอห์ม

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟฟ้าได้นั้น เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร และปริมาณกระแสไฟฟ้าภายในวงจรจะถูกจา กัดโดยความต้านทานไฟฟ้าภายในวงจรไฟฟ้านั้น ๆ ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าภายในวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า และค่าความต้านทานของวงจร ซึ่งวงจรนี้เรียกว่ากฎของโอห์ม กล่าวว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า และแปรผกผันกับความต้านทานไฟฟ้า โดยเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Current} = \frac{Voltage}{Resistance}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

เมื่อ Resistance (R) = คือ ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม
Voltage (V) = คือ แรงดันไฟฟ้าหรือแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็นโวลต์
Current (I) = คือ ค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์

นอกจากนั้นยังประยุกต์สูตรได้อีก 2 สูตร คือ

$$V = IR \quad \text{และ} \quad R = \frac{V}{I}$$

**ตัวอย่าง**

จงคำนวณหาค่าปริมารกระแสไฟฟ้าตรงของวงจรไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 50 โวลต์ และมีค่าความต้านทานของวงจรเท่ากับ 5 โอห์ม

**วิธีทำ** จากสูตร I = $\frac{V}{R}$

แทนค่า I = $\frac{50V}{5\Omega}$

I = 10 แอมแปร์

**๑.๓ การบำรุงรักษา**

**ความปลอดภัยและอุบัติเหตุจากไฟฟ้า**

1) ก่อนลงมือปฏิบัติงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ให้ตรวจหรือวัดด้วยเครื่องมือวัดไฟฟ้าว่าในสายไฟหรืออุปกรณ์นั้นมีไฟฟ้าหรือไม่

2) การทำงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในขณะปิดสวิตช์ไฟหรือตัดไฟฟ้าแล้ว ต้องต่อสายอุปกรณ์นั้นลงดินก่อนทำงานและตลอดเวลาที่ทำงาน

3) การต่อสายดินให้ต่อปลายทางด้าน" ดิน "ก่อนเสมอจากนั้นจึงต่อปลายอีกข้างเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้า

4) การสัมผัสกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันต่ำใดๆ หากไม่แน่ใจให้ใช้อุปกรณ์ทดสอบไฟวัดก่อน

5) การจับต้องอุปกรณ์ที่มีไฟฟ้า จะต้องทำโดยอาศัยเครื่องมือ-อุปกรณ์ และวิธีการที่ถูกต้องเท่านั้น

6) เครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น คีม ไขควง ต้องเป็นชนิดที่มีฉนวนหุ้ม 2 ชั้นอย่างดี

7) ขณะทำงานต้องมั่นใจว่า ไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายหรือเครื่องมือที่ใช้อยู่สัมผัสกับส่วนอื่นของอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟด้วยความพลั้งเผลอ

8) การใช้กุญแจป้องกันการสับสวิตช์ การแขวนป้ายเตือนห้ามสับสวิตช์ตลอดจนการปลดกุญแจและป้ายต้องกระทำ โดยบุคคลคนเดียวกันเสมอ

9) การขึ้นที่สูงเพื่อทำงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องใช้เข็มขัดนิรภัย หากไม่มีการใช้เชือกขนาดใหญ่คล้องเอาไว้กับโครงสร้างหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของอาคาร

10) การทำงานเกี่ยวกับไฟฟ้าหากเป็นไปได้ควรมีผู้ช่วยเหลืออยู่ด้วย

**ข้อที่ไม่ควรกระทำในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับไฟฟ้า**

- ไม่ควรถอดปลั๊กไฟด้วยการดึงสายไฟ
- ไม่ควรใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ชารุด
- ไม่ควรใช้ปลั๊กไฟที่ชารุด
- ไม่ควรต่อพ่วงไฟเกินกา ลัง
- ไม่ควรต่อปลั๊กผิดประเภท
- ไม่ควรซ่อมแซมอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยตนเองถ้าหากไม่มีความรู้อย่างแท้จริง

**๑.๔ การใช้งาน**

**ระบบหน่วยวัดระหว่างประเทศ หรือ ระบบเอสไอ**

เป็นระบบการวัดที่ปรับปรุงมาจากระบบเมตริก โดยเน้นการสร้างมาจากหน่วยฐานทั้งเจ็ดหน่วยและใช้ระบบเลขฐานสิบ ซึ่งถือว่าเป็นระบบการวัดที่ใช้แพร่หลายที่สุดในโลกทั้งในชีวิตประจำวันและทางวิทยาศาสตร์

ระบบหน่วยวัดระหว่างประเทศประกอบไปด้วยชุดของหน่วยวัดเอสไอและชุดของคำนำหน้าเอสไอ หน่วยวัดเอสไอ แบ่งออกเป็น ๒ ส่วน คือ หน่วยฐานเอสไอและหน่วยอนุพัทธ์เอสไอ

| หน่วยฐานเอสไอ | | | |
|---|---|---|---|
| **ชื่อหน่วยวัด** | **สัญลักษณ์หน่วยวัด** | **ชื่อปริมาณ** | **สัญลักษณ์ปริมาณ** |
| เมตร | m | ความยาว | *l* (L ตัวเล็ก) |
| กรัม | g | มวล | *m* |
| วินาที | s | เวลา | *t* |
| แอมแปร์ | A | กระแสไฟฟ้า | *I* (i ตัวใหญ่) |
| เคลวิน | K | อุณหภูมิอุณหพลวัติ | *T* |
| แคนเดลา | cd | ความเข้มของการส่องสว่าง | $I_v$ (i ตัวใหญ่ห้อยด้วยตัว v เล็ก) |
| โมล | mol | ปริมาณของสาร | *n* |

เราสามารถสร้างหน่วยอนุพัทธ์เอสไอได้ไม่จำกัดจากการนำหน่วยฐานเอสไอทั้งเจ็ดมาคูณหรือหารกัน ตัวอย่างเช่น หน่วยอนุพัทธ์ของเอสไอเกี่ยวกับความเร็วคือเมตรต่อวินาที (m/s) หน่วยอนุพัทธ์บางหน่วยอาจมีชื่อเฉพาะเนื่องจากมีการใช้บ่อย ๆ เช่น โอห์ม หน่วยของความต้านทานซึ่งมีสัญลักษณ์ Ω สามารถนิยามได้จาก $\Omega = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$ อันมีผลมาจากนิยามเกี่ยวกับความต้านทานไฟฟ้าโดยตรง

มีหน่วยพิเศษสองหน่วยคือเรเดียนและสเตอเรเดียน ที่เดิมถูกกำหนดให้เป็นหน่วยเสริม (supplement unit) ของระบบเอสไอ แต่ภายหลังได้รับการยกเลิกและจัดเป็นหน่วยอนุพัทธ์ประเภทหนึ่งที่ไร้มิติ (dimensionless) กล่าวคือไม่มีหน่วยแทน

คำนำหน้าหน่วยเอสไอ เป็นคำที่ใช้เติมข้างหน้าหน่วยเอสไอเพื่อสร้างพหุคูณของหน่วยเอสไอเดิม พหุคูณของหน่วยเอสไอจะเป็นสิบยกกำลังด้วยจำนวนเต็มเท่าต่าง ๆ และนอกเหนือจากสิบเท่า ร้อยเท่า ส่วนสิบเท่า และส่วนร้อยเท่าแล้วจะเป็นพหุคูณของพันเท่าและส่วนพันเท่าทั้งหมด

| คำนำหน้าหน่วยเอสไอ | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ชื่อ** | | เดคา | เฮกโต | กิโล[5] | เมกะ[5] | จิกะ[5] กิกะ[5] | เทระ[5] | เพนตะ | เอกซะ | เซตตะ | ยอตตะ |
| **สัญลักษณ์** | | da | h | k | M | G | T | P | E | Z | Y |
| **ตัวประกอบ** | $10^0$ | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ | $10^6$ | $10^9$ | $10^{12}$ | $10^{15}$ | $10^{18}$ | $10^{21}$ | $10^{24}$ |
| | | | | | | | | | | | |
| **ชื่อ** | | เดซิ | เซนติ | มิลลิ | ไมโคร | นาโน | พิโค | เฟมโต | อัตโต | เซปโต | ยอกโต |
| **สัญลักษณ์** | | d | c | m | μ | n | p | f | a | z | y |
| **ตัวประกอบ** | $10^0$ | $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-6}$ | $10^{-9}$ | $10^{-12}$ | $10^{-15}$ | $10^{-18}$ | $10^{-21}$ | $10^{-24}$ |

นอกเหนือจากหน่วยเอสไอแล้ว ยังมีชุดของหน่วยที่ไม่ใช่เอสไอแต่ยอมรับให้ใช้ในระบบเอสไอซึ่งมักจะเป็นหน่วยที่ใช้เป็นประจำแต่ไม่ได้อยู่ในหน่วยเอสไอ เช่น หน่วยลิตร

# บทที่ ๒
# ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ทอ.

## ๑. พื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคม

ระบบโทรคมนาคมเป็นเครือข่ายสื่อสารหลักที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระยะไกล ในขณะที่เทคโนโลยีทั้งด้านสื่อสารและคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมาก เทคโนโลยีโทรคมนาคมจึงต้องพร้อมที่จะรองรับการเชื่อมต่อใช้งานของอุปกรณ์ปลายทางที่เปลี่ยนแปลงไปให้ได้ ปัจจุบันสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) มีการกำหนดมาตรฐานอุปกรณ์ในระบบโทรคมนาคมขึ้นใช้งาน ทั้งมาตรฐานการรวมสัญญาณและมาตรฐานในการเชื่อมต่อใช้งานกับอุปกรณ์ปลายทาง ทำให้อุปกรณ์ปลายทางไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือสื่อสารหรือคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่จะถูกกำหนดมาตรฐานการเชื่อมต่อกับระบบโทรคมนาคมไว้ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในการสื่อสารรวมทั้งในส่วนของโทรคมนาคมยังมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เช่น การสื่อสารแบบไร้สายมีการออกแบบให้อุปกรณ์รวมสัญญาณสื่อสารโทรคมนาคมทำหน้าที่บริหารจัดการรองรับปริมาณข้อมูลจำนวนผู้ใช้บริการที่มากขึ้น รวมถึงการค้นหาสลับเส้นทางที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ เป็นต้น มีความจำเป็นเป็นอย่างมากที่บุคลากรในสายสื่อสารโทรคมนาคมจะต้องติดตามความก้าวหน้าและการเปลี่ยนแปลงให้ทันเทคโนโลยีดังกล่าว ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีโทรคมนาคมพื้นฐานในปัจจุบัน คุณลักษณะของระบบโทรคมนาคมหลัก การใช้งานและอุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคมระบบดิจิทัลเพื่อมุ่งที่จะชี้ให้เห็นแนวโน้มพัฒนาการของระบบโทรคมนาคมทำให้มองเห็นภาพรวมของระบบโทรคมนาคมในอนาคต

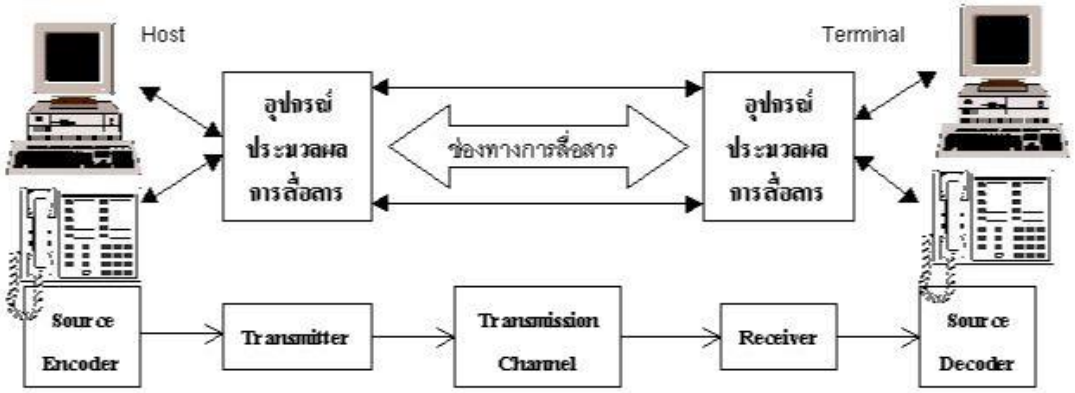
### ๑.๑ หลักการสื่อสารโทรคมนาคม

#### ๑.๑.๑ ความหมายของ Telecommunications

คำว่า “Tele” เป็นรากศัพท์ที่มาจากภาษากรีก หมายความว่า “ไกล” หรือ “อยู่ไกลออกไป” ดังนั้นคำว่า Telecommunications สามารถให้ความหมายอย่างกว้าง ๆ ตามรูปศัพท์ได้ว่า หมายถึงการสื่อสารไปยังผู้รับปลายทางที่อยู่ไกลออกไป ดังนั้น คำว่า Telecommunications สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ International Telecommunications Union : ITU ได้ให้คำจำกัดความว่า “Telecommunications” หมายถึงการส่งข่าวสารทุกรูปแบบไม่ว่าจะเป็นเสียงพูด ตัวอักษร สัญลักษณ์ ภาพถ่าย Graphics ภาพเคลื่อนไหว (Video) ฯลฯ ไปยังปลายทาง โดยอาศัยสัญญาณไฟฟ้า หรือสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสัญญาณแสงผ่านตัวกลางต่าง ๆ เช่น สายทองแดง หรือคลื่นความถี่วิทยุ หรือใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) เป็นต้น โดยไม่จำกัดว่าจะเจาะจงใช้ช่องทางชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือร่วมกันก็ตาม

#### ๑.๑.๒ ช่องทางที่ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม

ช่องสัญญาณในการสื่อสาร (Communication Channel) และจุดประสงค์อันเป็นพื้นฐานของการสื่อสารโทรคมนาคมทุกรูปแบบรวมทั้งระบบการสื่อสารข้อมูล คือ การแลกเปลี่ยนข่าวสารและสารสนเทศ (Message Of Information) ต้นทางและปลายทาง เช่นการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่าง Data Terminal ๒ ชุด โดยการใช้ช่องทางการสื่อสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ในการส่ง Message Of Information ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองชุดนั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งข่าวสารในระบบการสื่อสารข้อมูล ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า Data Terminal Device นั้น โดยส่วนใหญ่คือเครื่องคอมพิวเตอร์/อุปกรณ์ ส-อ.ในเครื่องรับ-ส่งข้อมูล ต่าง ๆ




รูปที่ ๒.๑ แสดงการทำงานของระบบโทรคมนาคม

ตามรูปแสดงถึงการสื่อสารข้อมูลที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์สองชุด โดยที่ชุดหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ส่ง (Transmitter) ขณะที่อีกเครื่องหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้รับ (Receiver) ที่สถานีด้านส่ง (Transmitting Station) ข่าวสารที่ต้องการจะส่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยอุปกรณ์ที่เหมาะสมและส่งสัญญาณไฟฟ้านั้นผ่านสื่อหรือตัวกลาง (Medium) ไปยังด้านรับ ที่สถานีด้านรับ (Receiving Station) จะทำการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้านั้นกลับมาเป็นข่าวสาร (Message Of Information) ที่ถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง และเพื่อให้เกิดการติดต่อสื่อสารหรือเกิดการเชื่อมโยงเพื่อการสื่อการสื่อสาร (Communication Link) ขึ้นระหว่าง Transmitter และ Receiver เราจำเป็นต้องมีช่องสัญญาณสื่อสาร (Communication Channel) และนำช่องสัญญาณสื่อสารนั้นมาใช้งาน ช่องสัญญาณสื่อสารโดยความเป็นจริงแล้วก็คือตัวกลาง (Medium) ที่จะทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูล ในบางครั้งเรานิยมเรียกช่องสัญญาณสื่อสารอย่างย่อ ๆ ว่า “Link” ช่องสัญญาณสื่อสารหรือ “Link” นี้สามารถแบ่งได้เป็น สื่อกลางแบบมีสาย (Guided Media) และสื่อกลางแบบไร้สาย (Unguided Media)

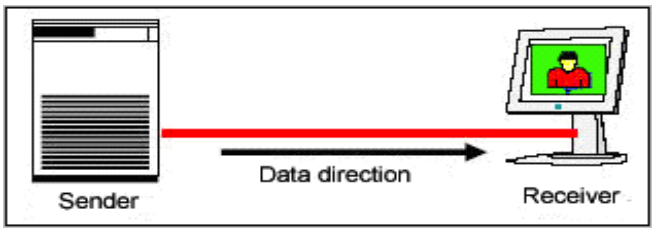
**๑.๑.๓ หน้าที่ของระบบสื่อสารโทรคมนาคม**

ในการส่งและรับข้อมูลระหว่างจุดสองจุด ได้แก่ ผู้ส่งข่าวสาร (Sender) และ ผู้รับข่าวสาร (Receiver) จะดำเนินการจัดการลำเลียงข้อมูลผ่านเส้นทางที่มีประสิทธิภาพที่สุด จัดการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่จะส่งและรับเข้ามา สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลให้ทั้งสองฝ่ายสามารถเข้าใจได้ตรงกัน ในระบบโทรคมนาคมส่วนใหญ่ใช้อุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลข่าวสารต่างชนิด ต่างยี่ห้อกัน แต่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้เพราะใช้ชุดคำสั่งมาตรฐานชุดเดียวกัน กฎเกณฑ์มาตรฐานในการสื่อสารนี้เราเรียกว่า “โปรโตคอล (Protocol)” อุปกรณ์แต่ละชนิดในเครือข่ายเดียวกันต้องใช้โปรโตคอลอย่างเดียวกัน จึงจะสามารถสื่อสารถึงกันและกันได้ หน้าที่พื้นฐานของโปรโตคอล คือ การทำความรู้จักกับอุปกรณ์ตัวอื่นที่อยู่ในเส้นทางการถ่ายทอดข้อมูล การตกลงเงื่อนไขในการรับส่งข้อมูล การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล การแก้ไขปัญหาข้อมูลที่เกิดการผิดพลาดในขณะที่ส่งออกไปและการแก้ปัญหาการสื่อสารขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นโปรโตคอลที่รู้จักกันมาก ได้แก่ โปรโตคอลในระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น Internet Protocol, TCP/IP, IP Address ที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้

**๑.๑.๔ คำจำกัดความเกี่ยวกับระบบสื่อสัญญาณ (Transmission Terminology)**

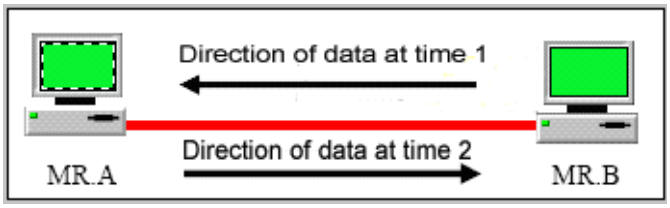
**รูปแบบของการส่งสัญญาณข้อมูล** การสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้รับกับผู้ส่ง สามารถแบ่งได้เป็น ๓ ประเภท ได้แก่

**A. การสื่อสารข้อมูลทิศทางเดียว (Simplex Transmission)** เป็นการติดต่อสื่อสารเพียงทิศทางเดียว คือผู้ส่งจะส่งข้อมูลเพียงฝั่งเดียวและโดยฝั่งรับไม่มีการตอบกลับ เช่น การกระจายเสียงของสถานีวิทยุ หรือการส่ง e-mail เป็นต้น



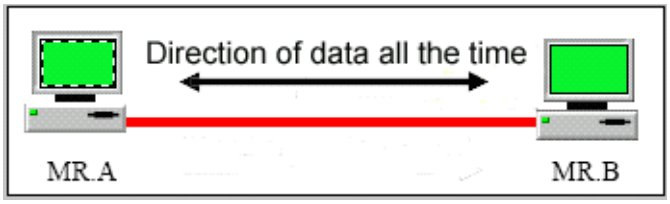

รูปที่ ๒.๒ แสดงการสื่อสารข้อมูลทิศทางเดียว

**B. การสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน (Half Duplex Transmission)** เป็นการสื่อสาร ๒ ทิศทาง แต่ต่างเวลากัน เช่น วิทยุสื่อสาร เป็นต้น




รูปที่ ๒.๓ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน

**C. การสื่อสารข้อมูลสองทิศทางพร้อมกัน (Full Duplex Transmission)** เป็นการสื่อสาร ๒ ทิศทาง โดยสามารถส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันได้ เช่น การคุยโทรศัพท์ เป็นต้น




รูปที่ ๒.๔ แสดงการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางพร้อมกัน

**๑.๒ การสื่อสารข้อมูลทางโทรคมนาคม**

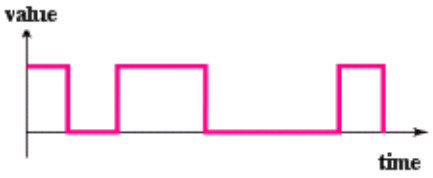
การสื่อสารข้อมูลทางโทรคมนาคม หมายถึง การโอนถ่าย (Transmission) ข้อมูลหรือการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างผู้ส่งต้นทางกับผู้รับปลายทาง ทั้งข้อมูลประเภท ข้อความ รูปภาพ เสียง หรือข้อมูลสื่อผสม โดยผู้ส่งต้นทางส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์รับ-ส่งทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือคอมพิวเตอร์ต้นทาง ซึ่งมีหน้าที่แปลงข้อมูลเหล่านั้นให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้า (Electronic data) ส่งผ่านเส้นทางโทรคมนาคมในรูปแบบต่าง ๆ ไปยังอุปกรณ์รับ-ส่งหรือคอมพิวเตอร์ปลายทาง มีการสื่อสารถึงกันไปมาตลอดเวลา

**๑.๒.๑ ประเภทของสัญญาณ**

ข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลทางโทรคมนาคมเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถจำแนกสัญญาณได้ ๒ แบบ ดังนี้

**A. สัญญาณแบบดิจิทัล (Digital signal)**

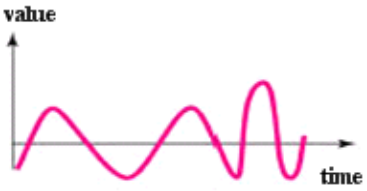
เป็นสัญญาณที่ถูกแบ่งเป็นช่วง ๆ อย่างไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยลักษณะของสัญญาณจะแบ่งออกเป็นสองระดับเพื่อแทนสถานะสองสถานะ คือ สถานะของบิต 0 (Low) และสถานะของบิต 1 (High) โดยแต่ละสถานะคือ การให้แรงดันทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน




รูปที่ ๒.๕ แสดงสัญญาณแบบดิจิทัล

**B. สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal)**

เป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่องของสัญญาณ โดยไม่เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เหมือนกับสัญญาณดิจิทัล เช่น เสียงพูด หรืออุณหภูมิในอากาศเมื่อเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง




รูปที่ ๒.๖ แสดงสัญญาณแบบแอนะล็อก

**๑.๒.๒ สื่อกลางการสื่อสาร (Transmission media)**

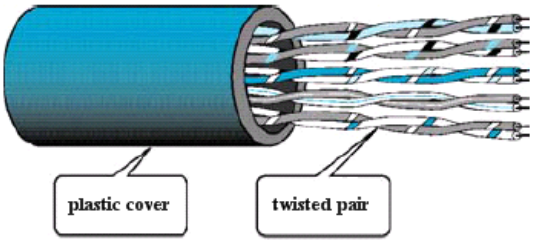
การส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับให้ครบถ้วนและถูกต้องจำเป็นต้องอาศัยสื่อกลางในการเชื่อมต่อ ซึ่ง Transmission media ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของข้อมูล โดยคุณภาพของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะเกิดการสูญเสียความเข้มของสัญญาณระหว่างเส้นทางการสื่อสารทำให้ข้อมูลฝั่งรับเกิดข้อผิดพลาดและเป็นการลดทอนประสิทธิภาพของการสื่อสารลง ซึ่งสื่อที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูล (Transmission medium) จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการส่งด้วย โดยสื่อกลางในการส่งแบ่งออกเป็น ๒ ประเภท ดังนี้

**A. สื่อกลางแบบมีสาย (Guide media)**

เป็นสื่อซึ่งอาศัยวัสดุที่จับต้องได้เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณ เช่น สายทองแดงในลักษณะสายคู่ตีเกลียว (Twisted pair) แบ่งเป็นหลายประเภท ได้แก่

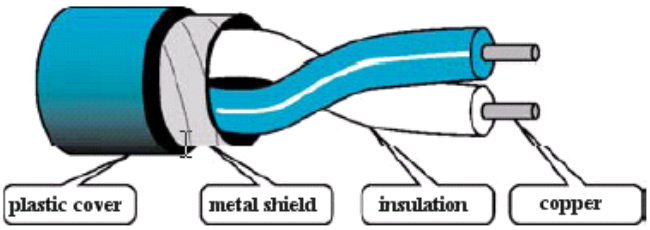
**A-1. สายคู่ตีเกลียว (Twisted pair)** แบ่งออกเป็นสายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวนเรียกสั้น ๆ ว่า UTP (Unshielded Twisted Pair) และสายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวน (Shielded Twisted Pair)

- สายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวน : UTP (Unshielded Twisted Pair) เป็นสายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวนคล้ายสายโทรศัพท์ มีหลายเส้น ซึ่งแต่ละเส้นก็จะมีสีแตกต่างไป และตลอดทั้งสายนั้นจะถูกหุ้มด้วยพลาสติก (Plastic Cover) ซึ่งการตีเกลียวลักษณะนี้จะช่วยให้มันมีคุณสมบัติในการป้องกันสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ เช่น จากเครื่องถ่ายเอกสารที่อยู่ใกล้ๆ เป็นต้น ปัจจุบันเป็นสายที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาถูกและติดตั้งได้ง่าย



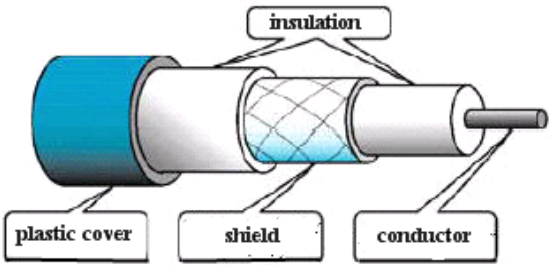

รูปที่ ๒.๗ สายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวน UTP (Unshielded Twisted Pair)

- สายคู่ตีเกลียวหุ้มชิลด์ : STP (Shield Twisted Pair) เป็นสายคู่ลักษณะคล้ายกันกับสาย UTP แต่มีชิลด์โลหะหุ้มป้องกันสัญญาณรบกวน สายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวนที่เป็นโลหะถักเป็นร่างแหโลหะหรือเป็นแผ่นฟลอยล์ จะมีคุณสมบัติเป็นเกราะในการป้องกันสัญญาณรบกวนต่างๆ ภาษาเทคนิคเรียกเกราะนี้ว่า ชิลด์ (Shield) จะใช้ในกรณีที่เชื่อมต่อเป็นระยะทางไกลเกินกว่าระยะทางที่จะใช้สาย UTP




รูปที่ ๒.๘ สายคู่ตีเกลียวหุ้มฉนวน (Shielded Twisted Pair)

**A-2. สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable)** ลักษณะแกนกลางของสายโคแอกเชียลเป็นทองแดงแล้วหุ้มด้วยพลาสติกส่วนชั้นนอกหุ้มด้วยโลหะหรือฟอยล์ที่ถักเป็นร่างแหเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน สายโคแอกเชียลมี 2 แบบ คือ แบบหนา (thick) และแบบบาง (thin) ส่วนใหญ่ใช้กับระบบเครือข่ายแบบ Ethernet แบบเดิม ซึ่งใช้เชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์โดยตรงไม่ต้องใช้อุปกรณ์รวมสาย (Hub) แต่ในปัจจุบันมีการใช้น้อยลงเนื่องจากถูกแทนที่ด้วยสาย UTP ที่มีราคาถูกกว่าและสามารถติดตั้งได้ง่ายกว่า




รูปที่ ๒.๙ สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable)

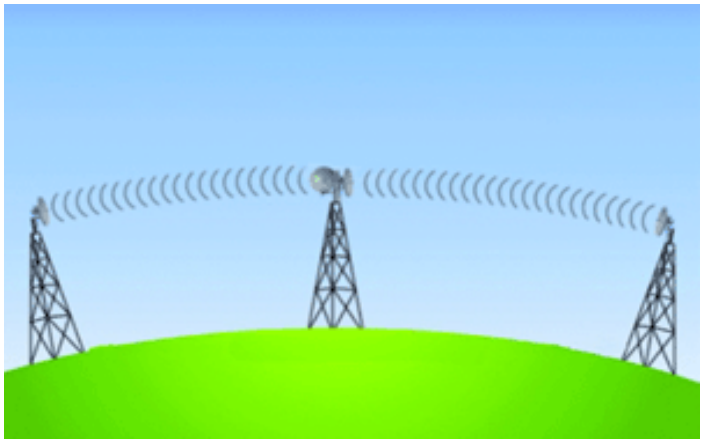
**A-3. ใยแก้วนำแสง (Fiber-Optic)** ลักษณะใยแก้วนำแสงจะส่งสัญญาณแสงวิ่งผ่านท่อแก้วหรือท่อพลาสติกเล็ก ๆ ซึ่งท่อแก้วนี้จะถูกหุ้มด้วยเจลหรือพลาสติก เพื่อป้องกันความเสียหายและการสูญเสียของสัญญาณ มีข้อดีตรงที่ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลโดยไม่มีสัญญาณรบกวน

รูปที่ ๒.๑๐ ใยแก้วนำแสง

**B. สื่อกลางแบบไร้สาย (Unguided media)**

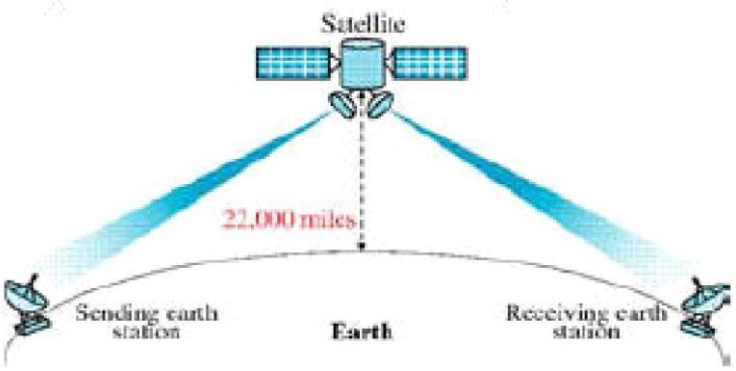
เป็นสื่อกลางประเภทที่ไม่ใช้วัสดุใด ๆ ในการนำสัญญาณ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดเส้นทางให้สัญญาณเดินทาง เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ

**B-1. ระบบคลื่นวิทยุไมโครเวฟ** ระบบสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ มักใช้ในการเชื่อมต่อเครือข่ายที่อยู่ในพื้นที่ที่เชื่อมต่อด้วยสื่อประเภทอื่นลำบาก เช่น มีแม่น้ำขวางกั้นอยู่ หรือการสื่อสารข้ามอาคาร เป็นต้น การส่งสัญญาณข้อมูลไปกับคลื่นไมโครเวฟเป็นการส่งสัญญาณข้อมูลแบบรับช่วงต่อๆ กันจากสถานีรับส่งสัญญาณหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง โดยสามารถเกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งสภาพดินฟ้าอากาศมีผลต่อการส่งคลื่นไมโครเวฟพอสมควร เช่นถ้าสภาพอากาศมีฝนหรือควันมาก สัญญาณไมโครเวฟจะถูกรบกวนได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้เครื่องส่งรับไมโครเวฟส่วนใหญ่จะถูกออกแบบมาให้ทำงานในสภาพอากาศที่แตกต่างกัน



รูปที่ ๒.๑๑ ระบบคลื่นวิทยุไมโครเวฟ

**B-2. ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม** การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นการสื่อสารที่สถานีรับ-ส่งที่อยู่บนพื้นดินส่งตรงไปยังดาวเทียมแล้วส่งกลับมายังตัวรับปลายทางที่พื้นดินอีกครั้งหนึ่ง ลักษณะการสื่อสารระบบดาวเทียมเหมาะสำหรับการติดต่อสื่อสารระยะไกลที่ระบบสื่อสารอื่นๆ เข้าถึงลำบาก เช่น เดินเรืออยู่กลางทะเล หรือในท้องที่ทุรกันดารห่างไกล เป็นต้น




รูปที่ ๒.๑๒ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

**B-3. แสงอินฟราเรด (Infrared)** เป็นการสื่อสารข้อมูลโดยใช้แสงอินฟราเรดเป็นสื่อกลาง การสื่อสารประเภทนี้นิยมใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลระยะใกล้ เช่น การสื่อการจากรีโมทคอนโทรลไปยังเครื่องรับวิทยุหรือโทรทัศน์

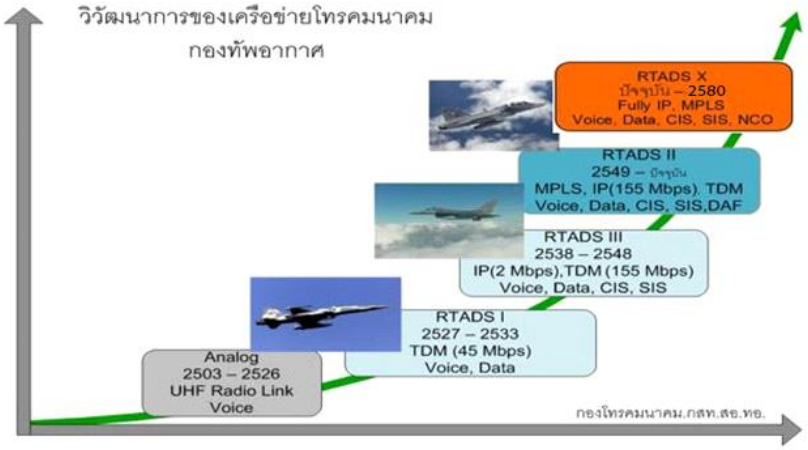
**B-4. สัญญาณคลื่นวิทยุ (Radio Wave)** เป็นสื่อนำข้อมูลแบบไร้สาย (Wireless Media) ที่มีการส่งข้อมูลเป็นสัญญาณคลื่นวิทยุไปในอากาศไปยังตัวรับสัญญาณ

**๒. ระบบโทรคมนาคม ทอ.**

**๒.๑ ความเป็นมา**

วิวัฒนาการของระบบโทรคมนาคมกองทัพอากาศ มีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ ๒-๑ โดยกองทัพอากาศได้รับความช่วยเหลือจากกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาทางด้านอุปกรณ์ และการติดตั้งวิทยุสื่อสารโทรคมนาคมทหารตั้งแต่ปี พ.ศ.๒๕๐๓ หลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงระบบโทรคมนาคมโดยการจัดหาวิทยุโทรคมนาคมย่าน UHF (Ultra High Frequency) มาทดแทนวิทยุโทรคมนาคม ในปี พ.ศ.๒๕๑๔ และในปี พ.ศ. ๒๕๒๖ กองทัพอากาศได้นำระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมมาใช้สำหรับการสื่อสารโทรคมนาคม โดยเช่าใช้งานดาวเทียมของประเทศอินโดนีเซีย และเปลี่ยนมาใช้งานผ่านดาวเทียมไทยคมในปัจจุบัน

ปี พ.ศ.๒๕๔๙ ระบบโทรคมนาคมกองทัพอากาศได้เปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยีสื่อสารโทรคมนาคมที่ทันสมัยและมีใช้กันแพร่หลายทั่วโลก โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตโปรโตคอล (IP) เป็นมาตรฐานกลางในการเชื่อมต่อ ซึ่งเทคโนโลยี IP จะถูกขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีการสลับเส้นทางแบบมัลติ-โปรโตคอล-ลาเบล-สวิตซ์ (Multi - Protocol Label Switching : MPLS) เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในด้านความเร็ว (High Speed) และ ความน่าเชื่อถือ (High Reliability)




รูปที่ ๒.๑๓ วิวัฒนาการของระบบโทรคมนาคมกองทัพอากาศ

การพัฒนาระบบสื่อสารโทรคมนาคมกองทัพอากาศได้มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของโครงการสำคัญต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงการพัฒนาระบบควบคุมและแจ้งเตือนการป้องกันทางอากาศ (Royal Thai Air Defense System : RTADS) ซึ่งเริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ.๒๕๒๗ โดยมีการพัฒนาที่สำคัญ ดังนี้

**๒.๑.๑ การพัฒนาระบบโทรคมนาคมในโครงการพัฒนาระบบควบคุมและแจ้งเตือนการป้องกันทางอากาศ** เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ.๒๕๒๗ โดยแบ่งการดำเนินการเป็น ๓ ขั้น (Phase) และมีการปรับปรุงระบบสื่อสารโทรคมนาคมในแต่ละขั้น ดังนี้

**๒.๑.๑.๑ RTADS Phase I** พัฒนาระบบโทรคมนาคมในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้ระบบวิทยุดิจิทัลไมโครเวฟ PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) มาใช้เป็นเส้นทางหลักสำหรับในเส้นทางย่อย (Spur-route) ได้ใช้วิทยุย่านความถี่ UHF

**๒.๑.๑.๒ RTADS Phase III** พัฒนาระบบโทรคมนาคมในพื้นที่ภาคใต้ โดยนำระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้เป็นเครือข่ายหลัก และในเครือข่ายสำรองได้นำระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมแบบ TDMA/DAMA (Time Division Multiple Access/Demand Assigned Multiple Access) มาใช้งานเมื่อ พ.ศ. ๒๕๔๓

**๒.๑.๑.๓ RTADS Phase II** พัฒนาระบบโทรคมนาคมเป็นการปรับปรุงระบบโทรคมนาคมของระบบ RTADS ให้เป็น IP Based Packets เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความเร็ว ความน่าเชื่อถือ ความปลอดภัยและความอ่อนตัวของระบบโทรคมนาคมกองทัพอากาศ และปรับปรุงระบบวิทยุดิจิทัลไมโครเวฟจาก PDH เป็น SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

## ๒.๒ ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาออกแบบระบบสื่อสารโทรคมนาคมของ ทอ.

กองทัพอากาศได้ปรับแนวทางการพัฒนาระบบสื่อสารโทรคมนาคมสมัยใหม่โดยการบูรณาการระบบสื่อสารโทรคมนาคมของกองทัพอากาศเพื่อให้มีช่องสื่อสารที่เพียงพอ มีเครือข่ายสำรองและเชื่อมต่อกับโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคมภายนอก เพื่อรองรับการพัฒนาของกองทัพอากาศยุค IT โดยได้พิจารณาถึงปัจจัยสำคัญในการพิจารณาออกแบบระบบสื่อสารโทรคมนาคม ดังนี้

### ๒.๒.๑ ความเชื่อถือได้ (Reliability)

เครือข่ายโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ ให้ความสำคัญต่อความเชื่อถือได้ของข่ายการสื่อสารเป็นอันดับแรก ความเชื่อถือได้ ในที่นี้หมายถึงการที่สามารถใช้งานติดต่อสื่อสารได้ตลอดเวลาแม้กระทั่งในยามสงคราม รวมถึงขีดความสามารถในการอยู่รอดของเครือข่ายด้วย ยกตัวอย่างเช่น เครือข่ายโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ ที่ใช้งานในการรับ-ส่งข้อมูล จากเรดาร์ ไปยังศูนย์ยุทธการทางอากาศ ตามโครงการป้องกันทางอากาศอัตโนมัติ กรณีที่เครือข่ายขัดข้องเพียงในช่วงเวลาไม่กี่นาที ก็มีความสำคัญต่อการป้องกันทางอากาศเป็นอย่างยิ่ง การที่จะประ สบผลสำเร็จตามหลักนิยมในการใช้กำลังทางอากาศ คือ “รวมการควบคุม แยกการปฏิบัติ” กองทัพอากาศต้องมีเครือข่ายสื่อสารที่มีความเชื่อถือได้สูง

### ๒.๒.๒ ความปลอดภัยในการสื่อสาร (Security)

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

### ๒.๒.๓ ความอ่อนตัว (Flexibility)

ระบบโทรคมนาคมที่ดีจะต้องสามารถรองรับภารกิจได้หลายรูปแบบ โดยทำการออกแบบให้เครือข่ายมีทิศทางติดต่อได้หลายทาง และ มีความอ่อนตัวในการจัดรูปแบบเครือข่าย เป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ และความอยู่รอดของระบบ

### ๒.๒.๔ สามารถบริหารจัดการ และควบคุมดูแลจากส่วนกลาง (Manageability)

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

**๒.๒.๕ ความสามารถในการใช้งานร่วมกันได้ (Interoperability)**

ความสามารถในการทำงานร่วมกันได้ของอุปกรณ์จากต่างผู้ผลิต (Interoperability) ในการออกแบบเลือกใช้งานอุปกรณ์สื่อสาร จำเป็นต้องเลือกแบบที่มีความเป็นมาตรฐาน สอดคล้องกับมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) เพื่อการใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์ที่เรามีใช้งานอยู่ในปัจจุบันได้

**๒.๒.๖ ความสามารถขยายเพิ่มเติม (Expandability)**

เพื่อรองรับการขยายตัวของเครือข่าย ต้องมีแผนแม่บทเครือข่ายโทรคมนาคม กองทัพอากาศสำหรับใช้ในการออกแบบ และ ควรมีการพิจารณาออกแบบโดยรวม ต้องคำนึงถึงขีดความสามารถในการรองรับการขยายตัวของ เทคโนโลยีการสื่อสาร ทั้งในด้านชุดอุปกรณ์และรูปแบบการใช้งานในอนาคตตลอดจนพิจารณาใช้งานข่ายโทรคมนาคมเหล่าทัพอื่น หรือของหน่วยงานของภาคเอกชนประกอบด้วย

**๒.๒.๗ ความคุ้มค่าในการใช้งาน (Cost Consideration)**

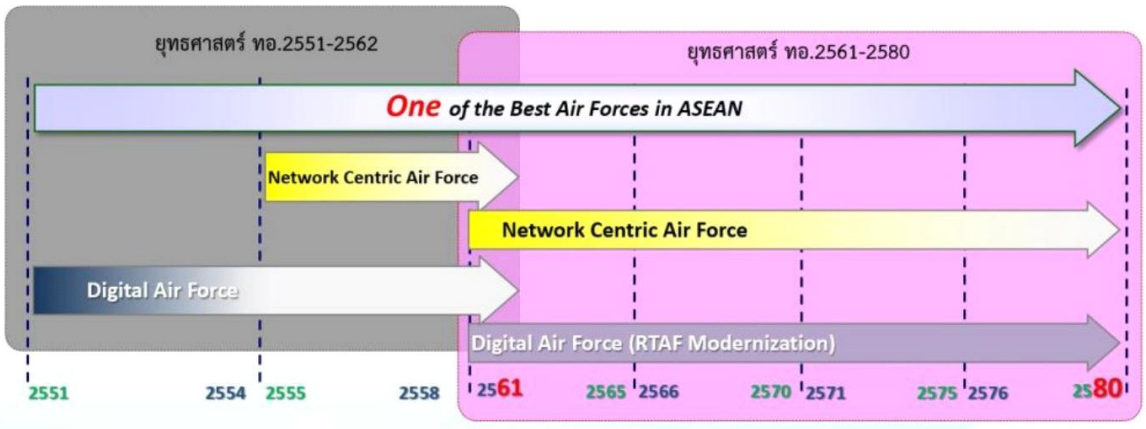
การออกแบบใช้งานเครือข่ายสื่อสารให้คุ้มค่า ต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบ (Operating Cost) ในระยะยาวเนื่องจากอุปกรณ์โทรคมนาคมมีอายุการใช้งานยาวนาน เช่นวิทยุโทรคมนาคมไมโครเวฟ มีอายุการใช้งาน ๑๕ ปี สายเคเบิลใยแก้วนำแสง ๒๐ ปี ทั้งนี้เพื่อให้ได้เครือข่ายโทรคมนาคมที่มีคุณภาพ มีความเชื่อถือได้ และ มีความปลอดภัยในการใช้งานอยู่เสมอ

**๒.๒.๘ การส่งกำลังและการซ่อมบำรุง (Operability and Maintainability)**

การส่งกำลังและการซ่อมบำรุง ต้องมีความคุ้มค่าในระยะยาว ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำไม่สิ้นเปลืองมากในการส่งกำลังหรือการปฏิบัติงาน เช่น ใช้บุคลากรในการปฏิบัติงานน้อย เป็นต้น

**๒.๓ ระบบสื่อสารโทรคมนาคมกับยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ.๒๕๖๑ - ๒๕๘๐)**

ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี ให้ความสำคัญกับการพัฒนากองทัพอากาศในทุกด้านอย่างเป็นระบบ เช่น การจัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือ และอาวุธยุทโธปกรณ์ที่เหมาะสม การฝึกศึกษาเพื่อพัฒนาบุคลากร การพัฒนาแนวความคิดในการปฏิบัติภารกิจ และการปรับปรุงโครงสร้างองค์กร เป็นต้น ระบบเครือข่ายรวมถึงระบบสื่อสารโทรคมนาคม เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ถูกกำหนดไว้ในการพัฒนากองทัพอากาศดิจิทัลที่ทันสมัย (Modernized DAF) และการพัฒนาต่อเนื่องสู่กองทัพอากาศที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCAF) เพื่อขับเคลื่อนกองทัพอากาศมุ่งสู่เป้าหมายในการเป็น“กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค” (One of the Best Air Forces in ASEAN) ที่กำหนดไว้ (ดังภาพที่ ๒-๒) ดังนี้




รูปที่ ๒.๑๔ ขอบเขตการพัฒนายุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ.๒๕๖๑ - ๒๕๘๐)

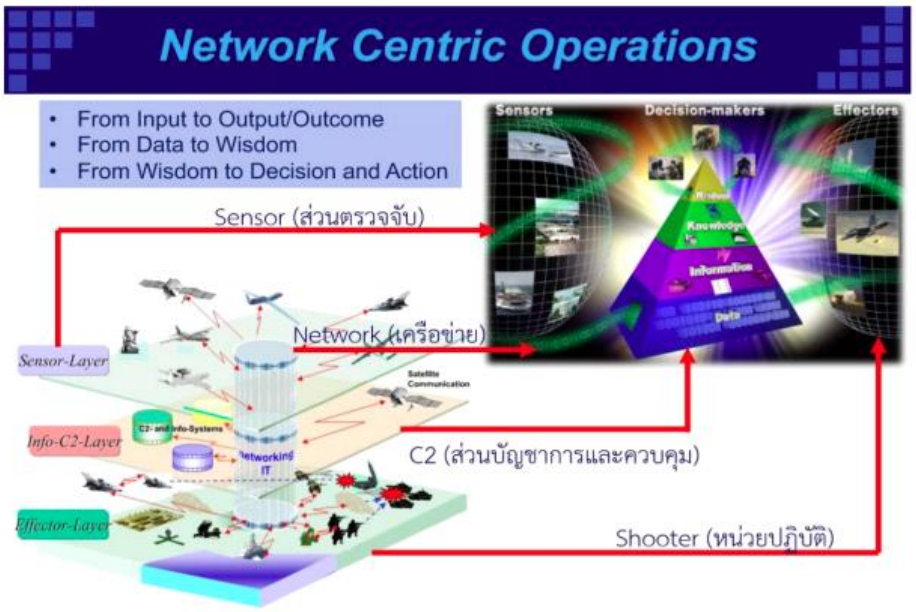
**๒.๓.๑ การพัฒนาสู่กองทัพอากาศดิจิทัลที่ทันสมัย** เป็นการดำเนินการเพิ่มเติมและต่อเนื่อง เพื่อพัฒนากองทัพอากาศ ในทุกภาคส่วนให้ก้าวสู่กองทัพอากาศดิจิทัลที่ทันสมัย (Modernized DAF) ซึ่งเป็นการพัฒนา พื้นฐานเทคโนโลยีดิจิทัลให้การปฏิบัติภารกิจในทุกด้านของกองทัพอากาศเป็นไปอย่างรวดเร็ว เหมาะสม ทันตามความต้องการในทุกสถานการณ์ อันเป็นพื้นฐานของการพัฒนา สู่การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) รวมทั้งเป็นการพัฒนาให้กองทัพอากาศ มีความทันสมัยโดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารเพื่อสนับสนุนการปฏิบัติภารกิจและการปฏิบัติงานของกองทัพอากาศ

**๒.๓.๒ การพัฒนาสู่กองทัพอากาศที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง** เป็นการมุ่งพัฒนาการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางด้านการรบ (RTAF NCO Combat Related Function) โดยกำหนดกลุ่มเป้าหมาย และจัดลำดับความสำคัญในการพัฒนาอย่างชัดเจน ทำให้สามารถพัฒนาสู่กองทัพอากาศที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCAF) ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยกำหนดกรอบระยะเวลา ในการดำเนินการคู่ขนานไปกับการพัฒนาสู่กองทัพอากาศดิจิทัลที่ทันสมัย (Modernized DAF)

**๒.๓.๓ การขับเคลื่อนกองทัพอากาศไปสู่ “กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค”** โดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัล และแนวความคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) ในการปฏิบัติการรบและที่มิใช่การรบเพื่อตอบสนองต่อภัยคุกคาม ทุกรูปแบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ บนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเอง และพัฒนาเป็นกองทัพอากาศที่มีขีดความสามารถอยู่ในระดับ ๑ ใน ๓ ของภูมิภาคอาเซียน ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ. ๒๕๖๑ - ๒๕๘๐) ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๓ กองทัพอากาศมีความเกี่ยวข้องเชื่อมโยงกับเทคโนโลยีอย่างแนบแน่น รวมทั้งการพัฒนาตามแนวความคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) ที่บูรณาการอย่างเป็นระบบ เทคโนโลยีเป็นจุดก่อกำเนิดนภานุภาพและเป็นเครื่องมือสนับสนุนกำลัง กองทัพอากาศให้เกิดการทวีกำลัง เทคโนโลยีที่ทันสมัยของกองทัพอากาศจะต้องนำไปสู่ กระบวนการตัดสินตกลงใจ เพื่อให้การใช้กำลังอย่างถูกต้อง เหมาะสม และทันเวลา

**๒.๔ ระบบสื่อสารโทรคมนาคมคือองค์ประกอบหลักของการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง**

การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) จะทำให้การปฏิบัติภารกิจของกองทัพอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเป็นการเพิ่มความรวดเร็ว ของวงรอบการตัดสินใจ (Observe-Orient-Decide-Act : OODA Loop) โดยการแลกเปลี่ยน ข้อมูลข่าวสาร (Information) และความตระหนักรู้สถานการณ์ (Situation Awareness) ร่วมกันผ่านระบบเครือข่าย (Network) ที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ผู้บังคับบัญชามีข้อมูลถูกต้อง ครบถ้วน สามารถตัดสินตกลงใจและสั่งการไปยังผู้ปฏิบัติ/หน่วยปฏิบัติ (Shooter) ได้ถูกต้อง และทันเวลานั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีระบบโทรคมนาคมที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งเป็นส่วนสำคัญในระบบเครือข่าย (Network) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเชื่อมต่อการบัญชาการและควบคุม (C2) ระบบตรวจจับ (Sensor) และผู้ปฏิบัติ/หน่วยปฏิบัติ (Shooter) เพื่อการปฏิบัติภารกิจ มีรายละเอียดดังนี้



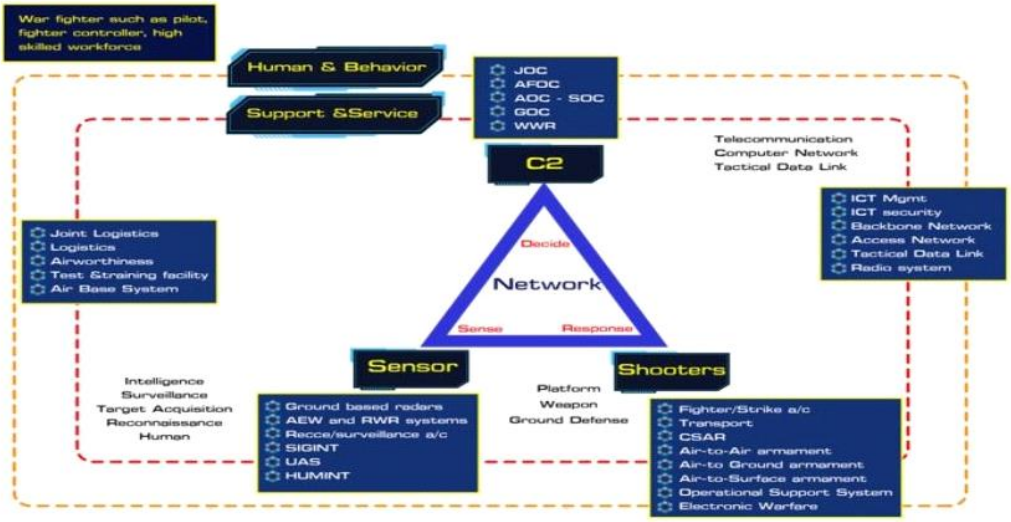

รูปที่ ๒.๑๕ องค์ประกอบหลักของการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง

**๒.๔.๑ Sensor Layer** คือส่วนของการตรวจจับ ซึ่งได้แก่ เรดาร์ อุปกรณ์ตรวจจับต่าง ๆ อุปกรณ์ถ่ายภาพที่ติดตั้งกับอากาศยานหรือ Platform ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจจับหรือถ่ายภาพ และส่งสัญญาณนั้นลงมาถ่ายทอดที่สถานีภาพพื้นผ่านเครือข่ายให้กับระบบบัญชาการและควบคุมในแต่ละระดับชั้นตามความต้องการของข้อมูลเพื่อการตัดสินตกลงใจ

**๒.๔.๒ Decision Maker Layer** คือส่วนของระดับการตัดสินใจในการควบคุมบังคับบัญชาของผู้ที่มีอำนาจตัดสินตกลงใจในแต่ละระดับชั้น ในการควบคุมและสั่งการต่อไปยังระดับ Shooter Layer ผ่านเครือข่าย

**๒.๔.๓ Shooter Layer** คือส่วนของระดับของหน่วยรบ/ผู้ปฏิบัติ ซึ่งได้รับคำสั่งการจาก Decision Maker Layer ในการปฏิบัติภารกิจ และปฏิบัติภารกิจให้สำเร็จตามคำสั่งการที่ได้รับ

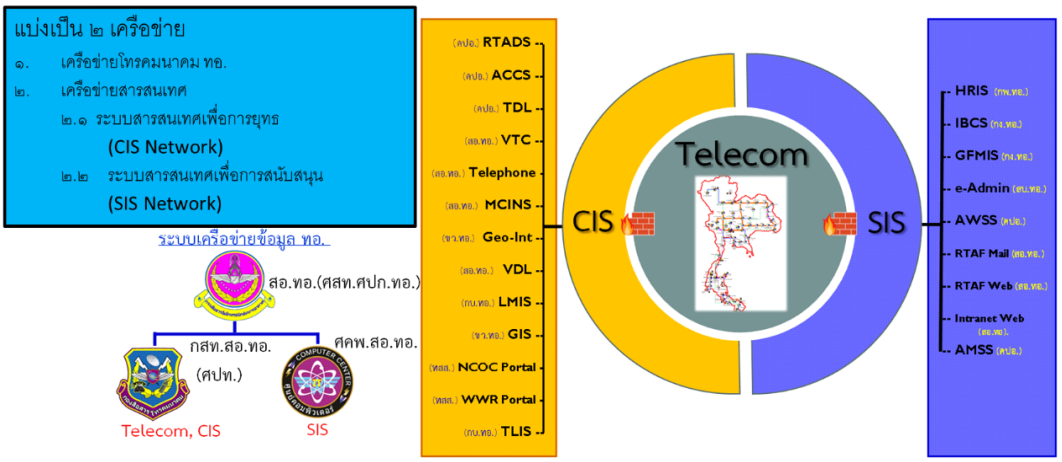
**๒.๔.๔ Network** คือเครือข่ายที่จะต้องเชื่อมโยงระหว่าง 3 Layers เข้าด้วยกันแบบบูรณาการ ซึ่งทั้ง ๔ องค์ประกอบดังกล่าวต้องได้รับการสนับสนุนจากอีก ๒ องค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ การสนับสนุนและบริการ (Support and Service) และบุคลากรและพฤติกรรม การปฏิบัติงาน (Human and Behavior) ดังแสดงในรูปภาพที่ ๒-๔




รูปที่ ๒.๑๖ การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง

## ๒.๕ เครือข่ายสื่อสารและสารสนเทศกองทัพอากาศ

เครือข่ายสื่อสารและสารสนเทศ ทอ.ประกอบด้วย เครือข่ายโทรคมนาคม ทอ.และ เครือข่ายสารสนเทศ โดยเครือข่ายสารสนเทศ แบ่งออกเป็น เครือข่ายสารสนเทศเพื่อการยุทธ (CIS Network) และเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน (SIS Network) ซึ่งกรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ ควบคุม กำกับ ดูแลในภาพรวม โดยมีกองสื่อสารโทรคมนาคม สอ.ทอ.ควบคุมกำกับดูแล เครือข่ายโทรคมนาคม ทอ.และเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการยุทธ และมีศูนย์คอมพิวเตอร์ สอ.ทอ.ควบคุมกำกับดูแล เครือข่ายสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน โดยเครือข่ายโทรคมนาคม ทอ.ทำหน้าที่สนับสนุนช่องสัญญาณเชื่อมต่อเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการยุทธ และเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน โดยทั้งสองเครือข่ายถูกแบ่งแยกกันทางตรรกะ (Logical) เปรียบเสมือนว่าเป็นคนละเครือข่าย ไม่สามารถเชื่อมต่อหากันโดยตรงได้ ดังแสดงในภาพที่ ๒-๕




รูปที่ ๒.๑๗ เครือข่ายโทรคมนาคม ทอ.รองรับเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการยุทธ (CIS Network) และเครือข่ายสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน (SIS Network)

สรุปการแบ่งกลุ่มงานระบบสารสนเทศกองทัพอากาศ ออกเป็น ๒ กลุ่มงาน คือ ระบบสารสนเทศเพื่อการยุทธ (Combat Information System : CIS) และระบบสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน (Support Information System : SIS) ตามตารางที่ ๒-๑

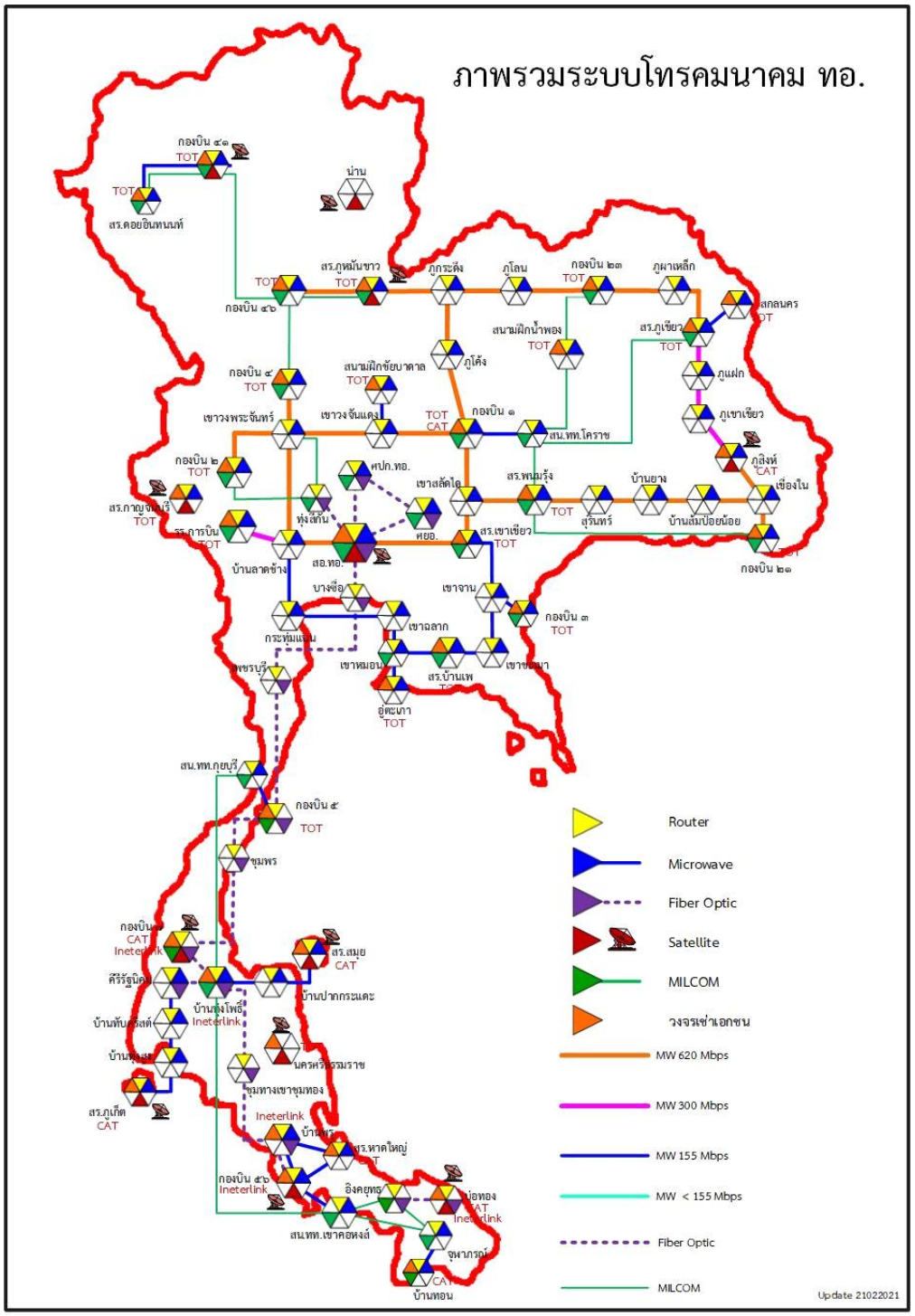
๒.๕.๑ เครือข่ายสารสนเทศเพื่อการยุทธ เป็นเครือข่ายสำหรับระบบสารสนเทศเพื่อการยุทธใช้งานที่ ศปก.ทอ., ศยอ.ศปก.ทอ., ศคปอ.ดม., ศคปอ.กท., ศคปอ.สฏ., ศปก.บน. และ สร. เพื่อรองรับระบบงานด้านยุทธการ อาทิเช่น ACCS, ICSS, VTC และระบบโทรศัพท์ เป็นต้น

๒.๕.๒ เครือข่ายสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน เป็นเครือข่ายสำหรับระบบสารสนเทศเพื่อการสนับสนุนที่ใช้งานในพื้นที่ดอนเมืองและกองบินต่าง ๆ อาทิเช่น ระบบ HRIS, IBCS, GFMIS, e-Admin, RTAF mail และ Website เป็นต้นใช้เครือข่ายโทรคมนาคม ทอ. และมีการเชื่อมต่อ Internet รองรับการเชื่อมต่อใช้งานจากภายนอก ทอ.

| ระบบสารสนเทศเพื่อการยุทธ (Combat Information System : CIS) | ระบบสารสนเทศเพื่อการสนับสนุน (Support Information System : SIS) |
|---|---|
| ระบบป้องกันทางอากาศอัตโนมัติ (RTADS)<br>ระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารงานด้านการข่าวและแฟ้มเป้าหมายอัตโนมัติ<br>ระบบบัญชาการและควบคุม (ACCS)<br>ระบบเชื่อมโยงข้อมูลทางยุทธวิธี (TDL)<br>ระบบภูมิสารสนเทศใช้เพื่อบริหาร 3 จว.ชายแดนภาคใต้<br>ระบบประชุมทางไกลผ่านวีดิทัศน์ (VTC) และระบบโทรศัพท์<br>ระบบเครือข่ายข้อมูลศูนย์ข่าว (MCINS)<br>ระบบข่าวกรองภูมิสารสนเทศ (Geo-Int)<br>ระบบรับ-ส่งสัญญาณภาพจากอากาศยานและอากาศยานไร้นักบิน (VDL)<br>ระบบสารสนเทศด้านการส่งกำลังบำรุงของ ทอ. (LMIS)<br>ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS)<br>ระบบโปรแกรมบริหารจัดการฐานข้อมูลฝ่ายอำนวยการเพื่อการบัญชาการและควบคุม (NCOC Portal)<br>ระบบโปรแกรมบูรณาการข้อมูลสำหรับ ศปก.บน. (Wing War Room Portal) และระบบการบริหารการซ่อมบำรุง (TLIS) | ระบบการบริหารงานด้านกำลังพล (HRIS)<br>ระบบควบคุมการใช้จ่ายงบประมาณภายใน ทอ. (IBCS)<br>ระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารด้านการเงิน ทอ. (GFMIS)<br>ระบบสารบรรณอิเล็กทรอนิกส์ (e-Admin)<br>ระบบบริการข่าวอากาศเพื่อการบิน (AWSS)<br>ระบบจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (RTAF Mail)<br>ระบบเว็บไซต์ ทอ. (RTAF Website)<br>ระบบเว็บไซต์อินทราเน็ต ทอ. (Intranet RTAF Website)<br>และระบบบริการข่าวสารข้อมูลการบินอัตโนมัติ (AMSS) |

**๒.๖ สถานภาพระบบโทรคมนาคม ทอ.ในปัจจุบัน (Transmission System)** ได้แก่ ระบบวิทยุไมโครเวฟ ระบบเคเบิลใยแก้วนำแสง เป็นเส้นทางเชื่อมต่อหลัก เครือข่ายโทรคมนาคมทหาร เครือข่ายเอกชน และ

ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นเส้นทางเชื่อมต่อสำรองในการเชื่อมต่อ อุปกรณ์สลับเส้นทางหรือ IP/MPLS Router โดยอุปกรณ์ระบบโทรคมนาคม ทอ.และระบบสนับสนุนอุปกรณ์ ส-อ.ต่าง ๆ ได้ถูกติดตั้งตามสถานีโทรคมนาคม ทอ. ทั่วทุกภูมิภาคในประเทศ ดังรูปที่ ๒.๑๘




รูปที่ ๒.๑๘ เครือข่ายโทรคมนาคมกองทัพอากาศในปัจจุบัน

**๒.๖.๑ องค์ประกอบของระบบโทรคมนาคม ทอ.**

ระบบโทรคมนาคม ทอ.สามารถพิจารณาตามองค์ประกอบหลักของอุปกรณ์ระบบโทรคมนาคม ทอ. ออกได้เป็น ๗ ระบบย่อย ได้แก่

- ระบบสื่อสัญญาณโทรคมนาคม (Transmission System)
- ระบบสลับเส้นทางและจัดช่องสัญญาณ (Packet Routing and Switching System)
- ระบบบริหารจัดการเครือข่ายโทรคมนาคม (Network Management System)
- ระบบรักษาความปลอดภัยเครือข่ายโทรคมนาคม (WAN Security System)
- ระบบ Interface งานด้านยุทธการและธุรการ สถานีโทรคมนาคม
- ระบบโครงสร้างพื้นฐาน Telecommunication Station and Infrastructure)
- บุคลากร

**๒.๖.๑.๑ ระบบสื่อสัญญาณโทรคมนาคม (Transmission System)** ทำหน้าที่เชื่อมต่อช่องสัญญาณสำหรับอุปกรณ์สลับเส้นทางหลัก (Core Router) สามารถจำแนกเป็น ๓ ประเภท ดังนี้

I ข่ายหลัก คือ ระบบวิทยุดิจิทัลไมโครเวฟของ ทอ. และระบบการสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสง โดย ทอ.มีระบบวิทยุดิจิทัลไมโครเวฟของ ทอ.เป็นเครือข่ายโทรคมนาคมหลักทั่วประเทศ รองรับความเร็วระหว่าง 40 - 622 Mbps และเช่าใช้บริการสายใยแก้วนำแสง (Dark Fiber) ของบริษัทเอกชน เป็นเส้นทางหลักของภาคใต้ จำนวน 2 Cores ระยะทาง ๑,๐๑๕ กม. รองรับความเร็วระดับ Gbps

II ข่ายรอง คือ เครือข่ายระบบโทรคมนาคมทหาร และเช่าใช้ช่องสัญญาณของบริษัทโทรคมนาคมแห่งชาติจำกัด (มหาชน) โดยขอใช้บริการช่องสัญญาณเครือข่ายโทรคมนาคมทหาร (สส.ทหาร) จำนวน ๒๒ เส้นทาง โดยมีความเร็วระหว่าง 40 - 1000 Mbps รวมทั้งสามารถขอรับการสนับสนุนใช้งานสายใยแก้วนำแสง (Dark Fiber) และเช่าใช้บริการช่องสัญญาณของบริษัทโทรคมนาคมแห่งชาติจำกัด (มหาชน) ในรูปแบบ IP-VPN โดยมีความเร็วระหว่าง 20 - 100 Mbps จำนวน ๓๓ เส้นทาง

III ข่ายสำรอง คือ ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยเช่าช่องสัญญาณผ่านดาวเทียมไทยคม ใช้เป็นข่ายสำรองในกรณีข่ายอื่น ๆ ขัดข้อง และในกรณีฉุกเฉินเร่งด่วน รวมทั้งในภารกิจจำเป็น รองรับความเร็วระหว่าง 512 Kbps - 2 Mbps

| ระบบ | ความเร็ว | จำนวน |
|---|---|---|
| ระบบวิทยุดิจิทัลไมโครเวฟ<br>1. SDH (Packet Radio)<br>2. SDH (SDH - STM-1)<br>3. PDH | <br>310 - 622 Mbps<br>155 Mbps<br>40 - 100 Mbps | <br>28 คู่สถานี<br>13 คู่สถานี<br>18 คู่สถานี |
| ระบบสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสงแบบ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) | 155 Mbps - 10 Gbps | 15 คู่สถานี |
| ระบบสื่อสารดาวเทียม<br>1. แบบภาคพื้น (Fixed)<br>2. แบบเคลื่อนที่ (Deployable) | <br>512 Kbps - 2 Mbps<br>512 Kbps - 2 Mbps | <br>11 Nodes<br>3 Nodes |

**๒.๖.๑.๒ ระบบสลับเส้นทางและจัดช่องสัญญาณ (Packet Routing and Switching System)** ประกอบด้วย อุปกรณ์สลับเส้นทางหลัก (Core Routers) จำนวน ๘๖ ชุด อุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Switches) จำนวน ๑๐๑ ชุด อุปกรณ์กระจายสัญญาณระบบบัญชาการและควบคุม (ACCS, CCIS) จำนวน ๘ ชุด อุปกรณ์สลับเส้นทางระบบบัญชาการและควบคุม (ACCS, CCIS) จำนวน ๔๗ ชุด และอุปกรณ์จัดช่องสัญญาณแสงแบบ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) จำนวน ๑๑ ชุด

**๒.๖.๑.๓ ระบบบริหารจัดการเครือข่ายโทรคมนาคม (Network Management System)** ประกอบด้วยระบบบริหารจัดการอุปกรณ์กระจายสัญญาณและอุปกรณ์สลับเส้นทาง (Switches and Routers) โดยเครือข่ายโทรคมนาคมและเครือข่าย CIS มีหลักการบริหารจัดการ Service หรือการให้บริการต่าง ๆ โดยจะแยก Service ออกเป็นเครือข่ายเสมือน (Virtual Private Network) ของแต่ละระบบงานออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถบริหารจัดการ Bandwidth โดยสามารถจัดลำดับความสำคัญให้การสื่อสารข้อมูลระบบทางยุทธการสำคัญ ให้ได้รับการจัดลำดับการส่ง-รับข้อมูลเป็นลำดับแรก

**๒.๖.๑.๔ ระบบรักษาความปลอดภัยเครือข่ายโทรคมนาคม (Network Security System)** เป็นระบบป้องกันการบุกรุกเครือข่าย ตามมาตรฐาน NIST โดยมีระบบ Active Directory, ระบบ Privileged Access Management (PAM), ระบบ One Time Password (OTP) สำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลเครือข่าย ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ได้แก่ อุปกรณ์ป้องกันภัยคุกคามในเครือข่าย Next Generation Firewall, อุปกรณ์จัดการความปลอดภัย Security Information and Event Management, อุปกรณ์จัดการความเป็นส่วนตัว Privileged Access Management และอุปกรณ์สำหรับสร้างรหัสผ่านเฉพาะกาล One Time Password (OTP)

**๒.๖.๑.๕ ระบบเชื่อมต่องานด้านยุทธการและธุรการ** (Interface) เป็นระบบที่เชื่อมต่อให้ระบบงานที่มีความแตกต่างลักษณะทางเทคนิคสามารถนำเข้าสู่ระบบโทรคมนาคมเพื่อการสื่อสารต่างระบบกันได้อย่างเรียบร้อย เช่น การเชื่อมต่อระบบการประชุมทางไกลผ่านวีดิทัศน์ (VTC) รองรับการประชุมระหว่าง ศปก.ทอ.และนขต.ทอ.ทั้งประเทศ และเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สายระยะไกล (LTE) ในการเชื่อมโยงข้อมูลภาพสถานการณ์ทางยุทธวิธีและพิกัดของชุดปฏิบัติการจากพื้นที่ปฏิบัติการตามกองบินมายัง ศปก.กองบินต่าง

**๒.๖.๑.๖ สถานีโทรคมนาคมและระบบโครงสร้างพื้นฐาน (Telecommunication Station and Infrastructure)** ซึ่งประกอบด้วย อาคารสถานที่ สิ่งอำนวยความสะดวก และอุปกรณ์ประจำสถานีโทรคมนาคมต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หอเสาอากาศ (Tower) เป็นต้น

**๒.๖.๑.๗ บุคลากร** เป็นผู้ควบคุมดูแล รวมถึงการซ่อมบำรุงระบบโทรคมนาคม ทอ. ให้คงประสิทธิภาพโดยจะมีระบบการฝึกอบรมพัฒนาบุคลากรในทุกระดับที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่อง

ตามภาพที่ ๒.๑๘ จะเห็นว่า ทอ.มีสถานีโทรคมนาคมเป็นจำนวนมาก เนื่องจากระบบสื่อสารโทรคมนาคม ทอ.ต้องมีพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่ปฏิบัติการของ ทอ.ทั่วประเทศ และสนับสนุนข่ายโทรคมนาคม สำหรับหน่วยงาน ทอ.ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เขาสูงหรือห่างไกล เช่น สถานีรายงานต่าง ๆ สถานีโทรคมนาคมจำนวนมากจึงมีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภูเขาสูงยากแก่การเข้าถึงทางถนน และบางส่วนมีการก่อสร้างและติดตั้งใช้งานมาตั้งแต่ปี พ.ศ.๒๕๓๐ จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงหรือบำรุงรักษาที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความพร้อม หรือคุณภาพขององค์ประกอบต่าง ๆ ในทุกส่วนงานของระบบโทรคมนาคมที่กล่าวมา จะส่งผลกระทบต่อการสนับสนุนภารกิจของ ทอ. และกระทบต่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ประจำสถานีโทรคมนาคม จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีสภาพพร้อมใช้งานตลอดเวลา

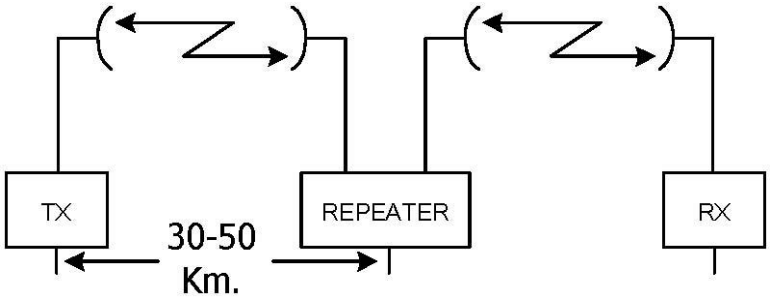
## ๓. ระบบวิทยุไมโครเวฟ ทอ.

### ๓.๑ การสื่อสารระบบวิทยุไมโครเวฟ (Microwave)

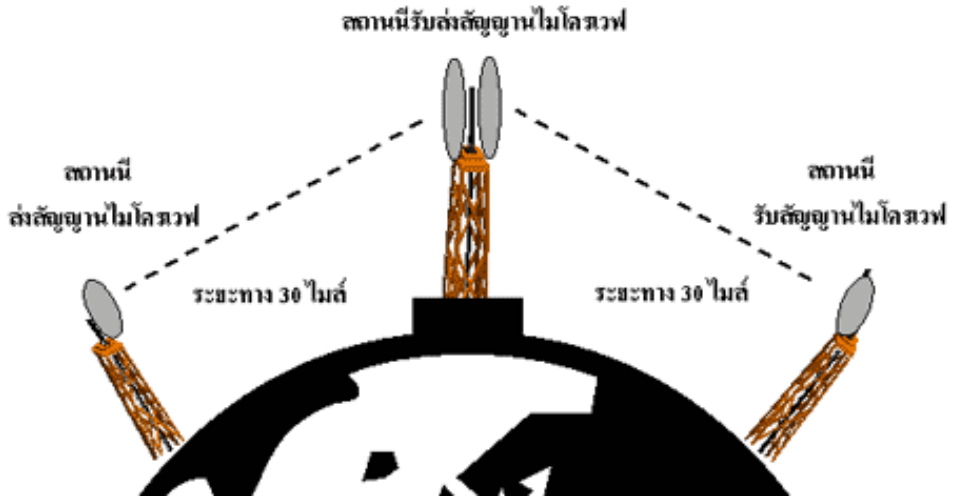
เป็นคลื่นความถี่วิทยุชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 1 GHz - 300 GHz ส่วนในการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1 GHz – 60 GHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสื่อกลางในการสื่อสารที่มีความเร็วสูงในระดับกิกะเฮิรตซ์ (GHz) และเนื่องจากความของคลื่นมีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร จึงเรียกชื่อว่า “ไมโครเวฟ” การส่งข้อมูลโดยอาศัยสัญญาณไมโครเวฟซึ่งเป็นสัญญาณคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าไปในอากาศพร้อมกับข้อมูลที่ต้องการส่ง และจะต้องมีสถานที่ทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูล และเนื่องจากสัญญาณไมโครเวฟจะเดินทางเป็นเส้นตรงในระดับสายตา (Line of sight transmission) ไม่สามารถเลี้ยวหรือโค้งตามขอบโลกที่มีความโค้งได้ จึงต้องมีการตั้งสถานีรับ-ส่งข้อมูลเป็นระยะๆ และส่งข้อมูลต่อกันเป็นทอดๆ ระหว่างสถานีต่อสถานีจนกว่าจะถึงสถานีปลายทาง หากลักษณะภูมิประเทศ มีภูเขาหรือตึกสูงบดบังคลื่นแล้ว ก็จะทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณไปยังเป้าหมายได้ ดังนั้นแต่ละสถานีจึงจำเป็นตั้งอยู่ในที่สูง เช่น ดาดฟ้า ตึกสูง หรือยอดดอยเพื่อหลีกเลี่ยงการชนเนื่องจากแนวการเดินทางที่เป็นเส้นตรงของสัญญาณดังที่กล่าวมาแล้ว การส่งข้อมูลด้วยสื่อกลางชนิดนี้เหมาะกับการส่งข้อมูลในพื้นที่ห่างไกลและทุรกันดาร

การส่งและรับสัญญาณของระบบไมโครเวฟจะใช้จานสะท้อนรูปพาลาโบลา เป็นระบบที่ใช้วิธีส่งสัญญาณที่มีความถี่คลื่นวิทยุเป็นทอด ๆ จากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง (1 Hop) จะมีจานสายอากาศเป็นคู่ที่ห่างกลกัน โดยสัญญาณของไมโครเวฟจะเดินทางเป็นเส้นตรง คุณลักษณะที่เรียกว่า “ระยะห่างที่มองเห็น (Line-of-sight)” ดังนั้นสถานีจะต้องพยายามตั้งอยู่ในที่สูง ๆ รวมทั้งยังขึ้นอยู่กับความสูงของเสาสัญญาณด้วย ซึ่งสถานีหนึ่ง ๆ จะครอบคลุมพื้นที่ที่รับสัญญาณได้ประมาณ ๓๐ - ๕๐ กิโลเมตร (๒๐ - ๓๐ ไมล์) ความเร็วในการส่งข้อมูล 100 - 1000 Mbps อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าถ้าเราสามารถมองเห็นจุดปลายทางแล้วจะหมายความว่าสามารถติดตั้งใช้งานระบบไมโครเวฟได้เสมอไป สภาพของชั้นบรรยากาศและผลกระทบจากภูมิประเทศแวดล้อมมีผลต่อการติดตั้งใช้งานระบบไมโครเวฟเป็นอย่างมาก จุดบางจุดอาจจะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่ไม่สามารถติดตั้งใช้งานระบบไมโครเวฟได้ ดังนั้นถาหากมีความจำเปน ที่จะตองติดตอระยะไกลกวานี้จะตองมีสถานีถายทอด กอนติดตั้งจะตองทำสำรวจเส้นทางทางเทคนิคอยางละเอียด เพื่อจะไดผลการติดต่ออยางสมบูรณ ในเบื้องต้นมีการแสดงการทำงานระบบไมโครเวฟเพื่อให้เข้าใจในหลักการทำงานโดยง่าย ดังภาพ




รูปที่ ๒.๑๙ แสดงรูปแบบเบื้องต้นของการสื่อสารระบบไมโครเวฟ




รูปที่ ๒.๒๐ แสดงการสื่อสารไมโครเวฟชนิดตั้งบนพื้นดิน

การส่งสัญญาณข้อมูลไปกลับ คลื่นไมโครเวฟเป็นการส่งสัญญาณข้อมูลแบบรับช่วงต่อ ๆ กันจากสถานีส่ง-รับสัญญาณหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง การส่งสัญญาณข้อมูลไมโครเวฟ มักใช้กันในกรณีที่การติดตั้งสายเคเบิลทำได้ไม่สะดวก เช่น ในเขตเมืองใหญ่ ๆ หรือในเขตที่ป่าเขา แต่ละสถานีไมโครเวฟจะติดตั้งจานส่ง-รับสัญญาณข้อมูลซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ๑๐ ฟุต สัญญาณไมโครเวฟเป็นคลื่นย่านความถี่สูง (2 - 10 GHz) เพื่อป้องกันการแทรกหรือรบกวนจากสัญญาณอื่น ๆ แต่สัญญาณอาจจะอ่อนลง หรือหักเหได้ในที่มีอากาศร้อนจัด พายุหรือฝน ดังนั้นการติดตั้งจานส่ง-รับสัญญาณจึงต้องให้หันหน้าของจานตรงกัน และหอยิ่งสูงยิ่งส่งสัญญาณได้ไกล ปัจจุบันมีการใช้การส่งสัญญาณข้อมูลทางไมโครเวฟกันอย่างแพร่หลาย สำหรับการสื่อสารข้อมูลในระยะทางไกล ๆ หรือระหว่างอาคาร โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่สะดวกที่จะใช้สายไฟเบอร์ออปติก หรือการสื่อสารดาวเทียม อีกทั้งไมโครเวฟยังมีราคาถูกกว่า และติดตั้งได้ง่ายกว่า และสามารถส่งข้อมูลได้คราวละมาก ๆ ด้วย อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญที่ทำให้สื่อกลางไมโครเวฟเป็นที่นิยม คือราคาที่ถูกกว่า

### ๓.๒ ข้อดีและข้อเสียของระบบวิทยุไมโครเวฟชนิดตั้งบนพื้นดิน

| ข้อดี | ข้อ เสีย |
|---|---|
| ๑. ใช้ในพื้นที่ซึ่งการเดินสายกระทำได้ไม่สะดวก<br>๒. ราคาถูกกว่าสายใยแก้วนำแสงและดาวเทียม<br>๓. ติดตั้งง่ายกว่าสายใยแก้วนำแสงและดาวเทียม<br>๔. อัตราการส่งข้อมูลสูง | ๑. ข้อจำกัดที่ต้องไม่มีสิ่งใดมากีดขวางเส้นสายตาของทั้งเครื่องรับและเครื่องส่ง มีผลในการลดทอนประสิทธิภาพ<br>๒. สัญญาณจะถูกรบกวนได้ง่ายจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากธรรมชาติ เช่น พายุ หรือฟ้าผ่า<br>๓. ถูกดักจับสัญญาณได้ง่าย |

## ๓.๓ องค์ประกอบของชุดวิทยุไมโครเวฟ

๓.๓.๑ เครื่องส่ง (Transmission Equipment)

สัญญาณที่ออกจากเครื่องสงจะสงผานสายส่งสัญญาณ (Transmission Line) ไดแก ท่อนำสัญญาณ (Wave Guide) หรือสายนำสัญญาณ (Coaxial Cable) ไปยังสายอากาศ (Antenna) เพื่อแพร่กระจายสัญาณคลื่นความถี่ โดยมีจานรีเฟล็กสัญญาณ (Parabolic Reflector) เพื่อบีบให้สัญญาณแคบเป็นลำคลื่น (Beam) ให้ส่งไปได้ระยะทางไกลขึ้น และสงตรงไปยังสายอากาศของเครื่องรับ

๓.๓.๒ เครื่องรับ (Receiver Equipment)

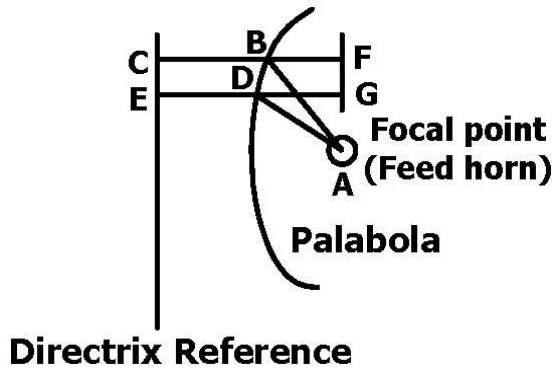
เครื่องรับจะต่องมีความไวตอการรับสัญญาณ (Highly Sensitive) สัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่ง จะรับสัญญาณผานสายอากาศที่มีรีเฟล็กแบบจาน (Parabolic Antenna) ผ่าน Transmission Line อาจเปน Wave Guide หรือ Coaxial Cable เขาสูภาครับเพื่อขยายและกรองสัญญาณเอาข้อมูลข่าวสารที่ส่งมาจากภาคส่งนำไปใช้ประโยชน์ตามภารกิจ หรือเพื่อส่งต่อไปยังจุดหมายปลายทางที่ไกลออกไป

๓.๓.๓ ท่อนำคลื่น (Wave Guide)

ท่อนำคลื่น หรือ Wave Guide เป็นสายส่งสัญญาณชนิดหนึ่งที่ใช้ในการเป็นเส้นทางเดินของคลื่นไมโครเวฟในการรับ-ส่ง โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อกลม หรือท่อเหลี่ยม ทำจากทองแดงหรืออะลูมิเนียมด้านในฉาบด้วยเงินเพื่อให้เป็นตัวนำที่ดี เหตุที่สายนำสัญญาณออกแบบเป็นลักษณะท่อนี้ เพราะว่าคลื่นไมโครเวฟมีความถี่สูงมาก ซึ่งจะเดินทางได้ดีที่บริเวณผิวของตัวนำถ้า หากใช้สายนำสัญญาณทั่วไปจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปได้ จึงต้องทำเป็นท่อเพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานจากผิวของสายสัญญาณ ความถี่ต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้กับเวฟไกด์เรียกว่า ความถี่คัตออฟ ซึ่งถ้าความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟจะสามารถเดินทางไปบนเวฟไกด์ได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่านี้จะไม่สามารถเดินทางบนเวฟไกด์ได้ ในการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟในเวฟไกด์นั้น จะเดินทางโดยการสะท้อนผนังท่อไปตามความยาวของท่อนำคลื่น

๓.๒.๓ สายอากาศ (Antenna)

เนื่องจากคุณสมบัติของความถี่ยานไมโครเวฟมีลักษณะคลายแสง ดังนั้น Parabolic Reflector จึงเหมาะสำหรับเปนสายอากาศของชุดวิทยุไมโครเวฟ Parabolic Reflector ทำหนาที่คลายกับแผนสะท่อนของไฟฉาย คือจะรวมพลังงานแมเหล็กไฟฟาของไมโครเวฟให้เปนลำ (Beam) และสงออกไปคลาย ๆ กับลำแสงที่ออกจากไฟฉายหรือ Spotlight ซึ่งในการรับเขาก็เชนกัน เมื่อสัญญาณรับกระทบกับสายอากาศมันก็จะสะทอนเขามารวมที่ จุดโฟกัส หรือ Feed Horn




รูปที่ ๒.๒๑ แสดงโครงสร้างของ Parabolic Reflector

๓.๒.๔ สถานีทวนสัญญาณไมโครเวฟ (Repeater)

เนื่องจากการสื่อสารไมโครเวฟเป็นการส่งสัญญาณแบบ Line-of-sight หรือในระดับแนวสายตา ไปตามส่วนโค้งของโลก ซึ่งประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไมโครเวฟที่สามารถใช้ได้ในระยะต่าง ๆ ขึ้นอยู่

กับกำลังส่ง ย่านความถี่ของสัญญาณ และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น ภูมิประเทศ สภาพอากาศ ฝน หิมะ หรือแม้กระทั้งหมอก ซึ่งผลจากการสะท้อนของคลื่น (Reflection) การดูดซับ (Absorbtion) ฯลฯ สามารถทำให้ประสิทธิภาพของการสัญญาณการสื่อสารที่ส่งถูกลดทอนไปได้ ดังนั้นในการสื่อสารไมโครเวฟนี้จะต้องมีสถานีเพื่อทวนสัญญาณในระยะทุก ๆ ๓๐ - ๕๐ กม. ซึ่งสถานีทวนสัญญาณจะทำการถ่ายทอด สัญญาณจากสถานีต้นทางทำการรับสัญญาณมาและทำการขยายสัญญาณ ให้แรงขึ้นแล้วก็ทำการส่งสัญญาณต่อไปจนถึงปลายทาง

๓.๒.๕ เสาสำหรับติดตั้งจานสายอากาศ (Tower)

ระยะทำการปกติของไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดประมาณ ประมาณ ๓๐ - ๕๐ กิโลเมตร (๒๐ - ๓๐ ไมล์) ซึ่งสถานีรับจะต้องไม่มีสิ่งใดกีดขวางระหว่างทางเพื่อให้การสื่อสารถูกลดทอนลงไป ระบบไมโครเวฟปกติจะถูกติดตั้งที่ยอดหรือด้านข้างอาคารให้อยู่เหนือต้นไม้ หรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ และในหลายระบบจะต้องใช้เสาสำหรับติดตั้งจานสายอากาศ (Tower) ซึ่งอาจต้องติดตั้งบนอาคารสูง หรือภูเขาสูง เพื่อเพิ่มมุมความสูงให้ Line-of-sight ระหว่างสถานีส่ง-รับ หลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางทางภูมิประเทศ ทำให้การสื่อสารมีระยะทางไกลยิ่งขึ้น และได้ประโยชน์จากการสื่อสารไมโครเวฟอย่างเต็มที่

# บทที่ ๓
# ระบบเครื่องช่วยเดินอากาศ ทอ.

## ๑. บทนำ

Navigation เป็นการดำเนินการวางแผน และควบคุม เพื่อนำเครื่องบินหรือยานพาหนะ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยที่ Navis มาจากภาษาลาติน หมายถึง Ship และ Agere หมายถึง To Move หรือ To Direct สำหรับ Air Navigation เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการเดินทาง การเขียนเส้นทางลงในกระดาษ หรือบนแผนที่ ในอดีตเป็นหน้าที่ของ Navigator ซึ่งต้องอาศัยการสังเกต การใช้แผนที่ เครื่องมือการเดินทาง และเครื่องคิดเลข ปัจจุบันการนำร่องทางอากาศทั้งภายนอก และภายในเครื่องบิน จะช่วยนำร่องระยะไกลได้อย่างเที่ยงตรง

เริ่มแรกวิธีรักษาเส้นทางการบิน หรือทิศทางการบิน โดยการสังเกตจากจุดต่างๆบนพื้นดิน เช่น ทางหลวง ทางรถไฟ แม่น้ำ สะพานต่างๆ การบินข้ามมหาสมุทร Atlantic นักบินต้องรู้ระยะทางจากจุดหนึ่งไปถึงอีกจุดหนึ่ง และทิศทางที่จะเคลื่อนที่ไป ความเร็วที่สม่ำเสมอในอากาศนักบินใช้เข็มทิศในการรักษาทิศทางการบิน แต่ไม่ใช่วิธีที่ประสบความสำเร็จทุกครั้ง เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางลม สำหรับ Radio Navigation นักบินสามารถปรับคลื่นความถี่รับสัญญาณจากสถานี และอ่านทิศทางได้จากอุปกรณ์แสดงผลว่ากำลังทำการบินไปทิศทางใด

วิธีการวัดแบบเดิมถูกใช้งานน้อย เช่น การกระพริบเพื่อคำนวณทางภูมิศาสตร์จากวัตถุไปยัง Lighthouse วิธีการของเครื่องช่วยเดินอากาศได้เปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งวิธีการใหม่ๆ ได้ถูกเปลี่ยนให้มีความถูกต้องปลอดภัย

เพื่อให้การบังคับเครื่องบินจากจุดหนึ่งไปสู่ที่หมายโดยไม่ผิดพลาด เป็นไปตามกฎกติกา หรือเพื่อความปลอดภัย เครื่องช่วยเดินอากาศต่างจากเครื่องช่วยเดินทางบกหลายอย่าง เนื่องจากเครื่องบินเดินทางด้วยความเร็วสูง เวลาที่ออกเดินทางใช้เพื่อคำนวณตำแหน่งตามเส้นทางบิน ซึ่งปกติเครื่องบินไม่สามารถหยุดกลางอากาศได้ มีจำนวนเชื้อเพลิงจำกัด ดังนั้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งหรือพิกัดตลอดเวลา เทคนิคการใช้เครื่องช่วยเดินอากาศขึ้นกับสภาพของอากาศว่าจะบินด้วยสายตา Visual Flight Rules (VFR) หรือบินด้วยเครื่องวัด Instrument Flight Rules (IFR) สำหรับการบินด้วยเครื่องวัดนักบินจะทำการนำเครื่องบินไปสู่เป้าหมายโดยการใช้เครื่องวัดประกอบการบิน ได้แก่เครื่องช่วยเดินอากาศ และการควบคุมของระบบ Radar

การวางแผนการเดินทาง เมื่อกำหนดเป้าหมายเรียบร้อยแล้ว นักบินจะวางแผนโดยใช้ Aeronautical Chart ของพื้นที่นั้น ซึ่งมีรายละเอียดของ หอบังคับการบิน เครื่องช่วยเดินอากาศ และส่วนสำคัญของสนามบิน ได้แก่ ภูเขา หอสูง เมือง ถนน หรือ ป่าไม้ เป็นต้น เพื่อช่วยให้นักบินมองเห็นได้ถูกต้อง ข้อมูลนี้ถูกปรับปรุงตลอดเวลา นักบินจะเลือกเส้นทางบินเพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่หวงห้าม หรือพื้นที่อันตราย โดยไม่ทำการบินผ่าน เส้นทางที่ใช้เดินทางถูกเขียนขึ้นเรียกว่า Track ความมุ่งหมายของเครื่องช่วยเดินอากาศ คือเพื่อให้นักบินเลือก Track และรักษา Ground Track ให้ถูกต้อง กรณีที่มีกระแสลมพัดหรือเครื่องยนต์ข้างใดข้างหนึ่งขัดข้อง ทำให้นักบินต้องคำนวณเพื่อปรับหัวของเครื่องบินชดเชยให้ได้ Track ตามต้องการหรือเมื่อมีกระแสลมพัดส่งท้ายเวลาที่ใช้ในการเดินทางจะน้อยลง เป็นต้น นอกจากนี้ Aeronautical Chart ยังระบุนามบินสำรองเมื่อสนามปลายทางหรือเครื่องบินมีข้อขัดข้อง รวมถึงความถี่วิทยุที่ใช้ติดต่อกับหอบังคับการบินต่างๆ

ระบบเครื่องช่วยเดินอากาศนั้นมีความจำเป็นโดยเฉพาะการนำอากาศยานร่อนลงสู่พื้น Runway ในสภาพอากาศที่เลวร้าย เช่น ฝนตก หิมะ หมอกลงจัด เมฆต่ำปกคลุมบริเวณสนามบิน ทำให้นักบินไม่สามารถมองเห็น Runway ได้ชัดเจน และเนื่องจากขณะที่กำลังร่อนลงนั้น เครื่องบินมีความเร็วต่ำใกล้กับความเร็วต่ำสุด จึงไม่สามารถไต่ระดับความสูงขึ้นได้อีก เพราะจะก่อให้เกิดอันตราย โดยเฉพาะเครื่องบินที่มีขนาดใหญ่ และจำนวนเครื่องบินมีมาก การควบคุมการจราจรทางอากาศจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่เชื่อถือได้

**๑.๑ วิวัฒนาการเครื่องช่วยเดินอากาศ**

ความแตกต่างทางเทคนิคของ Navigation ได้วิวัฒนาการไปตามยุคสมัย แต่ทั้งหมดล้วนนำไปสู่การทราบพิกัดของเครื่องบิน และเส้นทางบิน เทคนิคของ Navigation มีวิวัฒนาการดังนี้

๑. Dead Reckoning (DR) เป็นระบบนำร่องที่สำคัญใช้ในระยะแรกๆ ของการบิน เป็นวิธีที่ Lindberg ใช้ทำการบินข้ามมหาสมุทร Atlantic ครั้งแรกนักบินใช้วิธีนี้เมื่อทำการบินข้ามพื้นน้ำอันกว้างใหญ่ หรือทะเลทราย วิธีนี้จำเป็นต้องใช้ความสามารถ และประสบการณ์ เวลา ระยะทาง ทิศทางที่จะเคลื่อนที่ไป นักบินต้องรู้ระยะทางจากจุดหนึ่งไปถึงอีกจุดหนึ่ง และทิศทางที่จะไป โดยศึกษาได้จากแผนที่เพื่อเตรียมการก่อนทำการบิน นักบินวางแผนใช้เส้นทางบินล่วงหน้า แล้วนักบินคำนวณ เวลาที่แน่นอนสำหรับใช้เดินทางไปถึงจุดหมาย ขณะที่ทำการบินด้วยความเร็วคงที่ นักบินใช้เข็มทิศในการรักษาทิศทางการบิน แต่วิธีนี้ไม่สามารถประสบความสำเร็จได้ทุกครั้ง เพราะว่าการเปลี่ยนทิศทางของลม ซึ่งเป็นพื้นฐานของการบินแบบ VFR

๒. Pilotage หรือ Piloting เป็นวิธีทั่วๆไป สำหรับการนำร่องของเครื่องบิน วิธีนี้นักบินจะรักษาเส้นทางการบิน หรือทิศทางการบิน โดยการสังเกตจุดต่างๆบนพื้นดิน ปกติก่อนทำการบิน จะต้องเตรียมการ หรือวางแผนการบิน นักบินจะขีดเส้นบนแผนที่ เพื่อกำหนดเส้นทางที่ใช้ทำการบิน นักบินจะสังเกตเห็นตำแหน่งต่างๆ บนพื้นดิน เช่น ถนน ทางรถไฟ แม่น้ำ และ สะพานต่างๆ เมื่อนักบินทำการบินผ่านจุดสังเกต นักบินจะขีดเส้นบนแผนที่ แต่ถ้าเครื่องบินไม่ผ่านจุดสังเกตที่กำหนดบนแผนที่ นักบินจะต้องทราบทันทีว่าเกิดข้อผิดพลาด ต้องรีบแก้ไข

๓. Celestial Navigation เป็นการหาพิกัดจากตาราง แบบวงกลม หรือความรู้ทางตรีโกณมิติ และแบบดาราศาสตร์

๔. Radio Navigation เป็นวิธีที่นักบินทุกคนใช้เครื่องช่วยเดินอากาศ จากสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุพร้อม อุปกรณ์แสดงผล ของเครื่องรับ-ส่ง บนเครื่องบิน สัญญาณจะให้ข้อมูลว่า กำลังบินไปในทิศทางใด วิธีนี้ใช้คลื่นความถี่วิทยุในการหาตำแหน่งของเครื่องบิน โดยใช้ระบบ Finding Systems หรือระบบ Hyperbolic Systems เช่น Decca, Omega และ LORAN-C เป็นต้น

๕. Radar Navigation ใช้เรดาร์เพื่อหาทิศทาง ระยะทาง ไปยังจุดสังเกตที่ทราบพิกัด ซึ่งเป็นระบบใช้สำหรับหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุ เช่น การชนกันของเครื่องบิน

๖. Satellite Navigation ใช้การสร้างระบบดาวเทียมเช่น GPS เพื่อการหาพิกัดของเครื่องบิน

๗. ระบบ ILS หรือ Instrument Landing System ถูกทดลองใช้งานเมื่อปี 1929 และได้รับอนุญาตจาก Civil Aeronautics Administration โดยใช้งานครั้งแรก ๖ แห่ง และสายการบิน Pennsylvania – Central

Airlines โดยเครื่องบิน Boeing 247 – D ทำการบินจาก Washington DC ไปยัง Pittsburgh ทำการร่อนลงกลางพายุฝน โดยใช้เครื่องช่วยเดินอากาศ ILS เพียงอย่างเดียว

๘. VOR หรือ VHF Omni direction Radio Range เป็นเครื่องช่วยเดินอากาศ แบบ Broadcast ส่งข้อมูล นามสถานีในรูปแบบ Morse Code หรือสัญญาณเสียง และข้อมูลทิศทาง เป็น Radial ของเครื่องบิน โดยเทียบกับทิศเหนือของแม่เหล็กโลก สำหรับการพัฒนา Visual Aural Range หรือ VAR เป็น VOR เพื่อให้ได้เส้นทางทั้ง ๓๖๐ องศา เครื่องส่งสมัยแรกใช้ Electron Tube กับ Mechanically Rotated Antenna ได้ติดตั้งใช้งานอย่างกว้างขวางในปี 1950 ต่อมาประมาณปี 1960 ได้มีการพัฒนาเป็นแบบ Solid State เนื่องจากขณะนั้น VOR เป็นเครื่องช่วยเดินอากาศหลัก ที่เข้ามาแทนวิทยุหาทิศแบบ NDB ซึ่งยังคงใช้งานอยู่ สำหรับ VOR มีความแม่นยำ เชื่อถือได้มากกว่า เพราะว่ามีคุณสมบัติของคลื่นวิทยุย่าน VHF ที่สามารถลดการรบกวนจากพื้นที่รอบสถานี และการเกิดฝนฟ้าคะนองได้ดีกว่า

**๑.๒. ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้สำหรับเครื่องช่วยเดินอากาศ**

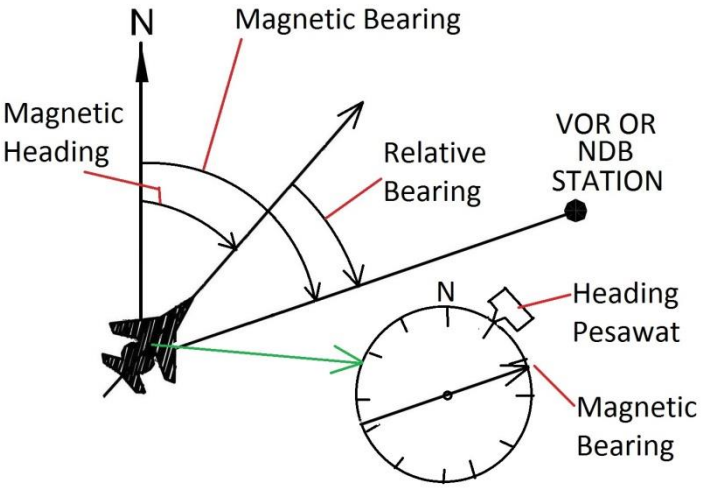
๑. Heading คือทิศทางที่ตรงกับหัวของ บ. โดยวัดเป็นองศาตามเข็มนาฬิกาเทียบกับ Magnetic North

๒. Track คือเส้นทางของ บ. ที่กำลังมุ่งหน้าไปจริงๆซึ่งอาจเป็นเพราะมีลมพัดทำให้ไม่ตรงกับ Heading มีหน่วยเป็นองศา วัดตามเข็มนาฬิกาเทียบกับ Magnetic North

๓. Drift คือค่าความแตกต่างระหว่าง Heading หัวของ บ.กับ Track มีหน่วยเป็นองศา

๔. Relative Bearing ทิศทางไปยังเป้าหมายหรือสถานีเครื่องช่วยเดินอากาศ เทียบกับ Heading (วัดแบบตามเข็มนาฬิกา)

๕. Magnetic Bearing ทิศทางไปยังสถานีเครื่องช่วยเดินอากาศ เทียบกับ Magnetic North (วัดแบบตามเข็มนาฬิกา)




รูปที่ ๓.๑ แสดงความสัมพันธ์ ทิศทาง , Track และ Heading

**๒. หลักการทำงานของเครื่องช่วยเดินอากาศภาคพื้นและภาคอากาศ**

**ระบบ NDB (Non Directional Beacon) และ ADF (Automatic Direction Finder)**

ระบบ NDB เป็นเครื่องส่ง AM ซึ่งติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่กำหนด โดยแพร่กระจายคลื่นแบบ AM และ Modulated ด้วย Audio Identification Tone ในรูปแบบของ Morse Code เพื่อบอกนามสถานี สำหรับบน บ. ใช้ระบบ Automatic Direction Finder หรือ ADF ใช้หาทิศทาง Relative Bearing ของสถานีเครื่องส่ง NDB เพื่อให้นักบินใช้ถือเข็มแสดงทิศทางสำหรับนำเครื่องบินเข้าหรือ ออก จากสถานีนั้น ADF สามารถรับสัญญาณคลื่นความถี่จากสถานีวิทยุ AM ทั่วไปได้ ซึ่งระบบนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยมีข้อดีในเรื่องการ รับ-ส่งสัญญาณ ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของ Line of Sight หรือสิ่งกีดขวาง เนื่องจากสัญญาณ NDB สามารถเดินทางไปตามส่วนโค้งของผิวโลกได้ รัศมีทำการสูงสุดของสัญญาณ ขึ้นอยู่กำลังส่งของเครื่องส่ง NDB ทั้งนี้ NDB แบ่งเป็น ๔ ชนิด ได้แก่

๑. Lowest-Power Beacons ใช้เป็น Marker Beacon ในระบบ ILS หรือ Instrument Landing System เรียกว่า Compass Locators เพื่อบอกตำแหน่งหรือขอบเขตกำลังออกอากาศไม่เกิน 25 Watts รัศมีทำการประมาณ 15 Nautical Mile

๒. Short Rang Beacon กำลังออกอากาศ 50 Watts รัศมีทำการประมาณ 25 Nautical Mile

๓. Medium Range Beacon กำลังออกอากาศ 50 - 2,000 Watts รัศมีทำการประมาณ 50 Nautical Mile

๔. Long range Beacon กำลังออกอากาศมากกว่า 2,000 Watts ใช้งานระยะไกล 75 Nautical Mile หรือมากกว่า

**เครื่องส่ง NDB ภาคพื้น**

ย่านความถี่ใช้งาน 200 - 800 kHz โดยแบ่งเป็น ย่านความถี่ต่ำ 200 - 400 kHz ย่านความถี่กลาง 400 - 600 kHz และย่านความถี่สูง 600 - 800 kHz Modulation แบบ AM Audio Identification Tone ความถี่ 1,020 Hz หรือ 400 Hz กำลังส่งออกอากาศ 25 – 2,000 Watts ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน Broadcast Station Antenna การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Vertical Polarized โดยไม่จำเป็นต้องแพร่กระจายคลื่นแบบทุกทิศทาง Omni Directional เสมอไป

**เครื่องรับ ADF บนเครื่องบิน**

ย่านความถี่ใช้งาน LF/MF 190 – 1,750 kHz มีหน้าปัทม์แสดง Bearing เรียกว่า Bearing Indicator

**การให้ข้อมูลของระบบ ADF**

นักบินสามารถปรับเลือกความถี่ ไปรับคลื่นความถี่ จากสถานีที่ต้องการ สัญญาณที่รับได้จะทำการขยาย และแปลงคลื่นความถี่เป็น เสียง หรือ สัญญาณ Morse Code พร้อมกับแปลงสัญญาณ ส่งให้ชุด Bearing Indicator แสดงผลทิศทาง เครื่องบินในปัจจุบันมักจะเป็นตัวเลข เช่น ความถี่ที่เลือกทิศทางของสถานี

รูปที่ ๓.๒ ชุดเครื่องรับและแสดงผลระบบ ADF

Bearing Indicator ทำหน้าที่แสดง และบ่งบอกทิศทางของสถานีส่งเป็นองศาเทียบกับทิศเหนือแม่เหล็กโลกเรียกว่า Magnetic Bearing ซึ่งประเภทของ ADF Indicator ในระบบ ADF ที่ใช้ในปัจจุบันนี้ มีอยู่ ๔ แบบได้แก่

รูปที่ ๓.๓ Fixed Compass Card

Fixed Compass Card: หน้าปัดจะยึดติดอยู่กับที่ไม่สามารถหมุนได้ และทิศ ๓๖๐ องศาจะอยู่ด้านบนเสมอ

รูปที่ ๓.๔ Rotatable Compass Card

Rotatable Compass Card: หน้าปัดชนิดนี้สามารถปรับได้ โดยหมุนหน้าปัดให้ Magnetic Heading ของเครื่องบิน อยู่ใต้เข็มด้านบน อ่านค่าทิศทางจากสถานีส่งได้โดยตรงจากหน้าปัดเข็มทิศ ซึ่งไม่ต้องคำนวณ

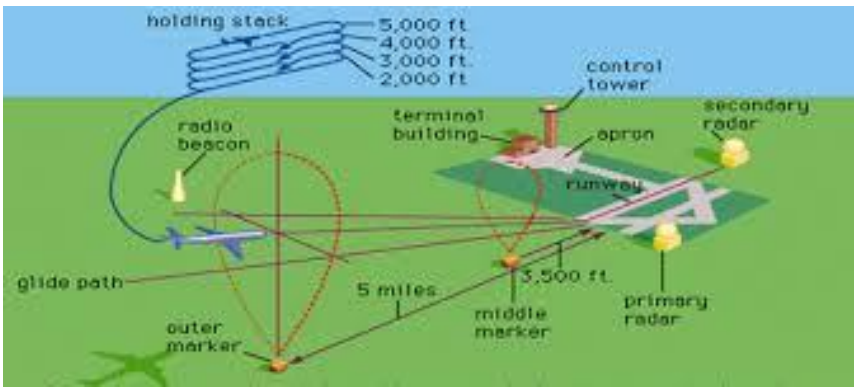
รูปที่ ๓.๕ Single-Needle Radio Magnetic Indicator

Single-Needle Radio Magnetic Indicator เข็มหน้าปัด RMI (Radio Magnetic Indicator) เป็นเครื่องมือที่ประกอบไปด้วย ข้อมูล Heading, Bearing, และตำแหน่ง Radial

รูปที่ ๓.๖ Dual-Needle Radio Magnetic Indicator

Dual-Needle Radio Magnetic Indicator เข็มหน้าปัด RMI เข็มหน้าปัดอันแรก เป็นเข็มใหญ่ (สีเหลือง) ทำหน้าที่แสดงถึง Magnetic Bearing ไปยังสถานี NDB สำหรับเข็มอันที่สองเป็นเข็มเล็ก (สีเขียว) ในภาพจะชี้ ไปยังสถานี VOR เครื่องชี้แบบเข็มหน้าปัดคู่มีประโยชน์ในการหาตำแหน่งของเครื่องบิน

**ILS (Instrument Landing System)**




รูปที่ ๓.๗ การลงสนามบินด้วยเครื่องช่วยเดินอากาศ ILS

ILS เป็นเครื่องช่วยเดินอากาศที่ใช้ในการนำเครื่องบินร่อนลงสู่สนามบินระยะสุดท้ายตามทางวิ่งที่กำหนด โดยให้ข้อมูล ทั้งเส้นทางเข้าสู่ทางวิ่ง ( Course ) ที่ตรงกับ Center Line ของ Runway และมุมร่อน ( Glide Path ) ของเครื่องบินถึงจุดสัมผัส (Threshold) รวมถึงบอกระยะห่างของเครื่องบินให้ทราบว่าอยู่ที่ตำแหน่งใด หรือระยะทางถึงสนามบินเท่าไร และสามารถใช้งานได้ทุกสภาพอากาศ ทั้งนี้ สามารถแยกประเภทโดยพิจารณาจากความสามารถตาม ILS Categories ได้ดังนี้

**Category I** มีประสิทธิภาพอำนวยความสะดวกให้นักบินใช้งานนำเครื่องบินร่อนลง จนถึงจุดซึ่งเส้น Localizer Course ตัดกับ Glide Path และเหลือความสูงเพียง ๖๐ เมตร หรือ ๒๐๐ ฟุต เทียบกับแนวระดับเดียวกับ Threshold เป็นความสูงที่นักบินสามารถมองเห็น Runway และตัดสินใจร่อนลง โดยเหลือระยะทางไม่น้อยกว่า ๘๐๐ เมตร หรือ ๒,๖๐๐ ฟุต ก่อนถึง Threshold

**Category II** มีประสิทธิภาพอำนวยความสะดวกให้นักบินใช้งานนำเครื่องบินร่อนลง จนถึงจุดซึ่งเส้น Localizer Course ตัดกับ Glide Path และเหลือความสูงเพียง ๑๕ เมตร หรือ ๕๐ ฟุต เทียบกับแนวระดับเดียวกับ Threshold โดยเหลือระยะทางไม่น้อยกว่า ๔๐๐ เมตร หรือ ๑,๓๐๐ ฟุต ก่อนถึง Threshold

**Category III** มีประสิทธิภาพอำนวยความสะดวกให้นักบินใช้งานนำเครื่องบินร่อนลงถึง Threshold

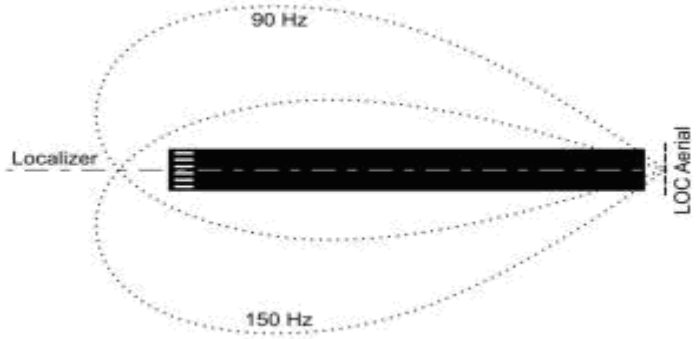
**คุณลักษณะทางเทคนิค**

| | |
|---|---|
| **Localizer** | ย่านความถี่ใช้งาน VHF ระหว่าง 108.1 – 111.9 MHz<br>กำลังออกอากาศของเครื่องส่งภาคพื้น 15 – 20 Watts |
| **Glide Slope** | ย่านความถี่ใช้งาน UHF ระหว่าง 328.6 – 335.4 MHz<br>กำลังออกอากาศของเครื่องส่งภาคพื้น 3 – 8 Watts |
| **Marker Beacon** | ความถี่ใช้งาน 75 MHz<br>กำลังออกอากาศ Outer Marker ประมาณ 1 Watts สำหรับ Middle Marker และ Inner Marker ประมาณ 350 mW |

**การทำงานของระบบ ILS ภาคพื้น**

รูปที่ ๓.๘ สถานี Localizer

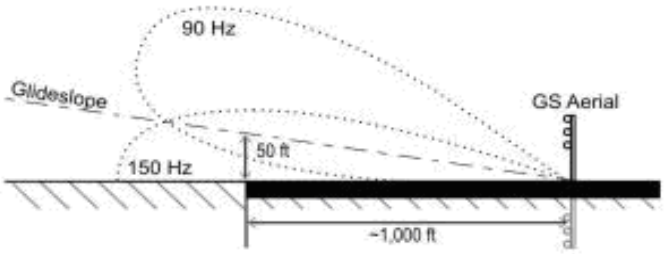
**สถานี Localizer** ทำหน้าที่ส่งสัญญาณข้อมูล Course เพื่อบอกให้นักบินทราบว่าเครื่องบินอยู่ด้านซ้ายหรือขวาของเส้นทางบินเข้าหาสนามบิน ซึ่งตรงกับ Center Line ของ Runway โดยที่สถานี Localizer มีชุด Antenna ติดตั้งอยู่ปลายทางวิ่งห่างจาก Runway Threshold ด้าน Stop End ๑,๐๐๐ ฟุต




รูปที่ ๓.๙ การแพร่กระจายคลื่น ของ Localizer

**สถานี Glide Slope** ทำหน้าที่ให้ข้อมูลมุมร่อน Glide Path (ในแนวดิ่ง) โดยทั่วไปเป็นมุมเงยจากระดับสนามบิน ๓ องศา

รูปที่ ๓.๑๐ สถานี Glide Slope



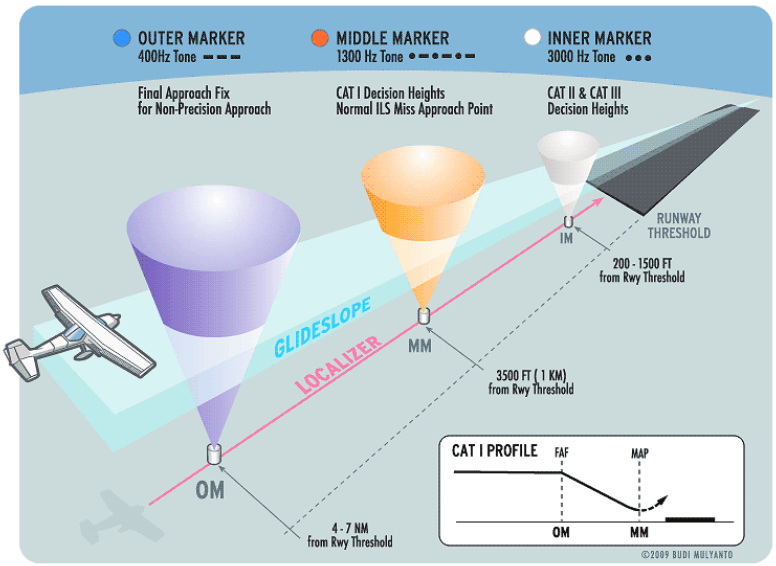

รูปที่ ๓.๑๑ การแพร่กระจายคลื่น ของ Glide Slope

**สถานี Marker Beacon** ทำหน้าที่บอกตำแหน่งที่ตั้งสำหรับนักบิน แยกได้เป็น ๓ สถานีย่อยดังนี้

Outer Marker ติดตั้งห่างจากRunway Threshold ประมาณ 4 - 6 NM สัญญาณที่ส่งออกอากาศ Modulate กับสัญญาณ Tone ความถี่ 400 Hz แบบ Morse Code เป็น Dash

Middle Marker ติดตั้งห่างจาRunway Threshold ประมาณ 0.6 NM สัญญาณที่ส่งออกอากาศ Modulate กับสัญญาณ Tone ความถี่ 1,300 Hz แบบ Morse Code เป็น Dot และ Dash

Inner, Airway, Fan หรือ Z Marker ติดตั้งติดกับ Runway Threshold สัญญาณที่ส่งออกอากาศ Modulate กับสัญญาณ Tone ความถี่ 3,000 Hz แบบ Morse Code เป็น Dot

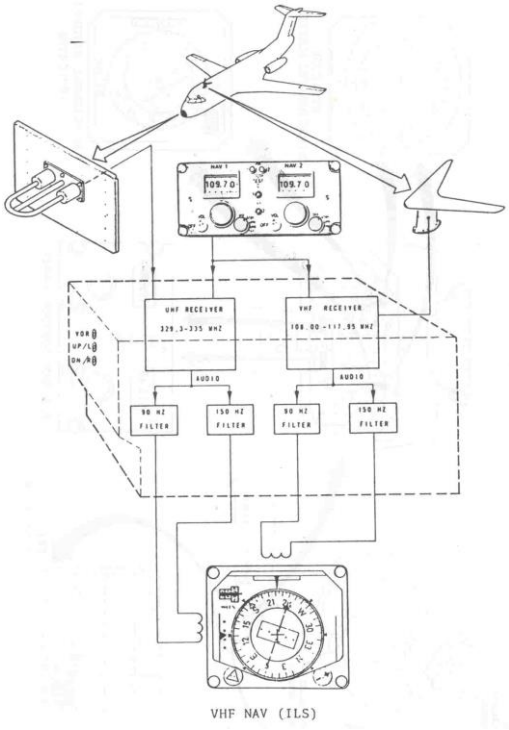



รูปที่ ๓.๑๒ การแพร่กระจายคลื่น ของ Marker Beacon

**การทำงานของระบบ ILS ภาคอากาศ**

ระบบ ILS บนเครื่องบินประกอบด้วย เครื่องรับ , ชุด VHF NAV , Glide Slope Antenna , Localizer Antenna , ชุดแสดงผลสำหรับนักบิน ADI กับ HSI และชุด VHF NAV Control

เครื่องรับ ILS ติดตั้งไว้ที่ Avionics Rack ส่วน Antenna Localizer ติดตั้งไว้ด้านบนเครื่องบิน สำหรับ Glide Slope Antenna ติดตั้งไว้ที่ Radome หน้าเครื่อง ชุด ADI กับ HSI ติดตั้งไว้ที่แผงเครื่องวัดในห้องนักบิน และชุด VHF NAV Control ติดตั้งไว้ที่แผงควบคุมในห้องนักบินเช่นกัน เครื่องรับ Localizer / Glide Slope พื้นฐาน




รูปที่ ๓.๑๓ การทำงานของระบบ ILS ภาคอากาศ

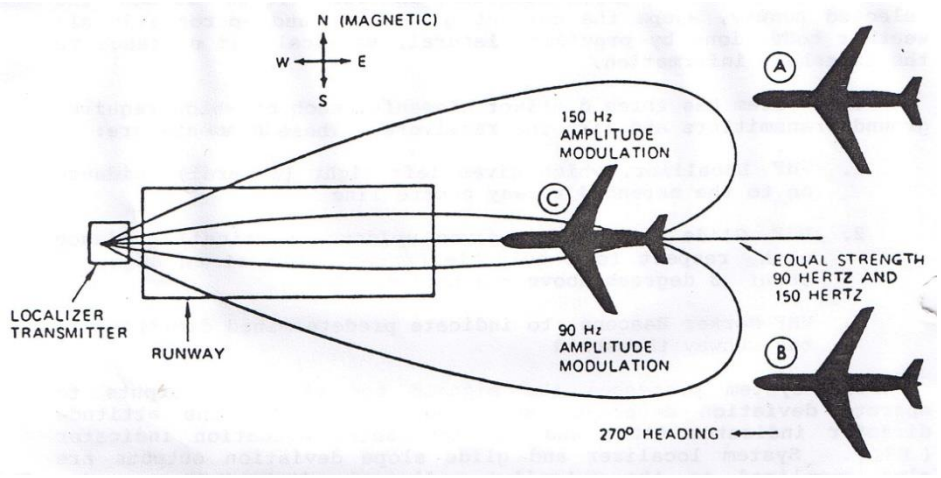
**การให้ข้อมูลของระบบ ILS**

**Localizer**

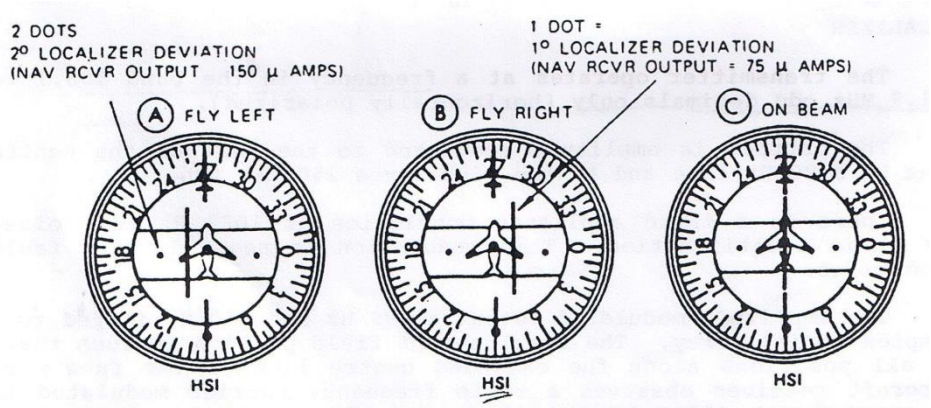
เครื่องบิน A อยู่ด้านขวามือของเส้นทางบิน หรือขวามือของนักบินที่บินเข้าหา Runway สัญญาณ Localizer ความถี่ 150 Hz มีความแรงมากกว่าสัญญาณความถี่ 90 Hz ทำให้เข็ม Deviation เบี่ยงเบนไปด้านซ้ายมือ Scale ของ HSI รูป A ตามภาพที่ ๓.๑๓ และ ๓.๑๔

เครื่องบิน B อยู่ด้านซ้ายมือของเส้นทางบิน หรือซ้ายมือของนักบินที่บินเข้าหา Runway สัญญาณ Localizer ความถี่ 90 Hz มีความแรงมากกว่าสัญญาณความถี่ 150 Hz ทำให้เข็ม Deviation เบี่ยงเบนไปด้านขวามือ Scale ของ HSI รูป B ตามภาพที่ ๓.๑๓ และ ๓.๑๔

เครื่องบิน C อยู่ในตำแหน่งตรงกับ Center Line ของ Runway สัญญาณ Localizer ความถี่ 150 Hz มีความแรงเท่ากับสัญญาณความถี่ 90 Hz ทำให้เข็ม Deviation อยู่ตรงกลาง Scale ของ HSI รูป C ตามภาพที่ ๓.๑๓ และ ๓.๑๔

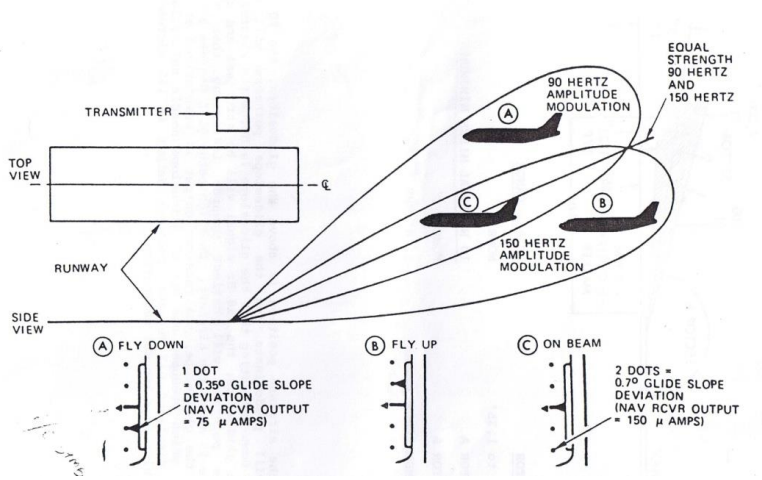



รูปที่ ๓.๑๔ การบินเข้าโดยใช้ระบบ Localizer




รูปที่ ๓.๑๕ การแสดงผลเครื่องวัดบนอากาศยานโดยใช้สถานี Localizer

**Glide Slope**




รูปที่ ๓.๑๖ การบินเข้าและแสดงผลเครื่องวัดบนอากาศยานโดยใช้ระบบ Glide Slope

เครื่องบิน A อยู่ด้านบนของ Glide path สัญญาณ Glide Slope ความถี่ 90 Hz มีความแรงมากกว่าสัญญาณความถี่ 150 Hz ทำให้เข็ม Deviation เบี่ยงเบนไปด้านล่าง Scale ของ HSI รูป A

เครื่องบิน B อยู่ด้านล่างของ Glide path สัญญาณ Glide Slope ความถี่ 150 Hz มีความแรงมากกว่าสัญญาณความถี่ 90 Hz ทำให้เข็ม Deviation เบี่ยงเบนไปด้านบน Scaleของ HSI รูป B

เครื่องบิน C อยู่ตรงกับ Glide path สัญญาณ Glide Slope ความถี่ 90 Hz มีความแรงเท่ากับสัญญาณความถี่ 150 Hz ทำให้เข็ม Deviation อยู่ตรงกลาง Scale ของ HSI รูป C ตามภาพที่ ๓.๑๕

**Marker Beacon**

เป็นการแสดงผลบนเครื่องบินให้นักบินทราบขณะทำการบินผ่านสถานี Marker Beacon โดยแสดงให้เห็นด้วย Lamp สีน้ำเงินสำหรับ Outer Marker สีอำพันสำหรับ Middle Marker และสีขาวสำหรับ Inner เกิดสัญญาณเสียงให้ได้ยินด้วย Tone ความถี่ 400 Hz แบบ Morse Code เป็น Dash สำหรับ Outer Marker ความถี่ 1,300 Hz แบบ Morse Code เป็น Dot – Dash สำหรับ Middle Marker และ ความถี่ 3,000 Hz แบบ Morse Code เป็น Dot สำหรับ Inner

**VOR (VHF Omni-directional Range)**

VOR เป็นระบบนำร่องพื้นฐานทาง Electronic ซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับ การบินที่ช่วยให้นักบินมีความสะดวก และเชื่อถือได้ ในการบินจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง สำหรับข้อมูลที่นักบินอ่านได้จากหน้าปัด ดังนี้ ทิศทาง, นามสถานี, บินเข้าสู่ หรือออกจากสถานี (To-From) และ CDI ปัจจุบันระบบการนำร่องแบบ VOR ยังขึ้นอยู่กับเครื่องส่งพื้นดิน ที่ส่งสัญญาณให้เครื่องรับ VOR บนเครื่องบิน

สถานี VOR ภาคพื้น แบ่งตามการใช้งานได้ ๒ ประเภทได้แก่ Category A คือ Normal VOR สำหรับ Enroute Navigation และ Category B คือ Terminal VOR สำหรับ Terminal Navigation นอกจากนี้ยังแบ่งตามทฤษฎีการทำงานได้ ๒ แบบได้แก่ CVOR (Conventional VOR) และ DVOR (Doppler VOR)

รูปที่ ๓.๑๗ สถานี VOR

ข้อดีของระบบ VOR คือหน้าปัด VOR แสดงให้นักบินเห็น และเข้าใจง่ายต่อการปฏิบัติตาม ไม่เกิดผลกระทบจากช่วงเวลากลางวัน กลางคืน (Night effect) ไม่ถูกรบกวนจากชั้นบรรยากาศ

ข้อเสียของระบบ VOR ไม่ได้ให้ข้อมูลระยะทาง จึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องรับ-ส่ง DME ร่วมใช้งานกับเครื่องส่ง VOR ด้วย และต้องมีสถานีภาคพื้นเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน เนื่องจากการส่งคลื่นพลังงานเป็นแบบ Line of Sight ซึ่งสิ่งกีดขวางมีผลต่อการรับสัญญาณ

**คุณลักษณะทางเทคนิค**

ย่านความถี่ใช้งาน 108 - 117.95 MHz Channel Spacing 50 kHz

สำหรับความถี่ 108 – 112 MHz เป็นย่านความถี่ของ VOR Category B ยกเว้นความถี่ที่ลงท้ายด้วย .10 , .30 , .50 , .70 , .90 ซึ่งความถี่ดังกล่าวใช้กับระบบ ILS

RF Output ประมาณ 200 W ใช้งานในระยะ 200 NM สำหรับ Category A และประมาณ 50 W ใช้งานได้ในระยะจำกัด หรือประมาณ 25 NM สำหรับ Category B

**การบินทดสอบสถานี VOR**

การบินทดสอบสถานี VOR องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) กำหนดให้มีการบินทดสอบเพื่อหาค่าความถูกต้องของสถานีเครื่องส่ง VOR เมื่อติดตั้งครั้งแรก ตามระยะเวลาทุก ๑ ปี และหลังจากมีการแก้ไขข้อขัดข้องเมื่อไม่เป็นตามที่ T.O.กำหนด การบินทดสอบต้องทราบพิกัดที่แน่นอน กำหนดวิธีทดสอบ กำหนด Sensitivity ของเครื่องรับบนเครื่องบิน เพื่อให้ใช้งานได้ตามปกติ โดยมีค่าผิดพลาดของทิศทาง Bearing ไม่เกิน ± ๑ องศา Identification Tone ใช้ความถี่ 1,020 Hz

**หลักการทำงานของระบบ VOR ภาคอากาศ**

เครื่องรับ VOR บนเครื่องบิน ทำหน้าที่ รับสัญญาณจากสถานีเครื่องส่ง VOR ภาคพื้น ความถี่ 108 – 117.95 MHz จากนั้นแยกสัญญาณ AM ออกได้เป็น ๒ ความถี่ คือ Reference Frequency 30 Hz และ Variable Frequency 9,960 ± 480 Hz

ข้อมูลทิศทาง (VOR Omni Bearing) ได้จากการแยกสัญญาณ ความถี่ 30 Hz AM และ 9,960 ± 480 Hz หรือ 30 Hz FM ใช้เป็นสัญญาณ Reference นำไปเปรียบเทียบ Phase กับ 30 Hz Variable ทำให้ทราบทิศทางของสถานี VOR นอกจากนี้ VOR Bearing บน RMI ยังสามารถหาค่า Relative Bearing ได้โดยเปรียบเทียบกับหัวของเครื่องบิน (Heading)

OBS (Omni Bearing Selector) มีไว้สำหรับให้นักบินเลือกทิศทาง เพื่อใช้บินเข้าหรือออกจากสถานี VOR โดยมี Course Deviation เทียบกับ OBI (Omni Bearing Indicator)

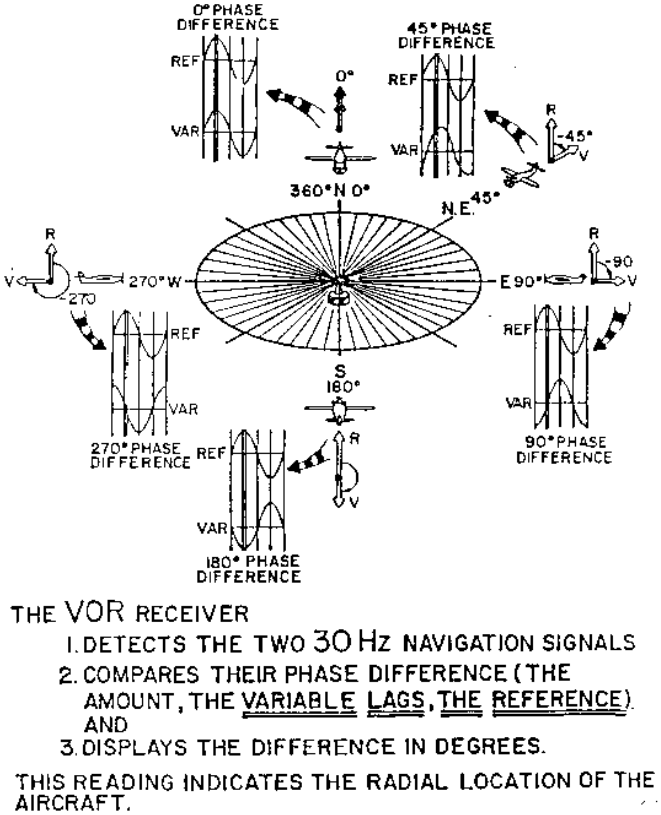
การแสดง To – From ได้จากการอ่าน OBI เทียบกับ OBS และการเปลี่ยน Phase ไป ๑๘๐ องศา ทำให้การแสดง To – From เปลี่ยนจาก To เป็น From

ระบบ Flag Alarm เป็นการเตือนความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น โดยปกติมีเงื่อนไข ๓ ประการได้แก่ Power Supply ขัดข้อง, Amplitude ของ Reference หรือ Variable Signal ไม่เพียงพอ และความแตกต่างระหว่างการอ่าน OBI และ Bearing ของ VOR มากเกินไป

สายอากาศ VOR บนเครื่องบินเป็นแบบ Omni Directional Horizontal Dipole และใช้ร่วมกับ Localizer ของระบบ ILS เนื่องจากอยู่ในย่านความถี่เดียวกัน

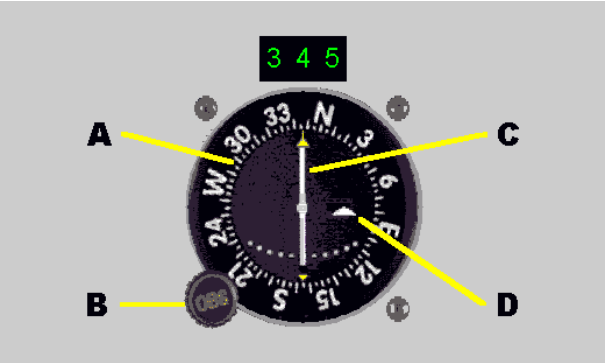
**การให้ข้อมูลของระบบ VOR ภาคอากาศ**

VOR ให้ข้อมูลข่าวสารกับเครื่องบิน ดังนี้ ทิศทาง, นามสถานี, Course Deviation และ To – From ทั้งนี้ทิศทาง ได้จากการเปรียบเทียบ Phase ระหว่างสัญญาณ Reference และสัญญาณ Variable ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะ In Phase กันที่ทิศเหนือ และจะมี Phase เปลี่ยนแปลงไปทุก ๑ องศาโดยรอบ




รูปที่ ๓.๑๘ หลักการแพร่สัญญาณระบบ VOR

นามสถานี Identification Tone ใช้ Tone ความถี่ 1,020 Hz เป็นสัญญาณเสียง Morse Code แทนอักษรนามสถานี ประกอบด้วย 3 ตัวอักษร โดยระยะเวลาสัญญาณ Tone ที่เป็น Dots = 0.125 Sec , Dashes = 0.375 Sec , ระยะเวลาระหว่าง Dots กับ Dashes ภายในอักษร = 0.125 Sec และระยะเวลาระหว่างอักษร = 0.375 Sec โดยการModulation แบบ AM ออกอากาศไปพร้อมกับ Reference Signal




รูปที่ ๓.๑๙ หน้าปัด แสดงข้อมูลของ VOR บนเครื่องบิน

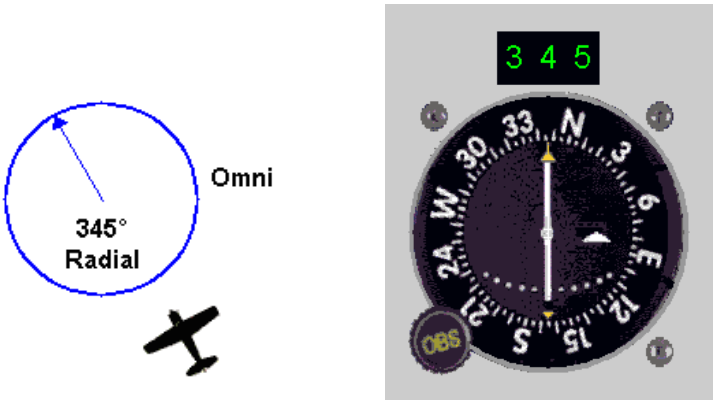
A - Rotating Course Card เลือกจาก 0 to 360° ซึ่งแสดง VOR Bearing ที่ถูกเลือกไว้สำหรับบินเข้าหรือออก ตัวอย่างเลือก 345° Radial

B - Omni Bearing Selector หรือ OBS Knob ใช้สำหรับปรับ Course Card

C - CDI หรือ Course Deviation Indicator เข็มนี้เบนซ้ายหรือขวาแสดงว่าทิศทางของเครื่องบินยังไม่ตรงกับ Course ที่ต้องการ ถ้าตรงเข็มจะอยู่ตรงกลางดังรูปนี้

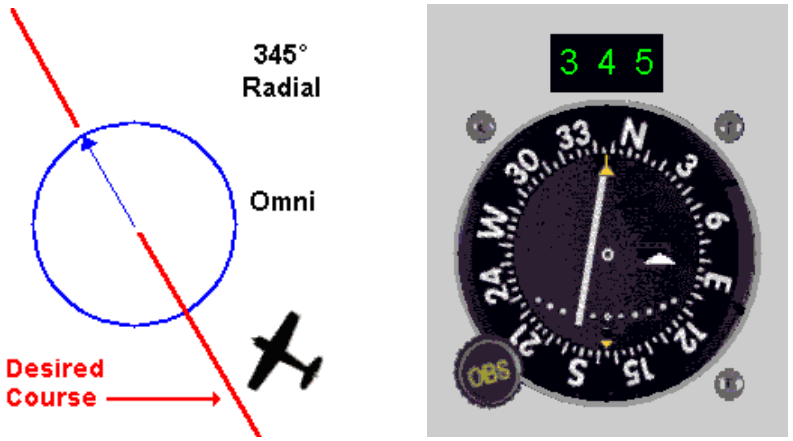
D - The To-From Indicator. ลูกศรนี้จะบอกว่าบินเข้าหรือออกจากสถานี VOR และจะมีธงแดงลงมาปิดที่ลูกศร To-From เมื่อรับสัญญาณ VOR ไม่ได้หรือ ขัดข้องที่ต้องแก้ไขตามรูปหน้าปัดแสดงให้เห็นว่าการบินตรงกับ Course ที่ได้ตั้งค่าไว้

การแสดงให้ทราบจาก RMI เป็น Relative Bearing และ Magnetic Bearing ซึ่งสามารถเลือก OBS ทิศทางที่ต้องการได้




รูปที่ ๓.๒๐ การแสดงผลการบินตรงกับ Course

การแสดงให้ทราบการบินที่ไม่ตรงกับ Course ที่ได้ตั้งค่าไว้




รูปที่ ๓.๒๑ การแสดงผลการบินไม่ตรงกับ Course

การแสดงให้ทราบว่าสัญญาณ VOR ใช้งานไม่ได้ Flag Show สีแดง

รูปที่ ๓.๒๒ การแสดงผลระบบ VOR ใช้งานไม่ได้

**TACAN (Tactical Air Navigation)**

รูปที่ ๓.๒๓ Mobile TACAN

TACAN เป็นระบบเครื่องช่วยเดินอากาศที่ กองทัพสหรัฐอเมริกา และประเทศสมาชิกองค์การ NATO ใช้ทางยุทธวิธีในทางทหารโดยเฉพาะทำงานร่วมกันระหว่างสถานีภาคพื้นกับเครื่องรับ-ส่งบนเครื่องบิน หรือระหว่างเครื่องบินกับเครื่องบิน โดยใช้งานเป็นเครื่องช่วยเดินอากาศหลัก ที่ติดตั้งกับเครื่องบินรบทั่วไป เพื่อนำเครื่องบินเข้าหาเป้าหมาย หรือสนามบินได้ถูกต้อง สถานี TACAN มีคุณลักษณะพิเศษคือสามารถเคลื่อนย้ายไปติดตั้งใช้งาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการทางยุทธวิธีได้สะดวกและรวดเร็ว สามารถใช้เป็นแบบ Air Borne TACAN ในขณะทำการบินทางยุทธวิธีเพื่อบอกตำแหน่งและทิศทางของเครื่องบินรบอื่น ขณะทำการบินด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น โดยให้ข้อมูลกับนักบิน ดังนี้

- ทิศทาง
- ระยะทาง
- นามสถานี
- Course Deviation Indicator (CDI)
- To - From

เนื่องจากข้อมูลทิศทาง และระยะทาง รวมไว้ในระบบเดียวกันที่สถานีภาคพื้นจึงง่ายต่อการติดตั้งใช้พื้นที่น้อยกว่า VOR ไม่จำเป็นต้องติดตั้งในอาคารเป็นแบบสถานีประจำที่ (Fixed TACAN) แต่สามารถติดตั้งใน Shelter, รถบรรทุก หรือ เรือ สำหรับใช้งานระยะเวลาสั้นๆ เป็นแบบเคลื่อนที่ได้ (Mobile TACAN) และให้ความแน่นอนมากกว่า VOR/DME เนื่องจากใช้คลื่นความถี่ 15 Hz และ 135 Hz เป็นส่วนประกอบ การให้ข้อมูลทิศทางมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± ๑ องศา และค่าความผิดพลาดของระยะทางไม่เกิน 185 m หรือไม่เกิน ± 0.1 NM

เครื่องรับ VORTAC มีความอ่อนตัวโดยสามารถใช้ VORTAC รับสัญญาณทิศทางจากสถานี VOR และรับสัญญาณระยะทางจากสถานี TACAN ภาคพื้นใน Function DME ทำให้สามารถลดจำนวนสถานี DME ลงได้ โดยใช้สถานี TACAN ปรับเป็น DME แทน

สถานี TACAN นำเครื่องบินเข้าหาเป้าหมาย แต่อาจถูกข้าศึกใช้งานนำเครื่องบินเข้ามาโจมตีได้เช่นกัน ต่างจากระบบ GPS, JPALS (Joint Precisions Approach And Landing System) ซึ่งป้องกันการโจมตีได้ดีกว่า และสามารถทำการบินแบบ Auto Operations ได้ ปัจจุบันเครื่องบินบางชนิดเริ่มมีการใช้งานเครื่องช่วยเดินอากาศที่ไม่ต้องมีสถานีภาคพื้น เช่น ระบบ GPS เป็นต้น

**คุณลักษณะทางเทคนิค**

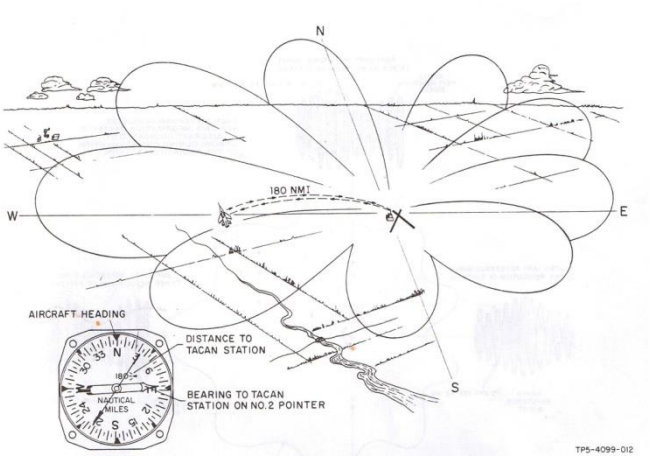
Standard TACAN Signal MIL STD 291 C

ความถี่ที่ใช้งานอยู่ในย่าน UHF 962 – 1,213 MHz แบ่งเป็น 126 Channel โดยแยกเป็น Low Band 63 Channel และ Hi Band 63 Channel และยังกำหนดเป็น X-Mode และ Y-Mode โดยแตกต่างกันในเรื่อง ความถี่ของเครื่องรับ – ส่ง และคุณลักษณะเฉพาะของ Pulse ที่ใช้งานในระบบ สำหรับสถานี TACAN ของ ทอ. ไทย ใช้งานเฉพาะ X-Mode เท่านั้น

**ตาราง** แสดงความถี่ของสถานี TACAN

| BAND | CHANNEL | RECEIVER | TRANSMITTER | |
|---|---|---|---|---|
| | | | X-MODE | Y-MODE |
| LO | 1 | 1,025 | 962 | 1,088 |
| | 2 | 1,026 | 963 | 1,089 |
| | 3 | 1,027 | 964 | 1,090 |
| | . | . | . | . |
| | . | . | . | . |
| | 63 | 1,087 | 1,024 | 1,150 |
| HI | 64 | 1,088 | 1,151 | 1,025 |
| | 65 | 1,089 | 1,152 | 1,026 |
| | 66 | 1,090 | 1,153 | 1,027 |
| | . | . | . | . |
| | . | . | . | . |
| | 126 | 1,150 | 1,213 | 1,087 |

**หลักการทำงานของระบบ TACAN ภาคอากาศ**




รูปที่ ๓.๒๔ การรับสัญญาณ TACAN บน อากาศยาน

ระบบเครื่องรับ-ส่ง TACAN บนเครื่องบิน ทำการ รับ – ส่ง สัญญาณ และให้ข้อมูลทิศทาง, ระยะทาง, นามสถานี, Course Deviation และ To From แก่นักบิน

ส่วนประกอบของระบบ TACAN บนเครื่องบิน มีดังนี้ Antenna, R/T, D/A Adapter, RNAV Interface, ระบบ Compass และ HSI

Antenna ทำหน้าที่รับ – ส่ง คลื่นวิทยุ ติดตั้งไว้ด้านล่างลำตัวของเครื่องบินหรือติดตั้งทั้งด้านบนและด้านล่างลำตัวเครื่องบิน

R/T Unit ทำหน้าที่รับ – ส่งสัญญาณ และถอดรหัส Pulse Pair จากนั้นประมวลผลเป็นข้อมูลทิศทาง ระยะทาง ส่งให้กับชุด D/A Adapter เพื่อแปลงเป็นสัญญาณให้กับชุดแสดงผล (Indicator) โดยแยกสัญญาณนามสถานีให้ชุด Audio Control ซึ่งสามารถปรับความแรงของสัญญาณเสียงได้

รูปที่ ๓.๒๕ TACAN Transceiver

D/A Adapter ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลทิศทาง ระยะทาง ให้สามารถแสดงผลได้ นอกจากนั้นยังรับค่าทิศทาง Compass บนเครื่องบินและค่า Course Set มาประมวลผลเป็นข้อมูล Relative Bearing, Course Deviation และ To – From

RNAV Interface ทำหน้าที่แปลงข้อมูลระหว่าง R/T กับชุด HSI ด้วยระบบ Computer ให้สามารถควบคุม ทิศทาง และ ตำแหน่งของเครื่องบินได้

ชุด TACAN Display (HSI) ทำหน้าที่แสดงผลข้อมูล ของระบบ TACAN โดยมี Compass เป็นอุปกรณ์ Magnetic แสดงทิศเหนือแม่เหล็กโลก เพื่อใช้ในการหาทิศเหนือจริง

Function การใช้งานของระบบ TACAN บนเครื่องบิน

REC Mode ใช้สำหรับการรับสัญญาณข้อมูล Bearing, Course Deviation และ To - From จากสถานีภาคพื้น ให้แสดงผลที่ HSI

R/T Mode ใช้สำหรับการรับสัญญาณของมูล Bearing, Distance และ Course Deviation จากสถานีภาคพื้น ให้แสดงผลที่ HSI

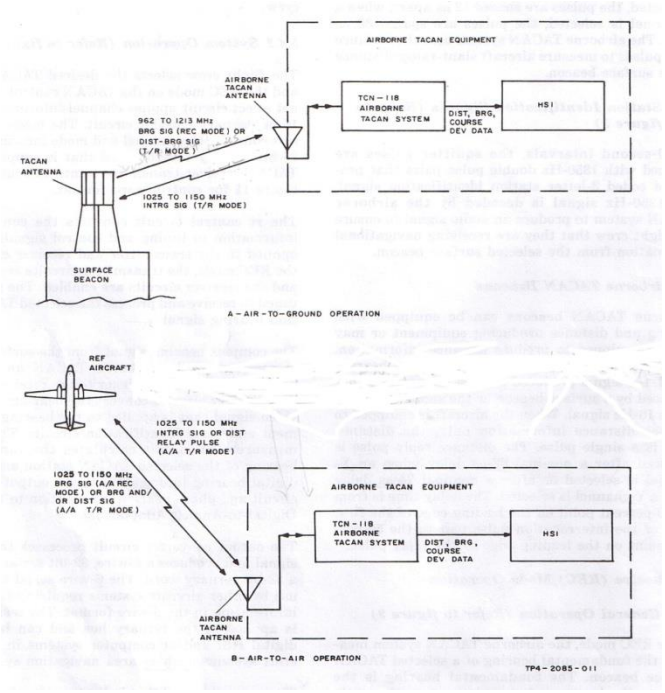
A/A REC Mode ใช้งานระหว่าง Air to Air ให้ข้อมูล เหมื่อนกับ REC Mode แต่ข้อมูล Bearing ที่ได้รับจะเป็นทิศทางไปยังเครื่องบินที่ใช้งานร่วมกัน

A/A R/T Mode ใช้งานระหว่าง Air to Air ให้ข้อมูล เหมือนกับ R/T Mode แต่ข้อมูล Bearing และระยะทาง ที่ได้รับจะเป็นทิศทางไปยังเครื่องบินที่ใช้งานร่วมกัน และถ้ากรณีที่เครื่องบินที่ใช้งานร่วมกันไม่อุปกรณ์ที่ใช้ผลิตสัญญาณ Bearing จะทำให้รับข้อมูลเฉพาะระยะทางเท่านั้น

การ Test มีทั้งแบบ Manual Seft Test และ Automatic Self Test

Manual Seft Test คือการตรวจสอบการทำงานของเครื่องโดยเจ้าหน้าที่ช่าง ซึ่งเป็นการทดสอบอุปกรณ์ของระบบ TACAN บนเครื่องบินเมื่อมีการเปลี่ยนหรือแก้ไขอุปกรณ์ ยกเว้นชุด Antenna

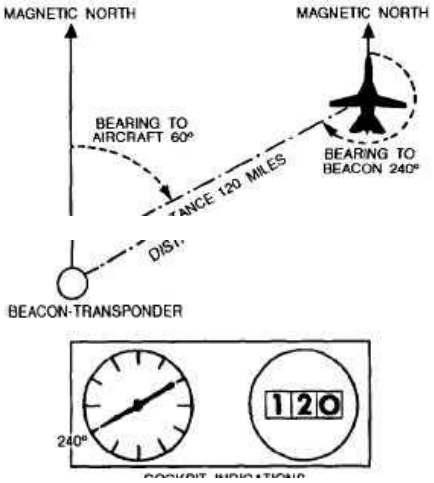
Automatic Self Test คือการตรวจสอบการทำงานของเครื่องแบบอัตโนมัติ เมื่อเครื่องรับทำการรับสัญญาณไม่ได้ หรือมีความแรงไม่เพียงพอเป็นเวลานานเกินกว่า Memory Time ระบบจะทำการ Automatic Self Test โดยเข็มของ Bearing จะชี้ทิศทาง ๒๗๐ องศาเป็นเวลาประมาณ ๒-๔ วินาที และเมื่อจบการ Automatic Self Test แล้วยังไม่สามารถรับสัญญาณได้เพียงพอ Control Lights จะแสดงให้นักบินทราบว่าไม่สามารถใช้งานได้



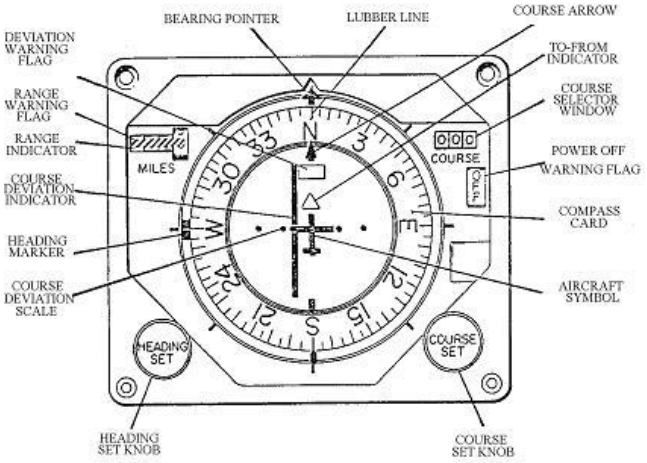

รูปที่ ๓.๒๖ การรับส่งสัญญาณ TACAN

**การให้ข้อมูลของระบบ TACAN**

การให้ข้อมูลของระบบ TACAN ประกอบด้วย Horizontal Situational Indicator (HSI) ซึ่งใช้แสดงข้อมูลหลายอย่าง




รูปที่ ๓.๒๗ การให้ข้อมูลของระบบ TACAN




รูปที่ ๓.๒๗ Horizontal Situational Indicator (HSI)

ข้อมูลทิศทาง เป็น Magnetic Bearing ไปยังสถานี TACAN ที่ใช้งาน แสดงให้ทราบโดย Bearing Pointer

ข้อมูลระยะทาง เป็น Nautical Mile จากเครื่องบินถึงสถานี TACAN ที่ใช้งาน แบบ Slant Range แสดงให้ทราบโดย Range Indicator

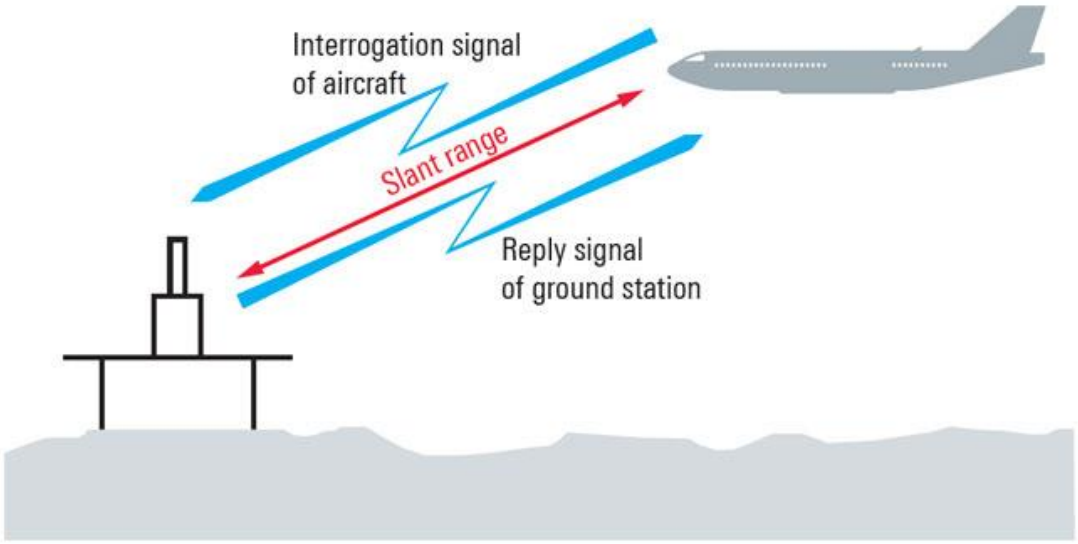
ข้อมูล Course Deviation หรือ ทิศทางที่เลือกสำหรับใช้เป็นเส้นทางบิน สามารถ Set ได้โดยหมุน Omni Bearing Selector (OBS) แสดงให้ทราบโดย Course Deviation Indicator (CDI)

ข้อมูล To - From บอกให้ทราบว่าเป็นการบินเข้าหาหรือออกจากสถานี แสดงให้ทราบโดย To - From Indicator

นอกจากนี้ยังมี Flag Alarm เตือนเมื่อเครื่องมีข้อขัดข้องเกิดขึ้น หรือเครื่องรับสัญญาณไม่ได้

**DME (Distance Measuring Equipment)**

ระบบ DME ประกอบด้วยสถานีภาคพื้น และเครื่องรับ-ส่ง DME บนเครื่องบินเพื่อใช้วัดระยะทางระหว่างเครื่องบินกับสถานีภาคพื้น โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับ การกำหนดตำแหน่ง การบินเข้าหาสนามบิน การป้องกันปัญหาการจราจรทางอากาศ และการรออยู่ในตำแหน่งที่กำหนด หรือคำนวณ Ground Speed

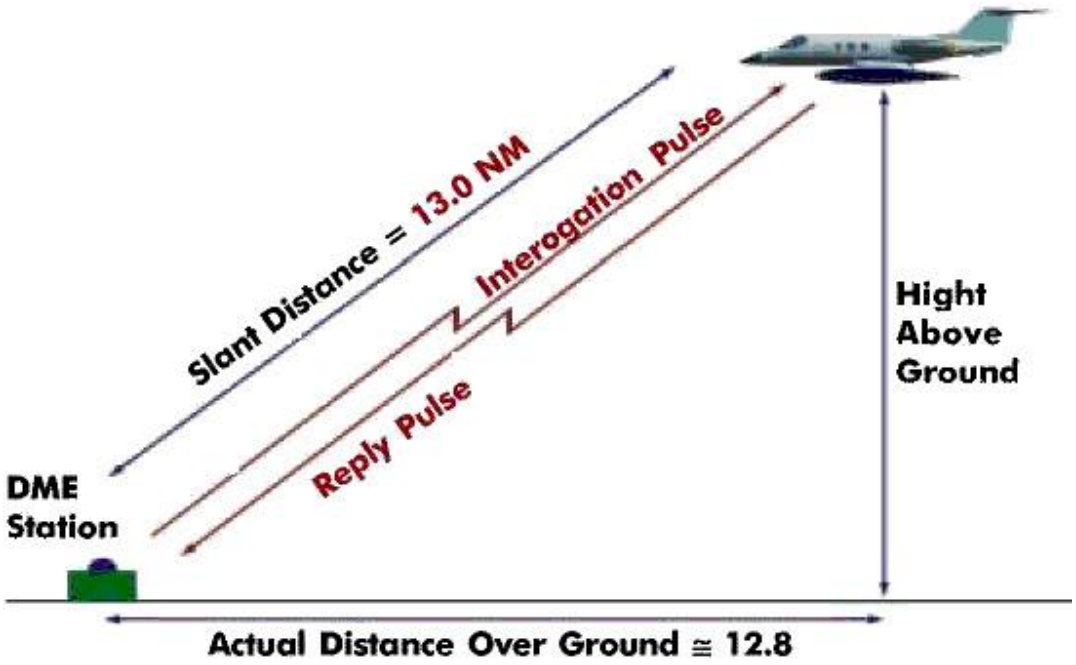



รูปที่ ๓.๒๘ การรับส่งสัญญาณ DME

สถานี DME ภาคพื้นประกอบด้วย Receiver transmitter และ Antenna ซึ่งทำงานอยู่ในย่านความถี่ 962-1213 MHz สำหรับเครื่องรับ-ส่ง DME บนเครื่องบินประกอบด้วย Transceiver, Control Unit, Distance Indicator และ Antenna

การแพร่กระจายคลื่นของสถานี DME ภาคพื้นจะมีอุปสรรคในเรื่องของสิ่งกีดขวางสัญญาณ และเกิดการสะท้อนของคลื่นเรียกว่า Echo ทำให้สถานี DME จะรับสัญญาณ Echo ได้อีกครั้งหลังจากรับสัญญาณหลัก ทำให้ได้ระยะทางผิดพลาด ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาโดยตัด Echo ด้วยวงจร Echo Suppressor

การวัดระยะทางจาก Air to Ground ของระบบ DME ได้ระยะทางในระนาบ Slant Range เป็นระยะที่วัดจากเครื่องบินไปยังสถานี DME โดยตรง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสูงของเครื่องบิน และแตกต่างจากระยะทางตามแนวพื้นดิน




รูปที่ ๓.๒๙ การวัดระยะทางแบบ Slant Distance

ย่านความถี่ใช้งานของระบบ DME คือ 962 – 1213 MHz

DME ทำงานอยู่ในย่านความถี่ 962 – 1,213 MHz ซึ่งสามารถแบ่งการใช้งานได้ 126 Channel ทั้ง X – Mode และ Y – Mode เช่นเดียวกับ ระบบ TACAN

Frequency Pairing แต่ละช่องความถี่ของ DME ถูกกำหนดให้ใช้งานคู่กับระบบ VOR หรือ ILS โดย ICAO (International Civil Aviation Organization)

Pulse Spacing ของการใช้งานแบบ X – Mode มีระยะห่างระหว่าง Pulse ที่ 1 กับ Pulse ที่ 2 ของ Interrogation Pulse และ Reply Pulse เท่ากับ 12 μS สำหรับการใช้งานแบบ Y-Mode มีระยะห่างระหว่าง Pulse ที่ 1 กับ Pulse ที่ 2 ของ Interrogation Pulse เท่ากับ 36 μS และของ Reply Pulse เท่ากับ 30 μS Delay Time ของระบบ DME แบบ X-Mode เท่ากับ 50 μS ส่วนแบบ Y-Mode เท่ากับ 56 μS

กำลังออกอากาศของสถานีภาคพื้น มีทั้ง Low Power 100 Watts และ High Power 1000 Watts ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความจำเป็นในการใช้งาน

**การทำงานของเครื่องรับ-ส่ง DME ภาคพื้น**

เครื่องรับ-ส่ง DME ภาคพื้น ติดตั้งใช้งานร่วมกับ VOR หรือ ILS (กรณีที่ไม่ได้ติดตั้ง Marker Beacon) โดยทำงานที่ความถี่คงที่ซึ่งกำหนดไว้ สถานี DME ภาคพื้นสามารถให้บริการกับเครื่องบินได้ 100 เครื่องในเวลาเดียวกัน ถ้าหากมีเครื่องบินมากกว่า 100 เครื่องสถานีภาคพื้นก็จะเลือกตอบแต่เฉพาะสัญญาณที่มีความแรงสูงสุด 100 เครื่อง

ขณะที่ไม่มี Interrogation Pulse จากเครื่องบิน หรือมีเครื่องบินใช้งานในเวลาเดียวกันไม่ถึงจำนวน 100 เครื่อง เครื่องรับ-ส่ง DME ภาคพื้นทำการผลิต Squitter Signal ชดเชยให้ได้เป็นจำนวน 2,700 Pulse Pair Per Second เพื่อให้ชุดเครื่องส่งมีกำลังออกอากาศคงที่

ระยะเวลาตั้งแต่ได้รับสัญญาณ Interrogation Pulse ผ่านกระบวนการที่เครื่อง รับ-ส่ง DME ภาคพื้น จนกระทั่งส่งสัญญาณ Reply Pulse ออกอากาศ เรียกว่า Delay Time ซึ่งใช้ระยะเวลา 50 μS สำหรับ X-Mode หรือ 56 μS สำหรับ Y-Mode โดยที่เครื่องรับ-ส่งบนเครื่องบินจะต้องนำค่า Delay Time มาประกอบการคำนวณ เพื่อให้ได้ระยะทางที่ถูกต้อง

สถานี DME ภาคพื้นทำการส่ง Identification Signal ทุกๆ ๓๐-๔๐ วินาที โดยการส่งสัญญาณเสียง Tone ความถี่ 1,350 Hz แบบ Morse Code ขนาด ๓ ตัวอักษร ใช้แทนนามสถานี และการติดตั้งเครื่อง รับ - ส่ง DME ภาคพื้น ใช้งานร่วมกับระบบ VOR หรือ ILS การส่งสัญญาณ Identification ต้องสัมพันธ์กัน โดยทำการส่งสัญญาณเสียง Tone แบบ Morse Code ของเครื่องส่ง VOR หรือ ILS เป็นจำนวน ๓ ครั้ง (๑ ครั้งประกอบด้วย ๓ ตัวอักษร) ติดต่อกัน จากนั้นทำการส่งสัญญาณเสียง Tone แบบ Morse Code ของระบบ DME จำนวน ๑ ครั้ง เป็นวงรอบหมุนเวียนต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีระบบ Synchronize/Keying ทำหน้าที่ควบคุม

**การทำงานของเครื่องรับ-ส่ง DME ภาคอากาศ**

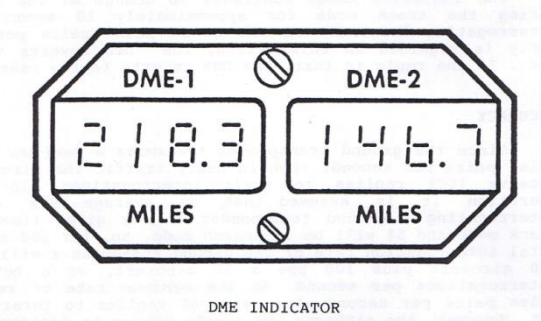
เมื่อนักบินเลือกใช้ความถี่ของ VOR หรือ ILS ความถี่ของ DME จะถูกเลือกโดยอัตโนมัติเครื่องส่ง DME บนเครื่องบินทำการส่ง Interrogation Pulse Pair ไปยังสถานี DME ภาคพื้น จากนั้นเครื่อง DME ภาคพื้นใช้เวลา 50 μS ทำตามกระบวนการ และส่ง Reply Pulse ให้กับเครื่องรับ DME บนเครื่องบิน โดยมีการพิสูจน์ว่าเป็น Pulse แบบที่เครื่องส่ง DME บนเครื่องบินเครื่องนั้นส่งออกไปหรือไม่ และคำนวณเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่น Pulse ให้เป็นระยะทางเพื่อนำไปแสดงผลให้นักบินทราบ เครื่องรับ – ส่ง DME บนเครื่องบินทำงานต่อเนื่องจนถึงระยะทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้ หรือเปลี่ยนความถี่ไปใช้งานสถานี DME ภาคพื้นอื่น

Track Mode คือการทำงานของเครื่องรับ DME บนเครื่องบิน เมื่อถอดรหัส Reply Pulse และทราบว่าเป็นของตนเอง จากนั้นจะทำการลดจำนวน Interrogation Pulse ลงเหลือประมาณ 20 Pulse Pair per Second เป็นการ Lock On เพื่อแสดงข้อมูลระยะทาง

Memory Mode เป็นช่วงระยะเวลาที่เครื่องรับบนเครื่องบินรับ Reply Pulse ไม่ได้ในขณะที่ Lock On อยู่ การทำงานจะเปลี่ยนไปเป็น Memory Mode โดยการค้างค่าการแสดงผลระยะทางต่อไป 10 วินาที กรณีที่สามารถรับสัญญาณ Reply Pulse ได้อีกครั้งหนึ่ง เครื่องรับ DME บนเครื่องบินจะกลับไปทำงานในสถานะ Track Mode ได้ กรณีที่ผ่านพ้นระยะเวลา Memory Mode แล้ว โดยที่ไม่สามารถรับสัญญาณ Reply Pulse ได้ เครื่องรับ DME บนเครื่องบินจะเปลี่ยนสถานะการทำงานไปเป็น Search Mode

DME Indicator มีทั้ง Dual และ Single Indicator และแบบที่เป็น electromechanical หรือแบบใหม่เป็นแบบ Seven Light Bar ซึ่งเหมาะกับ Digital DME Output

**การให้ข้อมูลของระบบ DME**




รูปที่ ๓.๓๐ DME Indicator

ระบบ DME ให้ข้อมูลข่าวสารกับเครื่องบิน คือ ระยะทาง และนามสถานีโดยที่ Range Indicator แสดงผลระยะทางเป็นไมล์ทะเล สำหรับสัญญาณเสียง Morse Code แทนนามสถานี แยกออกไปที่ Distribution Panel สำหรับเชื่อมต่อเข้าหูฟังของนักบิน

**ระบบ INS (Inertial Navigation System)**

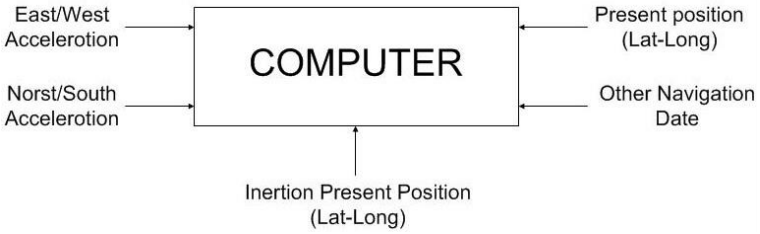
ระบบ INS เป็นเครื่องช่วยเดินอากาศที่มีลักษณะการทำงานแบบ Self Control คือ ทำงานโดยไม่ต้องอาศัยสถานีส่งภาคพื้นหรือดาวเทียม ไม่ต้องการสัญญาณวิทยุ หรือการมองเห็นเพื่อหาตำแหน่งและทิศทางของเครื่องบิน ติดตั้งใช้งานบนอากาศยาน โดยพัฒนาการมาจากระบบ Inertial Guidance ที่ใช้ควบคุมการเดินทางของขีปนาวุธ โดยสถาบัน MIT (Massachusetts Institute of Technology) ได้ออกแบบสร้างเป็นเครื่องแรก นิยมใช้กันแพร่หลายต่อจากยุคของ Doppler และเป็นเครื่องช่วยเดินอากาศในอุดมคติ ที่ใช้งานในกิจการทหาร เป็นแบบ Passive ไม่มีการส่งสัญญาณหรือพลังงานให้ข้าศึกรับไปใช้ประโยชน์ได้ และ Self-contain ซึ่งสามารถทำงานด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องส่งหรือเครื่องรับภาคพื้น ซึ่งมีขีดจำกัดที่ไม่สามารถติดตั้งสถานีภาคพื้นในเขตของข้าศึกได้

รูปที่ ๓.๓๑ Inertial Navigation Unit Frontispiece

**หลักการทำงานของระบบ INS**

INS ใช้อัตราเร่งเป็นส่วนสำคัญโดยอาศัยหลักการของ Inertia และ Law of motion ดังนี้

นำเครื่องวัดอัตราเร่ง 2 ชุด ติดตั้งบนเครื่องบินโดยที่ชุดที่ 1 อยู่ในแนว เหนือ - ใต้ และชุดที่ 2 อยู่ในแนวตะวันออก - ตก ดังนั้นจะทำให้ทราบค่าอัตราเร่งในแนวทิศเหนือใต้และตะวันออกตะวันตก และจะมีชุด Computer คำนวณผลออกมาเป็นความเร็วและระยะทางได้ตามความต้องการตลอดเวลา ซึ่งหมายความว่าทราบตำแหน่งของเครื่องบินตลอดเวลาโดยอาศัยเส้นแวง คือแนวเหนือ-ใต้ และเส้นรุ้ง คือแนวตะวันออก-ตก ถ้าทราบจุดเริ่มต้นของเครื่องบินเป็นเส้นรุ้งและแวง (Latitude-Longitude) แล้วป้อนข้อมูลให้ชุด Computer ประมวลผลการเปลี่ยนแปลง Lat-Long ของเครื่องบินขณะเคลื่อนที่ ทำให้ทราบพิกัดใหม่ของเครื่องบินเป็น Lat-Long เพื่อคำนวณหาระยะทางและทิศทางของการเคลื่อนที่




รูปที่ ๓.๓๒ Gymbal

การทำงานของเครื่องวัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ปกติเครื่องวัดมีลักษณะเป็นลูกตุ้ม (Pendulum) แขวนในแนวระดับ (มีลักษณะวงแหวน) ถ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แรงลัพธ์จะทำให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่ไปด้านหลัง โมเมนตัมที่เกิดขึ้นมากน้อยขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า จากนั้นจะเปลี่ยนค่าโมเมนตัมให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคของการนำไฟฟ้าที่ติดอยู่กับวงแหวนทำให้หาอัตราเร่งได้ เนื่องจากเครื่องบินไม่ได้เคลื่อนที่ไปในแนวระดับตลอดเวลา จะต้องมีการไต่ (Pitch) และเลี้ยว (Roll) ดังนั้นในแนวที่ไม่ได้ระดับนี้ แรงดึงดูดของโลกเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง กับอัตราเร่ง เมื่อมีแรงดึงดูดของโลกเข้ามาเกี่ยวข้องจึงต้องขจัดแรงดึงดูดของโลกด้วยการทำให้ชุดเครื่องวัดอัตราเร่งอยู่ในแนวระดับตลอดเวลาไม่ว่าเครื่องบินจะเคลื่อนที่ไต่หรือเลี้ยวไปในทิศทางใด สรุปได้ว่า ส่วนที่ติดตั้งเครื่องวัดอัตราเร่งนี้ จะต้อง รักษาแนว เหนือ-ใต้ และตะวันออก-ตะวันตก ตลอดเวลา และรักษาแนวระดับ คือขนานกับพื้นโลกตลอดเวลา

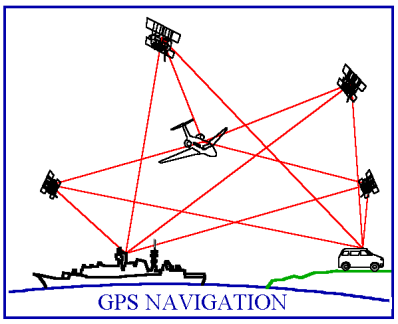
รูปที่ ๓.๓๓ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยาน

**การให้ข้อมูลของระบบ INS**

ระบบ INS ให้ข้อมูลกับเครื่องบิน ดังนี้

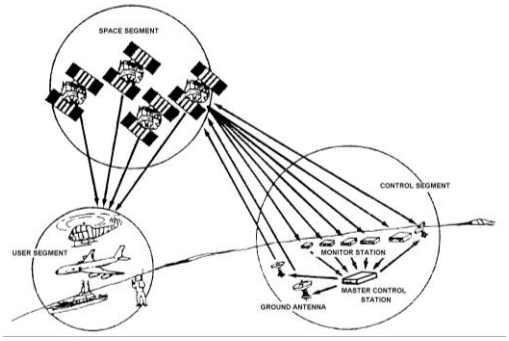
- Present Position (Lat/Long)
- Ground Speed (GS)
- Drift Angle (DA)
- Track Angle Error (TKC)
- Distance and time to any way point (dist/time)
- Present Track (TK)
- Aircraft Heading (HDG)
- Cross Track Distance (KTK)
- Desired Track (DST TK)
- Wind direction and wind speed
- คำนวนหาระยะทางและเวลาบินไปยัง Way point
- คำนวนหาระยะทางและเวลาบินระหว่าง Way point
- ผลรวมของระยะเวลาและเวลาบินตลอดระยะทางตาม Flight plan
- ใช้งานร่วมกับ Flight Director

**ระบบ GPS (Global Positioning System )**




รูปที่ ๓.๓๔ GPS Navigation

ระบบบอกตำแหน่งดาวเทียมบนพื้นโลกโดยใช้กลุ่มดาวเทียมนาฟสตาร์ (The Navstar Global Positioning System) เป็นระบบบอกตำแหน่งโดยใช้การส่งคลื่นวิทยุจากดาวเทียมในอวกาศ มายังภาคพื้น และใช้เวลาในการรับสัญญาณมาช่วยในการคำนวณหาตำแหน่ง GPS จะแสดงตำแหน่ง ความเร็ว และ เวลา Position Velocity Time (PVT) ให้กับผู้ใช้งานได้อย่างไม่จำกัด ทั้งทางบก ทะเล อากาศ และ อวกาศ ซึ่งจะจำกัดให้มีความถูกต้องแม่นยำของการใช้งาน GPS ประกอบด้วย 3 ระบบหลัก คือ ส่วนกลุ่มดาวเทียม (Space Segment) ส่วนสถานีควบคุม (Control Segment) ส่วนผู้ใช้ (User Segment)



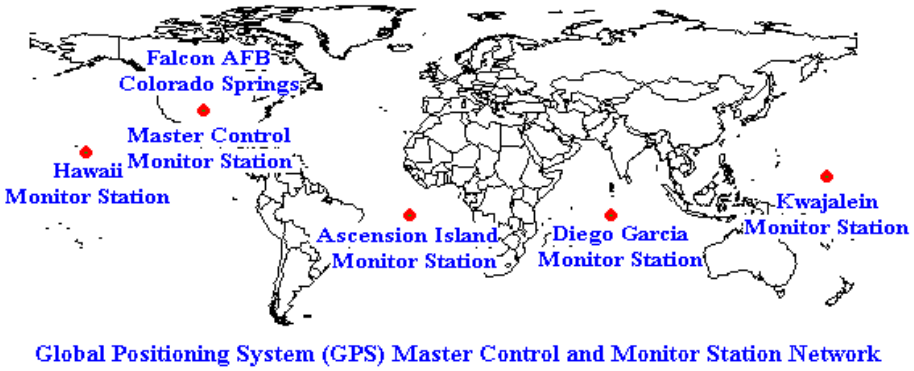

รูปที่ ๓.๓๕ เครือข่าย ระบบ GPS

ส่วนกลุ่มดาวเทียมประกอบด้วยหมู่ดาวเทียม 24 ดวง แต่ละดวงจะกระจายสัญญาณรหัสและข้อมูลข่าวสารการนำร่อง (Navigation Data Message) ในย่านความถี่วิทยุ ส่วนของสถานีควบคุมจะประกอบด้วยเครือข่ายสำหรับติดตามดาวเทียม (Network of Monitering) และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในการควบคุมซึ่งใช้ในการจัดการวงโคจรของดาวเทียมและ Update ข้อมูลข่าวสารการนำร่องของดาวเทียม ส่วนของผู้ใช้ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณข้อมูลการนำร่อง ซึ่งจะถูกออกแบบเพื่อรับ ถอดรหัส และประมวลผลสัญญาณ จากดาวเทียม GPS

รหัสของดาวเทียม เครื่องรับ GPS สามารถวัดเวลาในการเดินทางของสัญญาณรหัสดาวเทียม และจะสามารถคำนวณหาระยะทางระหว่างดาวเทียมแต่ละดวงกับเครื่องรับได้ เครื่องรับคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวง ในเวลาที่สัญญาณถูกส่งออกมาได้ เครื่องรับจะใช้ข้อมูลเหล่านี้เพื่อระบุตำแหน่งของตัวเอง เป็นข้อมูลข่าวสาร

การนำร่อง ซึ่งการคำนวณจะคล้ายกับการคำนวณระยะทางในอุปกรณ์นำร่องอื่นๆ สำหรับการบอกตำแหน่งโดยใช้ GPS ต้องการดาวเทียมอย่างน้อยที่สุด 4 ดวง ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจะได้ระยะทางจากการวัด 4 ค่า ซึ่งจะทำให้เครื่องรับคำนวณ พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 3 ค่า โดยใช้แทนตำแหน่ง 3 มิติ ( 3-D ) สำหรับค่าที่ 4 ใช้แทนค่าผิดพลาดของสัญญาณนาฬิกาของผู้รับ (User Clock Error)

ส่วนสถานีควบคุม (Control Segment) ทำหน้าที่ควบคุมและตรวจสอบสถานภาพ การทำงานของดาวเทียม GPS ทำการวัด พีซูโดเรนจ์ (Pseudo Range) และ เดลตาเรนจ์ (Delta Range) เพื่อกำหนดตัวแปรแก้ไขเวลา ข้อมูลอัลมาแนค และ ข้อมูลอิฟิเมอริส ส่วนสถานีประกอบด้วย สถานีควบคุมหลัก Master Control Station (MCS) สถานีสังเกตการณ์ (Monitor Station) จานสายอากาศภาคพื้น (Ground Antenna)สถานีควบคุมหลัก เป็นศูนย์กลางของการทำงานในส่วนควบคุม ตั้งอยู่ที่ ฐานทัพอากาศ Falcon Colorado Spring ทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากสถานีสังเกตการณ์เพื่อกำหนดความถูกต้องของเวลาบนดาวเทียม ตรวจสอบสถานภาพของดาวเทียมและสถานีภาคพื้น




รูปที่ ๓.๓๖ GPS Master Control and Monitor Station Network

สถานีสังเกตการณ์ ทำหน้าที่คำนวณเวลาการเกิดชั้นบรรยากาศ ซึ่งได้แก่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ โทรโปสเฟียร์ สำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์ อยู่ระหว่าง 70 km และ 1,000 km จากพื้นโลก ในบริเวณนี้รังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ จะไอออไนซ์ส่วนโมเลกุลของก๊าซ และปล่อยอิเล็คตรอนอิสระออกมา อิเล็คตรอนเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งการส่งสัญญาณของดาวเทียม GPS ด้วยความล่าช้าในชั้นโทรโปสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้นสัมพัทธ์ และ ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศ

จานสายอากาศภาคพื้น ทำการส่งคำสั่งและข้อมูลการนำร่อง และข้อมูลอื่นๆ ที่เรียกว่า TT&C (Telemetry Tracking And Command) ซึ่งเตรียมพร้อมโดยสถานีควบคุมหลักสำหรับดาวเทียมแต่ละดวง

ส่วนของผู้ใช้งาน ( User Segment) เครื่องรับ GPS จะรับสัญญาณ L-Band ที่ถูกส่งมาจากดาวเทียม และนำมาคำนวณหาตำแหน่ง ความเร็ว เวลา และความสูง ของเครื่องรับ GPS ซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบ Passive มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา จึงสะดวกต่อการใช้งาน สามารถใช้ได้ทั้งทางทหาร และ บุคคลทั่วไป ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับ GPS มีความแม่นยำสูง สายอากาศของเครื่องรับ GPS มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูก ตำแหน่งที่คำนวณได้จากเครื่องรับ GPS เป็นตำแหน่งของสายอากาศของเครื่องรับ ในการบอกตำแหน่งแบบ 3 มิติ

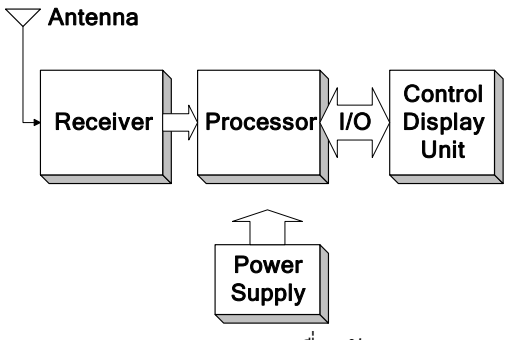
(ละติจูด ลองติจูด และความสูง) เครื่องรับ GPS จะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวง ถ้ารับได้ 3 ดวง จะบอกตำแหน่งได้แค่ 2 มิติ (ละติจูด และ ลองติจูด) การรับสัญญาณจะรับได้เฉพาะในที่โล่งแจ้ง

**การทำงานของระบบ GPS**

การบอกตำแหน่งแบบสมบูรณ์ Precise Positioning Service (PPS) เป็นบริการที่ให้ ตำแหน่ง ความเร็ว และ เวลา ที่ถูกต้อง เฉพาะผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น ในการได้รับอนุญาตให้ใช้นั้น จะพิจารณาโดย U.S. Department of Defense ผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาต เช่น U.S. Military User, NATO Military User, U.S. Mapping Agency มีความคลาดเคลื่อนทางด้านระยะทางไม่เกิน 22 เมตร มีความคลาดเคลื่อนทางด้านความสูงไม่เกิน 27.7 เมตร มีความคลาดเคลื่อนทางด้านเวลาไม่เกิน 100 nS การเข้ารหัสจะถูกควบคุมโดยเทคนิคคริปโตกราฟฟิก(Cryptographic) ได้แก่ Selective Availability (SA) และ Anti – Spoofing ( A-S )

การบอกตำแหน่งแบบมาตรฐาน Standard Positioning Service (SPS) เป็นบริการที่ให้ความถูกต้องน้อยกว่าแบบ PPS ใช้ได้กับผู้ใช้งานทั่ว ๆ ไป มีความคลาดเคลื่อนทางด้านระยะทางไม่เกิน 100 เมตร มีความคลาดเคลื่อนทางด้านความสูงไม่เกิน 156 เมตร มีความคลาดเคลื่อนทางด้านเวลาไม่เกิน 340 nS

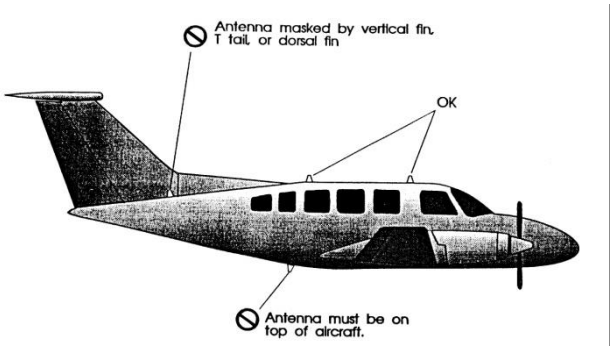
- ข้อมูลข่าวสารการนำร่อง (Navigation Messege) ที่ได้จากดาวเทียม GPS
- เวลาของการส่งข้อมูล (Time of transmission of the message)
- Hand Over Word (HOW) for the transition from C/A Code to P(Y) Code tracking
- ข้อมูลการแก้ไขสัญญาณนาฬิกา (Clock correction)
- ข้อมูล อิฟิเมอริส (Ephemeris Data) (Orbit Information)
- ข้อมูล อัลมาแนค Almanac Data)
- ค่าสัมประสิทธิ์ของการล่าช้า ในชั้นบรรยากาศ Ionosphere
- ค่า UTC Coefficients




Block Diagram ของเครื่องรับ GPS

รูปที่ ๓.๓๗ Block Diagram ของเครื่องรับ GPS

สายอากาศ รับสัญญาณจากดาวเทียม (P-Code, C/A Code) รูปแบบที่ใช้มีหลายรูปแบบ การเลือกสายอากาศดูจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ




รูปที่ ๓.๓๘ ตำแหน่งการติดตั้ง Antenna

เครื่องรับทำการรับสัญญาณทั้ง P-Code และ C/A Code การรับสัญญาณ P-Code นั้น จะกระทำกับเครื่องที่มีอุปกรณ์ คริพโตกราฟฟิก (Cryptographic Equipment) เท่านั้น เครื่องรับส่วนใหญ่จะมีช่องสัญญาณหลายช่อง โดยที่แต่ละช่องสัญญาณจะแทรคสัญญาณจากดาวเทียมดวงเดียว ในการรับสัญญาณนั้น ที่เครื่องรับจะมีการสร้าง Code ที่เหมือนกันกับสัญญาณจากดาวเทียมขึ้นมา เมื่อได้รับสัญญาณจากดาวเทียม จะมีการนำ Code ที่ได้รับมา เปรียบเทียบกับ Code ที่สร้างขึ้น ทำให้สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากดาวเทียม ลงมาถึงพื้นดิน

**๓. แนวโน้มเครื่องช่วยเดินอากาศในอนาคต**

เครื่องช่วยเดินอากาศส่วนใหญ่ ทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งของเครื่องบินเป็นหลัก โดยการรวบรวมข้อมูล ที่รับจากดาวเทียม หาทิศทางไปยังเป้าหมาย เทียบกับ Nautical Chart เพื่อให้ได้ทิศทางและระยะทางไปยังเป้าหมาย

การพัฒนาเข้าสู่ระบบ Global Position System หรือ GPS เพื่อใช้เป็นเครื่องนำร่องสำหรับเครื่องบิน และระบบ Wide Area Augmentation System (WAAS) โดยเริ่มใช้เป็นเครื่องช่วยเดินอากาศ Category I ในปี 2007 และขยายไปยังระบบอื่นเพื่อพัฒนาให้เป็น Category III หรือดีกว่า เช่น Local Area Augmentation System (LAAS) เป็นต้น

ปัจจุบันเครื่องบินมีแนวโน้มจะใช้งานสถานีเครื่องช่วยเดินอากาศที่อยู่ในอากาศ เช่น GPS เข้ามาแทนที่ระบบต่างๆ เช่น VOR ซึ่งมีลักษณะเฉพาะ เพราะว่ามีความต้องการจำนวนสถานีภาคพื้นจำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่ Satellite – Base GPS มีความเชื่อถือได้สามารถบอกตำแหน่งของเครื่องบินโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน ๑๐๐ ฟุต และขยายไปสู่ระบบ WAAS ซึ่งปัจจุบันเริ่มพัฒนาในสหรัฐอเมริกา โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ๑๐ ฟุต ซึ่งมีความแน่นอนใกล้เคียงกับระบบ ILS Category I แต่ไม่ต้องใช้สถานีภาคพื้น ยกเว้นจะมีบางกรณีที่ WAAS ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณให้กับเครื่องบิน ในอนาคตจะเพิ่มความละเอียดของ Local Area Augmentation System (LAAS) ให้เป็น Category III และใช้สถานีภาคพื้นให้น้อยที่สุด ซึ่ง LAAS ถูกเตรียมไว้ใช้งานในย่าน VHF และอาจจะมีเครื่องช่วยเดินอากาศ VOR บางสถานีที่สามารถทำการ Shut Down หรือสลับความถี่ เพื่อหลีกเลี่ยง Interference ได้ต่อไป

ในอนาคตเครื่องช่วยเดินอากาศบนเครื่องบินเช่น VOR TACAN และอื่นๆ จะถูกเปลี่ยนเป็นระบบที่ไม่ต้องใช้งานร่วมกับสถานีภาคพื้น ได้แก่ GPS เป็นต้น

# บทที่ ๔
# ระบบวิทยุสื่อสาร ทอ.

## ๑. บทนำ

การค้นพบระบบสื่อสาร (Communication Systems) มีมาก่อนศตวรรษที่ ๒๐ เริ่มจากการค้นพบกระแสไฟฟ้า แม่เหล็ก และปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต นับจาก Samuel Morse ประดิษฐ์เครื่องโทรเลขในปี ค.ศ.๑๘๓๗ จุดประกายให้เกิดความก้าวหน้าในการพัฒนาระบบสื่อสาร ซึ่งต่อมา Alexander Graham Bell ได้ประดิษฐ์โทรศัพท์ขึ้นใช้งานเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.๑๘๗๖ จากนั้นระบบสื่อสารแบบไร้สายที่สมบูรณ์ ก็ได้ถูกมนุษย์สร้างขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรกของโลกโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Guglielmo Marconi ในปี ค.ศ.๑๘๙๔ และ Lee Deforest ประดิษฐ์หลอดสุญญากาศ Triode ในปี ค.ศ.๑๙๐๘ ซึ่งเป็นการเริ่มเข้าสู่ยุคแห่งการสร้างวงจรภาคขยายทางอิเล็กทรอนิกส์อันเป็นประตูแห่งการก้าวสู่ยุคแห่งการสื่อสารแบบไร้สาย จนกระทั่งปี ค.ศ.๑๙๔๘ การค้นพบครั้งสำคัญในประวัติศาสตร์ของยุคแห่งอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้เกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อ Shockley, Brattain และ Bardeen ได้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า “ทรานซิสเตอร์ (Transistor) และนั่นคือการพัฒนาให้เกิดอุปกรณ์ IC, Chip และคอมพิวเตอร์ที่เราคุ้นเคยในปัจจุบัน

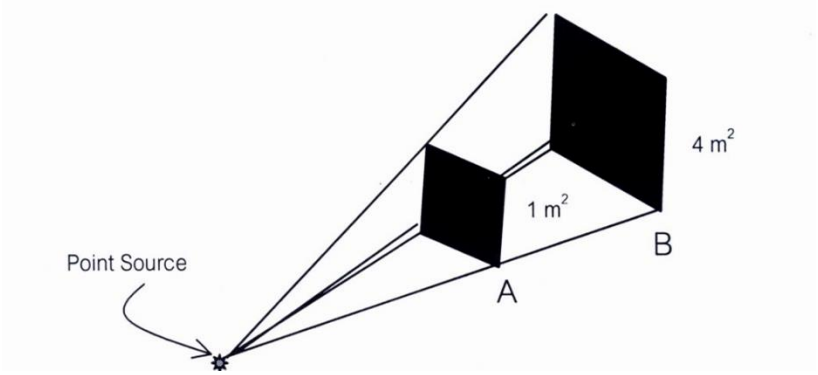
### คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave)

#### ความเข้มของสนามไฟฟ้า

ความแรงของพลังงานคลื่นวิทยุสามารถวัดได้จากค่าระดับความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) เกิดจากคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางชนิดต่าง ๆ โดยที่มีหน่วยมาตรฐานที่ใช้วัดคือ โวลต์/เมตร (V/m) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าของสนามไฟฟ้ามักจะมีค่าน้อยมาก จึงนิยมใช้ให้อยู่ในหน่วยมิลลิโวลต์/เมตร (mV/m) หรือ ไมโครโวลต์/เมตร (μV/m)

สมมุติว่า คลื่นมีแหล่งกำเนิดการกระจายออกมาจากสายอากาศที่มีลักษณะเป็นจุด (Point Source) ตามทฤษฎีแล้วก็จะกระจายออกไปรอบ ๆ สายอากาศที่มีลักษณะเป็นจุดนั้นอย่างสม่ำเสมอ คล้ายแสงไฟที่กระจายออกไปจากหลอดไฟกลม ๆ พลังงานของคลื่นนั้นจะไม่มีการสูญเสียไป หากมันไม่ได้ไปกระทบกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวางที่จะดูดซึมพลังงานไปจากมัน สายอากาศนั้นจะกระจายระลอกคลื่นให้ดาหน้าออกไปเป็น “หน้าคลื่น” (Wave Front) ในลักษณะของทรงกลมที่ค่อย ๆ ใหญ่ขึ้น ๆ ดังนั้นหน้าคลื่นที่อยู่ใกล้กับสายอากาศก็ย่อมจะมีความเข้มมากกว่าหน้าคลื่นที่อยู่ห่างไกลออกไป ทั้งนี้เพราะว่า พื้นที่ของผิวทรงกลมจะขยายออกมากขึ้น

เมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้พลังงานของคลื่นตลอดผิวหน้าของทรงกลมมีค่าเฉลี่ยต่อพื้นที่น้อยลง ดังรูปภาพที่ ๑-๑ ช่วยทำให้เราเข้าใจถึงว่า ทำไมความเข้มของพลังงานหรือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงมีค่าลดลง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดกำเนิดคลื่นมากยิ่งขึ้น




รูปที่ ๔.๑ การกระจายพลังงานของคลื่น

ค่าของความหนาแน่นหรือความเข้มของกำลังงานในคลื่นที่เคลื่อนที่ออกไปเป็นระยะต่าง ๆ จากจุดกำเนิด จะมีค่าแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง นั่นคือ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของคลื่นที่จุดต่าง ๆ จะมีค่าลดจากค่าพลังงานเริ่มต้นจากสายอากาศ (P) และสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง ค่าที่คำนวณได้เป็น dB หรือ Watt ต่อ ฟุต$^2$ หรือ เมตร$^2$ ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นของกำลังงาน} = \frac{P}{(4\pi d^2)}$$

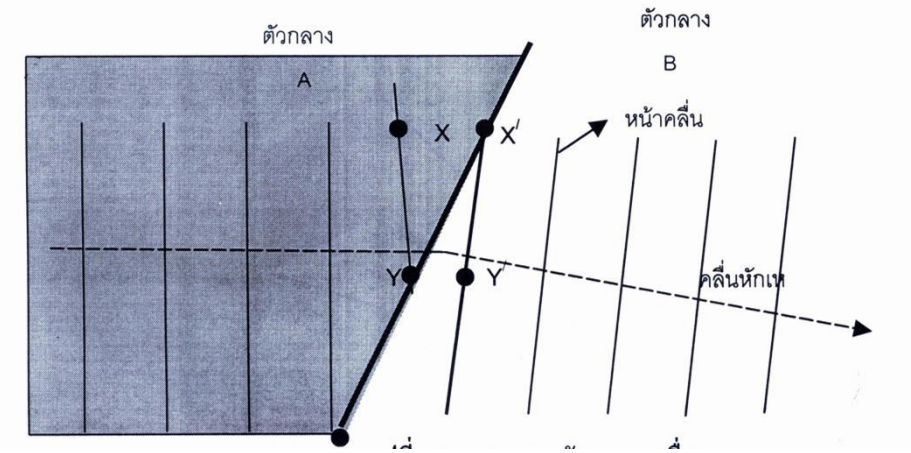
P คือ กำลังของคลื่นจากสายอากาศ หรือ แหล่งกำเนิดคลื่น

d คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดคลื่นมายังบริเวณที่ทำการวัดความแรงของคลื่นนั้น

แม้ว่าคลื่นจะกระจายออกไปจากสายอากาศในลักษณะของทรงกลม แต่เมื่อระยะทางที่คลื่นกระจายออกไปนั้น อยู่ห่างจากสายอากาศมาก ๆ แล้ว หน้าคลื่นก็จะเหมือนกับเกิดอยู่บนพื้นผิวทรงกลมขนาดใหญ่ ดังนั้น ถ้าหากเราพิจารณาเฉพาะเพียงบริเวณส่วนน้อยของหน้าคลื่น เราก็อาจจะเห็นว่า หน้าคลื่นมีลักษณะเป็นผิวระนาบราบเรียบเสมอกัน เหมือนกับที่เราคิดว่าผืนโลกเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งนั้นเป็นที่ซึ่งมีลักษณะแบนราบเป็นระนาบในแนวนอน ซึ่งการพิจารณาคลื่นที่อยู่ไกลจากสายอากาศมาก ๆ ในลักษณะดังกล่าว ทำให้เรามักจะสมมุติว่าคลื่นนั้นคือ “คลื่นระนาบ” (Plane Wave) เป็นคลื่นที่มีลักษณะราบเรียบเสมอกัน และเคลื่อนที่ออกไปเป็นระลอกคลื่นที่เป็นระนาบขนานกัน มากกว่าที่คิดว่าหน้าคลื่นนั้นเคลื่อนที่ออกไปในลักษณะโค้งนูน

**การหักเหของคลื่น**

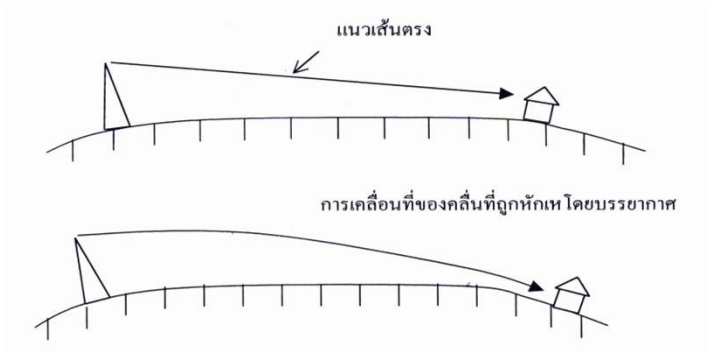
เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ เหล่านั้นจะมีค่าไม่เท่ากันฉะนั้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่างกันแล้ว เส้นทางการเคลื่อนที่ก็จะเกิดการหักเห (Refraction) ขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองนั้น




รูปที่ ๔.๒ การหักเหของคลื่น

พิจารณารูปภาพด้านบน จะทำให้เราเข้าใจสาเหตุแห่งการหักเหแนวทางการเดินของคลื่นได้ดียิ่งขึ้น คลื่นเดินทางจากตัวกลาง A ไปยังตัวกลาง B ที่มีความหนาแน่นมากกว่าตัวกลาง A หน้าคลื่นบริเวณจุด Y จะผ่านเข้าไปในตัวกลาง B ก่อนหน้าคลื่นบริเวณจุด X เพราะตัวกลาง B มีความหนาแน่นกว่าตัวกลาง A ดังนั้น คลื่นจะเคลื่อนที่จากจุด Y ไปสู่จุด Y' ได้ระยะทางน้อยกว่าส่วนของคลื่นที่เคลื่อนที่อยู่ในตัวกลาง A คือจากจุด X ไปยังสู่จุด X' ดังนั้นจึงทำให้การเบี่ยงเบนของหน้าคลื่นเกิดขึ้น ทำให้ทิศทางการเดินทางของคลื่นนั้นเกิดการเบี่ยงเบนออกไปจากเดิม

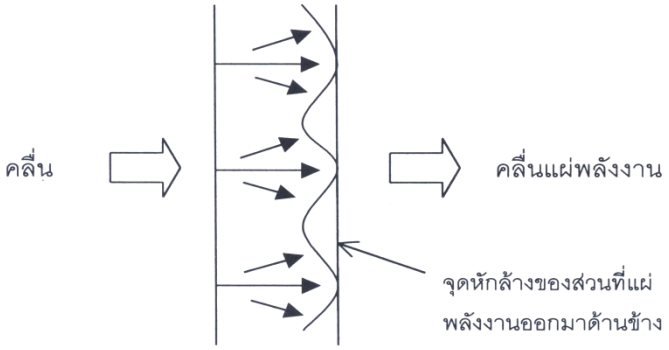
การหักเหของเคลื่อนจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในบรรยากาศทั่วไป ทั้งนี้เพราะบรรยากาศที่อยู่ในระดับผิวโลกจะมีความหนาแน่นมากกว่าความหนาแน่นของบรรยากาศที่อยู่สูงขึ้นไป จึงทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีลักษณะโค้งตามส่วนโค้งของโลก แทนที่จะมีเส้นทางการเดินทางเป็นเส้นตรง




รูปที่ ๔.๓ การเดินทางของคลื่นในบรรยากาศ

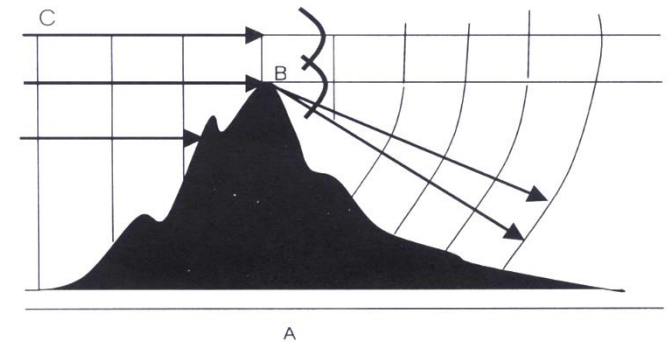
ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือปรากฏการณ์ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่โน้มรอบวัตถุ (Diffraction) หรือสิ่งกีดขวางไปได้ ที่เป็นดังนี้เพราะว่าตามทฤษฎีของ

Huygens กล่าวว่า “จะมีพลังงานแผ่ (Radiate) ออกไปจากทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่น” การแผ่รังสีของหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่ไปโดยไม่มีสิ่งกีดขวาง ทำให้เกิดการกระจายของคลื่นออกไปแต่เพียงด้านหน้าเท่านั้น



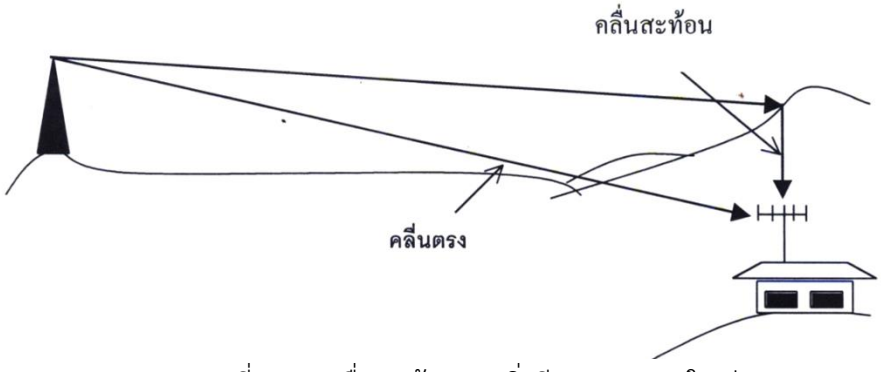

รูปที่ ๔.๔ การแผ่พลังงานของหน้าคลื่น

เมื่อคลื่นเดินทางไปพบกับสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา ดังรูปภาพที่ ๒.๔.๕ นั้น การแผ่รังสีของพลังงานจากหน้าคลื่นที่จุด C จะถูกลดทอนลงไปโดยภูเขา ทำให้ส่วนของพลังงานที่แผ่รังสีออกจากจุด B ไปในด้านล่างนั้น ไม่ถูกหักล้าง โดยส่วนของพลังงานจากจุด C ซึ่งต่างกับส่วนของพลังงานจากจุด B ที่แผ่รังสีขึ้นไปทางด้านบนและถูกหักล้างไปโดยส่วนที่แพร่รังสีออกจากจุด A ปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้เกิดการกระจายของพลังงานจากจุด B เลี้ยวลงไปเบื้องล่าง ซึ่งลักษณะของปรากฏการณ์ดังกล่าวนั้น เสมือนกับว่าคลื่นสามารถเคลื่อนที่โน้มรอบวัตถุสิ่งกีดขวางไปได้นั่นเอง ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่โน้มรอบสิ่งกีดขวางของคลื่นนี้ช่วยให้เราสามารถทำการสื่อสารได้ แม้แต่ในบริเวณที่ถูกบดบังโดยตึกใหญ่ ๆ หรือหลังภูเขา อย่างไรก็ดีในกรณีเช่นนี้ สัญญาณที่ใช้ส่งออกไปนั้นจะต้องเพิ่มความแรงให้สูงกว่าปกติ




รูปที่ ๔.๕ การเลี้ยวอ้อมสันเขาของคลื่น

ปรากฏการณ์เกี่ยวกับการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่ง คือ เมื่อคลื่นเดินทางไปกระทบวัตถุที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะเกิดการสะท้อนของคลื่น (Reflection) คล้ายกับแสงที่สะท้อนจากกระจกเงา การสะท้อนของคลื่นนี้เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากคลื่นตรง และคลื่นสะท้อน ใช้เวลาเดินทางต่างกัน ดังเช่น การเกิดภาพซ้อน (Ghosting) ในเครื่องรับโทรทัศน์ เป็นต้น ดังรูปภาพที่ ๒.๔.๖




รูปที่ ๔.๖ คลื่นสะท้อนจากสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่

**แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**

โดยทั่วไปแล้วตัวกลางที่ใช้ส่งถ่ายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีปฏิกิริยาต่อความถี่ต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน ทำให้คุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในย่านความถี่ที่ต่างกันมีความแตกต่างกันออกไป เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่แสงจะเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไปในลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่เสียงสามารถเดินทางอ้อมผ่านสิ่งกีดขวางบางอย่างไปได้ เป็นต้น ฉะนั้นจึงได้มีการแบ่งย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อที่จะได้รวบรวมเอาคลื่นความถี่ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเข้าไว้ด้วยกัน การแบ่งย่านความถี่และการกำหนดชื่อย่านความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง เป็นไปตามมาตรฐานข้อตกลงระหว่างประเทศ ซึ่งกำหนดโดย ITU (International Telecommunication Union)

ตาราง การแบ่งย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคำศัพท์เฉพาะ

| ย่านความถี่ | ชื่อความถี่ | อักษรย่อ | ชื่อย่านความถี่ในระบบเมตริก |
|---|---|---|---|
| 30-300 Hz | Extremely-low frequency | ELF | Megametric Wave |
| 300-3,000 Hz | Voice frequency | VF | - |
| 3-30 kHz | Very-low frequency | VLF | Myriametric Wave |
| 30-300 kHz | Low frequency | LF | Kilometric Wave |
| 300-3,000 kHz | Medium frequency | MF | Hectrometric Wave |
| 3-30 MHz | High frequency | HF | Metric Wave |
| 30-300 MHz | Very-high frequency | VHF | Decimetric Wave |
| 300-3,000 MHz | Ultra-high frequency | UHF | Centimetric Wave |
| 3-30 GHz | Super-high frequency | SHF | Millimetric Wave |
| 30-300 GHz | Extra-high frequency | EHF | Decimillimetric Wave |
| 300-3,000 GHz | - | - | |

**คุณสมบัติและประโยชน์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่าง ๆ** พอจะสรุปได้ดังนี้

ELF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำมาก เป็นย่านความถี่ที่อาจเกิดขึ้นจากเครื่องดนตรีและเสียงของสัตว์หรือเสียงของมนุษย์บางส่วน

VF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นความถี่ของเสียงมนุษย์ปกติ

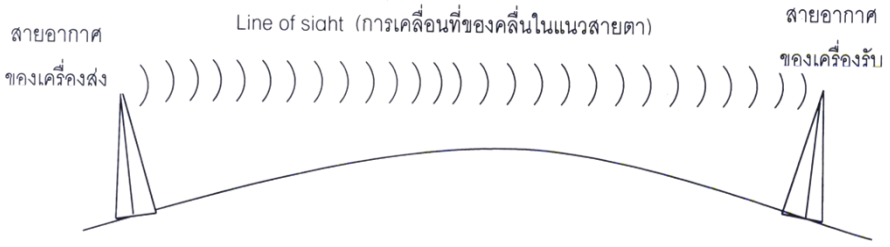
VLF และ LF ได้แก่ ย่านความถี่ที่ใช้สำหรับการสื่อสาร เริ่มแรกใช้สำหรับวิทยุโทรเลข (radio telegraph) แต่เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณในย่านนี้มีความยาวมากเป็นกิโลเมตร (ตัวอย่างเช่น f = 30 kHz, $\lambda$ = V/f ดังนั้น $\lambda$ = 10 km) ดังนั้นสายอากาศที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่นี้จึงต้องมีความยาวมาก ในทางปฏิบัติทำได้ยาก

MF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้ในการส่งกระจายเสียง AM แต่มีคลื่นวิทยุย่าน MF บางส่วนของปลายย่านความถี่ อาจมีการหักเหของคลื่นจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้

HF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้สำหรับการสื่อสาร ซึ่งในบางครั้งการกระจายเสียงวิทยุ AM เรียกว่า “คลื่นสั้น” ในระบบคลื่นสั้นและวิทยุสมัครเล่น คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่นี้ คือ เมื่อคลื่นนี้เดินทางไปถึงบรรยากาศชั้นสูงสุดที่ห่อหุ้มโลกนี้อยู่ คือ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) พลังงานของคลื่นบางส่วนจะถูกหักเหหรือสะท้อนโดยชั้นบรรยากาศกลับมายังพื้นโลก ทำให้เกิดการสะท้อนไปมาระหว่างพื้นโลกกับบรรยากาศอันเป็นเหตุทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้สามารถเดินทางไปได้ไกลมาก ดังนั้น คุณภาพของการติดต่อสื่อสารในย่านความถี่นี้จึงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

VHF และ UHF ได้แก่ ย่านความถี่ที่มีการเดินทางในตัวกลางในลักษณะคลื่นตรงมากกว่าการสะท้อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเกิดน้อยกว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นคลื่นในย่านนี้จะมีความสามารถที่จะเดินทางทะลุผ่านบรรยากาศชั้นต่าง ๆ ไปได้ เนื่องจากคลื่นในย่านความถี่นี้มีความถี่สูงมากจึงมักเรียกการสื่อสารในย่านนี้ว่า “การสื่อสารในแนวสายตา” (Line-of-Sight Communication) ดังแสดงในรูปภาพที่ ๑-๗

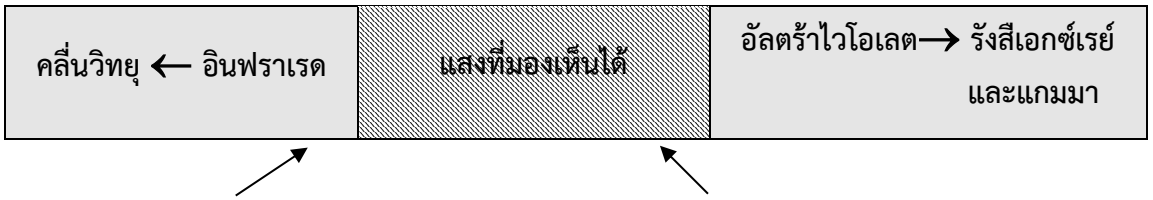
สำหรับย่านความถี่ที่มีความถี่สูงกว่า 1 GHz เรียกว่า “ไมโครเวฟ” (Microwave) ปกติจะใช้ในระบบเรดาร์ (Radar) และการสื่อสารด้านอื่นที่ต้องการแบนด์วิดท์กว้างมาก ไมโครเวฟมีความถี่อยู่ระหว่าง 3 GHz ถึง 30 GHz ความยาวคลื่นของมันคือ ๑๐-๑ ซม. และไมโครเวฟที่มีความถี่สูงกว่า 30 GHz แต่ไม่เกิน 300 GHz ความยาวคลื่นจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังนั้น บางครั้งเรียกคลื่นที่มีความถี่อยู่ในย่านไมโครเวฟว่าเป็นคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter wave) ข้อดีของการสื่อสารในย่านนี้คือ สายอากาศที่ใช้จะมีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือสภาพภูมิอากาศจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นในย่านความถี่นี้มาก โดยเฉพาะฝน เพราะฝนมีขนาดพอที่จะดูดซับเอาพลังงานของคลื่นสัญญาณไว้ จึงอาจทำให้คลื่นเดินทางไปไม่ถึงเครื่องรับได้




รูปที่ ๔.๗ ระบบการสื่อสารในแนวสายตา หรือ Line-of-Sight

**สเปคตรัมและความยาวคลื่น**

การวิเคราะห์สัญญาณโดยทั่วไปนั้น อาศัยเทคนิคของการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) จึงทำให้เราทราบว่าสัญญาณต่าง ๆ นั้นประกอบขึ้นจากคลื่นรูปไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณฮาร์มอนิค (Harmonics) จำนวนมาก โดยที่แถบพลังงานที่ครอบคลุมคลื่นรูปไซน์ทั้งหมดที่ประกอบขึ้นเป็นสัญญาณนั้น เรียกว่า สเปคตรัม (Spectrum) ของสัญญาณนั้น สัญญาณที่กล่าวถึงในที่นี้เราหมายถึงสัญญาณโดยทั่วไป ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณกายภาพอื่น ๆ ก็ได้ รูปภาพที่ ๑-๘ แสดงตัวอย่างของสเปคตรัมที่มนุษย์มองเห็นได้ ปริมาณที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งช่วยให้เราแบ่งแยกคุณสมบัติบางประการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้คือ “ความยาวคลื่น” (wavelenght)



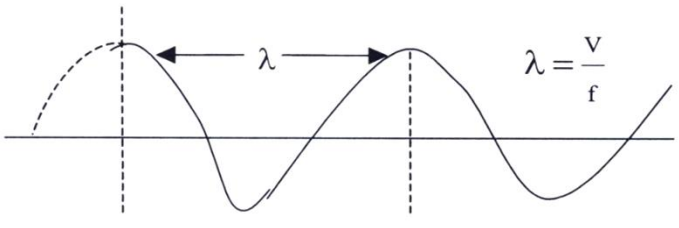

| | | | |
|---|---|---|---|
| ย่านความถี่ | $4X10^{14}$ Hz | ถึง | $7X10^{14}$ Hz |
| ความยาวคลื่น | $7X10^{-7}$ เมตร | ถึง | $4X10^{-7}$ เมตร |
| ขนาด | 0.7 ไมครอน | ถึง | 0.4 ไมครอน |

รูปที่ ๔.๘ สเปคตรัมของแสงที่มองเห็นได้

ความยาวคลื่น คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปครบหนึ่งลูกคลื่น เป็นความยาวที่วัดได้จากระยะทางระหว่างยอดคลื่นที่เกิดตามกันมา (ดูรูปภาพที่ ๑-๙) ถ้าเราให้ V คือความเร็วของคลื่นสัญญาณที่เดินผ่านตัวกลางซึ่งมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที และถ้าคลื่นนั้นเกิดขึ้นด้วยความถี่ f Hz เราก็สามารถที่จะคำนวณหาความยาวคลื่น ($\lambda$) มีหน่วยเป็นเมตรได้ดังนี้คือ

$$\text{ความยาวคลื่น } (\lambda) = V/f$$

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง คือ $3X10^8$ เมตร/วินาที ในขณะที่เมื่อผ่านตัวกลางชนิดอื่นที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะทำให้ความเร็วของคลื่นลดลง เช่น ตัวกลางที่เป็นทองแดงจะมีความเร็วของคลื่นเท่ากับ $2.8X10^8$ เมตร/วินาที เป็นต้น




รูปที่ ๔.๙ ความยาวคลื่น

ตาราง แสดงการคำนวณค่าความถี่ให้เป็นค่าความยาวคลื่น

ใช้ช่วยในการหาค่าของความยาวคลื่น (เมตร) จากความถี่ของคลื่นแม่เหล็ก-ไฟฟ้า

| ความถี่ในช่วงตั้งแต่ (MHz) | คูณค่าความถี่ด้วย | คูณค่าความยาวคลื่นด้วย |
|---|---|---|
| ๐.๐๓ – ๐.๓ | ๐.๐๑ | ๑๐๐ |
| ๐.๓ – ๓.๐ | ๐.๑ | ๑๐ |
| ๓.๐ – ๓๐ | ๑ | ๑ |
| ๓๐ - ๓๐๐ | ๑๐ | ๐.๑ |
| ๓๐๐ – ๓,๐๐๐ | ๑๐๐ | ๐.๐๑ |
| ๓,๐๐๐ – ๓๐,๐๐๐ | ๑,๐๐๐ | ๐.๐๐๑ |
| ๓๐,๐๐๐ – ๓๐๐,๐๐๐ | ๑๐,๐๐๐ | ๐.๐๐๐๑ |

**การใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**

**ย่านความถี่ ELF, VLF และ LF**

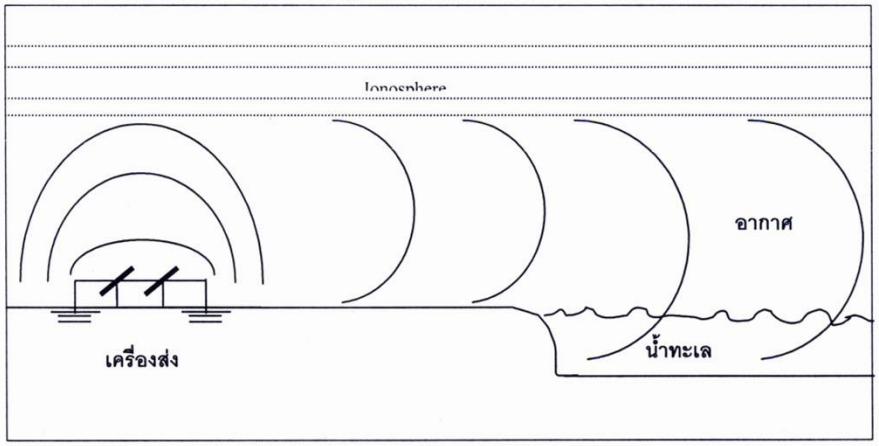
ย่านความถี่ ELF, VLF และ LF เป็นย่านความถี่ที่มีความถี่ต่ำมาก ๆ ในระดับที่ใกล้เคียงกับเสียงพูดของมนุษย์ มีคุณลักษณะตามตาราง

ตาราง ความถี่และความยาวคลื่นของย่านความถี่ต่ำ ๆ

| **ย่านความถี่** | **ความถี่ (kHz)** | **ความยาวคลื่น (กม.)** |
|---|---|---|
| Extremely Low Frequency (ELF) | ๐.๐๓ – ๐.๓ | ๑๐,๐๐๐ – ๑,๐๐๐ |
| Voice Frequency (VF) | ๐.๓ – ๓.๐ | ๑,๐๐๐ – ๑๐๐ |
| Very Low Frequency (VLF) | ๓.๐ – ๓๐.๐ | ๑๐๐ – ๑๐ |
| Low Frequency (LF) | ๓๐ – ๓๐๐.๐ | ๑๐ – ๑ |

ความถี่ในย่าน VF เป็นความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ จะไม่ใช้ในการสื่อสารทางวิทยุโดยทั่ว ๆ ไป แต่มีการใช้งานสำหรับ โซนาร์ (Sonar) หรือ โทรศัพท์ใต้น้ำ (Under Water Telephone) ซึ่งเป็นการแพร่กระจายคลื่นเสียงออกจากเครื่องส่ง โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง

ย่านความถี่ VLF และ LF จะมีคุณลักษณะพื้นฐานใกล้เคียงกัน มีชื่อเรียกรวมว่าย่านความถี่คลื่นยาว (Long Wave) การแพร่คลื่นจะเป็นลักษณะของ surface wave มีโพลาไรเซชั่นแนวตั้ง (Vertical Polarization) โดยมีพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นเสมือนท่อนำคลื่น (Terrestrial Wave Guide) และความสูงของท่อนำคลื่นนี้จะมีผลต่อความสามารถในการแพร่คลื่นของความถี่ในย่านนี้ โดยที่ความสูงของท่อนำคลื่นจะมีค่าแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในขณะนั้น โดยทั่วไปจะมีความสูงประมาณ ๗๐ กม.ในเวลากลางวัน และประมาณ ๙๐ กม.ในเวลากลางคืน โดยมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ดังรูปภาพที่ ๒.๔.๑๐




รูปที่ ๔.๑๐ การแพร่กระจายคลื่นของย่านความถี่ ELF, VLF และ LF

การแพร่กระจายของคลื่นออกสู่อากาศนั้น ปัจจัยสำคัญที่กำหนดระยะทางที่สามารถใช้งานคลื่นความถี่นั้นได้ปัจจัยหนึ่งคือ การถูกลดทอนสัญญาณ โดยที่การแพร่กระจายในลักษณะของ (surface wave) ของย่านความถี่ ELF, VLF และ LF การถูกลดทอนสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพื้นผิวที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน นั่นคือคุณสมบัติในการเป็นตัวนำของพื้นผิว (Conductivity) จะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณดังกล่าว ซึ่งความถี่ในย่านนี้ทั้งหมดมีอัตราการถูกลดทอนน้อยขณะที่แพร่กระจายออกสู่อากาศ ส่วนพื้นผิวที่เป็นน้ำทะเลจะยิ่งมีอัตราลดทอนต่ำมาก

นอกจากนี้ลักษณะเด่นของความถี่ในย่าน VLF และ ELF คือความสามารถในการทะลุทะลวงลงสู่ใต้น้ำได้ดี จึงสามารถนำไปใช้งานในการติดต่อสื่อสารกับเรือดำน้ำได้ โดยขีดความสามารถในการแพร่กระจายลงสู่ใต้พื้นน้ำดังตารางที่ ๑-๓

ความถี่ในย่านนี้สามารถแพร่กระจายไปได้ไกล จึงมักมีการใช้งานในการติดต่อสื่อสารระยะไกล และงานในระบบวิทยุนำเรือ เช่น ระบบ LORAN – C (Long Range Navigation) ใช้งานย่านความถี่ 100 kHz และระบบ OMEGA ย่านความถี่ 10 -14 kHz

ตาราง ความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นสู่ใต้ผิวน้ำของย่านความถี่ต่าง ๆ

| ย่านความถี่ | ความสามารถในการแพร่กระจายสู่ใต้ผิวน้ำ (ม.) |
|---|---|
| LF | ๐.๔๖ – ๑.๔ |
| VLF | ๑.๔ – ๔.๖ |
| VF | ๔.๖ – ๑๔ |
| ELF | ๑๔ – ๔๖ |

**ย่านความถี่ MF**

มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 – 3,000 kHz และความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง ๑๐๐ เมตร ถึง ๑ กิโลเมตร มีคุณลักษณะที่สามารถใช้งานได้ทั้งการสื่อสารในรูปแบบของคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยในการใช้งานในลักษณะของคลื่นผิวพื้นนั้น การถูกลดทอนของสัญญาณเมื่อแพร่กระจายออกสู่อากาศจะสูงกว่าย่านความถี่ LF ทำให้มีพื้นที่ครอบคลุมการใช้งานน้อยลง (แต่สามารถติดต่อได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตร) ส่วนใหญ่ใช้ในกิจการวิทยุกระจายเสียงย่านความถี่ 1,456-1,647 kHz และการติดต่อสื่อสารเป็นพื้นที่ไม่กว้างมากนัก เช่น การสื่อสารโทรเลข/โทรศัพท์ของเรือในย่าน 405-525 kHz และ 1,600-3,800 kHz เป็นต้น

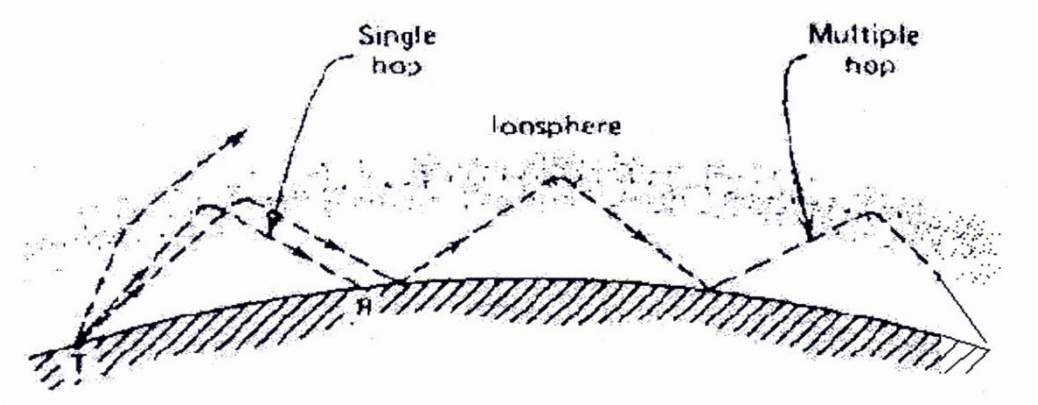
สำหรับการแพร่คลื่นในลักษณะของคลื่นฟ้านั้น ความถี่ในย่านนี้จะถูกดูดกลืนพลังงานโดย D – Layer ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่ในเวลากลางคืนบรรยากาศชั้น D – Layer นี้จะเบาบางลงหรือไม่ปรากฏขึ้น ทำให้การสื่อสารในลักษณะของ Sky Wave สำหรับย่านความถี่ MF สามารถกระทำได้แต่ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน

**ย่านความถี่ HF**

มีความถี่อยู่ระหว่าง 3 – 30 MHz เป็นย่านความถี่หลักสำหรับการติดต่อสื่อสารในระยะไกล ซึ่งสามารถสื่อสารได้ครอบคลุมทั่วโลก โดยสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ใน ๒ ลักษณะคือ ทั้งคลื่นดิน (Ground Wave) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยคลื่นดินจะใช้ในการติดต่อสื่อสารในระยะที่ไม่ไกลนักเนื่องจากมีอัตราการถูกลดทอนสูง จึงมักใช้งานกับสถานีวิทยุชายฝั่งที่แพร่กระจายคลื่นวิทยุผ่านพื้นผิวที่เป็นน้ำทะเล ซึ่งมีค่าความนำทางไฟฟ้าสูงช่วยให้อัตราการถูกลดทอนน้อยลง จึงสามารถสื่อสารได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น สำหรับคลื่นฟ้านั้น จะใช้ติดต่อสื่อสารในระยะไกลและสามารถติดต่อสื่อสารได้ทั่วโลก โดยอาศัยการสะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งอาจเป็นการสะท้อนเพียงครั้งเดียว (1 Hop) หรือสะท้อนกลับไปมาหลายครั้ง (Multi-Hop) ก็ได้ ดูรูปภาพที่ ๑-๑๒ อีกทั้งสามารถใช้สายอากาศที่ออกอากาศได้ทั้งโพลาไรเซชั่นแนวตั้งและแนวนอน นอกจากนี้ยังได้เปรียบย่านความถี่อื่น ๆ ในเรื่องของขนาดของสายอากาศ ซึ่งมีขนาดเล็กลงอยู่ในขนาดไม่กี่เมตร ทำให้เป็นระบบที่สะดวกและประหยัดในการติดต่อระยะไกล แต่การสื่อสารย่านความถี่ HF ด้วยคลื่นฟ้ามีความไม่แน่นอนสูง เนื่องจากต้องอาศัยชั้น

บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวช่วยในการสื่อสาร และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก็มีความแปรปรวนสูง ทำให้ผู้ที่จะใช้งานต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานเป็นอย่างดี

การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้คลื่นฟ้าในการติดต่อสื่อสารวิทยุโทรศัพท์ระหว่างชาติ, การกระจายเสียงวิทยุ และระบบสื่อสารเคลื่อนที่ของเครื่องบินหรือเรือเดินสมุทร

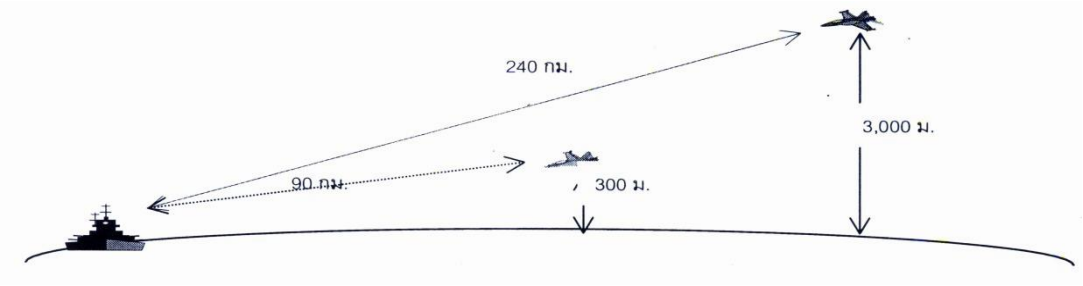



รูปที่ ๔.๑๑ ภาพการสะท้อนของคลื่นกลับไปกลับมาระหว่างพื้นโลก
กับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

**ย่านความถี่ VHF และ UHF**

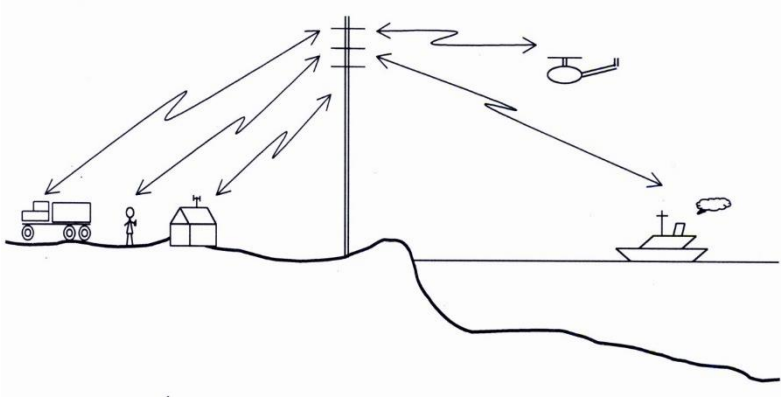
ย่านความถี่ VHF มีความถี่อยู่ระหว่าง 30 – 300 MHz ส่วน UHF มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 3 GHz ซึ่งทั้ง ๒ ย่านความถี่จะมีคุณสมบัติส่วนใหญ่ที่คล้ายคลึงกัน มีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

- สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนจากการทำงานของอุปกรณ์ (Thermal Noise) มากกว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Atmospheric Noise)
- ไม่มีผลกระทบจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากเป็นความถี่ที่สูงจะทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศนี้ และคลื่นความถี่จะเดินทางเป็นเส้นตรง จึงสามารถติดต่อกันได้ในระยะสายตาเท่านั้น (คลื่นไม่เดินทางโค้งตามความโค้งของผิวโลก) ระยะทางในการติดต่อสื่อสารจริงขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศทั้งด้านรับและด้านส่ง ดังรูปภาพที่ ๒.๔.๑๑ และรูปภาพที่ ๒.๔.๑๒
- มีแบนด์วิดท์กว้างกว่าย่านความถี่ HF มาก รวมทั้งมีความยาวคลื่นน้อย ทำให้ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็ก และสามารถใช้งานการสื่อสารข้อมูลได้ดีกว่า




รูปที่ ๔.๑๒ ระยะทางในการติดต่อสื่อสารกับความสูงของสายอากาศทั้งด้านรับและด้านส่ง

การใช้งานส่วนใหญ่เป็นในลักษณะของแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) ในกิจการวิทยุกระจายเสียง, ระบบสื่อสารเคลื่อนที่บนพื้นดิน, อากาศ และมหาสมุทร, การแพร่ภาพสัญญาณโทรทัศน์ ดังรูปภาพที่ ๑-๑๔



รูปที่ ๔.๑๓ การใช้งานย่านความถี่ ในลักษณะของแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight)

**ย่านความถี่ SHF**

ย่านความถี่นี้มีความถี่อยู่ระหว่าง 3-30 GHz มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง ๑๐-๑ เซนติเมตรซึ่งความยาวคลื่นจะมีขนาดอยู่ในระดับเดียวกับขนาดอนุภาคของ ฝน, เมฆ หรือ หิมะ ทำให้ถูกดูดซับพลังงานจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเหล่านี้ได้ง่าย

การใช้งานในย่านความถี่นี้ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง, การติดต่อสื่อสารของยานอวกาศ, การใช้งานเรดาร์, การสื่อสารดาวเทียม เป็นต้น

**ย่านความถี่ EHF**

ย่านความถี่ EHF จะเริ่มจากย่านความถี่อินฟราเรด โดยมีความถี่อยู่ระหว่าง 30-300 GHz ความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง ๑๐-๑ มิลลิเมตร (Millimeter wave) ปัญหาของการใช้งานย่านความถี่นี้ยังคงเหมือนกับย่านความถี่ SHF สาเหตุจากความยาวคลื่นของมันมีขนาดที่เล็กมาก ปัจจุบันใช้ในระบบวิทยุดาราศาสตร์ (Radio Astronomy), เรดาร์ การสื่อสารดาวเทียมสมัครเล่น และการวิจัยสำรวจทรัพยากร เป็นต้น

**การแพร่กระจายคลื่น**

การศึกษาเรื่องการแพร่คลื่นวิทยุมีความเกี่ยวพันโดยตรงกับคุณสมบัติและผลกระทบอันเนื่องมาจากตัวกลางที่คลื่นวิทยุเดินทางผ่านไม่ว่าจะเป็นทางใดก็ตาม ระหว่างสายอากาศส่งจนถึงสายอากาศรับ ตัวกลางที่สำคัญได้แก่ชั้นบรรยากาศโลก ซึ่งมีลักษณะหรือรูปแบบที่แตกต่างกันตามความสูงเหนือพื้นโลก ตำบลที่ทางภูมิศาสตร์หรือช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป (วัน, เดือน, ปี, ฤดูกาล) รูปแบบที่แตกต่างกันนี้เองที่มีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังชั้นบรรยากาศโลก และเป็นพื้นฐานแรกที่ผู้ศึกษาต้องมีความเข้าใจ โดยชั้นบรรยากาศโลกแบ่งเป็น ทรอโพสเฟียร์ (Troposphere) สตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) และ ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

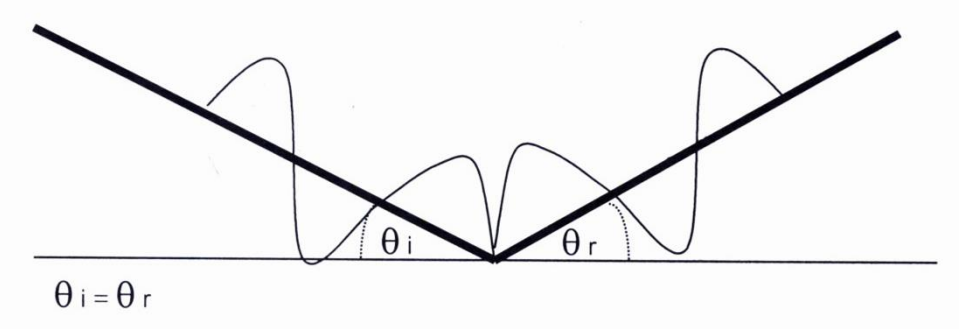
ชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่นับจากพื้นโลกจนกระทั่งถึงความสูงประมาณ ๑๑ กม. โดยชั้นนี้จะมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปตามความสูง ส่วนชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ระหว่าง ทรอโพสเฟียร์ และไอโอโนสเฟียร์ โดยชั้นนี้มีอุณหภูมิเกือบจะคงที่ จนเรียกว่า ชั้นไอโซเทอร์มอล (Isothermal Region) ส่วนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อยู่สูงเหนือชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ขึ้นไปตั้งแต่ความสูง ๕๐ กม. ขึ้นไปถึงประมาณ ๒๕๐ กม. เหนือพื้นโลก ในชั้นนี้มีความเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุอิสระ ซึ่งมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการใช้คลื่นวิทยุ

การเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับนั้น อาจเป็นได้ทั้งแบบคลื่นดิน (Ground Wave) , คลื่นตรง (Direct Wave) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยคลื่นดิน และคลื่นตรงมักแพร่กระจายไปได้ระยะทางจำกัด คลื่นดินอาศัยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของผิวพื้นโลก (พื้นดินและพื้นน้ำ), การเลี้ยวเบน (Bending) หรือการโน้มรอบวัตถุ (Diffraction) ไปตามความโค้งของผิวโลก ส่วนคลื่นตรงจะใช้การหักเห (Refraction) ของคลื่นไปตามความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศ จึงทำให้สามารถแพร่กระจายไปได้ไกลเกินขอบฟ้า และคลื่นฟ้าแพร่กระจายไปได้ระยะไกลโดยอาศัยความนำทางไฟฟ้าของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวหักเห หรือสะท้อนกลับของคลื่นกลับสู่พื้นโลกอีกครั้ง

**๑.๔.๑ การสะท้อนของคลื่น (Reflection)**

การสะท้อนเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของคลื่นวิทยุ โดยเมื่อคลื่นตกกระทบวัตถุหรือตัวกลางใด ๆ จะเกิดการสะท้อนกลับ โดยประสิทธิภาพการสะท้อนแตกต่างกันตามวัตถุหรือตัวกลางชนิดนั้น เช่น พื้นผิวโลหะ (ความนำไฟฟ้าดี) ที่มีขนาดใหญ่และเรียบจะเป็นตัวสะท้อนคลื่นได้ดี พลังงานของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) เกือบทั้งหมดจะสะท้อนกลับ ส่วนพื้นโลกเป็นตัวสะท้อนคลื่นที่ดีพอใช้ โดยเฉพาะคลื่นที่ตกกระทบด้วยมุมต่ำเมื่อเทียบกับแนวระนาบ รวมทั้งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก็ถือว่าเป็นตัวสะท้อนคลื่นวิทยุที่ดีพอใช้

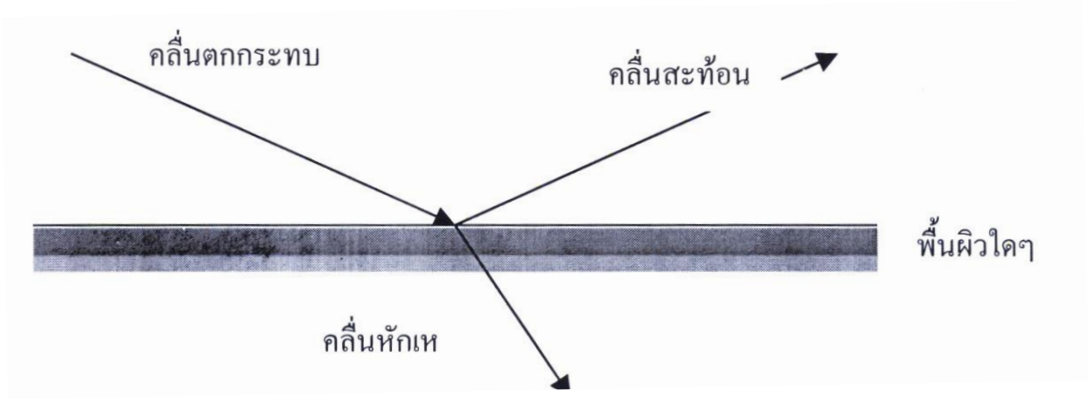
รูปภาพที่ ๑-๑๕ แสดงภาพการตกกระทบของหน้าคลื่น (Wave Front) แล้วสะท้อนกลับ โดยมุมตกกระทบ (Angle of Incident) และมุมสะท้อน (Angle of Reflection) มีขนาดเท่ากันเสมอ รวมทั้งคลื่นสะท้อนจะกลับเฟส หรือ เฟสต่างจากคลื่นตกกระทบ ๑๘๐ องศา ดังแสดงในภาพ




รูปที่ ๔.๑๔ การสะท้อนของคลื่น

**การหักเหของคลื่น (Refraction)**

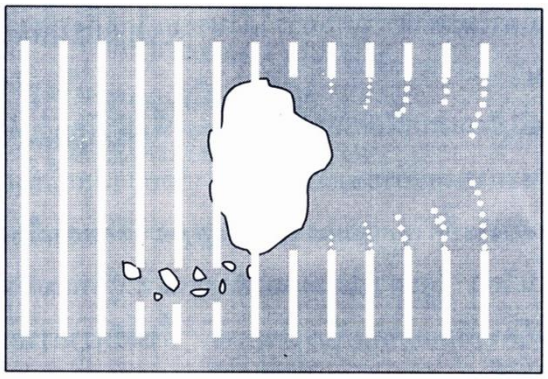
การหักเหเป็นปรากฏการณ์ของคลื่นที่ตกกระทบกับพื้นผิวใด ๆ ในมุมเฉียง (Oblique) และมีพลังงานของคลื่นบางส่วนทะลุลงไปในพื้นผิวตกกระทบ แทนที่จะสะท้อนกลับทั้งหมด โดยความแตกต่างของความหนาแน่นของตัวกลาง ๒ ตัวกลางที่มีความแตกต่างจะทำให้คลื่นที่หักเหออกไปในตัวกลางหนึ่งมีความเร็วเปลี่ยนไปจึงเกิดการเลี้ยวเบนออกไป เช่น เมื่อคลื่นหักเหที่ตัวกลางที่เป็นน้ำ ความเร็วของคลื่นช้ากว่าคลื่นตกกระทบในอากาศ จะทำให้มุมเบนออกไปจากทิศทางคลื่นที่ตกกระทบและเฟสเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปภาพที่ ๒.๔.๑๕




รูปที่ ๔.๑๕ การหักเหของคลื่น (Refraction)

**การโน้มรอบวัตถุ (Diffraction)**

การโน้มรอบวัตถุเป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นเดินทางรอบวัตถุหรือสิ่งกีดขวางโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของคลื่น ตัวอย่างดังแสดงในรูปภาพที่ ๒.๔.๑๖ คลื่นความถี่ต่ำหรือมีความยาวคลื่นมากจะสามารถเลี้ยวเบนได้ดีกว่าคลื่นความถี่สูงหรือมีความยาวคลื่นสั้น



รูปที่ ๔.๑๖ การโน้มรอบวัตถุ

**แบบของการแพร่กระจายคลื่น (Mode of Propagation)**

แบบของการแพร่กระจายคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น ๓ กลุ่มใหญ่ ๆ คือ คลื่นดิน (Ground Wave), คลื่นในชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ (Space Wave in Troposphere) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยคลื่นดินหรือคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) จะเป็นคลื่นที่เดินทางไปตามความโค้งของผิวโลกโดยอาศัยความนำทางไฟฟ้าของผิวโลก ส่วนคลื่นในชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ ประกอบด้วยคลื่นในแบบต่าง ๆ ที่มิได้มีการสะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ประกอบด้วยคลื่นตรง (Direct Wave) , คลื่นสะท้อนพื้นดิน (Ground-reflected Wave) และคลื่นกระทบชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ (Tropospheric Wave) ส่วนคลื่นฟ้าจะกล่าวถึง การแพร่กระจายคลื่นที่เมื่อเดินทางตกกระทบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วเกิดการหักเหหรือสะท้อนกลับลงมายังพื้นโลก

**การแพร่คลื่นดิน (Ground Wave Propagation)**

การแพร่กระจายคลื่นดินในที่นี้จะหมายถึงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับผ่านตัวกลางชั้นบรรยากาศโลก ที่ไม่ใช่การสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และผ่านตัวกลางผิวพื้นโลก โดยพื้นผิวโลกจะทำหน้าที่เป็น “วัตถุกึ่งตัวนำ” (Semi Conductor) ที่พลังงานของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านจะสามารถถูกดูดซับและเปลี่ยนรูปแบบกลายไปเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด ด้วยอัตราการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ของคลื่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่กระจายคลื่นดินถูกจำกัดด้วยระยะทาง โดยการใช้ความถี่ต่ำจะสามารถสื่อสารได้ในระยะใกล้ถึงระยะกลางเท่านั้น และระยะทางจะยิ่งลดลงอีกเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น

คลื่นผิวพื้นเป็นคลื่นที่ใช้คุณสมบัติความนำไฟฟ้าของพื้นผิวโลก ทำให้คลื่นเดินทางไปได้ตามส่วนโค้งของผิวโลก ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นมิได้จำกัดอยู่เพียงที่พื้นโลกเท่านั้น แต่ขยายขึ้นไปถึงที่ความสูงระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามความแรงของสัญญาณจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น พลังงานของคลื่นจะถูกดูดซับโดยพื้นโลก ความแรงของสัญญาณจะถูกลดทอนมากกว่าเมื่อคลื่นเดินทางในอากาศที่อัตราการลดทอนมีส่วนผกผันกับระยะทาง ทั้งนี้

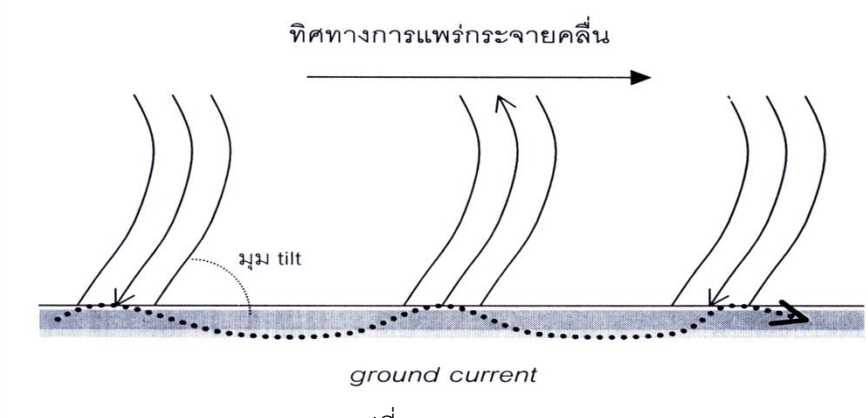
อัตราการลดทอนจะขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าของพื้นผิวชนิดนั้น ๆ พื้นผิวที่มีความนำไฟฟ้าสูง อัตราการลดทอนจะต่ำ จึงทำให้คลื่นเดินทางไปได้ไกลกว่าพื้นผิวที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ ตามตัวอย่างในตาราง

จากตารางข้อมูลจะเห็นได้ว่าน้ำทะเลเป็นพื้นผิวที่มีความนำไฟฟ้าดีที่สุด การสื่อสารด้วยคลื่นผิวพื้นในทะเลจึงสามารถติดต่อได้ในระยะไกลขึ้น ส่วนป่าดงดิบเป็นพื้นผิวที่คลื่นผิวพื้นไม่สามารถจะเดินทางผ่านไปได้

ตาราง ค่าความนำไฟฟ้าของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ

| ชนิดของพื้นผิว | Relative Conductivity | Dielectric Constant |
|---|---|---|
| น้ำทะเล | ดี | ๘๐ |
| น้ำจืด | พอใช้ | ๘๐ |
| พื้นดินชื้น | พอใช้ | ๓๐ |
| พื้นดินเรียบ | พอใช้ | ๑๕ |
| พื้นผิวเป็นสูง-ต่ำ , แห้ง | ไม่ดี | ๗ |
| ทะเลทราย | ไม่ดี | ๔ |
| ป่าดงดิบ | ใช้ไม่ได้เลย | - |

การใช้สายอากาศแนวตั้งที่แพร่กระจายคลื่นในแบบโพลาไรเซชั่นทางตั้ง (Vertical Polarization) เหมาะสมกับคลื่นผิวพื้น เนื่องจากการใช้โพลาไรเซชั่นทางนอนจะทำให้เกิดรูปแบบวงจรต่อลงดิน (Short-Circuit) ทำให้คลื่นไม่สามารถสร้างกระแสดิน (Ground Current) เพื่อส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ ในทางกลับกันการใช้โพลาไรเซชั่นทางตั้งจะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นในวงจร จึงทำให้สามารถถ่ายทอดพลังงานในพื้นผิวโลกได้ ดังแสดงในรูที่ ๑-๑๘ พื้นผิวที่เป็นตัวนำที่ดีจะสามารถถ่ายทอดพลังงานได้ดี และมีการสูญเสียน้อยกว่าตัวนำที่ไม่ดี การสูญเสียพลังงานที่พื้นผิวจะหน่วงมิให้หน้าคลื่น (Wave Front) บริเวณพื้นผิวเคลื่อนที่ไปได้ ทำให้หน้าคลื่นเกิดการเบนลงไปข้างหน้าเรียกมุมเบนลงนี้ว่า “Forward Tilt” ดังนั้นพื้นผิวที่เป็นประเภทตัวนำที่ไม่ดีจะทำให้หน้าคลื่นเกิดมุมเบนมากกว่าตัวนำที่ดี รวมทั้งเมื่อเกิดความถี่สูงขึ้น มุมเบนนี้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในตาราง นั่นคือที่ความถี่สูงขึ้นการติดต่อด้วยคลื่นผิวพื้นจะใช้ได้ระยะทางลดลง




รูปที่ ๔.๑๗ Forward Tilt

ตาราง มุม Tilt กับความถี่และชนิดของพื้นผิว

| ความถี่ (MHz) | มุม Tilt บนน้ำทะเล | มุม Tilt บนพื้นดินแห้ง |
|---|---|---|
| ๐.๐๒ | ๐° ๒.๕’ | ๔° ๑๘.๐’ |
| ๐.๒ | ๐° ๘.๐’ | ๑๓° ๓๐.๐’ |
| ๒.๐ | ๐° ๒๕.๐’ | ๓๒° ๑๒.๐’ |
| ๒.๐๐ | ๑° ๒๓.๐’ | ๓๕° |

**การแพร่คลื่นในชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ (Space Wave in Troposphere)**

ในชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ประกอบด้วยเส้นทางของคลื่นต่าง ๆ ได้แก่ คลื่นตรง, คลื่นสะท้อนพื้นดิน และคลื่นกระทบชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ ดังนั้นความเข้มหรือความแรงของคลื่นในชั้นบรรยากาศนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น กำลังส่ง, คุณลักษณะของสายอากาศ,ความถี่ใช้งาน, ความชื้นในชั้นบรรยากาศ หรือลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ นั่นคือ ความเข้มหรือความแรงของสัญญาณ ณ ภาครับ เป็นผลรวมของคลื่นแบบต่าง ๆ การสื่อสารในย่านความถี่ VHF และ UHF ใช้คุณสมบัติของการแพร่คลื่นแบบนี้ โดยอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การสะท้อนจากพื้นดิน (หรือสิ่งกีดขวางอื่น), การหักเหในชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์, การโน้มรอบสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางการแพร่คลื่น ตลอดจนการกระจาย (Scattering) และการจางหาย (Fading) ของคลื่นในชุมชนเมือง

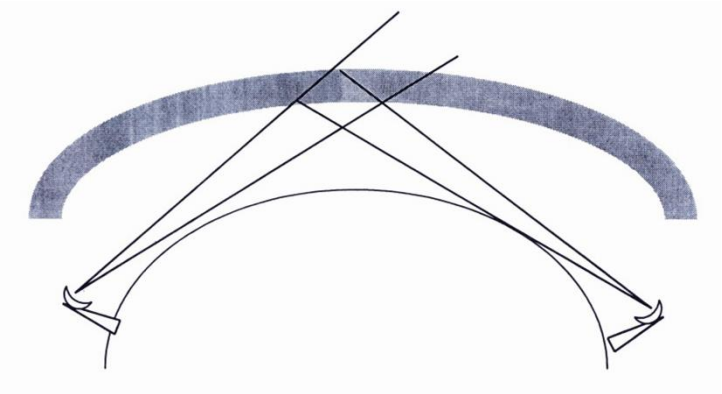
**คลื่นตกกระทบชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์(Tropospheric Wave)**

คลื่นตกกระทบชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์เป็นคลื่นที่เดินทางจากพื้นโลกขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์ด้วยมุมที่เหมาะสมแล้วเกิดการหักเห (Refraction) ณ จุดที่ชั้นบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น, ความหนาแน่น หรือ อุณหภูมิ อย่างรวดเร็ว เรียกว่า “Steep Gradients” ซึ่งจะทำให้ชั้นบรรยากาศขาดความต่อเนื่องในดัชนีหักเห พลังงานบางส่วนของคลื่นวิทยุจึงสามารถสะท้อนหรือหักเห กลับลงมายังพื้นโลกอีกครั้งได้ การสื่อสารโดยคลื่นแบบนี้จึงสามารถใช้งานได้ในระยะทางไกลเกินเส้นขอบฟ้า โดยใช้ความถี่สูงกว่า 50 MHz ขึ้นไป ในทาง

ปฏิบัติใช้ความถี่ 350 – 450 MHz, 755 – 985 MHz, 1,700 – 2,400 MHz และ 4,500 – 5,000 MHz โพลาไรเซชั่นของการแพร่คลื่นแบบนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสายอากาศรับและส่งจึงต้องใช้โพลาไรเซชั่นแบบเดียวกันเสมอ

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหก็คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากมวลอากาศอุ่นเข้าแทนที่มวลอากาศเย็น, ความกดอากาศ, การเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเมื่อดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า และการสร้างความร้อนจากแสดงอาทิตย์ที่ตกกระทบชั้นบนของเมฆ การแพร่กระจายคลื่นแบบนี้จึงขึ้นกับลักษณะอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงนาทีต่อนาที ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการจางหาย (Fading) ของคลื่น หรือเปลี่ยนแปลงความเข้มได้ตลอดเวลา

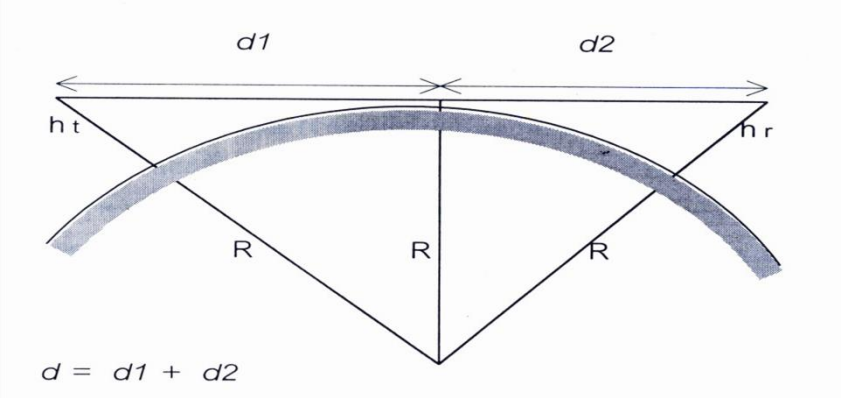
ปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในบางครั้งที่กระจุกตัวในลักษณะต่อเนื่องกันที่ความสูงจากพื้นโลกเท่า ๆ กัน (๑๐๐ – ๕๐๐ ฟุต) โดยเฉพาะในเขตเส้นศูนย์สูตรหรือเขตที่มีความชื้นสูง ทำให้คลื่นสามารถเดินทางได้ในลักษณะขนานกับพื้นโลก หรือเป็นท่อนำคลื่น (Duct) โดยคลื่นมีการสูญเสียพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับการแพร่คลื่นโดยปกติในอากาศที่สูญเสียเป็นอัตราส่วนผกผันกับระยะทางกำลังสอง ซึ่งในบางพื้นที่ทำให้การสื่อสารสามารถกระทำได้ในระยะทางหลายพันไมล์



รูปที่ ๔.๑๘ คลื่นตกกระทบชั้นบรรยากาศทรอโพสเฟียร์

**การแพร่คลื่นตรง (Direct Wave)**

การแพร่กระจายคลื่นตรง ได้แก่ คลื่นที่เดินทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ จึงถูกจำกัดด้วยระยะทางที่ไม่เกินเส้นขอบฟ้าวิทยุ (Radio Horizon) หรือตามแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) โดยคลื่นวิทยุเดินทางไปได้ไกลเกินกว่าเส้นขอบฟ้า หรือแนวเส้นสายตา เนื่องจากการเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศโลกและการเพิ่มความสูงของสายอากาศรับและส่ง




รูปที่ ๔.๑๙ การแพร่กระจายคลื่นตรง

จากรูปภาพที่ ๔.๑๙ สามารถแสดงวิธีคำนวณระยะขอบฟ้าวิทยุได้ดังต่อไปนี้

$d_1^2 = (h_t + R)^2 - R^2 = h_t^2 + 2h_tR \approx 2h_tR$ , R มากกว่า $h_t$ มากๆ

$d_2^2 = (h_r + R)^2 - R^2 = h_r^2 + 2h_rR \approx 2h_rR$ , R มากกว่า $h_r$ มากๆ

$\therefore d = d_1 + d_2$, $d = \sqrt{2R}\,(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}\,)$

$R \approx 8500$ กม.

$d = 4.12\,(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}\,)$ กม.

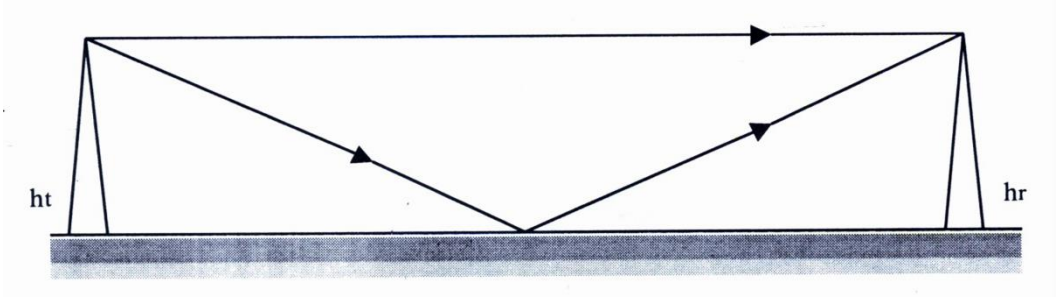
$h_t$ , $h_r$ แสดงความสูงของสายอากาศส่ง และสายอากาศรับเหนือพื้นโลก

d เป็นระยะขอบฟ้าวิทยุ

R เป็นรัศมีประสิทธิผลของโลก (effective radius of earth) ซึ่งคิดรวมคุณสมบัติการหักเหของคลื่นในชั้นบรรยากาศด้วย

**คลื่นสะท้อนพื้นดิน (Ground-reflected Wave)**

คลื่นสะท้อนพื้นดิน ได้แก่คลื่นที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับ หลังจากที่มีการสะท้อนมาจากพื้นดินหรือพื้นน้ำ โดยคลื่นสะท้อนจะมีเฟสต่างจากคลื่นตรง ๑๘๐ องศา ลักษณะเช่นนี้จะทำให้คลื่นที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับมีเฟสต่างกัน โดยเฉพาะคลื่นสะท้อนพื้นดินที่ต้องใช้เวลาเดินทางมากกว่า จึงทำให้ภาครับจะรับสัญญาณที่มีเฟสเลื่อนออกไปมากกว่า ๑๘๐ องศา ซึ่งภาครับต้องสามารถกำจัดคลื่นในส่วนนี้ออกไป รวมทั้งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของสายอากาศเพื่อลดความแตกต่างกันระหว่างเฟสของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อนพื้นดิน ความแตกต่างของเฟสนี้จะทำให้คลื่นทั้งสองส่วนมีทั้งส่วนเสริม (เมื่อคลื่นเฟสตรงกัน) และส่วนหักล้าง (เมื่อคลื่นเฟสต่างกัน ๑๘๐$^{o}$) ซึ่งถือว่าเป็นการรบกวนทางการสื่อสารอย่างหนึ่ง สามารถแสดงความแรงของสัญญาณได้ดังนี้




รูปที่ ๔.๒๐ คลื่นสะท้อนพื้นดิน

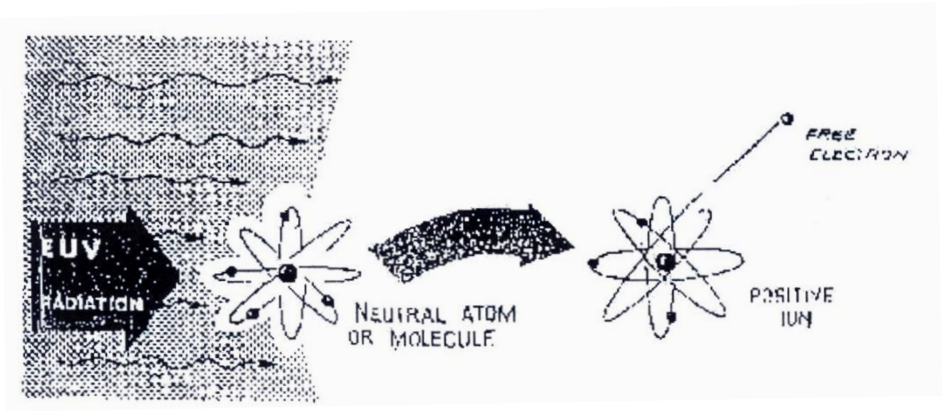
การสะท้อนของคลื่นที่มีต่อระดับสัญญาณที่ภาครับที่ตั้งอยู่ตามระยะทางต่าง ๆ ระหว่าง ๑ – ๑,๐๐๐ กม. ซึ่งจะพบการจางหาย (Fading) ของสัญญาณเป็นช่วง ๆ เมื่อระยะห่างระหว่างสถานีรับและส่งเปลี่ยนไป ซึ่งจะมีผลกระทบมากในการติดต่อสื่อสารย่านความถี่ VHF/UHF ระหว่างสถานีภาคพื้นดินกับอากาศยาน

**การแพร่กระจายคลื่นฟ้า (Sky Wave Propagation)**

การแพร่กระจายคลื่นฟ้าเป็นการสร้างเส้นทางการเดินทางของคลื่นระหว่างสายอากาศส่งและรับ โดยผ่านการหักเหหรือสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วการสื่อสารจะประสบความสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อภาครับสามารถรับคลื่นที่เดินทางมาถึงได้ด้วยความแรงสัญญาณเหนือระดับสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ที่ปรากฏที่ภาครับ เพื่อให้ติดต่อได้ตามเงื่อนไขนี้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวแปรสำคัญ เนื่องจากสามารถรองรับคลื่นที่เดินทางตกกระทบได้ในช่วงความถี่หนึ่งเท่านั้น โดยความถี่สูงสุดที่รองรับได้ เรียกว่า MUF (Maximum Usable Frequency) ส่วนความถี่ต่ำสุดที่จะรองรับได้ เรียกว่า LUF (Lowest Usable Frequency) ทั้งนี้จะมีค่าเฉพาะสำหรับเส้นทางคู่ใดคู่หนึ่งเท่านั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเพดานควบคุมการหักเหของคลื่นวิทยุที่ส่งขึ้นมาจากโลกให้กลับลงสู่พื้นโลกอีกครั้ง รวมทั้งจะกล่าวถึงเส้นทางการเดินทางของคลื่นวิทยุผ่านชั้นบรรยากาศและผลกระทบต่อการติดต่อสื่อสารวิทยุด้วย

**ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์**

ในยุคเริ่มต้นมีความเชื่อกันว่า การแพร่คลื่นวิทยุนั้นจะถูกจำกัดโดยความโค้งของส่วนโลก ซึ่งทำให้คลื่นวิทยุสามารถแพร่กระจายไปได้ในขอบเขตจำกัดในแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) หลังจากนั้นไม่นานนัก บริษัทมาร์โคนีได้ทดลองแพร่คลื่นวิทยุย่านความถี่ HF ซึ่งสามารถแพร่คลื่นไปได้ไกลกว่า ๑,๐๐๐ กิโลเมตร ทำให้นักวิทยาศาสตร์สมัยนั้นเชื่อกันว่าชั้นบรรยากาศมีคุณสมบัติสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุย่านความถี่ HF ได้ ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชื่อแอพพลีตัน ได้ทำการวิจัยและพบว่า ชั้นบรรยากาศดังกล่าวมีจริงและได้ตั้งชื่อชั้นบรรยากาศนั้นว่า “ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)”




รูปที่ ๔.๒๑ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

คุณสมบัติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสูงเริ่มจาก ๖๐ กิโลเมตรโดยประมาณจนถึง ๕๐๐ กิโลเมตร ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยโมเลกุลของสารต่าง ๆ ในอากาศมากมาย เช่น $O_2$ , $N_2$ เป็นต้น เมื่อโมเลกุลดังกล่าวได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์แล้วจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลนั้น ๆ อนุภาคดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นอิออน และมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบ ๆ บริเวณนั้น ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Ionized Media กระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นอิออน (Photoionization) ดังรูปภาพที่ ๑.๒๒ แหล่งของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมีรังสีอยู่ ๒ ชนิด คือ รังสี EUV (Extreme Ultra Violet) และรังสี X การเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นอิออนของอนุภาคต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีปริมาณที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์, ความเข้มของรังสี EUV และรังสี X ที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ รวมถึงความหนาแน่นของจำนวนโมเลกุลที่สามารถแตกตัวออกเป็นอิออนได้ (Ionizable Components)

ตอนบนสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ความเข้มของรังสี EUV จะมากในขณะที่ความหนาแน่นของจำนวนโมเลกุลที่สามารถแตกตัวเป็นอิออนได้จะเบาบาง ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นอิออนในชั้นนี้จึงเบาบาง ในขณะที่บริเวณด้านล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ความหนาแน่นของจำนวนโมเลกุลมีค่อนข้างมากแต่ความเข้มของรังสี EUV จากดวงอาทิตย์จะน้อย จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเบาบางเช่นเดียวกัน ณ ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างชั้นบรรยากาศตอนบนกับตอนล่างนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมากที่สุด

ดังนั้นในเวลากลางวัน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบ่งออกได้เป็น ๔ ชั้นด้วยกัน ดังนี้

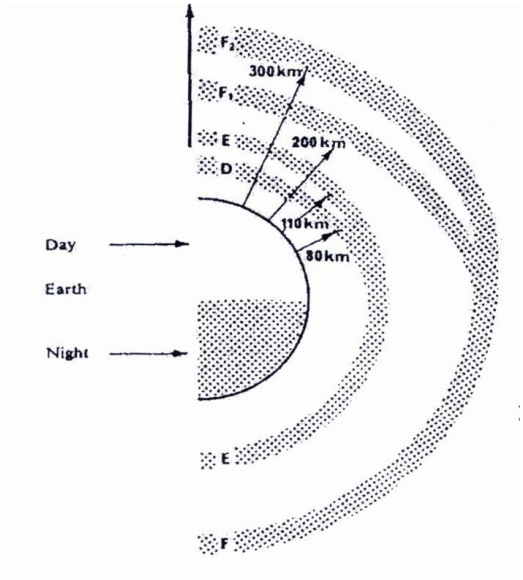
D – Layer ความสูงโดยประมาณ ๖๐ – ๘๐ กิโลเมตร

E – Layer ความสูงโดยประมาณ ๘๐ – ๑๖๐ กิโลเมตร

F1 – Layer ความสูงโดยประมาณ ๑๖๐ – ๒๑๐ กิโลเมตร

F2 – Layer ความสูงโดยประมาณ > ๒๑๐ กิโลเมตร

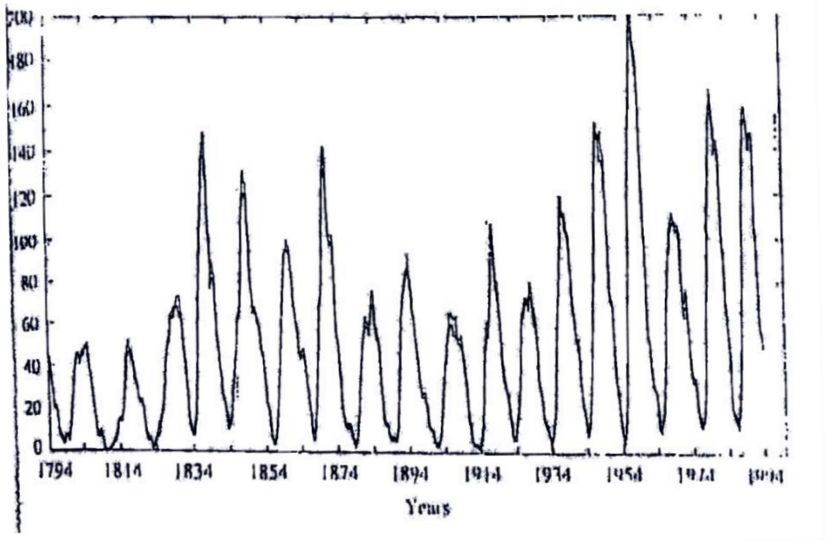
ชั้นบรรยากาศถูกแบ่งออกตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ตามรูปภาพที่ ๒.๔.๒๓ นั้น F2 – Layer เป็นชั้นบรรยากาศที่มีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุด เมื่อเทียบกับชั้นบรรยากาศอื่น ในเวลากลางคืนจะปรากฏเฉพาะ F2 – Layer ที่ความสูง มากกว่า ๒๐๐ กิโลเมตร ส่วนชั้นอื่น ๆ จะหายไป สาเหตุเพราะว่าอิออนที่ปรากฏใน F2 – Layer ส่วนมาก คือ Atomic Oxygen, $O^+$ ซึ่งเมื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นโมเลกุลที่เป็นกลางได้ช้ากว่า Molecular Oxygen, $O_2^+$ และ Nitric Oxide, $NO^+$ ที่พบมากในชั้น E และ F1 จึงทำให้ชั้น F2 ยังคงมีอิออนและอิเล็กตรอนเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นกลับสู่พื้นโลกได้ กระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนนี้ เรียกว่า Recombination Process ดังนั้น F2 – Layer จึงเป็นส่วนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับการสะท้อนคลื่นวิทยุย่านความถี่ HF เนื่องจาก F2 - Layer นี้จะปรากฏอยู่บริเวณที่สูงสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารในระยะพ้นเส้นขอบฟ้าได้ และสามารถติดต่อสื่อสารได้ระยะทางไกลที่สุด อีกทั้งเป็นชั้นบรรยากาศที่ปรากฏตลอด ๒๔ ชั่วโมง ดังนั้น การดำรงสภาพทางการสื่อสารจึงมีประสิทธิภาพสูงสุด




รูปที่ ๔.๒๓ ชั้นบรรยากาศที่ถูกแบ่งออกตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

**ความผันผวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere Variation)**

จากที่กล่าวในเบื้องต้นแล้ว ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Controlled) ซึ่งรังสีที่แพร่ออกมาจากดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot Number) ซึ่งมักจะพบในบริเวณที่ดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงมากและสนามแม่เหล็กมีความเข้มมาก ความเข้มของรังสี EUV ที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์นั้น แปรเปลี่ยนไปตามจุดดับบนดวงอาทิตย์ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในวงรอบ ๑๑ ปี รูปภาพที่ ๒.๔.๒๔ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความถี่ที่ใช้ในการรับ – ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ HF จะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของจุดดับบนดวงอาทิตย์เป็นวงรอบ ๑๑ ปี



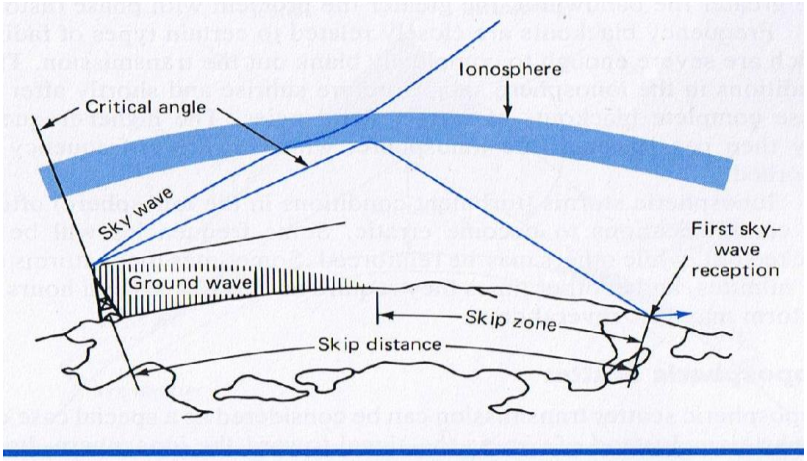

รูปที่ ๔.๒๔ ความผันผวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

คุณสมบัติที่สำคัญของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุก็คือความสามารถในการหักเหคลื่นวิทยุกลับมายังโลกได้ เมื่อโมเลกุลของอนุภาคต่างๆ ในชั้นบรรยากาศนี้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการสั่นและพยายามทำให้ตัวมันเองหลุดออกมาจากวงโคจรของโมเลกุลนั้นๆ ความถี่ในการสั่นสะเทือนนี้เรียกว่า Plasma Frequency (fp) ซึ่งก็คือความถี่วิกฤต (Critical Frequency) นั่นเอง

ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของความถี่ที่ใช้ส่งคลื่นวิทยุย่าน HF ก็คือ การเปลี่ยนแปลงประจำวันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Diurnal Variation) ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้กับพื้นผิวโลกมากที่สุด จะส่งผลให้อัตราการแตกตัวของโมเลกุลเป็นอิเล็กตรอนสูงที่สุด ดังนั้น ความถี่ของ plasma จะสูงที่สุด และความถี่ที่ใช้ส่งคลื่นวิทยุนั้น ๆ สูงที่สุดด้วยเช่นกัน นอกจากนั้นยังมีผลจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Seasonal Variation) โดยในช่วงฤดูร้อน มุมเงยระหว่างดวงอาทิตย์กับพื้นผิวโลก (Zenith Angle : $\chi$) จะแคบกว่าในช่วงฤดูหนาว รังสีที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์มากระทบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จึงมีความเข้มมากกว่า ดังนั้นในช่วงฤดูร้อนอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีจำนวนมากกว่าและส่งผลให้ความถี่ใช้งานสูงขึ้น

**เส้นทางการแพร่คลื่นฟ้า**

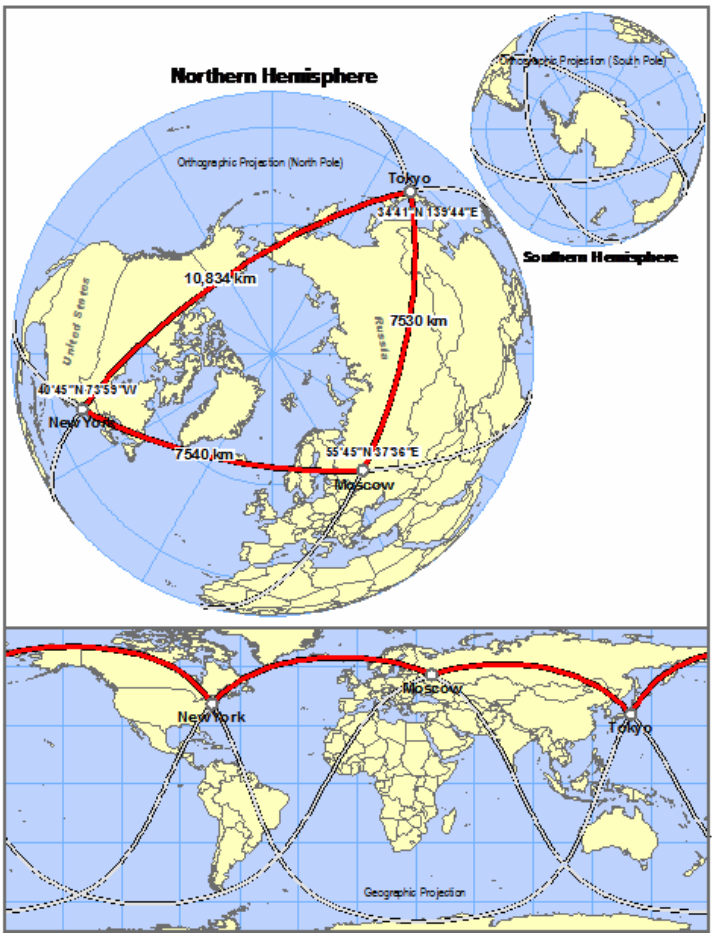
เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อาจมีหลายเส้นทางขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศขณะนั้นว่าจะสามารถรองรับความถี่นั้นได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ ความถี่ที่เหมาะสมจะสามารถหักเหกลับมายังพื้นโลกที่สายอากาศรับได้ ระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังจุดแรกที่คลื่นฟ้าสามารถหักเหมายังพื้นโลกได้ เรียกว่า ระยะกระโดด (Skip Distance) ส่วนย่านกระโดด (Skip Zone) ได้แก่ ย่านที่ไม่สามารถติดต่อได้ด้วยคลื่นวิทยุทั้งคลื่นดินและคลื่นฟ้า ดังแสดงในรูปภาพที่ ๒.๔.๒๕ ดังนั้น เมื่อระยะกระโดดของคลื่นฟ้าน้อยกว่าระยะเดินทางของคลื่นดิน หรือขอบในของย่านกระโดดแล้ว จะพบว่า ณ จุดนั้นจะมีทั้งส่วนของคลื่นฟ้าและคลื่นดินซึ่งมีความแรงของสัญญาณใกล้เคียงกัน แต่จะมีเฟส (Phase) แตกต่างกัน นั่นคือคลื่นจะมีทั้งส่วนที่เกิดการหักล้างหรือเสริมกันของสัญญาณในจุดนี้ ทำให้เกิดมีการจางหาย (Fading) ของสัญญาณในจุดนี้ขึ้น ในทางทฤษฎีแล้วการใช้ความถี่สูงเกินกว่าความถี่วิกฤต (Critical Frequency) จะเริ่มเกิดระยะกระโดด ซึ่งเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้นจะมีระยะกระโดดมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรองรับความถี่ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะนั้นด้วย หรืออีกนัยหนึ่งคือย่านกระโดดจึงขึ้นกับระยะการแพร่กระจายของคลื่นดินและจะไม่ปรากฏย่านกระโดดเมื่อคลื่นดินแพร่ไปได้ไกลเท่ากับระยะกระโดด




รูปที่ ๔.๒๕ ภาพแสดงเส้นทางการแพร่คลื่นฟ้าผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และย่านกระโดด ระยะทางที่คลื่นฟ้าสามารถเดินทางไปได้นั้น ขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือพื้นโลก

ขณะนั้น ทั้งยังขึ้นกับเส้นทางของคลื่นหลายเส้นทางที่หักเหภายในชั้นบรรยากาศที่ความสูงต่าง ๆ กัน ในกรณีนี้ความถี่ใช้งานมีความสำคัญต่อความสามารถในการหักเหของคลื่นหากใช้ความถี่สูงเกินไปจะทำให้คลื่นทะลุออกนอกชั้นบรรยากาศ คลื่นที่หักเหลงมายังพื้นโลกครั้งแรกเรียกว่า Hop ที่หนึ่ง และหากคลื่นสามารถสะท้อนจากพื้นโลกกลับไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อีกครั้งทำให้เกิดการหักเหกลับลงมายังพื้นโลกอีกครั้งนั้น เรียกว่า Hop ที่สอง เป็นเช่นนี้เรื่อยไปทำให้คลื่นฟ้าสามารถเดินทางไปได้ระยะทางไกลมากขึ้น อย่างไรก็ตามพลังงานของคลื่นบางส่วนจะสูญเสียที่พื้นโลก ทำให้การติดต่อสื่อสารด้วยจำนวน Hop มาก เกิดการลดทอนของสัญญาณลงไป

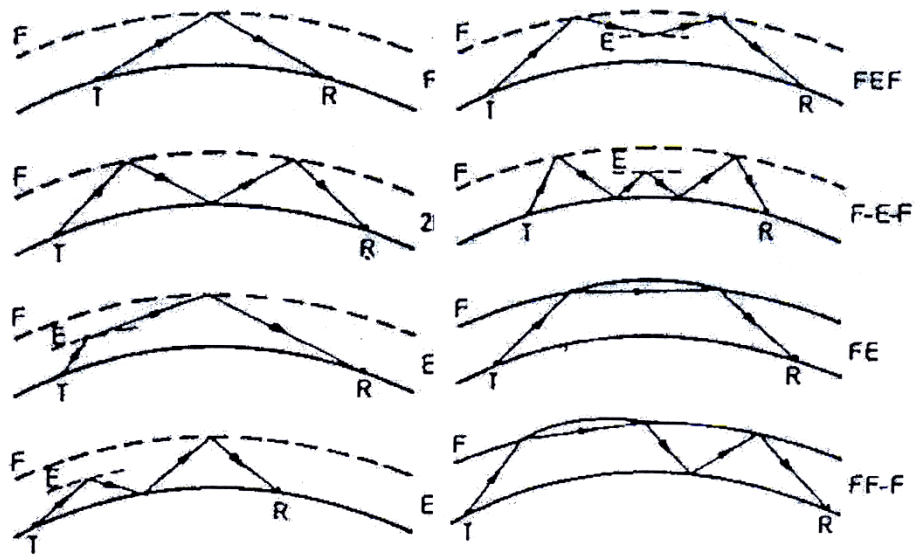
เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าระหว่างคู่รับส่งใด ๆ สามารถเขียนได้ตามเส้นทางวงรอบใหญ่ (Great – Circle path) ตามรูปภาพที่ ๒.๔.๒๖ จากจุดส่งไปยังจุดรับตามระนาบภาคตัดขวางพาดผ่านจุดตกกระทบที่ชั้นบรรยากาศและจุดศูนย์กลางโลก ส่วนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมคลื่นฟ้าในกรณี Hop ที่หนึ่งของคลื่นฟ้าก็คือจุดตรงกลางระหว่างคู่รับส่งนั่นเอง อย่างไรก็ตามกรณีหลาย Hop การตกกระทบที่ชั้นบรรยากาศหลายจุดจะทำให้การสร้างเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นอาจกระทำได้ยากขึ้น เนื่องจากจะต้องคำนึงถึงสภาพชั้นบรรยากาศในแต่ละจุดด้วย เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าระหว่างคู่รับส่งใด ๆ จะมี ๒ เส้นทางเสมอ ได้แก่ เส้นทางหลัก หรือ “Short Path” (เส้นทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดส่งไปยังจุดรับ) และเส้นทางรอง หรือ “Long Path” (เส้นทางยาวที่อ้อมไปอีกทางหนึ่ง)




รูปที่ ๔.๒๖ ภาพแสดงของเส้นทางวงรอบใหญ่ (Great Circle Path)

ดังที่ได้กล่าวถึงชั้นบรรยากาศ E, F1 และ F2 มาแล้ว คลื่นวิทยุสามารถหักเหที่ชั้น E หรือ F ก็ได้ อย่างไรก็ตามคลื่นวิทยุอาจหักเหหรือสะท้อนลงมาจากสองชั้นหรือทั้งสามชั้นในการติดต่อครั้งเดียวกันก็ได้ ส่วนการสื่อสารด้วยคลื่นฟ้าระยะไกลสามารถกระทำได้โดยใช้คลื่น 1 Hop, 2 Hop หรือ 3 Hop ทั้งนี้ขึ้นกับระยะการติดต่อและสภาพชั้นบรรยากาศขณะนั้น รูปภาพที่ ๒.๔.๒๗ แสดงภาพเส้นทางการเดินทางของคลื่นที่เป็นไปได้ การติดต่อแต่ละครั้งเกิดขึ้นอย่างน้อย ๒ เส้นทาง จะทำให้เกิดปัญหาจากการแพร่กระจายคลื่นหลายทาง หรือ “Multipath Effect”

สัญญาณที่รับได้จะกระจายออกไป (dispersion) การเกิดของ Multipath Effect อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ ดังต่อไปนี้ควบคู่กันไป




รูปที่ ๔.๒๗ การสื่อสารด้วยคลื่นฟ้าระยะไกล

- Multihop : โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่สายอากาศรับและส่งที่มี Gain และมุมส่งออก (TOA : Take Off Angle) ต่ำ
- การแพร่กระจายคลื่นที่มีทั้งมุม TOA สูงและต่ำในคราวเดียว
- การแพร่กระจายคลื่นกระทบชั้นบรรยากาศอย่างน้อย ๒ ชั้นขึ้นไป

โดยทั่วไประยะทางการเดินทางของคลื่นฟ้าใน 1 Hop จะเป็น ๒๐๐๐, ๓๔๐๐ และ ๔๐๐๐ กิโลเมตร สำหรับชั้น E, F1 และ F2 ตามลำดับ โดยที่ระยะทางนี้จะเปลี่ยนแปลงด้วยปัจจัยของความสูงชั้นบรรยากาศ และมุม TOA ของสายอากาศที่ต้องมี Gain สูง และมุม TOA ต่ำ

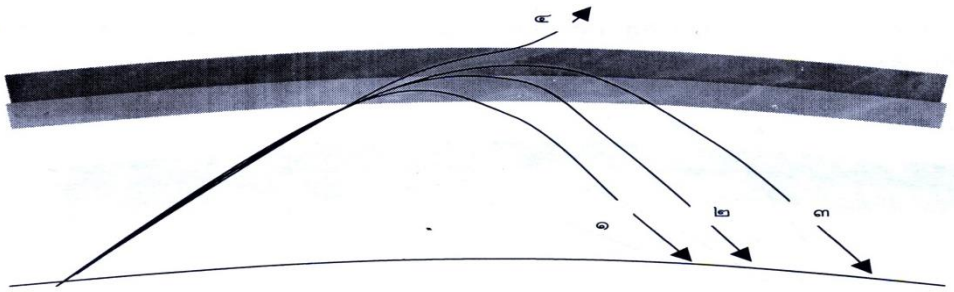
สำหรับการพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้า จะต้องพิจารณาถึงความถี่ใช้งาน, ระบบสายอากาศ, มุมส่งออก (TOA) และระยะทางในการติดต่อสื่อสาร (Circuit Length) เป็นองค์ประกอบสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเหล่านี้จะมีผลทำให้เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

กรณีมุมส่งออกหรือ TOA คงที่

ถ้าความถี่สูงขึ้น คลื่นจะหักเหจากชั้นบรรยากาศ ณ ระดับที่สูงขึ้นทำให้ไปได้ระยะไกลขึ้น ตามเส้นทาง ๑ และ ๒

ณ ความถี่สูงที่สุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศ คลื่นจะไปได้ระยะไกลมากที่สุด ตามเส้นทาง ๓

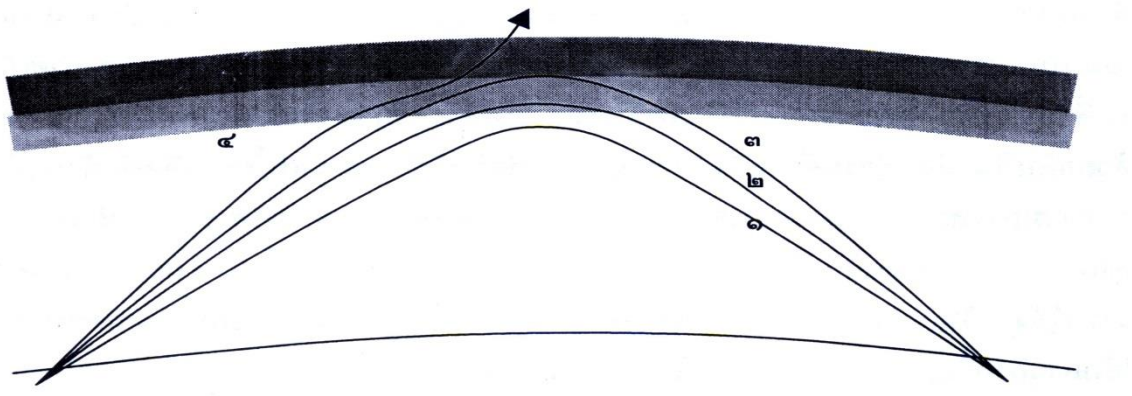
ถ้าความถี่สูงกว่าความถี่สูงสุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศ คลื่นจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศนั้นไป ตามเส้นทาง ๔




รูปที่ ๔.๒๘ การพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้า กรณีมุมส่งออกหรือ TOA คงที่

กรณีระยะทางที่ต้องการติดต่อคงที่

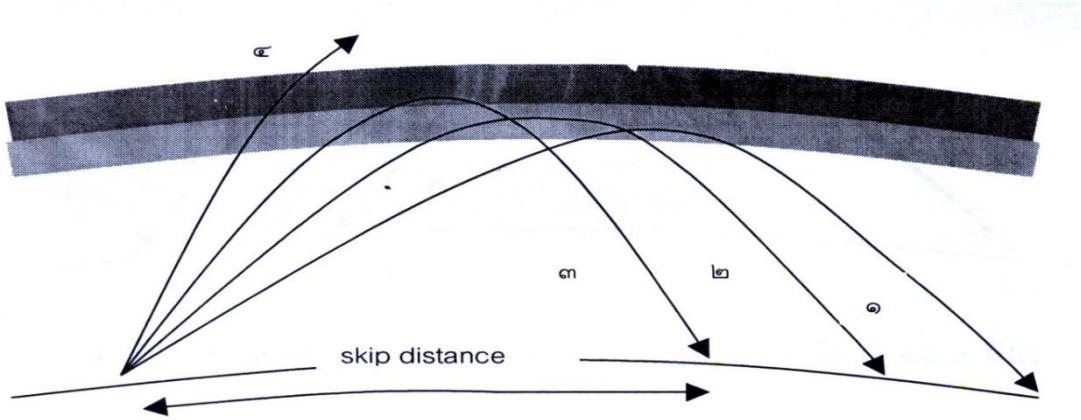
- ถ้าเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น คลื่นจะหักเหจากชั้นบรรยากาศ ณ ระดับที่สูงขึ้น เพื่อที่จะดำรงการติดต่อสื่อสารในระยะเดิมได้จะต้องเพิ่มมุม TOA ของสายอากาศ ตามเส้นทาง ๑ และ ๒
- ณ ความถี่สูงที่สุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศ มุม TOA ของสายอากาศจะสูงที่สุดในการดำรงการติดต่อสื่อสารในระยะเดิม ตามเส้นทาง ๓
- ถ้าความถี่สูงเกินกว่าความถี่สูงที่สุดที่คลื่นสามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศได้ คลื่นจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศนั้นไป ตามเส้นทาง ๔




รูปที่ ๔.๒๙ การพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้า กรณีระยะทางที่ต้องการติดต่อคงที่

กรณีความถี่คงที่

- ถ้ามุม TOA ของสายอากาศต่ำ คลื่นจะไปได้ระยะไกล ตามเส้นทาง ๑
- ถ้ามุม TOA ของสายอากาศสูงขึ้น ระยะทางของคลื่นจะไปได้ลดลง คลื่นจะสะท้อนจากชั้นบรรยากาศ ณ ระดับที่สูงขึ้นตามเส้นทาง ๒ และ ๓
- ณ มุม TOA ของสายอากาศสูงที่สุดที่คลื่นสามารถหักเหกลับจากชั้นบรรยากาศ ระยะดังกล่าวเรียกว่า ระยะกระโดด (Skip Distance) ตามเส้นทาง ๓




รูปที่ ๔.๒๙ การพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้า กรณีความถี่คงที่

สรุป การติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นตรงสามารถกระทำได้ง่ายที่สุด เนื่องจากเป็นการสื่อสารแบบแนวเส้นสายตา แต่หากคลื่นมาจากการสะท้อนกับสิ่งกีดขวาง หรือกระทบที่พื้นโลกจะทำให้คุณภาพของสัญญาณลดต่ำลง ส่วนในการติดต่อสื่อสารระยะไกลด้วยคลื่นฟ้าแต่ละครั้ง จะมีปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงหลายประการ ย่านกระโดด (Skip Zone) สามารถเปลี่ยนไปได้ตามความถี่ใช้งานขึ้นอยู่กับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะนั้น อย่างไรก็ตามแม้จะเลือกความถี่ที่เหมาะสมกับการติดต่อครั้งนั้นแล้วก็ตาม จะต้องเลือกสายอากาศที่มีมุมส่งออกอากาศ (TOA) ที่เหมาะสมด้วย เช่น ในการเลือกติดต่อด้วยสายอากาศแบบ Whip ที่ระยะทาง ๓๐๐ กม. ปรากฏว่าในย่านกระโดดไม่สามารถติดต่อได้ แต่เมื่อเปลี่ยนสายอากาศเป็นแบบไดโพล (Dipole) ซึ่งมีมุมส่งออกอากาศสูงกว่าในทิศทางที่ถูกต้อง ปรากฏว่าสามารถติดต่อได้เป็นต้น ส่วนการติดต่อด้วยคลื่นดินค่อนข้างมีข้อจำกัดในระยะทางที่ติดต่อได้ นอกจากนั้นการติดต่อด้วยคลื่นฟ้า ครั้งหนึ่ง ๆ อาจมีการสะท้อนหรือหักเหจากชั้นบรรยากาศได้หลายครั้งทำให้สายอากาศรับสามารถรับเอาคลื่นในหลายทาง (Multipath) เป็นสาเหตุให้คุณภาพของสัญญาณด้อยลงไป ดังนั้นการบริหารคลื่นความถี่วิทยุให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจตลอดจนความชำนาญ

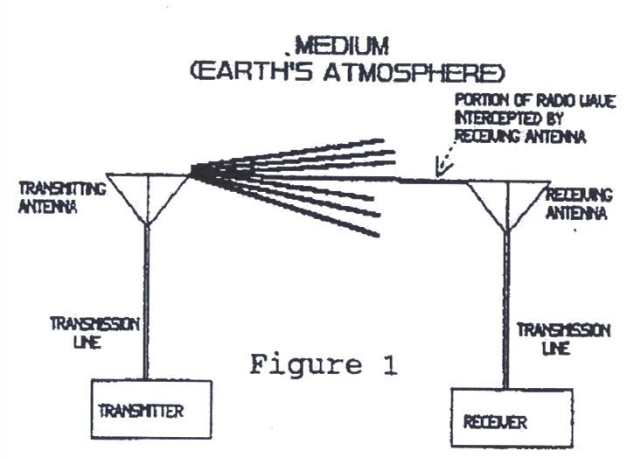
**ผลกระทบเนื่องจากการรบกวนโดยคลื่นฟ้า**

การสื่อสารในย่านความถี่ LF และ MF สายอากาศส่ง สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีทั้งคลื่นดินและคลื่นฟ้า แต่โดยทั่วไปในเวลากลางวันพลังงานส่วนของคลื่นฟ้าจะถูกดูดซับโดยชั้น D ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่เมื่อเวลากลางคืนความหนาแน่นของอิออนในชั้นนี้จะหมดไป ทำให้คลื่นฟ้าไม่ได้ถูกดูดซับออกไปในเวลากลางคืน สายอากาศด้านรับจึงมีโอกาสที่จะรับได้ทั้งส่วนของคลื่นดินและคลื่นฟ้าด้วย อย่างไรก็ตามคลื่นฟ้าจะเกิดระยะกระโดด (Skip Distance) ได้ในระยะหนึ่ง ซึ่งในช่วงระยะทางนี้สายอากาศรับจะรับได้เฉพาะส่วนของคลื่นดินเท่านั้น แต่การแพร่คลื่นในย่านความถี่ LF และ MF จะสามารถแพร่คลื่นดินได้ดีทำให้มีช่วงระยะหนึ่งที่สามารถรับได้ทั้งส่วนของคลื่นดินและคลื่นฟ้าทำให้เกิดการรบกวน การเกิดรบกวนกันเองนี้ทำให้คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ไม่สามารถรับฟังได้เลย จนกว่าสัญญาณคลื่นฟ้าจะแรงกว่าคลื่นดินเมื่ออยู่ในระยะไกลออกไป

การสื่อสารในย่านความถี่ LF ใช้ในการสื่อสารด้วยคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) ในระยะกลาง การใช้คลื่นโพลาไรเซชั่นทางตั้งมีการสูญเสียน้อย สามารถเดินทางไปตามส่วนโค้งของโลกได้ในระยะหลายร้อยไมล์ ส่วนการสื่อสารในย่านความถี่ MF ใช้ในการกระจายเสียงด้วยระบบ AM ได้ในระยะกลางด้วยคลื่นดิน (Ground Wave) และใช้สำหรับการสื่อสารด้วยคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) ระยะไกลเหนือพื้นน้ำทะเลได้ถึง ๑,๐๐๐ ไมล์ และสำหรับการสื่อสารในย่านความถี่ HF ซึ่งในย่านนี้ค่า Dielectric ของพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณสูงเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น จึงใช้สำหรับการสื่อสารในระยะใกล้ ส่วนการสื่อสารในย่านความถี่ VHF และสูงกว่าใช้สำหรับการสื่อสารแบบ Line-of-Sight ซึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้น คลื่นตรงจะยิ่งมีความสำคัญมากขึ้น และถือเป็นย่านที่ไม่ได้ใช้คลื่นดินในการสื่อสารแต่อย่างใด

**๒. หลักการทำงานระบบวิทยุสื่อสาร**

แบบจำลองของการสื่อสารด้วยวิทยุอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใน รูปภาพที่ ๒.๑ โดยมีองค์ประกอบที่ควรคำนึงถึง ได้แก่ เครื่องส่ง สายรับส่งสัญญาณ สายอากาศส่ง ตัวกลาง (ชั้นบรรยากาศโลก) สายอากาศรับ สายรับส่งสัญญาณ และเครื่องรับ




รูปที่ ๔.๓๐ องค์ประกอบการสื่อสารวิทยุอย่างง่าย

เครื่องส่งวิทยุ เป็นเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF: Radio Frequency) โดยที่เครื่องส่งวิทยุที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน โดยแต่ละชนิดจะทำการมอดูเลชั่นคลื่นต้นแบบแล้วจึงส่งออกอากาศไป เช่น เครื่องส่งประเภทส่งคลื่นต่อเนื่อง (CW : Continuous Wave) เครื่องส่งประเภทส่งคลื่นที่ทำการมอดูเลชั่นคลื่นต้นแบบด้วยการเปลี่ยนขนาด (AM : Amplitude Modulation) และ เครื่องส่งประเภทส่งคลื่นที่ทำการมอดูเลชั่นคลื่นต้นแบบด้วยการเปลี่ยนความถี่ (FM : Frequency Modulation) เป็นต้น

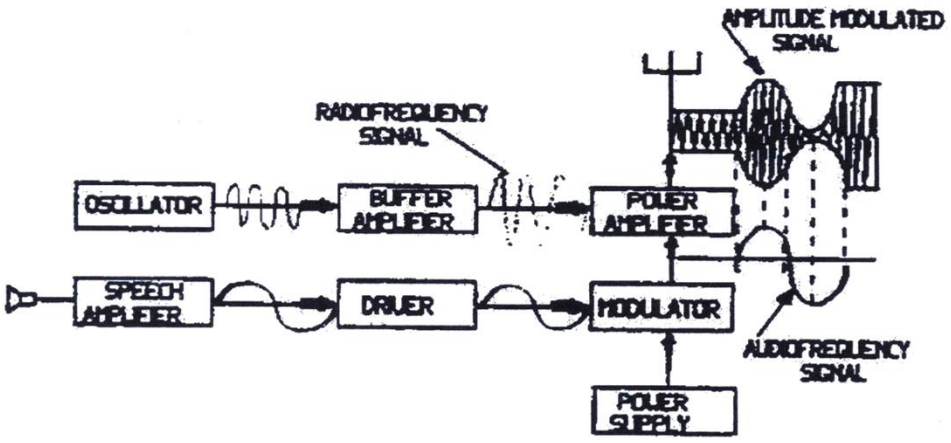
หากตั้งคำถามว่าทำไมต้องทำการมอดูเลชั่น ทำไมไม่ส่งข่าวสารนั้นออกไปโดยตรง เหตุผลคือข่าวสารหรือสัญญาณต้นแบบมักมีความถี่ต่ำ (มีความยาวคลื่นมาก) ซึ่งโดยทั่วไปสายอากาศมักมีขนาดแปรผันตามครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$) เช่น ความถี่เสียงส่วนมากมีความถี่ต่ำกว่า 3 kHz ($\lambda/2 \approx ๕๐$ กม.) ทำให้ต้องใช้สายอากาศที่มีความยาวมาก รวมทั้งต้องการเครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงมากจึงจะสามารถส่งคลื่นเสียงออกไปได้ในระยะทางที่ต้องการ ดังนั้นการแก้ปัญหาความยาวคลื่นมาก ๆ สามารถกระทำได้โดยทำการแปลงข่าวสารต้นแบบที่มีความถี่ต่ำไปสู่ย่านความถี่สูงกว่า จึงสามารถใช้สายอากาศที่มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากกว่า

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของการส่งคลื่น CW, การมอดูเลชั่นแบบ AM และ FMตลอดจนองค์ประกอบของวงจรเครื่องส่งและเครื่องรับอย่างง่าย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานในการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ รวมทั้งจะกล่าวถึงพื้นฐานในการคำนวณขนาดแบนด์วิดท์ของทั้งระบบ AM, FM และจะกล่าวถึงการคำนวณค่า SNR (Signal-to-Noise Ratio) นอกจากนั้นแล้วผู้อ่านยังสามารถทำความเข้าใจถึงความสำคัญของการเขียนสัญลักษณ์บ่งชี้ลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเรียกว่า Emission Designation

**ระบบวิทยุ AM**

**เครื่องส่งแบบ AM**

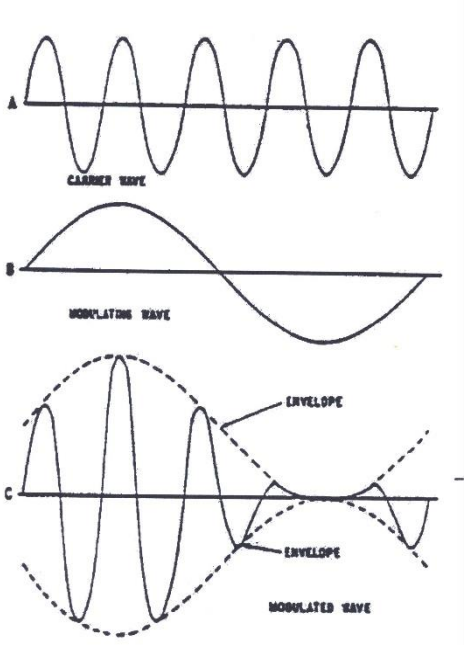
คลื่นพาห์ (Carrier) เป็นสัญญาณต้นแบบที่ผลิตขึ้นโดยวงจรออสซิลเลเตอร์ในเครื่องส่ง คลื่นพาห์จะมีความถี่และขนาดคงที่ ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานคลื่นไปสู่ตัวกลาง ซึ่งข่าวสารที่ต้องการส่งออกไปจะถูกเพิ่มหรือผสมเข้าไปบนคลื่นพาห์นี้ เรียกว่า การผสมคลื่น (Modulation)




รูปที่ ๔.๓๑ ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องส่งแบบ AM

รูปภาพที่ ๒.๔.๓๑ แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องส่งแบบ AM ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คลื่น AM ที่ผ่านการมอดูเลตที่ PA แล้ว จะถูกบังคับให้มีรูปร่างเป็นไปตามขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของกระแส/แรงดันของคลื่นที่จะทำการมอดูเลชั่น (Modulating Signal) หรือเรียกว่าสัญญาณต้นแบบ (Baseband) เมื่อคลื่นต้นแบบที่เป็นข่าวสารถูกผสมเข้าไปในคลื่นพาห์ จะทำให้เกิดรูปแบบคลื่นที่มีความซับซ้อนขึ้น โดยรูปคลื่นจะมีจุดสูงต่ำเปลี่ยนไปตามอัตราการเปลี่ยนของคลื่นต้นแบบ และคลื่นซับซ้อนนี้เองที่เป็นคลื่น AM ที่จะส่งออกอากาศต่อไป นอกจากที่กล่าวมาแล้ว รูปที ๒.๓ ยังแสดงส่วนประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ได้แก่ ไมโครโฟน (Microphone), ภาคขยายสัญญาณเสียง (Amplification stage), ภาคขับ (Driver Stage) และภาคผสมคลื่น (Modulator Stage) โดยที่ไมโครโฟนจะเป็นตัวแปลงสัญญาณเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำงานด้วยแผ่นบาง ๆ ที่เรียกว่า “ไดอะแฟรม” ที่มีการขยับเข้า-ออกตามจังหวะของเสียงพูด ในขณะที่วงจรขยายสัญญาณเสียง (Speech Amplifier) ทำหน้าที่รับสัญญาณที่มาจากไมโครโฟน โดยทั่วไปมีขนาดน้อยกว่า 1 Volt แล้วทำการขยายโดยภาคไดร์เวอร์ ส่วนภาคมอดูเลเตอร์เป็นส่วนที่เชื่อมต่อโดยตรงกับภาคขยาย (PA) ซึ่ง PA จะทำหน้าที่รับสัญญาณมาจากมอดูเลเตอร์และ Buffer Amplifier แล้วทำการเพิ่มสัญญาณทั้งด้านบวกและลบให้ขนาดคลื่นพาห์เป็นไปตามอัตราการเปลี่ยนขนาดของคลื่นต้นแบบ

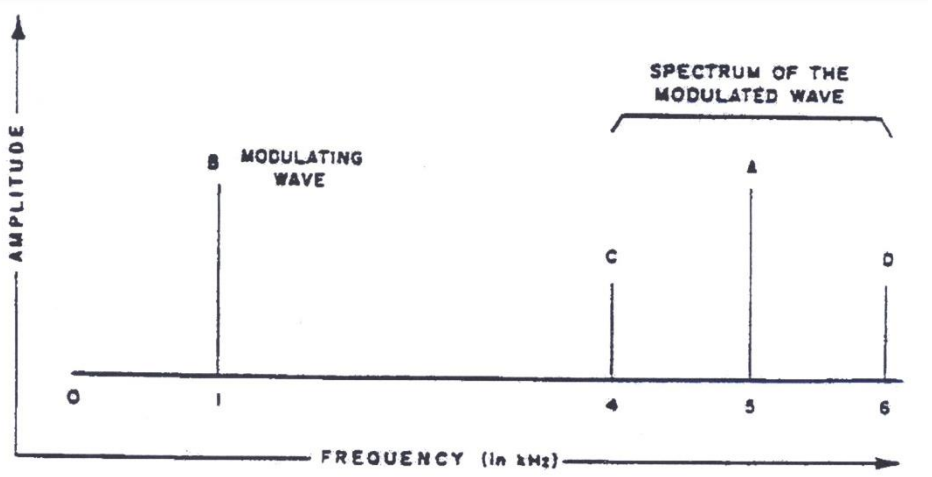
รูปภาพที่ ๔.๓๒ แสดงภาพคลื่นพาห์ (A), คลื่นต้นแบบ (B) ก่อนที่จะทำการมอดูเลต และคลื่น AM ที่ทำการมอดูเลตเรียบร้อยแล้ว (C) และถูกบรรจุอยู่ในกรอบของคลื่นต้นแบบที่เรียกว่า เอนเวโลป (Envelope)




รูปที่ ๔.๓๒ การมอดูเลตคลื่นต้นแบบให้เป็นคลื่น AM

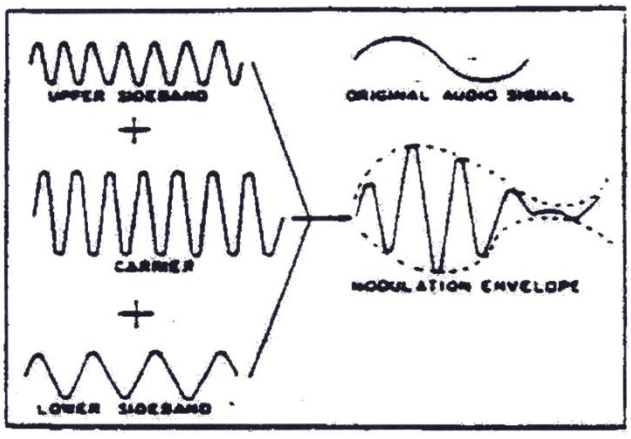
รูปภาพที่ ๒.๔.๓๓ แสดงภาพแถบความถี่และแบนด์วิดท์ของคลื่น AM โดยในตัวอย่างใช้คลื่นต้นแบบเสียงความถี่เดียว มีความถี่ $f_0$ (B) แสดงภาพด้วยเส้นความถี่ (Line Spectrum) ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการมอดูเลชั่นแล้วคลื่น AM ที่ได้จะมีเส้นความถี่ ๓ เส้นความถี่ (A,C,D) โดยเส้นความถี่ A เป็นเส้นความถี่ของคลื่นพาห์ ส่วนเส้นความถี่ D เรียกว่า ความถี่แถบด้านบน (Upper Sideband : USB) มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นพาห์ ($f_c$) บวกกับความถี่

เสียง ($f_{USB}= f_c + f_0$) สุดท้ายคือ เส้นความถี่ C เรียกว่า ความถี่แถบด้านล่าง (Lower Sideband : LSB) มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นพาห์ ลบด้วยความถี่เสียง ($f_{LSB}= f_c - f_0$) ตัวอย่างของเส้นแถบสเปกตรัมของคลื่น AM ที่แสดงในรูปภาพที่ ๒.๕ ความถี่พาห์ (A) คือ ๕ kHz และสัญญาณความถี่ถูกมอดูเลต (B) คือ 1 kHZ ดังนั้น ความถี่แถบด้านล่าง (C) คือ 5 kHz – 1 kHz = 4 kHz และความถี่แถบด้านบน (D) คือ 5 kHz + 1 kHz = 6 kHz



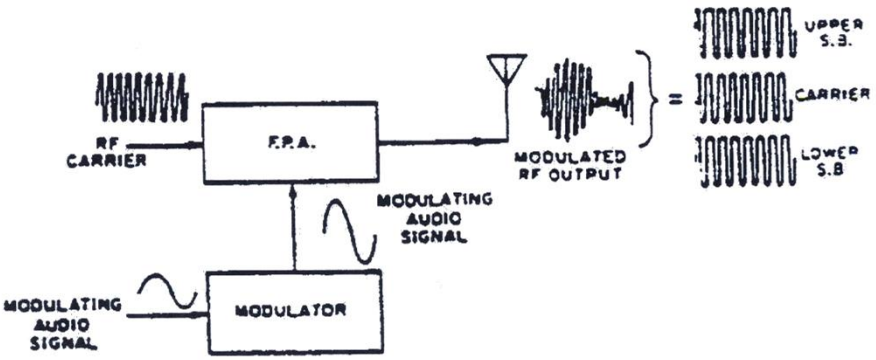

รูปที่ ๔.๓๓ แถบความถี่และแบนด์วิดท์ของคลื่น AM

ในทางปฏิบัติคลื่นต้นแบบประกอบไปด้วยหลาย ๆ ความถี่ ที่กระจุกตัวประกอบกันเป็นแถบพลังงานที่เรียกว่าสเปคตรัม (Spectrum) เมื่อถูกมอดูเลตแล้ว พลังงานของคลื่นต้นแบบจะถูกแบ่งออกเป็นแบนด์ทางข้างสองแบนด์เท่า ๆ กัน แต่รูปร่างของสเปคตรัมยังเหมือนเดิมเช่นเดียวกับ line spectrum ตามตัวอย่างในรูปภาพที่ ๒.๔.๓๔ พลังงานของคลื่นต้นแบบจะเพิ่มเข้าไปในพลังงานของคลื่นพาห์ จึงเป็นการเพิ่มพลังงานออกอากาศของคลื่น AM ช่วงของความถี่ที่มีขนาดครอบคลุมสเปกตรัมของคลื่นพาห์รวมกับแบนด์ด้านข้างทั้งสองแบนด์ รวมเรียกว่า แบนด์วิดท์ (Bandwidth) โดยที่แบนด์ด้านข้างทั้งสองจะบรรจุข้อมูลเหมือนกันทุกประการ ซึ่งหากคลื่นต้นแบบและคลื่นพาห์มีขนาดคงที่แล้ว แบนด์ด้านข้างซึ่งเกิดจากผลรวมและผลต่างของความถี่ $f_c$ และ $f_o$ จะมีขนาดคงที่เช่นกัน




รูปที่ ๔.๓๔ ภาพแสดงการมอดูเลชั่นแบบ AM ซึ่งยังคงรูปร่างของ Envelope เดิม

ในทางกลับกันหากคลื่นต้นแบบมีขนาดและความถี่เปลี่ยนไป จะส่งผลให้ขนาดและความถี่ของแต่ละแบนด์ด้านข้างของคลื่น AM เปลี่ยนไปในลักษณะที่สัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น ในการส่งสัญญาณเสียง ความถี่และขนาดของคลื่นต้นแบบเปลี่ยนไปตามการพูดของพนักงานวิทยุ ผลลัพธ์ของคลื่น AM จึงมีการเปลี่ยนแปลงในแบนด์ด้านข้างอย่างต่อเนื่องในความถี่แถบข้าง รูปภาพที่ ๒.๔.๓๕ แสดงเอาต์พุตของเครื่องส่งระบบ AM ที่มอดูเลตกับสัญญาณเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นลง เมื่อมีการบวกลบขนาดของคลื่นเสียงกับคลื่นพาห์ ทำให้ envelope ของคลื่น AM จึงเปลี่ยนไปตามขนาดของคลื่นเสียงนั่นเอง

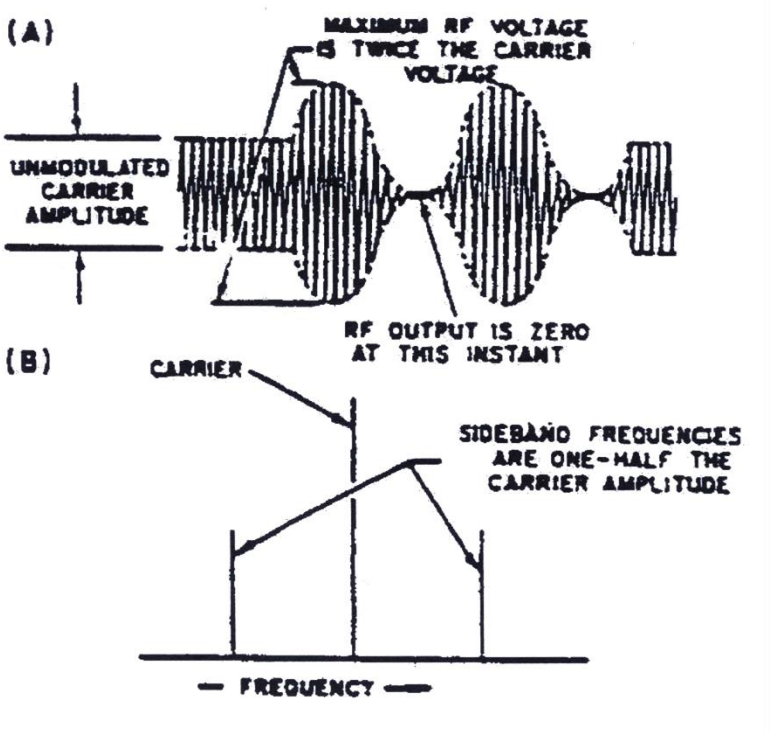



รูปที่ ๔.๓๕ ภาพแสดงเอาต์พุตของเครื่องส่งระบบ AM ที่มอดูเลตกับสัญญาณเสียง
ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นลง

**เปอร์เซ็นต์ของการมอดูเลชั่น (Percent of Modulation)**

อัตราการมอดูเลชั่นของคลื่น AM จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเป็นเปอร์เซ็นต์ของการมอดูเลชั่น โดยเปอร์เซ็นต์การมอดูเลชั่นขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณต้นแบบ เราจึงสามารถควบคุมค่าสูงสุดในการมอดูเลชั่นได้ ในรูปภาพที่ ๒.๗ แสดงถึงภาวการณ์มอดูเลต ๑๐๐% ซึ่งเมื่อดูขนาดของเอนเวโลปจะเห็นว่าจุดต่ำสุดของพลังงานออกอากาศ (RF Output) จะเท่ากับศูนย์ (ดูรูป A) และเมื่อดูสเปกตรัมของคลื่น AM ในรูป B จะพบว่าประกอบด้วยเส้นความถี่ (Line Spectrum) ของคลื่นพาห์และแบนด์ด้านข้างทั้ง USB และ LSB ซึ่งถูกแบ่งพลังงานเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน โดยแต่ละข้างมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของขนาดของคลื่นพาห์ (เฉพาะที่เปอร์เซ็นต์การมอดูเลต ๑๐๐%)

การทำการมอดูเลชั่นที่ ๑๐๐% จะสามารถส่งพลังงานออกอากาศได้มากที่สุดไปในแบนด์ด้านข้างแต่ละแบนด์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเมื่อส่งข่าวโดย Voice จะพบว่าหากปรับแต่งให้ดีแล้วการมอดูเลชั่นที่ ๑๐๐% จะเกิดเฉพาะเมื่อเสียงของพนักงานเปล่งออกมาดังที่สุดเท่านั้น (โดยเฉพาะกรณีที่คลื่นเสียงแกว่งลงเร็วและแรงที่สุด) แต่การเปล่งเสียงปกติการมอดูเลชั่นจะทำได้ในอัตราที่น้อยกว่า ๑๐๐% เสมอ




รูปที่ ๔.๓๖ การมอดูเลชั่น

ประสิทธิภาพของเครื่องส่งระบบ AM แบบ Double Sideband (DSB) ขึ้นกับพลังงานออกอากาศใน LSB และ USB ซึ่งตามปกติแล้วจะคิดตามพลังงานของคลื่นพาห์ที่ส่งไปถึงสายอากาศเป็นหลัก (พลังงานของคลื่นพาห์เมื่อยังไม่กดคีย์ หรือ Unmodulated Carrier Power) กล่าวคือ การมอดูเลชั่นที่ ๑๐๐% จะมีพลังงานออกอากาศของแบนด์ด้านข้างรวมกันเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานคลื่นพาห์ แต่หากลดเปอร์เซ็นต์ของการมอดูเลชั่นเหลือเพียงครึ่งหนึ่งจากข้างต้น พลังงานของแบนด์ด้านข้างจะลดลงเหลือหนึ่งในสี่ของการมอดูเลตที่ ๑๐๐% เท่านั้น

**เครื่องรับวิทยุแบบ AM**

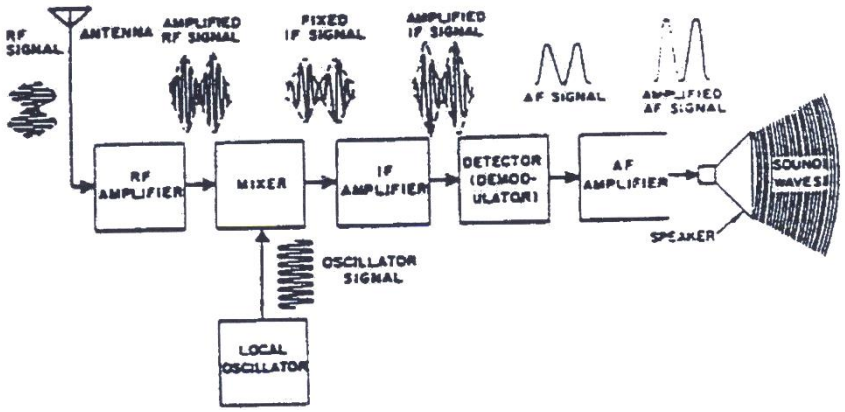
เครื่องรับวิทยุ ทำหน้าที่ดักรับคลื่นสัญญาณวิทยุจากสายอากาศ (Reception) โดยใช้สายอากาศทำหน้าที่แปลงพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้จากในตัวกลาง (อากาศ) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารนั้น ๆ และเลือกรับเฉพาะความถี่ที่ต้องการ (Selection) จากนั้นจึงทำการแยกสัญญาณ (Detection) โดยแยกความถี่เสียงออกจากคลื่นพาห์ แล้วขยายสัญญาณเสียงให้ได้ระดับที่ต้องการ (Audio Frequency Amplification) และสร้างสัญญาณเสียงขึ้นใหม่อีกครั้ง (Reproduction) คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องรับที่ดีมี ๒ ประการคือ

- ความไว (Sensitivity) ได้แก่ คุณสมบัติของเครื่องรับที่สามารถสร้างสัญญาณข่าวสารจากเครื่องส่งกลับมาใหม่ได้ แม้ในสภาวะสัญญาณที่รับได้อ่อนมาก
- ความสามารถในการเลือกรับสัญญาณที่ต้องการ (Selectivity) ได้แก่ คุณสมบัติของเครื่องรับที่สามารถรับเอาเฉพาะสัญญาณในความถี่ที่ต้องการได้ แม้กระทั่งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการรบกวนจากความถี่อื่นได้

**เครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรดายน์ (Superheterodyne Receiver)**

“เฮเทอโรดายน์” มีความหมายว่า หลักการหรือกรรมวิธีของการรวมกันของความถี่สองความถี่หรือมากกว่า ทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมา ด้วยหลักการนี้เครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอโรดายน์จึงจะทำการเปลี่ยนสัญญาณความถี่ทั้งหมดที่รับเข้ามาให้เป็นสัญญาณที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ความถี่กลาง หรือ IF (Intermediate Frequency) การใช้ความถี่ IF มีข้อดีอย่างหนึ่ง คือ วงจร IF สามารถเลือกใช้ด้วยแบบที่เป็นมาตรฐาน มีการเลือกรูปแบบที่มีอัตราการขยายสูงและแถบความกว้างที่เหมาะสมสำหรับระบบวิทยุแบบต่าง ๆ

รูปภาพที่ ๒.๔.๓๗ แสดงภาพการทำงานของเครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอร์โรดายน์ เมื่อสายอากาศรับคลื่นพลังงาน RF แล้ว จะส่งผ่านสัญญาณเข้ามายังวงจรขยายสัญญาณภาค RF สัญญาณ RF ที่ถูกขยายขนาด จะเข้าไปผสมกับสัญญาณ RF ที่ผลิตขึ้นจาก local oscillator ซึ่งมีขนาดคงที่ การผสมคลื่นในภาคมิกเซอร์ (Mixer Stage) จะได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณความถี่กลาง (IF) จากนั้นสัญญาณจะถูกขยายจากภาคขยายสัญญาณ IF อีกหลายครั้ง แล้วจึงถูกป้อน (feed) เข้าสู่ภาคดีเทคเตอร์ (Detector) เพื่อแยกสัญญาณเสียงต้นแบบ ออกจากสัญญาณ IF จากนั้นจึงจะส่งต่อไปยังภาคขยายสัญญาณความถี่เสียง (Audio Frequency : AF) ก่อนออกสู่ลำโพงต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

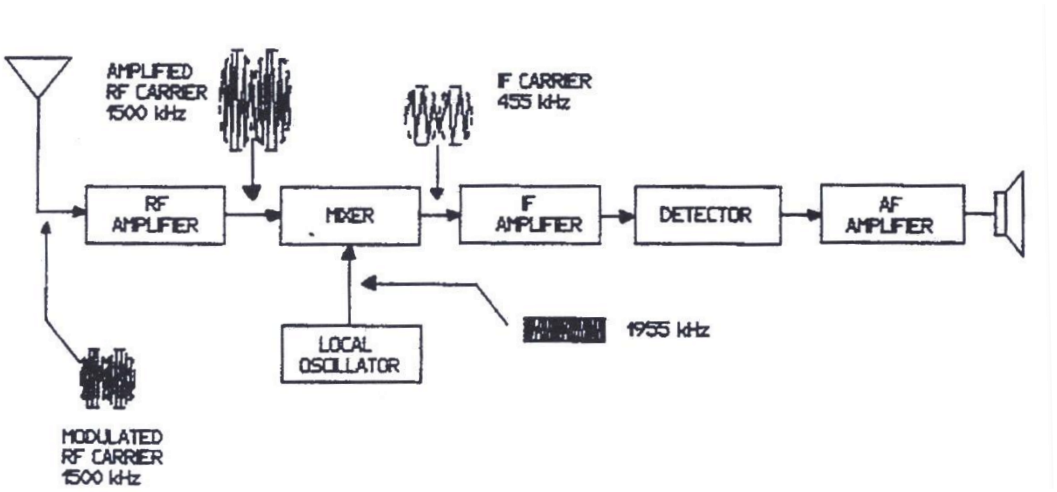



รูปที่ ๔.๓๗ เครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอร์โรดายน์

- สายอากาศ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากสายอากาศส่งผ่านตัวกลางเข้าสู่สายอากาศรับ และเหนี่ยวนำทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในสายอากาศรับ สัญญาณที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้านี้ จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรเลือกความถี่จากสายอากาศ (Frequency Selection Circuit) ที่อยู่ทางเข้าของเครื่องรับ ซึ่งทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณเฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้นเพื่อส่งต่อไปยังภาคขยายสัญญาณ RF ต่อไป
- ภาคขยายสัญญาณ RF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรเลือกความถี่ นอกจากขยายสัญญาณ RF แล้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวแยกวงจร Local Oscillator ออกจากระบบกราวด์ (Ground System) ของสายอากาศอีกด้วย มิเช่นนั้นแล้วหากสายอากาศต่อตรงกับภาคมิกเซอร์วงจร Local Oscillator อาจสูญเสียพลังงานบางส่วนออกอากาศไปได้ นอกจากนั้นแล้วภาคขยาย RF ยังทำหน้าที่ปรับระดับ SNR ของเครื่องรับให้ดีขึ้น ดังนั้นภาคขยาย RF ที่ดีต้องสามารถรับเอาสัญญาณที่ต้องการได้แรงกว่าสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งเป็นค่าประจำของเครื่องรับแม้จะเป็นสัญญาณที่อ่อนมากก็ตาม (สัญญาณรบกวนค่าประจำของเครื่องรับเป็นผลจากการทำงานของหลาย ๆ วงจรภายในแต่ละภาคของเครื่องรับ) ทั้งนี้ภาคมิกเซอร์เป็นภาคที่ผลิตสัญญาณ

รบกวนมากที่สุดของเครื่องรับ ดังนั้นภาคขยาย RF จะต้องขยายสัญญาณให้มีขนาดเพียงพอสำหรับภาคมิกเซอร์ หากพิจารณาถึงคุณสมบัติพื้นฐานของภาครับ คือ Selectivity และ Sensitivity ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ภาคขยาย RF นี้จึงทำหน้าที่แสดงคุณสมบัติ Selectivity ในการเลือกรับเฉพาะความถี่ที่ต้องการ และกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป รวมทั้งคุณสมบัติ Sensitivity ในการขยายสัญญาณ RF ขึ้นมาเพื่อส่งต่อให้ภาคมิกเซอร์ได้ ดังนั้นค่าความไว (Sensitivity) ของเครื่องวิทยุจึงสามารถปรับปรุงได้โดยเพิ่มอัตราการขยายของภาคขยาย RF หรือ การเพิ่มจำนวนภาค (Stage) ของการขยายในภาคขยาย RF นี้เอง

- ภาคมิกเซอร์ (Mixer Stage) มีหน้าที่แปลงความถี่โดยใช้ขบวนการเฮเทอโรดายน์ โดยนำสัญญาณ RF ที่มาจากภาคขยาย RF และสัญญาณที่ผลิตขึ้นจาก Local Oscillator มาผสมกันทำให้ได้คลื่นความถี่เกิดขึ้นมาใหม่หลายความถี่ เช่น ความถี่จาก RF Amplifier, ความถี่จากชุด Local Oscillator, ความถี่ที่เป็นผลบวกและผลลบของความถี่ทั้งสอง รวมทั้งความถี่ฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ ความถี่ที่เกิดจากผลลบและผลบวกนี้จะถูกเลือกไปใช้งานเป็นความถี่ IF แต่โดยส่วนมากแล้วจะนำเอาค่าความถี่ที่เป็นผลลบไปใช้งานเป็นความถี่กลาง (IF) ของเครื่องรับนั่นเอง ส่วนผลบวกไม่นิยมนำไปใช้งาน




รูปที่ ๔.๓๘ หลักการทำงานเครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอร์โรดายน์

ในเครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรดายน์ ส่วนมากความถี่ IF จะมีค่า 455 kHz สัญญาณ IF จะทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ที่มีความถี่ 455 kHz นั่นเอง ในตัวอย่างรูปภาพที่ ๒.๙ แสดงการทำงานของภาคเครื่องรับที่รับความถี่ (คลื่นพาห์) 1,500 kHz ในส่วนของภาค Local Oscillator จะผลิตสัญญาณความถี่ 1,955 kHz ส่งให้ภาคมิกเซอร์เพื่อผสมกับสัญญาณ 1,500 kHz ทำให้ได้ความถี่ผลลบเท่ากับ 1,955 – 1,500 = 455 kHz เป็นความถี่กลางมาใช้งาน

- วงจรขยายความถี่ IF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ IF เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ Selectivity ของเครื่องรับ ส่วนความถี่อื่นใดนอกเหนือจากความถี่ IF จะไม่ถูกขยาย จากนั้นสัญญาณจึงถูกป้อนเข้าสู่ภาคดีเทคเตอร์ต่อไป

- วงจรดีเทคเตอร์ (Detector) คือ กรรมวิธีของการแยกรับเอาสัญญาณต้นแบบที่เป็นข่าวสาร (เสียง) โดยทำการดักจับจากเอนเวลอปของคลื่น AM ที่ถูกมอดูเลตด้วยความถี่ IF เมื่อได้สัญญาณต้นแบบที่

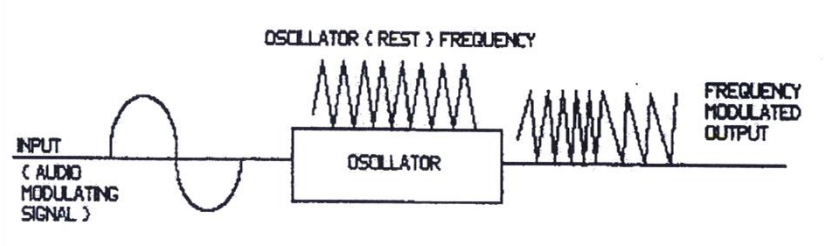
มีความถี่เสียง (AF) ก็จะส่งต่อให้กับภาคขยาย AF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ AF ที่ถูกป้อนมาจากภาคดีเทคเตอร์ แล้วจึงส่งต่อเข้าสู่ลำโพงต่อไป

**ระบบวิทยุแบบ FM**

**ภาคเครื่องส่ง FM**

ข่าวสารที่ส่งไปในรูปแบบของการไปเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของข่าวสารที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ เราเรียกรูปแบบการผสมคลื่นแบบนี้ว่า “Frequency Modulation : FM” หรืออาจอธิบายได้ว่าคลื่นที่ถูกทำการมอดูเลชั่นจะเปลี่ยนความถี่ไปตามข่าวสารที่ส่ง ขนาดของคลื่น FM ขณะออกอากาศจะมีขนาดคงที่ตลอดเวลา

การมอดูเลชั่นด้วยความถี่อย่างง่ายทำได้โดยนำไมโครโฟนต่อเข้ากับวงจรออสซิลเลเตอร์ของเครื่องส่ง ดังรูปภาพที่ ๒.๔.๓๙ ซึ่งแสดงการที่สัญญาณเสียงต้นแบบถูกป้อนผ่านเข้ายังวงจรออสซิลเลเตอร์ จะทำให้คลื่นความถี่ที่ผลิตจากวงจรออสซิลเลเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเสียงต้นแบบ




รูปที่ ๔.๓๙ การมอดูเลชั่น

**แบนด์ด้านข้างของคลื่น FM**

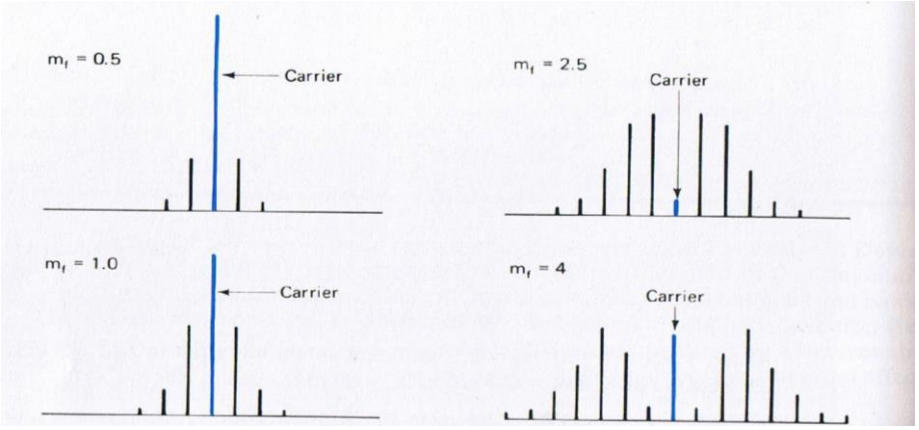
ในการมอดูเลชั่นด้วยความถี่ จะทำให้เกิดคลื่น FM ที่มีการสร้างความถี่ใหม่ด้านข้างทั้งด้านที่มีความถี่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่คลื่นพาห์ ในลักษณะเช่นเดียวกับคลื่นแบบ AM ที่มีแบนด์ด้านข้างจำนวน ๒ ข้าง ซึ่งมีความแตกต่างกัน คือจำนวนของแบนด์ด้านข้างที่เกิดขึ้นในระบบ AM ในแต่ละความถี่ที่จะทำการมอดูเลต จะปรากฏความถี่ด้านข้างเกิดขึ้นเป็นคู่ (USB และ LSB) ซึ่งก็คือผลรวมและผลต่างของความถี่ของเสียงต้นแบบกับความถี่คลื่นพาห์ แต่ในระบบ FM ในแต่ละความถี่ต้นแบบหลังจากสร้างความถี่ด้านข้างขึ้นใหม่ จำนวน ๑ คู่แล้ว คู่ความถี่นี้จะสร้างความถี่ฮาร์โมนิค (Harmonic) ของตนเองขึ้น ซึ่งความถี่ฮาร์โมนิคนี้จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) โดยสร้างขึ้นเป็นจำนวนไม่รู้จบ (Infinite) เพียงแต่จะมีขนาดลดลงเรื่อย ๆ เท่านั้น

ความแตกต่างกันอีกประการหนึ่งระหว่าง AM กับ FM คือ พลังงานของแบนด์ด้านข้างของ AM ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานของคลื่นพาห์ แต่ใน FM พลังงานของแบนด์ด้านข้างจะได้มาจากพลังงานของคลื่นพาห์ นั่นคือคลื่นพาห์ที่ออกอากาศจะมีขนาดพลังงานที่ลดลงมาก เมื่อเทียบกับคลื่นพาห์ก่อนการมอดูเลชั่น โดยพลังงานของแบนด์ด้านข้างจะมากหรือน้อยขึ้นกับความถี่ของคลื่นต้นแบบ และความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Deviation) ของ

คลื่นพาห์ โดยในบางกรณีอาจไม่ปรากฏว่าคลื่นพาห์มีพลังงานออกอากาศเลยซึ่งเป็นไปในทางอุดมคติที่ไม่ต้องการให้มีการสูญเสียพลังงานให้กับคลื่นพาห์ที่ไม่บรรจุข่าวสารใด ๆ นั่นเอง

**แบนด์วิดท์ของคลื่น FM**

แบนด์วิดท์ของคลื่น FM คือช่วงความถี่ระหว่างความถี่บนสุดของแบนด์ด้านบนจนถึงความถี่ล่างสุดของแบนด์ด้านล่าง โดยใช้ขนาดของพลังงานคลื่นเป็นขอบเขต กล่าวคือ วัดช่วงกว้างเฉพาะพลังงานที่มีขนาดเกินกว่า ๑% ของขนาดคลื่นพาห์ที่ออกอากาศไป (Significant Frequency) ดังแสดงในรูปภาพที่ ๒.๑๑ โดยปกติคลื่น FM มีแบนด์วิดท์กว้างมาก เมื่อเทียบกับคลื่น AM ดังนั้นจึงต้องใช้ความถี่คลื่นพาห์สูงกว่าที่ใช้ใน AM ในการส่งข่าวสารแบบเดียวกัน




รูปที่ ๔.๔๐ แบนด์วิดท์ของคลื่น FM

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีการมอดูเลชั่นแบบ FM ในระบบใหญ่ ซึ่งมีผู้ใช้เป็นจำนวนมาก จึงต้องการขนาดแบนด์วิดท์กว้างมากกว่าการมอดูเลชั่นที่มีคลื่นเสียงต้นแบบเพียง ๑ เสียง เรียกระบบเช่นนี้ว่า ระบบ FM แบนด์กว้าง (Wideband FM) อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของขนาดแบนด์วิดท์ที่ใช้ในระบบ FM ก็อาจใช้ระบบ FM แบนด์แคบ (Narrowband FM) ซึ่งขนาดของแบนด์วิดท์ในขนาดใกล้เคียงกับที่ใช้ใน AM ในการส่งข่าวสารเดียวกัน อย่างไรก็ตามระบบแบนด์แคบจะทำให้เกิดข่าวสารหรือเสียงที่รับได้เกิดการผิดเพี้ยนไป (Distortion)

**การคำนวณขนาดของแบนด์วิดท์ AM/FM**

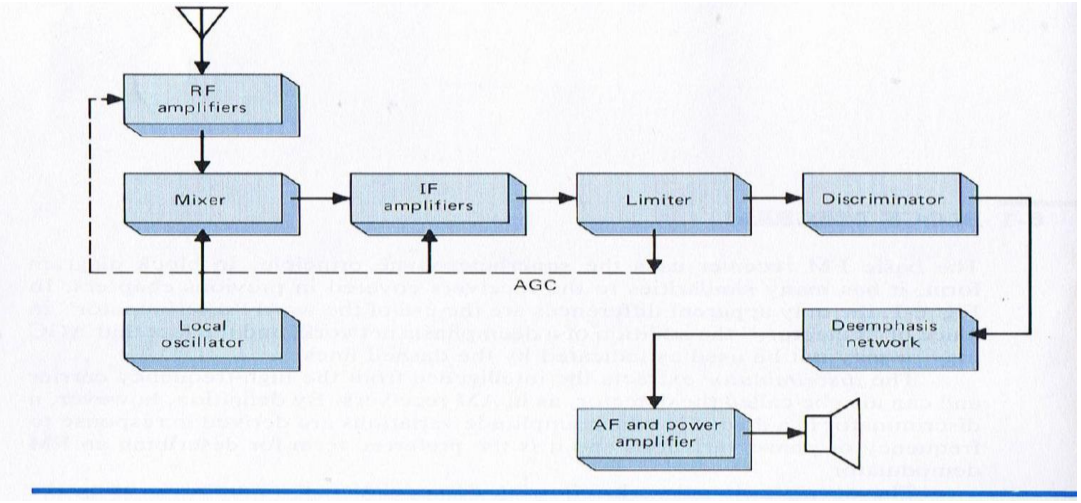
แบนด์วิดท์แสดงจำนวนของพื้นที่ที่สเปกตรัมต้องการในการส่งข่าวสาร และเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวางแผนสำหรับการจัดสรรความถี่ให้กับหน่วยต่าง ๆ ทั้งนี้การทราบแบนด์วิดท์ไม่เพียงแต่ที่จะแสดงความกว้างของสเปกตรัมที่ต้องใช้เท่านั้น แต่ยังช่วยเป็นข้อมูลเพื่อตรวจสอบมิให้มีการจัดสรรความถี่ใกล้เคียงให้กับหน่วยงานอื่น ที่อาจทำให้เกิดการรบกวนได้อีกด้วย ทั้งนี้มีความหมายของแบนด์วิดท์อยู่สามชนิดที่ต้องทำความเข้าใจ คือ

- แบนด์วิดท์ที่จำเป็น (Necessary Bandwidth) ได้แก่ ช่วงกว้างของความถี่ที่เพียงพอต่อการส่งข้อมูลข่าวสารใด ๆ โดยให้ได้คุณภาพหรืออัตราเร็วได้ตามที่กำหนด โดยทั่วไปมีขนาดเท่ากับแบนด์วิดท์ที่ได้รับอนุญาต
- แบนด์วิดท์ที่ได้รับอนุญาต (Authorised Bandwidth) ได้แก่ แถบของความถี่ที่ได้รับจัดสรรให้ใช้งานได้ โดยมักอ้างอิงมาจากขนาดของแบนด์วิดท์ที่จำเป็นนั่นเอง
- แบนด์วิดท์ใช้งาน (Occupied Bandwidth) ได้แก่แถบความถี่ซึ่งบรรจุพลังงานของการแพร่คลื่นไว้เท่ากับ ๙๙.๕% ของพลังงานเฉลี่ยออกอากาศ

**ภาคเครื่องรับวิทยุ FM**

โดยทั่วไปแล้ว เครื่องรับวิทยุแบบ FM จะใช้หลักการทำงานของ Superheterodyne จาก Block Diagram ในรูป ๒.๑๒ จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายกับภาครับอื่น ๆ ที่ผ่านมา สิ่งที่แตกต่างกันก็คือในระบบวิทยุ AM วงจรที่ใช้แยกสัญญาณเสียงออกจากสัญญาณ RF เรียกว่าวงจร Detector แต่งในเครื่องรับวิทยุ FM จะเรียกว่า “Discriminator” ซึ่งจะทำหน้าที่เดียวกับชุด Detector คือแยกสัญญาณข่าวสารออกจากสัญญาณคลื่นพาห์(Carrier) ความถี่สูง การที่เรียกว่าวงจร Discriminator ก็เพราะการทำงานที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางความถี่หรือเฟสนั่นเอง

นอกจากนั้น อาจมีวงจรพิเศษบางวงจร เช่น De-emphasis Network ที่ทำหน้าที่ปรับค่าแอมปลิจูดของสัญญาณข่าวสารความถี่สูงให้กลับสู่แอมปลิจูดที่เหมาะสมสัมพันธ์กับความถี่ที่ต่ำกว่า ก่อนส่งเข้าสู่ภาคขยายสัญญาณเสียง สาเหตุจากวงจร Pre-emphasis ภาคส่งผลิตสัญญาณ Noise ที่มีความแรงสูงมากมากับสัญญาณข่าวสาร




รูปที่ ๔.๔๑ Block Diagram ของภาครับวิทยุแบบ FM

ในส่วนของภาค AF and Power Amplifier จะทำหน้าที่นำสัญญาณเสียงมาขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามต้องการ นอกจากนั้นแล้วยังมีภาค AGC (Automatic Gain Control) ซึ่งเราคงคุ้นเคยในภาคเครื่องรับของวิทยุแบบ AM ทำหน้าที่ร่วมกับวงจร Limiter ควบคุมระดับแอมปลิจูดของสัญญาณ Output ให้คงที่ไม่ให้เกินระดับสูงสุดของการทำงานของวงจร Limiter เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่มาจากยอดแอมปลิจูดของสัญญาณที่มีความแรงหรือต่ำมากๆ ในระบบวิทยุ FM แบบเก่าจะใช้วงจร AFC (Automatic Frequency Control) เพื่อใช้ป้องกันการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง(Drift) ของความถี่ชุด Local Oscillator อันเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องรับแบบ FM แต่ปัจจุบันไม่นิยมใช้วงจรAFC แล้ว เพราะวงจรผลิตความถี่ปัจจุบันสามารถผลิตความถี่ที่มีความคงที่สูง

**ความไวของเครื่องรับ (Receiver Sensitivity)**

ความไวของเครื่องรับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่ง ดังนั้น การทำความเข้าใจในเรื่องความไวของเครื่องรับวิทยุจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับนายทหารที่ทำหน้าที่ควบคุมหรือบริหารความถี่ในทุกระดับ ความไวของเครื่องรับวิทยุได้แก่ การที่เครื่องรับสามารถรับเอาพลังงานที่มีขนาดต่ำมากแต่เพียงพอที่จะได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่าระดับสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับกำเนิดขึ้นเป็นค่าประจำของเครื่องรับได้ อย่างไรก็ตามระดับพลังงานที่มากกว่าจะต้องมีค่าเพียงพอค่าหนึ่งที่จะสามารถทำให้รับข้อมูลข่าวสารนั้นได้ด้วย

**ระดับสัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับ (Noise threshold)**

สัญญาณรบกวน เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำทำให้เกิดการชนกันภายในสารตัวนำ จึงทำให้อุณหภูมิของตัวนำเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลของมันจะถูกกระตุ้นมากขึ้น รวมทั้งเกิดการชนกันทางอิเล็กตรอนเร็วมากขึ้นหากอุณหภูมิเครื่องรับเพิ่มขึ้น จึงทำให้สัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของตัวนำ ซึ่งชนิดของสัญญาณรบกวนนี้เป็นสัญญาณรบกวนที่ถือว่าเป็นตัวกำหนดค่าความไวของเครื่องรับแต่ละเครื่อง เรียกสัญญาณรบกวนนี้ว่า สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (thermal Noise)

**อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio)**

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) คือ อัตราส่วนการเปรียบเทียบของระดับสัญญาณที่รับได้ต่อระดับของ noise threshold หรือ S/N ซึ่งตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณหา SNR มักมีค่าน้อยมาก จึงมักใช้วิธีการคำนวณในหน่วยเดซิเบล

**ระบบวิทยุ SSB (Single Sideband)**

**ภาคเครื่องส่งระบบ Single Sideband (SSB)**

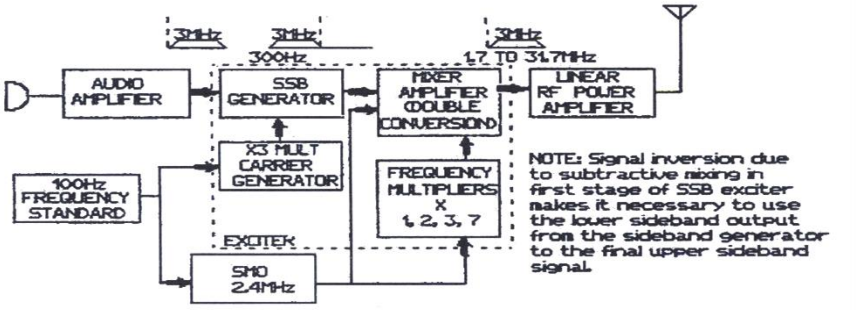
ในหัวข้อที่ ๒.๑.๒ กล่าวถึงเครื่องส่งคลื่น AM แบบ DSB ที่ข่าวสารถูกบรรจุอยู่ในแบนด์ด้านข้างทั้งสอง (USB และ LSB) โดยที่ในแบนด์แต่ละข้างต่างก็บรรจุข่าวสารอันเดียวกัน ขนาดของข่าวสารจะแสดงถึงขนาดของแต่ละแบนด์ รวมทั้งความถี่ของข่าวสารก็คือผลต่างระหว่างคลื่นพาห์และความถี่ในแต่ละแบนด์ (Sideband Frequency) ดังนั้นเราสามารถส่งข่าวสารโดยการใช้แบนด์ด้านข้างอันใดอันหนึ่งเท่านั้นก็เป็นการเพียงพอแล้ว หลักการของ SSB ก็คือ ส่งแบนด์ด้านข้างออกอากาศเพียงด้านเดียว โดยก่อนออกอากาศเครื่องส่งจะใช้ฟิลเตอร์ หรือ วงจรกรอง (Filter) กรองแบนด์อีกด้านที่ไม่ต้องการใช้ออกไป ในขณะที่คลื่นพาห์เองก็ไม่มีความจำเป็นในการส่งข่าวสาร ซึ่งสามารถกรองออกไปด้วย อย่างไรก็ตามในการติดต่อสื่อสารมีความจำเป็นต้องใส่คลื่นพาห์เข้าไปอีกที่เครื่องรับ

เพื่อให้การดีมอดูเลชั่น (Demodulation) ทำงานได้อย่างถูกต้อง ในระบบนี้เรียกว่า Single Sideband Suppresser Carrier (SSBSC) ซึ่งในระบบ SSB มีข้อดีที่เหนือกว่าระบบ AM แบบ DSB ธรรมดา คือ

- ต้องการแบนด์วิดท์ที่มีขนาดแคบลง ในระบบสื่อสารด้วยเสียง ในระบบ AM DSB ต้องการแบนด์วิทด์ถึง 6 kHz ในขณะที่ระบบ SSB เมื่อต้องการส่งข่าวสารเดียวกันต้องการแบนด์วิทด์เพียง 3 kHz เท่านั้น จะเห็นได้ว่าสามารถลดแบนด์วิดท์ในการส่งลงถึง ๕๐% ซึ่งจะทำให้สามารถบริหารการใช้ความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการสื่อสารย่าน HF ที่มีการใช้งานอย่างคับคั่ง
- ใช้กำลังส่งออกอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Conservation Power) เมื่อแบนด์ข้างด้านหนึ่งถูกกำจัดออกไป พลังงานในแบนด์นั้นจะถูกนำไปรวมให้กับแบนด์ที่เหลือ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้มาก การส่งคลื่น AM แบบ SSB แบ่งได้เป็น ๒ แบบ คือ แบบที่ไม่กำจัดคลื่นพาห์ออก (full carrier) กับแบบที่ลดขนาดของคลื่นพาห์ (Suppressed Carrier)
    - แบบที่กำจัดแบนด์ด้านข้างอันหนึ่งออกไป แต่ยังคงเหลือคลื่นพาห์อยู่ ระบบนี้เรียกว่า Single Sideband Full Carrier ทั้งนี้หน้าที่หลักของคลื่นพาห์ คือนำพาข่าวสารไปกับคลื่นพาห์ที่มีความถี่ที่สูงขึ้น ตัวคลื่นพาห์เองไม่ได้บรรจุข่าวสารไว้เลย แต่ยังคงมีความจำเป็นสำหรับเครื่องรับในกระบวนการดีมอดูเลชั่น นอกจากนั้นยังนำไปใช้สำหรับวงจร Automatic Gain Control ในเครื่องรับอีกด้วย
    - แบบที่ลดหรือกำจัดแบนด์ด้านข้างอันหนึ่งออกไป รวมทั้งลดขนาดของพลังงานของคลื่นพาห์ลง ระบบนี้เรียกว่า Single Sideband Reduced/ Suppressed Carrier ทั้งนี้การส่งคลื่นพาห์ไม่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเต็มที่เหมือนกับในระบบ DSB จึงสามารถลดหรือกำจัดพลังงานคลื่นพาห์ได้ และเอาพลังงานที่ลดหรือกำจัดไปเพิ่มให้แบนด์ด้านข้างที่บรรจุข่าวสาร ซึ่งกระบวนการลดหรือกำจัดคลื่นพาห์จะกระทำที่เครื่องส่ง ดังนั้นที่เครื่องรับ SSB จึงต้องสร้างสัญญาณที่มีความถี่เดียวกับคลื่นพาห์ขึ้นก่อน แล้วจึงแทรกเข้าไปในคลื่น AM ที่ถูกลดหรือกำจัดคลื่นพาห์มาจากเครื่องส่ง จากนั้นจึงส่งผ่านวงจรดีมอดูเลชั่น จะได้คลื่นต้นแบบต่อไป
- ลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Minimization of Distortion) ในระบบ AM DSB ที่มีแบนด์ด้านข้างสองอันนั้น คลื่นต่างความถี่กันจะต้องมาถึงเครื่องรับด้วยเฟสที่สัมพันธ์กันเช่นเดียวกับตอนที่ส่งจากเครื่องส่ง ในทางปฏิบัติคลื่นต่างความถี่กันจะใช้เวลาในการเดินทางในตัวกลางไม่เท่ากัน จึงมักประสบปัญหาคลื่นที่มาถึงภาครับมีเฟสต่างออกไปจากเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณที่รับได้ผิดเพี้ยน (Distorted) ดังนั้นคลื่น DSB ที่มีแบนด์วิดท์มากกว่าคลื่น SSB ถึงสองเท่า (มีจำนวนความถี่ในสเปกตรัมมากกว่า) มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้มากกว่าแบบ SSB
- ลดการรบกวน (Reduction of Interference) ระบบ AM DSB คลื่นพาห์จะส่งออกอากาศตลอดเวลาเมื่อกดปุ่มพูด (Push-to-Talk) แต่ในระบบ SSB จะออกอากาศเฉพาะเมื่อทำการมอดูเลตเท่านั้น (เนื่องจากมีการกำจัดคลื่นพาห์) เพราะจะออกอากาศเฉพาะในส่วนของแบนด์ด้านข้าง (USB หรือ LSB อันใดอันหนึ่ง) ดังนั้นในระบบ AM DSB เมื่อมีการกดคีย์ออกอากาศ (ขณะที่ไม่มอดูเลต) จะเกิดสัญญาณคลื่นพาห์เพียงความถี่เดียว แต่ขณะที่มอดูเลตสัญญาณคลื่นพาห์รวมกับสัญญาณข่าวสารเกิดสัญญาณ ๒ สัญญาณ (USB และ LSB) เป็นผลให้เกิดเสียง Squeal และ Howls ขึ้นที่ภาครับจนรบกวนข่ายปกติได้ในที่สุด ในขณะที่ระบบ SSB จะไม่เกิดปัญหานี้ตราบเท่าที่ไม่มีการส่งคลื่นพาห์ออกอากาศในขณะที่กดคีย์แล้วไม่มีเสียงพูด

รูปภาพที่ ๒.๔.๔๒ แสดงแผนภาพการทำงานอย่างง่ายของเครื่องส่งระบบ SSB เมื่อคลื่นเสียงผ่านวงจรขยาย (Audio Amplifier) วงจร SSB Generator จะผลิตสัญญาณ SSB โดยส่งคลื่น AM DSB ผ่านไปยังฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาเฉพาะแบนด์ด้านข้างเพียงด้านเดียว (ด้วยวงจร crystal หรือ Mechanic ก็ได้) โดยมีความถี่ขั้นกลาง หรือ Intermediate Frequency (IF) จากนั้น สัญญาณ SSB จะส่งผ่านไปยังภาคมิกเซอร์ (Mixer) และ วงจรขยาย (Amplifier) เพื่อแปลงไปเป็นความถี่ย่าน RF แต่ในระบบ SSB จะไม่มีคลื่นพาห์นำ (Pilot Carrier) จึงต้องการวงจรผลิตคลื่นวิทยุ RF ที่มีเสถียรภาพอย่างมาก ซึ่งประกอบด้วยวงจรผลิตความถี่มาตรฐาน 100 Hz และ Stabilized Master Oscillator (SMO) เพื่อสร้างเสถียรภาพให้สูงขึ้น

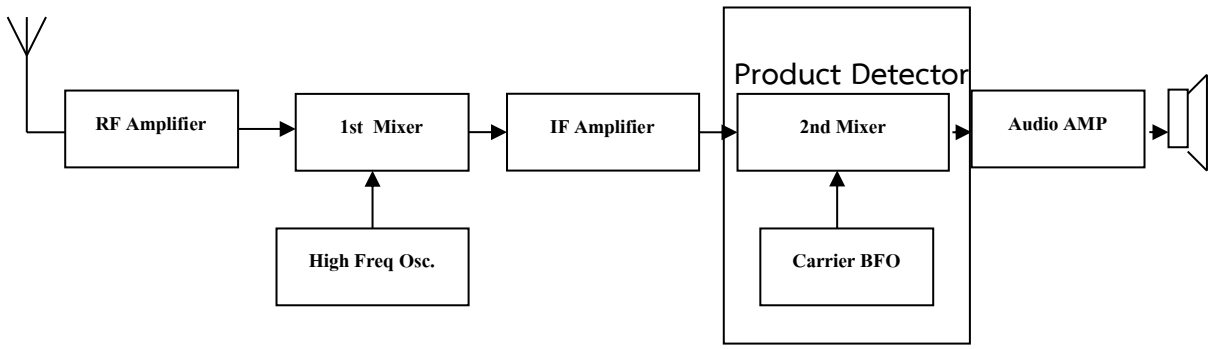
ความถี่มาตรฐานที่สร้างจาก Crystal Oscillator จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นอย่างมาก จึงควรมีการตรวจสอบอุณหภูมิในสถานที่ติดตั้งอย่างสม่ำเสมอ และความถี่มาตรฐานนี้เองจะเป็นตัวกำหนดความมีเสถียรภาพของความถี่ทั้งหมดในเครื่องส่ง ซึ่งการผลิตความถี่ต่าง ๆ ในวงจรย่อยหากไม่ออกแบบให้เหมาะสมแล้วจะทำให้วงจรโดยรวมขาดเสถียรภาพไปทันที วงจรย่อยดังกล่าวมี ๒ วงจร ได้แก่ วงจรผลิตคลื่นพาห์ความถี่ IF และวงจร SMO วงจรผลิตคลื่นพาห์ความถี่ IF ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณ SSB IF และทำการเปลี่ยนให้เป็นความถี่ RF ของสัญญาณ SSB ในทางปฏิบัติ ระบบ SSB จะใช้วงจร SMO ในช่วงความถี่ 2 – 4 MHz จึงจะทำให้วงจรผลิตความถี่มีเสถียรภาพสูง ส่วนความถี่ IF จะใช้ ความถี่ 300 kHz ซึ่งเป็นความถี่ใช้งานเหมาะสมที่สุด จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายก่อนออกอากาศสัญญาณ SSB ความถี่ IF จะถูกผสมกับคลื่นพาห์ (RF) และขยาย จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่ภาคขยาย RF แล้วส่งต่อไปยังสายอากาศ เพื่อแพร่กระจายคลื่นออกอากาศต่อไป




รูปที่ ๔.๔๒ Crystal Oscillator

**ภาคเครื่องรับวิทยุแบบ SSB**

- RF Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ RF ที่รับจากสายอากาศให้สัญญาณมีความแรงขึ้นเพื่อส่งต่อให้กับภาค Mixer ที่อยู่ถัดไป
- High Frequency Oscillator ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่สูง เพื่อส่งไปยังภาค Mixer
- 1st Mixer ทำหน้าที่ผสมสัญญาณ RF กับสัญญาณ High Frequency Oscillator โดยหลักการ Heterodyning ซึ่งจะได้ Output Frequency จำนวนหนึ่งที่เกิดจากการผสมคลื่น และภายในวงจรภาค Mixer นี้ จะมีวงจร Sideband Filter ทำหน้าที่เลือกเอาสัญญาณแบนด์ใดแบนด์หนึ่งที่ต้องการ (LSB or USB) เพื่อส่งผ่านไปยังภาค IF Amplifier ที่อยู่ถัดไป
- IF Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ RF ให้มีขนาดที่เหมาะสม ก่อนส่งไปยัง 2nd Mixer
- Product Detector หรือเรียกว่า Beat Frequency Oscillator (BFO) ถ้าเป็นในระบบ AM จะเป็นวงจร Detector วงจร Product Detector นี้จะทำงานในแบบเดียวกันกับชุด Balance Modulation ในเครื่องส่ง แต่แทนที่จะเอา RF ผสมกับ AF เพื่อให้เกิด DSB แต่เอา IF หรือ RF ความถี่ต่ำมาผสมกับ RF Carrier (BFO) ให้ได้ AF ออกมา ฉะนั้นภาคนี้ จึงมีหน้าที่แยกเอาสัญญาณเสียงหรือข่าวสารออกมาก่อนส่งต่อให้กับภาค Audio Amplifier ต่อไป
- Audio Amplifier ทำหน้าที่ขยายระดับสัญญาณเสียงให้มีความแรงเพิ่มขึ้น แล้วจึงส่งผ่านไปยังลำโพงเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณเสียง



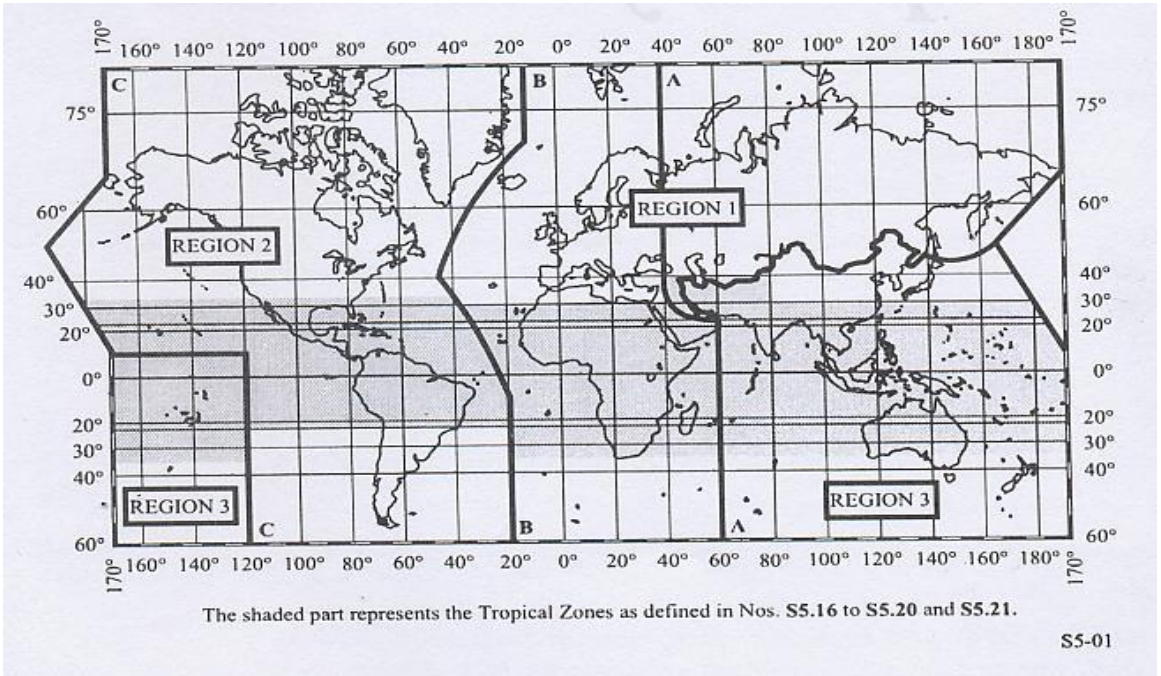

รูปที่ ๔.๔๓ บล็อกไดอะแกรมเครื่องรับ SSB

**๓. ระบบวิทยุสื่อสารภาคพื้น**

สามารถแบ่งประเภทและการใช้งานของระบบวิทยุตามภารกิจสนับสนุนทางด้านยุทธการและธุรการ เพื่อให้เป็นระบบที่มีความเป็นมาตรฐานสะดวกในการควบคุม กำกับดูแล โดยให้ กองโรงงาน กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศเป็นหน่วยงานรับผิดชอบการซ่อมบำรุงระดับโรงงาน (Depot Maintenance) โดยรับผิดชอบการซ่อมบำรุงในสายงานระบบวิทยุ ๔ ประเภท ดังนี้

๑. ระบบวิทยุควบคุมการบิน (Air Traffic Control Radio System)
๒. ระบบวิทยุซิงเกิลไซด์แบนด์ (Single Sideband Radio System)
๓. ระบบวิทยุสื่อสารยุทธวิธี (Tactical Radio System)
๔. ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ (Command and Control Radio System)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเพิ่มมากขึ้น จะขอนำข้อกำหนดในตารางจัดสรรคลื่นความถี่ที่กำหนดโดยสหภาพโทรคมนาคม (ITU : International Telecommunication Union) ได้แบ่งขอบเขตตารางความถี่ของประเทศสมาชิกในโลกออกเป็น ๓ ภูมิภาค (Region)




รูปที่ ๔.๔๔ การแบ่งส่วนของภูมิภาคในการกำหนดตารางคลื่นความถี่ของ ITU

Region 1 ประกอบด้วยประเทศในเขตแนวเส้น B ทางด้านทิศตะวันตก และ เขตแนวเส้น A ตอนบน ไปจนถึงแนวเขต C

Region 2 ประกอบด้วยประเทศในแนวเขตเส้น C ทิศตะวันตก ไปจนสุดแนวเส้นเขต B ทางทิศตะวันออก

Region 3 ประกอบด้วยประเทศในแนวเขต A – C บริเวณตอนล่าง

วัตถุประสงค์ของการกำหนดตารางความถี่ใช้งานออกเป็นภูมิภาคดังกล่าว ก็เพื่อให้บรรดาชาติสมาชิกของ ITU สามารถใช้งานความถี่ได้โดยปราศจากการรบกวนหรือเกิดการรบกวนกันน้อยที่สุด เพราะหากไม่มีการกำหนด

กฎเกณฑ์ในการใช้ความถี่ก็จะเกิดผลเสียต่อผู้ใช้งานตลอดจนการบริหารจัดการคลื่นความถี่ที่แต่ละประเทศใช้งานก็จะขาดประสิทธิภาพ

สำหรับประเทศไทย ถูกจัดอยู่ในภูมิภาคที่ ๓ (Region 3) ดังนั้น การกำหนดระเบียบในการจัดสรรตารางคลื่นความถี่ใช้งานจึงต้องสอดคล้องตามข้อกำหนดของภูมิภาคที่ ๓ ที่ ITU กำหนดให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล อย่างไรก็ดีแต่ละประเทศสมาชิกสามารถกำหนดข้อปฏิบัติหรือเงื่อนไขปลีกย่อยได้

**ระบบวิทยุควบคุมการบิน (Air Traffic Control Radio System)**

หมายถึงอุปกรณ์สื่อสารที่ถูกใช้ในการควบคุมกำกับดูแลกิจการการบิน ให้เป็นไปตามข้อกำหนดการบินของ FAA โดยแบ่งออกตามเขตพื้นที่บริการ ดังนี้

๑. เขตหอบังคับการบิน (Tower Control) หมายถึงเขตควบคุมการบินที่อยู่ในระยะไม่เกิน 15 NM

๒. เขตประชิดสนามบิน (Approach Control) หมายถึงเขตพื้นที่บริการในระยะประชิดสนามบินก่อนเครื่องบินเข้าสู่เขตหอบังคับการบิน ระยะทางทั่วไปอยู่ที่ 35 NM แต่บางสนามบินอาจมีระยะถึง 50 NM เช่น สนามบินดอนเมือง และสนามบินสุวรรณภูมิ เป็นต้น

๓. เขตเส้นทางการบิน (FIR : Flight Information Rule) หมายถึงเขตพื้นที่บริการที่อยู่นอกเหนือไปจากเขตพื้นที่บริการในข้อ ๑ และ ๒ เพื่อควบคุมการบินให้เป็นไปตามเส้นทางที่กำหนด

หน้าที่ของระบบวิทยุควบคุมการบินคือการควบคุมอากาศยานในการเดินอากาศหรือควบคุมการจราจรทางอากาศให้เป็นไปตามกฎการบินที่ FAA กำหนด ทั้งนี้เพื่อให้นักบินสามารถนำเครื่องบินจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้อย่างปลอดภัย หรือการสนับสนุนการบินให้เป็นไปตามภารกิจที่ได้รับมอบหมาย มีย่านความถี่มาตรฐานที่ถูกกำหนดให้ใช้งาน ๒ ย่านความถี่ คือ VHF/AM และ UHF/AM โดยกำหนดย่านความถี่ VHF คือ 118.000 – 137.000 MHz สำหรับพลเรือนใช้งาน (Civilian Band) ส่วนกิจการทางทหารย่านความถี่ที่ถูกกำหนดใช้งานย่าน UHF ความถี่ 225.000–399.975 MHz สำหรับประเทศไทยกำหนดความถี่ยกเว้นไว้ ๒ ย่านความถี่คือ 225-230 MHz ถูกกำหนดให้ใช้ในกิจการกระจายเสียง (Broadcasting) เป็นหลักและ 328.6-335.4 MHz กำหนดให้ใช้งานในกิจการเครื่องช่วยเดินอากาศเป็นหลัก

**คุณสมบัติย่านความถี่วิทยุควบคุมการบิน (VHF/UHF)**

ย่านความถี่ VHF (30-300 MHz) และย่านความถี่ UHF (300-3000 MHz) ต่างก็มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยมีลักษณะสำคัญดังนี้

**๑.** สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนของตัวอุปกรณ์ (Thermal Noise และ Electrical Noise) มากกว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เรียกว่า "Atmospheric Noise"

๒. ไม่มีผลกระทบจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากเป็นย่านความถี่สูง สามารถทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศนี้ไปได้ การเดินทางเป็นเส้นตรง (Directed Wave) จึงมักเรียกการสื่อสารในย่านความถี่นี้ว่า “ การสื่อสารใน

แนวสายตา (Line of Sight : LOS) ” โดยไม่ได้เดินทางโค้งไปตามผิวโลก ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารจึงขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศระหว่างสถานีรับกับสถานีส่ง

๓. มีแบนด์วิดท์กว้าง (Wide Bandwidth) กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับย่านความถี่ HF มาก รวมทั้งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กและสามารถใช้งานสื่อสารข้อมูลได้ดีกว่า

จากเหตุผลดังกล่าวนี้เอง ทำให้ระบบวิทยุควบคุมการบินถูกนำมาใช้ในการติดต่อในแบบจุดต่อจุด (Point to Point) หรือพื้นสู่พื้น (Ground to Ground) หรือแบบพื้นสู่อากาศ (Ground to Air) หรือ อากาศสู่อากาศ (Air to Air) ในการสื่อสารแนวสายตา (Line of Sight)

**แบบของระบบวิทยุควบคุมการบิน (VHF/AM และ UHF/AM)**

วิทยุควบคุมการบินที่กองทัพอากาศมีใช้งานอยู่มีหลายแบบด้วยกัน และด้วยเหตุผลที่ประเทศไทยเป็นประเทศพันธมิตรกับสหรัฐอเมริกา อุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในระบบวิทยุควบคุมการบิน และวิทยุอื่นๆ ทางทหารจึงเป็นผลิตภัณฑ์ของสหรัฐฯเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้งานในหน่วยงานทางทหารของประเทศสหรัฐฯ ทำให้สามารถจัดซื้อเครื่องและอะไหล่เพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงได้จากระบบความช่วยเหลือทางทหาร (FMS)

แม้ว่าวิทยุส่วนใหญ่ที่มีใช้งานใน ทอ. จะเป็นผลิตภัณฑ์ของสหรัฐฯ ก็ตาม แต่ก็มีผลิตภัณฑ์จากประเทศอื่นๆ ที่ ทอ.ได้จัดหามาใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกับการพัฒนาของเทคโนโลยีและสนับสนุนภารกิจของ ทอ.ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเห็นได้จากโครงการระบบป้องกันทางอากาศภาคใต้ (RTADS Phase III) ระบบวิทยุควบคุมการบินจะเป็นเครื่องวิทยุรับ-ส่งแบบ PAE 3060 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศอังกฤษ และในโครงการระบบป้องกันทางอากาศภาคเหนือ (RTADS Phase II) จะเป็นเครื่องรับ-ส่งวิทยุที่เป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศเยอรมนี

ปัจจุบันวิทยุควบคุมการบินที่ใช้งานอยู่ใน ทอ.ส่วนใหญ่ จะเป็นวิทยุประเภท Single Channel โดยใช้งานเป็นเครื่อง Primary และมีวิทยุประเภท Multi Channel ถูกใช้เป็นเครื่อง Backup ในกรณีเครื่อง Primary ขัดข้อง ต่อมาเทคโนโลยีทางวิทยุได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งความต้องการทางด้านยุทธการและการสนับสนุนภารกิจเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการนำเครื่องวิทยุรับ-ส่งประเภท Multi Channel มาใช้งานเป็นเครื่อง Primary และ Backup ดังจะเห็นได้จากโครงการระบบป้องกันทางอากาศของ ทอ. และคาดว่าวิทยุประเภท Single Channel ก็จะถูกทดแทนและหมดไปจากกองทัพอากาศในที่สุด

วิทยุควบคุมการบินที่มีใช้งาน สามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น ๓ แบบ ดังนี้

๑.วิทยุควบคุมการบินแบบ Single-Channel

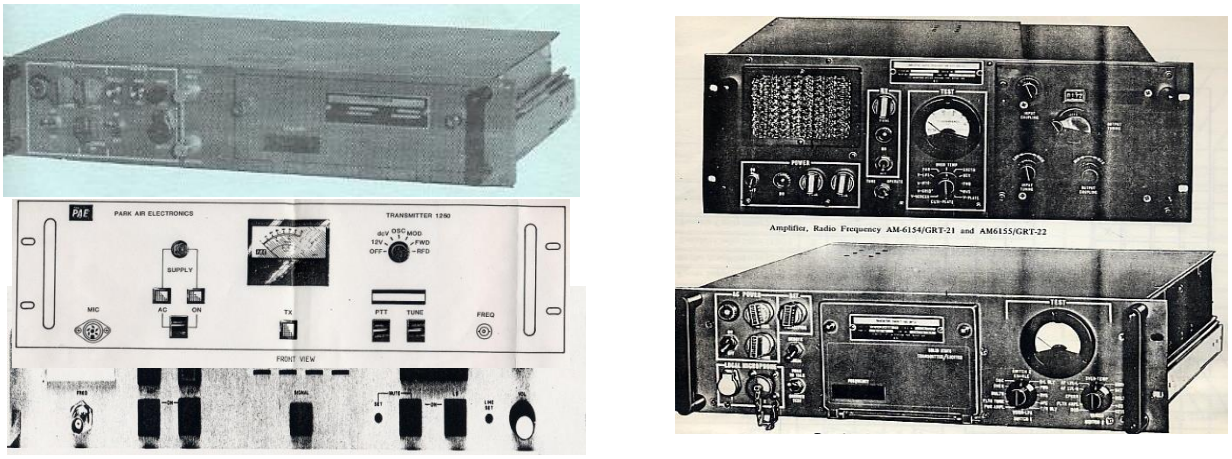
๒. วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi-Channel

๓. วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi-Channel – Multi Band – Multimode

**วิทยุควบคุมการบินแบบ Single Channel**

หมายถึงเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ ที่ผู้ใช้งานต้องทำการปรับแต่งเครื่องทางเทคนิคเสียก่อนที่จะเปลี่ยน Channel ไปใช้ความถี่อื่น ตัวอย่างเช่น ถ้าความถี่ใช้งานของเครื่องส่งวิทยุอยู่ที่ 236.6 MHz หากต้องการเปลี่ยนไปใช้งานที่ความถี่ 243.0 MHz จะต้องทำการปรับแต่งภาคผลิตความถี่เสียก่อนจึงจะติดต่อใช้งานที่ความถี่ใหม่ได้ เครื่องวิทยุแบบนี้จึงไม่สะดวกกับการใช้งานที่ต้องมีการปรับความถี่อยู่บ่อย ๆ อย่างไรก็ดีวิทยุประเภทนี้มีราคาถูกเมื่อเทียบกับวิทยุในแบบอื่นๆ ติดตั้งและซ่อมบำรุงง่าย เนื่องจากวงจรไม่สลับซับซ้อน

วิทยุควบคุมการบินประเภทนี้ที่ทอ.มีใช้งานย่านความถี่ VHF/AM ความถี่อยู่ระหว่าง 116–149.9875 MHz ได้แก่ AN/GRT-21, AN/GRR-23 ยกเว้นวิทยุแบบ PAE 1250, PAE 2100 ย่านความถี่อยู่ระหว่าง 118 – 137 MHz สำหรับ UHF/AM ย่านความถี่อยู่ระหว่าง 225-399.975MHz




รูปที่ ๔.๔๕ แสดงเครื่องรับและเครื่องส่งวิทยุควบคุมการบินแบบ Single Channel ที่ใช้งานใน ทอ.

รูปภาพที่ ๒.๔.๔๕ แสดงเครื่องรับ และเครื่องส่งวิทยุ แบบ Single Channel ที่มีใช้งานอยู่ในกองทัพอากาศ ได้แก่ VHF/AM Single Channel แบบ AN/GRT-21, AN/GRR-23 และ UHF/AM Single Channel แบบ AN/GRT-22, AN/GRR-24

**วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel**

หมายถึงวิทยุรับ-ส่ง ที่ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนความถี่เพื่อใช้งาน Channel อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง เครื่องวิทยุประเภทนี้สามารถใช้งานได้หลาย Channel ถูกออกแบบให้มีภาครับและภาคส่งอยู่ภายในตัวเครื่องเดียวกัน (Transceiver) เพื่อสะดวกในการนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับภารกิจ วิทยุประเภทนี้เมื่อเทียบกับวิทยุแบบ Single Channel พบว่าวงจรภายในมีความสลับซับซ้อน การติดตั้งและซ่อมบำรุงยุ่งยากกว่า

วิทยุควบคุมการบินประเภทนี้ที่ ทอ.ใช้งานอยู่เป็น VHF/AM Multi Channel ได้แก่ AN/GRC-211, UHF/AM Multi Channel แบบ AN/GRC-171 และอยู่ในระหว่างการดำเนินการตามโครงการ RTADS Phase II เป็น VHF/AM Multi Channel แบบ XU4200 และ UHF/AM Multi Channel แบบ XD4200 ของบริษัท Rohde & Schwarz

ประเทศเยอรมนี ตามรูปภาพที่ ๓.๓ เป็นภาพเครื่องรับ-ส่งวิทยุ แบบ AN/GRC-211, AN/GRC-171 และวิทยุที่อยู่ในโครงการปรับปรุง RTADS Phase I บางส่วน และ RTADS Phase II แบบ XU4200, XD4200

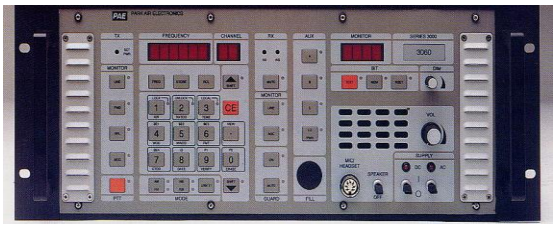
AN/GRC-211 & AN/GRC-171

XU4200 & XD4200

รูปที่ ๔.๔๖ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel

**วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel – Multi Band – Multi Mode**

หมายถึงวิทยุรับ-ส่ง ที่ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนความถี่เพื่อใช้งาน Channelอื่นๆ ได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง เครื่องวิทยุประเภทนี้สามารถใช้งานได้หลาย Channel มี Mode เพื่อใช้ในการสนับสนุนการทำงานได้ทั้งแบบ AM, FM, TADIL-A และ Have Quick สามารถเลือกย่านความถี่ (Band) ได้มากกว่าหนึ่งย่านความถี่ขึ้นไป เช่น ย่านความถี่ VHF และ UHF ถูกออกแบบให้มีเครื่องรับและเครื่องส่งภายตัวเดียวกัน (Transceiver) เพื่อสะดวกในการนำไปใช้งานสนับสนุนภารกิจต่างๆ ทั้งที่เป็น Primary และ Backup วิทยุประเภทนี้จะมีราคาสูงกว่าทั้ง ๒ แบบที่กล่าวมา เนื่องจากวงจรภายในมีความสลับซับซ้อนมากกว่า ทำให้การติดตั้งและซ่อมบำรุงยุ่งยากกว่า ๒ แบบที่กล่าวมา ปัจจุบันวิทยุประเภทนี้ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานหลากหลายภารกิจ (Multi Roles) ได้ด้วย



PAE3060

M3SR

รูปที่ ๔.๒๗ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel-Multi Band-Multi Mode

วิทยุควบคุมการบินประเภทที่ ทอ.มีใช้งานอยู่ ได้แก่ PAE3060 และอยู่ในระหว่างการดำเนินการจัดหาตามโครงการ RTADS Phase II แบบ M3SR ของบริษัท Rohde & Schwarz ประเทศเยอรมนี ตามรูปภาพที่ ๓.๔ เครื่องวิทยุทั้ง๒แบบสามารถทำงานได้หลากหลายภารกิจ เช่น PAE3060 เป็นวิทยุ VHF/UHF/AM/FM ความถี่ 100-163

MHz และ 225-399.975 MHz ส่วน M3SR สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความถี่ 30-512 MHz ทั้งแบบ AM/FM ทั้งนี้วิทยุทั้ง ๒ แบบ สามารถเพิ่ม Option ใช้งานในระบบ Data Link และทำงานในระบบ Have Quick ได้ โดยเฉพาะ M3SR ยังมีขีดความสามารถเชื่อมต่อในแบบ IP ได้โดยตรง มีระบบ Security ที่ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการโปรแกรมได้ด้วยตัวเอง เรียกว่า SECOS (Security Communication System)

อย่างไรก็ดี ในการคำนวณเพื่อหาระยะทางในระบบวิทยุพื้นดิน-อากาศ-พื้นดิน VHF/UHF ยังคงมีปัจจัยอื่นที่สำคัญ เพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางที่แท้จริง ได้แก่ ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น (EIRP : Effective Isotropic Radiated Power) เช่น กำลังของเครื่องส่ง เกณฑ์ของสายอากาศ ค่าสูญเสียในสายส่งกำลังและประสิทธิภาพของภาครับ เช่น เกณฑ์สายอากาศ ค่าสูญเสียในสายส่งกำลัง ความไวของเครื่องรับ เป็นต้น นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงความถี่ใช้งาน ค่าสูญเสียในการเดินทางของคลื่น (Free Space Loss) การหาระยะทางที่แท้จริง จำเป็นต้องนำค่าเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณด้วย การคำนวณหา OHD และ RHD จึงเป็นค่าที่ช่วยให้ผู้ใช้งานได้ทราบว่า หากต้องการติดตั้งสถานีภาคพื้นความสูงของสายอากาศ ควรมีค่าอยู่ที่ระยะสูงกี่ฟุต เพื่อใช้สนับสนุนภารกิจการบินที่ระยะความสูงนั้นๆ ให้มีประสิทธิภาพ

**ระบบวิทยุ SINGLE SIDEBAND (SSB)**

แต่เดิมเครื่องวิทยุแบบ SSB ที่ ทอ.ใช้งานมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรวบรวมข่าวสารและทำหน้าที่กระจายข่าวสารระยะปานกลางถึงไกล ในขณะที่เทคโนโลยีในสมัยก่อนยังไม่แพร่หลายและเจริญเท่ากับหลายปีที่ผ่านมา การติดต่อสื่อสารด้วยวิทยุ SSB สามารถตอบสนองภารกิจทางทหารได้ดีต่อมาเมื่อเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ระบบโทรคมนาคมพื้นฐานถูกวางครอบคลุมพื้นที่ที่หน่วยทางทหารเข้าไปปฏิบัติภารกิจ การรวบรวมข้อมูลและกระจายข่าวสารสามารถผ่านอุปกรณ์สื่อสารประเภทอื่นได้รวดเร็วและแม่นยำกว่า เช่นระบบโทรศัพท์ แฟกซ์ ไมโครเวฟ และดาวเทียม

อย่างไรก็ตามวิทยุ SSB ก็ยังคงเป็นระบบที่มีความสำคัญสำหรับหน่วยงานทางทหารอยู่ เนื่องจากระบบอื่นๆ ต่างต้องพึ่งพาเครือข่าย หรือ Media ในการติดต่อสื่อสาร กรณีที่เครือข่ายหรือ Media ขัดข้อง ก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานไปด้วย ดังนั้น วิทยุ SSB จึงเป็นระบบสื่อสารที่เป็นทางเลือกหนึ่งที่หน่วยทางทหารยังคงสามารถใช้ติดต่อข่าวสารเพื่อสนับสนุนภารกิจได้อยู่

กองทัพสหรัฐ ฯ ได้อาศัยข้อดีจากคุณสมบัติของคลื่นความถี่ในย่าน HF และสร้างระบบแลกเปลี่ยนข่าวสารทางยุทธวิธี (Data Link) ทำให้กองทัพสหรัฐ ฯ สามารถเพิ่มศักยภาพในการรบและนำมาซึ่งชัยชนะเหนือฝ่ายข้าศึกได้ ปัจจุบัน ทอ.ไทยได้นำระบบวิทยุ HF/SSB มาใช้งานใน ๒ ภารกิจใหญ่ ๆ คือ

๑. ติดต่อสื่อสารในระบบเสียงระหว่างหน่วยต่อหน่วย (Voice Mode)

๒. ใช้เป็นระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารทางยุทธวิธี (Data Link) ซึ่งเป็นการนำข้อมูลจากระบบต่างๆ ทางยุทธวิธีมาบูรณาการในรูปแบบ Network ทำการประมวลผลแล้วแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารทางยุทธวิธีในระหว่างฝ่ายเดียวกัน เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจ เป็นการเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพในการรบ อันเป็นหัวใจสำคัญของภารกิจทางทหาร

TMR 90’S HF Mackay Radio

AN/URC-94

รูปที่ ๔.๔๘ เครื่องวิทยุชิงเกิลไซด์แบนด์ที่มีใช้งานในกองทัพอากาศ

**แบบต่างๆ ในระบบ SSB**

๑. SSB Transmission หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งเฉพาะ Sideband ออกไปเพียงด้านเดียว ส่วนสัญญาณ Carrier และ Sideband อีกด้านหนึ่งถูกตัดออกไป นิยมใช้ในระบบ SSB ทั่วๆ ไป

๒. SSB Suppressed Carrier หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งเฉพาะ Sideband ออกไปเพียงด้านเดียวกับสัญญาณ Carrier บางส่วน ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “Pilot Carrier” สำหรับ Sideband อีกด้านหนึ่งจะถูกตัดออกไป

๓. SSB Reduced Carrier หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งเฉพาะ Sideband ออกไปเพียงด้านเดียวกับสัญญาณ Carrier ที่ถูกลดขนาดลง และ Sideband อีกด้านหนึ่งถูกตัดออกไป

๔. SSB Full Carrier หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งสัญญาณ Carrier กับ Sideband ด้านหนึ่งออกไป ส่วนอีก Sideband หนึ่งถูกตัดทิ้ง

๕. Independent Sideband หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่สัญญาณ Carrier จะถูกตัดออก ส่งแต่เฉพาะ Sideband ทั้งสองข้างออกไป ซึ่งแต่ละข้างจะบรรจุข่าวสารไว้ไม่เหมือนกัน

**สรุปข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบ AM กับระบบ SSB ทั่วไป**

**ข้อดีของ SSB**

- ในหนึ่งความถี่ใช้งาน SSB จะใช้ความกว้างของ Band ในการส่งน้อยกว่าง AM จึงทำให้สามารถใช้งานได้ถึง 2 Channels (LSB or USB) ขณะที่เครื่องส่ง AM ใช้ได้เพียง Channel เดียว
- ในสถานภาพเดียวกันเครื่องส่ง SSB จะใช้กำลังส่งน้อยกว่าเครื่องส่ง AM ถึง ๔ เท่า (9 dB)
- เปรียบเทียบ Signal - to - Noise Ratio ในสภาวะปกติคือการแพร่กระจายคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ คุณภาพในการรับคลื่นของระบบ AM และ SSB จะมีคุณภาพเท่าเทียมกัน แต่ถ้าอยู่ในสภาพของอากาศที่เลวลง ระบบ SSB จะมีคุณภาพทางการรับดีกว่า AM ถึง 9 dB
- ความคงทนของสัญญาณต่อการจางหายของคลื่นวิทยุ (Fading) และการรบกวน (Interference) ระบบ SSB จะมีสภาพดีกว่าของระบบ AM เนื่องจากในการส่งระบบ AM มีปัญหาจากการหักล้างของสัญญาณระหว่าง LSB กับ USB ในสภาวะที่สภาพอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง

- เนื่องจากระบบ SSB ต้องการกำลังไฟน้อยกว่าระบบ AM เมื่อต้องการกำลังงานระดับเดียวกัน จึงทำให้การออกแบบระบบ SSB มีขนาดและน้ำหนักน้อยกว่าระบบ AM

**ข้อเสียของ SSB**

- ระบบ SSB ต้องการความแน่นอนของความถี่ (Frequency Stability) สูง เพื่อใช้ในระบบ ฉะนั้นการปรับแต่งต่างๆ ของระบบจึงยุ่งยาก และเป็นสาเหตุให้การออกแบบวงจรในระบบ SSB มีความซับซ้อนมาก
- เนื่องจากความยุ่งยากและซับซ้อนของระบบ จึงทำให้เครื่องมีราคาแพง

**วิทยุ SSB ที่มีใช้งานใน ทอ.**

ปัจจุบันมีเครื่องวิทยุ HF/SSB ที่ ทอ.ใช้งานอยู่หลายแบบด้วยกัน ได้แก่ RF-2301, AN/URC-94 หรือ RF-280, TMR 90'S, HF6200 และ PRC-130 เป็นต้น และกำลังติดตั้งใช้งานในโครงการป้องกันทางอากาศภาคเหนือ (RTADS PHASE II) คือ XK2100 ที่ สถานีรายงานภูหมันขาวและสถานีรายงานเขาใหญ่

**คุณลักษณะของวิทยุ HF/SSB ที่มีใช้งานใน ทอ.**

เป็นเครื่องรับ-ส่งวิทยุที่มีคุณลักษณะทางเทคนิคสูง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในกิจการทางทหารการติดต่อสื่อสารเป็นแบบ Two-way Communication ใช้ได้หลาย Mode เช่น USB, LSB, FM, AM และ CW โดยมีความถี่ตั้งแต่ 1.5 ถึง 30 MHz บางแบบสามารถใช้งานได้จนถึง 79.999 MHz อาจมีการใช้งานร่วมกับชุด Antenna Coupler Unit หรือ Antenna Tuning Unit เพื่อใช้ปรับความยาวทางไฟฟ้าให้กับสายอากาศให้ Match กับความถี่ใช้งานโดยอัตโนมัติ สามารถเปลี่ยนความถี่ ออกอากาศได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว

กำลังส่งออกอากาศโดยเฉลี่ยของระบบ Voice/Data อยู่ระหว่าง ๑๐๐ - ๑๒๕ วัตต์ แต่หากต้องการส่งสัญญาณในรูปแบบของ Data ให้ครอบคลุมพื้นที่ในการรับ-ส่งได้ทั้งประเทศ ต้องใช้กำลังส่งโดยเฉลี่ยไม่น้อยกว่า ๔๐๐ วัตต์

**ระบบสื่อสารยุทธวิธี (Tactical Communication System)**

ระบบสื่อสารยุทธวิธีเป็นระบบสื่อสารที่กองทัพอากาศได้จัดไว้เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างหน่วยงานทางยุทธวิธีด้วยกันเองและหน่วยสนับสนุนทางยุทธวิธีอื่นๆ ทั้งในเหล่าทัพเดียวกันและต่างเหล่าทัพหรือระหว่างเหล่าทัพและหน่วยงานความมั่นคงภายในและนอกประเทศ สำหรับกองทัพอากาศ ระบบสื่อสารยุทธวิธีถูกนำมาใช้ในภารกิจทางทหาร ดังนี้

๑. ภารกิจควบคุมและสั่งการ เพื่อใช้ในการควบคุมจากส่วนควบคุมไปยังหน่วยผู้ปฏิบัติ
๒. ภารกิจป้องกันฐานบินหรือป้องกันทางอากาศ เพื่อใช้ในการป้องกันหน่วยที่ตั้งทางทหาร

๓. ภารกิจสนับสนุนทางยุทธวิธี ได้แก่ การฝึกร่วม/ร่วมผสม การส่งกำลังบำรุง รวมทั้งการสนับสนุนภารกิจอื่นที่มิใช่ทางทหาร เช่น ประเทศเกิดภัยพิบัติ หรือ สถานการณ์ฉุกเฉิน เป็นต้น

**ย่านความถี่วิทยุที่ใช้งานในระบบสื่อสารยุทธวิธี** แบ่งออกเป็น 3 ย่านความถี่ คือ

- ย่านความถี่ HF (High Frequency)
- ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)
- ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)3

**ย่านความถี่ HF/SSB (High Frequency)**

High Frequency จะกำหนดย่านความถี่ใช้งานไว้ที่ 2-30 MHz ในระบบสื่อสารยุทธวิธี ย่านความถี่ HF นี้จะถูกใช้งานทั้งแบบที่เป็น Manpack, Mobile หรือ Vehicle และแบบ Base Station ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจะส่งคลื่นขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศแล้วสะท้อนกลับลงมายังพื้นโลก กำลังส่งออกอากาศของเครื่องส่งจะมีตั้งแต่ประมาณ 20 Watts จนถึง 1,000 Watts ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการใช้งาน ย่านความถี่ HF มีประโยชน์ในเรื่องระยะทางในการติดต่อ ซึ่งสามารถติดต่อใช้งานได้ในระยะทางปานกลางถึงไกล ปัจจุบัน ทอ.มีวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ HF ได้แก่ AN/PRC-104, AN/PRC-174, AN/PRC-130, AN/URC-94, RF-2301 และวิทยุ HF6200 เป็นต้น

**ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)**

สำหรับในทางทหารแล้วย่านความถี่ VHF จะแบ่งออกเป็น VHF/FM (Low Band) และ VHF/AM โดยปกติ VHF/FM (Low Band) กำหนดย่านความถี่ใช้งานที่ 30 - 75.975 MHz และ VHF/AM จะกำหนดย่านความถี่ใช้งานไว้ที่ 116-149.975 MHz ย่านความถี่นี้การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Line-of-Sight ซึ่งมีประโยชน์ในการติดต่อสื่อสารระหว่างจุดต่อจุด สถานีภาคพื้นกับอากาศยาน และระหว่างสถานีภาคพื้นกับชุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ แต่การสื่อสารจะถูกจำกัดระยะทางด้วยลักษณะของภูมิประเทศ ปัจจุบัน ทอ.มีวิทยุที่ใช้งานในระบบสื่อสารยุทธวิธีย่านความถี่ VHF/FM (Low Band) ได้แก่ AN/PRC-77, AN/PRC-117(D), AN/GRC-160, RT-524A, AN/GRC-125, PRC-710S, CNR900 และเป็นทั้ง VHF/UHF/AM คือ AN/PRC-113 และ AN/VRC-83 นอกจากนี้ยังที่เป็นทั้ง VHF/UHF/AM/FM คือ AN/URC-200 และ PRC-710MB เป็นต้น

**ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)**

ย่านความถี่นี้ทางทหารกำหนดไว้ตั้งแต่ 225-399.975 MHz การ Modulation จะเป็นแบบ Amplitude Modulation การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Line-of-Sight ซึ่งมีประโยชน์ในการติดต่อสื่อสารระหว่างจุดต่อจุด สถานีภาคพื้นกับอากาศยาน อากาศยานกับอากาศยาน และระหว่างสถานีภาคพื้นกับชุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ แต่การสื่อสารจะถูกจำกัดระยะทางด้วยลักษณะของภูมิประเทศ กำลังส่งออกอากาศของเครื่องส่งประมาณ 2-30 Watts ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการใช้งาน ปัจจุบัน ทอ. มีวิทยุที่ใช้งานในระบบสื่อสารยุทธวิธีย่านความถี่ UHF ได้แก่ AN/PRC-

660 และ AN/VRC-240 และเป็นทั้ง VHF/UHF/AM คือ AN/PRC-113 และ AN/VRC-83 นอกจากนี้ยังที่เป็นทั้ง VHF/UHF/AM/FM คือ AN/URC-200 และ PRC-710MB เป็นต้น

**ระบบวิทยุสื่อสารยุทธวิธีที่ใช้งานในกองทัพอากาศมี 3 รูปแบบคือ**

๑. วิทยุ Manpack

๒. วิทยุ Mobile หรือ Vehicle

**วิทยุ Manpack**

วิทยุ Manpack เป็นวิทยุทางทหารที่ผู้ใช้งานสามารถนำติดตัวไปได้ทุก ๆ สถานการณ์ ดังนั้น วิทยุ Manpack จึงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีกำลังส่งออกอากาศต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานน้อย เพื่อให้ใช้งานได้นานที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากพลังงานที่ใช้กับวิทยุ Manpack ได้จาก Battery

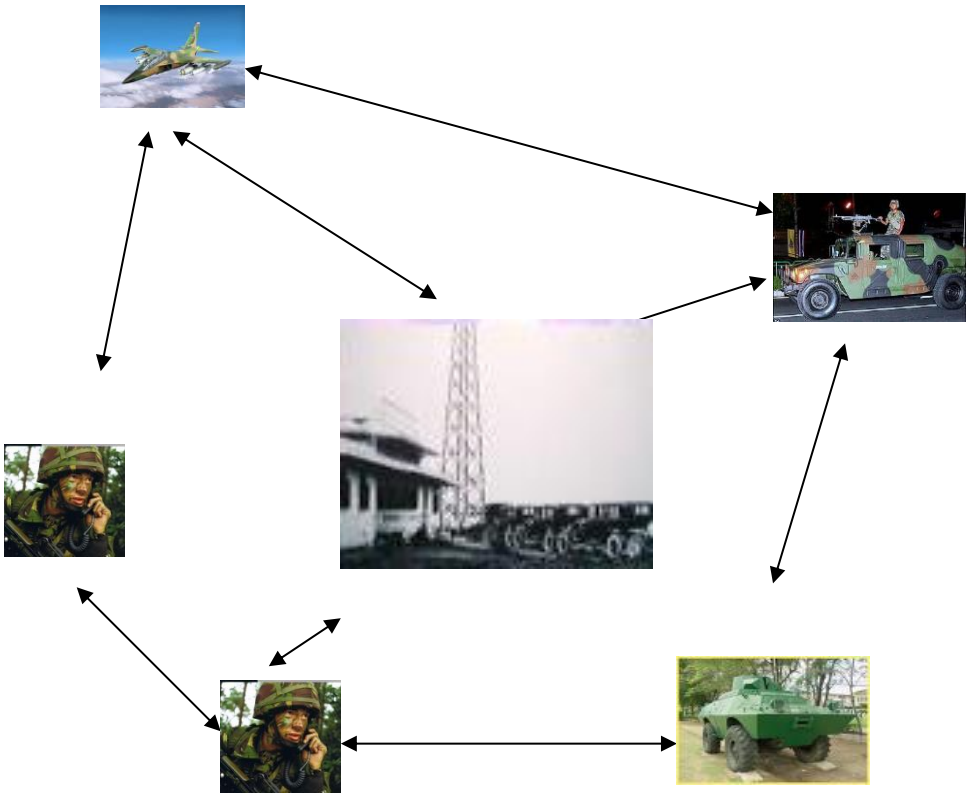
**วิทยุ Mobile หรือ Vehicle**

วิทยุ Mobile หรือ Vehicle เป็นวิทยุที่ออกแบบมาสำหรับติดตั้งบนยานพาหนะต่าง ๆ ดังนั้น วิทยุ Mobile หรือ Vehicle จึงถูกออกแบบให้มีขนาดที่พอเหมาะไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป น้ำหนักพอประมาณ มีกำลังส่งออกอากาศปานกลางจนถึงสูง พลังงานที่ใช้ในระบบวิทยุ Mobile หรือ Vehicle มาจาก Battery ของยานพาหนะนั้น ๆ หรือ ย. ทำไฟ

**วิทยุ Base Station**

วิทยุ Base Station เป็นวิทยุที่ออกแบบสำหรับติดตั้งประจำที่ จึงไม่ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดเหมือนกับทั้งสองแบบที่กล่าวมาข้างต้น โดยทั่วไปมีขนาดค่อนข้างใหญ่ น้ำหนักมาก ไม่เหมาะกับการเคลื่อนย้ายบ่อยๆ กำลังส่งออกอากาศสูงและสายอากาศมีขนาดใหญ่ เพื่อให้เกณฑ์การขยายสูงและติดต่อได้ระยะไกล พลังงานที่ใช้มาจากกระแสไฟฟ้า AC วิทยุ Base Station จะมีย่านความถี่ใช้งานครอบคลุมทุกย่านความถี่ คือ HF/SSB, VHF/FM (Low Band), VHF/FM (High Band), VHF/AM, UHF/AM ทั้งนี้เพื่อให้สามารถติดต่อใช้งานได้ครอบคลุมภารกิจของหน่วย

**ลักษณะการใช้งานของระบบสื่อสารยุทธวิธี**



รูปที่ ๔.๔๙ การติดต่อสื่อสารในระบบสื่อสารยุทธวิธี

**วิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ**

วิทยุข่ายควบคุมและสั่งการที่กองทัพอากาศไทยใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เป็นวิทยุที่ทำงานอยู่ในย่าน VHF/FM High Band ความถี่ระหว่าง 136-174 MHz และ UHF/FM ความถี่ระหว่าง 400-460 MHz แพร่กระจายคลื่นในแบบ Line of Sight ติดต่อระหว่าง Ground to Ground ระยะการติดต่อสื่อสารขึ้นอยู่กับกำลังส่ง ค่าสูญเสียในสายส่งกำลัง เกณฑ์ของสายอากาศ ความสูงของสายอากาศ ความถี่ใช้งาน และลักษณะภูมิประเทศ

ข่ายการใช้งานหลักมีอยู่ ๓ ข่ายใหญ่ ๆ คือ

๑. ข่าย สห.ทอ.

๒. ข่าย อย.ทอ.

๓. ข่ายสนับสนุนทั่วไป

**ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ**

ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ ถูกนำไปใช้งานโดยแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ๓ แบบ คือ

๑. วิทยุประจำที่ (Base Station)
๒. วิทยุติดรถยนต์ (Vehicle)
๓. วิทยุมือถือ (Hand-Held)

**วิทยุประจำที่ (Base Station)**

วัตถุประสงค์ของวิทยุประจำที่ (Base Station) เป็นวิทยุแม่ข่ายประจำสถานีคุณสมบัติโดยทั่วไปมีกำลังส่งสูง แต่เดิมมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าขึ้นจึงทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กและน้ำหนักน้อยลง ใช้สายอากาศที่ออกแบบให้มีเกณฑ์สูง เพื่อครอบคลุมพื้นที่ในการสนับสนุนการปฏิบัติภารกิจ

รูปที่ ๔.๕๐ วิทยุ VHF/FM Base Station

**วิทยุติดรถยนต์ (Vehicle)**

วัตถุประสงค์ของวิทยุติดรถยนต์ เพื่อใช้เป็นสถานีเคลื่อนที่ในการติดต่อสื่อสารกับสถานีแม่ข่าย (Base Station) หรือวิทยุมือถือ หรือกับวิทยุติดรถยนต์ด้วยกัน ออกแบบมาสำหรับติดตั้งบนยานพาหนะต่าง ๆ ขนาดเล็กน้ำหนักเบา กำลังส่งออกอากาศโดยทั่วไป 20-50 วัตต์ พลังงานที่ใช้ มาจาก Battery ของยานพาหนะนั้น ๆ

รูปที่ ๔.๕๑ วิทยุ VHF/FM Vehicle

**วิทยุมือถือ (Hand-Held)**

วัตถุประสงค์ของวิทยุมือถือ เพื่อใช้เป็นวิทยุประจำบุคคล ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานมีความคล่องตัวในการนำติดตัว และเข้าปฏิบัติภารกิจในพื้นที่ โดยติดต่อใช้งานกับวิทยุประจำที่ เคลื่อนที่ หรือในระหว่างผู้ปฏิบัติด้วยกัน แหล่งพลังงานที่ใช้เป็น Battery ที่มีคุณภาพสูง ค่าแรงไฟโดยปกติ 7.5 VDC 1200 mAh กำลังส่งอยู่ระหว่าง ๓-๕ วัตต์ สายอากาศเป็นแบบ Broadband

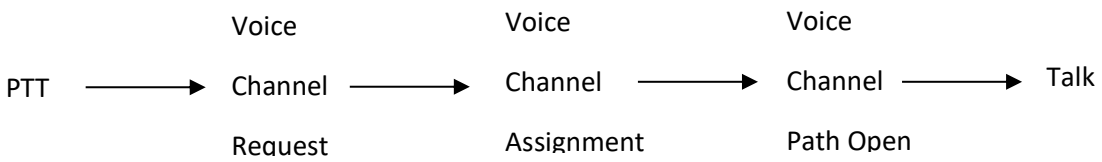
รูปที่ ๔.๕๒ วิทยุแบบ Hand-Held

**ระบบวิทยุทรั้งค์ (Trunked Radio System)**

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงระบบวิทยุสื่อสารที่ใช้งานอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นที่รู้จักและใช้งานแพร่หลายทั่วไป แต่หากกล่าวถึงระบบวิทยุทรั้งค์ หรือ Trunked Radio หลายคนอาจไม่เคยได้ยินมาก่อนหรือได้ยินมาบ้าง แต่ยังไม่ทราบถึงหลักการทำงานโดยทั่วไป

ระบบวิทยุทรั้งค์เป็นเครือข่ายวิทยุสื่อสารที่มีการทำงานคล้ายกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีสถานีกลาง (Central Controller) ทำหน้าที่จัดช่องสัญญาณให้มีจำนวนช่องสัญญาณเพียงพอในการรองรับการใช้งานของเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบ มีสถานีทวนสัญญาณ (Repeater Station) ทำหน้าที่เชื่อมโครงข่ายให้ครอบคลุมพื้นที่ของเครือข่ายนั้นๆ และเลือกช่องสัญญาณที่ว่างอยู่ให้ลูกข่ายโดยอัตโนมัติ อีกทั้งสามารถเรียกเฉพาะเครื่องลูกข่ายที่ต้องการติดต่อได้ และมีระบบการสื่อสารเฉพาะกลุ่ม (Private Call)

ปัจจุบันระบบวิทยุทรั้งค์ได้ถูกพัฒนาให้มีขีดความสามารถสูงขึ้นเป็นระบบดิจิทัลทรั้งค์ เพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อกับระบบโทรคมนาคมอื่น (PCM Switch) และมีโปรโตคอล MPT 1327 ซึ่งใช้งานแพร่หลายในปัจจุบันที่สุด และอาจสรุปภาพรวมของระบบวิทยุทรั้งค์ได้ว่า เป็นระบบเซลลูลาร์ (Cellular) ชนิดหนึ่งนั่นเอง เพียงแต่ “ไม่เสียค่า แอร์ไทม์”




รูปที่ ๔.๕๓ ภาพการทำงานพื้นฐานของระบบวิทยุทรั้งค์

โดยที่การสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุทรั้งค์ จะประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ได้แก่

- **VOICE PLUS DATA** เป็นระบบที่สนับสนุนการสื่อสารสัญญาณเสียงและรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งต้องเป็นการติดต่อผ่านสถานีแม่ข่ายเท่านั้น
- **PACKET DATA OPTIMIZED** เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อการรับ-ส่งข้อมูลแบบ Packet โดยเฉพาะ เช่น การเข้าถึงโครงข่ายอินเทอร์เน็ต หรือ ระบบควบคุม
- **DIRECT MODE** หรือการติดต่อสื่อสารระหว่างลูกข่ายโดยตรง ไม่ผ่านการจัดการจากหน่วยจัดการกลาง ซึ่งโดยปกติจะใช้เมื่ออยู่นอกพื้นที่ให้บริการของสถานีแม่ข่าย หรือกำหนดเพื่อต้องการความปลอดภัยในระดับสูง

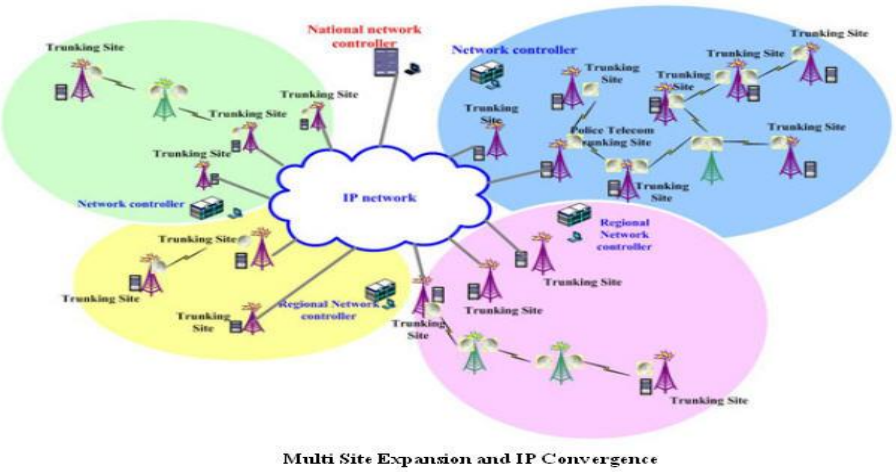
ในยุคต้นระบบ Trunked Radio และ Conventional Land Mobile เป็นเทคโนโลยีแบบแอนะล็อก ซึ่งไม่มีความปลอดภัยหรือเป็นส่วนตัวมากนัก อีกทั้งยังเป็นการใช้ความถี่วิทยุที่ค่อนข้างจะสิ้นเปลือง แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบเหล่านี้เป็นระบบดิจิทัล ซึ่งนับได้ว่าเป็นระบบที่มีความเป็นส่วนตัว และมีความปลอดภัยของข้อมูลสูง ที่สำคัญเป็นเทคโนโลยีที่สามารถบริหารจัดการการใช้ความถี่วิทยุได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การพัฒนาไปสู่ระบบดิจิทัลยังสามารถรวมเอาคุณสมบัติการสื่อสารทั้งแบบ Trunked Radio และ Conventional Land Mobile เข้าด้วยกันได้ โดยเรียกว่าระบบ Digital Trunked Radio

ระบบวิทยุทรั้งค์ที่นิยมในปัจจุบันมีอยู่ ๒ ข่ายใหญ่ ที่แข่งขันกันอยู่ คือ

- APCO P25 เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มบริษัทเอกชนด้านเทคโนโลยีของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการนำไปใช้งานในพื้นที่ๆ มีขนาดใหญ่มาก รวมทั้งในบริเวณที่มีการใช้งานของวิทยุทั่วไปอย่างหนาแน่น ความถี่ใช้งานอยู่ระหว่าง VHF/FM-136-174 MHz, UHF/FM - 400, 800 MHz
- TETRA เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป เพื่อแก้ปัญหาการรบกวนเนื่องจากประเทศส่วนใหญ่มีเนื้อที่ขนาดเล็ก อยู่ติดกันมาก ย่านความถี่ใช้งาน UHF/FM - 800 MHz

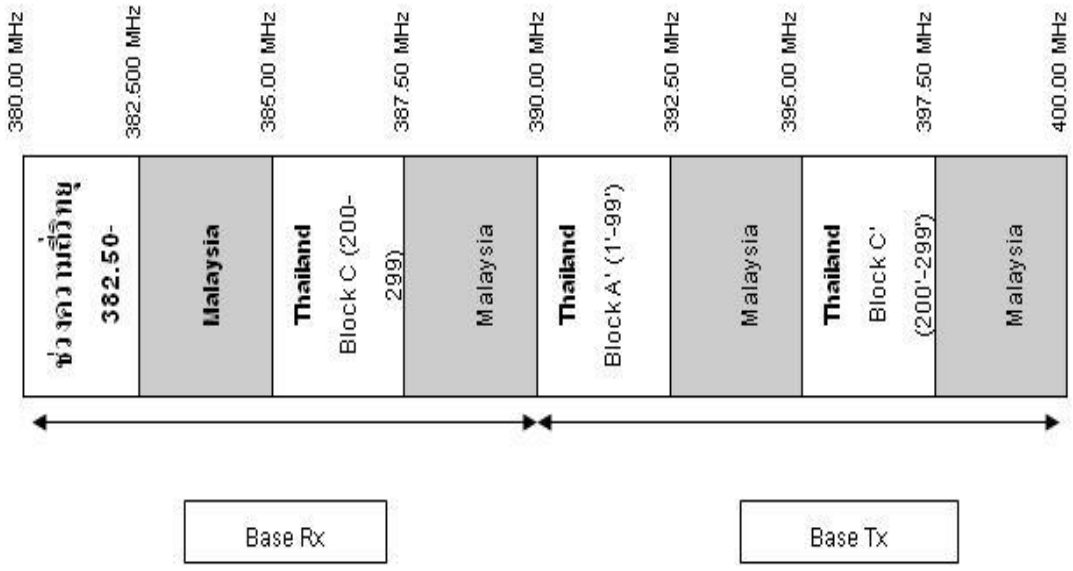
วิทยุคมนาคมระบบทรั้งค์ ในประเทศไทยใช้สำหรับติดต่อภายในกลุ่มองค์กรใหญ่หรือหน่วยงานราชการ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้เป็นระบบดิจิทัลแล้ว ก็ได้มีการพัฒนาความสามารถของระบบให้หลากหลายยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นความสามารถที่ลูกข่ายสามารถติดต่อกันเองได้โดยไม่ต้องผ่านการควบคุม และจัดการโดยสถานีแม่ข่าย หรือแม้แต่การเพิ่มความสามารถในการรองรับ-ส่งภาพเคลื่อนไหวแบบ Multi Media ได้ รวมถึงการเชื่อมต่อ

อินเทอร์เน็ต ได้ ทั้งนี้เทคโนโลยีต่างๆ ได้มีการพัฒนาที่แตกต่างกันไปในทางเทคนิค แต่ยังคงมีเป้าหมายของการพัฒนาที่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน นั่นคือระบบโทรคมนาคมที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้มากที่สุด



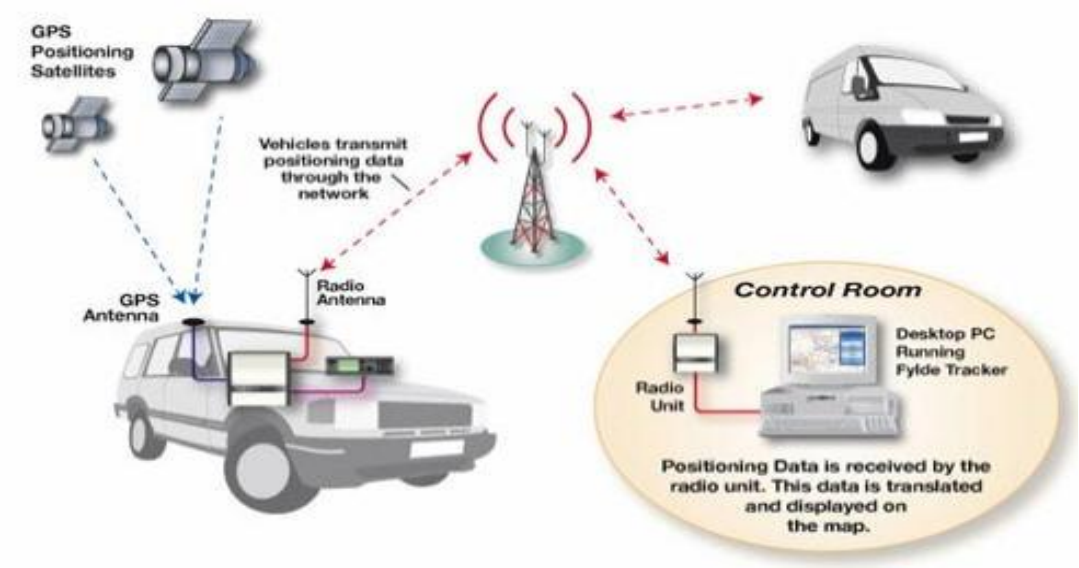

รูปที่ ๔.๕๔ แสดงภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายผ่านระบบวิทยุทรั้งค์

ปัจจุบันมีย่านความถี่สำหรับใช้งานระบบวิทยุทรั้งค์ ถูกกำหนดไว้หลายย่านความถี่ด้วยกัน โดยมีหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำหนดความถี่คือ สำนักงานกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สกทช.) จัดทำแผนความถี่วิทยุแห่งชาติเพื่อใช้เป็นแผนแม่บทในการดำเนินการ




รูปที่ ๔.๕๕ ตัวอย่างการจัดแผนความถี่ในระบบวิทยุทรั้งค์ของประเทศไทย

การใช้งานของวิทยุทรั้งค์ที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เช่น วิทยุรถแท็กซี่ โดยถูกนำมาใช้เป็นช่องทางการสื่อสารทางหนึ่งที่สามารถเติมเต็มบริการพิเศษต่างๆ ได้ อาทิเช่น การประยุกต์ GPS ติดรถยนต์เพื่อใช้ในการ tracking ติดตามรถ และสามารถควบคุมอุปกรณ์ระยะไกลได้เช่น สั่งดับเครื่องรถได้หากถูกขโมย หรือกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินก็สามารถส่งสัญญาณขอความช่วยเหลือได้ นอกจากวิทยุแท็กซี่แล้วอาจจะมีการวางระบบวิทยุทรั้งค์ทั่วประเทศเพื่อติดตามรถบรรทุก หรือใช้ในการเชื่อมต่อระบบโทรคมนาคมของหน่วยงานต่างๆ




รูปที่ ๔.๕๖ การนำระบบโทรคมนาคมเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยระบบวิทยุทรั้งค์

| สรุปข้อแตกต่างระหว่างระบบวิทยุทั่วไป (Conventional Radio) กับระบบวิทยุทรั้งค์ | | |
|---|---|---|
| **ลำดับ** | **วิทยุทั่วไป** | **ระบบวิทยุทรั้งค์แบบดิจิทัล** |
| ๑ | ราคาถูกกว่า | มีราคาค่อนข้างสูง |
| ๒ | การซ่อมบำรุงง่ายกว่า | การซ่อมบำรุงค่อนข้างยุ่งยาก วงจรมีความซับซ้อนกว่ามาก |
| ๓ | จำนวนช่องสื่อสารจำกัด เนื่องจากการติดต่อใช้งานเป็นแบบ Half Duplex | สามารถใช้งานได้ทั้งในแบบวิทยุทั่วไปและติดต่อผ่านเครือข่ายอื่นได้ |
| ๔ | ให้ความปลอดภัยต่ำ | มีความปลอดภัยสูง น่าเชื่อถือกว่า |
| ๕ | มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน | การนำไปประยุกต์ใช้งานกว้างกว่า |

**๒.๔.๔ ระบบวิทยุสื่อสารภาคอากาศ**

การใช้งานเครื่องวิทยุและเครื่องช่วยเดินอากาศมีเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวน บ.ที่มากขึ้นกว่าแต่ก่อน หนึ่งในเหตุผลดังกล่าวก็คือ Federal Aviation Administration ( FAA) มีความต้องการให้ บ. ทุกลำที่บินอยู่ในพื้นที่การจราจรหนาแน่นต้องติดตั้งระบบวิทยุ 2 – way radio เพื่อใช้ติดต่อกับ ATC และ หอบังคับการบิน

การพัฒนาของเทคโนโลยีอุปกรณ์ solid-state และ digital electronics มีความสับซ้อนสำหรับใช้ในระบบ communication, navigation และ flight control ของบ.เกือบทุกแบบ ซึ่งก่อนหน้านี้ระบบเหล่านี้น่าจะมีใช้เฉพาะ บ.ขนาดใหญ่เท่านั้น เนื่องจากปัญหาของน้ำหนัก , ขนาด ของอุปกรณ์ของระบบเหล่านั้น แต่ทุกวันนี้นิยามของคำว่า avionics ถูกเชื่อมด้วยกันของคำว่า aviation electronics รวมเอาอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเข้าไว้ด้วยกัน

ระบบ avionics ถูกติดตั้งบน บ. สามารถรวมถึง communication (COMM) radio, naviation( NAV and RNAV) systems, weather detection systems and flight management systems (FMS) ระบบ NAV จะรวมถึง VHF omnirange (VOR) receivers, distance measuring equipment (DME), automatic direction finder (ADF) localizer (LOC) receiver, glide slope (GS) receiver, traffic alert and collision avoidance systems (TCAS),

marker beacon receiver, identification transponder, radio altimeter and numerous indicators ในบางกรณีบน บ. ที่ทันสมัยระบบเหล่านี้ถูกรวมกันที่ integrated avionics processor system (IAPS) โดยระบบ IAPS เป็นระบบ avionics แบบที่ง่ายต่อการใช้งาน, น้ำหนักน้อย, และลดพื้นที่บน instrument panel

ระบบ avionics ที่ทันสมัยเหล่านี้ทำให้สอดคล้องกันได้บนมาตราฐาน Aeronautical Radio Incorporated (ARINC) โดยที่ ARINC ถูกกำหนดขึ้นมาจากบริษัทผลิตเครื่องบินเพื่อใช้เป็นมาตราฐานเดียวกัน ARINC 500 และ 700 ถูกพัฒนามาเพื่อระบบ COMM, NAV, CNI และ ระบบ Digital data transfer systems ถูกกำหนดเป็นมาตราฐานบน ARINC 429 และ 629

**หลักการระบบวิทยุโดยทั่วไป**

ระบบวิทยุติดต่อสื่อสารบนเครื่องบินนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์หลักคือ: เพื่อให้การปฏิบัติภารกิจสำเร็จโดยสามาถใช้งานในการติดต่อสื่อสารได้หลากหลายบน บ. นี้คือรูปแบบหนึ่งโดยการส่งข้อมูลข่าวสารจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆ โดยรูปแบบของข่าวสารหมายถึงเสียงหรือข้อมูล ระบบเครื่องช่วยเดินอากาศจะไปขับ indicator เพื่อนำล่อง บ.เข้าสู่สถานีที่ส่งสัญญาณนั้นมา ส่วนระบบเรดาร์จะตรวจจับและแสดงผลเป็นรูปเพื่อบอกให้นักบินทราบถึงมุมและระยะของวัตถุที่ตรวจจับได้ ระบบติดต่อสื่อสารโดยส่วนรวมแล้วจะเกี่ยวพันกับสัญญาณเสียง(Audio) , Creation, Reproduction และ วิธีการ Transfering of audio ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทนี้ต่อไป ซึ่งก่อนที่เราจะศึกษาในรายละเอียดต่อไป ควรที่จะต้องทราบความหมายของคำนิยามต่างเหล่านี้ได้แก่

Audio(สัญญาณเสียง)

ความถี่ของสัญญาณ Audio อยู่ระหว่าง 20 Hz – 20 KHz สัญญาณ Audio(voice or tone) คือสัญญาณที่ถูกส่ง สัญญาณสามารถส่งในระยะทางสั้นๆเรียกว่า Intercom อย่างไรก็ตาม มันมีความจำเป็นที่ต้องถูกกำหนดให้ผสมกับสัญญาณพาหะ( Carrier frequency) เพื่อที่ส่งออกจาก บ.ได้ระยะทางไกลขึ้น เรียกว่าวิทยุ (radio)

Carrier (สัญญาณพาหะ)

คือสัญญาณที่มีความคงที่ทาง Amplitude และ Frequency ใช้ในระบบวิทยุติดต่อสื่อสารเพื่อที่สามารถนำพา audio signal ไปได้ไกลยิ่งขึ้น โดยมี Radio set control เป็นตัวเปลี่ยนความถี่ เช่น เมื่อเราเปลี่ยนช่องสถานีบนวิทยุรถยนต์หรือวิทยุตามบ้านนั่นก็คือเราได้เปลี่ยน Carrier frequency ของสถานีเหล่านั้นวิทยุนั้นเอง

Amplitude

คือคุณสมบัติของ Electrical signal ซึ่งเป็นปริมาณความแรงของสัญญาณ (Amount)

Frequency

คือคุณสมบัติของ Electrical signal ซึ่งคิดเป็นจำนวนครั้งลูกคลื่นของ AC signal ต่อวินาที

Propagation

คือการแพร่กระจายของสัญญาณคลื่นออกไปในอากาศหรือ Atmosphere

Microphone Audio

สัญญาณเสียง(Audio signal)ที่ถูกสร้างโดย microphone

Headset Audio

Audio signal ที่ถูกส่งไปยัง Headset และทำให้ได้ยินเสียงออกมา

Modulation

ขบวนการรวมสัญญาณ 2 ความถี่ ( Carrier + Audio) : มี 2 รูปแบบ คือ Amplitude Modulation (AM) และ Frequency Modulation (FM)

PTT (key)

Push to talk switch เป็นswitch ที่เมื่อถูกกดจะกำหนดให้ระบบการส่ง (Transmit) อาจเป็นได้ทั้ง Radio or Intercom

Sidetone

สัญญาณเสียงที่ส่งออกอากาศและบางส่วนถูกป้อนกลับมายัง head set . หรือก็คือเสียงพูดที่คุณได้ยินกลับมานั้นเอง

Selectivity

คือคุณสมบัติของเครื่องรับซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเลือกรับความถี่ที่ต้องการจากความถี่อื่นๆได้, โดยที bandwidthของเครื่อง มีผลต่อ Selectivity ด้วยเช่นกัน

Sensitivity

คือคุณสมบัติของเครื่องรับซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการรับสัญญาณที่ความแรงต่ำๆได้แล้วนำไปขยายความแรงต่อไป

Squelch

การปรับตั้งค่าด้วยวิธี manual เพื่อตัดการรับสัญญาณเสียง เมื่อสัญญาณที่รับได้มีค่าอ่อนๆ เพื่อป้องกัน noise ที่จะเข้ามาที่หูฟังของนักบิน

Amplitude Modulation (AM)

คือกระบวนการที่ amplitude ของสัญญาณพาหะ(carrier) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลง freq และ Amplitude ของสัญญาณเสียงที่เข้าไป mod

Frequency Modulation (FM)

คือกระบวนการที่ frequency ของสัญญาณพาหะ(carrier) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลง freq และ Amplitude ของสัญญาณเสียงที่เข้าไป mod

Single Sideband Modulation (SSB)

คือหลักการในการส่ง carrier และ 1 sideband โดยผู้ใช้สามารถเลือกที่จะส่ง upper side หรือ lower sideband อย่างใดอย่างหนึ่งได้

Radio set Control (RSC)

โดยทั่วไปนั้นจะเรียกกันว่า Control Box หรือ control Unit

Line Replaceable Unit (LRU)

คือส่วนประกอบหลักของระบบ ง่ายต่อการถอดเปลี่ยนบน บ.

Xmit or Tx

ย่อมาจาก transmit or transmitter

Rec or Rx

ย่อมาจาก receive or receiver

RT

ย่อมาจาก Receiver- Transmitter

ในเบื้องต้นของการติดต่อสื่อสารกันนั้น เราติดต่อสื่อสารด้วย 3 ทางพื้นฐานหลัก ดังนี้

1. Face to Face
2. Intercom Systems
3. Telephone or Radio

เสียงพูดของมนุษย์มีความถี่อยู่ที่ประมาณ 300 Hz – 3.4 KHz ระบบการติดต่อสื่อสารบน บ. ถูกจัดระบบคล้ายๆกับการติต่อสื่อสารกันในอาคารสำนักงานขนาดใหญ่นั้นเอง

นักบินมีความจำเป็นต้องการติดต่อกับลูกเรือทั้งหมดโดยการใช้ Intercom หรือติดต่อกับ ATC หรือ บ.ลำอื่น โดยการใช้วิทยุเสียงหรือข้อมูลข่าวสารจะเริ่มต้นจาก microphone ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

Microphones

ไมโครโฟนเปลี่ยนสัญญาณไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ไมโครโฟนส่วนมากมีแผ่น diaphragm ติดอยู่กับ transducer การสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงบน diaphragm ถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่ง AC signal นี้คือoutput ของไมโครโฟนนั้นเอง

ไมโครโฟนมี 2 ชนิด ได้แก่ Carbon Microphone and Dynamic Microphone

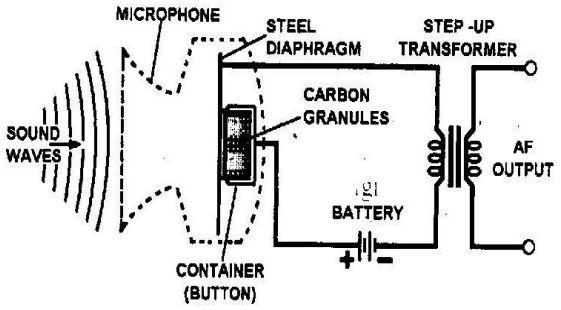



**Figure 1-1. Carbon Microphone**

รูปที่ ๔.๕๗ Carbon Microphone

1. Carbon Microphone ตาม figure 1-1 ทำงานบนหลักการของการเปลี่ยนค่าความต้านทานของตัวมันเอง ซึ่งแปลเปลี่ยนไปตามความดัน โดยคลื่นเสียงกระทบกับไดอะเฟรม ซึ่งการเปลี่ยนค่าความต้านทานนี้ส่งผลให้กระแสไฟ D.C.ที่ขด primary induce กระแสไฟ A.C ที่ขด secondary ซึ่งต้องอาศัยแบตเตอรี่ป้อนเข้าที่ด้านprimary ซึ่งเป็นจุดอ่อนของไมโครโฟนแบบ carbon คือเมื่อแบตเตอรี่เสื่อมหรือใช้การไม่ได้ จะทำให้

ไมโครโฟนใช้งานไม่ได้ด้วย และข้อเสียอีกอย่างคือในสภาพอากาศที่หนาวมาก carbon granules จะแข็งเป็นก้อนซึ่งหมายความว่ามันจะไม่แปลเปลี่ยนค่าความต้านทาน

ข้อควรทราบ

- เสียงดัง-ค่อย ขึ้นอยู่กับ amplitude of A.C. signal
- ระดับเสียงสูง-ต่ำ ขึ้นอยู่กับ frequency of A.C. signal

2. dynamic microphone ( figure 1-2) เป็นไมโครโฟนที่มีคุณภาพสูงแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันในปัจจุบันนี้ voice coil หรือ moving coil ถูกติดแน่นกับด้านหนึ่งของ diaphragm อีกด้านหนึ่งของ Diaphragm เป็นสนามแม่เหล็กซึงถูกทำโดยแม่เหล็กถาวร โดยแม่เหล็กถาวรนี้ทำหน้าที่คล้ายกับแบตเตอรี่ที่ใช้งานเป็น power source ใน carbon microphone ข้อดีของ dynamic microphone คือไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ โดยเมื่อคลื่นเสียงกระทบกับ diaphragm Diaphragm จะสั่นเป็นผลให้ voice coil เคลื่อนสัมพันธ์กับ
3. diaphragm การเคลื่อนตัวของ voice coil ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าใน voice coil ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้แทนแหล่งกำเนิดเสียงนั้นเอง dynamic microphone ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟภายนอก จึงทำให้มันมีน้ำหนักเบา ,sensitive สูง,

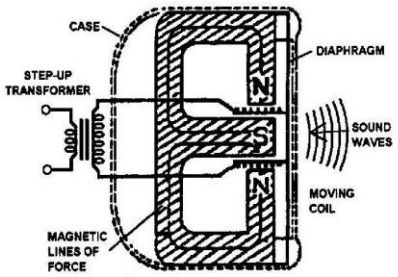



**Figure 1-2. Dynamic Microphone**

รูปที่ ๔.๕๘ dynamic microphone

Loundspeakers

Loundspeakers คือ เครื่องมือที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณเสียง ถูกทำงานสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกขยายโดยวิทยุ, โทรทัศน์, interphone, PA เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว Loundspeakers เกือบทั้งหมดที่ใช้กันทุกวันนี้เป็นแบบ dynamic หมายถึงการที่ voice coil นำพา audio signal เคลื่อนเข้าและออกจากสนามแม่เหล็กซึ่งสร้างโดยแม่เหล็กถาวร เราจะพูดกันถึง 2 แบบ ของ Loundspeakers

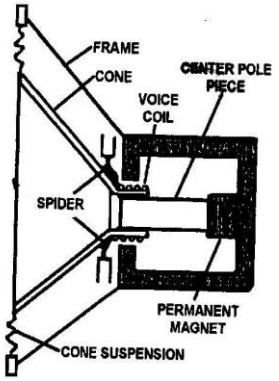



**Figure 1-3. Dynamic Loudspeaker**

รูปที่ ๔.๕๙ Dynamic Loundspeakers

๑. permanent magnet ( Dynamic) loundspeaker ( figure 1-3) โดยชื่อของมันได้บอกแล้วว่า permanent magnet ใช้สำหรับสร้าง magnetic field (power source) voice coil แขวนสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรไว้ cone

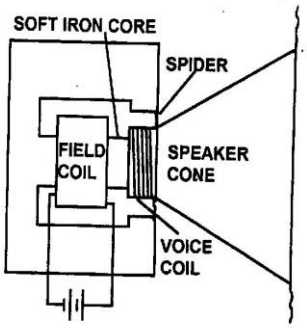



**Figure 1-4. Electromagnetic Loudspeaker**

รูปที่ ๔.๖๐ Electromagnetic Loudspeaker

๒. electromagnetic speaker ( figure 1-4) ทำงานบนหลักพื้นฐานเดียวกันกับ permanent magnet ( Dynamic) loundspeaker ซึ่งแตกต่างทางโครงสร้างเล็กน้อย คือ electromagnetic speaker ตัวแม่เหล็กถาวรถูกแทนโดย electromagnet or field coil ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟ อีกข้อหนึ่งคือcentral pole ของ Dynamic loundspeaker ใช้ soft iron core แทน ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มากพอทำให้ผ่านทะลุได้ดีกว่า

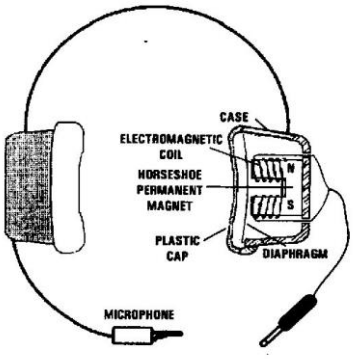



**Figure 1-5. Headset**

รูปที่ ๔.๖๑ Headset

ถ้าเรารวมการทำงานของไมโครโฟนและ loundspeaker เข้าไว้ในระบบเดียวกันหรืออุปกรณ์ตัวเดียวกัน แล้วเราจะเรียกว่า HEADSET (figure 1-5) headset แปลงคลื่นเสียงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ mouthpiece end และแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับไปเป็นคลื่นเสียงที่ earphone end ทุกวันนี้ ทอ. มีการใช้งาน headset เป็นหลัก

**ระบบวิทยุในอากาศยาน ( Airborne Radio Systems)**

วิทยุที่นำไปติดตั้งบนอากาศยานทุกระบบมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 2 ประการคือ

1. ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานกับสถานีพื้นดิน ( Air – to – Ground Communication)

2. ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานกับอากาศยาน( Air-to-Air Communication)

**การติดต่อติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานกับสถานีพื้นดิน**

การใช้วิทยุติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานกับสถานีภาคพื้นในภารกิจหลัก คือการติดต่อกับห่อบังคับการบิน เพื่อที่จะขออนุญาตใช้ลานจอดในโอกาสที่จะนำเครื่องบินวิ่งขึ้นหรือร่อนลง นอกจากนี้ก็ใช้ในภารกิจอื่นๆ เช่น ในทัศนวิสัยเลวจำเป็นต้องทำการบินด้วย GCA (Ground Control Approach) นักบินก็จะใช้วิทยุติดต่อกับ จนท. ของ GCA ในระหว่างที่ทำการบินเดินทางอยู่นั้นก็จะต้องใช้วิทยุรายงานที่อยู่ของ บ. ให้สถานีภาคพื้นทราบตามระเบียบ เพื่อให้หน่วยเกี่ยวข้องทราบตามสถานะของ บ.ตั้งแต่วิ่งขึ้นจนถึงร่อนลงที่สถานีปลายทาง ทางด้านข่าวอากาศก็มีความจำเป็นสำหรับนักบินในขณะทำการบินก็สามารถใช้วิทยุบน บ.ทำการรับฟังได้ ทางด้านระบบป้องกันภัยทางอากาศ Ground Controlled Interception) จนท.เรดาร์ที่สถานีพื้นดินสามารถใช้วิทยุติดต่อกับนักบินโดยตรง เพื่อที่จะนำ บ.ขับไล่ขึ้นทำการบินสกัดกั้น ในระบบรบร่วมระหว่างอากาศกับพื้นดินก็ใช้วิทยุติดต่อโดยตรงกับชุดเคลื่อนที่

**การติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานกับอากาศยาน**

ในกิจการทหาร เมื่อใช้ บ.ปฏิบัติภารกิจเป็นหมู่มีความจำเป็นที่จะต้องมีหัวหน้าหมู่ทำหน้าที่เป็นผู้บังคับบัญชา (Flight Commander) เพื่อสั่งการให้ลูกหมู่ปฏิบัติตามคำสั่ง หัวหน้าหมู่จะใช้วิทยุเป็นสื่อในการสั่งการในระหว่างที่ทำการบินอยู่ก็ใช้วิทยุพูดติดต่อซึ่งกันและกัน เพื่อแจ้งตำแหน่งที่อยู่ของ บ. นอกจากนี้ในด้านการค้นหาและช่วยเหลือผู้ประสบภัยที่ต้องใช้ บ.เป็นจำนวนมาก วิทยุจะอำนวยความสะดวกให้กับ บ.ต่างๆ เหล่านั้นในการติดต่อส่งข่าวสารซึ่งกันและกัน

การแบ่งประเภทวิทยุบนอากาศย่าน ( Airborne Radio Equipment) แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภทคือ

1. Command Set
2. Liaison Set

**Command set**

ในระยะเริ่มแรกที่มีวิทยุติดตั้งใช้บนเครื่องบินมีวัตถุประสงเพื่อจะให้ Flight Commander สั่งการหรือส่งข่าวสารไปยังนักบินอื่นที่ทำการบินด้วยกัน ความต้องการจึงเป็นเพียงการใช้การในระยะใกล้ ๆ เครื่องส่งออกแบบไว้มีกำลังมีกำลังออกอากาศต่ำและน้ำหนักเบา แต่ปัจจุบันนี้มี Command Set มีความหมายถึงการใช้งานทั่ว ๆ ไป จากที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องวัตถุประสงค์ในการใช้งาน และยังจัดไว้เป็นการติดต่อสื่อสารระยะใกล้ ( Short-range Communication ) เครื่องส่งกำลังออกอากาศต่ำ ย่านความถี่ไว้เป็น VHF,UHF ( Line-of-sight ) ระยะในการติดต่อกับเครื่องบินขึ้นอยู่กับความสูงเป็นสำคัญ กล่าวคือ เครื่องบินเจ็ตที่บินสูง 30,000 ฟุต สามารถติดต่อกับสถานีที่พื้นดินระยะห่างไกลกว่า 220 ไมล์ และถ้าเป็นการติดต่อระหว่าง บ.กับ บ. ที่ระยะสูง 30,000 ฟุต จะได้ระยะห่างกว่า 400 ไมล์

**LIATISON set**

เป็นวิทยุที่ออกแบบไว้ให่มีกำลังสูงเพื่อการติดต่อระยะไกล ( Long-range Communication ) เครื่องบินที่ต้องทำการบินในระยะทางไกล ๆ จะใช่วิทยุนี้ทำการติดต่อข่าวสารระหว่าง บ.กับ บ. หรือระหว่าง บ. กับสถานีที่พื้นดิน ( Hom-Base ) โดยกำหนดย่านความถี่ไว้เป็น HF ( High Frequency ) สมัยนี้ใช้ SSB ( Singe side band ) (ตามข้อตกลงของนานาชาติและ ICAO ได้ออกเป็นกฎเกณฑ์

**การติดตั้งใช้งาน**

การนำวิทยุประเภทต่าง ๆ ไปติดตั้งบนอากาศยานเพื่อใช้งานขึ้นอยู่กับแบบหรือชนิดของเครื่องบิน นอกจากนี้ก็มีเรื่องวัตถุประสงค์ใหญ่ ๆ ๒ ประการ คือ ใช้ในกิจการพลเรือนหรือกิจการด้านทหารตัวอย่างที่เห็นได้ง่าย ๆ

วิทยุ Command Set ทางพลเรือนใช้ VHF อย่างเดียว แต่ทางทหารใช้ทั้ง VHF และ UHF โดยกำหนดให้วิทยุย่านความถี่ UHF เป็นหลักในการใช้งาน และ VHF เป็นรอง สำหรับทางด้านขนาดของเครื่องบินก็มีส่วนเกี่ยวข้องด้วย กล่าวคือ เครื่องบินขนากเล็กจะใช้วิทยุที่มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็กมีเฉพาะ Command Set

ถ้าเป็นเครื่องบินขนาดใหญ่แต่สองเครื่องยนต์ขึ้นไปจะมีวิทยุใช้ทั้ง Command Set และ Liaison Set เพื่อความเข้าใจจะได้กล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปคือ

**ระบบวิทยุในย่านความถี่ HF ( HF Communication system )**

วิทยุในระบบนี้กำหนดย่านความถี่ตั้งแต่ 2-30 MHz. กำลังออกอากาศของเครื่องส่งประมาณ 100 วัตต์ จัดเป็นเครื่องส่งขนาดใหญ่บนอากาศยานและมีน้ำหนักมาก ปัจจุบันนิยมใช้เป็นแบบ HF/SSB ( Singe side band ) เพราะให้ประโยชน์ในเรื่องระยะทางในการติดต่อใช้งานได้ไกลมาก กองทัพอากาศมีใช้คือ

- RT-1149/ARC-200
- KHF-950
- KRX-1053

**ระบบวิทยุในย่านความถี่ VHF ( VHF Communication system )**

ตามปกติแล้วเมื่อกล่าวถึงย่านความถี่ VHF หมายถึงความถี่ตั้งแต่ 30 -300 MHz. และในย่านความถี่นี้การแพร่กระจายคลื่นจะเป็นในลักษณะ LINE – OF – SIGHT มีประโยชน์ในการติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานกับอากาศยานขณะทำการบินในอากาศ ( AIR – TO – AIR ) หรือระหว่างอากาศยานขณะทำการบินกับสถานีที่พื้นดิน ( AIR – TO – GROUND ) ถ้าเป็นการติดต่อสื่อสารบนพื้นดินแล้วจะถูกจะถูกจำกัดระยะทางเพียง 10 ไมล์เท่านั้น (ในทางทหารเครื่อง AIRBORNE VHFEQUIPMENT 100 – 756 MHz. มีกำลังออกอากาศของเครื่องส่ง 8 - 30 วัตต์ ส่วนใหญ่เป็นระบบ VHF/AM ( AMPLITUDE MODULATION ) และที่ระบบ VHF/FM ( FREQUENCY MODULATION ) ย่านความถี่ที่ใช้งาน 30 - 87.975 ก็มีเพื่อไว้ใช้ในภารกิจรบร่วม สำหรับกองทัพอากาศที่มีใช้อยู่ในขณะนี้ คือ

- EVR750
- AN/ARC – 186
- GIA 64W

**ระบบวิทยุในย่านความถี่ UHF ( UHF communication system )**

วิทยุที่ใช้ในย่านความถี่นี้ทางทหารกำหนดไว้ตั้งแต่ 225 – 400 MC การพัฒนาระบบวิทยุในย่านความถี่นี้เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้ ทำให้ได้ช่องสื่อสาร (CHANNEL) ย่านความถี่ VHF ที่มีใช้อยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ยังมีผลดีทางด้านอื่น ๆ อีกคือ

- มีการรบกวนจากไฟฟ้าสถิตในชั้นบรรยากาศน้อย
- เป็นย่านความถี่ที่มีใช้ไม่แออัด เมื่อเปรียบเทียบกับย่านอื่น
- มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และใช้สายอากาศขนาดเล็ก
- ต้องการกำลังงานที่จะจ่ายให้กับเครื่องน้อย

- ตัวเครื่องวิทยุสามารถจะนำไปมาได้สะดวก

- การแพร่กระจายคลื่นเป็นทิศทางไม่ยุ่งยากเพราะการออกแบบสายอากาศไม่ยุ่งยากนักเครื่องวิทยุในย่านความถี่นี้มีช่องสื่อสารให้ใช้งานได้ถึง 1750 ช่องสื่อสาร โดยที่แต่ละ CHANNEL ห่างกัน 100 KHz ต่อมาได้พัฒนาเป็น 3500 ช่องสื่อสาร แต่ละ CHANNEL ห่าง 50 KHz ปัจจุบันนี้เป็น 7000 ช่องสื่อสาร (25 KHz. SPACING) สำหรับกองทัพอากาศที่มีใช้อยู่ในขณะนี้ คือ

- AN/ARC – 164

- B1G-PRD

- KTR909B

**การใช้ร่วมกับระบบอื่น**

ระบบวิทยุบนอากาศยานนอกจากเจ้าหน้าที่ในเรื่องการติดต่อสื่อสารแล้วยังสามารถที่จะนำไปใช้ร่วมกับระบบอื่น ๆ ได้คือ

๑. ใช้ร่วมกับระบบหาทิศ (DIRECTION FINDER) ของสถานีที่พื้นดิน ตามปกติแล้วสนามบินทุกแห่งจะต้องมีบริการวิทยุหาทิศเพื่อบอกทิศทางให้กับเครื่องบิน ทางผู้ขอใช้บริการคือ นักบินจะต้องใช้วิทยุเป็นเครื่องมือในการติดต่อสื่อสาร นอกจากนี้ในเวลาที่ต้องการให้สถานีที่พื้นดินหาทิศทางให้นักบินจะต้องใช้วิทยุให้ถูกต้อง คือ ถ้าที่ CONTROL BOX มีตำแหน่ง TONE นักบินจะต้อง ON สวิทช์นี้เพื่อทำการส่งสัญญาณให้กับสถานี D/F ในระยะเวลาอันสั้น ในกรณีที่ไม่มีสวิทช์นี้ให้ KEYED MICROPHONE (PRSH-TO-TALK) ไว้ชั่วระยะเวลาอันสั้นก็ได้ การใช้ในระบบนี้จะต้องเป็นวิทยุในระบบ VHF/AM และ UHF/AM เท่านั้น ที่กองทัพอากาศมีใช้ คือ AN/TRD-9 เป็น VHF/DF และ AN/CRD-6 เป็น UHF/DF สำหรับที่ดอนเมืองได้ติดตั้ง VHF/DF รุ่นใหม่ คือ SERVO MODEL 5000

๒. ใช่เป็น UHF DIRECTION FINDER SYSTEM วิทยุระบบ UHF เมื่อมีชุดพิเศษมาต่อรวมอยู่ด้วย (DIRECTION FINDER GROUP) ที่กองทัพอากาศมีใช้ คือ AN/ARC – 25 หรือ AN/ARA – 50 จะทำให้ชุดนี้เป็นเครื่องกำหนดทิศทางได้ (HOMING) โดยใช้กับสถานีที่พื้นดินหรือระหว่างอากาศยานกับอากาศยาน โดยที่นักบินผักสวิทช์ที่ CONTONE BOX ไว้ในตำแหน่ง ADF VHF/AM

๓. ใช้เป็น VHF/AM HOMER วิทยุระบบ VHF/AM เมื่อมีชุดพิเศษมาต่อรวมด้วยสามารถใช้เป็น HOMING ได้เช่นเดียวกัน ระบบเก่าที่ ทอ.มีใช้คือ AN/ARA – 31 ใช้ฟังเสียงสัญญานเป็นเครื่องกำหนดทิศทาง ต่อมาใช้ AN/ARA – 56 ร่วมกับชุด AN/ARC – 131 ปัจจุบันนี้เป็นส่วนใหญ่ใช้ AS – 1922 ร่วมกับชุด AN/ARC – 131 สามารถอ่านทิศทางได้จาก BEARING INDICATOR ทำให้สะดวกในการใช้ยิ่งขึ้น

**สรุป**

วิทยุที่ติดตั้งบนอากาศยานมีความจำเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบันนี้ เพราะมีเครื่องบินจำนวนมากบินอยู่ในท้องฟ้าและต้องใช้บริการควบคุมการจราจรทางอากาศ ถ้าเครื่อง

บินขากวิทยุจะเกิดปัญหาในการติดต่อขึ้นทันที การใช้สนามบินจะเกิดการสับสนและเกิดอุบัติเหตุได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อต้องทำการบินในระยะทางไกล ๆ เช่นกิจการสากลซึ่งบริษัทการบินต่าง ๆ ดำเนินการอยู่ในขณะนี้มีความจำเป็นจะต้องมีวิทยุอย่างเพียงพอ จะเห็นได้ว่ามีเครื่องรับ-ส่งวิทยุในระบบ VHF ถึง 2 ชุด มีระบบ SSB ย่านความถี่ HF อีก 1 ชุด สำหรับเครื่องบินทหารตั้งแต่ 2 เครื่องยนต์ขึ้นไปมักจะติดตั้งระบบวิทยุครบทุกแบบ คือ VHF/ AM, VHF/FM,UHF/AM, AND HF/AM, SSB เพื่อความปลอดภัยในการติดต่อสื่อสาร คือ เมื่อระบบใดระบบหนึ่งเกิดเสียขึ้นก็ยังมีระบบอื่นสำรองใช้การได้อยู่

สำหรับกองทัพอากาศมีเครื่องบินอยู่หลายแบบ ทั้ง บ. และ ฮ. ดังนั้นจึงมีวิทยุอยู่หลายแบบด้วยกัน ขณะนี้มีอยู่ประมาณ 30 แบบ ทั้ง Command และ Liaison Set อาจสรุปได้ว่าถ้าเป็น บ.เครื่องยนต์เดียวจะมีวิทยุใช้เป็น Command Set อย่างเดียว โดยมี UHF/AM เป็นหลัก สำหรับ VHF/ AM หรือ VHF/FM อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ และอาจจะมีทั้งหมดเลยก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิด บ.ว่าเป็น ขับไล่ ธุรการหรือ โจมตี ทางด้านเครื่องบินลำเลียง เช่น AVRO – 748 และ

C – 130H จะมีวิทยุติดตั้งทุกระบบ คือ Command และ Liaison Set

สิ่งที่ควรจะจดจำเกี่ยวกับวิทยุประจำอากาศยานอีกประการหนึ่งก็คือ จะต้องเป็นเครื่องรับส่งที่มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

**ระบบวิทยุย่านความถี่ UHF ( Have Quick)**

เป็นระบบวิทยุที่ใช้งานเป็นหลักทางทหาร ถูกเรียกว่าเป็นวิทยุประเภท “ command radio”

**จุดประสงค์ในการใช้งาน**

1. ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ประเภท air-to-ground , air-to –air รูปแบบการส่งเป็นแบบ AM

2. มีคุณสมบัติในการป้องกันการดักฟังของฝ่ายตรงข้าม ( freq. hopping)

3. สามารถใช้เป็นระบบนำร่อง ( navigation) ให้กับ บ. ในการการนำ บ.บินกลับสู่สนามบิน โดยเครื่องวิทยุจะให้ relative bearing ไปขับเข็ม indicator ของเครื่องวัดให้ชี้ไปยังทิศทางของสถานีวิทยุ UHF โดยทั่วไปจะติดตั้งอยู่ใกล้กับสนามบิน

**กล่าวโดยทั่วไปของเครื่องวิทยุ**

ทำงานในย่านความถี่ UHF มาตรฐานที่ใช้เฉพาะทางทหารคือ 225.000 – 399.975 MHz สามารถใช้งานได้ normal mode และ anti jam mode ( have quick II ) มีช่องควาสมถี่ใช้งานจำนวน 7000 ช่องความถี่ ความถี่ guard อยู่ที่ 243 MHz ซึ่งระบบวิทยุตัวนี้มีความคงทนและ เชื่อถือได้สูง

**Have Quick II ( Anti jam (AJ))**

คือระบบที่ป้องกันการดักฟังของฝ่ายตรงข้าม โดยใช้หลักการที่ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดจากความถี่หนึ่งไปยังความถี่อื่นๆไปเรื่อยๆ ( freq, hopping) ในย่านความถี่ UHF ซึ่งช่วงเวลาในการ hopping นั้นทำโดยอัตโนมัติอย่างรวดเร็วมากๆ เป็นไมโครวินาที

การทำงานใน normal mode นั้นจะไม่มีการใช้เทคนิคของ freq. hopping โดยความถี่ที่ใช้งานจะรับ-ส่งในความถี่ที่ตั้งไว้ใช้งานตามปกติ

การทำงานในระบบ have quick นั้นความถี่ที่ hopping ไปนั้นจะมีรูปแบบการ hop ของมันพร้อมกับช่วงเวลาที่ใช้ในการ hopping โดยเครื่อข่ายที่ติดต่อกันนั้นต้องมีความสัมพันธ์กันจึงติดต่อกันได้

**ความต้องการของเทคนิคการ anti jam**

เพื่อที่จะให้การใช้งานแบบ anti jam mode ทำงานได้นั้น ต้องมีการกำหนดรูปแบบการใช้งาน 3 อย่าง ให้กับระบบ ได้แก่ tine-of-day( TOD), word-of-day (WOD), และ net number

๑. Time – of – Day (TOD) คือตัวกำหนด สัญญาณนาฬิกาให้กับเครื่องวิทยุนั้นเอง TOD ต้องมีความละเอียดและถูกต้อง แน่นอน เพื่อที่จะให้เครือข่ายวิทยุที่ใช้งานร่วมกันสามารถติดต่อกันได้รู้เรื่อง เพราะเครื่องวิทยุแต่ละเครื่องที่ติดต่อกันในระบบ Have Quick นั้นความถี่ที่ hopping ไปนั้นต้องเป็นช่วงเวลาและความถี่เดียวกัน โดยทั่วไปแล้วเครื่องจะรับ TOD แรกโดยอัตโนมัติหลังจากเปิดเครื่องใช้งานครั้งแรกและถูกเก็บไว้ที่ PRESET 1 โดย TOD แรกที่เกิดขึ้นที่ normal mode ส่วน TOD อื่นๆที่ตามมาอาจเกิดขึ้นที่ normal mode หรือ AJ mode ก็ได้ TOD อื่นๆที่ถูกส่งตามมาภายหลังจะถูกปฏิเสธการรับ จนกว่าผู้ใช้งานจะกำหนดให้วิทยุนั้นรับ TOD อันใหม่ ผู้ใช้ก็สามารถกำหนดการส่ง TOD ที่อยู่ในเครื่องของตนไปยังเครื่องวิทยุอื่นๆได้เหมือนกัน ในระบบ HQII นั้นการกำหนดวันที่เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลใน TOD โดยจะเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับวิทยุในการที่จะส่ง WOD ในช่วงวันเวลาเดียวกัน โดยเครื่องวิทยุทั้งหมดถูกกำหนดเวลาตาม Universal Time Constant ( UTC)

๒. Word – of – Day คือโปรแกรมกำหนดรูปแบบของความถี่ที่ hopping ไปให้อยู่ในรูปแบบและอัตราการ Hopping เดียวกัน เครื่องวิทยุไม่สามารถทำงานใน AJ mode ได้ถ้าปราศจาก WOD , WOD ทำหน้าที่คล้ายกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เล็กๆซึ่งถูกป้อนข้อมูลโดยนักบินหรือช่างเครื่องบิน โดย WOD ที่ป้อนให้กับเครื่องนั้นถูกจัดเก็บไว้ใน memory ของเครื่องซึ่งเมื่อปิดเครื่องแล้วยังคงข้อมูลไว้อยู่ การใช้งาน WOD นั้นกำหนดให้ใช้งานผ่านทาง preset channel ที่ช่อง 20-14 โดยช่องที่ 20-15 กำหนดไว้เป็น WOD length ส่วนช่องที่ 15 กำหนดไว้เป็น day – of - month โดย date code ทำงานสัมพันธ์กับ TOD เพื่อบอกวันเวลาที่ถูกต้องแน่นอน เมื่อวันที่เปลี่ยนในช่วงเที่ยงคืน ของแต่ละวัน เครื่องวิทยุจะกำหนดเป็นวันใหม่พร้อมกับเปลี่ยน WOD ตามวันใหม่นั้นโดยอัตโนมัติ

- **Multiple Word – of – Day (MWOD)** เราสามารถป้อน WOD ได้ถึง 6 WOD ในครั้งเดียว คือ เราสามารถป้อน WOD ของวันอื่นตามหลังเพิ่มเข้าไปได้สูงถึง 6 วัน ในครั้งเดียว โดยทำการป้อนแบบ manual หรือป้อนโดยเครื่องมือพิเศษชื่อ KYK-13 ก็ได้มีการกำหนด mode การทำงานไว้ 4 mode ไว้ที่ช่อง 20 เพื่อบอกให้เครื่องวิทยุทำงานตามต้องการ ได้แก่ กำหนดให้ป้อน WOD, ลบ WOD, ใช้งาน AJ mode, load FMT

| | | |
|---|---|---|
| Verify/Operate (VER/OP) | 220.000 | Radio will operate |
| MWOD LOAD (M-LOAD) | 220.025 | Load WODs |
| MWOD ERASE (ERASE) | 220.050 | Erase WODs |
| FMT.CNG | 220.075 | Loads FMT training frequencies |

**Table 3-2. Programming Codes**

๓. **Net number**

ทำหน้าที่คล้ายกับตัวกำหนดการเลือกกลุ่มของความถี่ที่ใช้งาน ( freq. selection) , net number เป็นตัวจัดให้เครื่องวิทยุในกลุ่มติดต่อกันโดยใช้ WOD และ TOD เดียวกันโดยปราศจากการรบกวน net number จขึ้นต้นด้วย A และตามด้วยตัวเลข 3 หลักคือ 000 ถึง 999 จะเห็นได้ว่าสามารถจัดได้สูงสุดถึง 1000 ช่อง

net number ที่ลงท้ายด้วย 00 เป็นตัวกำหนดว่าเป็น A-net และ B-net

net number ที่ลงท้ายด้วย 25 เป็นตัวกำหนดกลุ่ม NATO

net number ที่ลงท้ายด้วย 50 เป็นตัวกำหนดกลุ่มการใช้งาน NON NATO

net number ที่ลงท้ายด้วย 75 เป็นตัวกำหนดการรองรับการใช้งานในอนาคต

สรุปว่า การที่ระบบการใช้งานแบบ HQII ได้นั้นต้องประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ต้องมี WOD เดียวกัน, สัญญาณนาฬิกาเดียวกัน(TOD) และ ต้องอยู่ในกลุ่มความถี่ใช้งาน (net number) เดียวกัน

**Conferencing**

การใช้งานแบบ conference สามารถทำได้โดยตั้งการทำงานของเครื่องไว้ที่ AJ mode โดยกำหนดให้ตัวเลข 2 หลักสุดท้ายใน WOD ที่ช่อง 19 ดังนี้ ถ้า 2 หลักสุดท้ายลงท้ายด้วย 00 หรือ 50 สkมารถ conference ได้ แต่ถ้า 2 หลักสุดท้ายลงท้ายด้วย 25 หรือ 75 ไม่สามารถ conference ได้ , การ conference ไม่สามารถกระทำได้ใน secure voice mode แต่สามารถใช้ได้ใน FMT net mode

**๕ แนวโน้มระบบวิทยุสื่อสารในอนาคต**

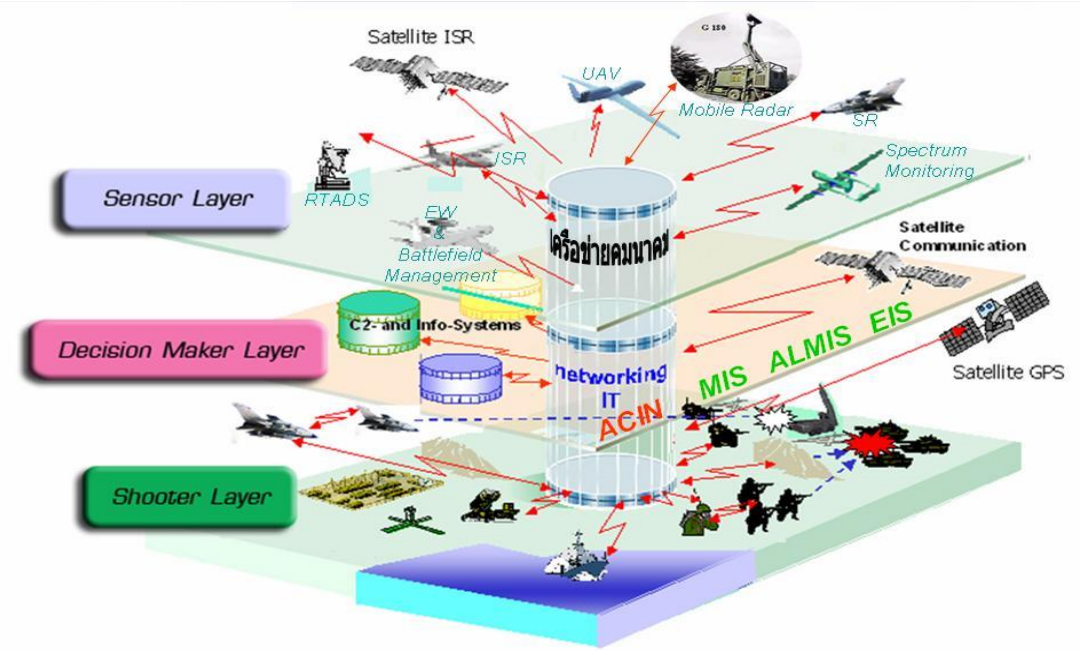
การพัฒนาเทคโนโลยีมีแนวโน้มว่าการสื่อสารในอนาคต จะมีอิทธิพลต่อบทบาทของกองทัพ มีผลกระทบโดยตรงต่อการสนับสนุนภารกิจทางทหาร ทั้งยังเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญในการกำหนดแนวทางในการพัฒนา Hardware Software และ Peopleware โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการสื่อสารแบบไร้สายและระบบเชื่อมโยงข้อมูล (Data Link) เมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และมีการพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากระบบอนาล็อกในยุคที่ 1 มาเป็นระบบดิจิทัลในยุคที่ 2 และกำลังจะก้าวเข้าสู่ยุคที่ 3 (Third Generation) ซึ่งเป็นการหลอมรวมเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน (Technology Convergence) ระหว่างระบบสื่อสารไร้สายและสื่อผสมอื่นๆ หน่วยงานของ ทอ.จึงจำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลในการกำหนดภัยคุกคาม เพื่อใช้ในการวางแผนอย่างมีทิศทาง ถูกต้อง และสอดคล้องกับแผนการพัฒนาเทคโนโลยีสื่อสารในอนาคต

ความถี่ที่ถูกนำมาใช้งานปัจจุบันมีย่านความถี่ระหว่าง 3 kHz – 60 GHz สำหรับย่านความถี่ตั้งแต่ 60 - 300 GHz สามารถนำมาใช้งานได้ในทางเทคนิค ในขณะที่ความถี่ 300 GHz ขึ้นไปยังไม่ได้มีการพิจารณาใช้งาน โดยมีองค์กรที่ทำหน้าที่กำกับดูแลความถี่ในระดับโลก ๓ องค์กร คือITU (International Telecommunication Union), FCC (Federal Communication Commission)และ WRC (World Radio Conference)

ปัจจุบันกองทัพอากาศ อยู่ในระหว่างการเตรียมการเข้าสู่เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 ซึ่ง ทอ.ก็ได้นำเทคโนโลยีที่ทันสมัย รวดเร็ว และปลอดภัยมาใช้งานในระบบป้องกันทางอากาศ(RTADS Phase I, II, III) และเตรียมแผนพัฒนาโครงสร้างของระบบเพื่อก้าวสู่ยุค Digital Air Force

สภาพสิ่งแวดล้อมของโลกที่เปลี่ยนแปลงไปจากยุคอุตสาหกรรม (Industrial Age) มาสู่ยุคข้อมูลข่าวสาร (Information Age) ที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารผลักดันทำให้เกิดสงครามยุคใหม่เป็นสงครามในยุคข้อมูลข่าวสาร(Information Age Warfare) โดยใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ในการเชื่อมเครือข่ายและระบบข้อมูลข่าวสารระหว่างหน่วยกองกำลังต่างๆของฝ่ายเรา โดยมีองค์ประกอบหลักของความเสถียรภาพของระบบที่มีศูนย์กลางการปฏิบัติ (Centric Warfare) ทั้งโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure System) ของระบบสารสนเทศที่เป็นระบบงานด้านต่างๆ สนับสนุน และระบบสื่อสารโทรคมนาคมอิเล็กทรอนิกส์ ให้เป็นมาตรฐานเดียวกันตลอดทั่วทั้งกองทัพอากาศและเป็นการบูรณาการระบบต่างๆ ให้สามารถใช้ประโยชน์ร่วมกันได้

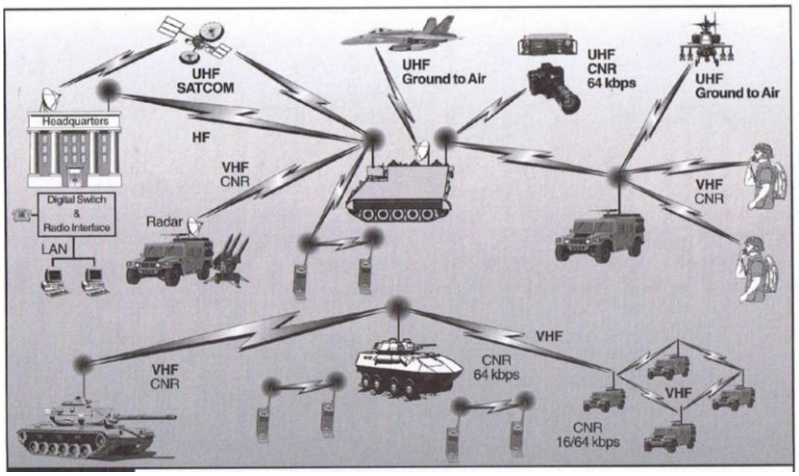
นโยบายของผู้บัญชาการทหารอากาศ ปี พ.ศ.๒๕๕๐ ในด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและการสื่อสาร ให้พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทั้งระบบสารสนเทศและการสื่อสารให้เป็นศูนย์กลางการปฏิบัติ (Centric Operation) มุ่งสู่การปฏิบัติการใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO : Network Centric Operation) ในการดำรงและรองรับข่ายการติดต่อสื่อสารทุกชนิดได้ อีกทั้งใช้ระบบสารสนเทศแบบบูรณาการ (Data Centric Operation) เข้าด้วยกัน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อดำรงและรองรับข่ายการติดต่อสื่อสารทุกชนิด ประสานการทำงานเข้าด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด




รูปที่ ๔.๖๒ การปฏิบัติการใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO : Network Centric Operation)

**การปฏิบัติการที่ใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางเครือข่าย (Radio Centric Network)**

หมายถึงการปฏิบัติการที่นำเอาระบบวิทยุมาใช้เป็นตัวเชื่อมเครือข่ายทางวิทยุเข้าด้วยกัน แล้วทำการประมวลผลที่ศูนย์ควบคุม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุม สั่งการ และตัดสินใจการใช้การปฏิบัติการทางทหาร โดยมีเวลาใกล้เคียงกับเวลาจริงมากที่สุด (Near Real Time) ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของ $C^4I$ (Command, Control, Communication, Computer and Intelligence) ปัจจุบันกระทรวงกลาโหมไทยได้พัฒนาเป็นระบบ $C^4ISR$ (Command, Control, Communication, Computer and Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)




รูปที่ ๔.๖๓ การปฏิบัติการที่ใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางเครือข่าย (Radio Centric Network)

จากรูป ๒.๔.๖๓ เป็นการนำเอาข้อมูลข่าวสารจากเครือข่ายต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากเรดาร์, ดาวเทียม, เรือ, อากาศยาน และ PC Data มาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันระบบวิทยุ HF, VHF, UHF ซึ่งจะทำให้ศูนย์ควบคุมและหน่วยทางยุทธวิธีที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกัน สามารถรับรู้ข้อมูลและประสานการปฏิบัติการทางทหารได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล

การที่จะใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางในการเชื่อมต่อเครือข่าย จำเป็นจะต้องวางแผนจัดหาระบบวิทยุที่มีขีดความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูล ทั้ง ๒ ระบบ คือ วิทยุที่ติดตั้งใช้งานภาคพื้นและวิทยุติดตั้งบนอากาศยาน การวางระบบโครงข่าย รวมทั้งระบบรักษาความปลอดภัย (Security system) ที่สร้างความมั่นใจในการปฏิบัติการทางทหารมีความถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ เป็นต้น

สิ่งสำคัญที่กองทัพอากาศกำลังดำเนินการคือการจัดเตรียมบุคลากรเพื่อรองรับระบบ การพัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถให้กับบุคลากรของกองทัพ เหล่านี้จะช่วยให้กองทัพเข้าสู่เทคโนโลยีแห่งยุคที่ ๓ ตามวิวัฒนาการของโลกได้อย่างมั่นคง

# บทที่ ๕
# ระบบเรดาร์ ทอ.

## ๑.บทนำ

### ๑.๑ กล่าวทั่วไป

คำว่าเรดาร์ RADAR ย่อมาจากคำว่า Radio Detection And Ranging เป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้คลื่นวิทยุ ตรวจค้นหาตำแหน่งของเป้าหมาย โดยสามารถอ่านค่าระยะทาง,ทิศทาง ตลอดจนลักษณะของเป้าหมายนั้นๆได้ ตัวเครื่องส่งจะสร้างความถี่วิทยุแล้วป้อนเข้าสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศจะส่งพลังงานความถี่วิทยุออกไปเป็นลำคลื่น แล้วกวาดไปทั่วพื้นที่รัศมีทำการ คลื่นความถี่วิทยุนี้ เมื่อกระทบเป้าหมายจะสะท้อนคลื่นวิทยุกลับมาเข้าเครื่องรับที่มีความไวพิเศษ แม้ว่าคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับอ่อนกำลังลง แต่หลังจากถูกวงจรขยายกำลังให้สูงพอก็จะป้อนสัญญาณผ่านระบบต่างๆ แล้วปรากฏบนจอเรดาร์ได้

### ๑.๒ ประวัติความเป็นมา

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

ปี ค.ศ.๑๙๔๑ ช่วงเวลาดังกล่าวเกิดสงครามโลกครั้งที่สอง อังกฤษต้องใช้เครื่องบินจำนวนมากขึ้นไปเตรียมพร้อมอยู่ในอากาศตลอดแนวชายฝั่ง เพื่อเตรียมการขัดขวางการโจมตี จากฝูงบินเยอรมันที่มุ่งเข้าทิ้งระเบิดมหานครลอนดอน แต่การนำเครื่องบินขึ้นไปเตรียมพร้อมบนอากาศตลอดเวลานั้น ทำให้อังกฤษประสบปัญหาขาดแคลนเชื้อเพลิง นักบินได้รับความเหนื่อยล้าเกิดความสึกหรอของเครื่องบินโดยเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก อังกฤษจึงได้จัดระบบการป้องกันภัยทางอากาศใหม่ โดยตั้งสถานีเรดาร์เป็นระยะตลอดชายฝั่ง สถานีเรดาร์เหล่านี้ทราบการเคลื่อนไหวของเครื่องบินข้าศึกที่เข้ามาแล้วจึงสั่งการไปยังเครื่องบินที่เตรียมพร้อมอยู่ที่พื้นดิน ขึ้นไปสกัดกั้นบนอากาศ วิธีการเช่นนี้อังกฤษสามารถตรวจพบฝูงบินเยอรมันได้ตั้งแต่ระยะไกลๆ จึงมีเวลาทำลายเครื่องบินข้าศึกลงได้มากขึ้น และลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ลดความเหนื่อยล้าของนักบินและลดความสึกหรอของเครื่องบิน

ต่อมาหลังสงครามโลกครั้งที่สองได้มีการดัดแปลงแก้ไขให้เครื่องเรดาร์มีรัศมีทำการไกลขึ้นสามารถวัดได้ระยะสูงขึ้น จึงมีการสร้างเครื่องเรดาร์แบบใหม่ๆที่ได้แก้ไขจุดอ่อนของแบบเก่าออกมา ใช้งานอยู่ตลอดเวลา ความมุ่งหมายที่ต้องมีการดัดแปลงก็เพื่อ

๑. มีกำลังส่งสูง และได้รัศมีทำการไกลออกไป
๒. สามารถจับเป้าหมายได้แน่นอน
๓. มีความรวดเร็วที่จะได้สัญญาณป้อนแก่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ Data Automationสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
๔. มีความสะดวกในการใช้งาน และง่ายต่อการปรนนิบัติซ่อมบำรุง
๕. มีความแข็งแรง ทนทานต่อการเคลื่อนย้าย
๖. สามารถขจัดการรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์ของข้าศึกได้ทุกชนิดทั้ง ECM และ ECCM

**๑.๓ วิวัฒนาการเรดาร์ของ ทอ.ไทยในอดีต**

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

เนื่องจากเรดาร์แบบ AN/TPS – 1D และ AN/TPS – 10D เป็นเรดาร์ขนาดเล็กและล้าสมัย ผู้สร้างได้เลิกสร้าง จึงมีปัญหาทางด้านชิ้นส่วนอะไหล่ ทอ.จึงเปลี่ยนเป็นเรดาร์ที่มีขนาดใหญ่ กำลังส่งสูงและทันสมัยขึ้น คือเรดาร์ค้นหาแบบ AN/FPS – 20A และเรดาร์วัดระยะสูงแบบ AN/FPS – 89 โดยได้รับการช่วยเหลือจากประเทศสหรัฐ

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

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

**๒. หลักการทำงานของเรดาร์**

**๒.๑ หลักการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุ**

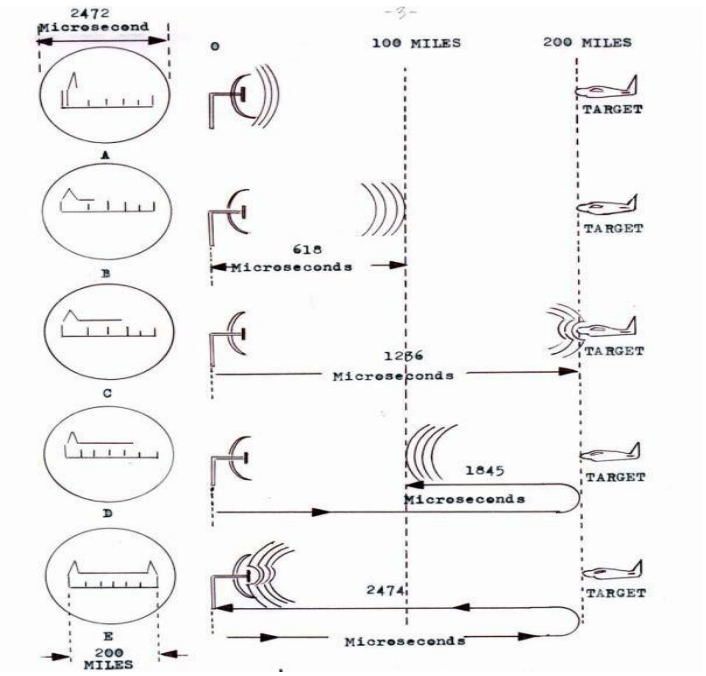
การสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุความถี่สูงมากๆ อาศัยหลักการทางวิทยาศาสตร์ ๓ ข้อ คือ

๑. ความถี่ของคลื่นไมโคร ระหว่าง 1,000 MHz. ถึง 6,000 MHz. สามารถสะท้อนผิวพื้นได้เช่นเดียวกับการสะท้อนแสง

๒. บรรดาความถี่วิทยุที่ออกจากเครื่องส่งด้วยกำลังสูง สามารถบังคับให้พุ่งออกเป็นลำคลื่นเหมือนลำแสงไฟฉายได้ โดยอาศัยคุณสมบัติของสายอากาศแบบที่มีตัวสะท้อนรูปกลีบส้ม (Parabolic Reflector)

๓. เพราะว่าคลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วของแสง (๑๖๑,๗๕๐ ไมล์ทะเลต่อวินาที) เราจึงอาศัยความเร็วคงที่นี้ เป็นหลักในการคำนวณหาระยะทางของเป้าหมายได้

คลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วแสงคือ ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์บกต่อหนึ่งวินาที หรือเท่ากับ ๑๖๑,๗๕๐ ไมล์ทะเลต่อวินาทีฉะนั้นระยะทาง ๑ ไมล์ทะเลจะใช้เวลาเท่ากับ ๖.๑๘ ไมโครเซคกั้น คลื่นพัลส์ของเรดาร์จากสายอากาศพุ่งสู่อากาศคราวใดที่กระทบเป้าหมายจะมีคลื่นพัลส์สะท้อนกลับ จึงหาระยะทางของเรดาร์ได้ โดยการวัดเวลาทั้งขาไปและขากลับรวมกัน ฉะนั้นระยะทาง หนึ่งเรดาร์ไมล์จึงเท่ากับ ๑๒.๓๖ ไมโครเซคกั้นซึ่งความหมายของหนึ่งเรดาร์ไมล์ คือ ระยะทาง ๑ ไมล์ทะเลขาไป และ ๑ ไมล์ทะเลขากลับด้วย

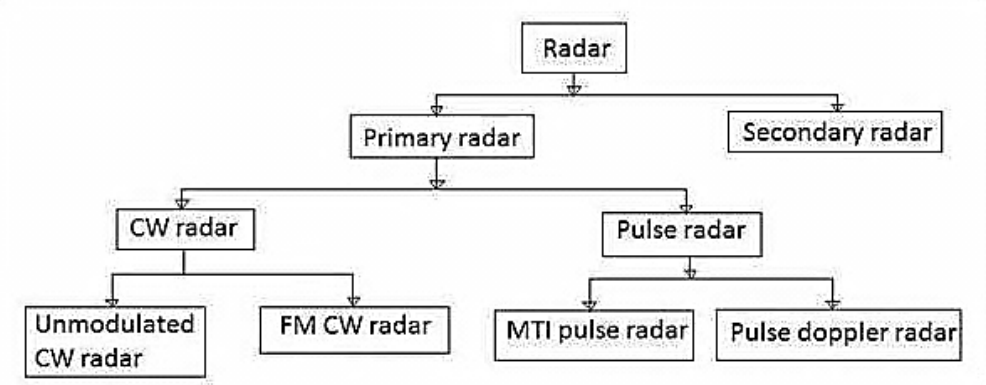



รูปที่ ๕.๑ Echo Ranging Principle

จากรูปที่ ๑ เริ่มจากภาพ A เมื่อส่งคลื่นพัลส์ออกไป ใช้เวลา 618 μs.จะได้ระยะทาง ๑๐๐ ไมล์ทะเลที่ภาพ B ซึ่งเท่ากับครึ่งทางไปสู่เป้าหมายที่หน้าจอ เส้นกวาดเคลื่อนที่ไปเศษ ๑ ส่วน ๔ ของระยะทางทั้งหมดในจอเรดาร์ ที่ภาพ C พัลส์เรดาร์กระทบเป้าหมายที่ห่าง ๒๐๐ ไมล์ใช้เวลา 1,236 μs. ตอนนี้เส้นกวาดหน้าจอไปได้ครึ่งทางแล้ว ที่ภาพ D คลื่นสะท้อนกลับใช้เวลา 1,854 μs. เส้นกวาดไปได้เศษ ๓ ส่วน ๔ ของหน้าจอ เมื่อคลื่นสะท้อนกลับเข้าสายอากาศ รวมเวลาเป็น 2,474 μs. เส้นกวาดหน้าจอจะสุดทางพอดี ที่ภาพ E แล้วก็เริ่มส่งพัลส์ลูกใหม่ออกไปอีก รูปดังกล่าวเป็นการอธิบายหลักการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุเท่านั้น

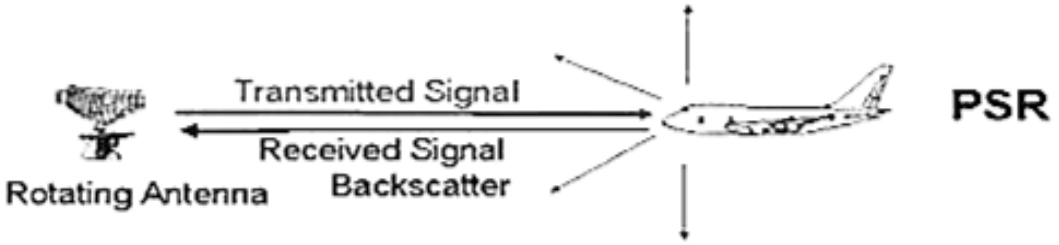
**๒.๒ ระบบเรดาร์เบื้องต้น**

ระบบเรดาร์ แบ่งตามหลักการทำงานสามารถแบ่งได้ ๒ แบบ คือ



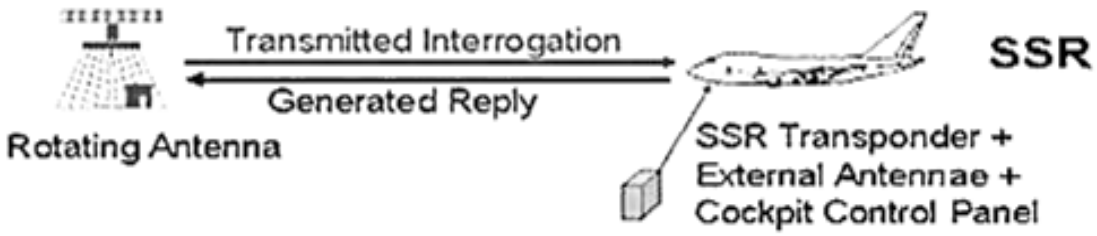

รูปที่ ๕.๒ การแบ่งระบบเรดาร์

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




รูปที่ ๕.๓ Primary Surveillance Radar (PSR)

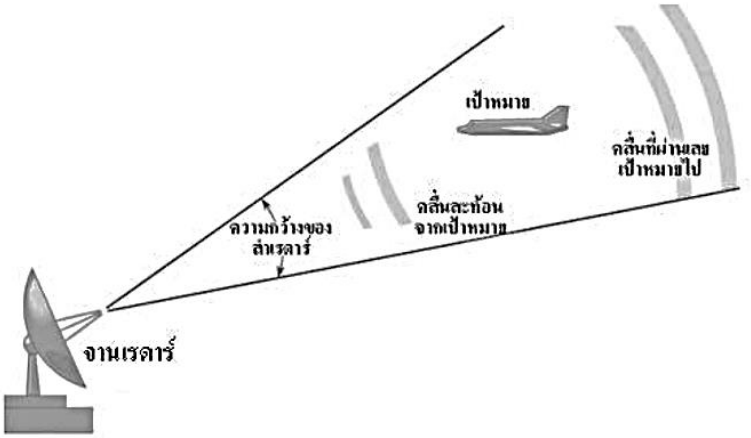
**๒.๒.๒ Secondary Surveillance Radar (SSR)** เป็นเรดาร์ที่ส่ง Code ไปถามแล้วตอบกลับมา




รูปที่ ๕.๔ Secondary Surveillance Radar (SSR)

**๒.๓ หลักการทำงานของเรดาร์**

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

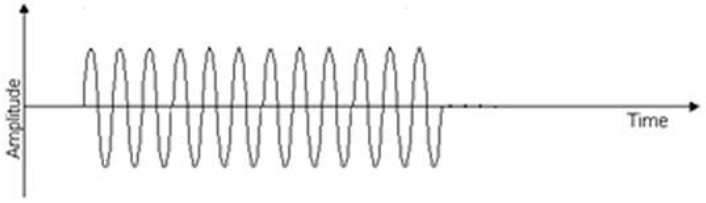



รูปที่ ๕.๕ หลักการทำงานของเรดาร์

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

**๒.๔ CW เรดาร์ (Continuous Wave Radar)**

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

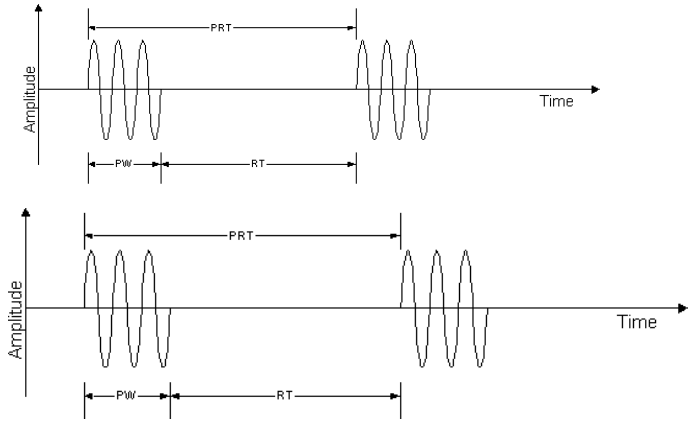



รูปที่ ๕.๖ CW เรดาร์ (Continuous Wave Radar)

หลักการของ Continueous Wave Modulation อาศัยทฤษฎีของ Doppler Effect โดยให้ช่วงสูงของคลื่นคงที่ แต่ความถี่แปรเปลี่ยนไปตามระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเป้าหมาย ตัวอย่างเช่น ถ้ายืนอยู่ที่ชานชลาสถานีรถไฟเมื่อกำลังจะผ่านสถานี หูเราจะได้ยินเสียงหวูดรถไฟแหลมขึ้น หรือความถี่ที่ได้ยินสูงขึ้นเมื่อรถไฟแล่นผ่านสถานีไปแล้ว หูจะได้ยินเสียงหวูดรถไฟทุ้มลง หรือความถี่ที่ได้ยินต่ำลง

**๒.๕ Pulse เรดาร์**

หลักการของ Pulse Modulation เครื่องส่งจะส่งพลังงานคลื่นวิทยุเป็นห้วงสั้นๆ เรียกว่า “คลื่นพัลส์”นานห้วงละ ๒ - ๓ ไมโครเซคกั้น (๑ ไมโครเซคกั้น เท่ากับเศษ ๑ ส่วนล้านวินาที) เมื่อคลื่นพัลส์กระทบเป้าหมายพลังงานส่วนน้อยๆ (Echoes) จะสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องรับในช่วงเวลาระหว่างห้วงสั้นๆนั้น เนื่องจากความเร็วของคลื่นวิทยุเท่ากับ ความเร็วของแสงซึ่งคงที่ ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์ต่อวินาที หรือประมาณ ๓๒๗ หลาต่อไมโครเซคกั้นจึงสามารถหาระยะห่างของเป้าหมายจากสถานีส่งได้ หลักการนี้ใช้มากที่สุด เช่น ในระบบเรดาร์ป้องกันภัยทางอากาศ, ระบบควบคุมทางอากาศยุทธวิธี ถ้าส่งเป็นพัลส์คู่ หรือขบวนพัลส์จะพบในระบบเรดาร์พิสูจน์ทราบ เป็นต้น




รูปที่ ๕.๗ Pulse เรดาร์

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

ระบบตรวจจับหลักในปัจจุบันคือ ระบบเรดาร์หลัก การทำงานที่สำคัญคือ การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเป้าหมาย โดยรูปแบบพื้นฐานของการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเรดาร์มีสองแบบ คือแบบ Pulse และแบบ Continuous Wave (CW) โดยเรดาร์แบบ Pulse จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นช่วงสั้นๆ (หรือพัลส์-Pulse)และคอยดักรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ทิศทาง และระยะทางของเป้าหมายสามารถคำนวณได้จากมุมของสายอากาศและระยะเวลาสำหรับสัญญาณ Pulse ในการสะท้อนกับมาหาเครื่องรับ ส่วนเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง และอาศัยปรากฏการดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ในการคำนวณหาค่าความเร็วของเป้าหมาย โดยปรากฏการ Doppler คือการที่คลื่นใดๆมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นหรือวัตถุที่สะท้อนคลื่นมีการเคลื่อนที่เข้าหา หรือออกจากกัน โดยการเคลื่อนที่เข้าหากันจะทำให้ความถี่สูงขึ้น และการเคลื่อนที่ออกจากกันจะทำให้ความถี่ต่ำลง

การแพร่คลื่นของเรดาร์ทั้งสองแบบ มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป อย่างไรก็ดีเนื่องจากเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง จึงไม่สามารถคำนวนระยะทางจากเวลาที่ใช้ในการสะท้อนคลื่นได้ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นเรดาร์แบบ Pulse Doppler ขึ้น ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาข้อดีของเรดาร์ทั้งสองแบบเข้าด้วยกันโดยเรดาร์แบบนี้สามารถวัดระยะเป้าหมายได้จากการส่งคลื่นแบบ Pulse และสามารถคำนวนความเร็วเป้าหมายจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นภายในสัญญาณ Pulse ได้อีกด้วย

## ๒.๖ ประโยชน์และการใช้งานของเรดาร์

ซึ่งคุณสมบัติต่างๆนี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบ และจุดประสงค์ในการใช้งาน ซึ่งจัดแบ่งได้ ๔ ลักษณะโดยทั่วๆ ไป คือ

### ๒.๖.๑ พื้นสู่พื้น (Surface To Surface)

จุดประสงค์ส่วนใหญ่ใช้ในการติดตามเป้าหมาย และชี้ตำแหน่งของเป้าหมายที่อยู่ภาคพื้น โดยอุปกรณ์จะอยู่ภาคพื้นเช่นกัน เช่น ในระบบ Doppler Radar ที่ใช้ในกิจการตำรวจสำหรับตรวจจับความเร็วของยานพาหนะหรือใช้ในการนำร่องและจัดการจราจรทางน้ำใช้ตามเมืองท่าสำคัญๆ ที่มีการจราจรทางน้ำมาก และใช้ในสภาพทรรศนะวิสัยไม่ดี เรดาร์พื้นสู่พื้นนี้มีข้อเสียในด้านระยะทางของเป้าหมายจะถูกจำกัดโดยพื้นผิวของโลกเองรวมถึงสภาวะของภูมิประเทศโดยรอบด้วย

**๒.๖.๒ พื้นสู่อากาศ (Surface To Air)**

ใช้ในการนำร่องอากาศยาน (Air Surveillance Radar) โดยอาจจะกวาดสัญญาณไปรอบๆ หรืออาจใช้ติดตามบางตัวโดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังใช้ตรวจสภาพอากาศ (Weather Radar) ใช้จัดการจราจรทางอากาศ (Air Traffic Control) ใช้เป็นเรดาร์แจ้งเตือน (Eary Warning Radar) จับเป้าหมายอากาศยาน หรือจรวด,ใช้ช่วยในการยิงต่อสู้ป้องกันภัยทางอากาศ ซึ่งเรดาร์ระบบพื้นสู่อากาศนี้อาจติดตั้งพื้นดินบนภูเขา หรือบนเรือก็ได้แล้วแต่จุดประสงค์เนื่องจากระยะทางที่เรดาร์จับได้นั้น เป็นแนวเส้นตรง ดังนั้นเรดาร์ภาคพื้นสู่อากาศจึงมีข้อจำกัดเช่นเดียวกับระบบพื้นสู่พื้น แต่จัดได้ว่าน้อยกว่ามาก เพราะเป้าหมายที่ต้องการส่วนใหญ่เป็นอากาศยาน ผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปก็จะเกิดจากสภาพแวดล้อมภูมิประเทศที่อยู่ใกล้ ๆ เป็นส่วนใหญ่ เช่น ภูเขา, ตึกอาคาร, ต้นไม้ต่างๆ ซึ่งจะปรากฏบนจอ Indicator ในทางเทคนิค เราเรียกว่าสิ่งที่เกิดขึ้นบน Indicator โดยสาเหตุจากสิ่งต่างๆ เหล่านี้เรียกว่า “Ground Clutter”

**๒.๖.๓ อากาศสู่อากาศ (Air To Air)**

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

**๒.๖.๔ อากาศสู่พื้น (Air To Ground)**

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

เรดาร์ได้นำมาใช้งานหลายๆ ด้าน ทั้งภาคพื้น ในอากาศ และในทะเล เรดาร์ ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบเพื่อใช้งานในกิจการทหารในด้านการป้องกัน,แจ้งเตือน และเพื่อความปลอดภัย ส่วนด้านพลเรือนจะมีใช้ในการช่วยความปลอดภัย เช่น การจัดการจราจรทางอากาศ, การร่อนลงของอากาศยาน การเดินเรือ เป็นต้นขอยกตัวอย่างพอสังเขปดังนี้

- ATC. Radar (Airtraffic Control Radar) ใช้ควบคุมการบิน ช่วยในความปลอดภัยของอากาศยานโดยให้บินอยู่ในเส้นทางที่กำหนด และควบคุมการจราจรบริเณใกล้สนามบินที่มีการจราจรคับคั่ง

- GCA. Radar (Ground Control Appraoch Radar) ช่วยในการร่อนลงของอากาศยานในทรรศนะวิสัยไม่ดี ซึ่งก็รวมถึงระบบ Microwave Landing System และ ATE. Radar Beacon System ซึ่งใช้แทนกันได้ในกรณีเดียวกัน

- Aircraft Navigation ใช้ตรวจสอบสภาพอากาศเพื่อใช้หลีกเลี่ยง หรืออาจใช้เป็น Terrain Avoidance หรือ Terrain Follow และบางอย่างที่ใช้หลักการเดียวกันกับระบบเรดาร์ เช่น Radio Altimeter ไม่ว่าจะเป็น FM/CW หรือ Pulse และ Doppler Navigation

- Ship Safety ใช้แจ้งเตือน และตรวจสอบชายฝั่ง สิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่นทุ่น รวมถึงเรือลำอื่นๆ ด้วย

- Remote Sensing ใช้ในการส่งสัญญาณระยะไกล ซึ่งอาจเป็นข้อมูลสภาพอากาศ สภาพพื้นผิวโลก เป็นต้น

- Law Enfourcement ใช้ในด้านกฎหมาย เช่น ใช้จับความเร็วของยานพาหนะ หรือการบุกรุกสถานที่เป็นต้น

- Early Warning ใช้แจ้งเตือนอากาศยานที่รุกล้ำแนวพรมแดน, จรวดนำวิถีของฝ่ายข้าศึกที่ยิงเข้ามาเพื่อเตรียมการป้องกัน หรือตอบโต้ได้ทันท่วงที

**๒.๗ ย่านความถี่เรดาร์**

ในทางปฏิบัติ ความถี่เรดาร์อยู่ในย่านไมโครเวฟ แบ่งเป็นย่านต่าง ๆ ดังนี้

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

ตารางแสดง ความถี่ในย่านต่างๆ

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

- ความถี่อุลตรา (UHF 300–1,000 MHz.) สิ่งรบกวนภายนอก (Noise) น้อยกว่าย่าน VHF เชื่อถือได้ดีสำหรับเรดาร์เฝ้าตรวจระยะไกล ไม่มีผลจากสภาพอากาศ ความสามารถ MTI ดีแต่มีข้อจำกัด คือ ถูกกำหนดใช้ไปในด้านบริการวิทยุด้านอื่นๆมาก

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

- S – BAND (2,000 – 4,000 MHz.) เรดาร์เฝ้าตรวจส่วนใหญ่ใช้ความถี่ต่ำกว่า S–BAND ให้ Resolution ทางมุมดี สายอากาศเล็ก, การรบกวนจากภายนอกต่ำ, MTI ไม่ดี เท่า ย่าน UHF, มักใช้งานตรวจจับ และติดตาม บ. ในระยะปานกลาง

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

- X – BAND (8 – 12.5 GHz.) นิยมใช้ในเรดาร์ควบคุมอาวุธ และเรดาร์ในกิจการพลเรือน เช่น Civil Marine RadarAirbrone Weather Avoidance Radar, Doppler Navigation Radar สายอากาศมีขนาดเล็ก, น้ำหนักเบาจึงเหมาะที่จะใช้เป็นเรดาร์เคลื่อนที่, เฝ้าตรวจระยะใกล้, ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเรดาร์เฝ้าตรวจระยะไกล, ความกว้างลำคลื่นแคบทำได้ง่าย เช่น ลำคลื่น ๑° จากสายอากาศกว้าง ๖ ฟุต

- Ku, Ki และ Ka – BAND (12.5 - 40 GHz.) ขณะนี้ใช้ในการทดลองเท่านั้น เพราะใกล้กับเวฟเลนท์ของไอน้ำ (22.2 GHz.) สูญเสียจากการดูดซึมสูง กำลังสูง ๆ ทำได้ยาก, ให้ Resolution ดีทางมุม และทางระยะ

## ๒.๘ ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติงานของเครื่องเรดาร์ (Factors Affecting Radar Performance)

ปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติงานของเครื่องเรดาร์ ปัจจัยที่เกี่ยวกับความถี่และความกว้างของคลื่นพัลส์ได้กล่าวแล้ว ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบกำลังออกอากาศ กำลังของคลื่นสะท้อนกลับ และผลสรุปต่างๆ อาจแบ่งออกเป็นสองทางคือ ความชำนาญของพนักงานและสิ่งแวดล้อมต่างๆ

เครื่องส่งเรดาร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง เป็นพลังงานคลื่นวิทยุหรือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในเครื่องส่งมีอุปกรณ์เริ่มจากสวิทช์นิรภัย ระบบหล่อเย็นท่อส่งคลื่นเครื่องวัดต่างๆ และหลอดวิทยุ เช่น MagnetronStabilitron, Klystron, Plationotron หรือ TWT = Traveling Wave Tube เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์เกี่ยวข้องกับการสร้างรูปคลื่นวิทยุ ความถี่ของคลื่นวิทยุในการส่งเรดาร์พื้นดินประมาณ 3,000 MHz. (S-Band) ใช้ Magnetron, Klystron ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$) เท่ากับ ๒ นิ้ว

- ความถี่เรดาร์บนเครื่องประมาณ 10,000 MHz. (X-BAND) จะเห็นว่าเครื่องเรดาร์ความถี่สูง จะมีขนาด, น้ำหนัก และไฟสูงลดลง แล้วก็จะลดกำลังออกอากาศลงไปด้วย กำลังออกอากาศมาก เรดาร์ก็มีรัศมีทำการไกล แต่เครื่องส่งเรดาร์จะพักการส่งนานกว่า ขณะทำการส่งฉะนั้นกำลังเฉลี่ยการออกอากาศของหนึ่งวงรอบจึงต่ำมาก เมื่อเทียบกับกำลังออกอากาศสูงสุด

โดยรูปแบบพื้นฐานของการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเรดาร์มีสองแบบ ได้แก่แบบ Pulse และแบบ Continuous Wave (CW) โดยเรดาร์แบบ Pulse จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นช่วงสั้นๆ (หรือพัลส์-Pulse) และคอยดักรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ทิศทาง และระยะทางของเป้าหมายสามารถคำนวณได้จากมุมของสายอากาศและระยะเวลาสำหรับสัญญาณ Pulse ในการสะท้อนกับมาหาเครื่องรับส่วนเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่องและอาศัยปรากฏการดอปเปลอร์(Doppler Effect)ในการคำนวณหาค่าความเร็วของเป้าหมาย โดยปรากฏการ Doppler คือการที่คลื่นใดๆมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นหรือวัตถุที่สะท้อนคลื่นมีการเคลื่อนที่

เข้าหา หรือออกจากกัน โดยการเคลื่อนที่เข้าหากันจะทำให้ความถี่สูงขึ้น และการเคลื่อนที่ออกจากกันจะทำให้ความถี่ต่ำลง

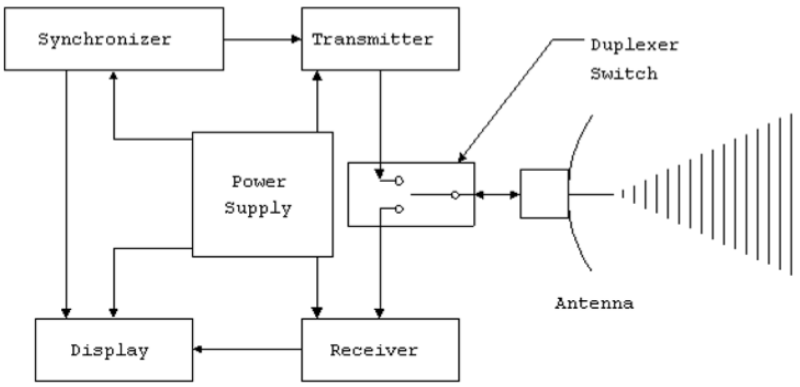
การแพร่คลื่นของเรดาร์ทั้งสองแบบ มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป อย่างไรก็ดีเนื่องจากเรดาร์แบบ CW ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง จึงไม่สามารถคำนวนระยะทางจากเวลาที่ใช้ในการสะท้อนคลื่นได้ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นเรดาร์แบบ Pulse Doppler ขึ้น ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาข้อดีของเรดาร์ทั้งสองแบบเข้าด้วยกันโดยเรดาร์แบบนี้สามารถวัดระยะเป้าหมายได้จากการส่งคลื่นแบบ Pulse และสามารถคำนวนความเร็วเป้าหมายจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นภายในสัญญาณ Pulse ได้อีกด้วย

ที่ตั้งสถานีเรดาร์ มีผลกระทบต่อการทำงานของเรดาร์มากกว่าภายในตัวเครื่องเรดาร์เอง ฉะนั้นสถานที่ตั้งสถานีเรดาร์ควรจะอยู่ที่โล่ง

การปรับแต่งเรดาร์พื้นดินต้องให้ทิศทาง 0 องศาตรงกับทิศเหนือโลกจริง เรดาร์บนเรือหรือบนอากาศยานต้องปรับแต่งหัวเรือหรือหัวเครื่องบินตรงกับระบบไจโร ฐานเรดาร์พื้นดินต้องปรับระดับน้ำเพื่อป้องกันมุมยกคลาดเคลื่อน

**๒.๙ เรดาร์เบื้องต้นและการทำงานของระบบต่างๆ**

เครื่องเรดาร์ประกอบด้วยชุดต่างๆ อย่างน้อย ๖ ชุด ดังนี้ คือ ชุด Synchronizer หรือ Timer, Transmitter (ชุดเครื่องส่ง), Antenna (ชุดสายอากาศ) , Duplexer, Receiver (ชุดเครื่องรับ), Display (ชุดจอเรดาร์) และชุดจ่ายกระแสไฟฟ้า




รูปที่ ๕.๘ ส่วนประกอบหลักระบบเรดาร์เบื้องต้น

**๒.๙.๑ Synchronizer (Timer)**

เป็นหัวใจของเครื่องเรดาร์ เพราะว่าเป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระยะทาง บางทีเรียก “ Master Timer, Timer, Trigger Generator หรือ Keyer” เป็นต้น หลักการของเรดาร์คือ วัดระยะเวลาที่คลื่นวิทยุเดินทางจากจุดเริ่มต้น และถูกสะท้อนกลับมายังจุดเริ่มต้น Synchronizer จะกำหนดพลังงานคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกตามช่วงเวลาที่คล้องจองกันระหว่างส่งออกไปและรับเข้ามาแล้วไปปรากฏบนจอเรดาร์พร้อมๆกันกับที่มีสัญญาณ Trigger ไปป้อนสู่ Transmitter Modulator

**๒.๙.๒ ชุดเครื่องส่งเรดาร์ Transmitter Modulator**

ชุดนี้ประกอบด้วยวงจรสร้างรูปคลื่นพัลส์สำหรับส่งออกมา และวงจรส่งความถี่วิทยุเครื่องเรดาร์บางแบบจะแยก Transmitter กับ Modulator แล้วต่อกันด้วยเคเบิลที่ยอมให้พัลส์แรงไฟสูงผ่านเมื่อมีสัญญาณ Trigger จากชุด Synchronizer จะไปกระตุ้นชุด Transmitter Modulator ให้ส่งคลื่นวิทยุที่มีแรงไฟสูงมากออกมาเป็นห้วงสั้นๆ ซึ่งอาจจะเป็นแรงไฟสูงถึง ๑๕,๐๐๐โวลท์ หรือมากกว่านั้น ฉะนั้นการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องเรดาร์ต้องระวังอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูง เพราะอาจเป็นอันตรายถึงกับเสียชีวิตได้

ส่วนประกอบที่สำคัญในการส่งคลื่นวิทยุออกอากาศนี้คือ ระบบระบายความร้อน และระบบอัดอากาศในท่อส่งคลื่นจะต้องมีอุณหภูมิและมีความกดอากาศคงที่ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงไฟกระโดดในท่อส่งคลื่นภายในระบบอัดอากาศจะต้องมีชุดปั้มลม, ชุดกรองอากาศ, และชุดกรองความชื้น (Dehydrator) ชุดต่างๆดังกล่าวจะต้องมีการตรวจสอบเสมอ

**๒.๙.๓ ชุดสายอากาศ**

ปกติจะทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสู่อากาศ หรือรับคลื่นจากอากาศสายอากาศที่ดี จะต้องมี Characteristic Impedance (ZO) เท่ากับสายส่งกำลังหรือท่อส่งคลื่น และต้องมีชุด สะท้อนคลื่น (Reflector) มาประกอบกับ สายอากาศเพื่อเพิ่มกำลังรับ-ส่งสัญญาณ และช่วยให้หาทิศทางและมุมเงยของเป้าหมายได้แน่นอน ระบบสายอากาศที่สมบูรณ์จะต้องประกอบด้วยชุดขับเคลื่อน และชุดควบคุมการขับเคลื่อนในสายอากาศที่เป็นทิศทางจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

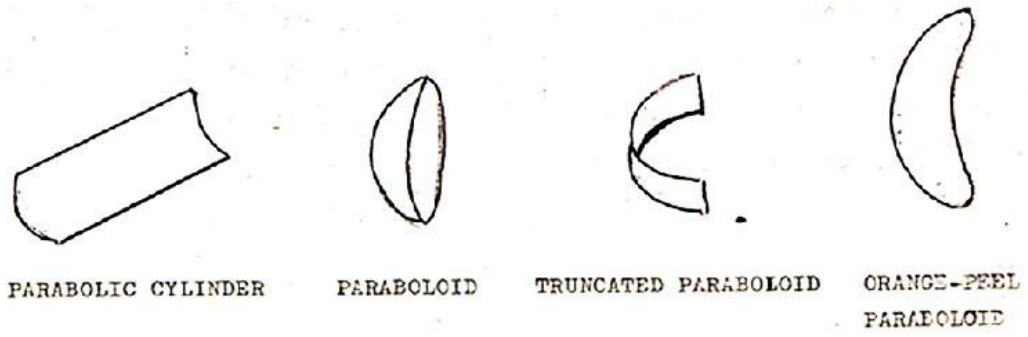
- มุมของลำคลื่นที่ส่งออกไป (Beam Angle)
- เปอร์เซ็นต์ของ Side Lobe ที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ประมาณ ๑๐%
- กำลังการขยายของสายอากาศ
- รูปแบบของจานสายอากาศ (Reflector)

ระบบสายอากาศที่มีการขับเคลื่อนจะประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

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

Reflector ทำหน้าที่สะท้อนกำลังงานที่สูงจาก FeedHorn ออกไปสู่บรรยากาศให้ได้รูปแบบและทิศทางตามต้องการรวมถึงการรวบรวมสัญญาณที่สะท้อนกลับเข้ามาในระบบเรดาร์ส่วนมาก Reflector จะเป็นแบบที่มีพื้นผิวราบเรียบ เพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นเป็นไปอย่างคงที่และได้รูปแบบตามต้องการจานสายอากาศที่นิยมใช้ทั่วไปจะเป็นแบบ PARABOLIC ซึ่งมีอยู่ ๔ แบบ ด้วยกัน คือ

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

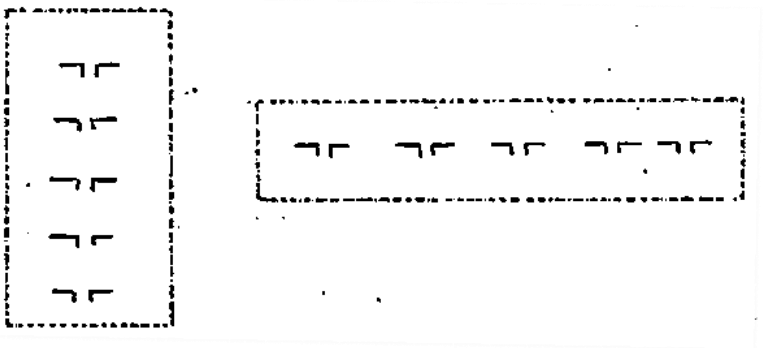



รูปที่ ๕.๙ Parabolic Antenna

สายอากาศแบบ Parabolic มีการนำมาใช้งานโดยทั้วไป การกระจายกำลังอาศัยการป้อนกำลังงานจาก Feed Horn ป้อนเข้าที่จุดศูนย์รวมของจานสายอากาศ คลื่นสัญญาณที่สะท้อนออกไปจะเป็นแนวขนานซึ่งกันและกัน และจะตั้งฉากกับแนวแกนของสายอากาศ หมายถึงว่า พลังงานที่สะท้อนออกไปมีความสัมพันธ์ทางมุมเดียวกัน นอกจากสายอากาศแบบ Parabolic ที่กล่าวมาแล้วยังมีสายอากาศอีกหลายชนิดที่นำมาใช้งานเช่นเดียวกัน เช่น สายอากาศแบบ Lens, และสายอากาศแบบ Array เป็นต้น

สายอากาศแบบ Array เป็นสายอากาศอีกแบบหนึ่งซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน สายอากาศแบบ Array จะประกอบด้วยตัวแพร่กระจายคลื่น (Elment) หลายๆอันนำมาวางเรียงกันในระยะเท่าๆกัน ใช้ความสัมพันธ์ทางมุม (Phase) และ Amplitude ของสัญญาณป้อนให้กับตัว แพร่กระจายคลื่นแต่ละอันเพื่อควบคุมการแพร่กระจายคลื่นให้ได้รูปแบบของคลื่นที่กระจายออกไปตามต้องการ สายอากาศแบบ Array ที่ใช้ทั่วไปมี ๒ แบบ คือ

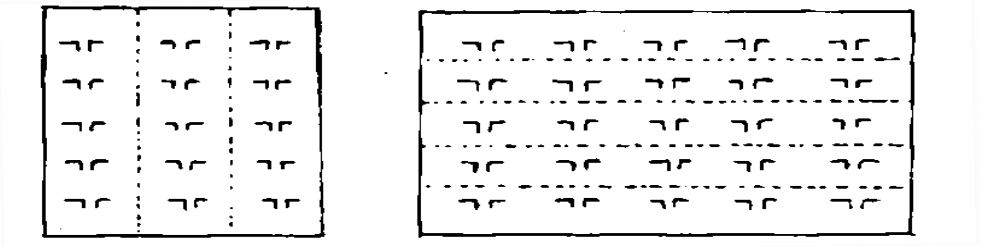
1. Linear Array เป็นการนำเอาตัวแพร่กระจายคลื่น (Element) หลายๆอันนำมาจัดวาง เรียงกันเป็นแนวเส้นตรงในระยะเท่าๆกันในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง



รูปที่ ๕.๑๐ Linear Array

2. Planar Array ประกอบด้วย Linear Array ตั้งแต่ ๒ ชุดขึ้นไป นำมาจัดวางเรียงกัน หรือซ้อนกัน หรือใช้ Linear Array หลายๆอันจัดวางเรียงผสมกัน ขึ้นอยู่กับการออกแบบ หรือจุดประสงค์ในการใช้งาน

รูปที่ ๕.๑๑ Planar Array



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

**FeedHorn** เป็นตัวป้อนและรับกำลังงานจากจุดศูนย์รวมของจานสายอากาศการติดตั้ง FeedHorn จำเป็นที่จะต้องปรับแต่งให้กำลังที่ส่งออกพุ่งเข้าจุดศูนย์รวมของจานสายอากาศพอดี เพื่อให้ได้กำลังงานและทิศทางที่ถูกต้อง ถ้า Feed Horn ติดตั้งอย่างไม่ถูกต้องแล้วกำลังงานที่จาน สายอากาศที่ส่งออกไปจะต่ำ มุมทิศที่แพร่กระจายคลื่นก็ผิดพลาด ทำให้การจับเป้าหมายอาจผิดพลาด

**Rotary Joint** ระบบเรดาร์ทั่วไป จานสายอากาศจะเคลื่อนที่ตลอดเวลาอาจเป็นไปในลักษณะของการหมุนรอบตัวหรือกระดก ขึ้น-ลง ซึ่งการส่งกำลังงานออกไปหรือรับเข้ามาจำเป็นที่จะต้องส่งผ่านออกสู่จานสายอากาศ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ Rotary Joint ซึ่งเป็นส่วนต่อที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษให้มีการสูญเสียกำลังงานน้อยที่สุด ในส่วนของข้อต่อนี้ขณะจานสายอากาศกำลังเคลื่อนที่

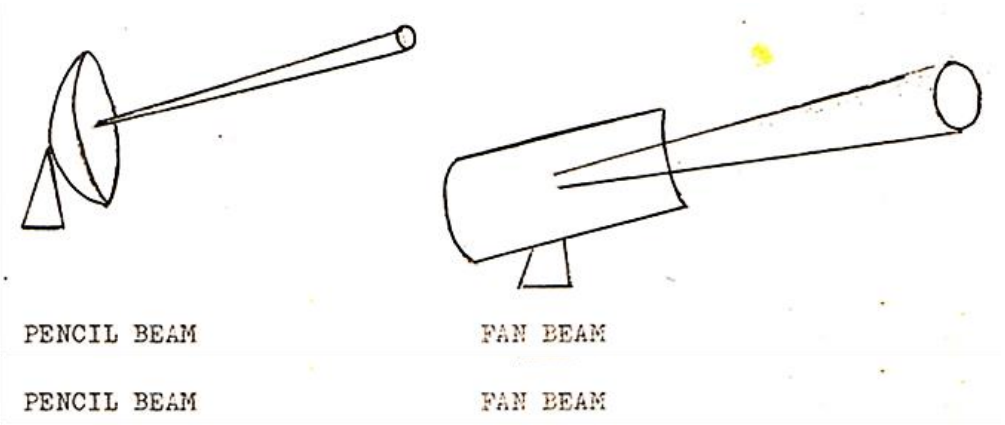
**ระบบ Synchro และ/หรือ ACP (Azimuth Change Pulse)** เป็นระบบที่มีขึ้นเพื่อให้สายอากาศทำงานสัมพันธ์กับระบบ Electronic ทั้งหมด โดยเฉพาะทางมุมทิศ และเวลาให้เริ่ม ณ ที่เวลาหรือตำแหน่งเดียวกัน มิฉะนั้นเส้นกวาดบนจอเรดาร์จะมีมุมทิศที่ผิดพลาดแตกต่างกับมุมทิศของสายอากาศจริง

**ระบบ Synchro** ใช้ Synchro Motor ต่อทางกลกับการหมุนไปของสายอากาศ สัญญาณที่ได้จะ เป็นสัญญาณ AC ซึ่งมีความแตกต่างทางมุม สายอากาศหมุนไป ๑ รอบ ก็จะได้สัญญาณ AC 1 Cycle หรือ ๓๖๐ องศา ซึ่งสามารถนำสัญญาณนี้ไปกำหนดมุมทิศได้

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

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

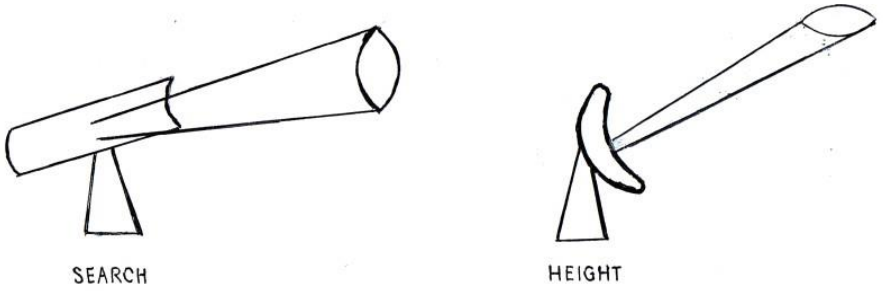
**กระสวยลำคลื่น (Beam)** กระสวยลำคลื่นในการส่งออกอากาศมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งานและอุปกรณ์ โดยทั่วไปจะเป็นแบบ Fan Shape และ Pencil Beam




รูปที่ ๕.๑๒ Beam Pattern

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

Fan Beam Pattern ความกว้างของ Beam จะมาก ใช้ใน เรดาร์ค้นหาระยะไกล เพื่อให้จับเป้าหมายได้มาก




รูปที่ ๕.๑๓ Fan Beam Patternในเรดาร์ค้นหา และ เรดาร์วัดความสูง ความกว้างลำคลื่นทางระดับ

- ในเรดาร์ค้นหา (Search) จะมีความกว้างของกระสวยลำคลื่น (Beam) ทางแนวดิ่ง (Vertical) กว้าง และมีความกว้างทางแนวระดับ (Horizontal) แคบเพื่อให้มีพื้นที่ในการจับเป้าหมาย ในแต่ละมุมที่สายอากาศกวาดไปมา และการแยกเป้าหมายใกล้เคียงในระดับเดียวกันได้ดี

- ในเรดาร์วัดความสูง (Height) จะมีมุมทางแนวดิ่ง (Vertical ) แคบ และ มุมทางระดับ(Horizontal) กว้าง เพื่อการวัดความสูงที่แน่นอน ต่อนาทีอัตราการหมุนของสายอากาศ (Rotation Rate) มีหน่วยเป็น องศา ต่อวินาที หรือ รอบ

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

เมื่อ Scan Time คือ เวลาที่ใช้ไปในการกวาด ๑ รอบ (๓๖๐ °)

Radome คือ ฝาครอบสายอากาศทำด้วยพลาสติกที่มีเนื้อวัสดุแข็ง และหนาเป็นพิเศษ ทำหน้าที่ป้องกันสายอากาศจากลมแรง, หิมะ และความชื้นของสายอากาศ ขนาดของ Radome ขึ้นอยู่กับชนิดของเรดาร์ และการใช้งาน ตัวอย่างเช่น Radome ของเรดาร์ที่ติดตั้งบนลำตัว บ.แบบโบอิ้ง ๗๐๗ ของ ทอ.อม.ระบบ AWACS (Air Borne

Warning Air Craft System) สูง ๖ ฟุต, เส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๑ ฟุต Radome ของเรดาร์ภาคพื้นบางแบบมีเส้น ผ่าศูนย์กลางถึง ๑๓๐ ฟุต เป็นต้น

**๒.๙.๔ ชุด Duplexer**

ทำหน้าที่เป็น Electronic Switch ขณะทำการส่งจะยอมให้พลังงานความถี่วิทยุที่มีกำลังแรงมากออกจากสายอากาศ แต่ไม่ให้พลังงานความถี่วิทยุที่มีกำลังแรงมากนั้นเข้าไปในเครื่องรับขณะ ทำการส่ง

**๒.๙.๕ ชุดเครื่องรับเรดาร์**

คือ เครื่องมือในการรับสัญญาณกำลังอ่อน ที่สะท้อนกลับมาเข้าสายอากาศได้สัญญาณอ่อนๆ นี้อาจจะมีเพียง ๒-๓ ไมโครโวลท์ แล้วถูกขยายอย่างมากจนได้รูปของ Video Pulse ไปป้อนที่จอเรดาร์ คุณสมบัติที่ต้องการสี่ประการของเครื่องรับเรดาร์คือ Reliability, Sensitivity, Bandwidth และ Selectivity ตลอดจน Recovery Time

- Reliability ความเชื่อถือได้ ปกติแล้วเครื่องเรดาร์จะต้องทำงานได้ตลอดเวลาจะหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุงก็ต้องทำตามหมายกำหนดการซ่อมบำรุงเท่านั้น หากต้องหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุงนอกหมายกำหนดการบ่อยๆ หมายถึงมีชั่วโมงเฉลี่ยการใช้งานต่ำ (MTBF = Mean Time Between Function) หรือมีชั่วโมงเฉลี่ยการซ่อมบำรุง (MTTR = Mean Time to Repair) สูง แสดงว่าเครื่องมีสภาพไม่น่าไว้วางใจ

- Sensitivity ความไวในการรับสัญญาณและอัตราส่วนของสัญญาณต่อคลื่นรบกวน (Signal To Noise Ratio) ต้องมีความสัมพันธ์กัน คลื่นรบกวนที่เกิดจากสภาพอากาศและสัญญาณรบกวนต่างๆ (Interference)รวมทั้ง Fluctuation Noise (คลื่นรบกวนจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ หรือวัตถุซึ่งตัวนำในวงจรต่างๆ)และ Avoidable noise ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของรีเลย์ มอเตอร์เย็น เนอเรเตอร์ แหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าที่กรองไม่เรียบ ตลอดจนการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ต่างๆ ปัจจุบันเครื่องรับสมัยใหม่ใช้ Paramatic Amplifier แก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแล้วปรับปรุงความไว ของเครื่องรับได้ผลดียิ่งขึ้น

- Band Width and Selectivity คือ การสนองตอบต่อความถี่ (Frequency Response) คิด จากจุด 0.707 ของค่าสูงสุดของความถี่แตกต่างระหว่างจุด คือความกว้างแถบคลื่น (Bandwidth) และการเลือกรับ (Selectivity) จะเพิ่มขึ้นถ้าความกว้างแถบคลื่นลดลง มีผลให้แยกเป้าหมายได้ละเอียดขึ้นคือเป้าหมายที่ปรากฏบนจอไม่พร่า

**๒.๙.๖ จอเรดาร์**

เป็นชุดแสดงออกของสัญญาณภาพที่หลอดภาพ (CRT)จะมีภาพทุกครั้งที่มีการจับเป้าหมายเข้ามาที่สายอากาศ หลอดภาพที่ทำหน้าที่เป็นจอเรดาร์บนอากาศยานมีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา มักใช้หลอดภาพแบบ Electrostatic ถ้าติดตั้งบนเรือใหญ่หรือสถานีเรดาร์พื้นดินก็มักจะใช้หลอดภาพแบบ Electromagnetic ที่จอเรดาร์จะเป็นจุดสั่งการ และควบคุมการใช้งานของเครื่องเรดาร์ ช่างซ่อมจะตรวจสอบการทำงานของเครื่องเรดาร์ หรือค้นหาจุดเสียเพื่อทำการซ่อมบำรุง ก็ต้อง เริ่มต้นที่จอเรดาร์ก่อน

**๒.๙.๗ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power Supply)**

เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับการทำงานของระบบเรดาร์ทั้งหมด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญ ในการออกแบบการใช้งานของเรดาร์ กล่าวคือ ระบบเรดาร์จะต้องมีระบบพลังงานที่เหมาะสมต้อการ ใช้งานและการติดตั้ง เช่น หากเป็นเรดาร์เคลื่อนที่ควรต้องมีแหล่งผลิตพลังงานภายในของตนเอง ซึ่ง จะมีกำลังน้อยส่งผลให้ระยะการตรวจจับเป้าหมายลดลง หากเป็นเรดาร์ขนาดใหญ่ไม่สามารถ เคลื่อนที่ได้และต้องการรัศมีตรวจจับระยะไกลจำเป็นต้องมีแหล่ง

ผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่เช่นกัน นอกจากนี้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ายังเป็นปัจจัยในเสถียรภาพการทำงานของระบบเรดาร์ที่ต้องปฏิบัติงาน ตลอดเวลาอีกด้วย

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับสถานีเรดาร์อาจได้มาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line) แล้วเข้าเครื่องแปลงความถี่ (Frequency Converter) ในกรณีที่เครื่องเรดาร์ต้องการกระแสไฟฟ้าสลับ ชนิด 60 Hz ขนาดแรงดันไฟฟ้า 120/208 3 เฟส 4 สาย แล้วยังต้องมีเครื่องยนต์ทำไฟขนาดไม่เกิน 400 KW ๒ เครื่อง หรือขนาด 250 KW ๓ เครื่องเป็นการสำรองในกรณีที่กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขัดข้อง แผนผังของระบบเบื้องต้นนั้นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นผังสี่เหลี่ยมอันเดียวแต่ภายในนั้นจะต้องมีการจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรต่างๆของเรดาร์ และต้องมีกระแสไฟฟ้า และแรงดันระดับต่างๆ

**๓. ระบบป้องกันทางอากาศ**

การป้องกันทางอากาศของ ทอ. ประกอบด้วยหน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือนหน่วยบินขับไล่สกัดกั้นและหน่วยอาวุธต่อสู้อากาศยาน โดยปฏิบัติพันธกิจการป้องกัน ทางอากาศอย่างต่อเนื่องตลอด ๒๔ ชั่วโมง ด้วยการค้นหา พิสูจน์ฝ่าย สกัดกั้น และทำลายจากการ โจมตีทางอากาศของฝ่ายตรงข้ามตามแผนป้องกันประเทศ หรืออากาศยานไม่ทราบฝ่ายที่กระทำ ผิดกฎหมาย หรืออากาศยานที่มีการกระทำอันอาจเป็นภัยต่อความมั่นคงแห่งราชอาณาจักร หรืออาจ เป็นภัยต่อสาธารณะภายใต้ขอบเขตที่กฎหมายกำหนด

การป้องกันทางอากาศ หมายถึง มาตรการที่กำหนดขึ้นในการปฏิบัติการ ทั้งปวงที่จำเป็น เพื่อขจัด ยับยั้ง ลดประสิทธิภาพการโจมตีทางอากาศ และ/หรือ เพิ่มความปลอดภัย จากภัยคุกคามทางอากาศทุกรูปแบบ ให้กับกำลังทางอากาศของฝ่ายเราและเหล่าทัพอื่นตลอดจน ประชาชนองค์การ และองค์กรต่าง ๆ ของชาติเป็นส่วนรวม

**๓.๑ อำนาจหน้าที่กองทัพอากาศ**

“เหนือนภาฟ้าไทย ใครรุกใครรานอธิปไตย ทัพอากาศของไทยพลีชีพบูชา”

พระราชบัญญัติจัดระเบียบบริหารราชการ กระทรวงกลาโหม พ.ศ. ๒๕๕๑ มาตรา ๒๑ “กำหนดให้กองทัพอากาศ มีหน้าที่เตรียมกำลังกองทัพอากาศ ป้องกันราชอาณาจักร และดำเนินการ เกี่ยวกับการใช้กำลังทางอากาศตามอำนาจหน้าที่ของกระทรวงกลาโหม มีผู้บัญชาการทหารอากาศ เป็นผู้บังคับบัญชารับผิดชอบ

**๓.๑.๑ ภารกิจของ ทอ.**

กองทัพอากาศมีหน้าที่เตรียมกำลังกองทัพอากาศ และป้องกันราชอาณาจักร พร้อมการ พัฒนาประเทศและแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดความขัดแย้งในระดับต่าง ๆ โดยดำรงระดับความพร้อมของขีด ความสามารถอยู่ตลอดเวลา ด้วยการเสริมสร้างศักยภาพกำลังทางอากาศให้มีคุณภาพ และ ครอบครองเทคโนโลยีที่ทันสมัย รวมถึงการมีความสัมพันธ์ที่ดีกับมิตรประเทศและดำรงความเข้มข้น ในความรับผิดชอบต่อภารกิจตามกฎหมายโดยเฉพาะในการรักษาผลประโยชน์แห่งชาติ และการ พัฒนาประเทศตามแนวคิดทางยุทธศาสตร์

**๓.๑.๒ ศูนย์ป้องกันทางอากาศ (Air Defense Center)**

ศูนย์ป้องกันทางอากาศ มีหน้าที่ วางแผน อำนวยการ สั่งการ และควบคุมการใช้ กำลังทางอากาศในการป้องกันทางอากาศ รวมถึงระบบบัญชาการและควบคุมกองทัพอากาศ ควบคุม และสั่งการหน่วยในระบบป้องกันทางอากาศทุกหน่วย ให้ปฏิบัติตามพระราชบัญญัติ กฎหมายทาง อากาศ กฎหมายระหว่างประเทศ และระเบียบปฏิบัติอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการป้องกันทางอากาศ โดย ดำเนินการควบคุมห้วงอากาศ ควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ ควบคุมการเดินอากาศ ทั้งอากาศยาน ราชการและพลเรือน ในเขตแสดงตน เพื่อการพิสูจน์ฝ่าย ตามพันธกิจการป้องกันทางอากาศ อันได้แก่ พันธกิจการค้นหา พันธกิจการพิสูจน์ฝ่าย พันธกิจการสกัดกั้น และพันธกิจการทำลาย ให้เป็นไปตามกฎหมายที่กำหนด ปรับปรุงและแก้ไขระบบการศึกษาให้ทันสมัยและเหมาะสมอยู่เสมอ รวมทั้งบริหาร จัดการและพัฒนากำลังพลสายวิทยาการต้นหนจำพวกทหารควบคุมการปฏิบัติทางอากาศให้เป็นไปตามกระบวนการบริหารจัดการทรัพยากรมนุษย์ โดยมีผู้อำนวยการศูนย์ป้องกันทางอากาศ (ผอ.ศปอ.) เป็นผู้บังคับบัญชารับผิดชอบ

**๓.๑.๓ ระบบป้องกันทางอากาศ**

ประกอบด้วยหน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือน หน่วยบินขับไล่สกัดกั้น หน่วย อาวุธต่อสู้อากาศยาน ซึ่งจะประสานการปฏิบัติกันอย่างใกล้ชิด มีข่ายการติดต่อสื่อสารหลัก (Command Line, Data Link) และระบบวิทยุพื้นดิน/อากาศ ใช้ในภารกิจการเฝ้าตรวจทางอากาศ การควบคุมอากาศยานในการสกัดกั้น การสั่งการและการประสานการปฏิบัติกับหน่วยในระบบ ควบคุมการปฏิบัติทางอากาศยุทธวิธี ตลอดจนการควบคุมการเดินอากาศของอากาศยานทั้งปวงใน พื้นที่การพิสูจน์ฝ่ายให้เป็นไปตามพระราชบัญญัติ กฎ ระเบียบ ข้อบังคับ ซึ่งตราไว้เพื่อความปลอดภัย ในการเดินอากาศ และความมั่นคงของชาติ โดยมีศูนย์ยุทธการทางอากาศ (ศยอ.ฯ) ทำหน้าที่ อำนวยการสั่งการ ควบคุมและกำกับดูแลการปฏิบัติของหน่วยหลักในระบบป้องกันทางอากาศให้ เป็นไปด้วยความรวดเร็ว ถูกต้อง และมีประสิทธิภาพเพื่อให้บรรลุพันธกิจในการป้องกันทางอากาศ คือ การค้นหา การพิสูจน์ฝ่าย การสกัดกั้นและการทำลาย ซึ่งหน่วยหลักในระบบป้องกันทางอากาศ ประกอบด้วย

(๑) หน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือน (Aircraft Control & Warning unit)

(๒) หน่วยบินขับไล่สกัดกั้น (Fighter Interceptor unit)

(๓) หน่วยอาวุธต่อสู้อากาศยาน (Anti-Aircraft Artillery)

**(๑) หน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือน (Aircraft Control & Warning unit)**

หน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือน มีหน้าที่ในการค้นหาเป้าหมาย พิสูจน์ฝ่ายอากาศยานที่ตรวจ พบ กระจายข่าวการตรวจพบเป้าหมาย ให้หน่วยที่เกี่ยวข้องในการป้องกันทางอากาศทั้งฝ่ายทหาร และพลเรือน อำนวยการ และควบคุมอากาศยาน หรือ อาวุธสกัดกั้นในการบินพิสูจน์ฝ่ายหรือทำลาย อากาศยานที่เป็นภัยคุกคาม และ/หรือฝ่ายข้าศึก หน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือน มีหน้าที่หลัก ในการป้องกันทางอากาศ ที่สำคัญ ๕ ประการ

(๑.๑) เฝ้าตรวจห้วงอากาศและอากาศยานทั้งหมดภายในเขตอากาศที่รับผิดชอบ เพื่อให้มีเวลาในการแจ้งเตือนเกี่ยวกับการเข้ามาของอากาศยานที่อาจเป็นภัยคุกคาม และ/หรือฝ่ายข้าศึกอย่างเพียงพอ

(๑.๒) พิสูจน์ฝ่าย ทำการพิสูจน์ฝ่าย อ.ที่ตรวจพบว่าเป็นฝ่ายเดียวกัน, ไม่ทราบฝ่ายหรือฝ่ายข้าศึก

(๑.๓) ควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ ของ อ.ฝ่ายเดียวกันที่ปฏิบัติการภายในพื้นที่รับผิดชอบ

(๑.๔) แจ้งเตือนการโจมตีทางอากาศ แก่หน่วยในระบบป้องกันทางอากาศทั้งฝ่ายทหารและฝ่ายพลเรือน เนื่องจากเป็นหน่วยที่รับทราบข้อมูลและติดตามการเคลื่อนไหวของ กำลังทางอากาศฝ่ายตรงข้าม ดังนั้นจึงต้องทำหน้าที่ในการส่งข่าวการแจ้งเตือนทางอากาศไปให้หน่วยเกี่ยวข้องทราบโดยทันที

(๑.๕) แสดงสถานภาพทางยุทธการ เกี่ยวกับการป้องกันทางอากาศณ ส่วนควบคุม การยุทธ ศูนย์ยุทธการทางอากาศ และหน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือน ด้วยความถูกต้อง แน่นอน และทันเวลาตามข่าวที่ส่งมาจาก ศูนย์ควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ และสถานีรายงานต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลให้แก่ผู้บังคับบัญชาสำหรับตัดสินตกลงใจในการสั่งใช้กำลังทางอากาศ

หน่วยควบคุมอากาศยานและแจ้งเตือนประกอบด้วย

(๑.๑.๑) ศูนย์ควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ: ศคปอ. (SECTOROPERATION CENTER - SOC)

(๑.๑.๒) สถานีรายงาน: สร. (Reporting Post - RP)

(๑.๑.๓) สถานีรายงานเคลื่อนที่ : สร.คท. (Mobile Reporting Post - MRP)

**(๒) หน่วยบินเตรียมพร้อมขับไล่สกัดกั้น (Fighter Interceptor unit)**

หน่วยบินขับไล่สกัดกั้น เป็นการจัดทางยุทธวิธีจากฝูงบินขับไล่สกัดกั้นอยู่ในความควบคุมทางยุทธการของศูนย์ยุทธการทางอากาศ ปกติ บ.ขับไล่สกัดกั้นต้องสามารถปฏิบัติการได้ทุก กาลอากาศ ติดอาวุธปืนกลอากาศ ปืนใหญ่อากาศ และอาวุธปล่อยนำวิถีอากาศสู่อากาศ กระจายกำลังอยู่ตามสนามบินต่าง ๆ ที่เหมาะสมตามแผนยุทธการ

**(๓) หน่วยอาวุธต่อสู้อากาศยาน (Anti-Aircraft Artillery)**

อาวุธต่อสู้อากาศยาน หมายถึง ปืนใหญ่ต่อสู้อากาศยาน และอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศที่ประจำการอยู่กับหน่วยอาวุธต่อสู้อากาศยานของสามเหล่าทัพ หรือหน่วยภาคพื้นหน่วยอาวุธต่อสู้อากาศยานรับผิดชอบป้องกันพื้นที่ในกรณีที่ข้าศึกสามารถทะลุทะลวงผ่านแนวป้องกันของ บ.สกัดกั้นเข้ามาได้

**๔. ระบบเรดาร์พิสูจน์ฝ่าย IFF/SIF**

ตอนต้นสงครามโลกครั้งที่ ๒ แผนยุทธศาสตร์หลักของฝ่ายพันธมิตรคือ ตั้งรับเครื่องบินข้าศึกเพราะเหตุว่าสถานภาพเครื่องบินของฝ่ายพันธมิตรยังอ่อนแอมากจะส่งเครื่องบินออกปฏิบัติการก็ต่อเมื่อ มีรายงานจากเรดาร์ชายฝั่งที่ทำหน้าที่แจ้งเตือนภัยว่ามีเครื่องบินศัตรูล่วงล้ำเข้ามาแต่คลื่นเรดาร์สะท้อนกลับไม่มีเครื่องหมายบอกว่าเครื่องบินนั้นๆ เป็นฝ่ายใด จึงได้ติดตั้ง Beacon แก่เครื่องบินพันธมิตรทุกเครื่องเพื่อวิเคราะห์ออกว่าคลื่นสะท้อนกลับเป็นฝ่ายเดียวกัน หรือฝ่ายข้าศึก เรดาร์ Beacon บนเครื่องบินจะส่งคลื่น Pulse ตอบทันทีที่ได้รับคลื่น Pulse จากสถานีเรดาร์ชายฝั่ง คลื่น Pulse ตอบจะเข้าเครื่องรับเรดาร์ภาคพื้นปรากฏที่จอเรดาร์สว่างกว่าคลื่นสะท้อนกลับ

ธรรมดา พนักงานเรดาร์ก็ทราบได้ว่าเป้าหมายนั้น ๆ เป็นเครื่องบินฝ่ายเดียวกัน ถ้ามีแต่คลื่นสะท้อนกลับธรรมดา ๆ ก็อ่านความหมายว่าเป็นเครื่องบินข้าศึก

วิธีการพิสูจน์ฝ่ายแบบนี้ เรียกชื่อว่า “IFF = Identification Friend or Foe” ระบบนี้ทำงานโดยสายอากาศของระบบ IFF จะติดตั้งอยู่บนสายอากาศของเรดาร์ค้นหาและจะใช้จอเรดาร์ร่วมกัน มีเครื่องรับ-ส่งบนพื้นดิน ซึ่งเรียกว่า “Interrogator Responder” จะสร้างสัญญาณถามเป็น Pulse คู่มีหลาย Mode ต่างกัน ด้วยความถี่ 1,030 MHz. บนเครื่องบินก็จะมีชุดรับ-ส่ง เรียกว่า “Transponder” จะทำการ Decode สัญญาณของ Interrogator ว่าเป็น Mode ใด แล้วก็ส่งสัญญาณตอบเป็น Reply Pulse กลับไปยังภาคพื้นด้วยความถี่ 1,090 MHz. ทางด้าน Interrogator ก็จะทำการแสดงผลของ Reply Pulse และส่งไปปรากฏบนจอเรดาร์ และเนื่องจากระบบ IFF การรับ-ส่งต่างความถี่กันจึงไม่มี Clutter เกิดขึ้น IFF จะให้ข้อมูลได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นและเพื่อควบคุมจำนวนของเครื่องบินที่มีมากขึ้นทุกวันอีกทั้งมีความเร็วสูงขึ้นอีกด้วย จึงได้มีการพัฒนาระบบ IFF โดยให้มีการเลือกรหัสตอบได้หลายๆ รหัสซึ่งเรียกว่า“SIF = Selective Indentification Feature”แล้วเรียกชื่อเสียใหม่ว่า“ระบบIFF/SIF”

หน้าที่ของเรดาร์พิสูจน์ฝ่าย คือ

๑. บอกให้พนักงานของหอบังคับการสามารถแยกความแตกต่างของเครื่องบินที่กำลังบินอยู่และอยู่ในรัศมีของRadar ที่จับได้

๒. ในทางทหาร IFF/SIF ทำให้พนักงานสามารถรู้ได้ว่าเครื่องบินลำใดเป็นพวกเดียวกัน และลำใดเป็นฝ่ายตรงข้าม

ความสัมพันธ์ระหว่าง IFF กับ เรดาร์ค้นหา

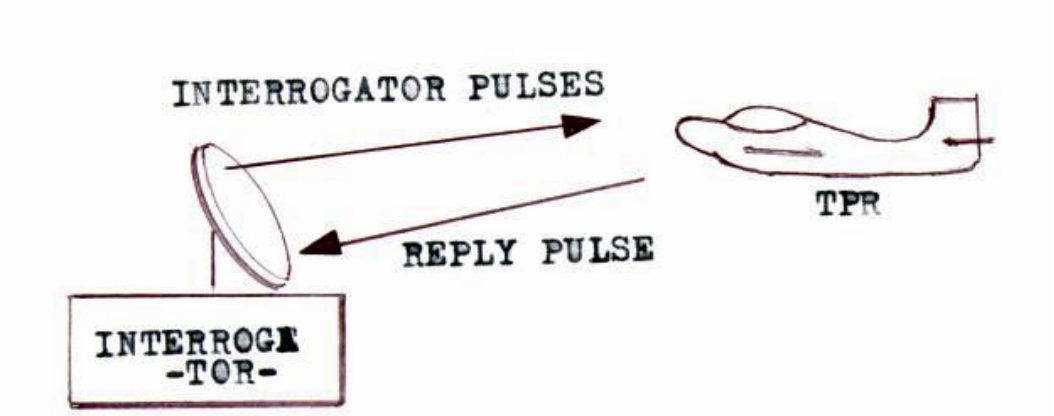
๑. ใช้ Display เดียวกัน

๒. สายอากาศแยกกันโดยของ IFF จะติดอยู่บนสายอากาศของเรดาร์ค้นหา

**<u>องค์ประกอบของระบบ IFF/SIF</u>** มีอยู่ด้วยกันสองส่วนคือ Interrogator และTransponder

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

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




รูปที่ ๕.๑๔ แสดงถึงองค์ประกอบ ของ IFF/SIF

วัตถุประสงค์ของแต่ละ Mode เพื่อเป็นการสะดวกแก่พนักงานที่จะแยกแยะเป้าหมายได้ ในการทำงานของแต่ละ Mode ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดวัตถุประสงค์ของแต่ละ Mode ดังนี้

Mode 1 ใช้พิสูจน์ว่าเป็นเครื่องบินของฝ่ายใดฝ่ายหนึ่ง รวมทั้งบอกภาระกิจของเครื่องบินในการปฏิบัติงานด้วย (Security Identification = SI)

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

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

Mode C ใช้ในกรณีต้องการทราบความสูงของเครื่องบิน

Mode 4 ใช้ในกรณี การบินซึ่งเป็นความลับทางทหาร

**๕. การประเมินค่าเรดาร์ (Radar Evaluation)**

การประเมินค่าเรดาร์มีความมุ่งหมาย เพื่อต้องการทราบขีดความสามารถทางยุทธการ ขีดจำกัดในการจับเป้าหมาย การติดต่อสื่อสารพื้นดิน/อากาศ ทอ.อม. อาศัยหนังสือคู่มือ AFM 100-28A Basic Radar Evaluation เป็นหลักในการดำเนินการประเมินค่าเรดาร์ การประเมินค่าเรดาร์มีแบบต่างๆ ดังนี้คือ

**๕.๑ การประเมินค่าสถานีเรดาร์ (Station Evaluation)** ต้องมีการดำเนินการภายใน ๖๐-๙๐ วัน หลังจากเริ่มติดตั้งใช้งาน หรือในกรณีที่มีการปรับปรุงส่วนที่สำคัญของเครื่องเรดาร์ทุกครั้ง

**๕.๑.๑** ความรับผิดชอบของสถานีเรดาร์ ก่อนการประเมินค่าต้องมีการติดต่อประสานทั้งด้านสื่อสารและยุทธการให้เรียบร้อยก่อน เครื่องเรดาร์สามารถทำงานได้ตามเอกสารเทคนิคบริภัณฑ์ เครื่องวัด และเครื่อง ส-อ พร้อม ภายหลังการประเมินค่าแล้วด้านสื่อสารจะต้องดำเนินการแก้ไขข้อเสนอแนะของชุดประเมินค่า

**๕.๑.๒** ความรับผิดชอบของเจ้าหน้าที่ชุดทำงานประเมินค่ามีดังนี้

**๕.๑.๒.๑** ตรวจสอบคุณลักษณะทางเทิคนิคของเครื่อง ส-อ.ทุกประเภท

**๕.๑.๒.๒** ทำ Screening Data ให้ละเอียด

**๕.๑.๒.๓** ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนทางด้านเอียงของสายอากาศเรดาร์ค้นหา

**๕.๑.๒.๔** ให้คำแนะนำการซ่อมบำรุงรายการที่สำคัญเท่าที่จำเป็น เช่น Antenna Tilt, MTI Gates แบบของ Video และการเลือกใช้ลำคลื่นให้มีสภาพการทำงานได้ดีที่สุด

**๕.๑.๒.๕** ประเมินค่าขีดความสามารถ และขีดจำกัดของระบบ MTI และระบบ ECCM

**๕.๑.๒.๖** ตรวจสอบการจับเป้าหมาย และความคลาดเคลื่อนของเรดาร์วัดระยะสูง

**๕.๑.๒.๗** เตรียมการ และแจกจ่ายรายงานการประเมินค่าเกี่ยวกับการประเมินค่าปัญหาที่พบข้อยุติ และข้อเสนอต่างๆ

**๕.๑.๓** รายการตรวจก่อนประเมินค่า เจ้าหน้าที่ชุดทำงานประเมินค่า ต้องบันทึกตามหัวข้อดังนี้

**๕.๑.๓.๑** ระบบสายอากาศ มีรายการตรวจดังนี้

- Mechanical Axis
- Elevation Electromagnetic Axis
- Azimuth Electromangnetic Axis
- Solar Radiation

**๕.๑.๓.๒** ระบบเครื่องส่ง มีรายการดังนี้

- กำลังเครื่องส่ง
- Transmitter Spectrum
- Standing Wave Ratio

**๕.๑.๓.๓** ระบบเครื่องรับ มีรายการตรวจดังนี้

- MDS = Minimum Desirable Signal
- Noise Figure
- Receiver Bandwidth
- Transmit
- Receiver (TR) Recovery Time
- อุปกรณ์ประกอบการตรวจ เช่น Skyline – Graph, Coverage Diagrame

**๕.๒ การประเมินค่าด้วยเครื่องบิน (Evaluation Flights)** นายทหารประเมินค่าจะเป็นผู้กำหนดความสูง, ทิศทาง และแนวบินรูป Radial ของแต่ละเที่ยว เพื่อตรวจสอบการจับเป้าหมายของเรดาร์ทั้งค้นหา และวัดระยะสูง ว่ามี Error หรือไม่ ข้อมูลที่ได้จากการบินทดสอบไม่ว่าจะบันทึกด้วยระบบ Manaul หรือ Automatic (บันทึกลงเทปแม่เหล็ก) ก็ตาม จะนำมาทำ Vertical Coverage Chart และ จัดทำ Radar Coverage Indicator = RCI ของสถานีเรดาร์นั้นต่อไป สำหรับเรดาร์วัดระยะสูง ข้อมูลที่ได้จากการบินทดสอบ จะเป็นแบบ Height Versus Range Graph , Histograms (Bar Graph) เจ้าหน้าที่ชุดทำงานประเมินค่าจะให้คำแนะนำเรื่องเรดาร์วัดระยะสูงเกี่ยวกับ Refraction Correction และ Sensitivity Time Control (STC) ให้ได้ผลดีที่สุด

**๕.๓ การประเมินค่าระบบ (System Evaluation)** เป็นการประเมินค่าระบบเรดาร์ มีขีดความสามารถ และขีดจำกัดอย่างไรบ้าง เมื่อประสานกันกับ คปอ.ฯ แบ่งเป็น ๔ ระยะ

**๕.๓.๑** ระยะแรก ประเมินค่าระบบเรดาร์แต่ละสถานี และปฏิบัติร่วมกันหลายๆ สถานีเรดาร์

**๕.๓.๒** ระยะสอง ประเมินค่าแต่ละสถานีใหม่

**๕.๓.๓** ระยะสาม ประเมินค่าทุกระบบร่วมกับการใช้ ECM

**๕.๓.๔** ระยะสุดท้าย ประเมินค่าโดยไม่มีการใช้ ECCM การประเมินค่าระบบนี้มักไม่ใคร่กระทำ

**๕.๔ การประเมินค่าเป็นพิเศษ (Special Evaluation)** อาจกระทำได้ทุกเมื่อ เป็นการหาข้อขัดข้อง หรือทดสอบการประเมินค่าสถานีเรดาร์ที่ได้ปฏิบัติไปแล้วว่าถูกต้อง หรือไม่เพื่อแก้ปัญหาของสถานีเรดาร์ที่ยังมีอยู่

**๕.๕ การประเมินค่าแบบต่อเนื่อง (Continuous Evaluation)** บางทีเรียกว่า “การตรวจควบคุมคุณภาพ (QC = Quality Control)” การปฏิบัติของเจ้าหน้าที่ยุทธการเป็นคนละเรื่องกับฝ่ายสื่อสาร ที่ดำเนินการตามกำหนดระยะเวลาทุก ๖ เดือน หรือตรวจสอบเป็นการภายในทุกเดือน (Local QC.)

การประเมินค่าแบบต่อเนื่อง (Continuous Evaluation) เป็นการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่อง และประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่ยุทธการ การตรวจสอบแบบสุ่มตัวอย่าง คล้ายกับการตรวจสอบของโรงงานอุตสาหกรรม หรือการเลือกผลิตภัณฑ์ของบริษัทขึ้นมาชิ้นหนึ่ง (Random Sampling) เป็นครั้งคราว เพื่อหาคุณค่าเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด การตรวจสอบคุณภาพของเรดาร์ใช้ Random Track ซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนแต่ละ Track แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย RCI Chart ซึ่งมีข้อมูลของสถานีเรดาร์, ชนิดของ บ., ความสูงของเป้าหมาย, db Rating หรือ Electrical Size ของ บ. แต่ละแบบ

**๕.๖ ที่ตั้งสถานีเรดาร์**

การสำรวจพื้นที่สำหรับกำหนดสถานที่ตั้งของสถานีเรดาร์ โดยนำปัจจัยหรือสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ มาพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อให้แน่ใจว่า ณ ที่ตั้งนั้น ๆ เครื่องเรดาร์จะสามารถให้การสนับสนุนภารกิจด้านยุทธการได้ผลดีที่สุด พร้อมกับคำนึงถึงการส่งกำลังบำรุงด้านต่าง ๆ ในเวลาเดียวกันมักปรากฏอยู่บ่อย ๆ ว่าในพื้นที่ที่เราต้องการให้มีขอบข่ายของเรดาร์โดยทั่วถึงนั้นบางจุดเหมาะสมอย่างยิ่งในด้านเทคนิค แต่ขัดข้องเรื่องพื้นที่ไม่เพียงพอเส้นทางเข้าออกไม่มีหรือมีอยู่แล้วก็ต้องใช้งบประมาณในการปรับปรุงมาก ยากแก่การรักษาความปลอดภัย ฯลฯ ปกติแล้วการสำรวจหรือศึกษาพื้นที่โดยทั่ว ๆ ไปก่อน กำหนดที่ตั้งที่แน่นอน มักจะกำหนดขึ้นหลายจุดแล้วนำมาพิจารณาแห่งที่เหมาะสมที่สุด บางครั้งไม่มีจุดที่เหมาะสมโดยสมบูรณ์ แต่จำเป็นต้องเลือกเอาจุดใดจุดหนึ่งที่มีจุดอ่อนน้อยที่สุด งานนี้แบ่งเป็น ๓ ตอน ตามลำดับ

**๕.๖.๑** การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในสำนักงาน

**๕.๖.๒** งานสนาม หรือการสำรวจพื้นที่จริง

**๕.๖.๓** งานขั้นสุดท้ายในสำนักงาน และการรายงานข้อมูลหลังการสำรวจ

**๕.๗ การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในสำนักงาน**

**๕.๗.๑** ความมุ่งหมายขั้นแรก จะกำหนดที่ตั้งที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นไปได้ตั้งแต่ ๒ แห่งขึ้นไป ชุดสำรวจจะประกอบด้วยตัวแทนของสายงานด้านยุทธการ, สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์, ช่างโยธา, ส่งกำลังบำรุง และเจ้าหน้าที่อื่นๆอีกตามความจำเป็น

**๕.๗.๒** สภาพภูมิประเทศ แบ่งออก ตามหลักสากลในการสำรวจพื้นที่สำหรับที่ตั้งเรดาร์มีอยู่ ๔ ลักษณะ คือ ฝั่งทะเล, พื้นที่สูงๆ ต่ำ ๆ โดยรอบบริเวณ, พื้นที่ราบ และบริเวณภูเขาโดยพื้นฐานทั่วไปเรดาร์ในระบบป้องกันภัยทางอากาศต้องการรัศมีทำการไกล และมี Ground Clutterน้อยที่สุด เพ่งเล็งบริเวณที่มีภูเขาสูงเป็นประการแรก เพราะถ้าที่ตั้งอยู่สูงมุมกดของ Beam ครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่า แต่ในเวลาเดียวกันถ้าเลือกจุด

ไม่เหมาะสม ข้อดีของมุมกดนั้นเอง จะมีผลสียทางด้าน Ground Clutter จากยอดเขา หรือสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่รอบๆ ที่ตั้งเหมือนกัน อย่างไรก็ตามต้องอยู่ในภาวะจำยอม คือ ณ จุดนั้นจะไม่สูงสำหรับเทือกเขาบริเวณนั้น แต่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับอาคาร และสิ่งก่อสร้างอื่นๆ ตลอดจนส่งกำลังบำรุงไม่ยากลำบากนักก็ยังเลือกจุดนี้โดยหวังว่าปัญหาสัญญาณรบกวนโดยรอบสถานีในระยะไกลนั้น สามารถใช้วงจร MTI และ STC ช่วยขจัดได้บ้าง

**๕.๗.๓** เพื่อให้การทำงานของเครื่องเรดาร์ได้ผลดีที่สุดในด้านยุทธการ ถ้ามีเครื่องเราดาร์หลายแบบ ต้องพิจารณาชุดเรดาร์ที่จะนำมาใช้งาน เองที่ต้องพิจารณา คือ

- ความถี่ และกำลังเครื่องส่ง
- ความกว้างของ Pulse
- PRF
- เครื่องรับแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชุดนั้น
- ความไวของเครื่องรับ
- ระบบสายอากาศ
- Gain และ Directivity
- Horizontal Beamwidth
- Vertical Beamwidth
- Polarization

แต่ถ้ามีแบบ และจำนวนเรดาร์จำกัด คุณสมบัติเหล่านี้มักจะมองข้ามไป เพราะไม่มีทางเลือกจำเป็นต้องใช้เครื่องเรดาร์ที่มีอยู่ คงพิจารณาหนักไปทางด้านยุทธการ และความสะดวกในการส่งกำลังบำรุงเป็นหลัก

**๕.๗.๔** การศึกษาแผนที่ซึ่งเป็นที่สำคัญที่สุด ในขั้นแรกถ้าสามารถทำได้โดยละเอียดจะลดงานด้านสนามลงได้มากในการหาจุดที่เกี่ยวข้อง และลักษณะพื้นที่ทั่วไปในบริเวณนั้น เรื่องของ RLS = Horizontal Radar Line - Of - Sight, Converage Diagram (High - Altitude Gap Diagram (Low -Altitude) ล้วนๆเป็นเรื่องที่ต้องเตรียมการ จากการศึกษาแผนที่ทั้งสิ้น อนึ่งหลังจากการศึกษาจากแผนที่แล้ว ถ้ามีการตรวจสอบสภาพภูมิประเทศทั้งการลาดตระเวนและการถ่ายภาพทางอากาศเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรายละเอียด เช่น สิ่งก่อสร้าง หรือเส้นทางต่างๆ ซึ่งไม่ปรากฏในแผนที่ จะทำให้การประมาณการครั้งแรกนี้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้นหรืออาจเพิ่มเติมจุดที่จะพิจารณาขึ้นมาใหม่ก็เป็นได้ อย่างน้อยที่สุดการลาดตระเวน และถ่ายภาพทางอากาศช่วยประหยัดเวลาในการที่ต้องไปสำรวจทางภาคพื้นภายหลัง

**๕.๗.๕** Radar-Line-Of-Sight Boundary Diagram เป็นการกำหนดขอบเขตการทำงานของเครื่องเรดาร์ในแนวระดับสายตา ณ ความสูงระดับต่าง ๆ ซึ่งขั้นแรกนี้อาจกำหนดความสูงเพียง 3K, 5K, 10K แล้วตรวจสอบดูว่าในมุมต่างๆ แต่ละองศานั้นมีมุมอับ ณ ที่ใดหรือบริเวณใดบ้าง รัศมีในการจับเป้าหมายที่แท้จริงในความสูงระดับต่างๆ ต้องได้รับการบินทดสอบ (Flight Check) ภายหลังการติดตั้งด้วย บ. ที่มี db.Rating แตกต่างกันตามประเภทของ บ. ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อประเมินค่าการทำงานของสถานีนั้น ๆ พร้อมกับรัศมีการติดต่อสื่อสาร พื้นดิน / อากาศ ทั้งย่านความถี่ VHF และ UHF ด้วย

**๕.๘ งานสนาม หรือการสำรวจพื้นที่จริง**

**๕.๘.๑** ชุดสำรวจซึ่งจะต้องเก็บข้อมูลทั้งหมดที่เกี่ยวกับพื้นที่ พื้นที่ที่เลือกไว้แต่ละจุดนั้นก่อนออกเดินทางต้องมีการจัดชุดสำรวจ ประกอบด้วยใครบ้าง? เตรียมเครื่องมือเครื่องใช้, ประชุมเจ้าหน้าที่ภายในชุด และประสานงานกับหน่วยที่เกี่ยวข้องในโครงการเรดาร์ ถ้าต้องการให้การทำงานของชุดสำรวจครบทุกสายงาน ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย คือได้ข้อมูลมาครบในการเดินทางครั้งเดียว ควรจะส่งชุดล่วงหน้าที่มีประสบการณ์ทางด้าน

นี้ประมาณ ๒-๓ คน ไปสำรวจข้อมูลทั่วไปก่อน แล้วกลับมาประสานงานกับชุดใหญ่ว่าควรเตรียมการในเรื่องใดบ้าง อย่างไรก็ตามเจ้าหน้าที่ในชุดสำรวจนี้อย่างน้อยต้องประกอบด้วย

- นายทหารอิเล็กทรอนิกส์ (เรดาร์)
- นายทหารสื่อสาร(อากาศ/พื้นดิน, จุด/จุด)
- นายทหารช่างโยธา
- นายทหารส่งกำลังบำรุง
- เจ้าหน้าที่เขียนแบบ

**๕.๘.๒** ด้านเครื่องมือเครื่องใช้ ต้องมีเข็มทิศ, กล้องส่องทางไกล, กล้องถ่ายรูป, เทปวัดระยะ, อุปกรณ์เกี่ยวกับงานแผนที่ และรังวัด วิทยุติดต่อชนิดมือถือ ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ ที่จะอำนวยความสะดวกให้แก่คณะก็แล้วแต่สภาพภูมิประเทศ, จำนวนคน, ยานพาหนะที่ใช้ เส้นทางคมนาคม และห่างไกลจากชุมชนมากน้อยเพียงใด เพราะมีผลกระทบกระเทือนในเรื่องอาหาร และที่พัก

**๕.๘.๓** งานหลักที่ต้องพิจารณา ณ พื้นที่แต่ละแห่งที่เลือกไว้คือ เปรียบเทียบ Skyline Charts, Horizontal Coverage Charts และ Propagation Data รวมทั้งความสะดวกในด้านส่งกำลังบำรุง และก่อสร้าง ฯลฯ เจ้าหน้าที่ชุดนี้ต้องพยายามประณีประนอมความต้องการด้านเทคนิค ความสะดวกในการส่งกำลังบำรุงให้อยู่ในเกณฑ์ที่พอไปด้วยกันได้ ถ้าแตกต่างกันมากก็ไม่นำมาพิจารณาเลย

**๕.๘.๔** งานขั้นสุดท้ายในสำนักงาน และการรายงานข้อมูลหลังการสำรวจข้อมูลต่างๆ จากการสำรวจพื้นที่ขั้นแรก ซึ่งส่วนมากเป็นข้อมูลด้าน ส-อ. และ ชย. จะต้องรวบรวมรายงาน และชี้แจงรายละเอียดแก่ บก.โครงการฯ หรือคณะกรรมการ โครงการเรดาร์เพื่อตัดสินใจเลือกจุดที่เหมาะสม แล้วพิจารณาขั้นตอนต่อไป แผนกำหนดงานขนส่ง และติดตั้งตามโครงการหลังที่ดำเนินการเรื่องที่ดิน, การชดใช้ค่าเสียหายแก่ผู้ครอบครองเดิม หรือข้อตกลงกับกระทรวงเกษตรฯ รวมทั้งตัดเส้นทางเข้าออกแล้ว แผนกำหนดงานอย่างน้อยควรมีขั้นตอนเกี่ยวพันกัน ดังนี้

- สำรวจเลือกพื้นที่
- ออกแบบอาคาร
- สร้างอาคาร
- จัดหาพัสดุ, ครุภัณฑ์ (พธ.,ขส.,ชย.,ฯลฯ)
- ขนส่งพัสดุ ส-อ.
- ขนส่งพัสดุสนับสนุน
- บรรจุกำลังพล ส-อ.
- ดำเนินการติดตั้งเครื่อง ส-อ.
- ทดสอบและปฏิบัติงาน
- บรรจุกำลังพลเพิ่มเติม (ขั้นแรกบรรจุไว้ประมาณ ๓๐ % เพื่อโอนถ่ายให้หน่วยงานปฏิบัติพยายามบรรจุให้อีก ๖๐-๗๐%) แผนกำหนดงานในแต่ละขั้นตอนจะใช้เวลามากน้อย หรือช่วงการดำเนินงานซ้อนกันอยู่นานเพียงใด มีปัจจัยเกี่ยวข้องอีกมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ ปัญหาด้านงบประมาณ บางโครงการอาจใช้เวลาเพียง ๒ ปี บางโครงการอาจใช้เวลาถึง ๕ หรือ ๗ ปี จึงจะแล้วเสร็จ ทั้งนี้ต้องแล้วแต่แผนยุทธการ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามสถานการณ์ทั้งใน และนอกประเทศด้วย

**๕.๙ การประเมินค่าเรดาร์ด้วยการใช้ บ.บินทดสอบ**

การประเมินค่าเรดาร์ด้วยการใช้ บ.บินทดสอบ ของ ทอ.กำหนดประเมินค่าปีละ ๒ ครั้ง ประเมินค่าที่ระดับความสูง ๒,๕๐๐ - ๔๓,๐๐๐ ฟุต และการรายงานสถานภาพเรดาร์ป้องกันทางอากาศในที่ประชุม ศปก.ทอ.

**๕.๙.๑** การประเมินค่าเรดาร์ด้วยการใช้ บ.บินทดสอบ กำหนดให้มีการประเมินค่า ๒ แบบ คือ การประเมินค่าหลัก และการประเมินค่ารอง

**๕.๙.๑.๑** การประเมินค่าเรดาร์ด้วยการใช้ บ.บินทดสอบแบบการประเมินค่าหลัก

**๕.๙.๑.๑(๑)** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับ เป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมายกำหนดประเมินค่าปีละ ๑ ครั้ง ในช่วงเดือน ธ.ค. - ม.ค. และกำหนดให้ใช้ความสูง ๒,๕๐๐ - ๓๐,๐๐๐ ฟุต

**๕.๙.๑.๑(๒)** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับ เป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) กำหนดประเมินค่าปีละ ๑ ครั้ง ในช่วงเดือน พ.ค. - มิ.ย. และกำหนดให้ใช้ความสูง ๒,๕๐๐ - ๑๕,๐๐๐ ฟุต

**๕.๙.๑.๒** การประเมินค่าเรดาร์ด้วยการใช้ บ.บินทดสอบแบบการประเมินค่ารอง

**๕.๙.๑.๒(๑)** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมาย โดยตรวจจับ บ.พาณิชย์ที่บินผ่านในเส้นทางและทิศทางเดียวกันเป็นประจำกับที่ตั้งสถานีเรดาร์ กำหนดประเมินค่าทุกสัปดาห์ และกำหนดประเมินค่าที่ความสูง ๓๐,๐๐๐ - ๔๓,๐๐๐ ฟุต

**๕.๙.๑.๒(๒)** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับ เป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) ขณะที่ บ.เคลื่อนย้ายที่ตั้ง (Deploy) ตามแผนฝึกบินของหน่วยบิน กำหนดประเมินค่าตามแผนฝึกบินฯ และกำหนดให้ใช้ความสูง ๒,๕๐๐ - ๑๕,๐๐๐ ฟุต

**๕.๙.๑.๓** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมาย

**๕.๙.๑.๓(๑)** วัตถุประสงค์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงของเรดาร์ในการวัดความสูงของเป้าหมาย

**๕.๙.๑.๓(๒)** เรดาร์ที่ต้องได้รับการประเมินค่า

- เรดาร์ป้องกันทางอากาศ
- เรดาร์ควบคุมการจราจรทางอากาศ (Airport Surveillance Radar : ASR)
- เรดาร์ Erieye ที่ติดตั้งบน บ.ค.๑ (Saab 340 AEW)
- เรดาร์เคลื่อนที่ตรวจจับระยะปานกลาง (Giraffe - 180)
- เรดาร์ป้องกันฐานที่ตั้ง (Giraffe - 40)

**๕.๙.๑.๓(๓)** กำหนดให้ บ.ข.๑๘ ข/ค, บ.ข.๑๙/ก, บ.ข.๒๐/ก, บ.ขฝ.๒, บ.จ.๗, บ.ฝ.๑๙ หรือ บ.แบบอื่น ที่มีสมรรถนะเหมาะสม เป็น บ.ที่ใช้ในการบินทดสอบประเมินค่าเรดาร์

**๕.๙.๑.๓(๔)** วิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ด้วยการใช้ บ.บินทดสอบครอบคลุมการตรวจสอบประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ ๓ ด้าน ตามข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเรดาร์แต่ละประเภท ดังนี้

**๕.๙.๑.๓(๔.๑)** การตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด โดยเปรียบเทียบระยะที่เรดาร์ตรวจจับเป้าหมายได้จริง (Detection Range) กับระยะที่เรดาร์ควรตรวจจับเป้าหมายได้ (Reference

Range) ซึ่งเป็นระยะที่ได้จากแผ่นแสดงการครอบคลุมของเรดาร์ (Radar Coverage Indicator : RCI) ที่ กสอ.คปอ.จัดทำขึ้น ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ ๘๐ จึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยเปรียบเทียบจากสูตรคำนวณ คือ

ประสิทธิภาพในการตรวจจับเป้าหมายไกลสุด = Detection Range x 100
Reference Range

**๕.๙.๑.๓(๔.๒)** ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมายแบบสายอากาศหมุน ๓๖๐ องศา ใช้วิธีการตรวจนับเป้าหมายตั้งแต่ตรวจจับได้ครั้งแรกจนเป้าหมายจางหาย โดยนับจำนวนครั้งของเป้าหมายที่ปรากฏบนจอเรดาร์ในแต่ละรอบการหมุนของสายอากาศกับจำนวนรอบสายอากาศทั้งหมด (Inner Range - Outer Range) ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ ๘๐ จึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยเปรียบเทียบจากสูตรคำนวณ คือ

ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย = จำนวนรอบสายอากาศที่จับเป้าหมายได้ x 100
จำนวนรอบสายอากาศทั้งหมด

**๕.๙.๑.๓(๔.๓)** ความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมาย ว่ามีความเที่ยงตรงมากน้อยเท่าไร โดยเปรียบเทียบความสูงที่วัดได้จากเรดาร์ปฐมภูมิ (Primary Surveillance Radar : PSR) กับความสูงที่วัดได้จาก MODE “C” ซึ่งเป็นความสูงจากเรดาร์ทุติยภูมิ (Secondary Surveillance Radar : SSR) (ความสูงจาก MODE “C” ถือว่าเป็นความสูงที่ค่อนข้างเที่ยงตรง ถ้าความสูงจาก MODE “C” ไม่แสดงผลจะใช้ความสูงจากนักบินรายงานแทนได้) ถ้าความสูงที่วัดได้จากเรดาร์ปฐมภูมิ ผิดพลาดจากความสูงที่วัดได้จาก MODE “C” ไม่เกิน + ๓,๐๐๐ ฟุต ถือว่าเป็นจำนวนรอบที่วัดความสูงอยู่ในเกณฑ์ถูกต้อง นำไปเปรียบเทียบกับจำนวนรอบที่วัดความสูงจากเรดาร์ปฐมภูมิและ MODE “C” ที่วัดได้พร้อมกันทั้งหมด ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ ๘๐ จึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยเปรียบเทียบจากสูตรคำนวณ คือ

ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย = จำนวนรอบสายอากาศที่จับเป้าหมายได้ x 100
จำนวนรอบสายอากาศทั้งหมด

**๕.๙.๑.๓(๕)** หลักเกณฑ์การบินประเมินค่า

**๕.๙.๑.๓(๕.๑)** เส้นทางบินประเมินค่าจะต้องเป็นทิศทางที่ไม่มีสิ่งกีดขวางในการตรวจจับเป้าหมายของเรดาร์ โดยจะบินเข้า (HOMING) และออกจากสถานีเรดาร์เท่านั้น (ไม่ใช่บินผ่าน) โดย นบ.จะต้องรักษาความเร็ว ความสูง และทิศทางบิน ให้คงที่ตลอดเส้นทางบิน

**๕.๙.๑.๓(๕.๒)** ระยะห่างของ บ.ก่อนบินเข้าสู่สถานีเรดาร์ ณ ระดับความสูงใด จะต้องมากกว่ารัศมีการตรวจจับเป้าหมายของเรดาร์ที่จะตรวจสอบ ณ ความสูงนั้น และในทางกลับกันต้องบินออกจากสถานีเรดาร์ในระดับความสูงนั้น ไปจนกว่าจะพ้นระยะรัศมีการตรวจจับเป้าหมายของเรดาร์

**๕.๙.๑.๔** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายที่ปฏิบัติ การบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile)

**๕.๙.๑.๔(๑)** วัตถุประสงค์

**๕.๙.๑.๔(๑.๑)** เพื่อทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมาย แนวระนาบ แนวแกนลำตัว แนวแกนดิ่ง และการทดสอบการแยกเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงท่าทางการบินอย่างรวดเร็วของเรดาร์

**๕.๙.๑.๔(๑.๒)** เพื่อนำผลที่ได้จากการบินทดสอบในแต่ละรูปแบบการบิน (Profile) ทางยุทธวิธีเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์การตรวจจับเป้าหมายของเรดาร์ที่มีรูปแบบการบินในลักษณะเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน วิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการซ่อมบำรุงเรดาร์ การทดสอบจุดบอดจากการตรวจจับของเรดาร์ และใช้สำหรับวางแผนการปฏิบัติอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

**๕.๙.๑.๔(๒)** เรดาร์ที่ต้องได้รับการประเมินค่า ได้แก่ เรดาร์ป้องกันทางอากาศเรดาร์เคลื่อนที่ตรวจจับระยะปานกลาง (Giraffe - 180) และเรดาร์ Erieye

**๕.๙.๑.๔(๓)** สถานีเรดาร์ที่รับการประเมิน ได้แก่ สถานีรายงานที่ บ.บินเข้าหาเป็นสถานีหลัก และสถานีรายงานข้างเคียงที่มีรัศมีการตรวจจับครอบคลุมเส้นทางการบินประเมินค่าของ บ.เป็นสถานีรอง

**๕.๙.๑.๔(๔)** ศคปอ.กท., ศคปอ.ดม. และ ศคปอ.สฎ.ร่วมการทดสอบด้วยการเฝ้าตรวจและบันทึกข้อมูลการตรวจจับ บ.ที่บินทดสอบสมรรถนะสถานีเรดาร์ เพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลร่วมกันกับสถานีเรดาร์ต่าง ๆ

**๕.๙.๑.๔(๕)** วิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) กำหนดลักษณะท่าทางการบินแต่ละแบบ ดังนี้

**๕.๙.๑.๔(๕.๑)** การทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมาย ในแนวระนาบ

**๕.๙.๑.๔(๕.๒)** การทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมาย ในแนวแกนลำตัว

**๕.๙.๑.๔(๕.๓)** การทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมาย ในแนวแกนดิ่ง

**๕.๙.๑.๔(๕.๔)** การทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงท่าทางการบินอย่างรวดเร็วและมีค่าความสูงที่แยกจากกัน

**๕.๙.๑.๔(๖)** หลักเกณฑ์การบินประเมินค่า

**๕.๙.๑.๔(๖.๑)** ในแต่ละครั้งของการบินทดสอบแต่ละสถานีเรดาร์ให้ปรับเปลี่ยนความสูง ระยะห่าง และทิศทางของ บ.เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลาย และสามารถเพิ่มหรือลดระยะห่างเริ่มต้นจากสถานีเรดาร์ได้ตามความเหมาะสม

**๕.๙.๑.๔(๖.๒)** การบันทึกข้อมูลของสถานีเรดาร์ในการทดสอบสมรรถนะในการแยกเป้าหมายให้บันทึกระยะห่างระหว่าง บ. และระยะห่างของ บ.กับเรดาร์เมื่อตรวจจับเป้าหมายได้ครั้งแรก รวมทั้งให้บันทึกระยะห่างของ บ.กับเรดาร์เมื่อสามารถแยก บ.ออกเป็น ๒ เป้าหมาย ให้บันทึกข้อมูลเพิ่มเติมในการตรวจจับเป้าหมายตลอดห้วงเวลาทดสอบ และกรณีเรดาร์ไม่สามารถติดตามเป้าหมาย ได้ต่อเนื่องให้บันทึกระยะเวลาในการติดตามเป้าหมายเมื่อตรวจจับได้อีกครั้ง

**๕.๙.๑.๕** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมายโดยตรวจจับ บ.พาณิชย์ฯ

**๕.๙.๑.๕(๑)** วัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงของเรดาร์ในการวัดความสูงของเป้าหมาย

**๕.๙.๑.๕(๒)** เรดาร์ที่ต้องได้รับการประเมินค่า ได้แก่ เรดาร์ป้องกันทางอากาศ

**๕.๙.๑.๕(๓)** กำหนดให้สถานีรายงานตรวจจับ บ.พาณิชย์ที่บินผ่านในเส้นทางและทิศทางเดียวกันเป็นประจำกับที่ตั้งสถานีรายงานเป็นประจำทุกสัปดาห์

**๕.๙.๑.๕(๔)** กำหนดให้สถานีรายงานทำการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมาย บ.พาณิชย์ และบันทึกข้อมูล

**๕.๙.๑.๖** การประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) ขณะที่ บ.เคลื่อนย้ายที่ตั้ง (Deploy) ตามแผนฝึกบินของหน่วยบิน

**๕.๙.๑.๖(๑)** วัตถุประสงค์การประเมินค่าเพื่อทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมาย แนวระนาบ แนวแกนลำตัว แนวแกนดิ่ง และการทดสอบการแยกเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงท่าทางการบินอย่างรวดเร็วของเรดาร์ และใช้ประโยชน์จากการเคลื่อนย้ายที่ตั้งของ บ.ให้คุ้มค่า

**๕.๙.๑.๖(๒)** เรดาร์ที่ต้องได้รับการประเมินค่า ได้แก่ เรดาร์ป้องกันทางอากาศ ที่สถานีรายงานมีรัศมีตรวจจับครอบคลุมในเส้นทางของ บ.เคลื่อนย้ายที่ตั้ง ฯ

**๕.๙.๑.๖(๓)** ศคปอ.กท., ศคปอ.ดม. และ ศคปอ.สฎ.ร่วมการทดสอบด้วยการเฝ้าตรวจและบันทึกข้อมูลการตรวจจับ บ.ที่บินทดสอบสมรรถนะสถานีเรดาร์ เพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลร่วมกันกับสถานีเรดาร์ต่าง ๆ

**๕.๙.๑.๖(๔)** วิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) ขณะที่ บ.เคลื่อนย้ายที่ตั้ง ฯ กำหนดลักษณะท่าทางการบินแต่ละแบบ ทดสอบสมรรถนะของเรดาร์ในการแยกเป้าหมาย แนวระนาบ แนวแกนลำตัว แนวแกนดิ่ง และการทดสอบการแยกเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงท่าทางการบินอย่างรวดเร็วของเรดาร์
โดยพิจารณาเปลี่ยนแปลงลักษณะท่าทางการบินให้เหมาะสมกับระยะทางและเส้นทางการบิน

**๕.๙.๒** การรายงานสถานภาพเรดาร์ป้องกันทางอากาศในที่ประชุม ศปก.ทอ.กำหนดให้มีการรายงาน ดังนี้

**๕.๙.๒.๑** การรายงานสถานภาพเรดาร์ฯ แบบการประเมินค่าหลัก

**๕.๙.๒.๑(๑)** การรายงานผลการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ป้องกันทางอากาศในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมายตามวงรอบการประเมินค่าในช่วงเดือน ธ.ค. - ม.ค. ให้รายงานการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ฯ เมื่อได้รับอนุมัติ ผบ.ทอ. และกำหนดวิธีการวัดค่าของขีดความสามารถหรือประสิทธิภาพการทำงานของเรดาร์ หลักเกณฑ์ในการรายงานสถานภาพเรดาร์ และการแสดงภาพพื้นที่การตรวจจับเป้าหมายเรดาร์ (แนบ ๕) .

**๕.๙.๒.๑(๒)** การรายงานผลการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) ตามวงรอบการประเมินค่าในช่วงเดือน พ.ค. - มิ.ย.ให้รายงานการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ฯ เมื่อได้รับอนุมัติ ผบ.ทอ. และกำหนดให้รายงานการแยกเป้าหมายของเรดาร์แต่ละแบบ โดยรายงานผลการตรวจจับของเรดาร์ในการแยกเป้าหมายแนวระนาบ แนวแกนลำตัว แนวแกนดิ่ง และการเปลี่ยนแปลงท่าทางการบินอย่างรวดเร็ว เป็นระยะห่างของ บ.กับเรดาร์ เมื่อตรวจพบเป้าหมายครั้งแรก ระยะห่างการแยก บ.ออกเป็น ๒ เป้าหมาย และระยะเวลาในการติดตามเป้าหมาย

**๕.๙.๒.๑(๓)** การรายงานสถานภาพเรดาร์ฯ แบบการประเมินค่ารองให้รายงานเฉพาะผลการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายได้ไกลสุด ความต่อเนื่องในการตรวจจับเป้าหมาย และความเที่ยงตรงในการวัดความสูงของเป้าหมายโดยตรวจจับ บ.พาณิชย์ฯ ในห้วงที่ไม่มีการรายงานสถานภาพเรดาร์ฯ แบบการประเมินค่าหลัก และในส่วนของการรายงานผลการประเมินค่าประสิทธิภาพของเรดาร์ในการตรวจจับเป้าหมายที่ปฏิบัติการบินทางยุทธวิธี (Tactical Profile) ขณะที่ บ.เคลื่อนย้ายที่ตั้ง ฯ ไม่ต้องรายงานสถานภาพเรดาร์ฯ เนื่องจากการบินประเมินค่าขณะที่ บ.เคลื่อนย้ายที่ตั้ง ฯ ไม่สามารถบินประเมินค่าได้ทุกสถานีเรดาร์ จึงให้สถานีเรดาร์ที่ทำการประเมินค่าเก็บข้อมูลไว้เป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

**๕.๙.๓** หน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีหน้าที่ในการประเมินค่าเรดาร์ป้องกันทางอากาศด้วยการใช้ บ.บินทดสอบ ได้แก่ ทสส.ทอ., คปอ., กองบิน (บน.๑, บน.๔, บน.๗, บน.๒๑, บน.๒๓ และ บน.๔๑), สอ.ทอ., สถานีรายงาน, ศคปอ.กท., ศคปอ.ดม.และ ศคปอ.สฎ. และ ชย.ทอ.