

ความรู้เบื้องต้นของคลื่นวิทยุและสายอากาศ

HS2VLL

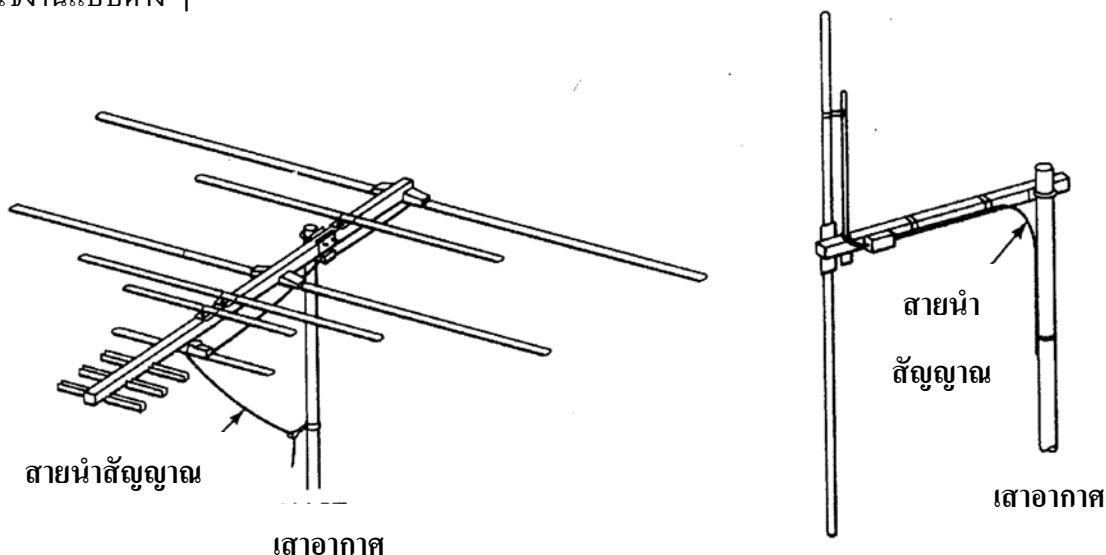
สายอากาศ คือ ตัวนำโลหะ ซึ่งมักจะเป็นแบบใดแบบหนึ่งของความยาวลวดหรือท่อกลวง ตัวนำที่จะใช้สำหรับสายอากาศจะต้องให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำนั้นได้ สายอากาศของเครื่องส่งกระแสไฟฟ้าจะสร้างคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นนี้จะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งเคลื่อนที่ไปในอากาศจากสายอากาศ สายอากาศของเครื่องรับ คลื่นวิทยุจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในสายอากาศ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะเป็นสัญญาณเข้าของเครื่องรับ

ซึ่งเครื่องส่งและเครื่องรับนี้ต่างก็ต้องมีสายอากาศเช่นเดียวกัน แต่ทำหน้าที่ต่างกัน เช่นตัวอย่างวิทยุ ความถี่ประชาชน (CB) ต่างก็ใช้สายอากาศสำหรับรับ – ส่งเหมือนกัน

สายนำสัญญาณจะต่อกับสายอากาศ ภายในสายนำสัญญาณจะประกอบด้วยตัวนำลวดคู่ วางในช่องว่างระหว่างกันคงที่ หน้าที่ของสายนำสัญญาณคือ การนำกระแสไฟฟ้าโดยปราศจากการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า

สายอากาศ คือ ตัวนำซึ่งออกแบบมาเพื่อแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรับการแผ่กระจายที่อยู่ในอากาศหรืออวกาศ สายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจะมีมากมายหลายขนาด และหลายรูปร่างเพื่อรองรับการใช้งานแบบต่าง ๆ



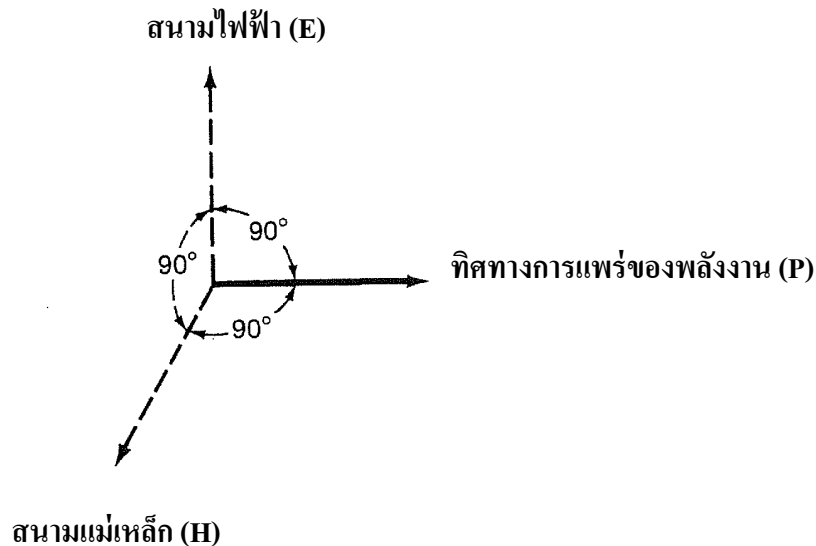
ก) สายอากาศของเครื่องรับโทรทัศน์

ข) สายอากาศของวิทยุความถี่ประชาชน (CB) ซึ่งใช้ทั้งรับและส่ง

รูปที่ 1 ตัวอย่างของสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สายอากาศจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่รอบ ๆ ตัว เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง หรือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า ผลลัพธ์ของทั้งสองสนามนี้คือหนึ่งเกิดฟลักซ์แม่เหล็ก และสองเกิดแรงจากเส้นแรงไฟฟ้า

แท้จริงแล้ว สนามทั้ง 2 มีความสำคัญมากกว่าตัวนำ การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการสร้างสนามไฟฟ้าเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อการสร้างสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้าและการแพร่ขยายในอากาศ

สนามไฟฟ้าใช้สัญลักษณ์ E สนามแม่เหล็กใช้สัญลักษณ์ H ทั้ง 2 สนามจะเปลี่ยนแปลง ผันแปรตามความแรงในขณะที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางของการแพร่ขยาย P จากการมองเห็นภาพ ลูกศรในสามมิติ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน มุมทางขวาจะเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการแพร่ขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไหลไปในอากาศ พลังงานการเคลื่อนที่ของคลื่นคือการแบ่งเท่า ๆ กันระหว่างองค์ประกอบของไฟฟ้าและแม่เหล็ก

ความเร็วของคลื่นวิทยุ

โดยทั่วไป คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ รูปแบบของการแผ่ ซึ่งส่งพลังงานออกไปในอากาศ การแผ่ของแสง, การแผ่ความร้อน รังสีเอกซ์และคลื่นวิทยุ เหล่านี้เป็นตัวอย่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ขยายไปในอากาศกับความเร็วของแสงมีสัญลักษณ์ C ความเร็วคือ

$$C = 300,000,000 \text{ เมตร / วินาที}$$

หรือ $C = 3 \times 10^8 \text{ เมตร / วินาที}$

หรือ $C = 3 \times 10^{10} \text{ เซนติเมตร / วินาที}$

ความเร็วนี้จะพิจารณาในอวกาศหรือสุญญากาศจะมีค่าเท่ากัน ในคลื่นวิทยุ ความถี่ของการแปรผันในความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะเป็นเหมือนกับความถี่ของการแปรผันในสายอากาศ กระแสไฟฟ้าซึ่งจะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าความถี่ของสนาม คือ ความถี่ของแหล่งกำเนิดซึ่งทำให้เกิดสนามนั้น

ความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ

สามารถหาได้จากความยาวของคลื่นแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปในอวกาศ ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก คือ แลมบ์ดา, λ หนึ่งความยาวคลื่น คือ ระยะทางระหว่างจุดสองจุดซึ่งไปพร้อมกันในทิศทางการแพร่ขยาย เมื่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มซ้ำ ๆ กัน

ความยาวคลื่น λ , ความถี่ f , และความเร็วของแสง C มีความสัมพันธ์กันตามสูตรนี้

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad \text{เมตร}$$

ตัวอย่างเช่น สถานีวิทยุกระจายเสียงมีความถี่ 1 MHz ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

$$\lambda = \frac{300,000,000 \text{ เมตร}}{1,000,000 \text{ เฮิรตซ์}}$$

$$\lambda = 300 \text{ เมตร}$$

หรือ

$$\lambda = \frac{300 \times 10^6 \text{ เมตร / วินาที}}{1 \times 10^6 \text{ เฮิรตซ์}}$$

$$\lambda = 300 \text{ เมตร}$$

ยิ่งความถี่สูงขึ้นไป ความยาวคลื่นจะสั้นลง เช่นความถี่ของวิทยุประชาชน (CB) 27 MHz จะมีความยาวคลื่น 11.11 เมตร ซึ่งสั้นกว่าสถานีวิทยุกระจายเสียง AM ที่ 1600 kHz ที่มีความยาวคลื่น 187.5 เมตร

| ชื่อเรียก | ความถี่ | ความยาวคลื่น |
|-----------------|------------|----------------------|
| ความถี่ต่ำมาก | VLF | 3 – 30 kHz |
| ความถี่ต่ำ | LF | 30 – 300 kHz |
| ความถี่ปานกลาง | MF | 300 – 3,000 kHz |
| ความถี่สูง | HF | 3 – 30 MHz |
| ความถี่สูงมาก | VHF | 30 – 300 MHz |
| ความถี่สูงยิ่ง | UHF | 300 – 3,000 MHz |
| ความถี่สูงสุด | SHF | 3,000 – 30,000 MHz |
| ความถี่สูงพิเศษ | EHF | 30,000 – 300,000 MHz |

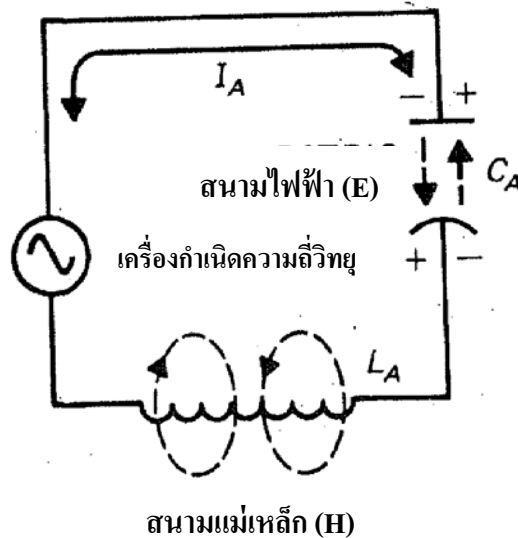
รูปที่ 3 ตารางแถบความถี่ต่างๆ

| ความถี่ | ความยาวคลื่น |
|-------------------|--------------|
| 1.8 – 2 MHz | 160 เมตร |
| 3.5 – 4 MHz | 80 เมตร |
| 5.3 – 5.4 MHz | 60 เมตร |
| 7 – 7.3 MHz | 40 เมตร |
| 10.1 – 10.15 MHz | 30 เมตร |
| 14 – 14.35 MHz | 20 เมตร |
| 21 – 21.45 MHz | 15 เมตร |
| 24.89 – 24.99 MHz | 12 เมตร |
| 28 – 29.7 MHz | 10 เมตร |
| 50 – 54 MHz | 6 เมตร |
| 144 – 148 MHz | 2 เมตร |
| 430 – 440 MHz | 0.7 เมตร |
| 1240 – 1300 MHz | 0.23 เมตร |

รูปที่ 4 ตารางความถี่วิทยุสมัครเล่น

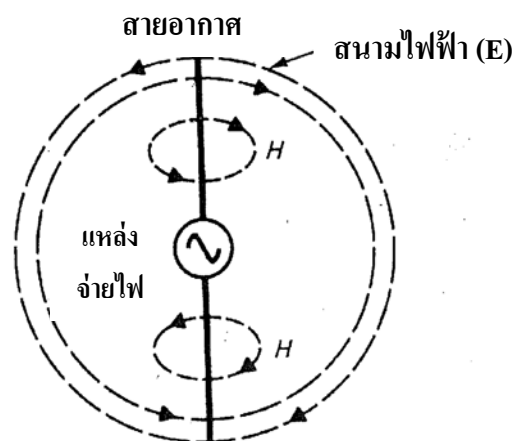
หลักการแผ่กระจายคลื่น

เส้นแรงไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสายอากาศไปในอวกาศรอบ ๆ



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของสายอากาศที่มีความเหนี่ยวนำ L_A และความจุ C_A

จากรูปที่ 5 แสดงถึงกลไกการแผ่กระจาย แผ่นความจุ C_A แสดงถึงตัวนำสายอากาศ



รูปที่ 6 ตัวนำสายอากาศที่ขยายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปในอวกาศรอบ ๆ สายอากาศ

จากรูปที่ 6 แสดงถึงการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปในอวกาศ ความจุจะมีแรงดันไฟฟ้าแปรผันเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า L_A แสดงถึงความเหนี่ยวนำของตัวนำสายอากาศ กระแสไฟฟ้าจะแปรผันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

โดยพื้นฐาน การแผ่กระจาย คือ สสารที่มีแรงดัน และกระแสไฟฟ้าแปรผันกับความถี่ สูงเพียงพอ ให้พลังงานในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในอากาศ แต่ความเป็นจริง สภาพที่ระบุคือค่าเฉลี่ยโดย ความถี่วิทยุสูงกว่า 30 kHz โดยประมาณ ความถี่วิทยุจึงจะเพียงพอที่จะแผ่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพจาก สายอากาศ

พิจารณาที่วงจรสมมูลของรูปที่ 5 เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ คือ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC) เพื่อใช้ประจุตัวเก็บประจุ C_A ความเหนี่ยวนำ L_A จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรม ที่ความถี่ของ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ดังนั้นจำนวนค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้าสลับจะถูกส่งไปในวงจรสายอากาศ

ตัวเก็บประจุ C_A จะเก็บประจุเมื่อแรงดันน้อยกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งการประจุทำให้เกิด ขั้วหนึ่งของแรงดันตรงข้ามกับ C_A เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายไฟลดลง C_A จึงสามารถที่จะปล่อยประจุ เมื่อแหล่งจ่ายไฟเริ่มประจุ C_A ในขั้วตรงกันข้ามในครึ่งรอบต่อมา เพราะฉะนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ตรงข้ามกับ C_A จะมีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในไดโอดเล็กทริก ซึ่งจะแสดงการใช้เส้นประ สำหรับสนามไฟฟ้า ความถี่ของการแปรผันคือค่าเดียวกับความถี่ของแหล่งจ่าย

ความเหนี่ยวนำ L_A จะมีกระแสอนุกรม ซึ่งสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก แสดงโดยเส้นประ สำหรับ สนามแม่เหล็ก ความถี่การแปรผันของ I_A และสนามแม่เหล็ก หรือค่าเดียวกับความถี่ของแหล่งจ่าย

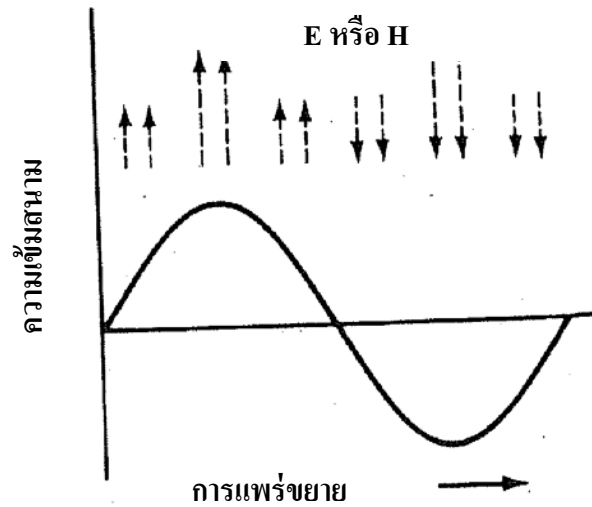
การปรับวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมก็ทำได้ในรูปที่ 6 แต่อย่างไรก็ตาม แผ่นตัวเก็บประจุที่เปิดออกใน รูปแบบของตัวนำ 2 ตัวนำของสายอากาศ จุดประสงค์คือเพื่อสร้างเส้นแรงสำหรับสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็ก ขยายต่อไปในอากาศรอบ ๆ สายอากาศ

ตัวนำ 2 ตัวจะสร้างปรากฏการณ์ความจุ โดยเฉพาะที่ปลายทั้ง 2 ด้าน เมื่อประจุสามารถเก็บสะสม ไดโอดเล็กทริกของตัวเก็บประจุ คือช่องว่างรอบ ๆ สายอากาศ ซึ่งช่องว่างนี้จะมีเส้นแรงไฟฟ้า แสดงเป็น เส้นประ สำหรับสนามไฟฟ้า มีทิศทางขึ้นและลง เหมือนกับสายอากาศ เช่นกัน กระแสไฟฟ้าในตัวนำ สายอากาศจะสร้างสนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะอยู่ในระนาบตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า จะเป็นไปตามนี้ แม้สายอากาศจะอยู่แนวตั้งหรือแนวนอนก็ตาม

เมื่ออัตราการประจุมีความเร็วขึ้นและระยะทางห่างจากสายอากาศมากขึ้น เส้นแรงของสนาม ไม่สามารถยุบลงในตัวนำสายอากาศ ก่อนที่กระแสและแรงดันจะสร้างขยายสนามอีก ผลลัพธ์บางส่วนของ พลังงานสนาม คือ ออกไปจากสายอากาศ

เส้นแรงที่อยู่ในสนามที่เคลื่อนที่ไปในอากาศ จะสร้างสนามขึ้นมาอีก สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่จะ สร้างสนามไฟฟ้า การสร้างนี้จะสอดคล้องกับแรงดันที่เหนี่ยวนำในขดลวดนั้น คือจะถูกตัดโดยเส้นแรง แม่เหล็ก เช่นกัน สนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จะสร้างสนามแม่เหล็ก การสร้างนี้จะสอดคล้องกับการประจุหรือ ปล่อยประจุ โดยตัวเก็บประจุ เมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

คลื่นวิทยุในอากาศ



รูปที่ 7 ความเข้มสนามของการแผ่กระจายคลื่นกับการแพร่ขยายคลื่น

ในรูปที่ 7 แสดงถึงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านเป็นรอบ ๆ ของการแปรผัน ซึ่งการแพร่ขยายไปทางด้านนอกจากตัวนำสายอากาศ ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีมุม 90° จากเฟสในเวลาต่าง ๆ กัน เช่นกัน เส้นแรงสนามอยู่ที่มุมขวา สูดท้ายการแพร่ขยายคือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงสนาม ถ้าดูตามระนาบสามมิติในอากาศ ทิศทางการแพร่ขยาย คือที่มุมขวาของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การแผ่ขยายไปในอากาศ คลื่นวิทยุอยู่ด้านซ้ายของสายอากาศ เพื่อแพร่ขยายในทิศทางทั้งหมด จากตัวนำสายอากาศ พลังงานคือการแผ่ขยายในทิศทางจากชนิดของสายอากาศ ตัวนำอื่น ๆ กับกระแสสามารถสร้างการแผ่ขยายได้บ้าง ในทางปฏิบัติ ความถี่วิทยุสูงกว่า 30 kHz จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพ ยิ่งความถี่สูงขึ้นจะมีประสิทธิภาพการแผ่กระจายที่ความถี่ต่ำกว่า 30 kHz สายอากาศจะมีความยาวมาก การแปรผันในความเข้มของสนามจะไม่รวดเร็ว เพื่อที่จะสร้างการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

การแผ่กระจายและสนามการเหนี่ยวนำ

การแผ่กระจายคลื่นใด ๆ จะถูกรับได้โดยสายอากาศ ซึ่งไม่ได้ต้องการสัญญาณที่ค้ำึงถึงการแทรกสอด การแทรกสอดเกิดจากสนามการแผ่กระจายคลื่น, สนามการเหนี่ยวนำหรือทั้งสอง ตัวอย่างเช่น อาศัยอยู่ใกล้กับทางด่วน รถยนต์ที่วิ่งผ่านสามารถสร้างการแทรกสอดในวิทยุหรือโทรทัศน์ พลังงานซึ่งส่งถึงสายอากาศ คือ สนามการแผ่กระจายของระบบจุดระเบิดในรถยนต์ สนามการเหนี่ยวนำเฉพาะของขดลวดจุดระเบิดสามารถสร้างการแทรกสอด แต่เกิดขึ้นในเวลารวดเร็ว ทำให้โทรทัศน์เกิดเส้นสีดำแนวนอน และมีเสียงปะทุในลำโพง ตัวอย่างอื่น ๆ อีก เช่นการสตาร์ทรถจักรยานยนต์ หรือขณะหลอดฟลูออเรสเซนต์กำลังจะติดสว่าง

ปรากฏการณ์การแทรกสอดอื่น ๆ ที่ได้รับ สามารถลดได้โดยลดความแรงของสัญญาณเครื่องรับ ตัวนำโลหะอื่น ๆ ที่ใช้ทำสายอากาศ เมื่อโครงสร้างโลหะใกล้กับสายอากาศรับ สามารถลดความเข้มสนามได้ โลหะจะทำหน้าที่ลัดวงจรสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นี่คือเหตุผลว่าทำไมจึงเป็นการยากที่จะรับสัญญาณวิทยุที่ดีในโลหะที่ปิดผนึกหรืออยู่ใกล้กับโครงสร้างโลหะขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามไม่มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า

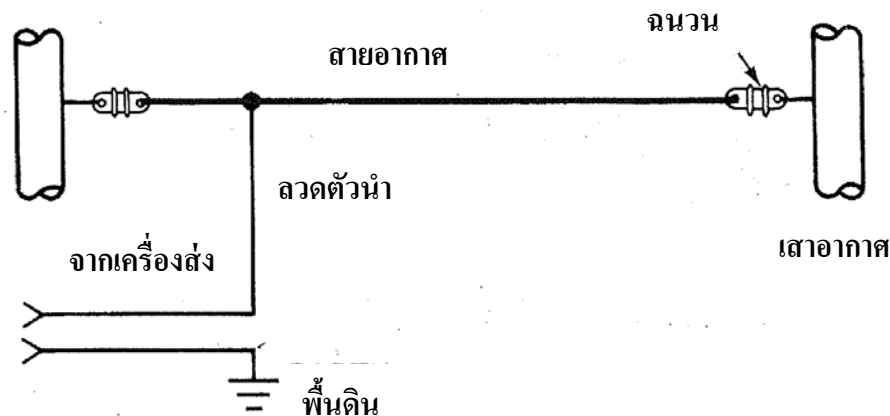
คุณสมบัติของสายอากาศ (Antenna Characteristics)

การเลือกชนิดของสายอากาศต่าง ๆ เพื่อใช้งานกับความถี่ใช้งาน ความถี่ที่สูงกว่า, ตัวนำสายอากาศที่มีความยาวพอเหมาะ ไม่ยาวจนเกินไป สายอากาศสามารถเรโซแนนซ์หรือไม่เรโซแนนซ์ สายอากาศเรโซแนนซ์จะมีความยาวเฉพาะเจาะจงสำหรับความถี่ใช้งาน โดยเฉพาะแถบความถี่สูงมาก (VHF) 30 ถึง 300 MHz จะใช้สายอากาศครึ่งคลื่น (Half-wave) ในทางปฏิบัติ สายอากาศของโทรทัศน์ คือ ตัวอย่างของขั้วคู่ครึ่งคลื่น (Half-wave dipole) มีความยาวประมาณ 240 เซนติเมตร เช่นนั้น สายอากาศนี้ใช้สำหรับโทรทัศน์และแถบความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (FM)

โดยทั่วไป สายอากาศที่มีความยาวมากจะมีพลังงานมากที่จะแผ่กระจายสำหรับเครื่องส่งหรือรับสัญญาณสำหรับเครื่องรับ ความยาวเรโซแนนซ์สายอากาศ อย่างไรก็ตามก็ต้องใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

สายอากาศพื้นดินและสายอากาศเหนือพื้นดิน (Grounded and Ungrounded Antennas)

ตัวอย่างของสายอากาศซึ่งทำงานแยกเป็นอิสระจากพื้นดินนั้นจะมี 2 ขั้ว หรือขั้วคู่ (dipole) แต่ละขั้วจะมีกระแสไหลกลับแหล่งจ่ายที่อยู่ตรงศูนย์กลาง พื้นดินไม่มีความจำเป็น เพราะความจุ C_A สายอากาศ คือระหว่างขั้ว 2 ขั้ว



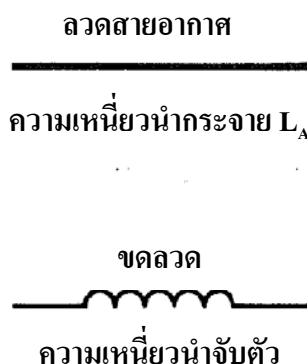
รูปที่ 8 ตัวอย่างของสายอากาศที่ใช้พื้นดินด้านหนึ่งในวงจรสายอากาศ

สายอากาศพื้นดิน แสดงในรูปที่ 8 ใช้พื้นดินด้านหนึ่งของวงจรสายอากาศเพื่อแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ลวดของสายอากาศจะมีฉนวนกันเพื่อแยกจากเสาอากาศที่เป็นโลหะที่ตั้งรองรับโครงสร้าง กระแสจะถูกป้อนโดยปลายลวดอีกด้านหนึ่ง สายอากาศแบบนี้ คือ ชนิดแอลกลับหัว (inverted-L)

อีกด้านหนึ่งของจุดต่อจะต่อกับพื้นดิน สายอากาศจะมีแรงดันสัญญาณตามพื้นดินและการแผ่กระจายคลื่นตามคุณลักษณะของพื้นดิน

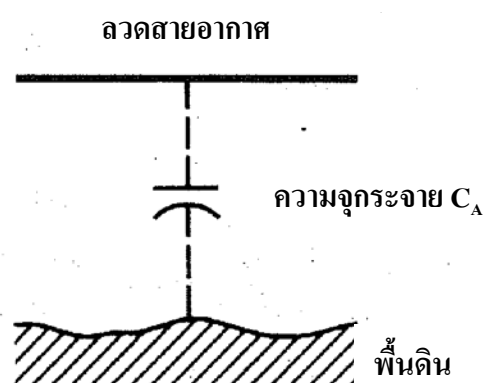
ความเหนี่ยวนำกระจาย และความจุกระจาย (Distributed Inductance L_A and Capacitance C_A)

C_A บนสายอากาศ จะดูเหมือนความยาวของลวด หรือแท่งตัวนำ แต่ไฟฟ้านั้นจะมีความเหนี่ยวนำ และความจุกระจายเหนือความยาว



รูปที่ 9 ความเหนี่ยวนำ L_A ของลวดสายอากาศ

กระแสในลวดสายอากาศ จะไหลผ่านน้อย ๆ ในความเหนี่ยวนำ L_A สมมูล ค่า L สอดคล้องกับ ขดลวดเล็ก ขดลวดมีความเข้มข้น ความเหนี่ยวนำในพื้นที่เล็ก ๆ จับตัวเป็นก้อน สายอากาศมีการกระจาย ความเหนี่ยวนำจากปลายด้านหนึ่งของตัวนำไปยังปลายตรงกันข้าม



รูปที่ 10 ความจุ C_A ของสายอากาศกับพื้นดิน

ลวดสายอากาศมีการกระจายความจุ C_A ไปยังพื้นดิน C_A คือ การชี้ที่จุดหนึ่งในรูปที่ 10 แต่ความยาวลวดมีความจุชัณฑ์ (Shunt capacitance) ซึ่งสร้างผลรวมของ C_A ในสายอากาศชั่วครู่ C_A คือ ความจุจากชั่วหนึ่งไปยังอีกชั่วหนึ่ง ในสายอากาศพื้นดิน C_A คือ ความจุต่อพื้นดิน

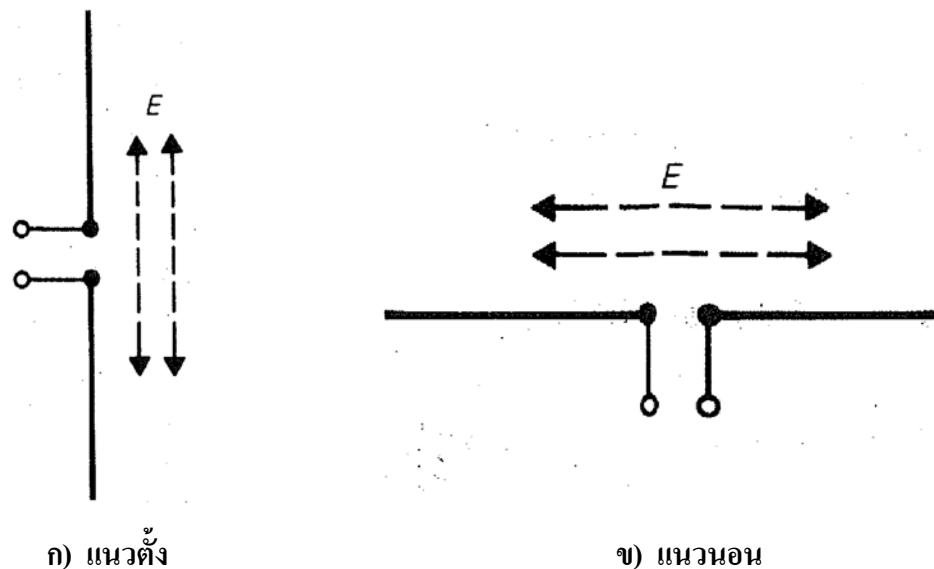
สายอากาศเรโซแนนซ์ (Resonant Antennas)

ค่าของ L_A และ C_A สามารถใช้เพื่อให้สายอากาศทำงานเหมือนวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ข้อดีคือสายอากาศมีกระแสสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ไม่ต้องมีขดลวดและตัวเก็บประจุ แต่คุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศจะตรงกับวงจร LC

ความยาวของสายอากาศกับค่านึงถึงความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ คำนวณจากความถี่เรโซแนนซ์ โดยทั่วไป ความยาวของครึ่งคลื่นที่ความถี่ใช้งานที่ใช้กับสายอากาศเรโซแนนซ์ในย่านความถี่สูงมาก (VHF) 30 – 300 MHz คือ 0.46 – 4.6 เมตร ความยาวเหล่านี้ ในทางปฏิบัติสำหรับสายอากาศชั่วคราว ครึ่งคลื่นเหนือพื้นดินโดยสามารถตั้งเสาอากาศที่สูงพอเพื่อที่จะเป็นอิสระจากพื้นดิน ที่ความถี่ต่ำจะใช้สายอากาศเรโซแนนซ์ 1 ใน 4 คลื่น (Quarter-wave) ก็คือสายอากาศพื้นดิน และพื้นดินก็คืออีกขั้วหนึ่ง

การเกิดขั้ว (Polarization)

ตัวนำสายอากาศ สามารถที่จะติดตั้งได้ทั้งแนวนอนหรือแนวตั้ง สนามไฟฟ้า E จะมีเส้นแรงในทิศทางเดียวกับสายอากาศ จากรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเกิดขั้วของสายอากาศในแง่ของสนามไฟฟ้า E

ทิศทางของการเกิดขั้วของคลื่นวิทยุ คือ การบ่งบอกทิศทางของสนามไฟฟ้า E สายอากาศแนวตั้ง และส่งคลื่นวิทยุคือ การเกิดขั้ว แนวตั้ง การเกิดขั้วแนวนอนก็เหมือนกัน สายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ จะมีทิศทางการเกิดขั้วเหมือนกันเพื่อสัญญาณที่สูงที่สุด

การเกิดขั้วแวนอนโดยทั่วไปจะใช้ที่ความถี่สูงมาก (VHF) 30 – 300 MHz เหตุผลคือ สัญญาณรบกวนแทรกสอดสูงในความถี่นี้จะเกิดขั้วแวนอนตั้ง เพราะฉะนั้นการเกิดขั้วสายอากาศแวนอนจะรับสัญญาณรบกวนได้น้อย

การออกอากาศระบบกระจายเสียงของโทรทัศน์ใช้การเกิดขั้วแวนอน ซึ่งก็คือเหตุผลว่าทำไมสายอากาศโทรทัศน์จึงเป็นแวนอน

มีวิธีใหม่สำหรับความถี่วิทยุสูงมาก (VHF) โดยมีการผสมระหว่างการเกิดขั้วแวนอนและแนวตั้ง ซึ่งผลลัพธ์คือ การเกิดขั้ววงกลม (Circular polarization) ข้อดีคือ สายอากาศรับสามารถติดตั้งแบบแนวตั้งหรือแวนอนก็ได้ ลักษณะที่สำคัญคือ ใช้สายอากาศภายในอาคาร ปัจจุบันนี้การเกิดขั้ววงกลมใช้ในการส่งสัญญาณกระจายเสียงวิทยุ FM และวิทยุโทรทัศน์

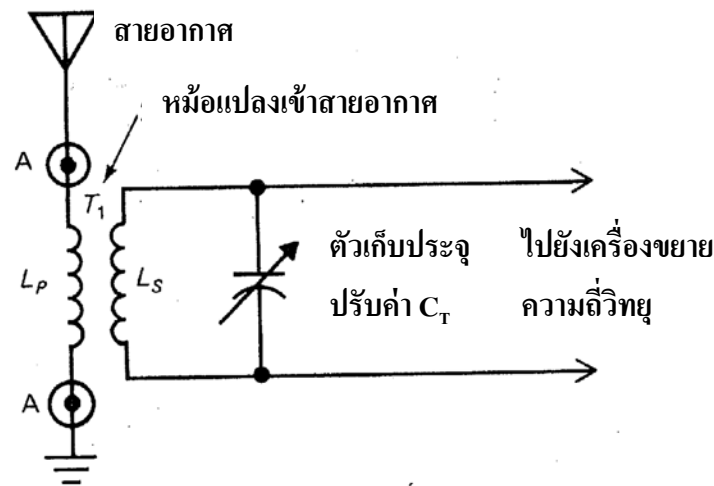
หน่วยไมโครโวลต์ต่อเมตรใช้เพื่อแสดงค่าความแรงสนาม (Field Strength) ของการส่งคลื่นวิทยุไปในอากาศ 1 เมตร คือ ประมาณ 40 นิ้ว ตัวอย่างเช่น สายอากาศขั้วคู่ ครึ่ง-คลื่น (Half-wave dipole) ยาว 1 เมตร มีสัญญาณ 300 μV มีค่าความแรงสนาม คือ 300 $\mu\text{V}/\text{m}$ ความสูงของสายอากาศรับที่เป็นมาตรฐานจะใช้ 9 เมตรสำหรับความถี่สูงมาก (VHF) เช่นกัน การเกิดขั้วของสายอากาศจะเป็นทิศทางเดียวกับเครื่องส่งคลื่นวิทยุ

ในสนามเดียวกันสามารถสร้างสัญญาณ ในสายอากาศที่มีความยาวที่ความถี่ต่ำ สายอากาศทั้ง 2 จะเรโซแนนซ์ ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศที่มีความยาว 2 เมตร จะมีค่าสัญญาณ 600 ไมโครโวลต์ที่ความแรงสนาม 300 ไมโครโวลต์ต่อเมตร

สายอากาศส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับได้อย่างไร

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายจากสายอากาศเครื่องส่งไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ในอากาศหรือวัสดุฉนวนต่าง ๆ จะมีผลต่อการแพร่ขยายของสัญญาณวิทยุ เพราะว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะตัดข้ามกับตัวนำโลหะของสายอากาศเครื่องรับ อย่างไรก็ตามจะเกิดเหนี่ยวนำแรงดันปริมาณน้อย ๆ สัญญาณที่สายอากาศใช้โดยทั่วไปเป็นไมโครโวลต์ ขนาด 1 ถึง 5 มิลลิโวลต์ หรือ 1,000 ถึง 5,000 ไมโครโวลต์ เป็นสัญญาณสายอากาศที่ดี

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณในสายอากาศเครื่องรับ คลื่นวิทยุจะแพร่ขยายต่อเนื่องไปในอากาศ ปริมาณของพลังงานถูกดึงโดยสายอากาศเครื่องรับแต่มีปริมาณน้อยในทางปฏิบัติไม่มีผลกระทบจากสนาม เครื่องรับในพื้นที่รอบ ๆ เครื่องส่งจะสามารถรับสัญญาณได้



รูปที่ 12 สายอากาศสร้างสัญญาณเข้าไปยังเครื่องรับได้อย่างไร

จากรูปที่ 12 เป็นวงจรเข้าจากสายอากาศไปเครื่องรับ ใช้สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมแทนชนิดต่าง ๆ ของสายอากาศ แรงดันเหนี่ยวนำในสายอากาศ สร้างกระแสในขดลวดปฐมภูมิ L_p ของหม้อแปลง T_1 ซึ่งก็คือ หม้อแปลงเข้าสายอากาศ ขั้วต่อเครื่องหมาย A บนเครื่องรับ คือ จุดต่อสายอากาศ โดยขณะที่หม้อแปลง ทำงาน สัญญาณคู่ควบไปยังขดลวดทุติยภูมิ L_s ตัวเก็บประจุ C_T ใช้ปรับตั้งขดลวดทุติยภูมิเพื่อให้ได้ความถี่ พานะที่ต้องการ

โดยทั่วไปสายอากาศเครื่องรับจะรับสัญญาณได้ทั้งหมดในแถบความถี่ที่ใช้งาน แต่ถ้าวงจรปรับตั้ง เลือกลักษณะที่ต้องการ สัญญาณความถี่วิทยุที่เลือกไว้จะเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีความแรง โดยใช้วงจรขยาย

ตามความเป็นจริง เครื่องรับต่าง ๆ ต้องการสายอากาศเพื่อรับสัญญาณวิทยุ เครื่องรับบางเครื่อง มีสายอากาศอยู่ภายในแต่ยังรับไม่ชัดเจน ฉะนั้นสายอากาศจะต้องส่งสัญญาณไปยังวงจรขยายความถี่วิทยุ

ในเครื่องรับจะมีการกำบังอย่างดี ในทางปฏิบัติต้องไม่มีสัญญาณน้อยกว่าจุดที่ต่อสายอากาศ ใช้ลวดขนาดชั้นเล็กสม่ำเสมอความยาว 30.5 ถึง 61 เซนติเมตร สำหรับสายอากาศเครื่องรับ เพื่อสร้างความ แตกต่างในการรับเปรียบเทียบกับไม่มีสายอากาศถ้าสัมผัสขั้วต่อสายอากาศบนเครื่องรับโดยไม่มีสายอากาศ ร่างกายจะมีความจุซึ่งส่งสัญญาณวิทยุได้

สายอากาศขั้วคู่ ครึ่งคลื่น (Half-wave dipole)

พื้นฐานของความเร็วแสงของคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ สูตรการคำนวณของความยาวครึ่ง คลื่น ได้จากอนุพัทธ์ $L = \frac{492}{f}$ เมื่อ f คือ เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) และ L คือ ความยาวหน่วยเป็น ฟุต (ft) อย่างไร

$$f$$

ก็ตาม ความยาวเรโซแนนซ์ของตัวนำขั้วคู่ ครึ่งคลื่นน้อยกว่าความยาวครึ่งคลื่นในอากาศ เหตุผลคือ สายอากาศมีความจุ ซึ่งเปลี่ยนแปลงการกระจายของกระแสที่ปลาย ปรากฏการณ์นี้ตัวนำที่สั้นลงสำหรับ ความยาวเรโซแนนซ์ สำหรับขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ

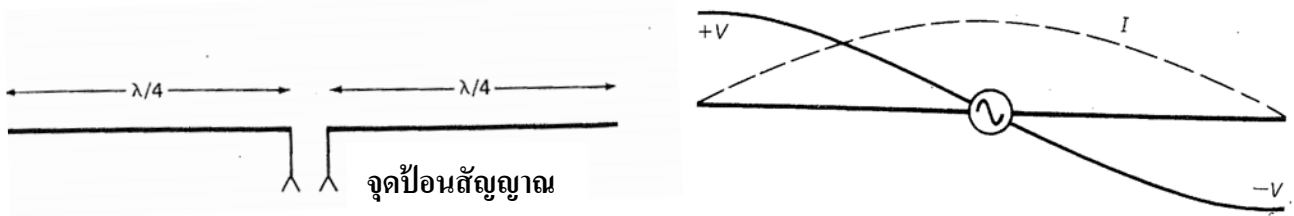
$$L = \frac{468}{f}$$

$$f$$

เมื่อ L คือ ฟุต (f t) และ f คือ เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)

เช่นตัวอย่างที่ 100 MHz ความยาวของขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ

$$L = \frac{468}{100} = 4.68 \text{ ฟุต หรือ } 1.43 \text{ เมตร}$$



(ก) แต่ละขั้วของสายอากาศคือความยาวเศษ 1 ส่วน 4 (ข) กระแส I และแรงดัน V กระจายตามบนตัวนำรูปที่ 13 สายอากาศขั้วคู่ครึ่งคลื่น

ถ้าเป็นคลื่นเศษ 1 ส่วน 4 จะได้ 2.34 ฟุต หรือ 71.3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 13 ช่องอากาศที่เป็นฉนวนระหว่างขั้วทั้งสอง ไม่ต้องนำมาคิด ขั้วคู่สามารถติดตั้งแนวนอนหรือแนวตั้งด้านใดด้านหนึ่ง

ขั้วคู่ครึ่งคลื่นมักจะเรียกว่า สายอากาศเฮิร์ตซ์ (Hertz antenna)

การกระจายกระแสและแรงดันไฟฟ้า

เมื่อสายอากาศขั้วคู่ถูกป้อนโดยเครื่องส่งอิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนที่ตามบนตัวนำไปสู่ด้านปลายเปิด การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้ คือ กระแสของสายอากาศ I ในรูปที่ 13 (ข) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาถึงปลายของตัวนำ, ประจุไฟฟ้าจะเริ่มสะสมขึ้น ซึ่งประจุจะให้แรงดัน V ที่ปลายตัวนำ ประจุไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งของปลายจะให้แรงดันสำหรับเคลื่อนอิเล็กตรอนในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากเหตุนี้ จึงกลับทิศทางของกระแส ผลลัพธ์คือ กระแสจะเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสอง และมีกระแสสองกระแสที่ขนาดเท่ากันไหลในทิศทางตรงข้ามกัน

ไหลออกไปด้านหลังจากปลายทั้งสองของตัวนำ กระแสซึ่งไหลไปและกลับมานี้จะไม่เท่ากัน เพราะสาเหตุจากประจุไฟฟ้า ทำให้กระแสที่จ่ายให้สายอากาศที่เวลาต่างกันของรอบความถี่วิทยุ

กระแสสูงสุดคือที่จุดศูนย์กลางซึ่งกระแสสะท้อนกลับ รวมกับกระแสเดิมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ

ปลายทั้งสองของสายอากาศคือจุดที่มีแรงดันสูงสุด รูปคลื่นของแรงดันกระจาย บนสายอากาศแสดงเป็น $+V$ และ $-V$ ที่ปลายทั้งสอง เพราะว่าขั้วทั้งสองมีขั้วตรงกันข้ามจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

การกระจายกระแสและแรงดัน แสดงถึงว่าทำไมความยาวนั้นสร้างเรโซแนนซ์ที่ความถี่เฉพาะเจาะจง อิเล็กตรอนในตัวนำสายอากาศจะเคลื่อนที่จากจุดศูนย์กลางออกไปยังปลายทั้งสองด้าน และกลับมาสู่จุดศูนย์กลางในเวลา 1 รอบครึ่งของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ในเวลานั้น กระแสและแรงดันบนสายอากาศจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่อื่น ๆ บางส่วนจะยกเลิกจากเหตุการณ์ผิดปกติ และปริมาณอิเล็กตรอนที่กลับมามีจำนวน

กระแสและแรงดันของสายอากาศ

คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

รูปคลื่นสำหรับค่า I และ V บนสายอากาศ แสดงในรูปที่ 13 (V) เรียกว่า คลื่นนิ่ง จุดที่ I หรือ V มีค่าน้อยที่สุด คือ โหนด จุดที่มีค่าสูงสุดคือ วงรอบ ในสายอากาศครึ่งคลื่น โหนด หรือ วงรอบที่ต่อเนื่องกัน สำหรับ V และ I คือ ความยาวครึ่งคลื่น

ความสำคัญที่จะทำให้กลายเป็นจริง ซึ่งคลื่นนิ่งไม่มีรูปภาพของกระแสหรือแรงดัน ตามความเป็นจริง จุดอื่น ๆ บนตัวนำจะมีกระแสและแรงดัน เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แตกต่างกับค่านิ่งถึงเวลาที่ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

อย่างไรก็ตาม ขนาดค่าของค่าความหลากหลายแหล่งไฟกระแสสลับจะแตกต่างกันบนความยาวของสายอากาศ การกระจายของค่าจะจะไม่เปลี่ยนแปลง บนความยาวสายอากาศโดยตลอดและผลลัพธ์คือคลื่นนิ่งของค่า I และ V จากปลายด้านหนึ่งไปหาส่วนอื่น ๆ

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

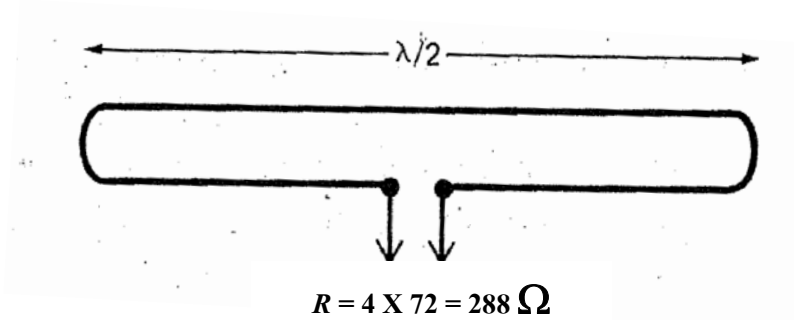
อัตราส่วนคลื่นนิ่งเปรียบเทียบกับแรงดันที่จุดสูงสุดไปที่จุดต่ำสุด ยกตัวอย่าง เมื่อสายอากาศขั้วคูมีแรงดันที่ปลาย 10 เท่าของจุดศูนย์กลาง SWR คือ 10 สายอากาศเรโซแนนซ์จะมีค่า SWR สูง ซึ่งแสดงว่าค่า V และ I สูงในคลื่นนิ่ง ในช่วงนั้นประสิทธิภาพจะสูงสำหรับสายอากาศส่งที่ซึ่งการแผ่กระจายหรือสายอากาศรับที่ซึ่งรับสัญญาณ อย่างไรก็ตาม สายอากาศตั้งไม่เรโซแนนซ์ซึ่งป้อนสัญญาณให้สายอากาศจะมีค่า SWR = 1 นี้คือค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ของ SWR และก็แสดงว่าไม่มีคลื่นนิ่ง

ความต้านทานการแผ่กระจาย

ที่จริงแล้วสายอากาศจะมีค่าเฉพาะของ V และ I เฉลี่ย ซึ่งจะมีอิมพีแดนซ์ค่าแน่นอน ถ้าสายอากาศเรโซแนนซ์จุดที่ป้อนสัญญาณคือความต้านทาน R คือ ความต้านทานการแผ่กระจายสำหรับการส่งหรือรับของสายอากาศ

ความต้านทานการแผ่กระจายของขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ 72Ω ที่จุดศูนย์กลางและไกลออกไป สายอากาศจะมีอิมพีแดนซ์ปฏิกิริยาซึ่งมีค่าสูง ปลายสายจะมีอิมพีแดนซ์สูง ค่าบางที่เพิ่มขึ้นถึง 1000Ω

สายอากาศขั้วคู่พับ (Folder Dipole Antenna)



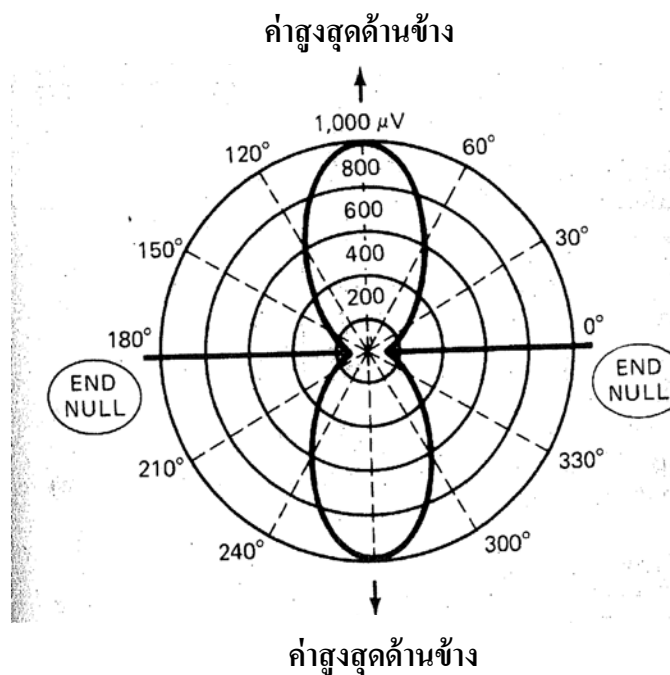
รูปที่ 14 สายอากาศขั้วคู่พับ

สายอากาศขั้วคู่พับ มีโครงสร้างคือ ตัวนำขั้วคู่ 2 ตัวนำ นำปลายมาชนเข้าหากัน แต่เปิดสายตัวนำไว้ตรงกลาง เพื่อต่อสายนำสัญญาณ ช่องว่างระหว่าง 2 ตัวนำ มีขนาดเล็กเทียบได้กับความยาวครึ่งคลื่น

ส่วนมากตัวนำที่ใช้เป็นขั้วคู่ตรง แต่จะล่างจะพับกลับมาพันเศษ 1 ส่วน 4 คลื่น ขั้วคู่ที่พบยังคงเป็นครึ่งคลื่น คุณสมบัติของสายอากาศมีความสำคัญที่ยังคงเป็นขั้วคู่ตรง ยกเว้นค่า R คือ $4 \times 72 = 288 \Omega$ สำหรับสายอากาศขั้วคู่พับ นั่นคือค่าที่เข้ากันของสายนำสัญญาณ 300Ω

รูปแบบทิศทางของขั้ว (Polar Directivity Pattern)

ทิศทางซึ่งสายอากาศจะรับหรือส่งที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 รูปแบบทิศทางของขั้วของสายอากาศขั้วคู่ครึ่งคลื่น

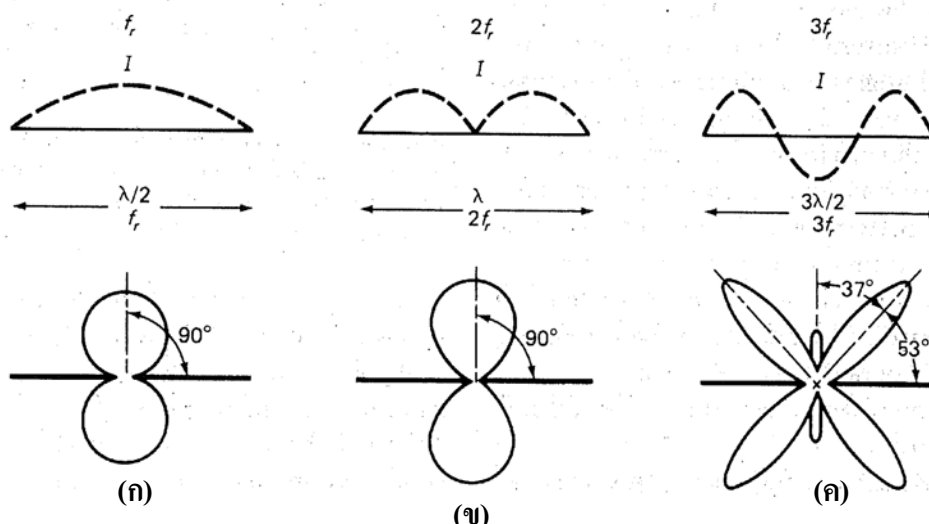
รูปแบบคือ ขั้วคู่ครึ่งคลื่นติดตั้งตามแนวนอน อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองสายอากาศแนวตั้งจะเท่ากันในทุกทิศทางในระบบแนวนอน

กราฟแสดงความแรงของสัญญาณในทิศทางสำหรับขนาดและทิศทาง มุมจะแสดงถึงทิศทางและความยาวของรังสี คือ จำนวนของแรงดันสัญญาณ รูปแบบของสายอากาศส่ง แสดงทิศทางต่าง ๆ ที่สายอากาศแผ่กระจายสัญญาณส่วนใหญ่ รูปแบบของสายอากาศรับแสดงทิศทางต่าง ๆ ที่สัญญาณส่วนใหญ่ถูกเหนี่ยวนำ การหมุนสายอากาศเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุด เรียกว่า การวางหรือหันให้ถูกทิศทาง โดยหันไปทางตะวันออก

ขั้วคู่ครึ่งคลื่นความถี่เรโซแนนซ์พื้นฐานจะมี 2 กlob (lobe) แสดงในรูปแบบที่ 15 สายอากาศรับได้ดีจากทิศทางด้านข้างที่กว้างก็คือ ด้านหน้าและด้านหลังกับสัญญาณเล็กที่ปลาย ที่เครื่องส่งขั้วคู่ที่ข้ามกันหลาย ๆ คู่ สามารถแผ่กระจายในทุกทิศทาง

สายอากาศฮาร์โมนิก (Harmonic Antennas)

คือ สายอากาศซึ่งสามารถใช้ความถี่ฮาร์โมนิกของเรโซแนนซ์ครึ่งคลื่นพื้นฐาน อย่างไรก็ตาม รูปแบบทิศทางจะเลื่อนไปเป็นจำนวนคี่ คูณของความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 16 ขั้วคู่ครึ่งคลื่นในรูปแบบที่ 16 (ก) จะมีรูปแบบธรรมดาเหมือนเลข 8 ที่ความยาวเดียวกันของความถี่ 2 เท่า หรือ $2f$ รูปที่ 16 (ข) จะเป็นขั้วคู่เต็มคลื่น ซึ่งจะมีผลตอบสนองเหมือนกัน แต่จะมีความกว้างของกลีบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วคู่ครึ่งคลื่น เช่นกันจึงมีสัญญาณมากกว่าขั้วคู่ครึ่งคลื่น เพราะว่ามีตัวนำที่ใช้มากกว่า สุดท้ายความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 หรือ $3f$ รูปแบบทิศทางจะแยกในด้านข้างกลีบ แสดงในรูปแบบที่ 16 (ค) สายอากาศจะรับหรือส่งได้น้อยในทิศทางด้านข้างที่กว้าง แต่จะได้ผลดีที่มุม 37°



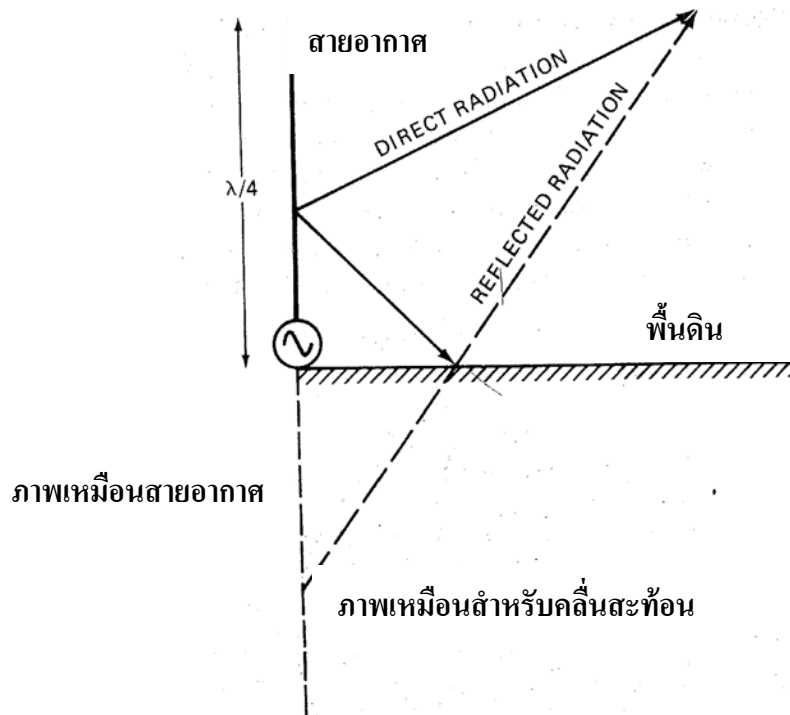
(ก) รูปเลข 8 ของเรโซแนนซ์ครึ่งคลื่นพื้นฐาน (ข) เต็มคลื่นที่ฮาร์โมนิกที่ 2 (ค) กลีบแยกเพื่อเปลี่ยนรูปแบบทิศทางที่ฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ความยาว $3\lambda/2$

รูปที่ 16 รูปแบบทิศทางของขั้วคู่ที่ป้อนสัญญาณตรงกลางที่ความถี่ฮาร์โมนิกพื้นฐาน

สายอากาศขั้วคู่ตัววี (V-Dipole Antenna)

ในบางกรณีขั้วทั้ง 2 ทำมุมกันเป็นตัว V เพื่อให้ผลตอบสนองทิศทางที่ดีขึ้นที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 สายอากาศรับจะสามารถใช้อัตราส่วน 3:1 ของย่านความถี่ที่เรโซแนนซ์ สายอากาศขั้วคู่รูปตัว V ใช้ในสายอากาศรับโทรทัศน์

สายอากาศพื้นดิน $\frac{1}{4}$ (Quarter-wave grounded antenna)



รูปที่ 17 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศพื้นดิน $\frac{1}{4}$

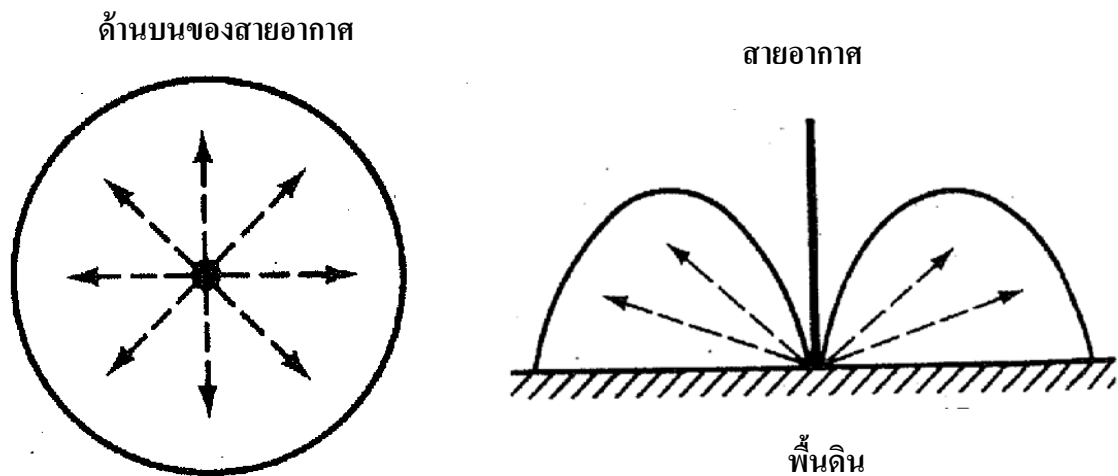
สายอากาศในรูปที่ 17 ซึ่งต่อกับพื้นดิน หรือด้านปลายคงที่ที่พื้นดินจะเป็นส่วนหนึ่งของระบบการแผ่กระจาย เมื่อตัวนำแนวตั้งสนามไฟฟ้าสถิตขยายไปยังพื้นดิน พื้นดินเสมือนพื้นผิวการนำหรือกระจกสำหรับการแผ่กระจาย สายอากาศพื้นดิน $\frac{\lambda}{4}$ แสดงในรูปที่ 1 จะมีภาพเหมือนข้างในพื้นดิน เมื่อแรงดันและกระแสกระจายจะเหมือนกับขั้วคู่ครึ่งคลื่นแนวตั้งในอากาศ

สายอากาศพื้นดิน $\frac{1}{4}$ เรียกว่าสายอากาศมาร์โคนี (Marconi antenna) ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปใช้ที่ความถี่ต่ำกว่า 30 MHz $\frac{\lambda}{4}$ คือ ครึ่งความยาวของ $\frac{\lambda}{2}$ จำเป็นต้องมีความยาวคลื่น $\frac{1}{4}$ คือเพื่อง่ายที่จะใช้กับความถี่ต่ำ ซึ่งต้องการสายอากาศที่ยาว

สายอากาศคลื่น $\frac{1}{4}$ ทำงานที่ความถี่ของ $\lambda/4$ หรือตัวคูณเลขคี่ เช่น $3\lambda/4$ หรือ $5\lambda/4$ ในช่วงที่จุดป้อน สัญญาณที่ปลายด้านพื้นดินคือจุดที่มีกระแสสูง และแรงดันต่ำ ความต้านทานการแผ่กระจาย ประมาณ 36Ω ค่าที่เหมาะสมสำหรับสายนำสัญญาณคือสายแกนร่วม 50Ω

รูปแบบทิศทาง

สายอากาศแนวตั้งจะส่งคลื่นวิทยุกับการเกิดขั้วแนวตั้ง รูปแบบทิศทางสำหรับส่งหรือรับจะรวมมุม ทั้งหมดในวงกลมในแนวระนาบนอน รอบสายอากาศ ในรูปที่ 18



ก) ระนาบแนวนอนในทุกทิศทางรอบ ๆ ตัวนำสายอากาศ

ข) เส้นแรงสนามในระนาบแนวตั้ง

รูปที่ 18 รูปแบบทิศทางสำหรับสายอากาศพื้นดิน $\frac{1}{4}$ แนวตั้ง ลูกศรเส้นประแสดงถึงเส้นแรงสนาม

ในรูปที่ 18 ทิศทางในระนาบที่แสดง จะมีรูปครึ่งคลื่น 2 รูป ที่เห็นเหมือนเลข 8 ของขั้วคู่ สายอากาศแนวตั้งและภาพเหมือนบนพื้นดินเหมือนกับขั้วคู่ อย่างไรก็ตาม อีกครึ่งของกลีบที่อยู่ต่ำกว่าจะไม่ปรากฏโดยการสะท้อนคลื่นจากพื้นดิน การสูญเสียของการแผ่กระจาย ตามที่จริงแล้วเพิ่มขึ้นตามความแรงของสัญญาณเหนือพื้นดินในแนวระนาบและทิศทางขึ้นไปด้านบน

การแผ่กระจายมีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ คลื่นดิน และคลื่นฟ้า คลื่นดิน คือการแผ่ออกจากสายอากาศ ในทิศทางแนวนอนขนานกับพื้นผิวโลก คลื่นฟ้าจะมีมุมแหลมแนวตั้ง การแผ่พลังงานขึ้นไปบนฟ้า บางส่วนของพลังงานจะสูญเสีย แต่การสะท้อนจากชั้นไอออนของอากาศที่อยู่เหนือพื้นดิน จะทำให้สามารถที่จะส่งไประยะทางไกล ๆ

การประยุกต์ใช้งานของสายอากาศพื้นดิน $\frac{1}{4}$ ก็มีการกระจายเสียงวิทยุ AM แถบความถี่ 535 ถึง 1,605 kHz, วิทยุความถี่ประมาณ 27 MHz (CB) และการสื่อสารวิทยุเคลื่อนที่คลื่นสั้น 3-30 MHz

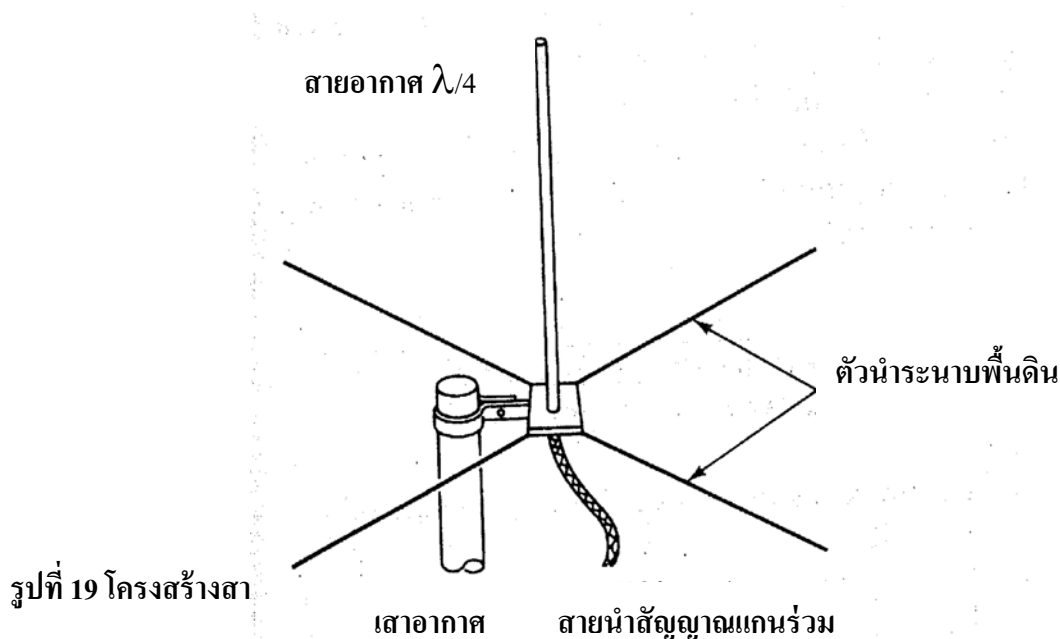
คุณภาพของสายอากาศ (Antenna Counterpoise)

เมื่อพื้นโลกไม่มีสภาพนำที่ตีได้ จึงจำเป็นต้องติดตั้งพื้นดินเทียมขึ้นมา ทำเป็นโครงข่ายของตัวนำโลหะฝึ่งตรง สำหรับสายอากาศพื้นดิน โครงสร้างโลหะที่ทำขึ้นเพื่อแทนพื้นดินเรียกว่า คุณภาพ (Counterpoise) พื้นผิวของโลหะคุณภาพจะต้องน้อยกว่าของสายอากาศ

เมื่อโลหะคุณภาพไม่ใช่พื้นดิน โดยแท้จริง ตัวนำจะเรียกว่าระนาบพื้นดิน (Ground Plane) โครงสร้างจะประกอบด้วย 1 แท่ง โลหะหรือลวดขยายรัศมีออกจากฐานสายอากาศ สายอากาศแนวตั้งสามารถติดตั้งสูงขึ้นเพื่อเป็นอิสระจากพื้นโลก

การทำงานของคุณภาพ แสดงว่าคลื่นวิทยุสามารถส่งและรับได้สำเร็จ เมื่อไม่มีพื้นโลก เช่น ในเครื่องบิน ตัวอย่าง โครงโลหะและผิวโลหะจะทำงานเหมือนคุณภาพ เพื่อทำหน้าที่เป็นพื้นดินสำหรับอุปกรณ์วิทยุ ทำนองเดียวกัน ตัวโครงโลหะของรถยนต์จะเป็นพื้นดินสำหรับวงจรสายอากาศ ตัวอย่างสุดท้าย ขั้วหนึ่งของสายอากาศขั้วคู่เหนือพื้นดิน สามารถนำมาพิจารณาคุณภาพของขั้วอื่น ๆ

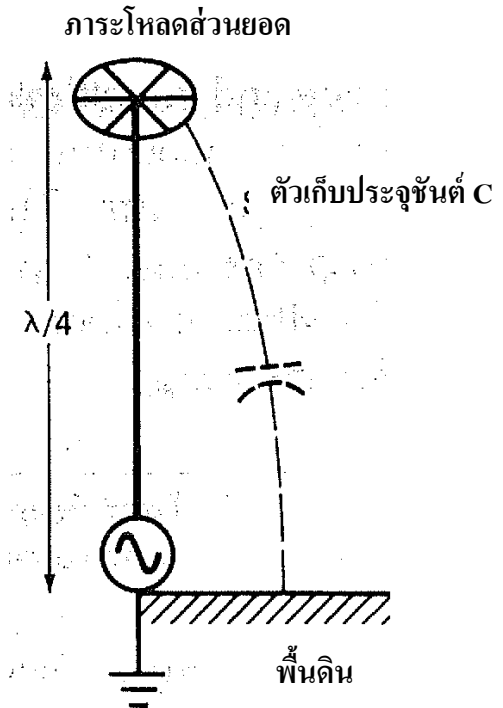
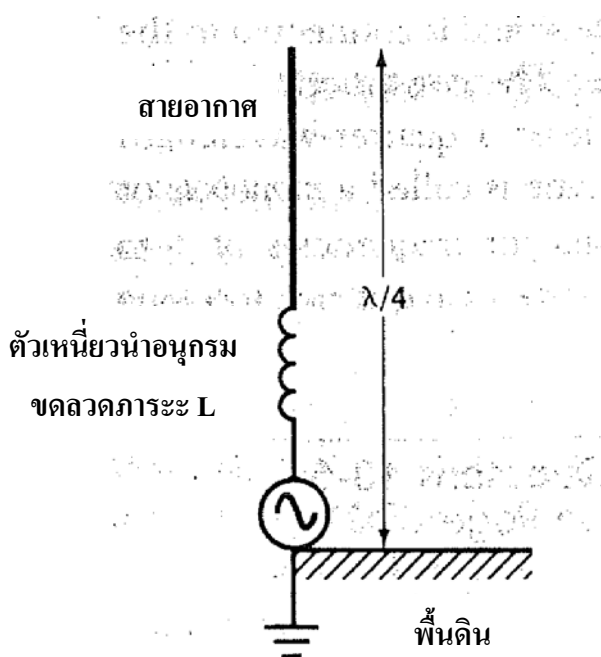
สายอากาศระนาบพื้นดิน (Ground-Plane Antenna)



รูปที่ 19 โครงสร้างเสา

ในรูปที่ 19 เป็นสายอากาศแนวตั้ง $\lambda/4$ ซึ่งติดตั้งบนแผ่นโลหะยึดติดกับเสาอากาศ สายอากาศจะมีฉนวนกันจากแผ่นโลหะ และตัวนำโลหะที่เป็นระนาบพื้นดิน ใช้สายแกนร่วม 50Ω ตัวนำภายในต่อกับสายอากาศ และกำบังภายนอกต่อกับแผ่นโลหะ และระนาบพื้นดิน โครงสร้างสามารถติดตั้งน้อยกว่าความยาวคลื่น $1/4$ เหนือพื้นดิน แบบนี้เรียกว่าขั้วเดี่ยว (Monopole) หรือสายอากาศแส้ (Whip) ใช้สำหรับความถี่ 3-30 MHz ซึ่งคลื่น $1/4$ จะไม่ยาวมากสำหรับสายอากาศแส้

ภาระโหลดของสายอากาศ (Antenna Loading)



ก) ขดลวดภาระที่ใช้เพิ่มความเหนี่ยวนำอนุกรม
รูปที่ 20 ภาระโหลดของอากาศ

ข) ภาระส่วนยอดที่ใช้เพิ่มความจุชั้น

เมื่อสายอากาศมีความยาวไม่เพียงพอสำหรับเรโซแนนซ์ เกิดความเหนี่ยวนำเล็ก ๆ ในวงจรอนุกรมสายอากาศ แสดงในรูปที่ 20 ก) ความเหนี่ยวนำนี้เรียกว่าขดลวดภาระ (Loading coil) เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของภาระกระแสโดยทำให้เรโซแนนซ์สายอากาศ ขดลวดภาระทำให้สายอากาศมีความยาวทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยรวมกับความเหนี่ยวนำด้วย ซึ่งเป็นเช่นนั้น ถ้าสายอากาศมีความยาวที่ถูกต้อง เหตุผลที่ใช้สายอากาศสั้นกว่าความจำเป็น คือต้องการความยาวทางกายภาพ ซึ่งใช้ในทางปฏิบัติสำหรับการติดตั้ง

ทางอื่น ๆ ที่จะทำให้สายอากาศมีความยาวทางไฟฟ้า คือใช้ความจุภาระส่วนยอด โลหะทรงกระบอก, งาน, หรือซี่พวงมาลัยที่บนสุดของสายอากาศ ตัวนำจะรวมความจุชั้นไปสู่พื้นดินในรูปที่ 20 ข) ก่อให้เกิดความเหมาะสมกับความยาวของสายอากาศ เพราะว่าตัวเก็บประจุต้องการเวลาที่จะประจุความจุของสายอากาศ

มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมเพื่อที่จะทำให้สายอากาศมีความยาวทางไฟฟ้าสั้นลง ถ้าต้องการที่จะทำ การใส่ความจุอนุกรม จะลดความจุสายอากาศโดยรวม ซึ่งจะลดความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศ

สรุป มี 3 วิธีที่ใช้ภาระโหลดของสายอากาศ

1. เพิ่มความเหนี่ยวนำอนุกรมโดยรวมขดลวดภาระเพื่อสร้างความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศ
2. เพิ่มความจุชั้น โดยที่ยอดส่วนบนใช้ตัวนำโลหะสร้างความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศ
3. รวมความจุอนุกรม เพื่อลดความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศ

ขดลวดภาระของสายอากาศเส้ คือ การติดตั้งปรกติในฐานะ ซึ่งเรียกว่าภาระฐาน (Base Loading) วิธีนี้เป็นปรกติทั่วไปใช้สำหรับสายอากาศ CB ที่ 27 MHz คลื่น $\frac{1}{4}$ ประมาณ 2.59 เมตร ซึ่งความยาวนี้เล็กน้อยในทางปฏิบัติของสายอากาศ เส้ที่ติดตั้งบนรถยนต์ แต่ความยาว 1.52-1.82 เมตรใช้กับภาระฐาน

ขบวนสายอากาศ (Antenna Arrays)

ขบวน คือ กลุ่มของตัวนำสายอากาศกับสายป้อนสัญญาณทั่วไป วัตถุประสงค์คือ เพิ่มสัญญาณของสายอากาศ โดยมีตัวนำหลาย ๆ ตัว เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองทิศทางของสายอากาศ ขบวนสายอากาศสามารถใช้ขั้วคู่ ครึ่งคลื่นหรือสายอากาศพื้นดิน $\frac{1}{4}$ ขบวนสามารถเป็นแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้

อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain)

อัตราขยายที่มากของสายอากาศเครื่องส่งจะทำให้สนามการแผ่แน่นอนหนา สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง สำหรับเครื่องรับ ทำให้รับสัญญาณได้มากกว่า

อัตราขยายของสายอากาศ ขบวนวัดตรงข้ามกับความแรงสัญญาณของสายอากาศขั้วคู่มาตรฐาน แท้จริงแล้วสายอากาศไม่สามารถขยายสัญญาณ แต่ผลของขบวนจะมีสัญญาณมากกว่าขั้วคู่อ้างอิง เหตุผลสำหรับอัตราขยายสายอากาศคือ ง่ายที่จะใช้ตัวนำหลาย ๆ ตัวนำกับเฟสที่ถูกต้อง

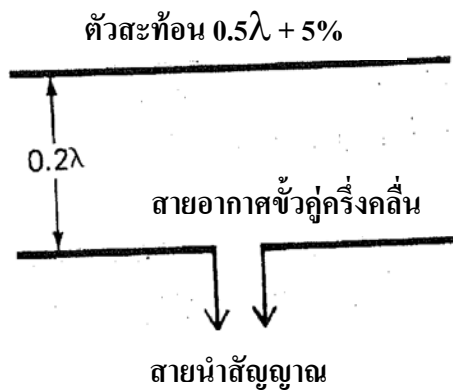
สำหรับตัวอย่าง ขบวนกับขั้วคู่สอง โดยทั่วไปสามารถให้สองเท่าของแรงดันสัญญาณที่ขั้วคู่หนึ่ง ดังนั้น อัตราขยายแรงดัน คือ น้อยกว่า 2 หรือประมาณ 5 dB

อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front-to-Back Ratio)

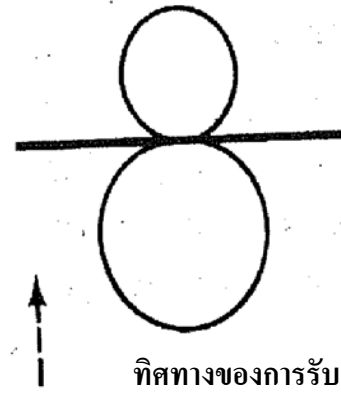
ขบวนสายอากาศถูกออกแบบเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศที่ด้านหน้าและมีสัญญาณน้อยกว่าจากด้านหลัง ความแตกต่างในทิศทางตอบสนอง คือ อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศ เมื่อการออกแบบถูกนำไปใช้ ความสำคัญ คือ สายอากาศจะถูกติดตั้งในทิศทางที่ออกแบบไว้

ขบวนกาฝาก (Parasitic Arrays)

ส่วนสำคัญของกาฝากในขบวน คือ ตัวนำที่ใกล้สายอากาศ แต่ไม่ต่อเข้าด้วยกัน สายอากาศที่ต่อกับสายนำสัญญาณ คือ ส่วนขับ (Driven element) ที่แสดงในรูปที่ 21 ตัวนำกาฝากที่อยู่หลังสายอากาศ เรียกว่าตัวสะท้อน (reflector) ตัวนำกาฝากที่อยู่ด้านหน้า เรียกว่า ตัวชี้ (Director) ที่แสดงในรูปที่ 22 ส่วนขับและส่วนกาฝากจะเป็นสองส่วนที่ทำงานด้วยกันโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศขั้วคู่ตรงหรือขั้วคู่พับ โดยทั่วไปจะใช้เป็นส่วนขับ

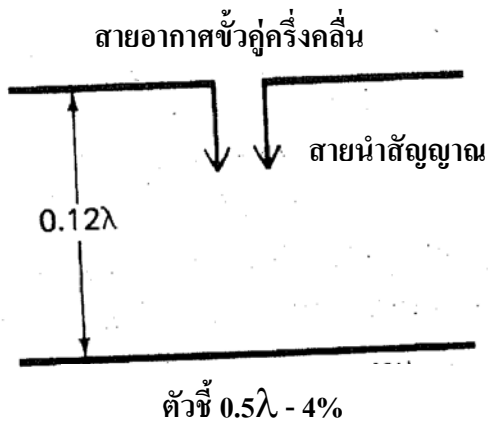


(ก)

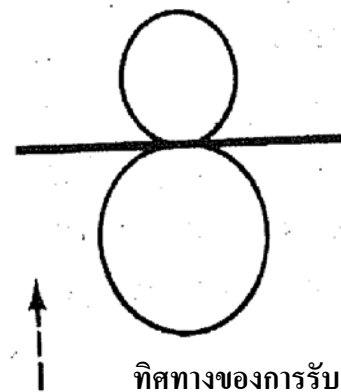


(ข)

รูปที่ 21 ขั้วคู่กับตัวสะท้อนด้านหลังของสายอากาศรับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 22 ขั้วคู่กับตัวชี้ด้านหน้าของสายอากาศรับ

ขั้วคู่กับตัวสะท้อน (Dipole with Reflector)

ตัวสะท้อนของรูปที่ 21 คือ 0.2λ อยู่ด้านหลังขั้วคู่ เพื่อเสริมกำลังสัญญาณรับจากด้านหน้า ฉะนั้นตัวสะท้อนจะมีค่า 5% ของขั้วคู่ รวมกับความยาวที่ชดเชยสำหรับช่องว่าง

การทำงานของสายอากาศต้องอาศัยการแผ่กระจายสัญญาณจากตัวสะท้อนจากทิศทางด้านหน้า สัญญาณวิทยุจะสร้างกระแสในตัวสะท้อน 90° ช้ากว่าในขั้วคู่ 90° ที่ล่าหลัง เป็นผลมาจากช่องว่างและความยาวตัวสะท้อนกระแสในตัวสะท้อนจะแผ่กระจายสัญญาณไปที่ส่วนรับ การแผ่กระจายสัญญาณจะมีมุม 90° ของรอบที่จะถึงขั้วคู่ ขณะที่สัญญาณขั้วคู่มีมุม 180° ของรอบ สัญญาณการแผ่กระจายและสัญญาณที่ขั้วคู่ต่างอยู่ในเฟสเดียวกัน ผลลัพธ์คือสามารถรวมสัญญาณสำหรับสายนำสัญญาณ

สำหรับสัญญาณที่มาจากด้านหลัง อย่างไรก็ตาม การแผ่กระจายสัญญาณจากตัวสะท้อนคือ 90° ออกจากเฟสกับกระแสน้ำอากาศในขั้วคู่ การผสมรวมในสัญญาณจะน้อยกว่าการรวมสัญญาณจากด้านหน้า อัตราการขยายกับตัวสะท้อน คือ 5 dB และอัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังคือ 3dB โดยประมาณ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คือ ครึ่งหนึ่งของส่วนจับเดียว

ขั้วคู่กับตัวชี้ (Dipole with Director)

ในรูปที่ 22 ตัวชี้คือ 0.12λ ในด้านหน้าของขั้วคู่และสั้นกว่า 4% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวสะท้อน ตัวชี้จะสั้นและติดตั้งที่ด้านหน้า อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์โดยประมาณเช่นเดียวกับตัวสะท้อน ขั้วคู่กับตัวชี้ จะรับสัญญาณ ได้มากกว่าจากด้านหน้า

ในหลาย ๆ กรณี ตัวชี้จะรวมกับขั้วคู่ และตัวสะท้อน เช่น ขบวนการสายอากาศจะมีอัตราการขยาย ประมาณ 7 dB

สายอากาศยาคิ (Yagi Antenna)

ขบวนการสายอากาศยาคิจะมีขั้วคู่กับหนึ่งตัวสะท้อนและตัวชี้สองหรือมากกว่านั้น ข้อดีคืออัตราการขยายสูง, อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังดีและมีผลตอบสนองในทิศทางแคบ ๆ อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนอง เรโซแนนซ์จะสูงมาก ซึ่งค่าเฉลี่ยจะไม่สามารถนำมาใช้สำหรับย่านความถี่กว้างได้

ขั้วคู่ความถี่สูงยิ่งกับตัวสะท้อนมุม (UHF Dipole with Corner Reflector)

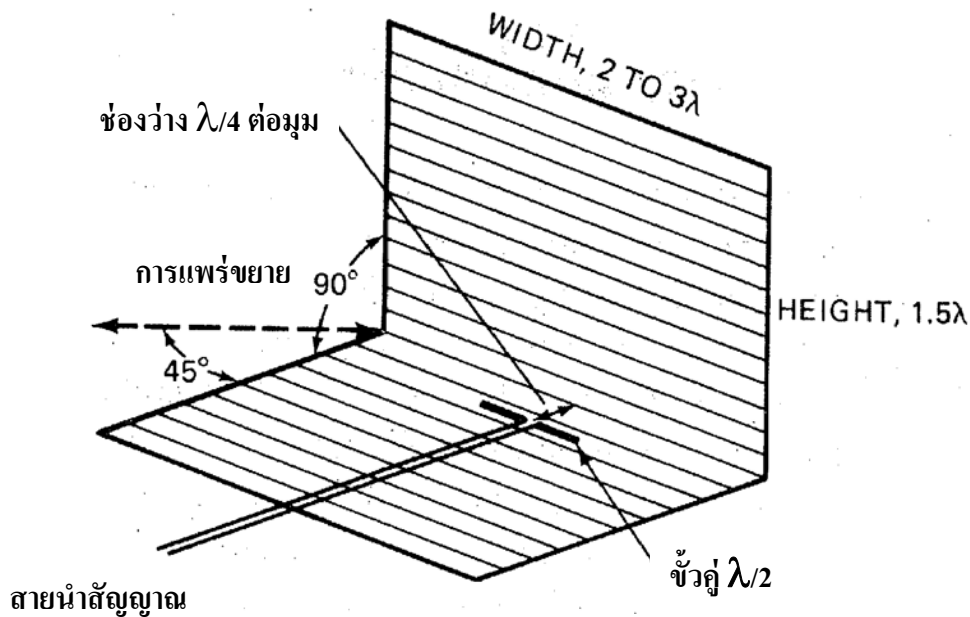
สำหรับย่านความถี่สูงยิ่ง 300 ถึง 3000 MHz ขั้วคู่ครึ่งคลื่น จะมีขนาดเล็ก ที่ 1000 MHz มีความยาว ขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ

$$\frac{468}{1000} = 0.468 \text{ ฟุต หรือ } 14.3 \text{ เซนติเมตร}$$

$$1000$$

$$\text{หรือ } 5.6 \text{ นิ้ว}$$

จึงต้องใช้ตัวสะท้อนขนาดใหญ่ เพื่อให้อัตราการขยายสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 ขั้วคู่ความถี่สูงยิ่งกับตัวสะท้อนมุม

แผ่นตัวนำใช้เป็นตัวสะท้อนมุมอยู่ด้านหลังของขั้วคู่ความถี่สูงยิ่ง ความกว้างของตัวสะท้อน 2-3 λ ตัวสะท้อนสามารถทำจากสิ่งอื่นได้ เช่น โลหะของแข็ง หรือตาข่ายของลวด

ขั้วคู่จะติดตั้งตามเส้นที่แบ่งครึ่งมุม 90° มีฉนวนกั้นที่ด้านหลัง การส่งหรือรับสูงสุดจากด้านหน้า อัตราการขยายประมาณ 10 dB อิมพีแดนซ์สายอากาศประมาณ 72Ω

ตัวสะท้อนสามารถสร้างเป็นรูปเว้าโค้ง แต่มีความยาวน้อยกว่า 10 เท่าของขั้วคู่ สายอากาศทำหน้าที่เป็นจุดป้อนพลังงานสำหรับตัวสะท้อน ถ้าเป็นขบวนจะมีทิศทางที่ชัดเจนกับความกว้างของลำ $2-3^\circ$ ซึ่งจะสามารถรวมจุดลำแสงได้

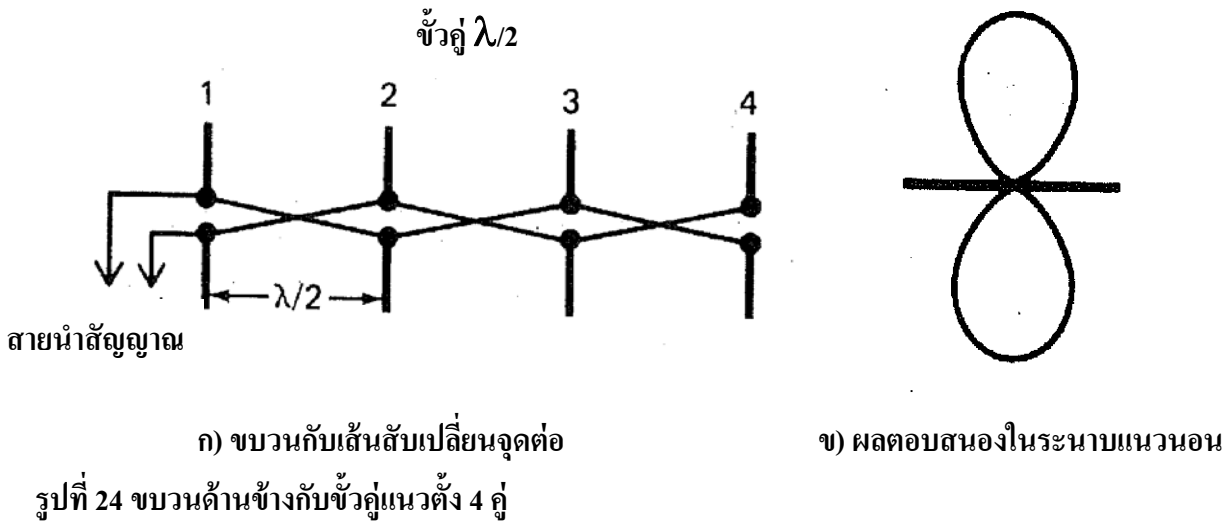
ขบวนขับ (Driven Arrays)

ในขบวนขับ สายอากาศทั้งหมดจะถูกต่อกับสายนำสัญญาณ ซึ่งสัญญาณของสายอากาศจะรวมทั้งช่องว่างและเฟสของสายป้อนสัญญาณ ผลลัพธ์คือมีอัตราการขยายสูง ถ้ามีตัวนำสายอากาศหลาย ๆ ตัวนำ และมีผลตอบสนองที่สูงขึ้น อย่างใดอย่างหนึ่งของสายอากาศ $\lambda/2$ หรือ $\lambda/4$ ที่ใช้ และยังสามารถติดตั้งได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง

ผลตอบสนองทิศทางจะจำเพาะเจาะจงกับการพิจารณาขนาดของขบวน พยายามที่จะบันทึกภาพทั้งหมดของสายอากาศที่ยังอยู่ในแผ่นหรือพื้นผิวของตัวนำ เมื่อสายอากาศอยู่แนวตั้ง แผ่นหรือระนาบของขบวนจะอยู่แนวตั้ง เมื่อสายอากาศอยู่แนวนอน ระนาบของขบวนจะอยู่แนวนอน ในขบวนด้านข้าง

ผลตอบสนองทิศทาง คือ ด้านข้าง หรือตั้งฉากกับระนาบของขบวน ในขบวนด้านปลาย ผลตอบสนองทิศทางคือ ในระนาบของขบวน อัตราการขยายสูงสุดคือ ด้านปลายทั้งสองของขบวน

ขบวนด้านข้าง (Broadside Arrays)

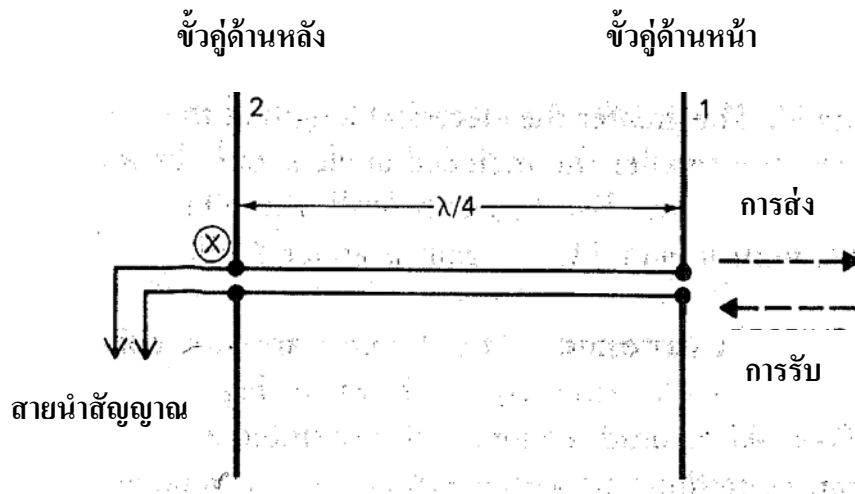


ในรูปที่ 24 แสดงถึงขั้วคู่ครึ่งคลื่นแนวตั้ง 4 คู่ ช่องว่างคือ ครึ่งคลื่น ภาพที่ขั้วคู่อยู่ด้านบนและด้านล่างตรงหน้า อัตราขยายทิศทางคือด้านข้างในระนาบแนวนอนต่อเนื่องและห่างออกไปในทิศทางตรงกันข้าม

สำหรับสายอากาศเครื่องส่ง การทำงานของขบวนคือ มีช่องว่างระหว่างสายอากาศคือครึ่งคลื่น ความยาวของสายนำสัญญาณคือครึ่งคลื่นระหว่างสายอากาศ อย่างไรก็ตาม สายนำสัญญาณที่ต่ออยู่จะเป็นรูปกากบาทหรือสับเปลี่ยน ซึ่งการสับเปลี่ยนเฟสของสัญญาณขับสายอากาศไป 180° ดังนั้น ความยาวของสายนำสัญญาณสำหรับครึ่งคลื่นจะตรงกับ 180° อยู่ในเฟส สายอากาศทั้งหมดจะถูกป้อนสัญญาณในเฟสเดียวกัน เพราะว่าช่องว่างของสายอากาศและเส้นที่สับเปลี่ยน

พิจารณาที่จุดในช่องว่างตรงหน้า ระหว่างจุดกึ่งกลางของขบวน ที่จุดนี้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศทั้งหมดจะสามารถรวมเข้าด้วยกัน เพราะว่าระยะทางไปยังตัวแผ่กระจายจะประมาณเดียวกัน จากจุดไปยังด้านขวาหรือด้านซ้าย ส่วนที่หายไปของสนามจากสายอากาศอื่น สำหรับระยะทางซึ่งแตกต่างกัน โดยความยาวครึ่งคลื่น รูปแบบทิศทางแสดงในรูปที่ 24 ข)

ขบวนปลายปิดเพลิง (End-Fire Array)



รูปที่ 25 ขั้วคู่แนวอนติดตั้งด้านหลังของอีกชุดในขบวนปลายปิดเพลิง

ในรูปที่ 25 ขั้วคู่ครั้งคลื่น 2 ชุด ติดตั้งแนวอนติดตั้งหนึ่งอยู่ด้านหลังของอีกชุดมีระยะห่าง $\lambda/4$ สายอากาศทั้งสองต่อกับสายนำสัญญาณ ไม่มีส่วนกาฝาก เพราะว่าช่องว่าง $\lambda/4$ ทำให้ขบวนมีทิศทางเดียว สายอากาศมีจุดป้อนสัญญาณที่จุด X ซึ่งอยู่ด้านหลังของขบวน อัตราการขยายของสายอากาศทั้งสองและอัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังจะประมาณ 3 dB

การทำงานของขบวนสำหรับการรับจะวิเคราะห์ได้ดังนี้ จากด้านหน้าสายอากาศ 1 ดักจับสัญญาณ $\lambda/4$ เร็วกว่าสายอากาศ 2 อย่างไรก็ตาม สายนำสัญญาณ $\lambda/4$ จะส่งสัญญาณที่จุด X ในเฟสเดียวกันกับสัญญาณที่สายอากาศ 2 สัญญาณจะรวมกันสำหรับการรับจากด้านหน้า

สัญญาณจากด้านหลังจะรับโดยสายอากาศ 1 ซึ่ง $\lambda/4$ รอบช้ากว่าสายอากาศ 2 นอกจากนี้ การรวมของสายนำสัญญาณ $\lambda/4$ จะส่งสัญญาณจากสายอากาศ 1 ไปที่จุด X 180° ออกจากเฟสกับสัญญาณที่สายอากาศ 2 สัญญาณทั้ง 2 จะยกเลิกไป ผลลัพธ์คือ การรับจะมีค่าต่ำสุดจากด้านหลัง

ขบวนซึ่งแสดงในรูปที่ 25 คือ ปลายปิดเพลิง (End-Fire) เพราะว่าการส่งหรือการรับจะมีค่าสูงสุดคือที่ปลายปิดทั้ง 2 ของระนาบสำหรับ 2 สายอากาศในทิศทางแนวอนติ ขบวนนี้จะมีทิศทางเดียว เพราะว่าช่องว่าง $\lambda/4$ ระหว่างสายอากาศ

การซ้อนกันแนวตั้งและแนวอนติ (Vertical and Horizontal Stacking)

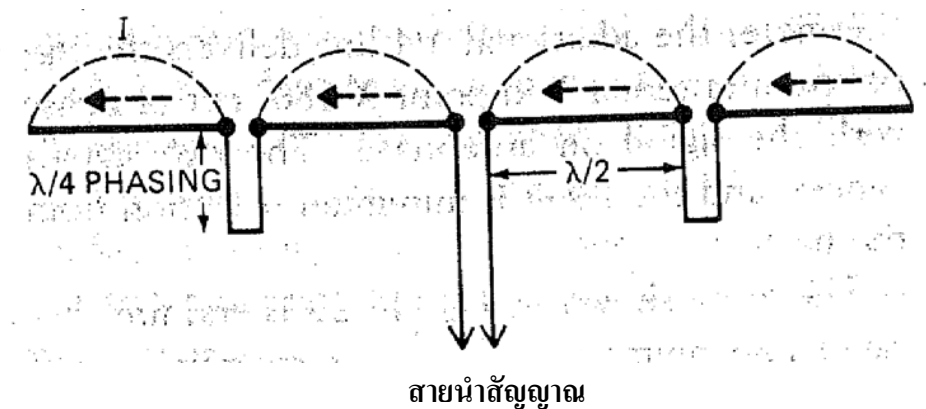
การซ้อนกันหมายถึงการติดตั้งสายอากาศมากกว่า 2 ในทิศทางเดียวกัน

วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราขยายและทิศทางที่ชัดเจนขึ้น ขบวนปลายปิดเพลิงในรูปที่ 25 สามารถนำมาพิจารณาทำการซ้อนกันแนวอนติ โดยเพิ่มอีกเพื่อให้อยู่ด้านหลังมากกว่า 2 สายอากาศ จะสามารถใช้ได้เช่นกัน สายอากาศขบวนจึงนำมาซ้อนกันได้

เทคนิคการซ้อนกันโดยทั่วไป คือติดตั้งขบวนปลายปิดเพลิงในแนวนอนให้เหนืออีกขบวนหนึ่งบนเสาอากาศแนวตั้ง ขบวนอื่นที่นำมาซ้อนกันเรียกว่าสายอากาศยื่น (Antenna bay) อัตราขยายมากขึ้น ทิศทางแนวนอนจะชัดเจนและมีอัตราขยายน้อย ในทิศทางแนวตั้ง

วิธีโดยทั่วไปของการซ้อนกันแนวตั้ง คือใช้สายอากาศยื่น 2 หรือ 3 ครั้งซ้อน ต่อกับสายนำสัญญาณ การต่อจะต้องสมมาตรเพื่อที่จะใช้ขบวนทั้งหมดส่งสัญญาณไปที่จุดป้อนสัญญาณในเวลาเดียวกัน เมื่อมีสายอากาศยื่น 2 มีสายป้อนต่อกับสายอากาศทั้งคู่ $\lambda/4$ เมื่อมีสายอากาศยื่น 3 สายป้อนจะอยู่ตรงกลาง และมี $\lambda/2$ ต่อกับสายอากาศยื่นของอีก 2 จุดต่อของสายอากาศยื่นเรียกว่าท่อนเฟส (Phasing rods)

ขบวนขนานใกล้ (Collinear Array)



รูปที่ 26 ขบวนขนานใกล้กับสายอากาศขั้วคู่ครึ่งคลื่น

ในขบวนขนานใกล้ แนวนอนชิ้นส่วน สายอากาศจะมีชิ้นปลายต่อปลาย ดังแสดงในรูปที่ 26 ขั้วคู่บนทั้งสองด้านจะเป็นจุดต่อสายป้อนสัญญาณ โดยต่อกับท่อนเฟส $\lambda/4$ จุดต่อทั้งหมด ตามความเป็นจริงจะพับเป็นส่วน $\lambda/2$ ของสาย

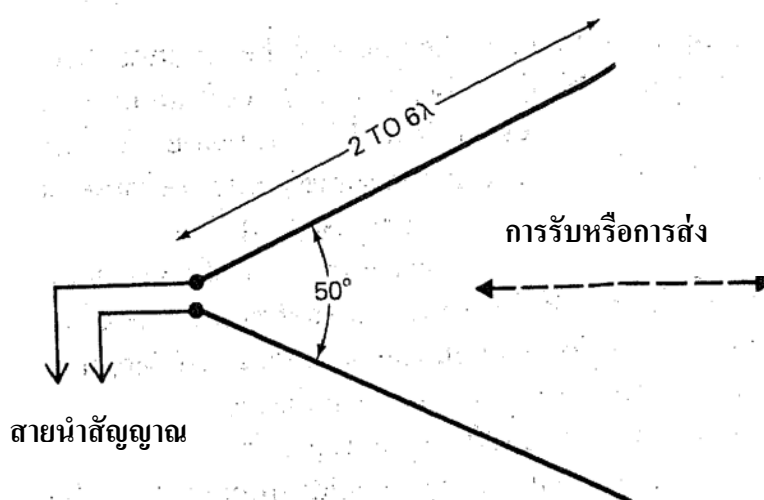
กระแสในส่วนเฟสจะช้ากว่าโดย $2 \times 90^\circ = 180^\circ$ ระหว่างชิ้นส่วนสายอากาศ เพราะฉะนั้น บางชิ้นส่วนของขั้วคู่ $\lambda/2$ จะมีกระแสในเฟสเดียวกัน

พิจารณาจุดที่เป็นช่องว่างด้านข้างสายป้อนของสายอากาศ ที่จุดตรงกลางและในด้านหน้าหรือหลัง จุดนี้คือ จุดที่มีระยะห่างเท่ากันจากด้านตรงข้ามปลายของขบวน ดังนั้น สนามการแผ่ของสายอากาศส่งจึงรวมกัน ถ้าเป็นสายอากาศรับ กระแสของสายอากาศจะเหนี่ยวนำรวมกับจุดที่ป้อนสัญญาณที่ด้านปลายของขบวน อย่างไรก็ตาม ขั้วคู่จะไม่มีปรากฏการณ์นี้ เพราะสัญญาณจะออกไปจากเฟส ผลลัพธ์คือการตอบสนองทิศทาง จะสูงสุดที่ด้านข้างจนไปสู่สายที่ขบวนแต่จะน้อยสุดที่ปลาย

สายอากาศลวดยาว (Long-Wire Antennas)

ชื่อสายอากาศลวดยาวนั้น ใช้สำหรับสายอากาศที่มีความยาวคลื่นมากกว่าครึ่งคลื่น โดยทั่วไปคือ 2 ถึง 6λ สายอากาศจะมีความยาวมากกว่าครึ่งคลื่น การกระจายของกระแสในตัวนำ จะเพิ่มทิศทางพร้อมกับในสายของลวด การตอบสนองทิศทางจะดีที่สุดตัวอย่างของกลับด้านข้างจะสร้างเรโซแนนซ์ฮาร์มอนิกบนขั้วคู่สายอากาศ

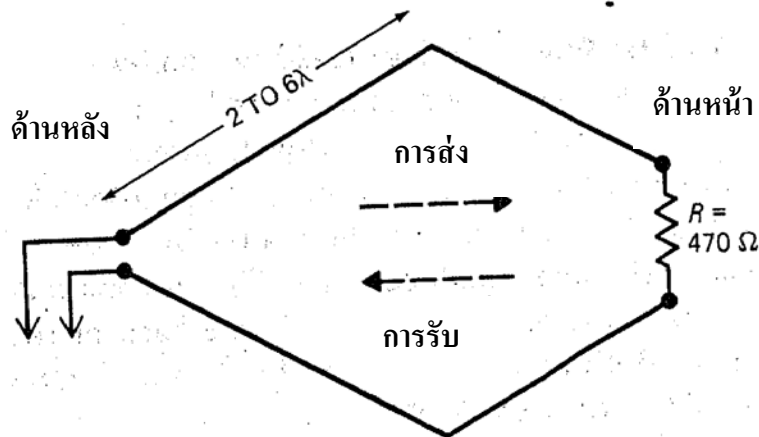
สายอากาศวี (V Antenna)



รูปที่ 27 สายอากาศวี คือตัวอย่างของสายอากาศลวดยาวสายอากาศมี 2 ทิศทาง

ผลตอบสนองของลวดยาว โดยตัวเองคือทิศทางของตัวนำเมื่อลวดยาว 2 เส้น รวมกันเป็นรูปตัววี ในรูปที่ 27 กลีบของรูปแบบ ทิศทางของตัวนำทั้งสองจะเสริมกันตลอดสาย เพราะฉะนั้นสายอากาศวี เครื่องส่งหรือเครื่องรับจะดีที่สุด ที่การแบ่งครึ่งของมุมตัววี ความยาวทางไฟฟ้าที่มากของขาทั้งสองข้าง มุมที่เล็กจะให้อัตราขยายสูง ตัวอย่างในรูปที่ 27 จะมีขาทั้งสอง 4λ และอัตราขยาย 7 dB

สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่น (Rhombic Antenna)

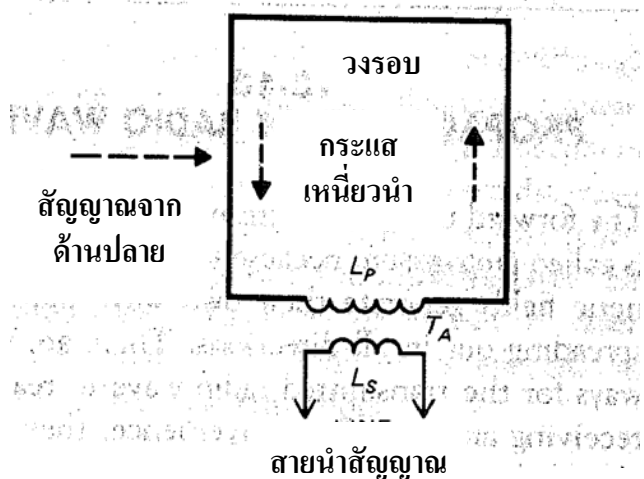
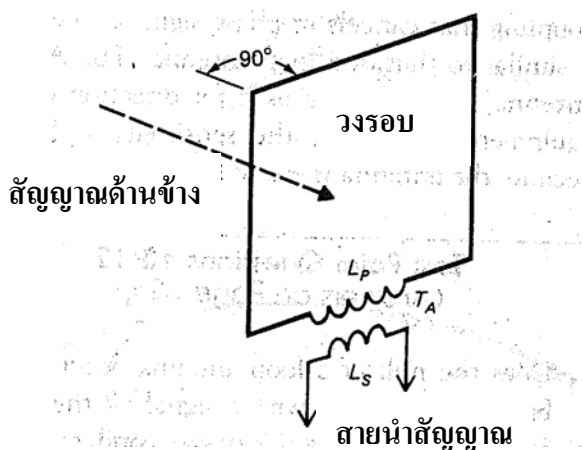


รูปที่ 28 สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่นประกอบด้วยสายอากาศวี 2 ชุด สายอากาศจะมีทิศทางเดียว เพราะมีความต้านทานอยู่ด้านหน้า

สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่นประกอบด้วยสายอากาศวี 2 ชุด แสดงในรูปที่ 28 มีทิศทางเดียว สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่น จะต่อกับตัวต้านทาน 470Ω เพื่อให้เข้ากับสายนำสัญญาณ 300Ω ที่ปลายด้านหน้าของสายอากาศ

ตัวอย่างในรูปที่ 28 ขาสองข้าง 4λ อัตราขยาย 10 dB สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่นมีข้อดีคือ อิมพีแดนซ์แบบเดียวกันอยู่เหนือย่านความถี่กว้าง $3:1$ อัตราขยายสูงและทิศทางชัดเจน

สายอากาศวงรอบ (Loop Antennas)



ก) สัญญาณต่ำสุด หรือรับไม่ได้จากด้านข้าง

ข) สัญญาณสูงสุดที่รับได้จากปลายวงรอบ

รูปที่ 29 สายอากาศวงรอบ

สายอากาศวงรอบ คือ ขดลวดซึ่งรอบรับทิศทางได้มากของสายอากาศรับ

วงรอบที่แสดงในรูปที่ 29 เป็นสี่เหลี่ยม แต่ก็สามารถทำเป็นวงกลมได้ สัญญาณสูงสุดที่รับได้จากปลายต่าง ๆ ของวงรอบ และสัญญาณต่ำสุดในทิศทางด้านข้าง ส่วนมากใช้กับอุปกรณ์ค้นหาทิศทาง วงรอบแนวตั้งจะหมุนเพื่อค้นหาและจะแสดงเมื่อมีสัญญาณเข้ามา

ในรูปที่ 29 ก) วงรอบแนวตั้ง แสดงถึงสัญญาณที่รับไม่ได้ เมื่อสัญญาณมีขั้วแนวตั้ง กระแสจะเหนี่ยวนำหลัก ๆ ในตัวนำแนวตั้ง ตัวนำแนวตั้งจะต่อกับตัวนำแนวนอนในด้านปลายตรงกันข้ามของสายอากาศเมื่อแปลงเข้า T_A จากทิศทางด้านข้าง ตัวนำแนวตั้งจะประมาณเท่ากับสัญญาณ เหตุผลคือว่าตัวนำทั้งสองรับคลื่นวิทยุที่เวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม จุดป้อนตัวนำทั้งสองตรงข้ามกับ T_A จะไม่มีกระแสในหม้อแปลง เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติจะไม่มีสัญญาณสำหรับเครื่องรับ

เมื่อสัญญาณถูกรับโดยปลายของวงรอบที่แสดงในรูปที่ 29 ข) กระแสในตัวนำแนวตั้งจะไม่อยู่ในเฟสเดียวกัน เพราะว่ามีช่องว่างอยู่ความเป็นจริง ส่วนประกอบสัญญาณของเฟสตรงข้ามในตัวนำแนวตั้งจะตาม T_A เพื่อที่จะให้สัญญาณเข้าสำหรับเครื่องรับ เหตุผลคือ เฟสตรงข้ามสำหรับกระแสในทิศทางตรงข้ามในปฐมภูมิ L_p จะสามารถสร้างกระแสสัญญาณใน L_s จำนวนรอบที่มากโดยทั่วไปใช้ในวงรอบเพื่อเพิ่มปริมาณของสัญญาณ

สายอากาศรับรู้ (Sense Antenna)

สายอากาศรับรู้จะแยกสายอากาศแนวตั้งที่ใช้กับวงรอบ สำหรับอุปกรณ์ค้นหาทิศทาง แต่จะอนุญาตให้ผลตอบสนองด้านข้าง จากด้านหน้าและด้านหลังของวงรอบ เพื่อที่จะแยกแยะจากสิ่งอื่นได้

สายอากาศปีกไก่ (Adcock Antenna)

ขบวนสายอากาศปีกไก่ ประกอบด้วย สายอากาศแนวตั้ง 2 ชุด กับหม้อแปลงคู่ควบซึ่งจะทำให้สัญญาณอยู่ในเฟสเดียวกัน

ปรากฏการณ์จะเหมือนสายอากาศวงรอบ สายอากาศปีกไก่ จะใช้สำหรับอุปกรณ์ค้นหาทิศทาง อย่างไรก็ตาม ความไวจะมีจำกัดเพราะว่าสายอากาศโดยพื้นฐานมีวงรอบหนึ่งรอบ