

## ความรู้เบื้องต้นของคลื่นวิทยุและสายอากาศ

### HS2VLL

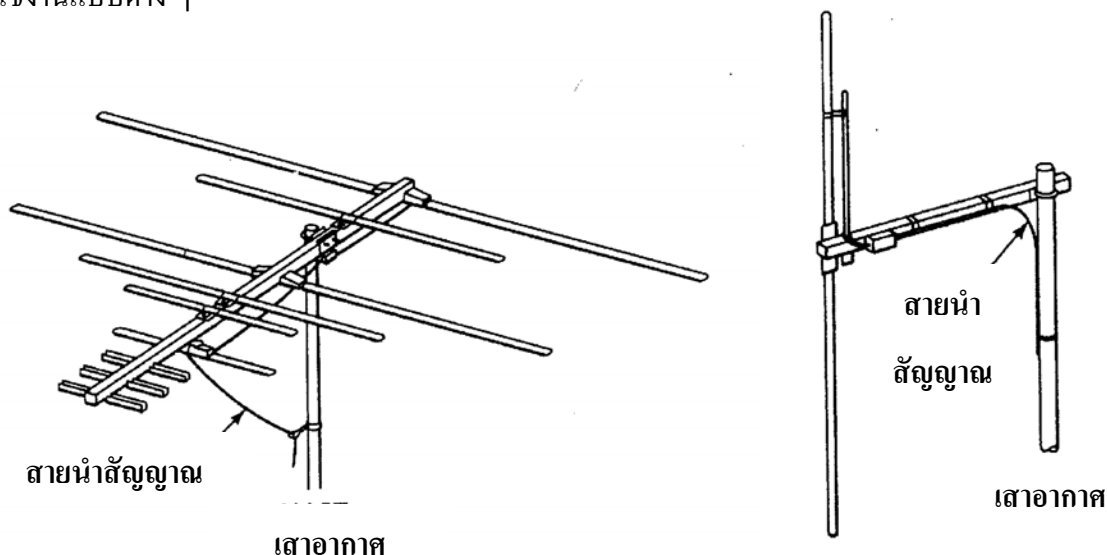
สายอากาศ คือ ตัวนำโลหะ ซึ่งมักจะเป็นแบบใดแบบหนึ่งของความยาวลวดหรือท่อกลวง ตัวนำที่จะใช้สำหรับสายอากาศจะต้องให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำนั้นได้ สายอากาศของเครื่องส่งกระแสไฟฟ้าจะสร้างคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นนี้จะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งเคลื่อนที่ไปในอากาศจากสายอากาศ สายอากาศของเครื่องรับ คลื่นวิทยุจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในสายอากาศ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะเป็นสัญญาณเข้าของเครื่องรับ

ซึ่งเครื่องส่งและเครื่องรับนี้ต่างก็ต้องมีสายอากาศเช่นเดียวกัน แต่ทำหน้าที่ต่างกัน เช่นตัวอย่างวิทยุ ความถี่ประชาชน (CB) ต่างก็ใช้สายอากาศสำหรับรับ – ส่งเหมือนกัน

สายนำสัญญาณจะต่อกับสายอากาศ ภายในสายนำสัญญาณจะประกอบด้วยตัวนำลวดคู่ วางในช่องว่างระหว่างกันคงที่ หน้าที่ของสายนำสัญญาณคือ การนำกระแสไฟฟ้าโดยปราศจากการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### คลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า

สายอากาศ คือ ตัวนำซึ่งออกแบบมาเพื่อแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรับการแผ่กระจายที่อยู่ในอากาศหรืออวกาศ สายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจะมีมากมายหลายขนาด และหลายรูปร่างเพื่อรองรับการใช้งานแบบต่าง ๆ



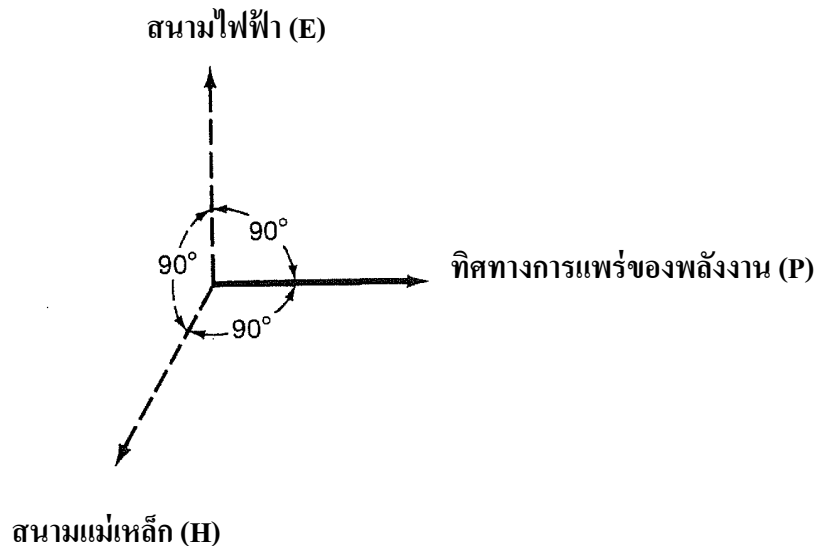
ก) สายอากาศของเครื่องรับโทรทัศน์

ข) สายอากาศของวิทยุความถี่ประชาชน (CB)  
ซึ่งใช้ทั้งรับและส่ง

รูปที่ 1 ตัวอย่างของสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สายอากาศจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่รอบ ๆ ตัว เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเปลี่ยน หรือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า ผลลัพธ์ของทั้งสองสนามนี้คือ หนึ่งเกิดฟลักซ์แม่เหล็ก และสองเกิดแรงจากเส้นแรงไฟฟ้า

แท้จริงแล้ว สนามทั้ง 2 มีความสำคัญมากกว่าตัวนำ การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสนามแม่เหล็ก จะมีผลต่อการสร้างสนามไฟฟ้าเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อการสร้างสนามแม่เหล็ก



## รูปที่ 2 ส่วนประกอบของคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้าและการแพร่ขยายในอากาศ

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

รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการแพร่ขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไหลไปในอากาศ พลังงานการเคลื่อนที่ของคลื่นคือการแบ่งเท่า ๆ กันระหว่างองค์ประกอบของไฟฟ้าและแม่เหล็ก

### ความเร็วของคลื่นวิทยุ

โดยทั่ว ๆ ไป 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,  $\lambda$  หนึ่งความยาวคลื่น คือ ระยะทางระหว่างจุดสองจุดซึ่งไปพร้อมกันในทิศทางการแพร่ขยาย เมื่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มซ้ำ ๆ กัน

ความยาวคลื่น  $\lambda$ , 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	<b>VLF</b>	3 – 30 kHz
ความถี่ต่ำ	<b>LF</b>	30 – 300 kHz
ความถี่ปานกลาง	<b>MF</b>	300 – 3,000 kHz
ความถี่สูง	<b>HF</b>	3 – 30 MHz
ความถี่สูงมาก	<b>VHF</b>	30 – 300 MHz
ความถี่สูงยิ่ง	<b>UHF</b>	300 – 3,000 MHz
ความถี่สูงสุด	<b>SHF</b>	3,000 – 30,000 MHz
ความถี่สูงพิเศษ	<b>EHF</b>	30,000 – 300,000 MHz

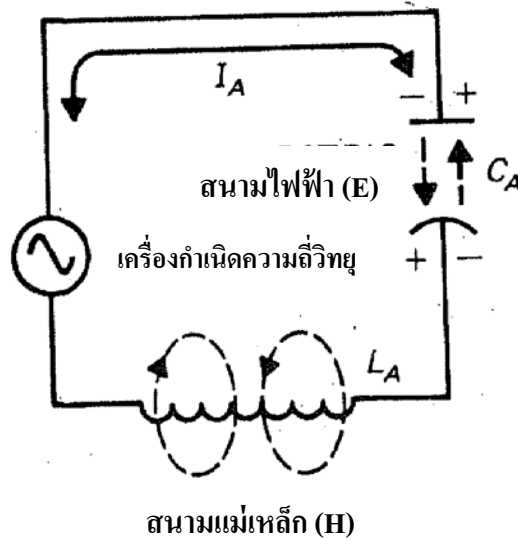
รูปที่ 3 ตารางแถบความถี่ต่างๆ

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

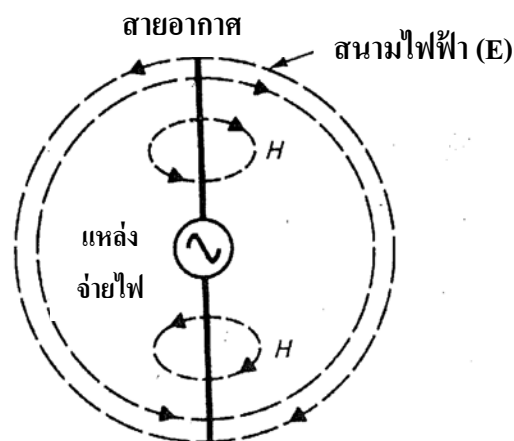
## หลักการแผ่กระจายคลื่น

เส้นแรงไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสายอากาศไปใน อากาศรอบ ๆ



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของสายอากาศที่มีความเหนี่ยวนำ  $L_A$  และความจุ  $C_A$

จากรูปที่ 5 แสดงถึงกลไกการแผ่กระจาย แผ่นความจุ  $C_A$  แสดงถึงตัวนำสายอากาศ



รูปที่ 6 ตัวนำสายอากาศที่ขยายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปในอากาศรอบ ๆ สายอากาศ

จากรูปที่ 6 แสดงถึงการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปในอากาศ ความจุจะมี แรงดันไฟฟ้าแปรผันเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า  $L_A$  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

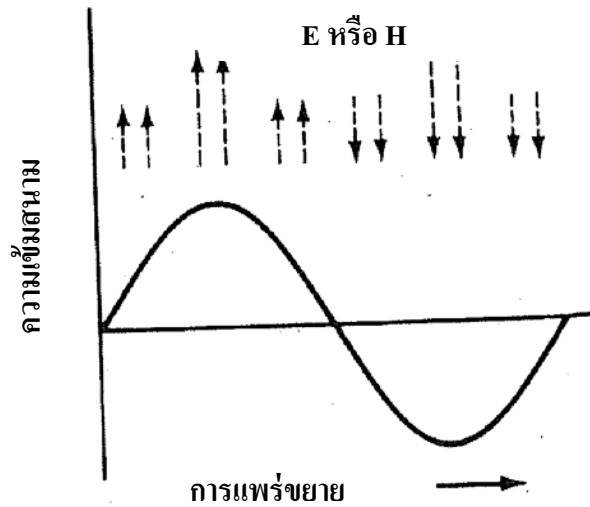
การปรับวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมก็ทำได้ในรูปที่ 6 แต่อย่างไรก็ตาม แผ่นตัวเก็บประจุที่เปิดออกใน รูปแบบของตัวนำ 2 ตัวนำของสายอากาศ จุดประสงค์คือเพื่อสร้างเส้นแรงสำหรับสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็ก ขยายต่อไปในอากาศรอบ ๆ สายอากาศ

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  $90^\circ$  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

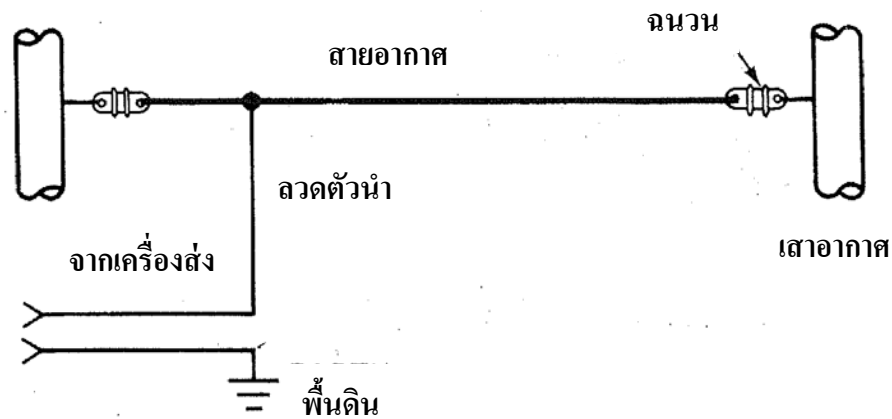
## คุณสมบัติของสายอากาศ (Antenna Characteristics)

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) แต่ละขั้ว จะมีกระแสไหลกลับแหล่งจ่ายที่อยู่ตรงศูนย์กลาง พื้นดินไม่มีความจำเป็น เพราะความจุ  $C_A$  สายอากาศ คือ ระหว่างขั้ว 2 ขั้ว



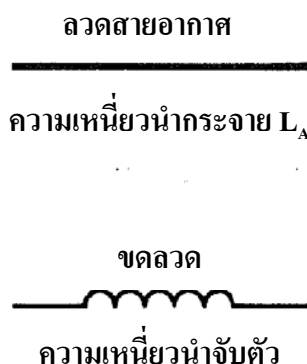
### รูปที่ 8 ตัวอย่างของสายอากาศที่ใช้พื้นดินด้านหนึ่งในวงจรสายอากาศ

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

อีกด้านหนึ่งของจุดต่อจะต่อกับพื้นดิน สายอากาศจะมีแรงดันสัญญาณตามพื้นดินและการแผ่กระจายคลื่นตามคุณลักษณะของพื้นดิน

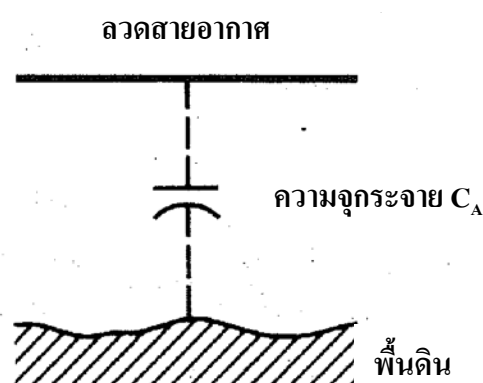
## ความเหนี่ยวนำกระจาย และความจุกระจาย (Distributed Inductance $L_A$ and Capacitance $C_A$ )

$C_A$  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

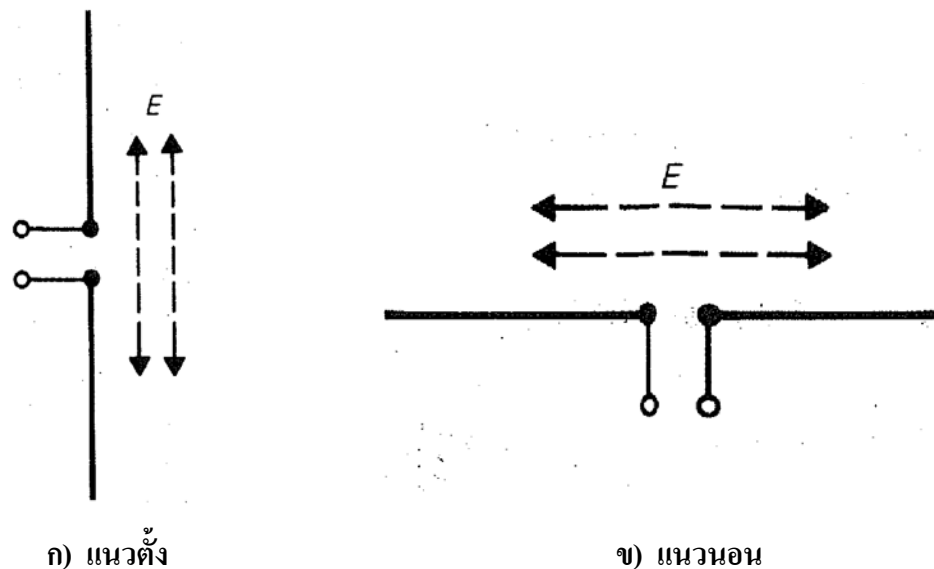
## สายอากาศเรโซแนนซ์ (Resonant Antennas)

ค่าของ  $L_A$  และ  $C_A$  สามารถใช้เพื่อให้สายอากาศทำงานเหมือนวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ข้อดีคือสายอากาศมีกระแสสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ไม่ต้องมีขดลวดและตัวเก็บประจุ แต่คุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศจะตรงกับวงจร LC

ความยาวของสายอากาศกับค่านึงถึงความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ คำนวณจากความถี่เรโซแนนซ์ โดยทั่ว ๆ ไป 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 สัญญาณรบกวนแทรกสอดสูงในความถี่นี้จะเกิดขั้วแนวตั้ง เพราะฉะนั้นการเกิดขั้วสายอากาศแวนอนจะรับสัญญาณรบกวนได้น้อย

การออกอากาศระบบกระจายเสียงของโทรทัศน์ใช้การเกิดขั้วแวนอน ซึ่งก็คือเหตุผลว่าทำไมสายอากาศโทรทัศน์จึงเป็นแวนอน

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

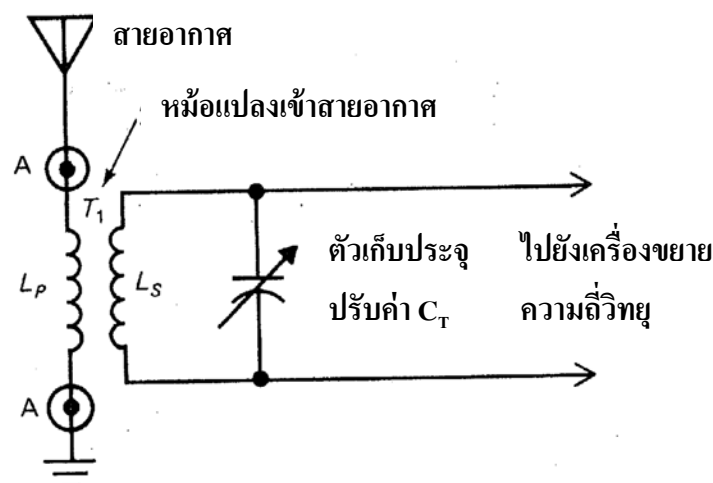
หน่วยไมโครโวลต์ต่อเมตรใช้เพื่อแสดงค่าความแรงสนาม (Field Strength) ของการส่งคลื่นวิทยุไปในอากาศ 1 เมตร คือ ประมาณ 40 นิ้ว ตัวอย่างเช่น สายอากาศขั้วคู่ ครึ่ง-คลื่น (Half-wave dipole) ยาว 1 เมตร มีสัญญาณ 300  $\mu\text{V}$  มีค่าความแรงสนาม คือ 300  $\mu\text{V}/\text{m}$  ความสูงของสายอากาศรับที่เป็นมาตรฐานจะใช้ 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 โดยขณะที่หม้อแปลงทำงาน สัญญาณคู่ควบไปยังขดลวดทุติยภูมิ  $L_s$  ตัวเก็บประจุ  $C_T$  ใช้ปรับตั้งขดลวดทุติยภูมิเพื่อให้ได้ความถี่พาหะที่ต้องการ

โดยทั่วไปสายอากาศเครื่องรับจะรับสัญญาณได้ทั้งหมดในแถบความถี่ที่ใช้งาน แต่ถ้าวจรปรับตั้งเลือกหาสถานที่ที่ต้องการ สัญญาณความถี่วิทยุที่เลือกไว้จะเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีความแรง โดยใช่วงจรขยาย

ตามความเป็นจริง เครื่องรับต่าง ๆ ต้องการสายอากาศเพื่อรับสัญญาณวิทยุ เครื่องรับบางเครื่องมีสายอากาศอยู่ภายในแต่ยังรับไม่ชัดเจน ฉะนั้นสายอากาศจะต้องส่งสัญญาณไปยังวงจรถ่ายความถี่วิทยุ

ในเครื่องรับจะมีการกำบังอย่างดี ในทางปฏิบัติต้องไม่มีสัญญาณน้อยกว่าจุดที่ต่อสายอากาศ ใช้ลวดขนาดชั้นเล็กสม่ำเสมอความยาว 30.5 ถึง 61 เซนติเมตร สำหรับสายอากาศเครื่องรับ เพื่อสร้างความแตกต่างในการรับเปรียบเทียบกับไม่มีสายอากาศถ้าสัมผัสขั้วต่อสายอากาศบนเครื่องรับโดยไม่มีสายอากาศร่างกายจะมีความจุซึ่งส่งสัญญาณวิทยุได้

### สายอากาศขั้วคู่ ครึ่งคลื่น (Half-wave dipole)

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

$$f$$

ก็ตาม ความยาวเรโซแนนซ์ของตัวนำขั้วคู่ ครึ่งคลื่นน้อยกว่าความยาวครึ่งคลื่นในอากาศ เหตุผลคือสายอากาศมีความจุ ซึ่งเปลี่ยนแปลงการกระจายของกระแสที่ปลาย ปรากฏการณ์นี้ตัวนำที่สั้นลงสำหรับความยาวเรโซแนนซ์ สำหรับขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ

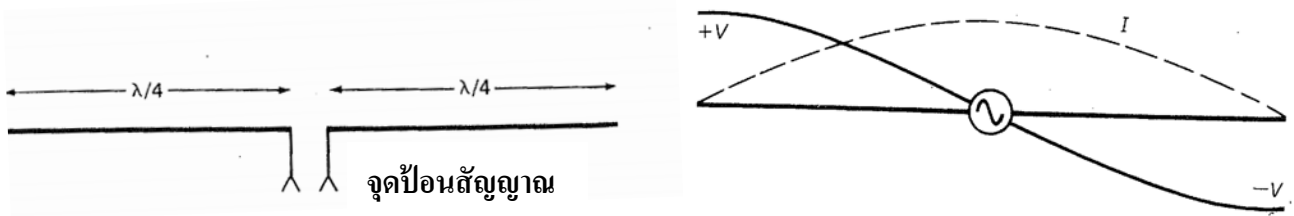
$$L = \frac{468}{f}$$

$$f$$

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 รูปที่ 13 สายอากาศขั้วคู่ครึ่งคลื่น

(ข) กระแส  $I$  และแรงดัน  $V$  กระจายตามบนตัวนำ

ถ้าเป็นคลื่นเศษ 1 ส่วน 4 จะได้ 2.34 ฟุต หรือ 71.3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 13 ช่องอากาศที่เป็น

ฉนวนระหว่างขั้วทั้งสอง 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 บนสายอากาศ แสดงเป็น  $+V$  และ  $-V$  ที่ปลายทั้งสอง เพราะว่าขั้วทั้งสองมีขั้วตรงกันข้ามจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

การกระจายกระแสและแรงดัน แสดงถึงว่าทำไมความยาวนั้นสร้างเรโซแนนซ์ที่ความถี่เฉพาะเจาะจง อิเล็กตรอนในตัวนำสายอากาศจะเคลื่อนที่จากจุดศูนย์กลางออกไปยังปลายทั้งสองด้าน และกลับมาสู่จุดศูนย์กลางในเวลา 1 รอบครึ่งของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ในเวลานั้น กระแสและแรงดันบนสายอากาศจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่อื่น ๆ บางส่วนจะยกเลิกจากเหตุการณ์ผิวกติ 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)

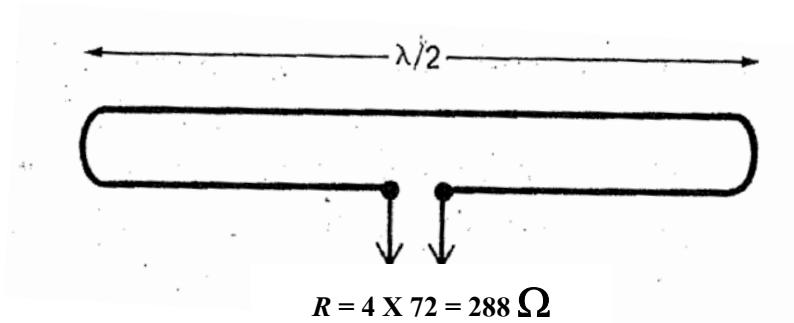
อัตราส่วนคลื่นนิ่งเปรียบเทียบกับแรงดันที่จุดสูงสุดไปที่จุดต่ำสุด ยกตัวอย่าง เมื่อสายอากาศขั้วคูมีแรงดันที่ปลาย 10 เท่าของจุดศูนย์กลาง SWR คือ 10 สายอากาศเรโซแนนซ์จะมีค่า SWR สูง ซึ่งแสดงว่าค่า V และ I สูงในคลื่นนิ่ง ในช่วงนั้นประสิทธิภาพจะสูงสำหรับสายอากาศส่งที่ซึ่งการแผ่กระจายหรือสายอากาศรับที่ซึ่งรับสัญญาณ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

### ความต้านทานการแผ่กระจาย

ที่จริงแล้วสายอากาศจะมีค่าเฉพาะของ V และ I เฉลี่ย ซึ่งจะมีอิมพีแดนซ์ค่าแน่นอน ถ้าสายอากาศเรโซแนนซ์จุดที่ป้อนสัญญาณคือความต้านทาน R คือ ความต้านทานการแผ่กระจายสำหรับการส่งหรือรับของสายอากาศ

ความต้านทานการแผ่กระจายของขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ  $72 \Omega$  ที่จุดศูนย์กลางและไกลออกไป สายอากาศจะมีอิมพีแดนซ์ปฏิกิริยาซึ่งมีค่าสูง ปลายสายจะมีอิมพีแดนซ์สูง ค่าบางที่เพิ่มขึ้นถึง  $1000 \Omega$

## สายอากาศขั้วคู่พับ (Folder Dipole Antenna)



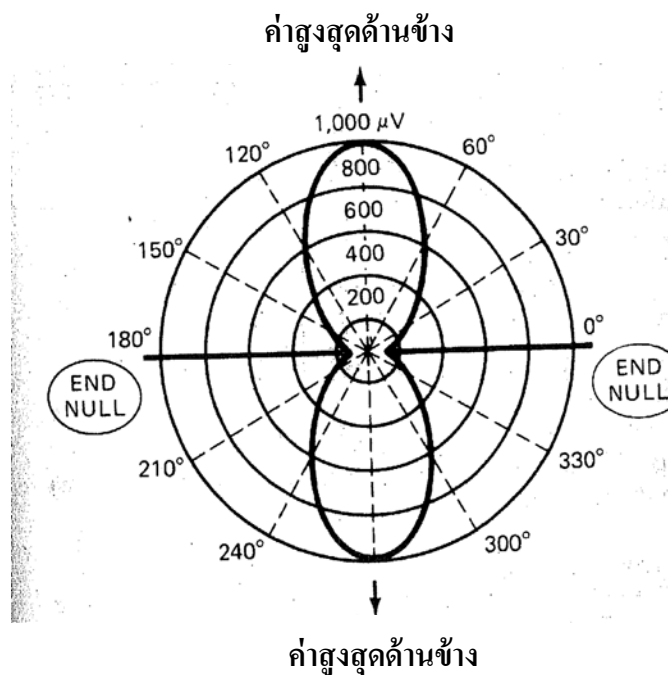
รูปที่ 14 สายอากาศขั้วคู่พับ

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

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

## รูปแบบทิศทางของขั้ว (Polar Directivity Pattern)

ทิศทางซึ่งสายอากาศจะรับหรือส่งที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 รูปแบบทิศทางของขั้วของสายอากาศขั้วคู่ครึ่งคลื่น

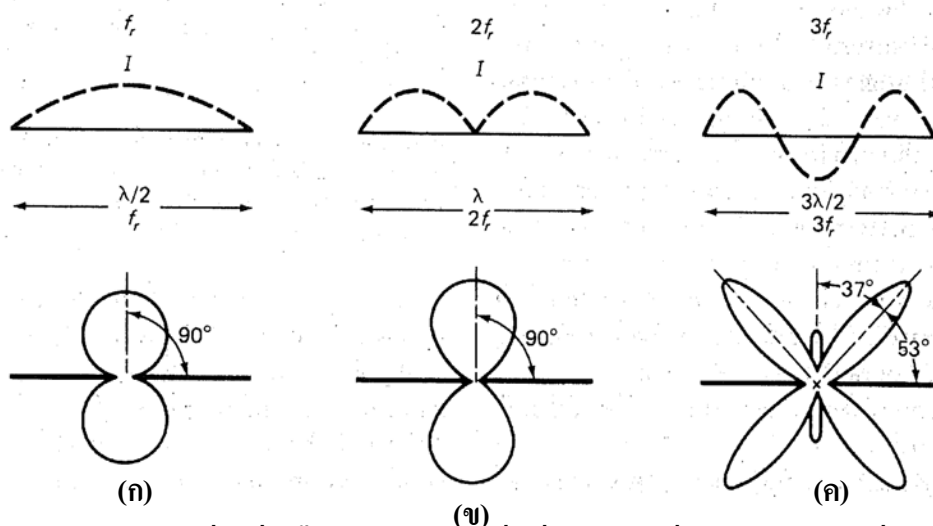
รูปแบบคือ ขั้วคู่ครึ่งคลื่นติดตั้งตามแนวนอน อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองสายอากาศแนวตั้งจะเท่ากันในทุกทิศทางในระบบแนวนอน

กราฟแสดงความแรงของสัญญาณในทิศทางสำหรับขนาดและทิศทาง มุมจะแสดงถึงทิศทางและความยาวของวงรีคือ 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 แต่จะมีความกว้างของกlob มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วคู่ครึ่งคลื่น เช่นกันจึงมีสัญญาณมากกว่าขั้วคู่ครึ่งคลื่น เพราะว่ามีตัวนำที่ใช้มากกว่า สุดท้ายความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 หรือ  $3f$  รูปแบบทิศทางจะแยกในด้านข้างกlob แสดงในรูปแบบที่ 16 (ค) สายอากาศจะรับหรือส่งได้น้อยในทิศทางด้านข้างที่กว้าง แต่จะได้ผลดีที่มุม  $37^\circ$



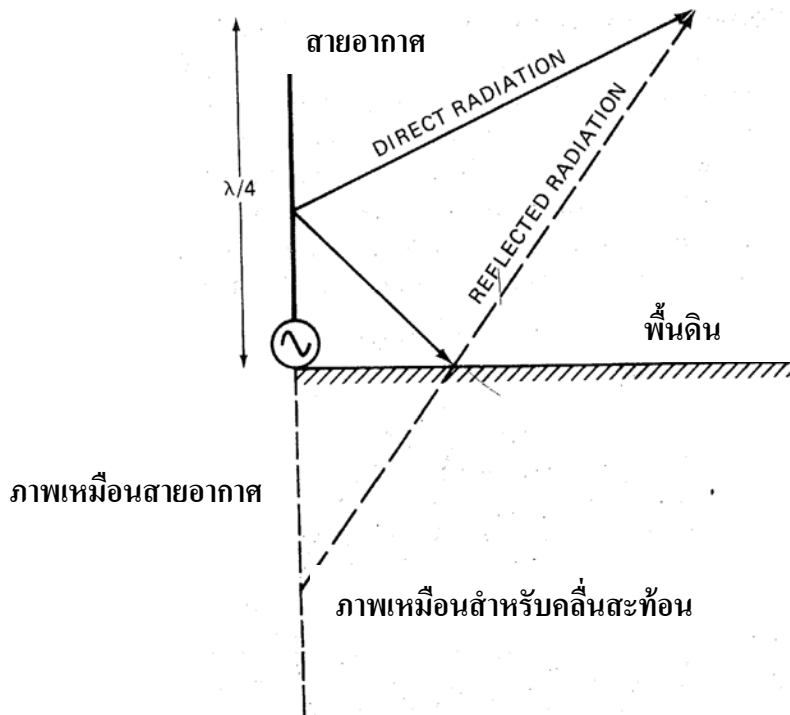
(ก) รูปเลข 8 ของเรโซแนนซ์ครึ่งคลื่นพื้นฐาน (ข) เต็มคลื่นที่ฮาร์โมนิกที่ 2 (ค) กlob แยกเพื่อเปลี่ยนรูปแบบทิศทางที่ฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ความยาว  $3\lambda/2$

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  $\frac{1}{4}$

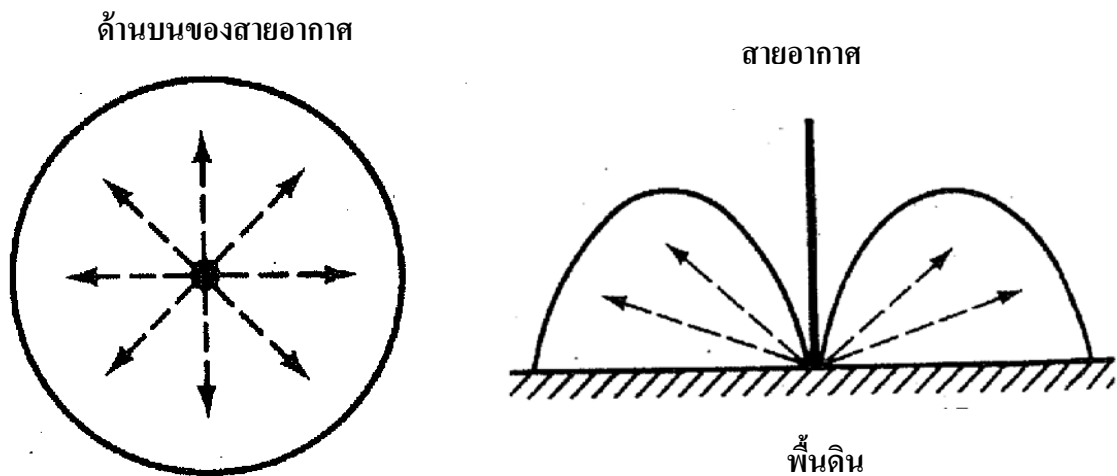
สายอากาศในรูปที่ 17 ซึ่งต่อกับพื้นดิน หรือด้านปลายคงที่ที่พื้นดินจะเป็นส่วนหนึ่งของระบบการแผ่กระจาย เมื่อตัวนำแนวตั้งสนามไฟฟ้าสถิตขยายไปยังพื้นดิน พื้นดินเสมือนพื้นผิวการนำหรือกระจกสำหรับการแผ่กระจาย สายอากาศพื้นดิน  $\frac{\lambda}{4}$  แสดงในรูปที่ 1 จะมีภาพเหมือนข้างในพื้นดิน เมื่อแรงดันและกระแสกระจายจะเหมือนกับขั้วคู่ครึ่งคลื่นแนวตั้งในอากาศ

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  $36 \Omega$  ค่าที่เหมาะสมสำหรับสายนำสัญญาณคือสายแกนร่วม  $50 \Omega$

### 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 ตามที่จริงแล้วเพิ่มขึ้นตามความแรงของสัญญาณเหนือพื้นดินในแนวนอนและทิศทางขึ้นไปด้านบน

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

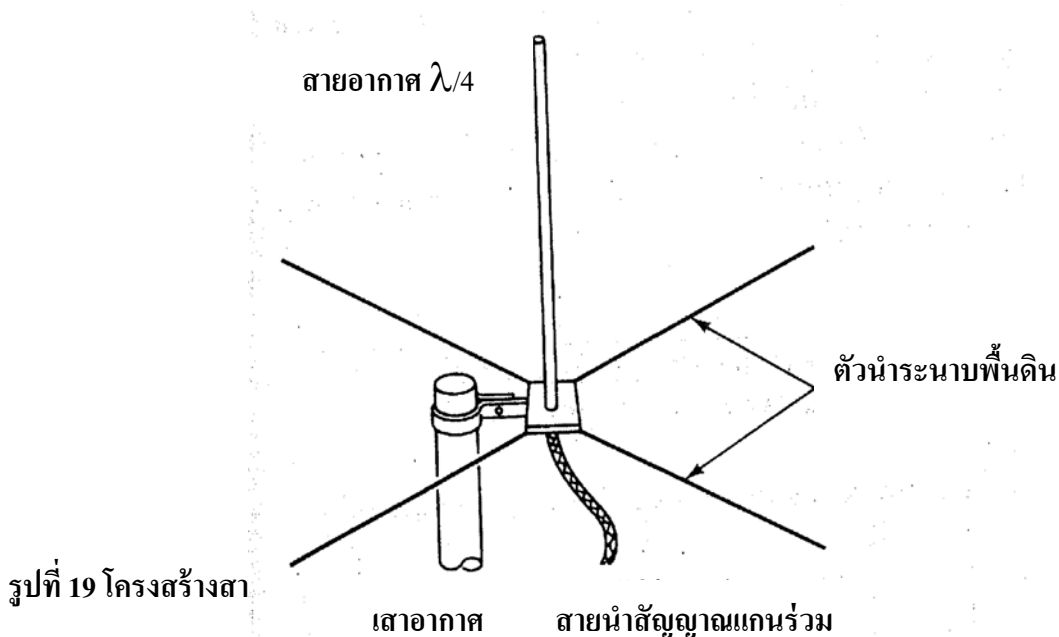
### คุณภาพของสายอากาศ (Antenna Counterpoise)

เมื่อพื้นโลกไม่มีสภาพนำที่ดีได้ จึงจำเป็นต้องติดตั้งพื้นดินเทียมขึ้นมา ทำเป็นโครงข่ายของตัวนำโลหะฝึ่งตรง สำหรับสายอากาศพื้นดิน โครงสร้างโลหะที่ทำขึ้นเพื่อแทนพื้นดินเรียกว่า คุณภาพ (Counterpoise) พื้นผิวของโลหะคุณภาพจะต้องน้อยกว่าของสายอากาศ

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

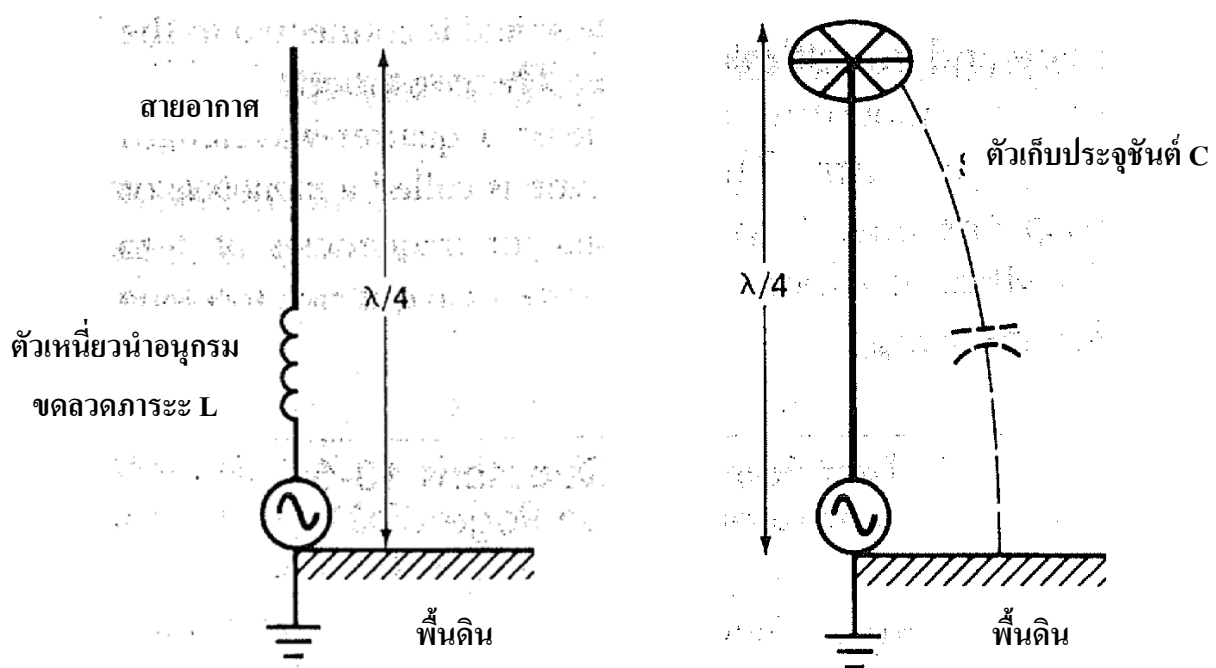
การทำงานของคุณภาพ แสดงว่าคลื่นวิทยุสามารถส่งและรับได้สำเร็จ เมื่อไม่มีพื้นโลก เช่น ในเครื่องบิน ตัวอย่าง โครงโลหะและผิวโลหะจะทำงานเหมือนคุณภาพ เพื่อทำหน้าที่เป็นพื้นดินสำหรับอุปกรณ์วิทยุ ทำนองเดียวกัน ตัวโครงโลหะของรถยนต์จะเป็นพื้นดินสำหรับวงจรสายอากาศ ตัวอย่างสุดท้าย ขั้วหนึ่งของสายอากาศขั้วคู่เหนือพื้นดิน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

### สายอากาศระนาบพื้นดิน (Ground-Plane Antenna)



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

## ภาระโหลดของสายอากาศ (Antenna Loading)



ก) ขดลวดภาระที่ใช้เพิ่มความเหนี่ยวนำอนุกรม

ข) ภาระส่วนยอดที่ใช้เพิ่มความจุชั้น

### รูปที่ 20 ภาระโหลดของอากาศ

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

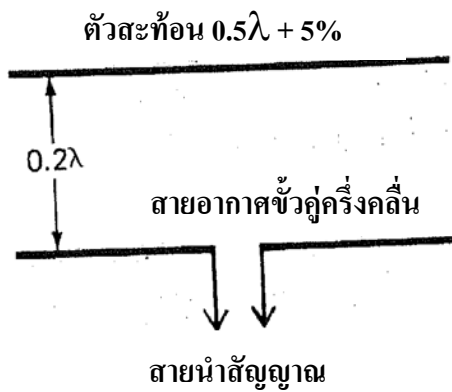
สำหรับตัวอย่าง ขบวนกับขั้วคู่สอง โดยทั่วไปสามารถให้สองเท่าของแรงดันสัญญาณที่ขั้วคู่หนึ่ง ดังนั้น อัตราขยายแรงดัน คือ น้อยกว่า 2 หรือประมาณ 5 dB

### อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front-to-Back Ratio)

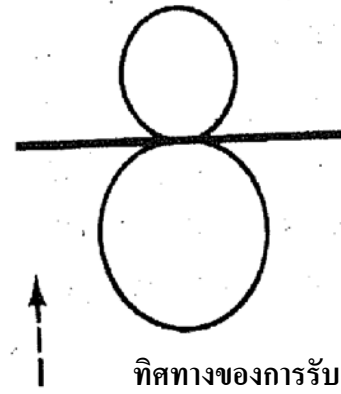
ขบวนสายอากาศถูกออกแบบเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศที่ด้านหน้าและมีสัญญาณน้อยกว่าจากด้านหลัง ความแตกต่างในทิศทางตอบสนอง คือ อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศ เมื่อการออกแบบถูกนำไปใช้ ความสำคัญ คือ สายอากาศจะถูกติดตั้งในทิศทางที่ออกแบบไว้

### 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

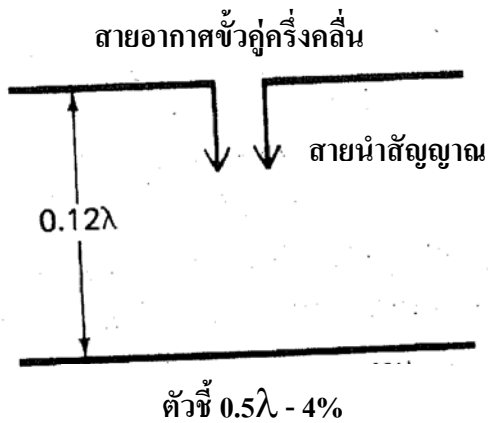


(ก)

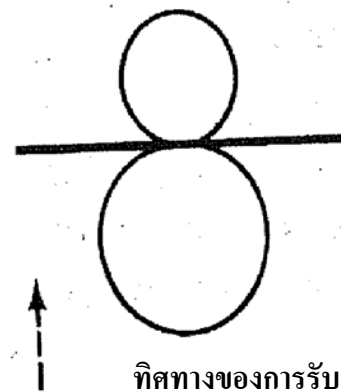


(ข)

รูปที่ 21 ขั้วคู่กับตัวสะท้อนด้านหลังของสายอากาศรับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 22 ขั้วคู่กับตัวชี้ด้านหน้าของสายอากาศรับ

### ขั้วคู่กับตัวสะท้อน (Dipole with Reflector)

ตัวสะท้อนของรูปที่ 21 คือ  $0.2\lambda$  อยู่ด้านหลังขั้วคู่ เพื่อเสริมกำลังสัญญาณรับจากด้านหน้า ฉะนั้นตัวสะท้อนจะมีค่า  $5\%$  ของขั้วคู่ รวมกับความยาวที่ชดเชยสำหรับช่องว่าง

การทำงานของสายอากาศต้องอาศัยการแผ่กระจายสัญญาณจากตัวสะท้อนจากทิศทางด้านหน้า สัญญาณวิทยุจะสร้างกระแสในตัวสะท้อน  $90^\circ$  ช้ากว่าในขั้วคู่  $90^\circ$  ที่ล่าหลัง เป็นผลมาจากช่องว่างและความยาวตัวสะท้อนกระแสในตัวสะท้อนจะแผ่กระจายสัญญาณไปที่ส่วนรับ การแผ่กระจายสัญญาณจะมีมุม  $90^\circ$  ของรอบที่จะถึงขั้วคู่ ขณะที่สัญญาณขั้วคู่มีมุม  $180^\circ$  ของรอบ สัญญาณการแผ่กระจายและสัญญาณที่ขั้วคู่ต่างอยู่ในเฟสเดียวกัน ผลลัพธ์คือสามารถรวมสัญญาณสำหรับสายนำสัญญาณ

สำหรับสัญญาณที่มาจากด้านหลัง อย่างไรก็ตาม การแผ่กระจายสัญญาณจากตัวสะท้อนคือ  $90^\circ$  ออกจากเฟสกับกระแสน้ำอากาศในขั้วคู่ การผสมรวมในสัญญาณจะน้อยกว่าการรวมสัญญาณจากด้านหน้า อัตราการขยายกับตัวสะท้อน คือ 5 dB และอัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังคือ 3dB โดยประมาณ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คือ ครึ่งหนึ่งของส่วนจับเดียว

### ขั้วคู่กับตัวชี้ (Dipole with Director)

ในรูปที่ 22 ตัวชี้คือ  $0.12 \lambda$  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 ผลตอบสนองเรโซแนนซ์จะสูงมาก ซึ่งค่าเฉลี่ยจะไม่สามารถนำมาใช้สำหรับย่านความถี่กว้างได้

ขั้วคู่ความถี่สูงยิ่งกับตัวสะท้อนมุม (UHF Dipole with Corner Reflector)

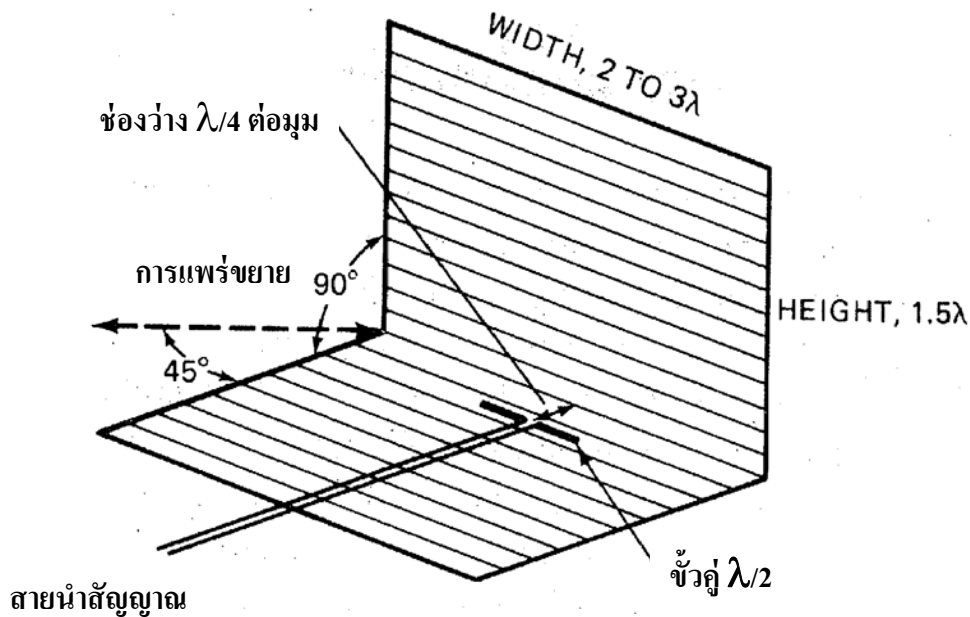
สำหรับย่านความถี่สูงยิ่ง 300 ถึง 3000 MHz ขั้วคู่ครึ่งคลื่น จะมีขนาดเล็ก ที่ 1000 MHz มีความยาวขั้วคู่ครึ่งคลื่น คือ

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

$$1000$$

$$\text{หรือ } 5.6 \text{ นิ้ว}$$

จึงต้องใช้ตัวสะท้อนขนาดใหญ่ เพื่อให้อัตราการขยายสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 ขั้วคู่ความถี่สูงยิ่งกับตัวสะท้อนมุม

แผ่นตัวนำใช้เป็นตัวสะท้อนมุมอยู่ด้านหลังของขั้วคู่ความถี่สูงยิ่ง ความกว้างของตัวสะท้อน 2-3  $\lambda$  ตัวสะท้อนสามารถทำจากสิ่งอื่นได้ เช่น โลหะของแข็ง หรือตาข่ายของลวด

ขั้วคู่จะติดตั้งตามเส้นที่แบ่งครึ่งมุม  $90^\circ$  มีฉนวนกั้นที่ด้านหลัง การส่งหรือรับสูงสุดจากด้านหน้า อัตราการขยายประมาณ 10 dB อิมพีแดนซ์สายอากาศประมาณ  $72\Omega$

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

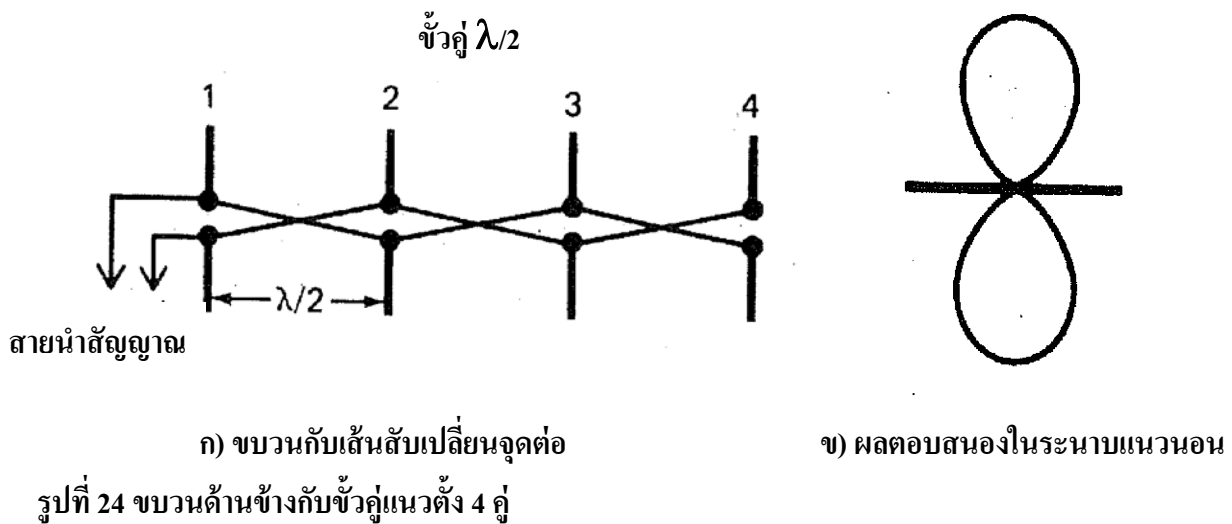
### ขบวนขับ (Driven Arrays)

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)

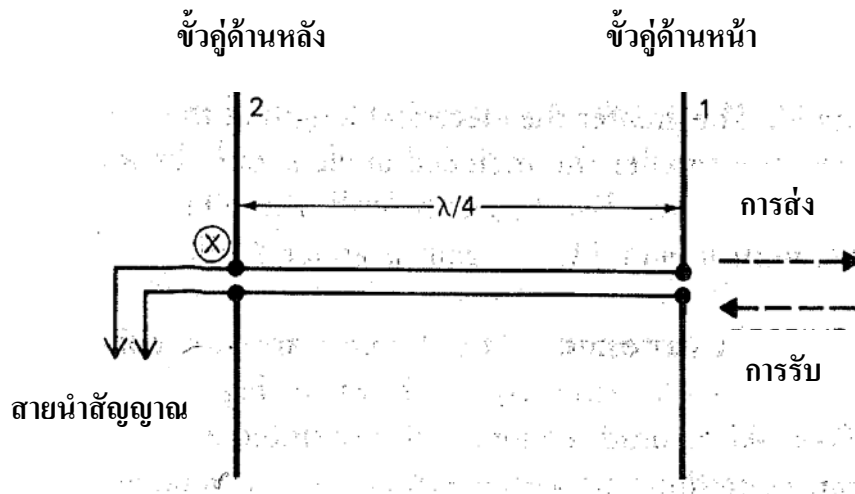


ในรูปที่ 24 แสดงถึงขั้วคู่ครึ่งคลื่นแนวตั้ง 4 คู่ ช่องว่างคือ ครึ่งคลื่น ภาพที่ขั้วคู่อยู่ด้านบนและด้านล่างตรงหน้า อัตราขยายทิศทางคือด้านข้างในระนาบแนวนอนต่อเนื่องและห่างออกไปในทิศทางตรงกันข้าม

สำหรับสายอากาศเครื่องส่ง การทำงานของขบวนคือ มีช่องว่างระหว่างสายอากาศคือครึ่งคลื่น ความยาวของสายนำสัญญาณคือครึ่งคลื่นระหว่างสายอากาศ อย่างไรก็ตาม สายนำสัญญาณที่ต่ออยู่จะเป็นรูปกากบาทหรือสับเปลี่ยน ซึ่งการสับเปลี่ยนเฟสของสัญญาณขับสายอากาศไป  $180^\circ$  ดังนั้น ความยาวของสายนำสัญญาณสำหรับครึ่งคลื่นจะตรงกับ  $180^\circ$  อยู่ในเฟส สายอากาศทั้งหมดจะถูกป้อนสัญญาณในเฟสเดียวกัน เพราะว่าช่องว่างของสายอากาศและเส้นที่สับเปลี่ยน

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

## ขบวนปลายปิดเพลิง (End-Fire Array)



### รูปที่ 25 ขั้วคู่แนวอนติติดตั้งด้านหลังของอีกชุดในขบวนปลายปิดเพลิง

ในรูปที่ 25 ขั้วคู่ครั้งคลื่น 2 ชุด ติดตั้งแนวอนติชุดหนึ่งอยู่ด้านหลังของอีกชุดมีระยะห่าง  $\lambda/4$  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  $180^\circ$  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)

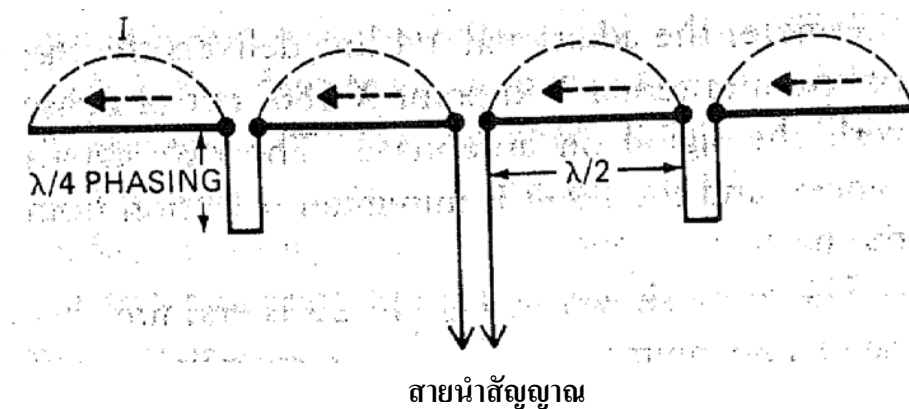
การซ้อนกันหมายถึงการติดตั้งสายอากาศมากกว่า 2 ในทิศทางเดียวกัน

วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราขยายและทิศทางที่ชัดเจนขึ้น ขบวนปลายปิดเพลิงในรูปที่ 25 สามารถนำมาพิจารณาทำการซ้อนกันในแนวอนติ 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 แนวนอนขึ้นส่วน สายอากาศจะมีชั้นปลายต่อปลาย ดังแสดงในรูปที่ 26 ขั้วคู่บนทั้งสองด้านจะเป็นจุดต่อสายป้อนสัญญาณ โดยต่อกับท่อนเฟส  $\lambda/4$  จุดต่อทั้งหมด ตามความเป็นจริงจะพับเป็นส่วน  $\lambda/2$  ของสาย

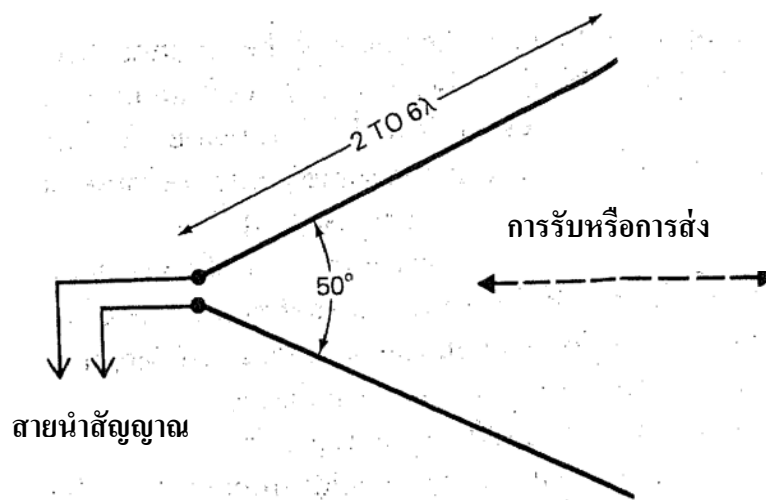
กระแสในส่วนเฟสจะช้ากว่าโดย  $2 \times 90^\circ = 180^\circ$  ระหว่างขึ้นส่วนสายอากาศ เพราะฉะนั้น บางขึ้นส่วนของขั้วคู่  $\lambda/2$  จะมีกระแสในเฟสเดียวกัน

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

### สายอากาศลวดยาว (Long-Wire Antennas)

ชื่อสายอากาศลวดยาวนั้น ใช้สำหรับสายอากาศที่มีความยาวคลื่นมากกว่าครึ่งคลื่น โดยทั่วไปคือ 2 ถึง  $6\lambda$  สายอากาศจะมีความยาวมากกว่าครึ่งคลื่น การกระจายของกระแสในตัวนำ จะเพิ่มทิศทางพร้อมกับในสายของลวด การตอบสนองทิศทางจะดีที่สุดตัวอย่างของกลับด้านข้างจะสร้างเรโซแนนซ์ฮาร์มอนิกบนขั้วคู่สายอากาศ

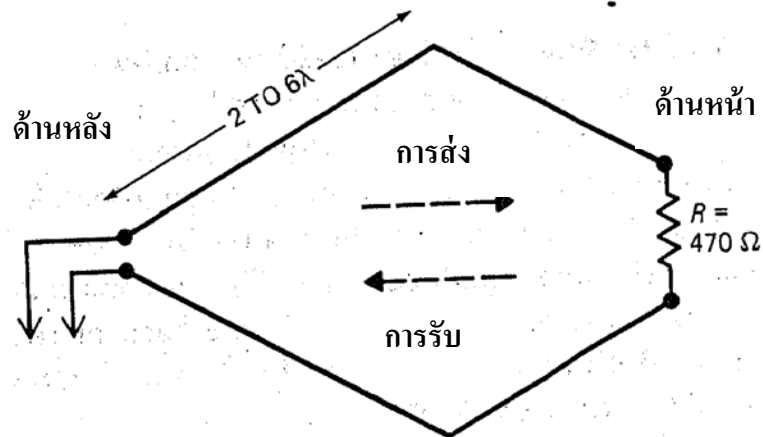
### สายอากาศวี (V Antenna)



รูปที่ 27 สายอากาศวี คือตัวอย่างของสายอากาศลวดยาวสายอากาศมี 2 ทิศทาง

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

## สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่น (Rhombic Antenna)

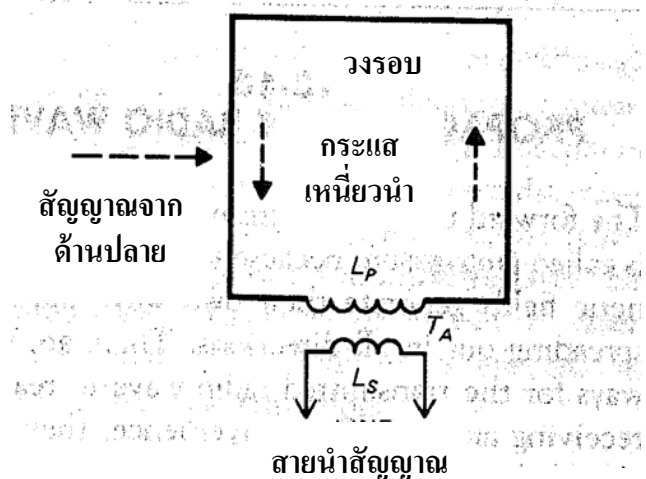
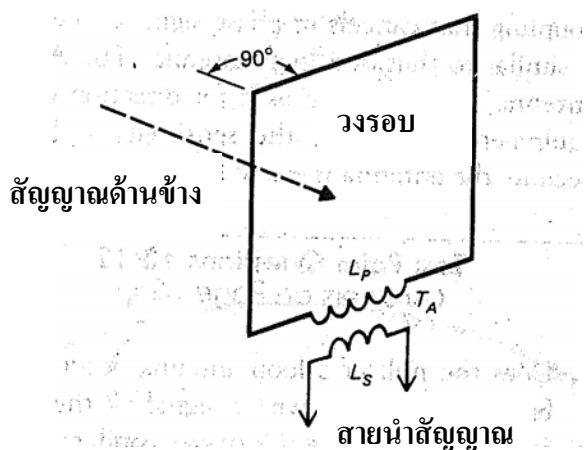


รูปที่ 28 สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่นประกอบด้วยสายอากาศวี 2 ชุด สายอากาศจะมีทิศทางเดียว เพราะมีความต้านทานอยู่ด้านหน้า

สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่นประกอบด้วยสายอากาศวี 2 ชุด แสดงในรูปที่ 28 มีทิศทางเดียว สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็ยกปุ่น จะต่อกับตัวต้านทาน  $470 \Omega$  เพื่อให้เข้ากับสายนำสัญญาณ  $300 \Omega$  ที่ปลายด้านหน้าของสายอากาศ

ตัวอย่างในรูปที่ 28 ขาสองข้าง  $4\lambda$  อัตราขยาย  $10 \text{ dB}$  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