

5.9 การต่อโหลดที่เอาต์พุตของสายส่ง และการสะท้อนกลับของคลื่น

(Terminations and Reflections)

เมื่อเรานำโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายส่ง ($Z_L = Z_0$) มาต่อกับเอาต์พุตของสายส่ง แล้วป้อนกำลังงานคลื่นวิทยุให้แก่อินพุตของสายส่ง คลื่นวิทยุจะเคลื่อนที่ตามสายส่งไปยังเอาต์พุตของสายส่งที่อยู่กับโหลด ก็จะทำให้กำลังงานของคลื่นวิทยุถูกดูดกลืนที่โหลดมากที่สุด ในกรณีเช่นนี้เราเรียกว่า “สายส่งแมตช์ (Match) กับโหลด” แต่ถ้าหากโหลดที่นำมาต่อกับเอาต์พุตของสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายส่ง ($Z_L \neq Z_0$) แล้ว ก็จะมีผลทำให้กำลังงานของคลื่นวิทยุถูกดูดกลืนที่โหลดไม่หมด และจะมีกำลังงานของคลื่นวิทยุบางส่วนสะท้อนกลับมายังสายส่งได้อีก โดยปริมาณกำลังการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและโหลดว่าไม่แมตช์ (Mismatch) กันมากน้อยเพียงใด

ซึ่งอัตราส่วนแรงดันของคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมายังสายส่ง (Reflected voltage : V_R) ต่อแรงดันของคลื่นวิทยุที่เคลื่อนที่ไปยัง โหลด (Forward voltage : V_F) เราเรียกว่า “สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ” (Reflection coefficient : Γ)

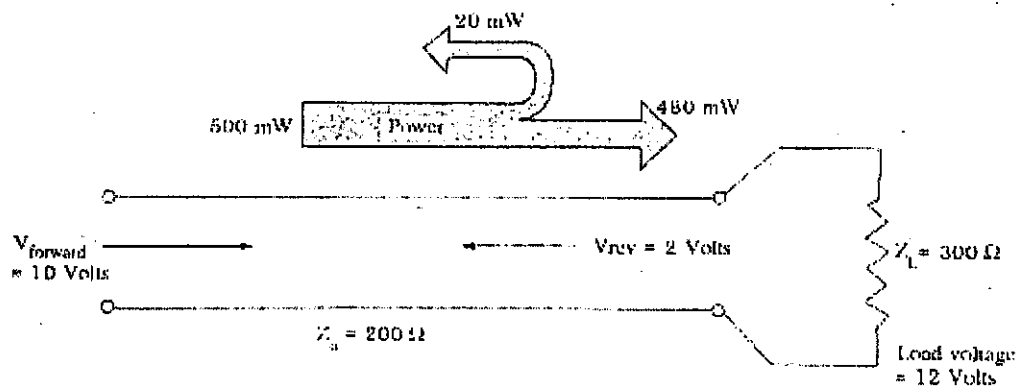
$$\Gamma = \frac{V_R}{V_F} \quad \dots(5.10)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Γ) ค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายส่ง (Z_0) และค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_L) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad \dots(5.11)$$

ซึ่งค่า Γ จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0~1 (ไม่มีหน่วย)

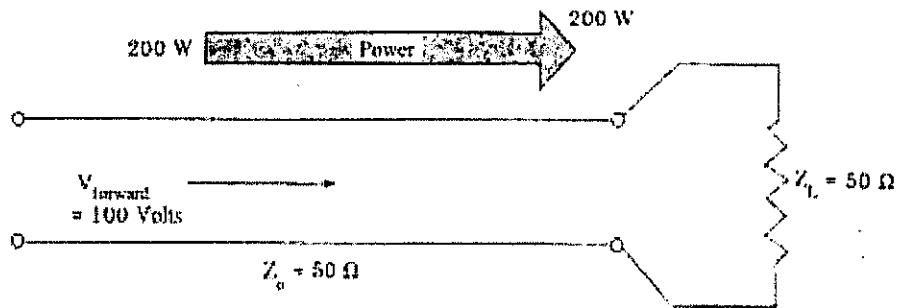
ในกรณีที่ $Z_L \neq Z_0$ นั้น จะมีคลื่นสองคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่ง คือคลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังโหลด หรือคลื่นตรง (Forward wave) และคลื่นที่เคลื่อนที่กลับมายังสายส่งหรือคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected wave) ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุ เมื่อ $Z_L \neq Z_0$

ถ้าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_L) มีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายส่ง (Z_0) แล้ว แรงดันที่สะท้อนกลับจะไม่มี การเปลี่ยนเฟส แต่ถ้าหาก Z_L น้อยกว่า Z_0 แล้ว แรงดันที่สะท้อนกลับ จะมีการเปลี่ยนเฟสไป 180°

ตัวอย่างที่ 5.11 การต่อโหลดที่เอาต์พุตของสายส่ง
สมมติว่าสายส่งมี Z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ ที่มีเอาต์พุตออก 100 โวลต์ ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงการต่อโหลดเอาต์พุตที่สายส่ง

ในขณะที่ยังไม่ต่อโหลดกระแสในสายส่งจะเท่ากับ $\frac{100}{50} = 2$ แอมแปร์ และถ้าต่อโหลด (Z_L) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มที่เอาต์พุตของสายส่ง เมื่อแรงดันความถี่วิทยุ 100 โวลต์ เคลื่อนที่ไปตามสายส่งจนถึงโหลด (Z_L) กระแสในโหลด (Z_L) ก็จะเป็นเท่ากับ $\frac{100}{50} = 2$ แอมแปร์ ด้วย

ดังนั้น กระแสในสายส่งจะเท่ากับกระแสในโหลด

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานจากเครื่องกำเนิดที่จ่ายให้กับสายส่ง (} P_P \text{)} &= V_m \times I_m = 100 \times 2 \\ &= 200 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่ถูกดูดกลืนที่โหลด (} P_L \text{)} &= V_L \times I_L = 100 \times 2 \\ &= 200 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่ากำลังงานทั้งหมดที่เคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิด (แหล่งจ่ายกำลังงาน) ไปตามสายส่ง จะถูกดูดกลืนที่โหลดทั้งหมด โดยไม่มีกำลังงานสูญเสียในสายส่งเลย ซึ่งกรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อ $Z_L = Z_0$ เท่านั้น เราเรียกว่า "สายส่งแมตช์กับโหลด"

พิจารณาในกรณีที่ $Z_L \neq Z_0$ (Z_L มากกว่าหรือน้อยกว่า Z_0)

ในกรณีที่ Z_L มากกว่า Z_0

ถ้าเราต่อ โหลด (Z_L) 100 โอห์มที่เอาต์พุตของสายส่ง ดังนั้น แรงดัน 100 โวลต์ จะทำให้ กระแสไหลในโหลดได้เพียง 1 แอมแปร์เท่านั้น แต่เรามีกระแส 2 แอมแปร์ไหลในสายส่งจะทำ

ให้กำลังงานถูกดูดกลืนที่โหลดได้ไม่หมด แต่จะมีกำลังงานส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังสายส่งที่เราเรียกว่า "คลื่นสะท้อนกลับ" ดังนั้น ที่โหลดจะมีทั้งคลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังโหลดและคลื่นที่สะท้อนกลับมายังสายส่ง จึงทำให้มีค่าแรงดันรวมที่โหลดดังนี้คือ

$$V_L = V_F + V_R \quad \dots(5.12)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$I_L = I_F - I_R \quad \dots(5.13)$$

(เครื่องหมายลบแสดงว่ากระแสไหลสวนทางกัน)

ดังนั้น ที่โหลดเราจะได้

$$\frac{V_L}{I_L} = Z_L \quad \dots(5.14)$$

หรือ $V_F + V_R = Z_L (I_F - I_R) \quad \dots(5.15)$

$$I_F - I_R$$

หาค่าแรงดันสะท้อนกลับ (V_R)

จากสมการที่ 5.15 คือ

$$\frac{100 + V_R}{2 - I_R} = 100 \quad \dots(5.16)$$

$$2 - I_R$$

$$100 + V_R = 200 - 100 I_R \quad \dots(5.17)$$

แต่ $V_R = Z_0 \cdot I_R = 50 I_R$

$$= 50 I_R \quad \dots(5.18)$$

นำเอาค่า V_R ไปแทนในสมการที่ 5.17 จะได้

$$100 + 50 I_R = 200 - 100 I_R$$

$$150 I_R = 100$$

$$I_R = \frac{100}{150} = 0.667 \text{ แอมแปร์}$$

นำเอาค่า I_R ไปแทนในสมการที่ 5.17 จะได้

$$100 + V_R = 200 - (100 \times 0.667)$$

$$V_R = 100 - 66.7 = 33.33 \text{ โวลต์}$$

หรือ $V_R = 50 I_R$

$$= 50 \times 0.667 = 33.33 \text{ โวลต์}$$

นั่นคือ ผลลัพธ์ของแรงดันที่โหลด (V_L) = $V_F + V_R$

$$= 100 + 33.33 = 133.33 \text{ โวลต์}$$

และผลรวมของกระแสที่โหลด (I_L) = $I_F + I_R$

$$= 2 - 0.667 = 1.33 \text{ แอมแปร์}$$

ดังนั้น ที่โหลดตามกฎของโอห์ม จะได้

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{133.3}{1.333} = 100 \text{ โอห์ม}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่เคลื่อนที่ไปยังโหลด} \quad (P_F) &= V_F \times I_F \\ &= 100 \times 2 = 200 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่ถูกดูดกลืนที่โหลด} \quad (P_L) &= V_L \times I_L \\ &= 133.3 \times 1.333 = 177.78 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่สะท้อนกลับมายังสายส่ง} \quad (P_R) &= V_R \times I_R \\ &= 33.3 \times 0.667 = 22.22 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

จากการคำนวณในตัวอย่างที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าถ้าโหลด (Z_L) มีค่ามากกว่า Z_0 แล้ว แรงดันที่โหลดจะมากกว่าที่แหล่งจ่าย (หรือในสายส่ง) แต่กระแสที่โหลดจะน้อยกว่าที่แหล่งจ่าย (หรือในสายส่ง) ดังนั้น กำลังงานที่โหลดจึงน้อยกว่ากำลังงานที่แหล่งจ่าย

ในทางตรงกันข้าม ถ้าโหลด (Z_L) มีค่าน้อยกว่า Z_0 แรงดันที่โหลดจะน้อยกว่าที่แหล่งจ่าย แต่กระแสที่โหลดจะมากกว่าที่แหล่งจ่าย อย่างไรก็ตามกำลังงานที่โหลดก็ยังมีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่แหล่งจ่ายอยู่นั่นเอง

ตัวอย่างที่ 5.11 ในกรณีที่ Z_L น้อยกว่า Z_0 ($Z_L = 25 \Omega$, $Z_0 = 50 \Omega$)

วิธีทำ ที่โหลด

$$\begin{aligned} \frac{V_F + V_R}{I_F - I_R} &= Z_L \\ V_F + V_R &= Z_L (I_F - I_R) \end{aligned} \quad \dots\dots(5.19)$$

แทนค่าในสมการ 5.19 จะได้

$$\begin{aligned} 100 + 50 I_R &= 25 (2 - I_R) \\ 75 I_R &= -50 \\ I_R &= \frac{-50}{75} = 0.667 \text{ แอมแปร์} \\ V_R &= 50 \times (-0.667) \\ &= -33.33 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

แรงดันสะท้อนกลับ (V_R) เท่ากับ -33.33 โวลต์

ผลรวมของแรงดันที่โหลด (V_L)

$$\begin{aligned} V_L &= V_F + V_R \\ &= 100 + (-33.33) \end{aligned}$$

$$= 66.67 \text{ โวลต์}$$

และผลรวมของกระแสที่โหลด (I_L)

$$\begin{aligned} I_L &= I_F - I_R \\ &= 2 - (-0.667) \\ &= 2.667 \text{ แอมแปร์} \end{aligned}$$

ดังนั้น ที่โหลดตามกฎของโอห์ม จะได้

$$\begin{aligned} Z_L &= \frac{V_L}{I_L} \\ &= \frac{66.67}{2.667} = 25 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

กำลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังโหลด (P_F)

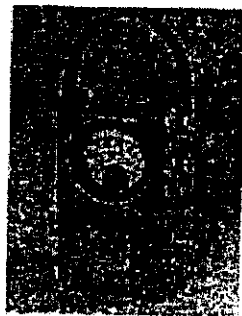
$$\begin{aligned} P_F &= V_F \times I_L \\ &= 100 \times 2 = 200 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่ถูกดูดกลืนที่โหลด (P}_L) &= V_L \times I_L \\ &= 66.67 \times 2.667 \\ &= 177.78 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่สะท้อนกลับมายังสายส่ง (P}_R) &= V_R \times I_R \\ &= (-33.33) \times (-0.667) \\ &= 22.22 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

สรุปได้ว่า ถ้าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_L) ไม่แมตช์กับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายส่ง (Z_0) แล้วไม่ว่า Z_L จะมากกว่าหรือน้อยกว่า Z_0 ก็ตาม จะทำให้กำลังงานถูกดูดกลืนที่โหลดไม่หมด และจะมีกำลังงานสะท้อนกลับมายังสายส่งคือ คลื่นสะท้อนกลับ นั้นเอง

ซึ่งในการวัดคลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังโหลดและคลื่นที่สะท้อนกลับที่สายส่งนั้น จะใช้เครื่องมือพิเศษที่เรียกว่า "Directional coupler" หรือ Thru-line wattmeter



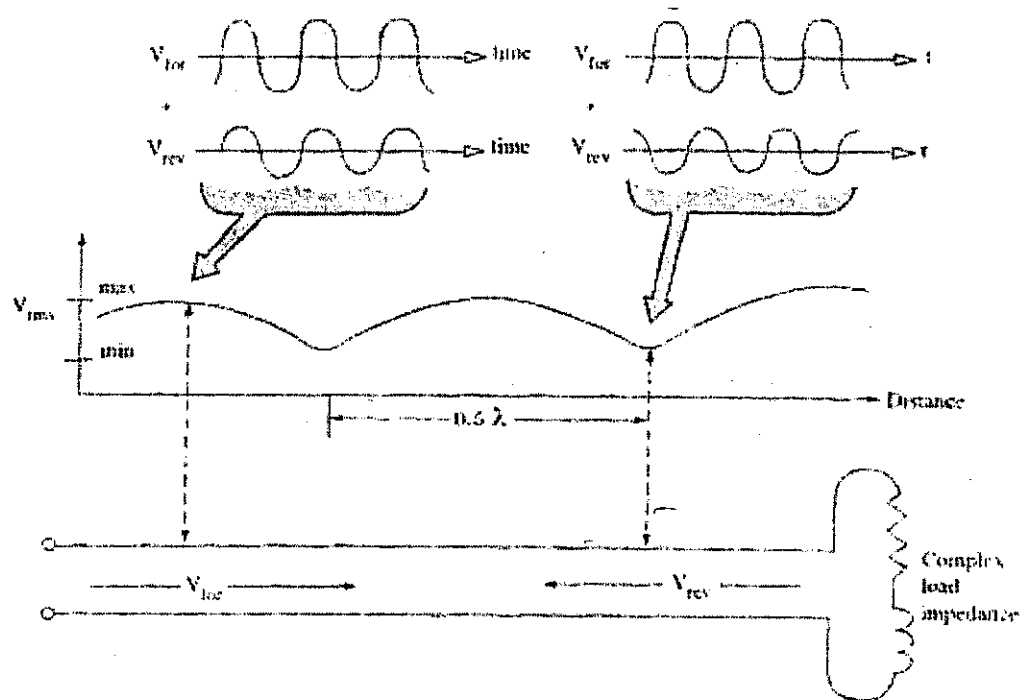
RF Wattmeter

5.10 คลื่นยืน (Standing wave)

ในสายส่งที่แมตช์กับโหลด จะมีเพียงคลื่นเดียวคือ คลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังโหลดหรือคลื่นตรง ดังเราได้เรียนรู้มาแล้วว่า ในสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย แอมพลิจูดของคลื่นตรงนี้มีค่าคงที่ตลอดทุก ๆ จุดบนสายส่ง และถ้าใช้มาตรวัดแรงดัน (Voltmeter) วัดที่ทุก ๆ จุดระหว่างสายส่ง จะอ่านค่าได้เท่ากันตลอด

ส่วนในสายส่งที่ไม่แมตช์กับโหลด จะมีอีกคลื่นหนึ่งเพิ่มเข้ามาคือ คลื่นสะท้อนกลับ (Reflected wave) ซึ่งคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดคงที่เช่นกัน ดังนั้น เราจึงมีสองคลื่นที่มีแอมพลิจูดคงที่เคลื่อนที่สวนทางกัน ที่จุดใด ๆ ตลอดความยาวของสายส่งจะมีแรงดันเท่ากับผลรวมแรงดันชั่วขณะของคลื่นตรงกับคลื่นที่สะท้อนกลับที่จุดนั้น ๆ

เนื่องจากคลื่นตรงกับคลื่นสะท้อนกลับเคลื่อนที่สวนทางกัน บางขณะคลื่นจะซ้อนกัน ดังนั้น ที่บางจุดคลื่นจะมีเฟสเสริมกัน (Inphase) ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นทั้งสองรวมกันมากขึ้น แต่บางขณะคลื่นจะต่างเฟสกัน (Out of phase) แอมพลิจูดของคลื่นจึงหักล้างกัน ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลง จึงทำให้เกิดผลลัพธ์เป็นคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงบ้างต่ำบ้างเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตลอดความยาวของสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงการเกิดคลื่นยืนบนสายส่ง

จุดใดที่ V_F กับ V_R มีเฟสเสริมกัน จะมีค่าแรงดันสูงสุด (Max) และจุดใดที่ V_F กับ V_R มีเฟสต่างกัน จะมีค่าแรงดันต่ำสุด (Min) ซึ่งลักษณะของแรงดันที่เกิดขึ้นบนสายส่งนี้เราเรียกว่า "คลื่นยืน"

ระยะระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดต่ำสุดถัดไป หรือระยะระหว่างจุดสูงสุดถึงจุดสูงสุดถัดไป เราเรียกว่า "ครึ่งความยาวคลื่น" (0.5λ)

ซึ่งอัตราส่วนของค่าแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นยืนในสายส่งเราเรียกว่า "อัตราส่วนแรงดันคลื่นยืน" (Voltage Standing Wave Ratio) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า "VSWR"

$$\text{VSWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad \dots\dots(5.20)$$

หรือ
$$\text{VSWR} = \frac{I + |\Gamma|}{I - |\Gamma|} \quad \dots\dots(5.21)$$

$$\text{VSWR} = \frac{Z_0}{Z_{\text{load}}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{Z_{\text{load}}}{Z_0} \quad (\text{แล้วแต่ว่าตัวใดค่ามากกว่า}) \quad \dots\dots(5.22)$$

ในสายส่งที่แมตซ์กับโหลด ($Z_0 = Z_L$) จะมีค่า VSWR เท่ากับ 1 เพราะไม่มีคลื่นยืนเกิดขึ้นในสายส่ง แต่ในสายส่งที่ไม่แมตซ์กับโหลด ($Z_0 \neq Z_L$) จะมีค่า VSWR มากกว่า 1

ถ้าโหลดยังมีค่าต่างจาก Z_0 มากเท่าไร คลื่นสะท้อนกลับจะใหญ่ขึ้น ทำให้ค่า VSWR มากขึ้นตามไปด้วย

ตัวอย่างที่ 5.12 สายส่งเส้นหนึ่งมีค่า Z_0 เท่ากับ 125 โอห์ม มีโหลด (Z_L) เท่ากับ 100 โอห์ม ต่ออยู่ที่เอาต์พุต แล้วป้อนแรงดันความถี่วิทยุที่มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ ให้แก่อินพุตของสายส่ง จงคำนวณค่า

- ก. กำลังงานที่เคลื่อนที่ในสายส่ง (Forward power)
- ข. แรงดันสะท้อนกลับ (Reverse voltage)
- ค. แรงดันที่โหลด (Load voltage)
- ง. กำลังงานที่โหลด (Load power)
- จ. กำลังงานที่สะท้อนกลับ (Reverse power)
- ฉ. VSWR

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{ก. กำลังงานที่เคลื่อนที่ในสายส่ง} &= \frac{V_E^2}{Z_0} \\ &= \frac{5^2}{125} = 200 \text{ mW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ} &= \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \\ &= \frac{100 - 125}{100 + 125} \end{aligned}$$

$$= -0.1111$$

(เครื่องหมายลบแสดงว่ามีเฟสต่างกัน 180°)

$$\begin{aligned} \text{ข. แรงดันสะท้อนกลับ} &= \Gamma \times \text{แรงดันคลื่นตรง} \\ &= -0.1111 \times 5.0 \\ &= -0.555 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

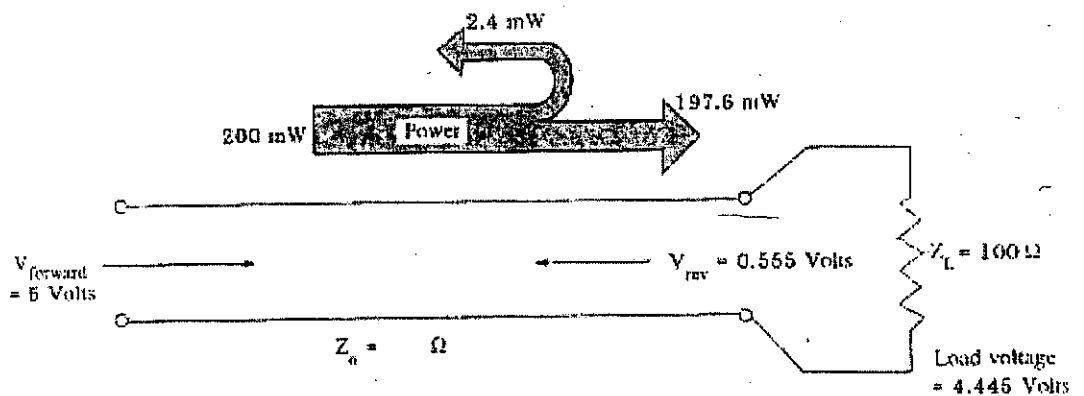
(เริ่มต้นมีเฟสต่างกับกับแรงดันคลื่นตรง)

$$\begin{aligned} \text{ค. แรงดันที่โหลด} &= \text{แรงดันคลื่นตรง} + \text{แรงดันสะท้อนกลับ} \\ &= 5.0 - 0.555 \\ &= 4.445 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ง. กำลังงานที่โหลด} &= \frac{(V_L)^2}{Z_L} \\ &= \frac{(4.445)^2}{100} = 197.6 \text{ เมกะวัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จ. กำลังงานสะท้อนกลับ} &= \frac{(V_R)^2}{Z_0} \\ &= \frac{(0.555)^2}{125} \\ &= 2.4 \text{ เมกะวัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉ. VSWR} &= \frac{Z_0}{Z_L} \\ &= \frac{125}{100} \\ &= 1.25 \end{aligned}$$



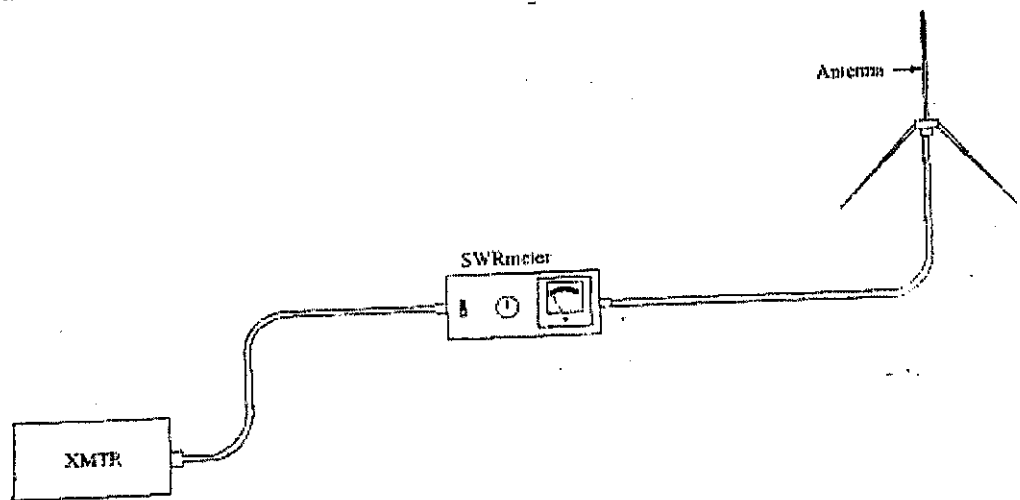
รูปที่ 5.15 แสดงผลของการคำนวณในตัวอย่างที่ผ่านมา

เราสามารถวัดกำลังงานของคลื่นวิทยุที่ส่งออกจากเครื่องส่งวิทยุผ่านสายส่งไปยังสายอากาศ (Forward RF power) และวัดค่ากำลังงานของคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับ (Reflected RF

power) โดยใช้เครื่องส่งกำลังงานคลื่นวิทยุ (Thru-line RF wattmeter) แล้วนำค่าทั้งสองมาคำนวณหาค่า VSWR ได้จากสูตรข้างล่างนี้

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{\text{Reflected power}}{\text{Forward power}}}}{1 - \sqrt{\frac{\text{Reflected power}}{\text{Forward power}}}} \quad \dots\dots(5.23)$$

ตัวอย่างที่ 5.13 การป้อนสัญญาณกำลังความถี่วิทยุจากเครื่องส่งวิทยุ ผ่านสายส่ง ไปยังสายอากาศ

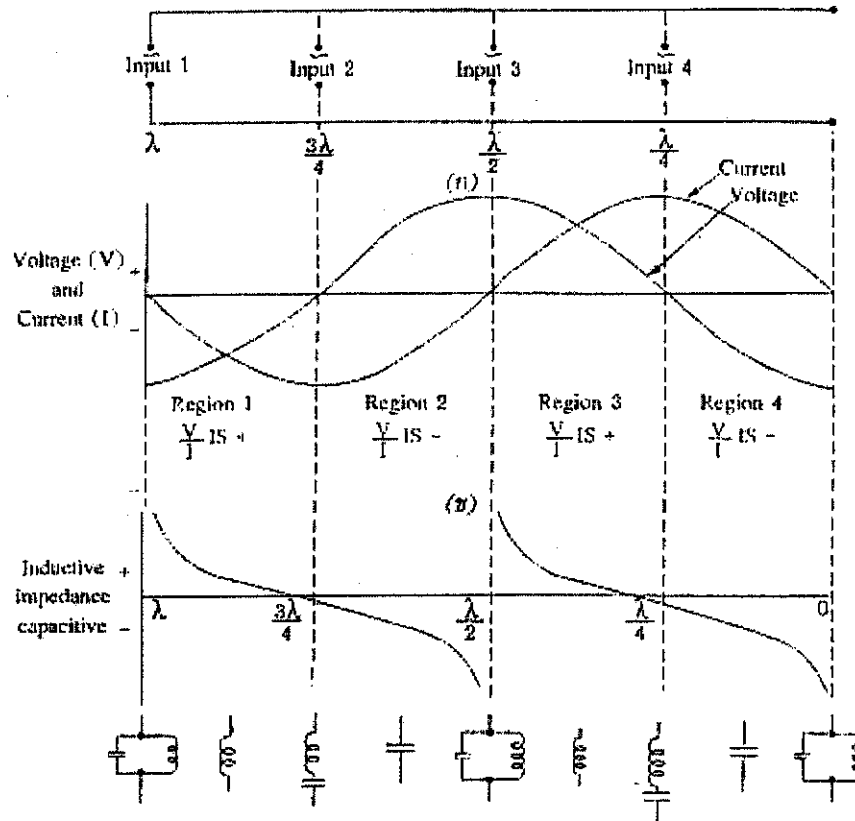


รูปที่ 5.16 แสดงการวัดค่า VSWR ของเครื่องส่งวิทยุ

5.11 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายส่งชนิดปลายเปิดและปลายปิด

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสของคลื่นขึ้นหรือคลื่นนิ่ง (Voltage and Current standing wave) ตามจุดต่าง ๆ บนสายส่ง ทั้งชนิดปลายเปิด (Open-end) และปลายปิด (Shorted-end) ที่จุดใด ๆ ที่มีแรงดันสูงสุด กระแสจะมีค่าต่ำสุด หรือที่จุดใด ๆ ที่มีกระแสสูงสุด แรงดันจะมีค่าต่ำสุด จึงทำให้แรงดันและกระแสมีเฟสต่างกัน 90° ดังนั้น จึงมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) บนสายส่งเปลี่ยนแปลงไปตลอดความยาวของสายส่งด้วย (เพราะว่า $Z = \frac{V}{I}$)

5.11.1 สายส่งชนิดปลายเปิด (Open-end)



รูปที่ 5.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า V, I และ Z บนสายส่งชนิดปลายเปิด

ที่อินพุต 1 V จะมีค่าสูงสุด และ I จะมีค่าต่ำสุด ดังรูปที่ 5.17 (ข) ทำให้อัตราส่วน $\frac{V}{I} = \infty$

ในทางปฏิบัติถือว่ามีค่าสูงมาก คล้ายกับเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance) ดังนั้น ที่อินพุต 1 จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ดังรูปที่ 5.17 (ค)

ที่อินพุต 2 อัตราส่วนของ $\frac{V}{I} = 0$ ดังนั้นที่จุดนี้อิมพีแดนซ์ (Z) จะมีค่าเท่ากับ 0 ในทาง

ปฏิบัติถือว่ามีค่าต่ำมาก คล้ายกับเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance) ดังรูปที่ 5.17 (ค)

ที่จุด $\frac{3\lambda}{4}$ ในขอบเขต (Region) ที่ 1 ซึ่งอยู่ระหว่างอินพุต 1 กับอินพุต 2 ทั้ง V และ I เป็นลบ ดังนั้น อัตราส่วนของ $\frac{V}{I}$ ก็จะเป็นบวก เปรียบเสมือนเป็นค่า XL ซึ่งจะมีค่ารีแอกแตนซ์เปลี่ยนแปลง อยู่ในขอบเขตที่ 1








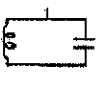
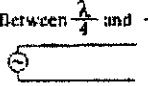


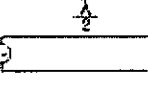
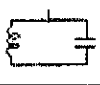

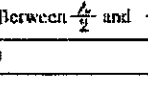


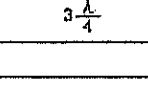

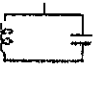
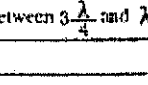


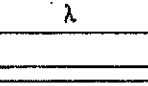


ลักษณะแรงดันและกระแสของคลื่นขึ้นที่เกิดขึ้นตามจุดต่าง ๆ ของสายส่งชนิดปลายปิดให้สังเกตที่ปลายของสายส่ง จะเห็นว่า V เท่ากับ 0 และ I จะมีค่าสูงสุด และจุดที่ห่างจากปลายของสายส่งเป็นระยะ $\frac{\lambda}{2}$ ก็จะมีค่า V เท่ากับ 0 และ I จะมีค่าสูงสุดเช่นกัน ที่จุดเหล่านี้อัตราส่วน $\frac{V}{I}$ เท่ากับ 0 ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ที่จุดเหล่านี้ก็จะเท่ากับ 0 เช่นกัน

ในทำนองเดียวกันที่ผลคูณเลขคี่ (1,3,5) ของ $\frac{\lambda}{4}$ จากปลายของสายส่งก็จะมีค่า V สูงสุด และ I ต่ำสุด ที่จุดปลายนี้อัตราส่วน $\frac{V}{I}$ จะเท่ากับ ∞ ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ที่จุดเหล่านี้จะเท่ากับ ∞ ด้วย

เราจะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ (Z) จะเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของสายส่งเช่นเดียวกับสายส่งชนิดปลายเปิด (แต่มีค่าตรงกันข้ามกับสายส่งชนิดปลายเปิด)

5.11.3 การเปรียบเทียบสายส่งชนิดปลายเปิดกับสายส่งชนิดปลายปิด

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายไฟฟ้าของสายส่งชนิดปลายเปิดและชนิดปลายปิดจะคล้าย ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5.19

Electrical length of line	Open-Circuited termination 	Short-Circuited termination 
Less than $\frac{\lambda}{4}$ 	Capacitive reactance 	Inductive reactance 
$\frac{\lambda}{4}$ 	Low impedance acceptor circuit 	High impedance rejector circuit 
Between $\frac{\lambda}{4}$ and $\frac{\lambda}{2}$ 	Inductive reactance 	Capacitive reactance 
$\frac{\lambda}{2}$ 	High impedance rejector circuit 	Low impedance acceptor circuit 
Between $\frac{\lambda}{2}$ and $\frac{3\lambda}{4}$ 	Capacitive reactance 	Inductive reactance 
$3\frac{\lambda}{4}$ 	Low impedance acceptor circuit 	High impedance rejector circuit 
Between $3\frac{\lambda}{4}$ and λ 	Inductive reactance 	Capacitive reactance 
λ 	High impedance rejector circuit 	Low impedance acceptor circuit 

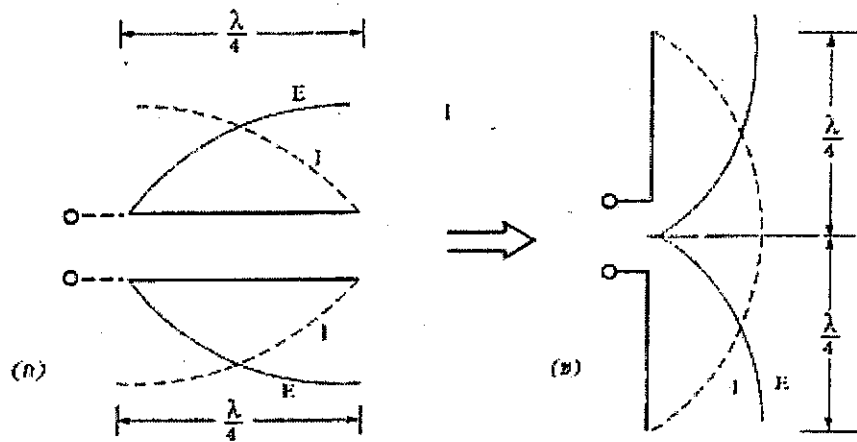
รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายส่งชนิดปลายเปิดและปลายปิด

5.12 ลักษณะการทำงานของสายอากาศ

สายอากาศทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานความถี่วิทยุจากเครื่องส่งวิทยุในรูปของคลื่นไฟฟ้า (กระแสและแรงดัน) ให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้แพร่กระจายออกไปในอวกาศ (สายอากาศส่ง) และในทำนองเดียวกัน สายอากาศก็จะเป็นตัวเปลี่ยนกำลังงานคลื่นวิทยุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่รับเข้ามาจากสายอากาศ ให้กลับมาเป็นคลื่นไฟฟ้า (กระแสและแรงดัน) ตามเดิม เพื่อส่งให้แก่เครื่องรับวิทยุต่อไป (สายอากาศรับ)

อย่างไรก็ตาม สายอากาศทางด้านเครื่องส่งวิทยุและทางด้านเครื่องรับวิทยุจะมีหลักการเหมือนกันทุกประการ ดังนั้น ในบทเรียนนี้ส่วนใหญ่จะกล่าวถึงระบบสายอากาศทางด้านเครื่องส่ง และให้ถือหลักว่าเมื่อทางด้านเครื่องส่งใช้สายอากาศแบบใด ทางด้านเครื่องรับก็จะใช้สายอากาศแบบเดียวกัน

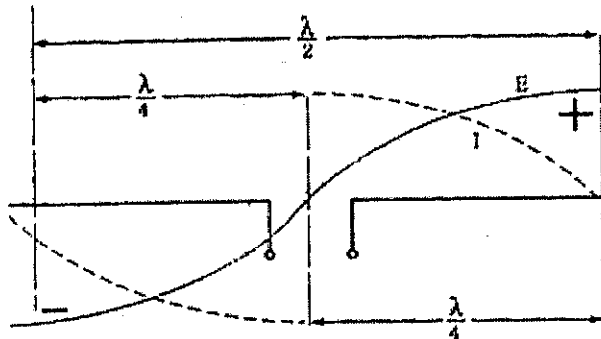
จากการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของกระแสและแรงดันในเรื่องของสายส่งมาแล้วนั้น ถ้าเราตัดสายคู่ขนานของสายส่งชนิดปลายเปิด เฉพาะส่วนท้ายสุด (คือนับจากปลายที่เปิด) ซึ่งมีความยาว $\frac{\lambda}{2}$ ออกมาพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 แสดงหลักการทำงานของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

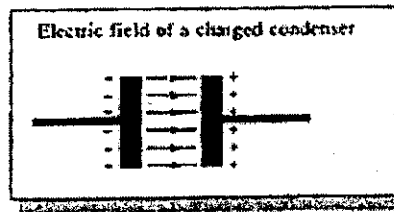
ถ้าเรานำสายคู่ขนานทั้งสองเส้น ดังรูปที่ 5.20 (ก) แยกออกจากกัน ให้ทั้งสองเส้นวางอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ดังรูปที่ 6.20(ข) จะเห็นได้ว่าความยาวของสายทั้งสองรวมกัน $\frac{\lambda}{2}$ เท่ากับเราก็จะได้สายอากาศแบบง่ายที่เรียกว่า “สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น” (Half-wave dipole) หรือบางครั้งอาจเรียกว่า “สายอากาศดับเบิ้ลท (Doublet) หรือสายอากาศเฮิร์ตซ์ (Hertz) ซึ่งค่าแรงดันและกระแสบนสายอากาศนั้นก็เหมือนกับการส่งเดิม

เมื่อเราป้อนสัญญาณความถี่วิทยุเข้าตรงจุดกึ่งกลางระหว่างสายทั้งสองแล้ว จะสังเกตเห็นว่าจะมีแรงดันสูงสุด ณ ที่ปลายทั้งสองข้าง และมีเฟสต่างกัน ส่วนที่จุดกึ่งกลางของสายนั้นจะมีแรงดันต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 5.21

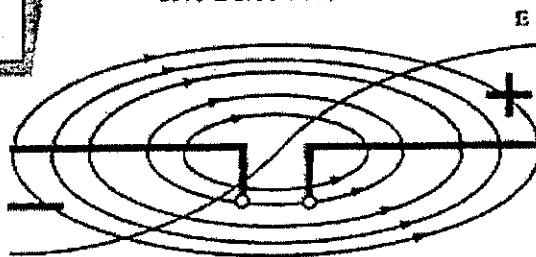


รูปที่ 5.21 แสดงแรงดันและกระแสบนสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

ตามที่ได้เรียนมาจากวิชาไฟฟ้าเบื้องต้นแล้วว่า “ถ้ามีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดเมื่อใด ก็จะมีสนามไฟฟ้า (Electric field) เกิดขึ้นระหว่างจุดสองจุดนั้น” ตัวอย่างเช่น ในคาปาซิเตอร์ เมื่อถูกประจุ (Charge) แผ่นเพลตแผ่นหนึ่งเป็นบวก และอีกแผ่นหนึ่งจะต้องเป็นลบจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น โดยมีทิศทางจากลบไปบวก ทำนองเดียวกัน ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างลวดสองเส้นของสายอากาศเส้นหนึ่ง ย่อมมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย โดยมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 5.22



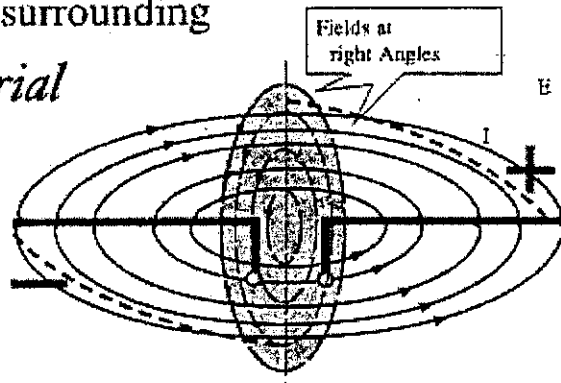
Electric field surrounding an Aerial



รูปที่ 6.22 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ สายอากาศ

นอกจากสนามไฟฟ้าแล้ว ยังมีสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้าสายอากาศอีกด้วย ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าสายอากาศ ดังนั้น จึงตั้งฉากกับสายอากาศ ด้วยเหตุนี้เองสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่างตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.23

Magnetic field surrounding an Aerial

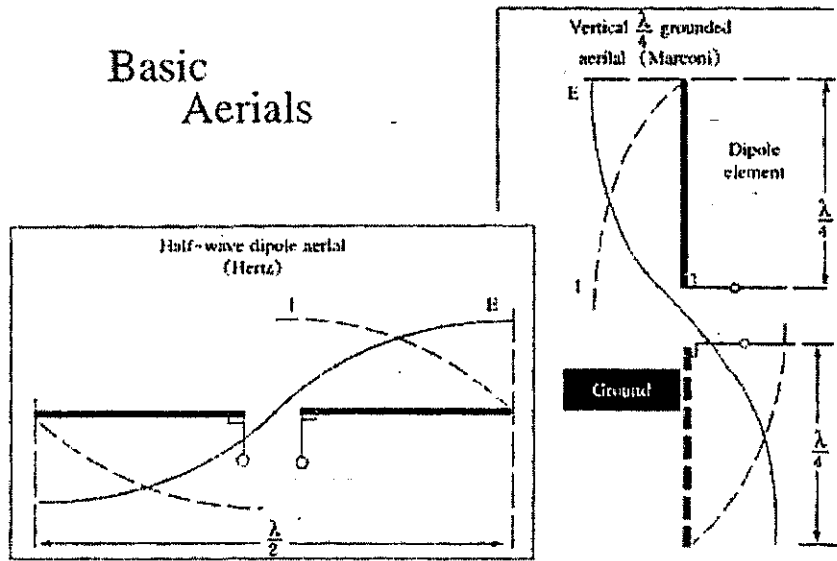


รูปที่ 5.23 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบ ๆ สายอากาศ

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งสองนี้ จะสลับไปมารอบๆสายอากาศ กล่าวคือจะก่อตัวทวีขึ้นถึงค่ายอด (Peak) แล้วยุบสลายตัว และก่อตัวขึ้นอีกครั้งหนึ่งในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความถี่เดียวกันกับกระแสสายอากาศ ซึ่งกรรมวิธีการก่อตัวขึ้นและยุบตัวลง ทำให้บางส่วนของสนามเหล่านี้หลุดพ้นออกไปจากสายอากาศ และกลายเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปสู่อวกาศ และเป็นตัวที่นำข่าวสารจากสถานีส่งไปยังสถานีรับที่อยู่ห่างไกลได้

สายอากาศพื้นฐานอีกแบบหนึ่งคือ สายอากาศแบบมาร์โคนี (Marconi) เป็นสายอากาศที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$ ที่วางในแนวตั้งฉากกับพื้นดิน โดยมีปลายอีกข้างหนึ่งถูกต่อลงดิน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (เฮิร์ตซ์) วางในแนวตั้ง ทั้งนี้ก็เพราะว่าดินทำหน้าที่เสมือนกับกระจกเงา เสมือนกับว่าความยาวของสายอากาศทั้งหมดเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ แรงดันและกระแสบนสายอากาศจะมีลักษณะเช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 5.24

Basic Aerials

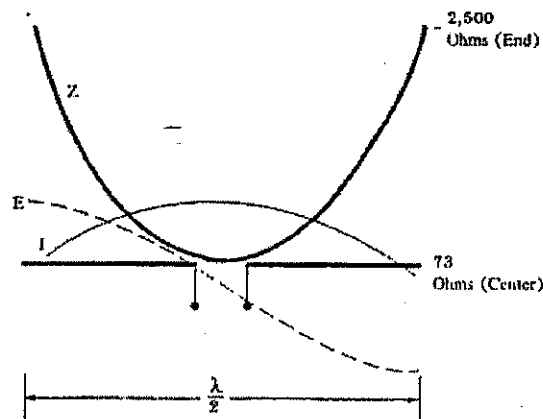


รูปที่ 5.24 แสดงสายอากาศพื้นฐานแบบมาร์โคนี

สายอากาศแบบมาร์โคนีนี้จะทำงานได้ดี ก็ต่อเมื่อเป็นตัวนำทางไฟฟ้าที่ดี ถ้าหากติดตั้งสายอากาศในแนวตั้งบนพื้นดินที่มีคุณสมบัติความเป็นตัวนำที่ไม่ดีแล้ว เราจะต้องใช้สายดินช่วย หรือกราวด์พิเศษที่เรียกว่า "Counterpoise earth" ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

5.13 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Antenna impedance)

เนื่องจากแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆบนสายอากาศใดโพลครั้งกลืนมีค่าแตกต่างกันก็จะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ทุกๆจุดบนสายอากาศเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจะมีค่าต่างกันไปตลอดความยาวของสายอากาศคือ ตรงจุดกึ่งกลางจะมีค่าต่ำสุดประมาณ 73 โอห์ม และที่ปลายจะมีค่าสูงสุดประมาณ 2500 โอห์ม ส่วนตรงจุดกึ่งกลางระหว่างต่ำสุดกับสูงสุดจะมีค่าประมาณ 500-600 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 5.25



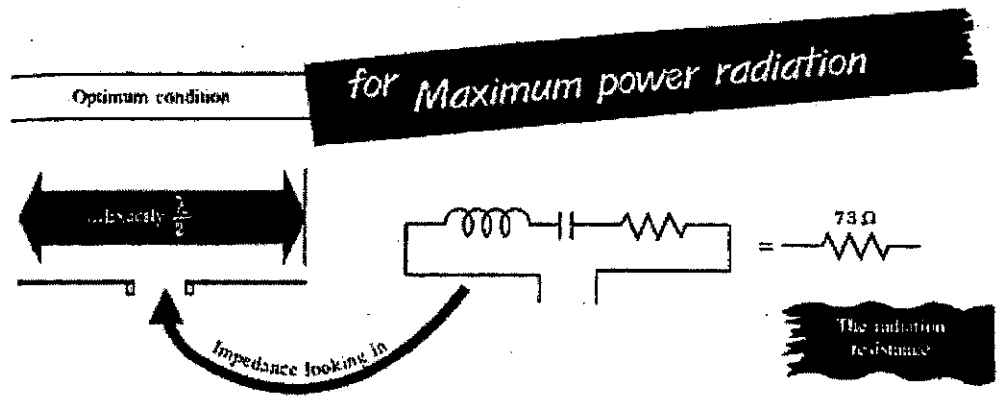
รูปที่ 5.25 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ตามจุดต่างๆของสายอากาศใดโพลครั้งกลืน

ดังนั้น ในการเลือกต่อสายส่งหรือสายพีดเคอร์เข้ากับสายอากาศจะกระทำให้ทุกๆจุดที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันหรือเมตรกันได้

เมื่อเราป้อนกำลังความถี่วิทยุให้แก่สายอากาศใดโพลครั้งคลื่น ณ จุดกึ่งกลางของสายอากาศนั้น สายอากาศจะเป็นเสมือน โหลดของเครื่องส่ง ซึ่งโหลดที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเป็นความต้านทานอย่างเดียว หรือความต้านทานต่ออนุกรมกับคาปาซิแตนซ์ หรือความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักแตนซ์ อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ โดยมีข้อแม้ดังต่อไปนี้

1. ถ้าเราตัดสายอากาศนั้นให้มีความยาวเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ ของความถี่ที่ใช้งานอย่างแท้จริงแล้วเรา

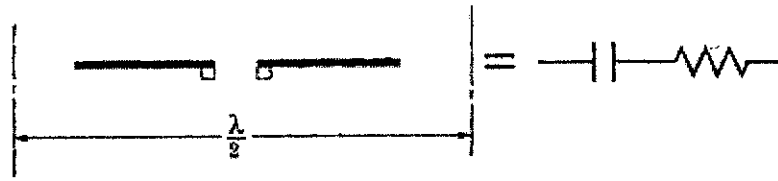
เรียกลักษณะนี้ว่า “สายอากาศแบบเรโซแนนซ์” (Resonant antenna) ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นความต้านทานอย่างเดียว (สายอากาศใดโพลครั้งคลื่นที่มีลักษณะคล้ายกับเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม) โดยจะมีค่าประมาณ 73 โอห์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความต้านทานแพร่กระจายคลื่น (Radiation resistance) ดังแสดงในรูปที่ 5.26



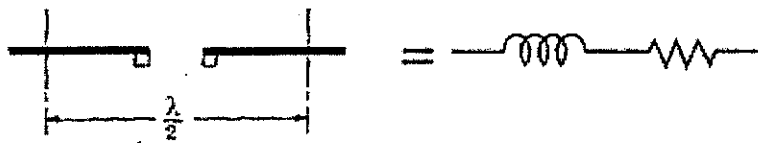
รูปที่ 6.26 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดโพลครั้งคลื่น

2. ถ้าเราตัดสายอากาศให้มีความยาวสั้นกว่า $\frac{\lambda}{2}$ หรือยาวกว่า $\frac{\lambda}{2}$ แต่ไม่เกิน $1 \frac{\lambda}{2}$ โหลดจะมีคุณสมบัติเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับคาปาซิแตนซ์ หรือถ้าตัดสายอากาศให้มีความยาวมากกว่า $\frac{\lambda}{2}$ แต่ไม่เกิน λ โหลดจะมีคุณสมบัติเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักแตนซ์

Dipole SHORTER than $\frac{\lambda}{2}$ appears CAPACITIVE

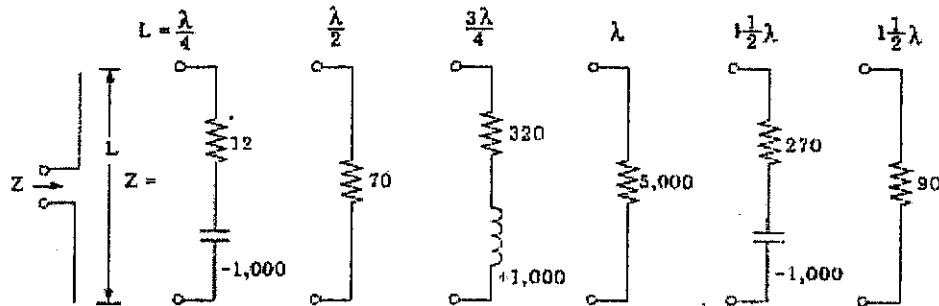


Dipole LONGER than $\frac{\lambda}{2}$ appears INDUCTIVE



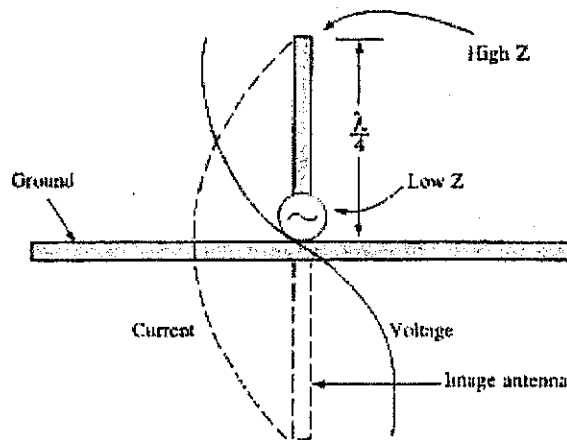
รูปที่ 5.27 แสดงความยาวของสายอากาศไดโพลที่สั้นกว่าและยาวกว่า

เนื่องจากโพลได้เป็นความต้านทานอย่างแท้จริง ดังนั้น เราจึงเรียกโพลนี้ว่า “อิมพีแดนซ์สายอากาศ” (Antenna impedance) และสายอากาศชนิดนี้เรียกว่า “สายอากาศแบบไม่เรโซแนนซ์” (Non-resonant antenna)



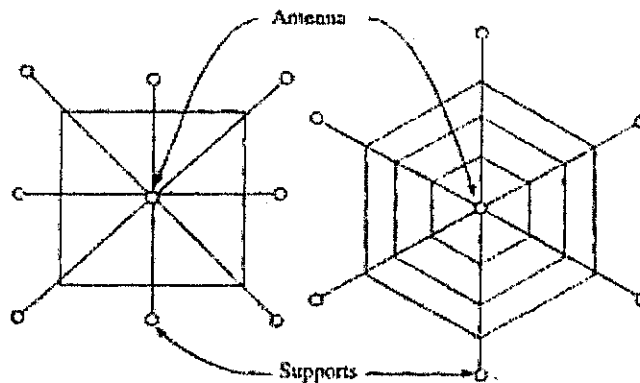
รูปที่ 5.28 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีความยาวขนาดต่าง ๆ กัน

ส่วนสายอากาศแนวตั้ง (มาร์โคนี) ที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$ ที่วางอยู่บนพื้นดินที่มีความนำที่สมบูรณ์ จะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณ 36.6 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 แสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแนวตั้งที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$

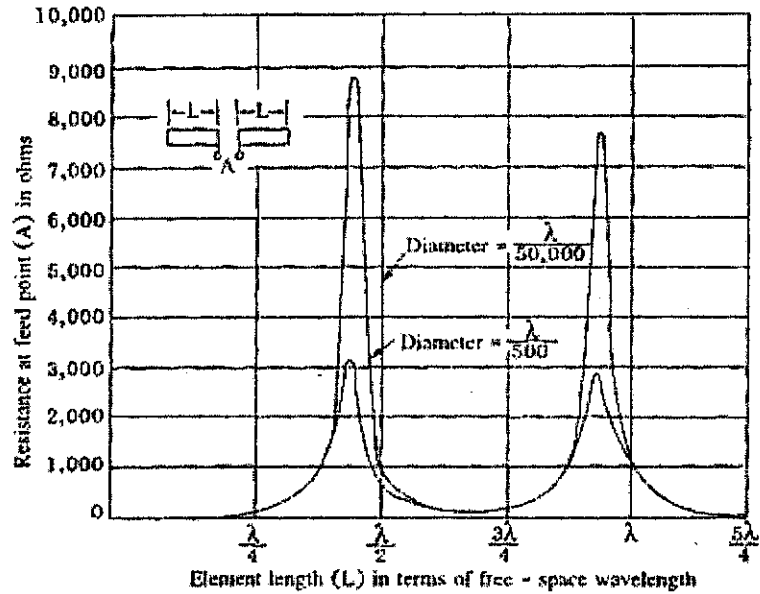
ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแนวตั้งที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$ นั้น จะขึ้นอยู่กับค่าความนำ (Conductivity) หรืออิมพีแดนซ์ของพื้นดินด้วย กล่าวคือ ความต้านทานของพื้นดินควรจะมีค่าต่ำ สายอากาศนี้จึงจะมีประสิทธิภาพสูง แต่ถ้าบริเวณที่ติดตั้งสายอากาศ พื้นดินแห้งหรือเป็นทราย จำเป็นจะต้องใช้สายดินหรือกราวด์ที่เสริมช่วยที่เรียกว่า "Counterpoise earth" ดังแสดงในรูปที่ 6.30



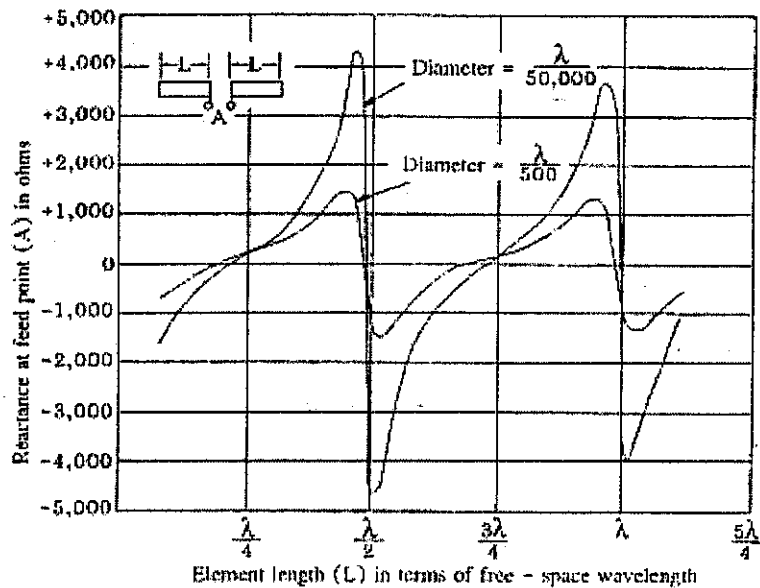
รูปที่ 5.30 แสดง Counterpoise earth

Counterpoise นี้ ประกอบด้วยลวดเส้นเดียว หรือหลายๆเส้นที่ หรือหลายๆ เส้นที่มีความยาวเท่ากับสายอากาศหรือมากกว่า มาทำหน้าที่แทนพื้นที่ดินจริงๆ ลวดนี้อาจถูกขึงไปภายใต้ สายอากาศโดยให้สูงจากพื้นดินประมาณ 8 ~ 12 ฟุต ที่มีฉนวนกันเพื่อไม่ให้ต่อลงดินจริงๆ

นอกจากนี้แล้วค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับความโต (เส้นผ่านศูนย์กลาง) ของ
 ตัวนำที่ใช้เป็นสายอากาศด้วย เพราะว่าขนาดความโตของตัวนำที่แตกต่างกันก็จะให้ค่าความ
 ต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.31



(ก) ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายอากาศ



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายอากาศ

(ค)

รูปที่ 5.31 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่ขนาดต่าง ๆ กัน

ดังนั้น ถ้าหากความโตของตัวนำที่ใช้เป็นสายอากาศมีค่ามาก จะทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์มาก หรือความโตของตัวนำมีค่าน้อย จะทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์น้อย ด้วยเหตุนี้เองตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiator) หรือตัวสายอากาศที่มีความ โตมาก ก็จะมีขนาดสั้นกว่าสายอากาศที่มีความ โตของตัวนำที่ เล็กกว่า

ตัวอย่างที่ 5.14 จงคำนวณค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้ตัวนำเส้นเล็กที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{\lambda}{50,000}$ โดยป้อนกำลังความถี่วิทยุเข้าที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศที่ ใช้งานในลักษณะนี้จะไม่เกิดการเรโซแนนซ์ ดังนั้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีทั้ง ความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์รวมกันจากรูปที่ 6.31 (ก) และ (ข) จุด $\frac{5\lambda}{8}$ ระหว่าง $\frac{\lambda}{2}$ กับ $\frac{3\lambda}{4}$ จะมีค่าความต้านทาน (R) เท่ากับ 150 โอห์ม และค่ารีแอค แแตนซ์ (X) เท่ากับ -1100 โอห์ม ดังนั้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่จุด $\frac{5\lambda}{8}$

จะมีค่าดังนี้

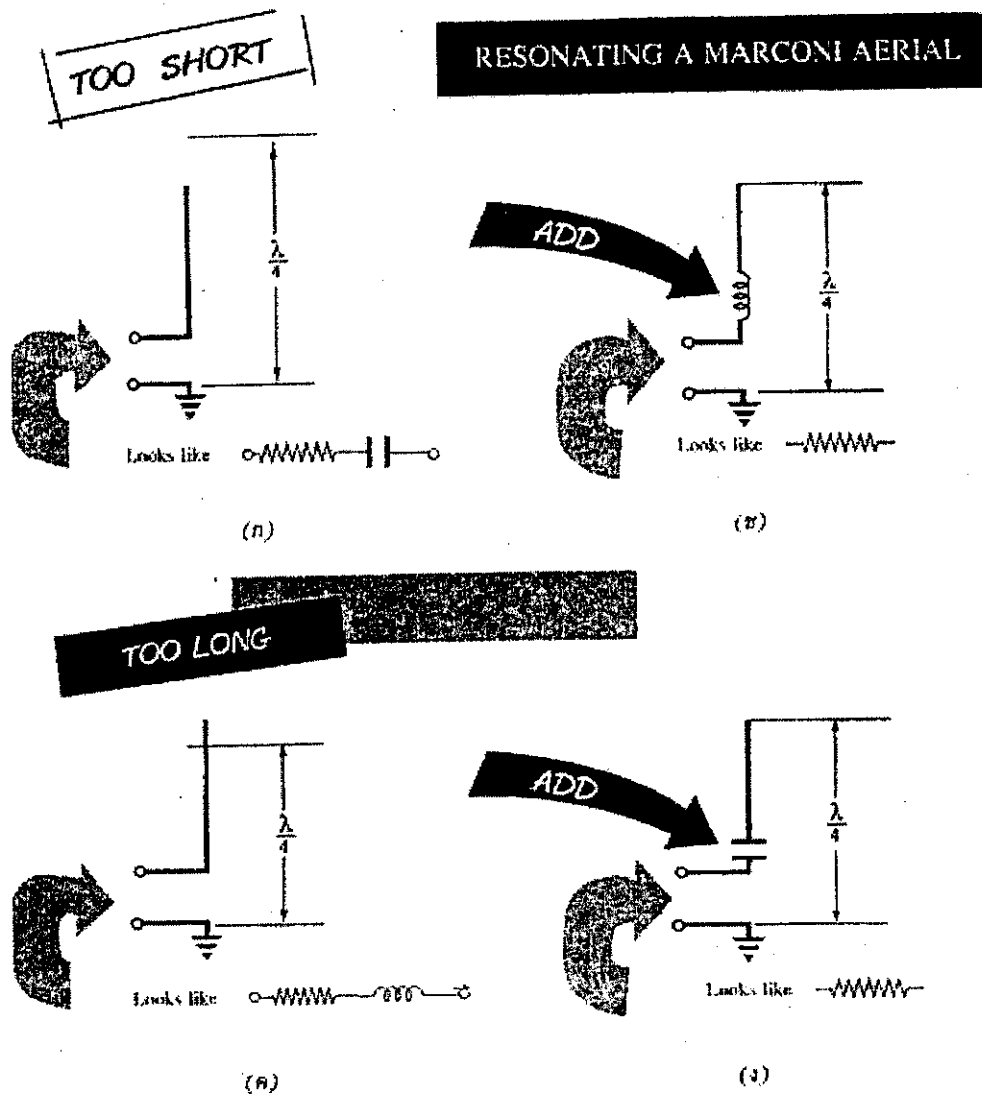
$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X^2} \\ &= \sqrt{(150)^2 + (-1100)^2} \\ &= 1,110 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

ดังนั้น สายพีด (Feed line) ที่จะต่อเข้ากับจุดกึ่งกลางของสายอากาศที่มีความยาว จะต้อง ออกแบบให้มีค่ารีแอคแตนซ์เท่ากับ +1100 โอห์ม และความต้านทานเท่ากับ 150 โอห์ม จึง จะทำให้การส่งถ่ายกำลังงานสูงสุดไปยังสายอากาศได้

5.14 การปรับความยาวของสายอากาศ (Tuning the aerial)

เราจะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนความถี่ของเครื่องส่ง ไป ก็จะทำให้ความยาวทางไฟฟ้า สายอากาศและอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากเราต้องการให้อิม พุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นความต้านทานอย่างเดียวกวๆขนาดความถี่จิงเครื่องส่งที่ เปลี่ยนไป เพื่อให้ได้กำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นออกไปมีค่าสูงสุด เราจะต้องจัดให้สายอากาศเข้า สภาวะเรโซแนนซ์ให้ได้ โดยการเพิ่มอินดักแตนซ์หรือคาปาซิแตนซ์เข้าไป เพื่อให้มีผลเสมือนว่า ความยาวของทางไฟฟ้าของสายอากาศเพิ่มขนาดขึ้นหรือลดขนาดลงได้ ซึ่งวงจรปรับความยาวทาง ไฟฟ้าของสายอากาศที่ใช้งานกัน ได้แก่ A.T.U (Antenna Tuning Unit) หรือบางครั้งอาจเรียกว่า "Matching unit" ก็ได้

ตัวอย่างที่ 6.15 สายอากาศแนวตั้งแบบมาร์โคนีที่มีความยาว λ



รูปที่ 5.32 แสดงการเพิ่มและลดความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศแนวตั้งแบบมาร์โคนี

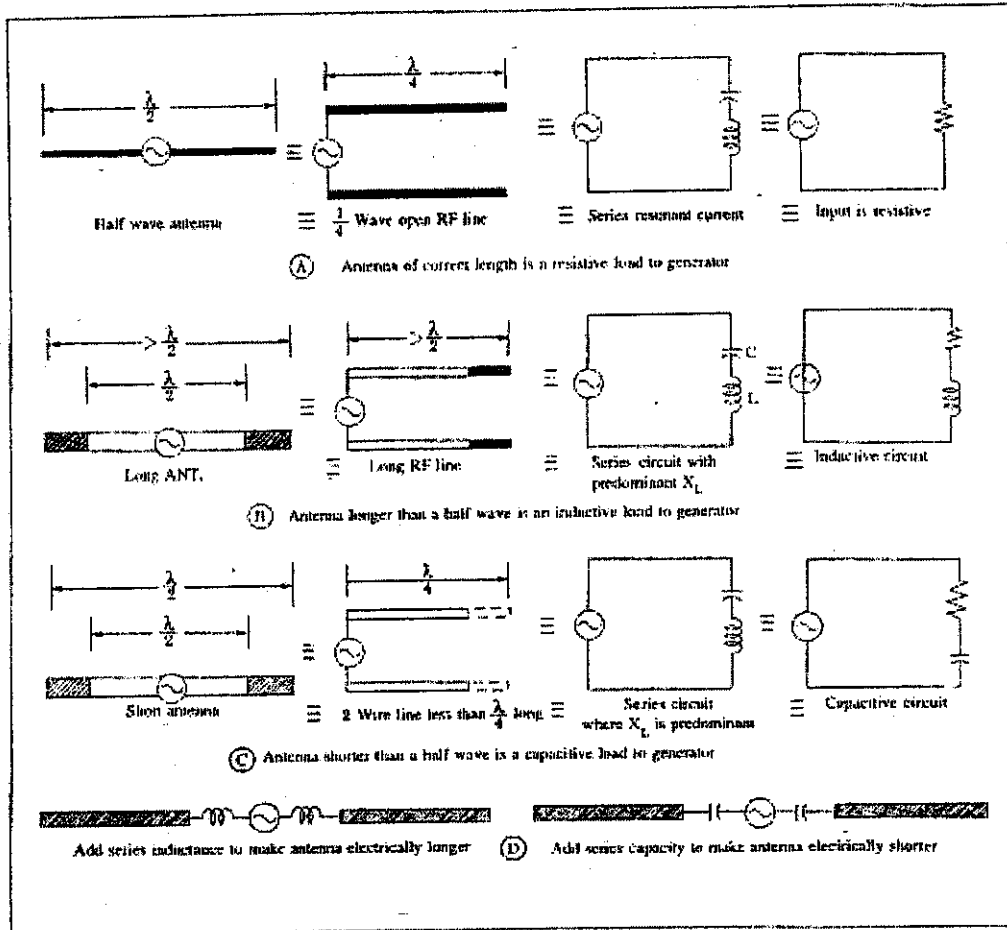
ถ้าความยาวสั้นกว่า $\frac{\lambda}{4}$ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีทั้งความต้านทานและคาปาซิแตนซ์ต่ออนุกรมกัน และจะทำให้มีความยาวถูกต้องได้ โดยการเพิ่มค่าอินดักแตนซ์เข้าไป เพื่อให้ไปหักล้างกับค่าคาปาซิแตนซ์ ก็จะทำให้สายอากาศเข้าสภาวะเรโซแนนซ์ จึงทำให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นความต้านทานอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.32 (ข)

และถ้าความยาวยาวกว่า $\frac{\lambda}{4}$ อินพุตอิมพีแดนซ์จะมีทั้งความต้านทานและอินดักแตนซ์ต่ออนุกรมกัน และจะทำให้มีความยาวที่ถูกต้องได้ โดยการเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์เข้าไปเพื่อให้หักล้างกับค่าอินดักแตนซ์ ก็จะทำให้สายอากาศเข้าสภาวะเรโซแนนซ์ได้ จึงทำให้ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นความต้านทานอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.32 (ง)

ตัวอย่างที่ 5.16 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโคโพลคริ่งคลื่น ที่มีความยาวสั้นกว่าและยาวกว่า $\frac{\lambda}{2}$

2

พอสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 แสดงความยาวและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโคโพลคริ่งคลื่น

5.15 ระบบการป้อนพลังงานคลื่นวิทยุให้แก่สายอากาศโคโพลคริ่งคลื่น

ในการป้อนพลังงานคลื่นวิทยุจากเสาอากาศของเครื่องส่งไปยังสายอากาศนั้น จะต้องจัดให้มีการแมตซิ่ง (Matching) กันให้ถูกต้อง มิฉะนั้นแล้วจะทำให้มีการสูญเสีย (Loss) เกิดขึ้นภายในสายส่ง ซึ่งในการจัดระบบนั้นสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ

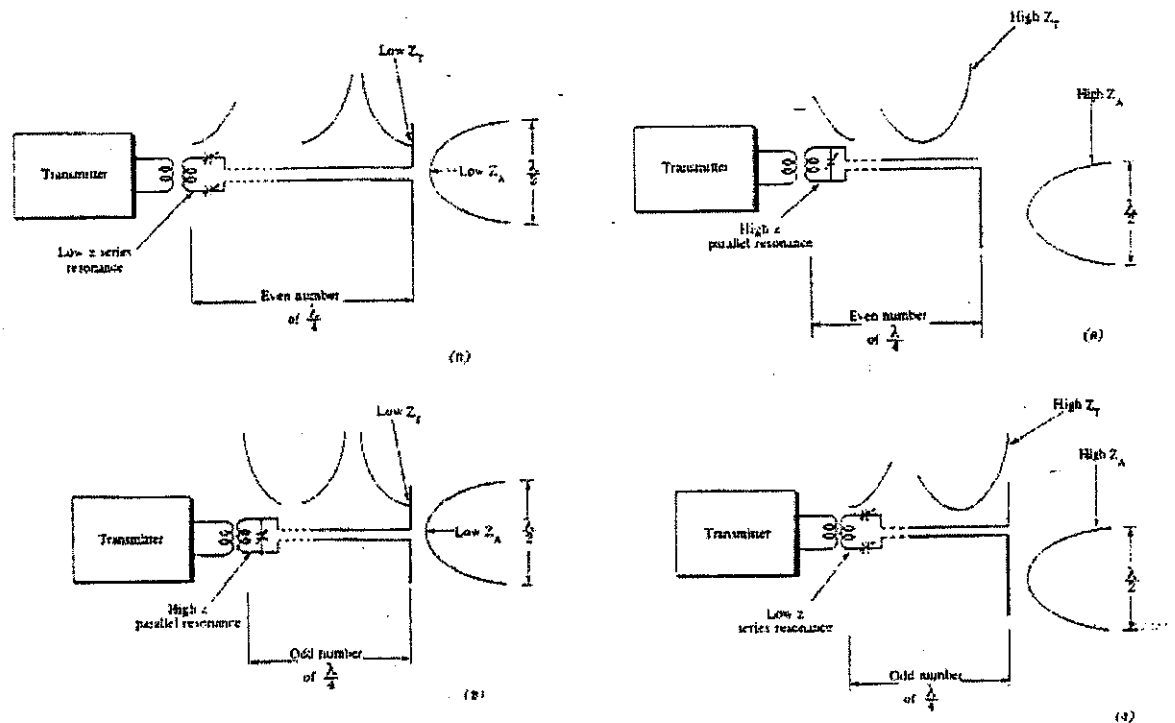
1. โดยผ่านสายส่งชนิดเรโซแนนซ์ (Resonant Line) ไปยังสายอากาศ สายส่งชนิดเรโซแนนซ์หรือจูนลายน์ (Tuned line) คือสายส่งที่ต่อเข้ากับสายอากาศโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านการแมตซิ่ง (Impedance matching) ระหว่างปลายสายส่งกับสายอากาศ นั่นคือสายส่งแบบนี้ จะต้องมิกคลื่นขึ้นปรากฏอยู่บนสายส่งเสมอ
2. โดยผ่านสายส่งชนิดไม่เรโซแนนซ์ (Non-resonant line) ไปยังสายอากาศ สายส่งชนิดไม่เรโซแนนซ์หรืออันจูนลายน์ (Untuned line) คือสายส่งที่ต่อเข้ากับสายอากาศโดย

ผ่านการแมตซึ่งระหว่างจุดต่อของสายส่งกับสายอากาศ สายส่งแบบนี้ถือว่าไม่มีคลื่นย้อนปรากฏบนสาย(หรือมีค่า VSWR เท่ากับ 1 นั้นเอง)

5.15.1 การจัดระบบโดยใช้สายส่งชนิดเรโซแนนซ์หรือจูนลายน์

การป้อนพลังงานความถี่วิทยุให้แก่สายอากาศโคโพละคริ่งคลื่น จะกระทำได้โดยการป้อนเข้าจุดกึ่งกลางของสายอากาศ และปลายสายอากาศเท่านั้น โดยไม่ต้องคำนึงว่าค่า Z_0 ของสายส่งจะเป็นเท่าใด แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดในระบบการป้อนแบบนี้ก็คือ จะต้องตัดสายส่งให้มีควายาวถูกต้องตรงจุดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งานพอดีเท่านั้นเอง

ลักษณะการจัดระบบโดยใช้สายส่งชนิดเรโซแนนซ์หรือจูนลายน์นั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ให้พิจารณาจากคุณลักษณะของสายส่งเรโซแนนซ์แบบปลายปิด)



รูปที่ 5.34 แสดงการจัดระบบการป้อนพลังงานคลื่นวิทยุให้แก่สายอากาศโดยผ่านจูนลายน์

ในรูปที่ 5.34 (ก) และ (ข) เป็นการต่อสายส่งเข้าตรงจุดกึ่งกลางของสายอากาศ ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า "Current fed" ก็ได้ ซึ่งการวัดวงจรแบบนี้จะต้องตัดความยาวของสายส่งเป็นจำนวนคู่ (Even number) ของ $\frac{\lambda}{4}$ (นับจากจุดที่ป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศมาถึงจุดต่อกับวงจรเอาต์พุตของเครื่องส่ง) ซึ่งจุดต่างๆ เหล่านี้ จะตรงกับจุดที่สายส่งแสดงตัวเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมพอดี ดังนั้น ปลายสายส่งที่ป้อนพลังงานคลื่นวิทยุเข้า จะต้องต่อเข้ากับวงจรจูนแบบอนุกรม (ที่เอาต์พุตของเครื่องส่งจะต้องเป็นวงจรจูนแบบอนุกรม)

แต่ถ้าตัดสายส่งให้มีความยาวเป็นจำนวนคี่ (Odd number) ของ $\frac{\lambda}{4}$ (นับจากจุดที่ป้อน

สัญญาณให้แก่สายอากาศมาถึงจุดต่อกับวงจรเอาต์พุตของเครื่องส่ง) ซึ่งจุดต่างๆเหล่านั้นจะตรงกับจุดที่สายส่งแสดงตัวเป็นเรโซแนนซ์แบบขนาน ดังนั้น ปลายสายส่งที่ป้อนพลังงานเข้า จะต้องต่อเข้ากับวงจรอนุแบบขนาน (ที่เอาต์พุตของเครื่องส่งจะต้องเป็นวงจรอนุแบบขนาน)

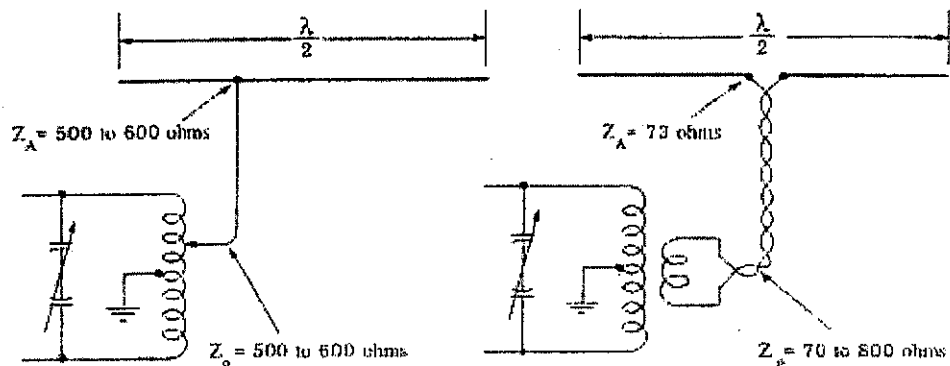
ส่วนในรูปที่ รูปที่ 5.34 (ค) และ (ง) นั้น เป็นการต่อสายส่งเข้าตรงปลายสายอากาศซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า "Zepp-fed" ก็ได้ ซึ่งการจัดวงจรแบบนี้ต้องตัดความยาวของสายส่งให้ถูกต้องตรงความยาวคลื่น (λ) ที่แสดงตัวเป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่เหมือนกับวงจรเอาต์พุตของเครื่องส่ง เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในรูปที่ 5.34 (ก) และ (ข)

ในการจัดระบบพีคเคอร์แบบ Zepp-fed นี้ มีข้อเสียมากคือ จะทำให้เกิดการสูญเสียแพร่กระจายคลื่นมากกว่าแบบ Center-fed เนื่องจากสายส่งเสียสภาพการสมดุล เพราะสายอากาศต่อกับสายส่งด้านเดียว จึงทำให้สายส่งแต่ละเส้นถูกโหลดไม่เท่ากัน

5.15.2 การจัดระบบโดยใช้สายส่งชนิดไม่เรโซแนนซ์หรืออันจูนลายน์

ในการที่จะทำให้สายส่งมีสภาพเป็นแบบไม่เรโซแนนซ์นั้น จะต้องต่อปลายสายส่งกับสายอากาศให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันหรือจะต้องต่อปลายสายส่งกับสายอากาศโดยผ่านอุปกรณ์อิมพีแดนซ์แมตซิง (Impedance matching device) เสียก่อน

ตัวอย่างเช่น การป้อนพลังงานคลื่นวิทยุให้แก่สายอากาศใช้สายส่งชนิดสายเดี่ยว (Single-wire feed) และสายส่งตีเกลียวคู่ (Twisted-pair feed) ซึ่งเป็นกรต่อปลายสายส่งให้เกิดการแมตซิงกันได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์การแมตซิง ดังแสดงในรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 แสดงการป้อนพลังงานคลื่นวิทยุให้แก่สายอากาศโดยใช้สายส่งชนิดสายเดี่ยวและตีเกลียวคู่

ในรูปที่ 5.35 (ก) กระทำได้โดยการเลือกจุดต่อของสายส่งกับอากาศให้ตรงจุดที่สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ (Z_A) เท่ากับ Z_0 ของสายส่ง

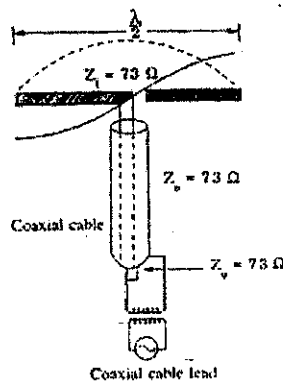
เนื่องจากสายส่งมีค่า Z_0 ประมาณ 500 ~ 600 โอห์ม แต่ Z_A ของสายอากาศตามจุดต่างๆ โดยคิดจากจุดกึ่งกลางถึงปลายสายอากาศ จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 73~2,500 โอห์ม ดังนั้น ถ้าเลือกจุดต่อที่มี ค่า Z_A เท่ากับ Z_0 ของสายส่งได้ถูกต้อง คือให้ตรงกับ Z_A ที่มีค่าประมาณ 500 ~ 600 โอห์ม (ประมาณ $\frac{\lambda}{8}$ นับจากปลายสายอากาศ) ซึ่งการป้อนสัญญาณแบบนี้เรียกว่า “Off center feed” ซึ่งจะต้องดึงสายส่งให้ตั้งได้ฉากกับสายอากาศลงมาด้วยความยาวอย่างน้อย $\frac{\lambda}{3}$ เพื่อป้องกัน

การคับปลิง (Couplin) จากสายอากาศกลับมาให้แก่สายส่ง และจำเป็นต้องใช้กราวด์ที่มีค่าความเป็นตัวนำสูง (Highly conductive ground return) เพื่อทำหน้าที่แทนสายส่งที่กลับมาซึ่งวงจรเทงก์ โดยอาศัยการคับปลิงผ่านมาทางความจุระหว่างสายอากาศกับกราวด์โดยที่วงจรเทงก์จะต้องต่อลงกราวด์เป็นอย่างดีด้วย ซึ่งการป้อนแบบนี้จะมีข้อเสียคือ จะเกิดการสูญเสียแพร่กระจายคลื่นมาก เพราะว่ามีมวลตัวนำอีกเส้นหนึ่งมาวางขนานเพื่อให้เกิดการหักล้างคลื่นที่แพร่กระจายออกไป (Radiation field) ของมัน

ส่วนในรูปที่ 5.35 (ข) เป็นการ ใช้สายส่งชนิดทึบเกลียวคู่มือเข้าตรงจุดกึ่งกลางของสายอากาศเพราะว่าค่า Z_0 ของสายส่งแบบนี้จะมีค่าประมาณ 70 ~ 80 โอห์ม ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแมตชิ่งกันได้โดยการแยกปลายสายส่ง (ถ้าหาก Z_0 น้อยกว่า Z_A) ตรงจุดต่อระหว่างสายส่งกับสายอากาศให้กว้างออก (ตรงจุดกึ่งกลางก็จะยิ่งสูงขึ้น)

เนื่องจากสายส่งมีลักษณะพันกันเป็นเกลียว จึงมีการสูญเสียมากขึ้น ดังนั้น จะนำมาใช้ งานก็ต่อเมื่อมีเหตุการณ์เฉพาะหน้าหรือกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ซึ่งอาจจะนำเอาสายไฟฟ้าธรรมดาหรือสายโทรศัพท์สนามมาพันให้เป็นเกลียว เพื่อนำมาใช้เป็นสายส่งแบบนี้ได้

นอกจากนี้แล้วเราอาจจะใช้สายส่งแบบโคแอกเซียลที่มีค่า Z_0 เท่ากับ 73 โอห์ม ต่อเข้ากับสายอากาศโดยตรงก็ได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.36



รูปที่ 5.36 แสดงการป้อนพลังงานคลื่นวิทยุให้แก่สายอากาศโดยใช้สายโคแอกเซียล

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของควอเตอร์เวฟ (Quarter wave section) นั้นจะหาได้จากสูตรข้างล่างนี้

	Z_0	=	$\sqrt{Z_T \cdot Z_A}$
เมื่อ	Z_0	=	อิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟที่นำมาทำการแมตช์
	Z_T	=	อิมพีแดนซ์ของสายส่ง
	Z_A	=	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ตัวอย่างที่ 6.17 จงคำนวณหาค่า Q-matching section ที่ใช้แมตช์ระหว่างสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Z_A) 73 โอห์ม กับสายส่งที่มีค่า Z_0 เท่ากับ 300 โอห์ม เมื่อใช้กับความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์

วิธีทำ ค่าอิมพีแดนซ์ของ Q-matching section

$$Z_A = \sqrt{Z_T \cdot Z_A}$$

$$= 300 \times 73$$

$$= 148 \text{ โอห์ม}$$

ความยาวของ Q-matching section

$$\lambda = \frac{300 \text{ เมตร}}{100}$$

$$= 3 \text{ เมตร}$$

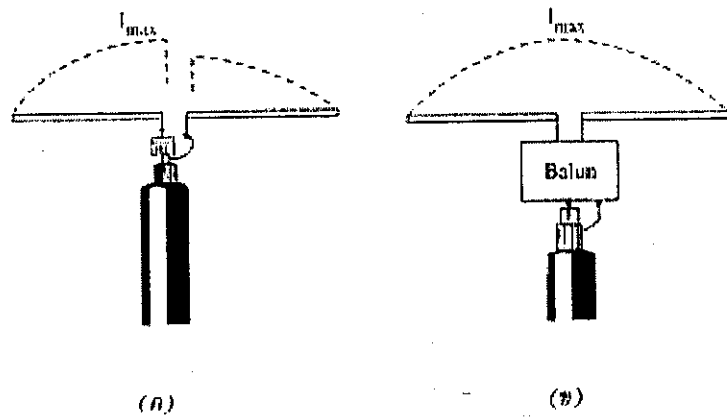
∴ ความยาว = $\frac{\lambda}{4}$

$$= \frac{3}{4} = 0.75 \text{ เมตร}$$

นั่นคือ จะต้องแมตช์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศด้วย ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 148 โอห์ม ที่มีความยาว 0.75 เมตร

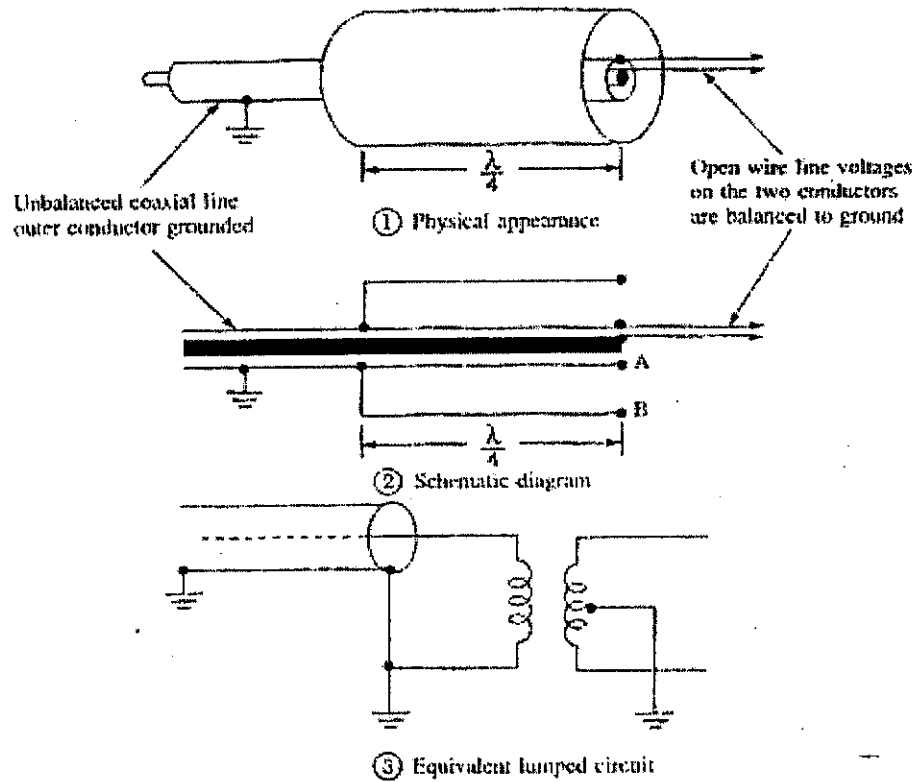
5.16 หม้อแปลงบาลัน (Balun transformer)

ในการนำสายโคแอกเชียลเป็นสายส่งแบบไม่สมดุล (Unbalance line) มาต่อเข้ากับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นที่สมดุล (Balance) จะทำให้กระแสบนสายอากาศในแต่ละซีกของไดโพลไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ผิดเพี้ยนไป และสามารถแก้ไขทำให้เกิดการสมดุลกันได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “บาลัน” (Balun ย่อมาจาก Balanced to Unbalanced line) มาต่อคั่นระหว่างสายอากาศกับสายโคแอกเชียล เพื่อแปลงให้สายอากาศมองเห็นสายส่งเป็นแบบสมดุล แล้วก็จะทำให้กระแสในแต่ละซีกของสายอากาศไดโพลมีค่าเกือบเท่ากัน โดยจะทำให้รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นมีการผิดเพี้ยนน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 5.37 แสดงกระแสคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นบนสายอากาศไดโพลขณะที่ไม่ต่อบาลันและต่อบาลัน

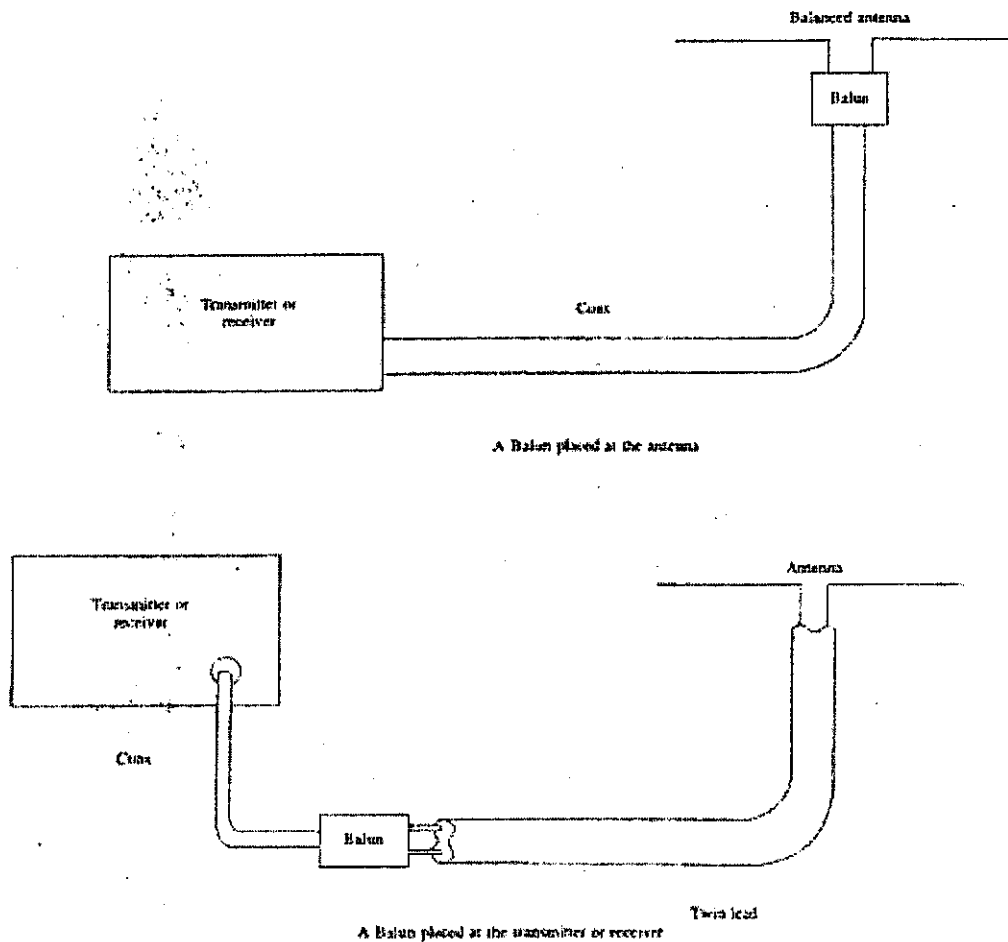
ตัวอย่างที่ 5.18 วงจรบาลันอย่างง่าย ๆ ที่ใช้สายส่งแบบโอแอกเซียลมาประกอบกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 แสดงวงจรบาลันอย่างง่าย ๆ

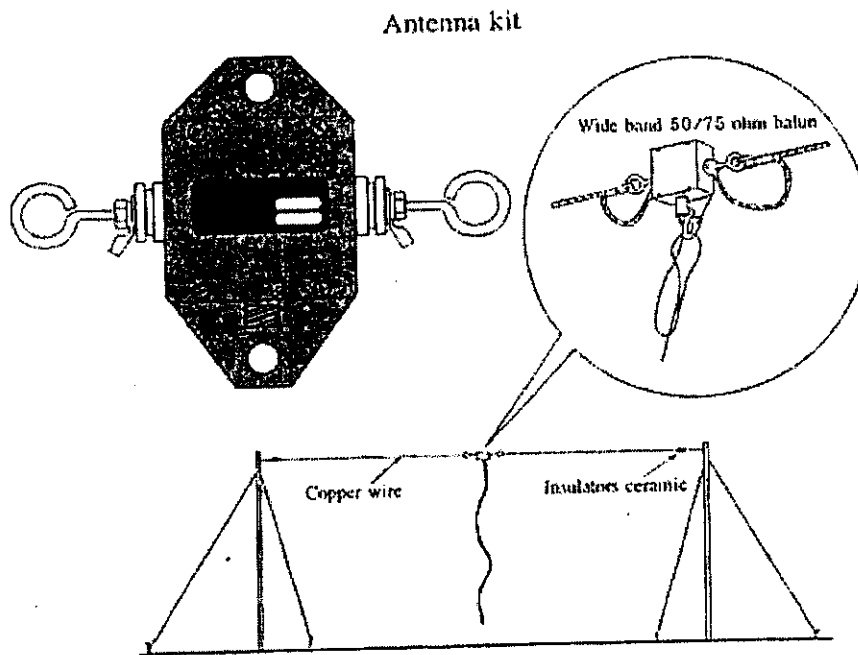
ในการประกอบวงจรเพื่อทำให้เกิดการสมดุลกันนั้นจะเอาฉนวนหรือยางหุ้มตัวนำภายนอก แล้วใช้กระบอกรหรือท่อโลหะแข็งที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$ สวมเข้าไปโดยให้ต่อกับตัวนำภายนอก (ปลายเปิด หรือข้อปลาย) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของกระบอกรหรือท่อโลหะแข็งจะลอยไว้ (ปลายเปิด) จะมีค่า อิมพีแดนซ์สูงมาก ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนของตัวนำคือ จุด A และ B แล้วต่อสายระหว่างตัวนำ ภายในกับตัวนำภายนอกเข้ากับสายอากาศ ซึ่งวงจรบาลันที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$ เรียกว่า “Bazooka section”

ตัวอย่างที่ 5.19 การต่อบาลันเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ



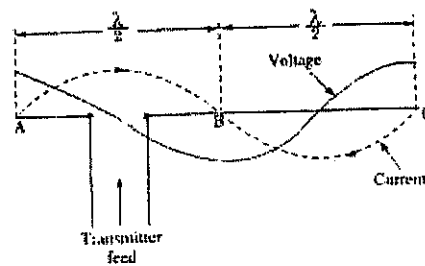
รูปที่ 5.39 แสดงการต่อบาลันเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ

ตัวอย่างที่ 5.20 สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นที่ใช้บาลัน

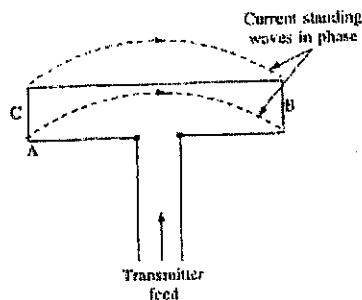


5.17 สายอากาศโพลเด็คไดโพล (Folded dipole antenna)

ในบางครั้งเราจำเป็นต้องเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้สูงขึ้น เพื่อให้แมตซ์กับสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 300 โอห์ม หรือ 600 โอห์ม โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์แมตซ์หรือบาลัน แต่เราจะใช้สายอากาศโพลเด็คไดโพล ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ 4 เท่าของสายอากาศไดโพลธรรมดา คือ $4 \times 73 = 292$ โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 300 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 5.41



(a)



รูปที่ 6.41 แสดงกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นบนสายอากาศโพลเด็คไดโพล

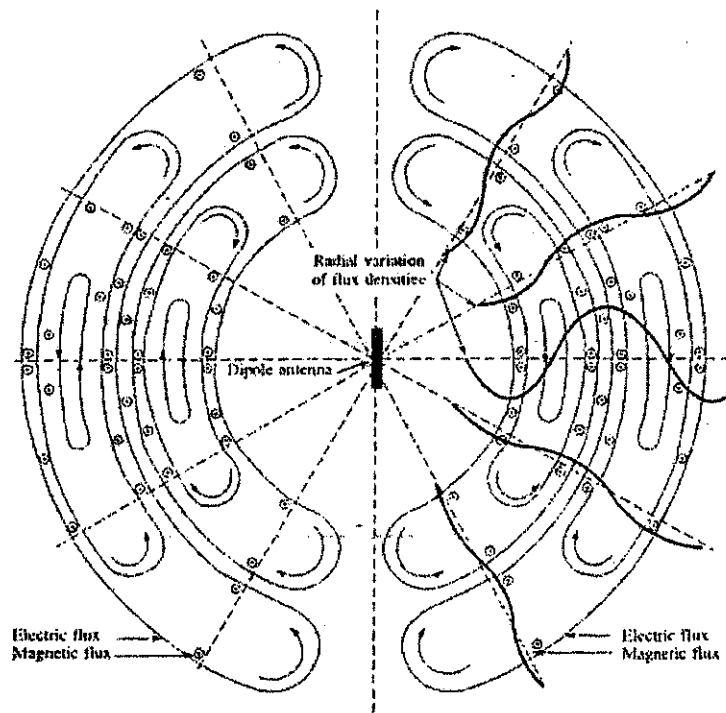
ในรูป 6.41 เป็นการแสดงกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นบนสายอากาศที่มีความยาว 1λ ดังรูปที่ 5.41 (ก) และเมื่อพับ (Folded) ส่วนของ BC ให้อยู่เหนือส่วนของ AB จะทำให้กระแสถูกแบ่งครึ่งเป็น 2 ส่วนที่มีทิศทางเดียวกัน โดยคลื่นยืนของกระแสที่เกิดขึ้นนั้นจะมีเฟสเดียวกัน และเสริมสร้างซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 6.41 (ข)

โดยปกติค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับกระแสกำลังสอง ($Z = P/I^2$) ซึ่งสายอากาศโพลเต็คไดโพลที่มีตัวนำขนาดเดียวกัน กระแสจะถูกแบ่งไปยังตัวนำแต่ละตัวจะเท่ากับ 1 ของค่าเดิม จะทำให้อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของไดโพลธรรมดา คือ $4 \times 73 = 292$ โอห์ม ซึ่งสามารถนำไปต่อกับสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น 300 โอห์มได้

5.18 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากสายอากาศครึ่งคลื่น (Radiation from a Half-wave antenna)

เมื่อป้อนพลังงานคลื่นวิทยุให้แก่สายอากาศ จะทำให้เกิดสนามจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานขึ้น 2 อย่างคือ สนามเหนี่ยวนำ (Induction field) และสนามแผ่รังสี (Radiation field) ซึ่งความเข้มของสนามจะปรากฏที่สายอากาศอย่างมากมาย และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของพลังงานที่ป้อนให้แก่สายอากาศ และค่อย ๆ จางลง ๆ เมื่อห่างไกลสายอากาศออกไป

สนามแผ่รังสีจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้า (Electric field) และส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ที่มีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกันและกันอยู่ในที่ว่างเปล่า (Free space) และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มไปพร้อม ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5.42

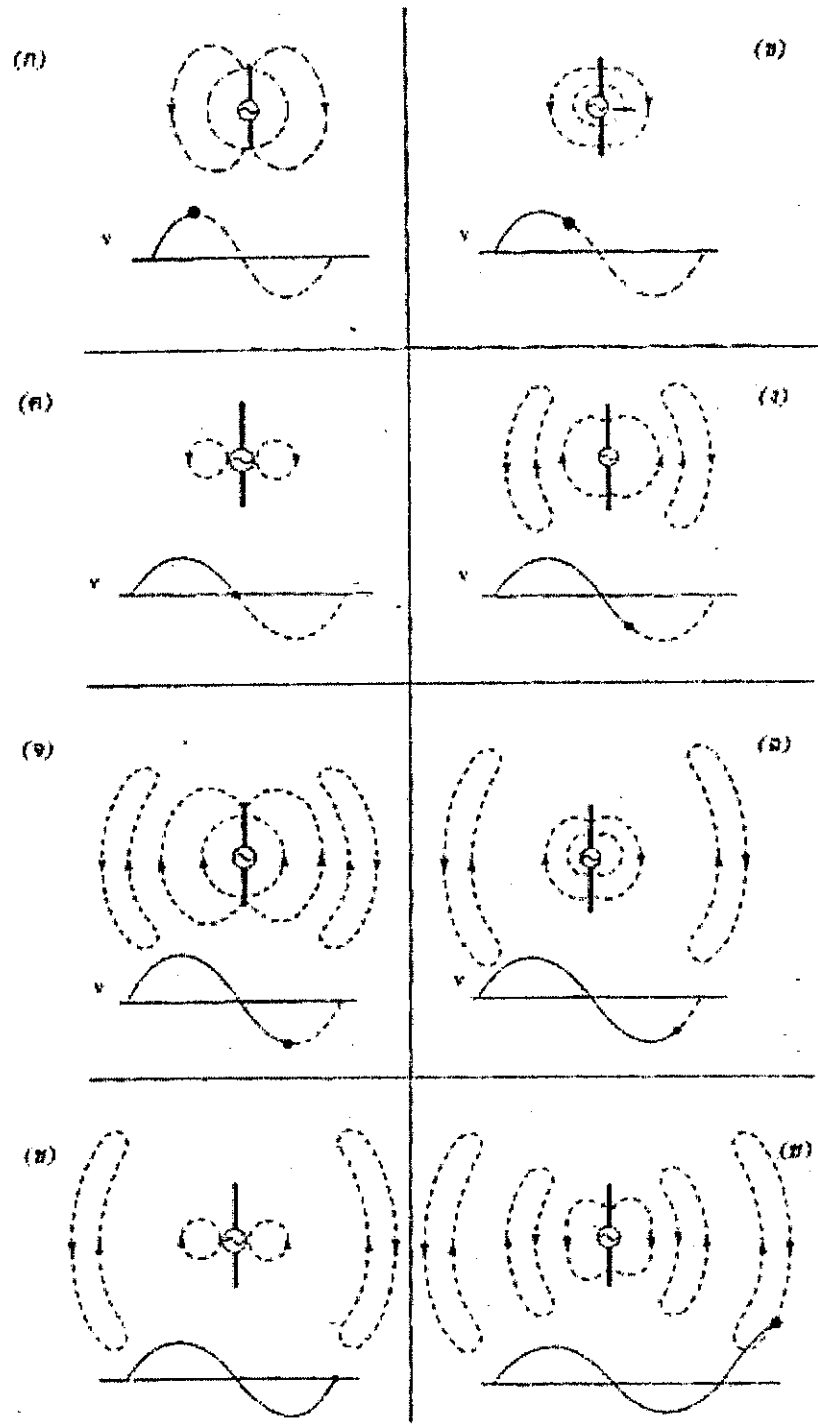


รูปที่ 5.42 แสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรอบ ๆ สายอากาศ

ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ออกไปจากสายอากาศได้แยกส่วนที่เป็น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กออกเป็นแต่ละชุด โดยแสดงให้เห็นว่าตั้งได้ฉากซึ่งกันและกัน และทั้งสองต่างก็ตั้งได้ฉากกับทิศของการเดินทางของคลื่น (Propagation) ภาพที่แสดงให้เห็น อาจเป็นระนาบ (Plane) หนึ่งระนาบใดก็ได้ โดยที่ระนาบนั้นตัดผ่านมาให้มีสายอากาศบรรจุอยู่ ด้วย และภาพที่แสดงให้เห็นนั่นได้หยุดไว้ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กนั้น ตามสภาพที่แท้จริงจะเป็นเส้นโค้งของรูปวงกลม มีสายอากาศเป็นจุดศูนย์กลาง ดังนั้น เมื่อตัด มองในรูประนาบจึงมองเห็นเป็นจุดกับรูปกากบาท

เส้นแรงไฟฟ้าที่แสดงให้เห็นจะเป็นแบบบรรจบถึงกัน หรือแบบไม่มีปลาย ยังอยู่ใน ลักษณะส่วนโค้งของวงกลม และเรียงรายอยู่ในระนาบที่มองเห็นสายอากาศเต็มตัว โดยเชื่อม ปลายเส้นต่อเข้าด้วยกัน บริเวณที่เส้นแรงไฟฟ้าเหล่านี้เปลี่ยนทิศทาง จะเป็นที่เดียวกันกับเส้น แรงแม่เหล็กเปลี่ยนกลับทิศทาง และความเข้มของมันจะเปลี่ยนแปลงไปตลอดตามทิศทางเดิน ผ่านของรัศมี

ในรูปที่ 5.42 นั้น เป็นภาพแสดงที่ถูกต้องของเส้นแรง ณ ช่วงเวลาหนึ่ง และเป็น จังหวะที่เส้นแรงขยายรัศมีให้กว้างออกไปด้วยความเร็วเกือบเท่ากับความเร็วแสง โดยเส้นแรง อันใหม่เกิดขึ้นจากสายอากาศ เพื่อมาทดแทนอันที่เคลื่อนที่ออกไปข้างหน้า ดังนั้น สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กจึงมีการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาตลอดเส้นทางที่มันผ่านไป โดยมี ความถี่ในการเปลี่ยนแปลง (Oscillate) เท่ากับความถี่ของกระแสสายอากาศ (Antenna current) พร้อมกันนั้นขนาดความเข้มของสนามทั้งสองก็จะเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องกันไป โดยสัมพันธ์กับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสสายอากาศ ลักษณะที่สนามแม่เหล็กตัดตัวออกจากสายอากาศและ แพร่กระจายออกไปยังที่ว่างเปล่า (Space) สามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 5.43 แสดงสนามแผ่รังสีที่ออกจากสายอากาศ

ตามรูปที่ 5.43 เป็นภาพประกอบการอธิบายให้เห็นถึงขั้นตอนการกระจายของคลื่นไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เพราะว่าการกระจายของคลื่นแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับคลื่นไฟฟ้าเสมอจึงไม่ได้แสดงไว้

ในรูปที่ 5.43 (ก) เมื่อแรงดันที่ป้อนให้แก่สายอากาศมีขนาดสูงสุดทางบวก จะมี สนามไฟฟ้าแผ่ออกมามากที่สุด โดยมีทิศทางจากบวกไปยังลบ

ในรูปที่ 5.43 (ข) แรงดันเริ่มตกลงจากค่าสูงสุดทางบวก (เนื่องจากสัญญาณเป็น กระแสสลับ) สนามไฟฟ้าก็จะลดลง โดยการยุบตัวลงเป็นวงแคบกว่า

ในรูปที่ 5.43 (ค) แรงดันมีค่าตกลงถึงแกนศูนย์ สนามไฟฟ้าจะยุบตัวลง เหลือเพียง วงกลมเล็ก ๆ ใกล้เคียงสายอากาศเท่านั้น

ในรูปที่ 5.43 (ง) แรงดันเพิ่มขึ้นอีกแต่เป็นทางลบ สนามไฟฟ้าบานตัวออกแต่มีทิศทาง ตรงกันข้าม

ในรูปที่ 5.43 (จ) แรงดันสูงขึ้นในทางลบ และถึงค่าสูงสุดสนามไฟฟ้าจะแผ่ออกมากขึ้น สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นครั้งแรกจะถูกผลักไกลออกไป

ในรูปที่ 5.43 (ฉ) แรงดันเริ่มตกลงจากค่าลบสูงสุด ทำให้สนามไฟฟ้ารอบ ๆ สายอากาศ จะลดแคบลง ส่วนที่อยู่ห่างจากสายอากาศเนื่องจากแรงดันสูงสุดก็กระจายออกไป

ในรูปที่ 5.43 (ช) แรงดันลบตกลงถึงแกนศูนย์ ครบ 1 ไซเคิลของสัญญาณ สนามไฟฟ้า จะยุบตัวแคบเป็นวงเล็ก ๆ ใกล้เคียงสายอากาศเหมือนรูปที่ 6.44 (ค) แต่ยังมีบางส่วนของ สนามไฟฟ้าที่อยู่ห่างยังกระจายออกไป

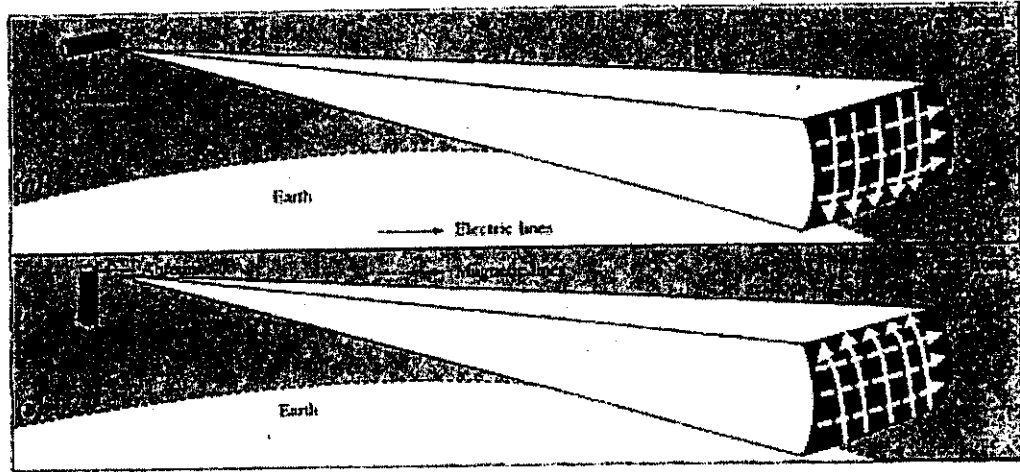
ในรูปที่ 5.43 (ซ) แรงดันเพิ่มขึ้นในทางบวกอีกครั้งหนึ่ง สนามไฟฟ้าจากแรงดันนี้จะแผ่ ออกจากสายอากาศในทิศทางตรงกันข้าม เพราะอยู่ในส่วนที่เป็นบวก แต่ยังมีสภาพไฟฟ้าที่ ตกค้างอยู่รอบนอก เนื่องมาจากแรงดันส่วนที่เป็นลบ สนามไฟฟ้านี้จะถูกผลักให้ห่างออกไป

หลักการตามรูปที่ 5.43 (ก) - (ซ) จะเห็นได้ว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบสายอากาศใด โพลจะมีทิศทางสวนกัน เมื่อแรงดันที่ปรากฏอยู่ในครึ่งไซเคิลบวกและครึ่ง ไซเคิลลบ สนามไฟฟ้าจะมีความเข้มมากที่สุดเมื่อแรงดันถึงค่าสูงสุด และจะมีความเข้มต่ำสุดเมื่อแรงดัน เป็นศูนย์ เมื่อใดก็ตามถ้าแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้น และยิ่งมากขึ้น สนามไฟฟ้าที่เกิดตามมาและอยู่ชิด สายอากาศจะผลักสนามไฟฟ้าที่เกิดก่อนให้ห่างจากสายอากาศออกไป

สนามไฟฟ้าจะถูกผลักให้หลุดกระจายออกไปในอากาศ เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีทิศทาง สวนกัน ฉะนั้นเมื่อแรงดันที่เปลี่ยนแปลงในจังหวะครึ่ง ไซเคิลบวกและครึ่ง ไซเคิลลบ ซึ่งเกิด ติดต่อกันตลอด จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกผลักให้หลุดกระจายออกไปในอากาศ ติดต่อกันไปด้วย ตลอดเวลาตราบเท่าที่ยังมีแรงดันกระแสสลับจ่ายให้แก่สายอากาศ สำหรับ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าจะกระจายออกไปได้ไกลเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับความแรงและความถี่ของ แรงดันที่จ่ายให้แก่สายอากาศ

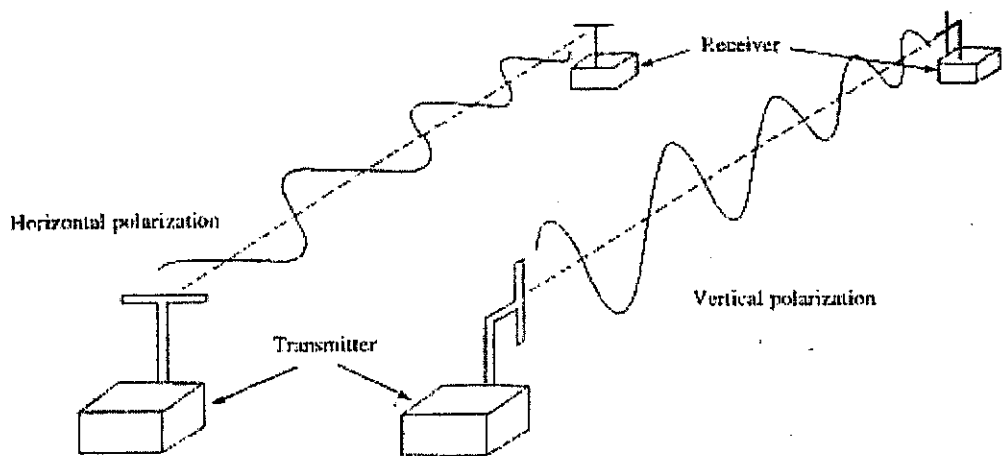
5.19 การจัดขั้วคลื่น (Polarization)

คลื่นวิทยุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกอากาศ จะประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกันในอากาศหรือที่ว่าง และสนามทั้งสองนี้ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.44



รูปที่ 5.44 แสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระจายออกจากสายอากาศ

ในการจัดขั้วคลื่นมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ เพื่อให้การวางสายอากาศอยู่ในลักษณะที่สามารถรับ-ส่งคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอ้างอิงสนามไฟฟ้าเป็นหลัก กล่าวคือ ถ้าสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในแนวตั้ง (ตั้งฉากกับพื้นโลก) เรียกว่า “การจัดขั้วแนวตั้ง (Vertical polarization)” แต่ถ้าสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ในแนวนอน (ขนานกับพื้นโลก) ก็เรียกว่า “การจัดขั้วแนวนอน (Horizontal polarization)”

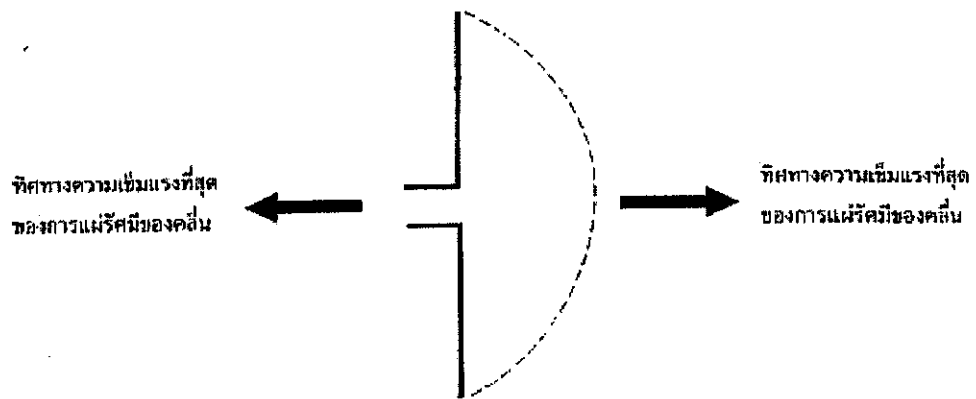


รูปที่ 5.45 แสดงการจัดขั้วคลื่นของสายอากาศ

ดังนั้น ในการติดตั้งสายอากาศเพื่อให้การรับ-ส่งคลื่นได้สูงสุด จะต้องวางสายอากาศให้อยู่ในแนวเดียวกัน กล่าวคือ สายอากาศแนวตั้ง (Vertical) ก็จะมีประสิทธิภาพดีในการรับคลื่นที่มีการจัดจั่วแบบแนวตั้ง และสายอากาศแนวนอน (Horizontal) ก็จะมีประสิทธิภาพดีในการรับคลื่นที่มีการจัดจั่วแบบแนวนอน

5.20 รูปแบบการแพร่คลื่น (Radiation pattern)

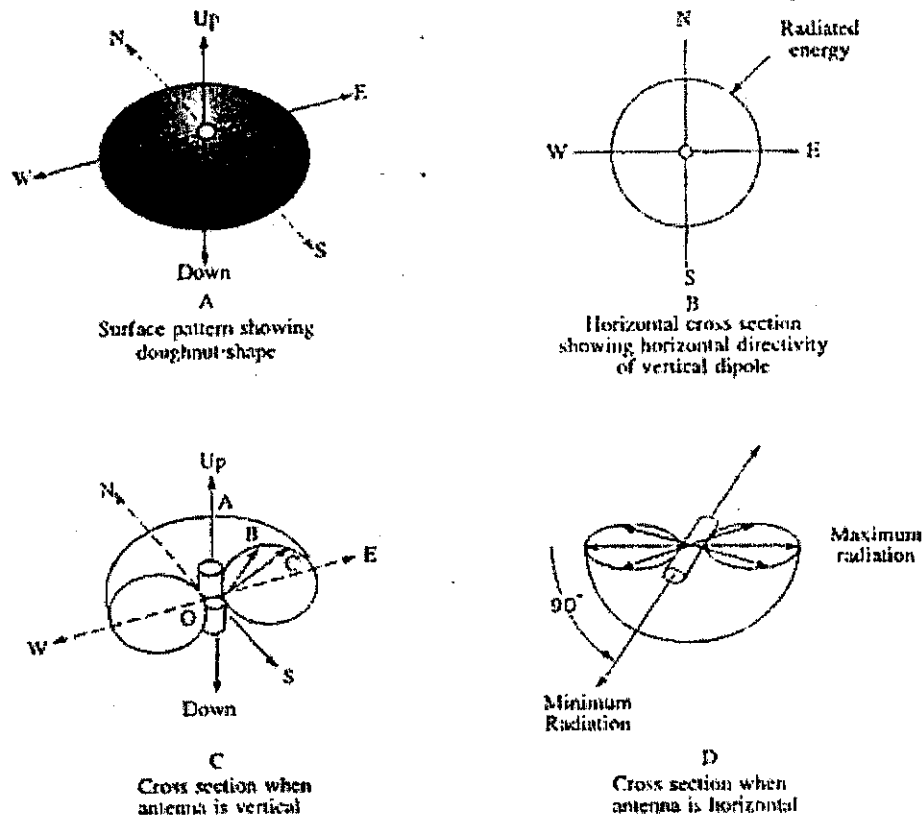
เมื่อสายอากาศแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในอากาศ การแพร่คลื่นจะมีกำลังแรงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ การแพร่คลื่นจะมีกำลังแรงที่สุดตามแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับจุดที่มีกระแสสูงสุดบนสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.47



รูปที่ 5.46 แสดงทิศทางการแพร่คลื่นวิทยุ

ในการทดสอบวัดความแรงการแพร่คลื่น สามารถกระทำได้โดยการใช้ “มาตรวัดความแรงของสนาม (Field strength meter)” เพื่อวัดความแรงการแพร่คลื่น (Radiation field) ณ จุดต่าง ๆ รอบสายอากาศได้ แล้วนำความแรงที่วัดได้นี้มาพล็อตในกราฟสามมิติ เราก็จะได้เส้นโค้งสามมิติแสดงรูปแบบ (Pattern) การแพร่คลื่นของสายอากาศ

ซึ่งการแพร่คลื่นของสายอากาศใด โพลครั้งคลื่นที่วางอยู่ในแนวตั้ง จะมีรูปสี่เหลี่ยมคล้ายขนมโดนัท (Doughnut) ดังแสดงในรูปที่ 5.47



รูปที่ 5.47 แสดงรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศไดโพลตั้งกึ่งคลื่น

จงสังเกตว่าความหนาที่สูงสุดของรูปโดนัท จะตั้งได้มากกับสายอากาศตรงจุดกึ่งกลางของ มันการแผ่รังสีสูงสุดจะเกิดในแนวนอน ส่วนบางที่สุดของรูปโดนัทอยู่ในแนวแกนของ สายอากาศ และตรงกับแนวที่มีการแผ่รังสีวิทยุน้อยที่สุด

ถ้าหมุนสายอากาศไป 90° อยู่ในแนวนอน การแผ่รังสีสูงสุดเกิดในแนวตั้ง รูปแบบ การแผ่รังสีนี้สมมติว่าสายอากาศถูกแยกไว้โดด ๆ ในที่ว่างเปล่าพ้นจากสิ่งอื่น ๆ บนพื้นดิน แต่ในการใช้งานจริง ๆ แล้ว สายอากาศอาจจะวางอยู่สูงจากพื้นดินไม่มากเท่าใดนัก และ รูปแบบการแผ่รังสีจะเปลี่ยนไปจากนี้

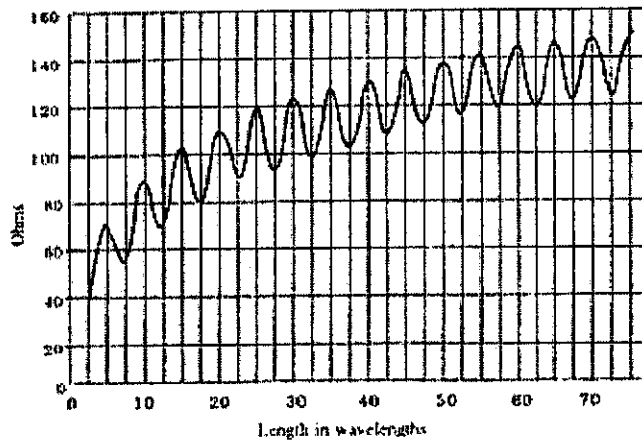
5.21 ความต้านทานการแผ่รังสี (Radiation resistance)

ความต้านทานการแผ่รังสี คือค่าความต้านทานที่วัดตรงจุดที่มีค่ากระแสสูงสุดของ สายอากาศในขณะที่แผ่กระจายคลื่นออกอากาศที่ระยะความสูงว่างเปล่า ซึ่งค่าความต้านทาน นี้ไม่ได้เป็นความต้านทานของสายอากาศจริง ๆ แต่เป็นความต้านทานเทียบเท่า ถ้านำเอาความ ต้านทานนี้มาต่อแทนสายอากาศ มันจะดูดกลืน (Absorb) กำลังงานจากเครื่องส่งเท่ากับกำลัง งานที่สายอากาศนั้นจ่ายออกไปในอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรข้างล่างนี้

$$R_r = P/I^2 \quad \dots\dots\dots(5.24)$$

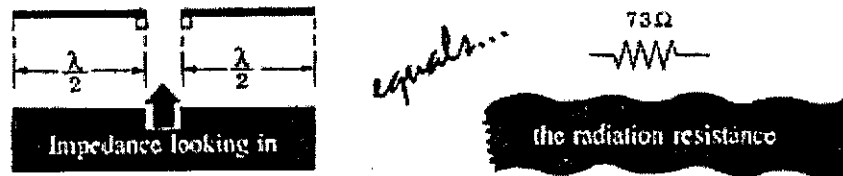
- เมื่อ R_r = ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น มีหน่วยเป็น โอห์ม
 P = กำลังงานที่แผ่กระจายคลื่นออกอากาศ มีหน่วยเป็นวัตต์
 I = กระแสสายอากาศที่จุดป้อนสัญญาณเข้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์

ซึ่งค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 5.48



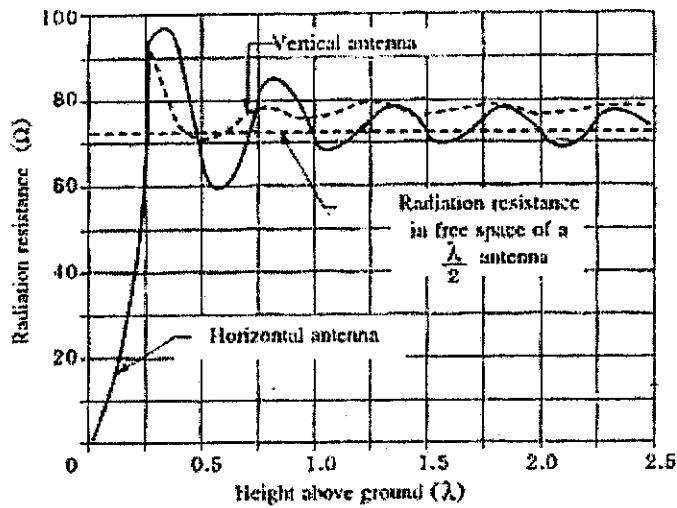
รูปที่ 5.48 แสดงค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาว

สำหรับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น ค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นจะวัดตรงจุดที่มีกระแสสูงสุด (ตรงจุดกึ่งกลางของสายอากาศ) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 73 โอห์ม ส่วนสายอากาศแนวตั้ง ขนาด $\lambda/4$ จะมีค่าประมาณ 36.6 โอห์ม โดยวัดตรงจุดที่มีกระแสสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 5.49 แสดงค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

นอกจากนี้แล้ว ค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะความสูงของสายอากาศด้วย และเมื่อสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงระดับว่างเปล่าก็จะมีค่าความต้านทานคงที่ คือประมาณ 73 โอห์ม (สำหรับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น) ดังแสดงในรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 แสดงค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นที่ระยะความสูงต่าง ๆ กัน

ค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นที่ระยะความสูงใกล้ ๆ พื้นดิน ในทางปฏิบัติพบว่าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0-100 โอห์ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศเหนือพื้นดิน

5.22 อัตราทวีกำลังของสายอากาศ (Antenna gain)

ค่าอัตราทวีกำลังของสายอากาศ เป็นตัวบอกให้ทราบว่าสายอากาศนั้นแพร่คลื่นหรือรับคลื่นดีกว่าหรือด้อยกว่าสายอากาศมาตรฐานที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบอย่างไร

ซึ่งสายอากาศมาตรฐานที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบนั้น นิยมใช้สายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติแพร่คลื่นได้เท่าๆ กันทุกทิศทาง สายอากาศแบบนี้ไม่มีจริง ๆ ในโลก แต่สมมติขึ้นเพื่อนำมาใช้อ้างอิงในการคำนวณทางทฤษฎีเท่านั้น แต่สายอากาศมาตรฐานที่สร้างขึ้นได้จริง ๆ คือสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

ในการวัดค่าอัตราทวีกำลังของสายอากาศ สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. โดยการ ใช้สายอากาศที่จะวัด และสายอากาศมาตรฐานเป็นสายอากาศรับความแรงของคลื่นวิทยุเปรียบเทียบกัน
2. โดยการ ใช้สายอากาศที่จะวัด และสายอากาศมาตรฐานเป็นสายอากาศรับความแรงของคลื่นวิทยุเปรียบเทียบกัน

สมมติว่าใช้สายอากาศที่ต้องการจะวัด และสายอากาศมาตรฐานเป็นสายอากาศส่งครั้งแรกเราป้อนพลังงานคลื่นวิทยุ (RF power) จำนวนหนึ่งให้แก่สายอากาศที่ต้องการวัด และเมื่อ

สายอากาศชนิดนี้กระจายกำลังคลื่นวิทยุ (Effective Radiated Power : ERP) ไปสู่จุดหนึ่ง ณ จุดดังกล่าวนี้ปรากฏว่ามีความเข้มของคลื่นวิทยุขนาดหนึ่ง

และถ้าเปลี่ยนสายอากาศที่ต้องการวัดออก แล้วใช้สายอากาศมาตรฐานเป็นสายอากาศส่งแทน แล้วป้อนพลังงานคลื่นวิทยุในขนาดเท่าเดิม แล้วทำการวัดความเข้มของคลื่นวิทยุ ณ ที่ตำแหน่งเดิม ปรากฏว่ามีความเข้มของคลื่นวิทยุขนาดหนึ่ง แล้วนำค่าความเข้มของคลื่นวิทยุที่ส่งด้วยสายอากาศที่ต้องการวัด หาค่าความเข้มของคลื่นวิทยุที่ส่งด้วยสายอากาศมาตรฐาน ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าทวีกำลัง (Gain) ของสายอากาศที่ต้องการนั่นเอง

ส่วนในการใช้สายอากาศที่ต้องการวัด กับสายอากาศมาตรฐาน เป็นสายอากาศรับความแรงของคลื่นวิทยุ ก็ใช้วิธีเช่นเดียวกัน เพียงแต่เป็นสายอากาศรับสัญญาณเท่านั้นเอง

การพิจารณาอัตราทวีกำลังของสายอากาศ จะต้องคำนึงถึงทิศทาง ทั้งนี้เพราะว่าสายอากาศบางชนิดอาจมีความเข้มของคลื่นวิทยุเท่ากันทุกทิศทาง หรือเรียกว่า Omnidirection (ไม่มีทิศทาง) แต่บางชนิดมีสองทิศทางเรียกว่า "Bi-direction" และสายอากาศบางชนิดอาจจะมีทิศทางมากกว่าสองทิศทางก็ได้ ดังนั้น ในการกำหนดค่าอัตราทวีกำลังของสายอากาศจึงจำเป็นต้องกำหนดทิศทางของค่าทวีกำลังประกอบด้วย

ในทางปฏิบัติ ค่าอัตราทวีกำลังของสายอากาศมี 2 ลักษณะคือ

1. Power Gain
2. Field Gain

1. **Power gain** เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราทวีกำลังของสายอากาศ 2 ชุด โดยการคำนวณค่าทวีกำลังออกมาในรูปของเดซิเบล (Decibel) โดยมีสูตรดังนี้

$$\text{Power gain (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad \text{.....(5.25)}$$

เมื่อ P_1 = กำลังงานของสายอากาศที่ต้องการวัด มีหน่วยเป็นวัตต์
 P_2 = กำลังงานของสายอากาศมาตรฐาน มีหน่วยเป็นวัตต์

ตัวอย่างที่ 5.20 สมมติว่าเราป้อนพลังงานความถี่วิทยุจำนวนหนึ่งให้กับสายอากาศชุดที่ 1 และสายอากาศชุดนี้ทำให้เกิด Effective power เท่ากับ 8 กิโลวัตต์ และเมื่อป้อนพลังงานความถี่วิทยุจำนวนเท่ากันให้กับสายอากาศชุดที่ 2 ปรากฏว่าสายอากาศชุดที่ 2 นี้ทำให้เกิด Effective power เท่ากับ 2 กิโลวัตต์ สายอากาศชุดที่ 1 มีค่าอัตราทวีกำลังสูงกว่าสายอากาศชุดที่ 2 เท่าไร

วิธีทำ จากสูตร Power gain (dB) = $10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$
 = $10 \log_{10} \frac{8}{2}$

$$\begin{aligned}
 &= 10 \log_{10} 4 \\
 &= 10 \times 0.602 \\
 (\log 4 = 0.602) &= 6.02 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

สายอากาศชุดที่ 1 มี Power gain สูงกว่าชุดที่ 2 เท่ากับ 6.02 dB

2. **Field gain** โดยการวัดความเข้มของคลื่นวิทยุที่รับได้จากสายอากาศสองชุดโดยอาศัยเครื่องมือวัดที่เรียกว่า “มาตรวัดความแรงของสนาม (Field strength meter)” ซึ่งค่าที่วัดได้ออกมาในรูปของ โวลต์ต่อเมตร (V/m) แล้วใช้สูตรคำนวณหาค่าทวิกำลัง โดยการเปรียบเทียบแรงดัน

$$\text{Field gain (dB)} = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \dots\dots(5.26)$$

เมื่อ V_1 = ความแรงของคลื่นวิทยุที่รับได้จากสายอากาศที่ต้องการวัด มีหน่วยเป็นโวลต์
 V_2 = ความแรงของคลื่นวิทยุที่รับได้จากสายอากาศมาตรฐาน มีหน่วยเป็นโวลต์

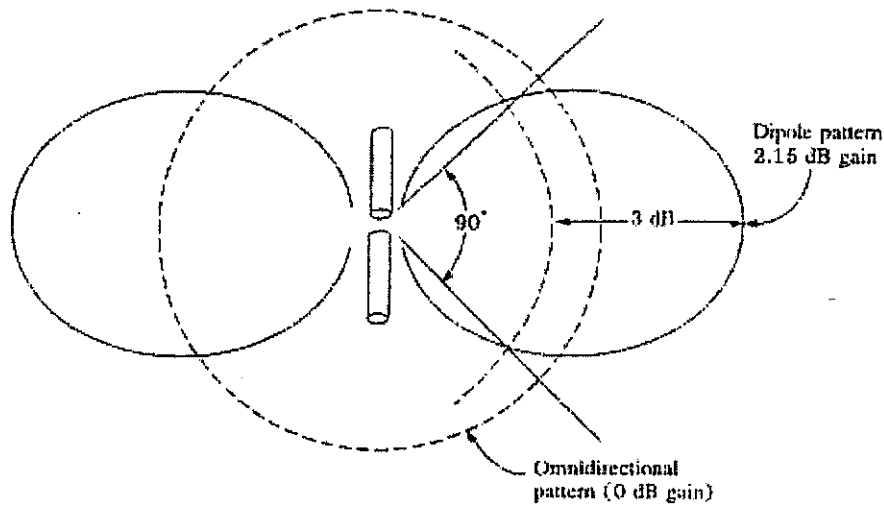
ตัวอย่างที่ 6.21 สมมติว่าเราป้อนพลังงานความถี่วิทยุจำนวนหนึ่งให้แก่สายอากาศชุดที่ 1 แล้วนำมาตรวัดความแรงคลื่นวิทยุไปวัดความเข้มของคลื่นวิทยุ ณ จุดหนึ่ง อ่านค่าออกมาได้ 80 mV/meter และเมื่อเปลี่ยนเป็นสายอากาศชุดที่ 2 แล้ววัดค่าความเข้มได้ 290 mV/meter ดังนั้น สายอากาศชุดที่ 2 จะมี Field gain สูงกว่าชุดที่ 1 เท่าไร

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร Power gain (dB)} &= 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \\
 &= 20 \log_{10} \frac{290}{80} \\
 &= 20 \log_{10} 43.63 \\
 &= 20 \times 0.56 \\
 (\log 4 = 0.602) &= 11.2 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

สายอากาศชุดที่ 2 มี Field gain สูงกว่าชุดที่ 1 เท่ากับ 11.2 dB

สำหรับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น จะมีความแรงของคลื่นประมาณ 1.28 เท่าของสายอากาศไฮโซทรอปิก (Field gain 2.15 dB) หรือมีกำลังงานประมาณ 1.64 เท่าของสายอากาศไฮโซทรอปิก ดังแสดงในรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 แสดงรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศไดโพลเปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก

หน่วยของอัตราทวีกำลังของสายอากาศที่นิยมใช้กันคือ dB (ใช้สายอากาศไดโพลเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ) และ dB (ใช้สายอากาศไอโซทรอปิกเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ)

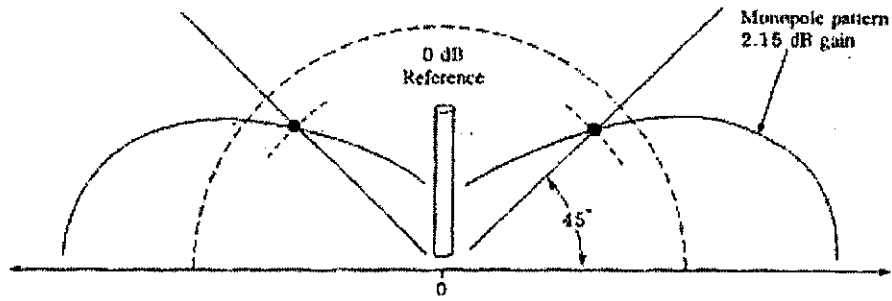
ค่าอัตราทวีกำลังของสายอากาศไดโพลครั้งคลื่นจะสูงกว่าสายอากาศไอโซทรอปิกอยู่ 2.15 dB ($0 \text{ dB}_i = 2.15 \text{ dB}_d$) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง dB_d กับ dB_i มีดังนี้

$$\text{dB}_d = \text{dB}_i - 2.15 \quad \dots(6.27)$$

ในบางครั้งทางปฏิบัติอาจจะใช้สายอากาศสี่ขความยาวคลื่น ($\frac{\lambda}{4}$) หรือสายอากาศมาร์

โคนี เป็นสายอากาศมาตรฐานอ้างอิงในการกำหนดอัตราทวีกำลังของสายอากาศ (Antenna gain) ก็ได้ เพราะว่าสายอากาศ ($\frac{\lambda}{4}$) นี้จะมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ($\frac{\lambda}{2}$) ดังนั้น

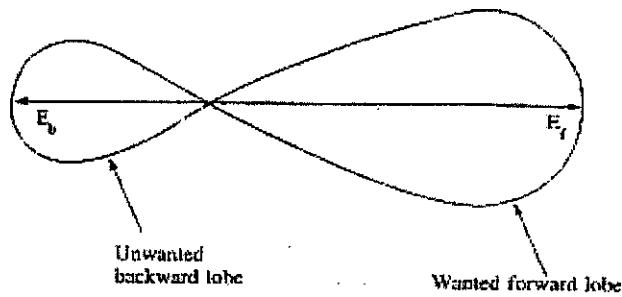
รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ($\frac{\lambda}{4}$) เหมือนกับครึ่งหนึ่งในระนาบแนวตั้ง (Vertical plane) ของสายอากาศไดโพล ($\frac{\lambda}{2}$) ดังแสดงในรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.52 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (λ) เปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก

6.23 อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to back ratio)

คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากด้านหน้าของสายอากาศ กับด้านหลังของสายอากาศแบบมีทิศทาง (สายอากาศขาก) ตัวอย่างเช่น ถ้าสายอากาศรับสัญญาณจากเครื่องส่งด้านหน้าได้ 1,000 μV แต่ถ้ารับจากด้านหลังจากเครื่องส่งเดียวกันที่มีความถี่และความแรงเท่ากัน แต่รับได้เพียง 500 μV ดังนั้น อัตราส่วนหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 2 หรือ 6 dB



รูปที่ 5.53 แสดงอัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังของคลื่นวิทยุ

$$\text{อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง (FBR)} = \frac{E_f}{E_b}$$

$$\text{ทำเป็น dB} = 20 \log \frac{E_f}{E_b}$$

ตัวอย่างที่ 5.22 ช่างเทคนิคทำการวัดความเข้มคลื่นวิทยุ (Field Strength) ที่ระยะทางห่างจากสายอากาศวิทยุ x กิโลเมตร ได้เท่ากับ 10 mV/m และที่ระยะทางเดียวกันนี้วัดในทิศทางตรงกันข้ามได้ความแรงเท่ากับ 1 mV/m จงคำนวณหาค่าอัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศวิทยุดังนี้

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง (FBR)} &= \frac{E_f}{E_b} \\ &= \frac{10 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \\ &= 10 \end{aligned}$$

หรือคิดในหน่วยเดซิเบล (dB)

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง} &= 20 \log_{10} \\ &= 20 \text{ dB} \end{aligned}$$

