บทที่ 11 สายอากาศล็อคเพอริโอดิก

11.1 บทนำ

สายอากาศล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์ (Log-periodic dipole array) ประกอบด้วยไดโพลความยาวต่าง ๆ มาเรียงต่อขนานกันด้วยระยะห่างที่แตกต่างกัน ซึ่งสายอากาศล็อคเพอริโอดิกจะต่างจากสายอากาศยากิ-อูดะตรงที่ไดโพลทั้งหมดที่ต่ออาร์เรย์กันแบบล็อคเพอริโอดิกจะถูกกระตุ้นด้วยโครงข่ายป้อนสัญญาณ นอกจากนี้สายอากาศล็อคเพอริโอดิกยังสามารถออกแบบแบบให้ใช้งานได้บนแบนด์วิทด์ที่กว้างกว่าสายอากาศไดโพล ในบางกรณีอาจออกแบบให้มีแบนด์วิทด์กว้างได้ถึง $f_U : f_L = 10:1$ ดังนั้นจึงสามารถออกแบบสายอากาศล็อคเพอริโอดิกให้สามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 3 MHz ถึง 30 MHz สำหรับการสื่อสารในย่านความถี่ HF ได้ เนื่องจากสายอากาศประเภทนี้มีอิมพุทอิมพีแดนซ์และอัตราขยายแปรผันแบบลอการิทึมกับความถี่ จึงทำให้เรียกสายอากาศนี้ว่าสายอากาศล็อคเพอริโอดิก

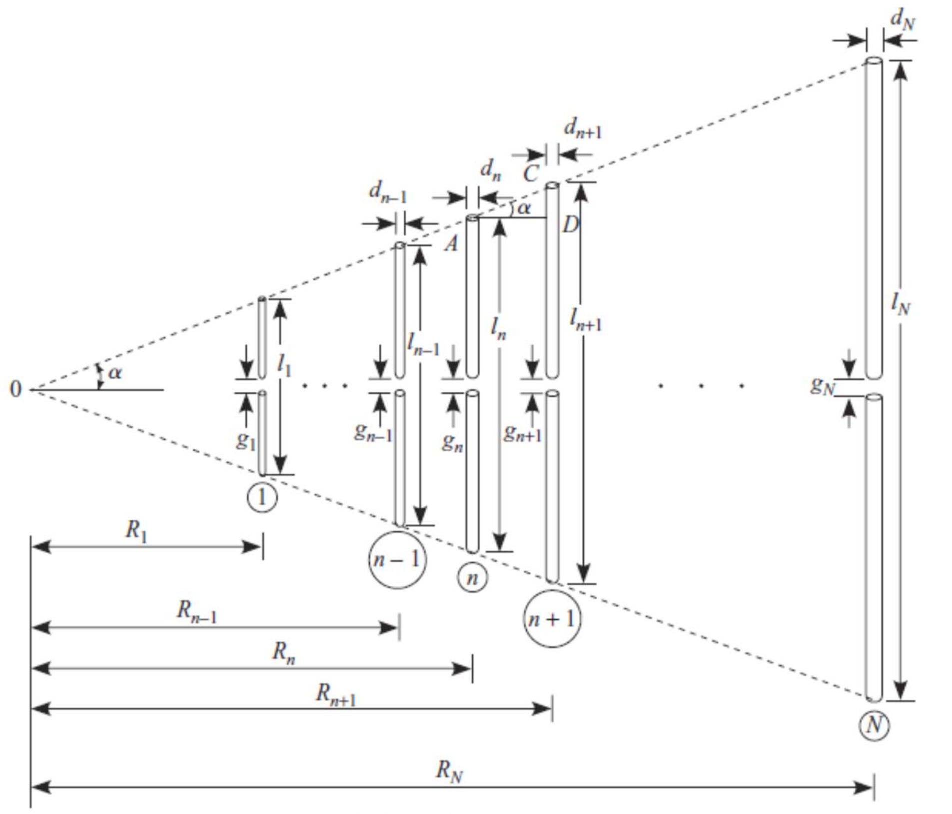
11.2 โครงสร้างของสายอากาศล็อกเพอริออดิก

รูปที่ 11.1 แสดงสายอากาศล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์จำนวน N องค์ประกอบ โดยที่ไดโพลลำดับที่ n มีความยาวเท่ากับ l_n มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ d_n มีช่องว่างของส่วนป้อนสัญญาณเท่ากับ g_n และกำหนดให้มีความยาวทั้งหมดเท่ากับ R_N เมื่อวัดจากจุดกำเนิด ซึ่งขนาดของไดโพลลำดับที่ n และ $(n+1)$ มีความสัมพันธ์กับไดโพลลำดับอื่น ๆ ดังแสดงในสมการ

$$\frac{R_n}{R_{n+1}} = \frac{g_n}{g_{n+1}} = \frac{l_n}{l_{n+1}} = \frac{d_n}{d_{n+1}} = \tau \qquad (11.1)$$

เมื่อ τ คือ แฟคเตอร์ขนาด (Scale factor) โดยที่ $\tau < 1$ และมีพารามิเตอร์อื่น ๆ ของอาร์เรย์ เช่น แฟคเตอร์ระยะห่าง (Spacing factor : σ) ซึ่งมีค่าคือ

$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2l_{n+1}} \qquad (11.2)$$



รูปที่ 11.1 โครงสร้างของสายอากาศล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์

นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ α ซึ่งเป็นมุมที่วัดออกจากจุดกำเนิดไปจนถึงไดโพลตัวสุดท้ายที่ยาวที่สุดดังแสดงในรูปที่ 11.1 ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว คือ τ, σ และ α ของล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์จะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ถ้าพิจารณาไดโพลลำดับที่ n และ $(n+1)$ ดังนั้นจากสมการ (11.1) ระยะห่างระหว่างไดโพลสองตัวกำหนดได้คือ

$$\mathrm{AD} = R_{n+1} - R_n = 2\sigma l_{n+1} \tag{11.3}$$

จากสามเหลี่ยม ACD จะได้

$$\tan\alpha = \frac{\mathrm{CD}}{\mathrm{AD}} = \frac{\dfrac{l_{n+1}}{2} - \dfrac{l_n}{2}}{2\sigma l_{n+1}} = \frac{l_{n+1}}{2}\,\frac{\left[1 - \dfrac{l_n}{l_{n+1}}\right]}{2\sigma l_{n+1}} \tag{11.4}$$

แทนค่า $l_n / l_{n+1} = \tau$ ลงในสมการ (11.4) จะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ τ, σ และ α คือ

$$\tan\alpha = \frac{(1 - \tau)}{4\sigma} \tag{11.5}$$

เมื่อพิจารณาล็อคเพอริโอดิกอาร์เรย์ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีจำนวนไม่จำกัด ถ้าขนาดของอาร์เรย์ทั้งหมดถูกคูณด้วยพารามิเตอร์ τ พบว่าจะได้ความสัมพันธ์กับความถี่คือ

$$\ln(f_n) - \ln(f_{n+1}) = \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) \;,\; n = 1, 2, 3, ... \tag{11.6}$$

จึงสามารถกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของอาร์เรย์มีการทำซ้ำหรืออยู่ในลักษณะเป็นรายคาบ (periodic) ในโดเมนของ $\ln(f)$ จึงเป็นที่มาของล็อกเพอริโอดิกอาร์เรย์ นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวในแต่ละองค์ประกอบจะเข้าใกล้ความยาวคลื่นของความถี่ดำเนินการ โดยที่ความถี่ต่ำสุดของย่านความถี่ใช้งาน (f_L) ไดโพลจะมีขนาดยาวที่สุด และความถี่สูงสุดของย่านความถี่ใช้งาน (f_U) ไดโพลจะมีขนาดสั้นที่สุด ถ้าให้ l_1 คือ ความยาวของไดโพลตัวแรก (ตัวที่สั้นที่สุด) และ l_N คือ ความยาวของไดโพลตัวสุดท้าย (ตัวที่ยาวที่สุด) เมื่อใช้สมการ (11.1) ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของความยาวไดโพลตัวสุดท้ายและตัวแรกคือ

$$\frac{l_N}{l_1} = \frac{l_N}{l_{N-1}} \cdot \frac{l_{N-1}}{l_{N-2}} \cdot \frac{l_{N-2}}{l_{N-3}} \cdots \frac{l_{n+1}}{l_n} \cdots \frac{l_3}{l_2} \cdot \frac{l_2}{l_1} \tag{11.7}$$

$$= \left(\frac{1}{\tau}\right)^N \tag{11.8}$$

โดย l_N คือ ความยาวของไดโพลตัวที่ยาวสุดและมีความยาวเท่ากับ $\lambda / 2$ ที่ความถี่ต่ำสุด f_L จะได้

$$l_N = \frac{1}{2}\frac{c}{f_L} \tag{11.9}$$

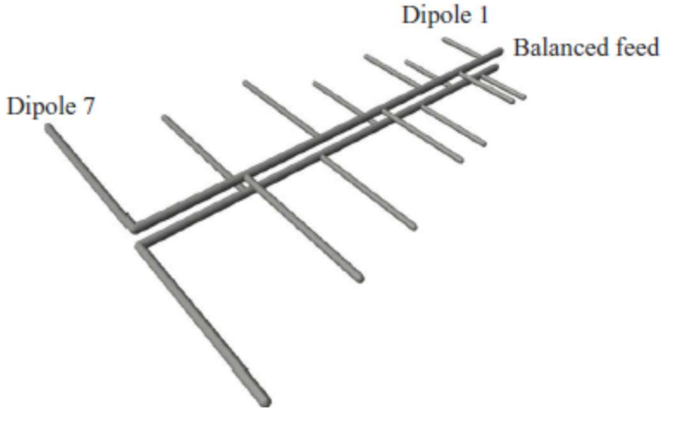
ในทำนองเดียวกันความยาวของไดโพลตัวแรกจะมีความยาวเท่ากับ $\lambda / 2$ ที่ความถี่สูงสุด f_U จะได้

$$l_1 = \frac{1}{2}\frac{c}{f_U} \tag{11.10}$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่า l_N และ l_1 สมการ (11.9) และ (11.10) ลงในสมการ (11.7) จะได้

$$\frac{f_U}{f_L} = \left(\frac{1}{\tau}\right)^{N-1} \tag{11.11}$$

สำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศล็อคเพอริออดิกไดโพลอาร์เรย์นั้น โดยทั่วไปมักใช้เป็นสายนำสัญญาณแบบตัวนำสองเส้น (Two-wire transmission line) โดยที่ตำแหน่งอินพุทจะอยู่ตรงขั้วของไดโพลตัวที่สั้นที่สุดและสายส่งตัวนำสองเส้นจะเชื่อมต่อกับไดโพลตัวอื่น ๆ ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 11.2 จากรูปจะเห็นได้ว่าสายนำสัญญาณตัวนำสองเส้นจะมีเส้นตัวนำเส้นหนึ่งวางอยู่เหนือตัวนำอีกเส้นหนึ่งด้วยระยะห่างคงที่ โดยระยะห่างนี้จะเป็นตัวกำหนดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สำหรับในส่วนของไดโพลนั้น แขนด้านขวาของไดโพลจะถูกเชื่อมต่อกับตัวนำของสายนำสัญญาณที่อยู่ด้านล่างและแขนด้านซ้ายของไดโพลจะถูกเชื่อมต่อกับตัวนำที่อยู่ด้านบน โดยทิศทางการแผ่พลังงานสูงสุดของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์จะอยู่ในทิศทางของไดโพลตัวที่สั้นที่สุด ซึ่งเมื่อเทียบกับสายอากาศยากิ-อูดะแล้ว ไดโพลตัวที่ยาวที่สุดจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนและไดโพลตัวที่สั้นที่สุดจะทำหน้าที่เป็นไดเร็กเตอร์ ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานจึงมีการชี้ทิศทางไปในทิศทางของไดโพลตัวที่สั้นที่สุดเช่นเดียวกับสายอากาศยากิ-อูดะ

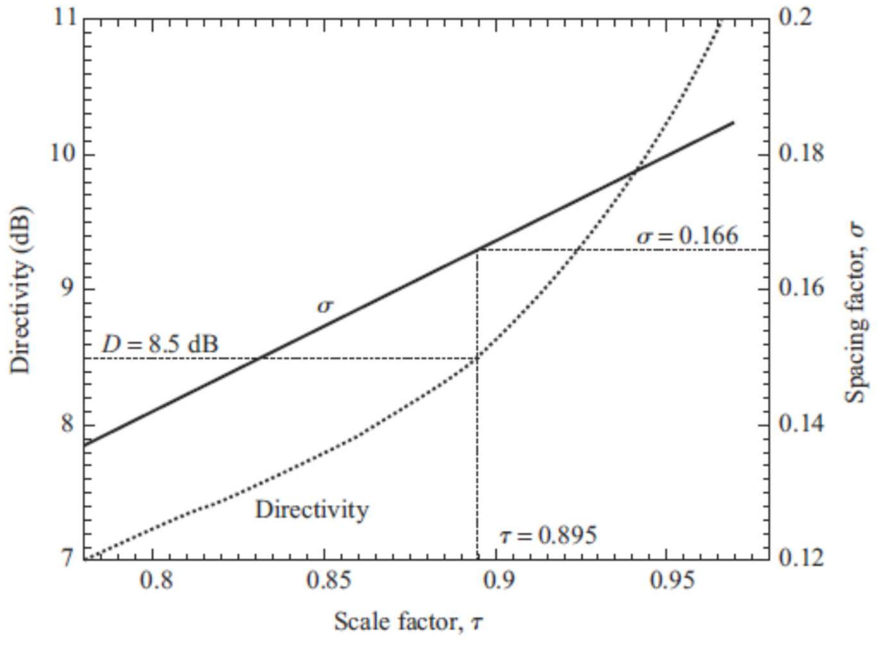


รูปที่ 11.2 โครงสร้างตัวป้อนสัญญาณของสายอากาศล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์

11.3 กระบวนการในการออกแบบสายอากาศล็อกเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการในการออกแบบสายอากาศล็อคเพอริโอดิกเพื่อให้ได้สภาพเจาะจงทิศทางและแบนด์วิทด์ตามที่กำหนด รูปที่ 11.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเจาะจงทิศทาง แฟคเตอร์ขนาด (τ) และแฟคเตอร์ระยะห่าง (σ) ของล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์ โดยกราฟนี้ถูกสร้างสำหรับสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 100 โอห์ม จากรูปที่ 11.3 สามารถสรุปได้ว่าถ้า τ มีค่าน้อยจะทำให้อาร์เรย์มีจำนวนองค์ประกอบน้อย แต่จะมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบกว้าง และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อ τ มีค่ามากขึ้น จะทำให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นแต่จำนวนขององค์ประกอบก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ซึ่งเป้าหมายในการออกแบบก็คือสายอากาศจะต้องมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นไปตามที่กำหนดโดยที่มีจำนวนขององค์ประกอบไม่มากนัก ซึ่งสามารถทำได้โดยลากเส้นตรงในแนวนอนตามค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ต้องการและดูค่าของ τ ที่จุดตัดกับเส้นของสภาพเจาะจงทิศทางนี้ดังแสดงในรูปที่ 11.3 จากนั้นลากเส้นตรงในแนวตั้งจากค่าของ τ ที่ได้ไปตัดกับเส้นของ σ และอ่านค่าของ σ บนสเกลด้านขวามือ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการสายอากาศล็อคเพอริโอดิกที่มีสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 8.5 dB จะได้พารามิเตอร์ของอาร์เรย์นี้คือ $\tau = 0.895$ และ $\sigma = 0.166$ ดังนั้นเมื่อรู้ค่า τ และ σ แล้ว จะสามารถนำไปหาค่าของ α โดยใช้สมการ (11.5)



รูปที่ 11.3 เส้นโค้งสำหรับใช้ในการออกแบบล็อคเพอริโอดิกไดโพลอาร์เรย์

ขั้นตอนต่อมาคือคำนวณหาจำนวนขององค์ประกอบ เนื่องจากความถี่สูงสุด (f_U) และความถี่ต่ำสุด (f_L) ได้ถูกกำหนดขึ้นมาและค่าของ τ ทราบค่าแล้วจากกราฟ ดังนั้นจำนวนขององค์ประกอบอาร์เรย์สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการ (11.11) โดยใส่ล็อคการิทึมเข้าไปทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log(f_U) - \log(f_L) = (N-1)\log\left(\frac{1}{\tau}\right) \tag{11.12}$$

และทำการแก้สมการหาค่าจำนวนองค์ประกอบ (N)

ที่ความถี่ต่ำสุด (f_L) ของย่านความถี่ใช้งาน ไดโพลตัวที่ยาวที่สุดจะเกิดเรโซแนนซ์และสามารถคำนวณความยาวได้จากสมการ (11.9) และไดโพลความยาวลำดับอื่น ๆ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (11.1)

ในทำนองเดียวกันระยะห่างระหว่างไดโพลสามารถหาได้โดยเริ่มจากไดโพลตัวที่ N และใช้สมการ (11.3) ในการหาระยะห่างระห่างไดโพลตัวที่ N และ ($N-1$) และใช้สมการ (11.1) ในการหาระยะห่างระหว่างไดโพลตัวอื่น ๆ ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางของไดโพล (ไม่ว่าจะเป็นไดโพลที่ยาวที่สุดหรือสั้นที่สุด) จะถูกสมมติขึ้น และใช้สมการ (11.1) เพื่อหาเส้นผ่าศูนย์กลางของไดโพลตัวอื่น ๆ โดยกระบวนการในการออกแบบสายอากาศล็อคเพอริโอดิกไดโพลได้แสดงไว้ในตัวอย่างที่ 11.1

<u>ตัวอย่างที่ 11.1</u> จงออกแบบสายอากาศล็อคเพอริโอดิกไดโพลเพื่อให้มีสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 8.5 dB ทำงานในย่านความถี่ 10 MHz ถึง 30 MHz

<u>วิธีทำ</u>

1. หาค่า τ และ σ โดยการใช้กราฟในรูปที่ 11.3 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าที่สภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 8.5 dB จะได้ค่า $\tau = 0.895$ และ $\sigma = 0.166$
2. คำนวณหาค่า α โดยใช้สมการ (11.5) จะได้

$$\tan\alpha = \frac{(1-\tau)}{4\sigma} = \frac{(1-0.895)}{4\times 0.166} = 0.1581$$

ดังนั้นจะได้ค่า $\alpha = 8.99^\circ$

3. คำนวณหาค่าของ N โดยใช้สมการ (11.12) โดยกำหนดให้ $f_U = 30\ \text{MHz}$ และ $f_L = 10\ \text{MHz}$ จะได้

$$\log(30\times10^{6})-\log(10\times10^{6})=(N-1)\log\left(\frac{1}{0.895}\right)$$

ทำการแก้สมการหาค่า N ซึ่งจะได้ $N=10.9$ ในที่นี้ให้ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม จะได้ค่า $N=11$

4. คำนวณหาความยาวของไดโพลแต่ละตัว จากสมการ (11.9) จะได้ความยาวของไดโพลตัวสุดท้ายคือ

$$l_{11}=\frac{1}{2}\frac{3\times10^{8}}{10\times10^{6}}=15 \ \text{ m}$$

5. ใช้สมการ (11.1) เพื่อหาไดโพลความยาวต่าง ๆ คือ

$$\frac{l_n}{l_{n+1}}=\tau=0.895$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาความยาวของไดโพลอื่น ๆ ได้คือ $l_{10}=0.895\times l_{11}=13.425 \text{ m}$, $l_9=0.895\times l_{10}=0.895\times13.425=12.0154 \text{ m}$ และคำนวณแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จะได้ $l_8=10.7538 \text{ m}$, $l_7=9.6246 \text{ m}$, $l_6=8.614 \text{ m}$, $l_5=7.7096 \text{ m}$, $l_4=6.9 \text{ m}$, $l_3=6.1755 \text{ m}$, $l_2=5.5271 \text{ m}$ และ $l_1=4.9468 \text{ m}$

6. คำนวณหาตำแหน่งของไดโพลและระยะห่างระหว่างไดโพล ซึ่งความยาวของไดโพลลำดับที่ n และตำแหน่งของไดโพล (R_n) มีความสัมพันธ์กันโดยดูจากรูปที่ 11.3 คือ

$$R_n=\frac{l_n}{2\tan\alpha}$$

ดังนั้นจะได้

$R_1=l_1/(2\tan\alpha)=4.9468/(2\times0.1582)=15.6341 \text{ m}$, $R_2=17.4681 \text{ m}$,
$R_3=19.5173 \text{ m}$, $R_4=21.8073 \text{ m}$, $R_5=24.3656 \text{ m}$, $R_6=27.2242 \text{ m}$,
$R_7=30.4181 \text{ m}$, $R_8=33.9867 \text{ m}$, $R_9=37.9739 \text{ m}$, $R_{10}=42.429 \text{ m}$,
$R_{11}=47.4067 \text{ m}$.

ซึ่งระยะห่างระหว่างไดโพลลำดับที่ n และ $(n+1)$ สามารถหาได้จากผลต่างของ $(R_{n+1}-R_n)$

7. คำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด โดยสมมติเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดตัวสุดท้ายและใช้สมการ (11.1) เพื่อหาเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดตัวอื่น ๆ ในที่นี้กำหนดให้ $d_{11}=10 \text{ mm}$ ซึ่งจะได้ $d_{10}=8.95 \text{ mm}$, $d_9=8.0103 \text{ mm},\ldots,d_2=3.6847 \text{ mm}$, และ $d_1=3.2978 \text{ mm}$.