

บทที่ 2

การวิเคราะห์สายอากาศยาคี-อูตะ

ความนำ

เนื่องจากว่าความถี่ที่ใช้งานในการควบคุมจราจรทางอากาศอยู่ในย่านความถี่วิทยุช่วง 118-137 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ VHF (Very High Frequency) สายอากาศที่นิยมใช้กับย่านความถี่นี้คือสายอากาศแบบเส้นลวด (wire antenna) [5-6] สำหรับสายอากาศที่ออกแบบเพื่อใช้งานในการควบคุมจราจรทางอากาศในเขตพื้นที่ควบคุม จะต้องมีการเลือกรูปแบบการแผ่พลังงานตามที่ต้องการ ดังนั้นการเลือกสายอากาศยาคี-อูตะจึงเหมาะสมสำหรับการใช้งาน ตามลักษณะโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้สามารถจะปรับองค์ประกอบ (element) ต่าง ๆ เช่น ความยาว ระยะห่าง และจำนวนขององค์ประกอบเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ สำหรับโครงสร้างของสายอากาศยาคี-อูตะดังแสดงในรูป 1.2 มีไดโพลเป็นองค์ประกอบรับพลังงาน ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ จะทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบปรสิติก ค่ากระแสที่ไหลในองค์ประกอบปรสิติกได้จากการเหนี่ยวนำ (induce) โดยวิธีมีวอลคาบปลิง จากตัวไดโพลและองค์ประกอบอื่น ๆ

การหาสัมประสิทธิ์การกระจายกระแสบนสายอากาศยาคี-อูตะ

สายอากาศยาคี-อูตะ สามารถจะวิเคราะห์ได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ การใช้ทฤษฎีประมาณด้วยสมการ 3 พจน์ [7] หรือการใช้ระเบียบวิธีการแปรผัน ในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ แบบจับคู่จุด (point matching) [4-6] เมื่อพิจารณาสายอากาศยาคี-อูตะ ในรูป 2.1 ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไดโพลและองค์ประกอบปรสิติกจำนวน N องค์ประกอบ ในแต่ละองค์ประกอบจะมีการกระจายกระแส (current distribution) ตามสมการ (2-1)

$$I_n(z) = \sum_{m=1}^M I_{nm} \cos(2m-1) \frac{\pi z}{l_n} \quad (2-1)$$

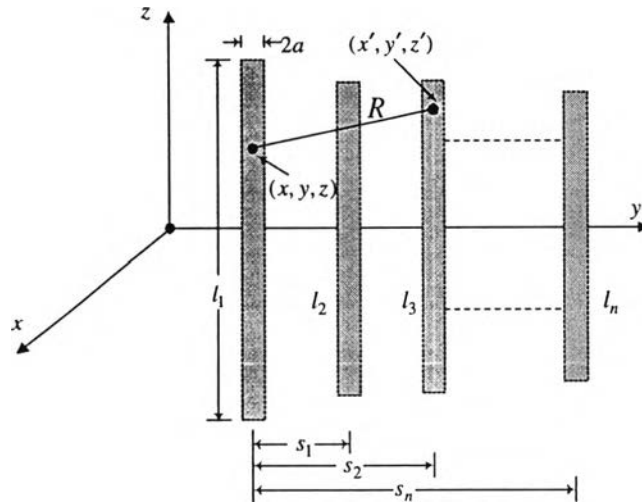
n = ลำดับขององค์ประกอบ

m = จำนวนโหมดของกระแสบนองค์ประกอบ

การกำหนดเงื่อนไขของสมการ (2-1) เป็นไปตามสมมุติฐาน 2 ข้อ คือ

- 1) เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ค่ากระแสที่ $z = \pm l_n / 2$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์

2) การกระจายกระแสจะต้องมีความสมมาตรรอบแกนของสายอากาศ



รูป 2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศยาก็-อูเดที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์แบบจับคู่จุด

ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกระแสบนแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศจะเริ่มจากการใช้สมการอินทิกรัลของ Pocklington ตามสมการ (2-2) หาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในแต่ละองค์ประกอบที่มาถึงจุดสังเกตดังรูป 2.1

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z') \left(\frac{d^2}{dz'^2} + k^2 \right) \frac{e^{-jkR}}{R} dz' = j4\pi\omega\epsilon_0 E_z' \quad (2-2)$$

โดยที่

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$

$I(z')$ = กระแสบนองค์ประกอบที่เป็นแหล่งจ่าย

R = ระยะห่างระหว่างจุดสังเกตและแหล่งจ่าย

(x, y, z) เป็นตำแหน่งจุดสังเกต (observation point)

(x', y', z') เป็นตำแหน่งแหล่งจ่าย (source point)

จากสมการ (2-2) จะได้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z) \frac{d^2}{dz'^2} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) dz' + k^2 \int_{-l/2}^{+l/2} I(z') \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) dz = j4\pi\omega\epsilon_0 E_z' \quad (2-3)$$

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z') \frac{d^2}{dz'^2} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) dz' = I(z') \left[\frac{d}{dz'} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \right]_{-l/2}^{+l/2} - \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{d}{dz'} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \frac{dI(z')}{dz'} dz' \quad (2-4)$$

เพราะว่ากระแสที่ปลายของเส้นลวดแต่ละเส้นเป็น 0 $[I_z(z^+ = +l/2) = I_z(z^- = -l/2) = 0]$

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z') \frac{d^2}{dz'^2} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) dz' = - \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{d}{dz'} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \frac{dI(z')}{dz'} dz' \quad (2-5)$$

จากสมการ (2-5) ใช้อินทิเกรตแบบ by part จะได้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z') \frac{d^2}{dz'^2} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) dz' = \left[dI(z') \frac{e^{-jkR}}{R} \right]_{-l/2}^{+l/2} - \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{d}{dz'} I(z') \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) dz' \quad (2-6)$$

เมื่อแทนสมการ (2-6) ลงในสมการ (2-3) จะได้

$$- \left. \frac{dI(z')}{dz'} \frac{e^{-jkR}}{R} \right|_{-l/2}^{+l/2} + \int_{-l/2}^{+l/2} \left[k^2 I(z') + \frac{d^2}{dz'^2} I(z') \right] \frac{e^{-jkR}}{R} dz' = j4\pi\omega\epsilon_o E'_z \quad (2-7)$$

เมื่อแทนค่า $I_n(z')$ ในสมการ (2-1) ลงในสมการ (2-7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M I_{nm} \left\{ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} \sin \left[(2m-1) \frac{\pi z'_n}{l_n} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} \right\}_{-l_n/2}^{+l_n/2} + \left[k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \\ & \times \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} \cos \left[(2m-1) \frac{\pi z'_n}{l_n} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} dz'_n \left. \right\} = j4\pi\omega\epsilon_o E'_z \end{aligned} \quad (2-8)$$

เพราะว่า cosine เป็นฟังก์ชันคู่ อินทิกรัลในสมการ (2-8) สามารถลดลงเหลือช่วง $0 \leq z' \leq l/2$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M I_{nm} \left\{ (-1)^{m+1} \frac{(2m-1)\pi}{l_n} G_2(x, x', y, y'/z, \frac{l_n}{2}) + \left[k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \right. \\ & \times \left. \int_0^{+l_n/2} G_2(x, x', y, y'/z, z'_n) \cos \left[(2m-1) \frac{\pi z'_n}{l_n} \right] dz'_n \right\} = j4\pi\omega\epsilon_o E'_z \end{aligned} \quad (2-9)$$

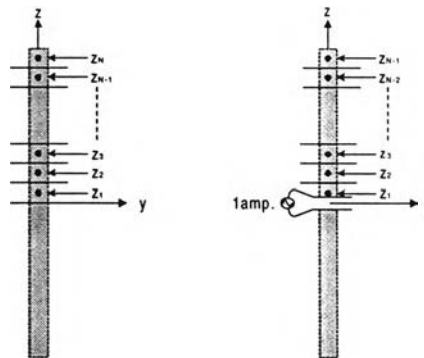
โดยที่

$$G_2(x, x', y, y' / z, z_n) = \frac{e^{-jkR_-}}{R_-} + \frac{e^{-jkR_+}}{R_+} \tag{2-9ก}$$

$$R_{\pm} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + a^2 + (z \pm z')^2} \tag{2-9ข}$$

R_{\pm} คือระยะจากศูนย์กลางขององค์ประกอบหนึ่งไปยังอีกองค์ประกอบหนึ่งตามรูปที่ 2.1

สำหรับการใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ในการวิเคราะห์สายอากาศจะใช้ฟังก์ชันฐานประมาณการกระจายกระแสของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งมีลักษณะฟังก์ชันแบบ entire domain ตามสมการ (2-1) และฟังก์ชันทดสอบเป็นแบบ dirac delta ซึ่งคือการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจับคู่จุด แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ เท่ากับจำนวนโมดของกระแสในแต่ละองค์ประกอบ จากนั้นก็จะจับคู่แต่ละจุด จากสมการ (2-9) ค่าสนามไฟฟ้า E'_z จะเป็นศูนย์ในแต่ละจุดของการจับคู่เท่ากับจำนวน M โมดของกระแส ดังแสดงในรูป 2.2 (ก) สำหรับองค์ประกอบไวงานการจับคู่จะทำเพียง $(M-1)$ จุด โดยที่โหนด m จะมีการป้อนสัญญาณตามรูป 2.2 (ข)



(ก) parasitic element (ข) driven element

รูป 2.2 ลักษณะของสายอากาศยาคิ-อูตะ สำหรับการมวิธีโมเมนต์แบบจับคู่จุด

เมื่อพิจารณาที่จุดสังเกต (x, y, z) บนผิวของตัวนำคลื่น (director) จากเงื่อนไขขอบเขตจะได้ว่า $E'_z = 0$ แต่เนื่องจากสมการ (2-9) เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากองค์ประกอบเดียว เมื่อรวมผลจากทุกๆ องค์ประกอบของแหล่งจ่ายบนองค์ประกอบนำคลื่นจะได้

$$\sum_{n=1}^{D+2} \sum_{m=1}^M G_{p,mn} I_{mn} = 0 \quad \text{เมื่อ } p = 1, 2, \dots, N \times D \tag{2-10}$$

$$G_{p,mn} = \frac{15}{j\pi} \left\{ (-1)^{m+1} \frac{(2m-1)}{l_n} \pi G_2 \left(x, x', y, y' / z, \frac{l_n}{2} \right) + \left[k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \right. \\ \left. \times \int_0^{+l_n/2} G_2(x, x', y, y' / z, z'_n) \cos \left[(2m-1) \frac{\pi z'_n}{l_n} \right] dz'_n \right\} \quad (2-11)$$

D = จำนวนของตัวนำคลื่น

$G_{p,mn}$ = เป็นฟังก์ชันที่ map จาก source point ไปยังจุดสังเกต

เมื่อพิจารณาที่จุดสังเกตบนตัวสะท้อนคลื่น (reflector) จะได้ผลรวมของสนามไฟฟ้าที่ map จากทุก source point เป็นศูนย์ด้วยดังนั้น

$$\sum_{n=1}^{D+2} \sum_{m=1}^M G_{p,mn} I_{mn} = 0 \quad \text{เมื่อ } p = (N \times D) + 1, \dots, N \times (D+1) \quad (2-12)$$

เมื่อพิจารณาที่องค์ประกอบไวงาน (driven) จะได้ผลรวมของสนามไฟฟ้าที่ map จากทุก source point เป็นศูนย์ด้วยดังนั้น

$$\sum_{n=1}^{D+2} \sum_{m=1}^M G_{p,mn} I_{mn} = 0 \quad \text{เมื่อ } p = N \times (D+1) + 1, \dots, N \times (D+2) - 1 \quad (2-13)$$

และที่จุดบ่อนสัญญาณ ($z=0$) บนองค์ประกอบไวงาน สมมติให้มีกระแสไหล 1 หน่วยดังนั้น

$$\sum_{m=1}^M I_{me} = 1 \quad \text{เมื่อ } e = D+2 \quad m = N \times (D+2) \quad (2-14)$$

เมื่อนำสมการ (2-10) ถึง (2-14) มาจัดรูปแบบเป็นเมตริกซ์ จะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสในแต่ละองค์ประกอบได้

การหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาก็-อูตะ

สนามไฟฟ้าในระยะสนามไกลของสายอากาศยาก็-อูตะ ได้จากการรวมกันของสนามแต่ละองค์ประกอบ ที่เกิดจากกระแสแต่ละโมดขององค์ประกอบ เมื่อพิจารณาสถาณไมล์ที่เกิดจากองค์ประกอบเดียวจะ
ได้

$$E_{\theta_1} \approx -j\omega A_{\theta_1} \quad (2-15)$$

$$\begin{aligned} A_{\theta_1} &= -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk(x_n \sin \theta \cos \phi + y_n \sin \theta \sin \phi + z_n' \cos \theta)} dz_n' \\ &= \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \left[e^{jk(x_n \sin \theta \cos \phi + y_n \sin \theta \sin \phi)} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz_n' \cos \theta} dz_n' \right] \end{aligned} \quad (2-16)$$

โดยที่ x_n, y_n เป็นตำแหน่งขององค์ประกอบ ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมที่ได้จากองค์ประกอบทุกตัวคือ

$$E_{\theta} = \sum_{n=1}^N E_{\theta_1} = -jkA_{\theta} \quad (2-17)$$

$$\begin{aligned} A_{\theta} &= \sum_{n=1}^N A_{\theta_1} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(x_n \sin \theta \cos \phi + y_n \sin \theta \sin \phi)} \right. \\ &\quad \left. \times \left[\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz_n' \cos \theta} dz_n' \right] \right\} \end{aligned} \quad (2-18)$$

เมื่อแทนค่ากระแส I_n ลงในสมการ (2-18) และทำการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz_n' \cos \theta} dz_n' = \sum_{m=1}^M I_{mn} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} \cos \left[\frac{(2m-1)\pi z_n'}{l_n} \right] e^{jkz_n' \cos \theta} dz_n' \quad (2-19)$$

เพราะว่า cosine เป็นฟังก์ชันคู่จึงสามารถเขียนสมการ (2-19) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz_n' \cos \theta} dz_n' &= \sum_{m=1}^M I_{mn} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} 2 \cos \left[\frac{(2m-1)\pi z_n'}{l_n} \right] \\ &\quad \times \left[\frac{e^{jkz_n' \cos \theta} + e^{-jkz_n' \cos \theta}}{2} \right] dz_n' \end{aligned} \quad (2-20)$$

$$= \sum_{m=1}^M I_{mn} \int_0^{+l_n/2} 2 \cos \left[\frac{(2m-1)\pi z_n'}{l_n} \right] \cos(kz_n' \cos \theta) dz_n' \quad (2-21)$$

$$= \sum_{m=1}^M I_{mn} \left[\frac{\sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{\sin(Z^-)}{Z^-} \right] \frac{l_n}{2} \quad (2-22)$$

$$Z^+ = \left[\frac{(2m-1)\pi}{l_n} + k \cos \theta \right] \frac{l_n}{2} \quad (2-22a)$$

$$Z^- = \left[\frac{(2m-1)\pi}{l_n} - k \cos \theta \right] \frac{l_n}{2} \quad (2-22b)$$

$$A_\theta = \sum_{n=1}^N A_{\theta n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(x_n \sin \theta \cos \phi + y_n \sin \theta \sin \phi)} \right. \\ \left. \times \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[\frac{\sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{\sin(Z^-)}{Z^-} \right] \right\} \frac{l_n}{2} \quad (2-23)$$

เมื่อแทนค่าศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก ตามสมการ (2-23) ลงในสมการ (2-17) ก็จะสามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้

สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity)

การแสดงความมีทิศทางของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางนอกจากสามารถทำได้โดยแสดงในรูปความกว้างลำคลื่นของพหุประฐานแล้วยังสามารถทำได้โดยแสดงสภาพเจาะจงทิศทาง ซึ่งได้แก่อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่สายอากาศสามารถแผ่พลังงานได้ดีที่สุดต่อความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ดังแสดงในสมการ (2-24)

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_o} \quad (2-24)$$

$$= \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2-25)$$

$$= 4\pi \frac{\left| E(\phi = 0, \theta = \frac{\pi}{2}) \right|^2}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} E(\phi, \theta) \sin \theta d\phi d\theta} \quad (2-26)$$

D_0 = สภาพเจาะจงทิศทาง

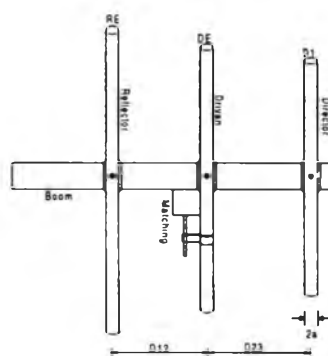
U_{\max} = ความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่สายอากาศแผ่ได้ดีที่สุด

P_{rad} = กำลังที่สายอากาศแผ่ออกไป

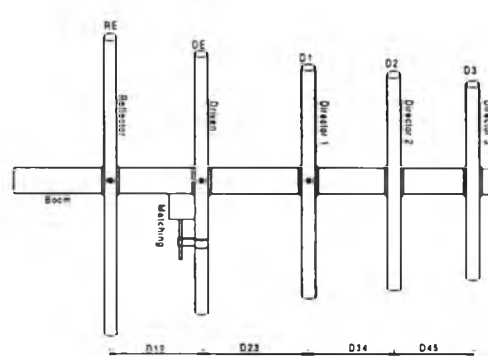
ผลการวิเคราะห์สายอากาศยาก็-อุตะด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์

1) เมื่อวิเคราะห์สายอากาศยาก็-อุตะ 3 องค์ประกอบในรูป 2.3 (ก) ประกอบด้วย $RE=0.504\lambda$ $DE = 0.48\lambda$ $D1=0.45\lambda$ $D12=0.15\lambda$ $D23=0.21\lambda$ และให้รัศมีของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 0.003369λ จะได้ค่าความกว้างลำ (beamwidth) ระนาบ $H=82^\circ$ ตามรูป 2.4(ก) ความกว้างลำระนาบ $E=57^\circ$ ตามรูป 2.5(ก) และอัตราส่วนหน้าต่อหลัง (Front to back ratio) = 10.67dB จากนั้นเมื่อปรับระยะห่างระหว่างตัวนำคลื่นกับตัวสะท้อนคลื่น ($D23$) เป็น 0.15λ จะทำให้ได้ความกว้างลำระนาบ $H=96^\circ$ ตามรูป 2.4 (ข) ระนาบ $E = 61^\circ$ ตามรูป 2.5(ข) และอัตราส่วนหน้าต่อหลังเท่ากับ 18.63 dB และเมื่อปรับระยะห่างระหว่างตัวนำคลื่นและตัวสะท้อนคลื่น ($D23$) เป็น 0.12λ จะได้ความกว้างลำระนาบ $H=108^\circ$ ตามรูป 2.4 (ค) ระนาบ $E=65^\circ$ ตามรูป 2.5(ค) และอัตราส่วนหน้าต่อหลังเท่ากับ 23.38 dB

2) เมื่อวิเคราะห์สายอากาศยาก็-อุตะ 5 องค์ประกอบในรูป 2.3 (ข) ประกอบด้วย $RE=0.51\lambda$ $DE=0.47\lambda$ $D1=0.45\lambda$ $D2=0.43\lambda$ $D3=0.41\lambda$ $D12=0.15\lambda$ $D23=0.15\lambda$ $D34=0.15\lambda$ $D45=0.15\lambda$ และรัศมีของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 0.003369λ จะได้ความกว้างลำระนาบ $H=76^\circ$ ตามรูป 2.6(ก) ความกว้างลำระนาบ $E=57^\circ$ ตามรูป 2.7(ก) และอัตราส่วนหน้าต่อหลังเท่ากับ 17.5 dB เมื่อปรับ $D34=0.18\lambda$ $D45=0.20\lambda$ จะได้ความกว้างลำระนาบ $H=74^\circ$ ตามรูป 2.6(ข) ระนาบ $E = 55^\circ$ ตามรูป 2.7 (ข) และอัตราส่วนหน้าต่อหลังเท่ากับ 36.3 dB เมื่อปรับความยาว DE เท่ากับ 0.49λ ปรับระยะ $D34$ เป็น 0.16λ และระยะ $D45$ เป็น 0.24λ จะได้ความกว้างลำระนาบ $H=74^\circ$ ตามรูป 2.6(ค) ระนาบ $E=55^\circ$ ตามรูป 2.7 (ค) และอัตราส่วนหน้าต่อหลังเท่ากับ 21.89 dB

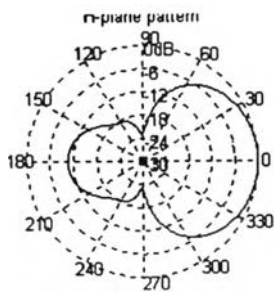


ก) สายอากาศยาก็-อุตะ 3 องค์ประกอบ



ข) สายอากาศยาก็-อุตะ 5 องค์ประกอบ

รูป 2.3 โครงสร้างของสายอากาศยาก็-อุตะ



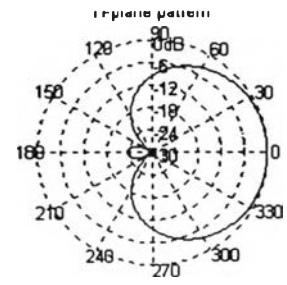
Beamwidth = 82° F / B = 10.67 dB

ก)



Beamwidth = 96° F / B = 18.62 dB

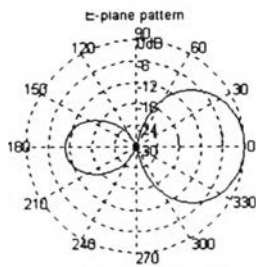
ข)



Beamwidth = 108° F / B = 23.38 dB

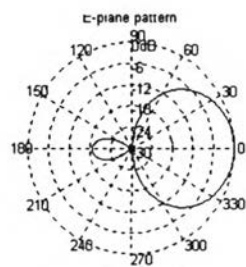
ค)

รูป 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาก็-ฮุดะ 3E ระนาบ H



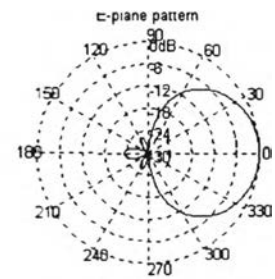
Beamwidth = 57° F / B = 10.67 dB

ก)



Beamwidth = 61° F / B = 18.63 dB

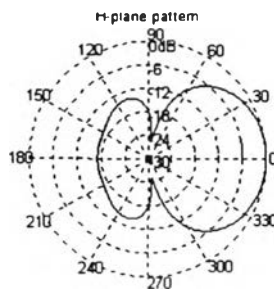
ข)



Beamwidth = 65° F / B = 23.37 dB

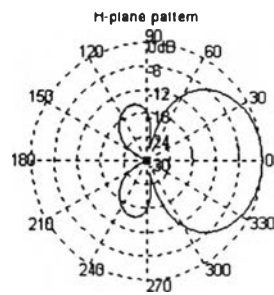
ค)

รูป 2.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาก็-ฮุดะ 3E ระนาบ E



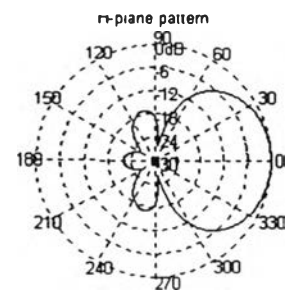
Beamwidth = 76° F / B = 17.5 dB

ก)



Beamwidth = 74° F / B = 36.32 dB

ข)

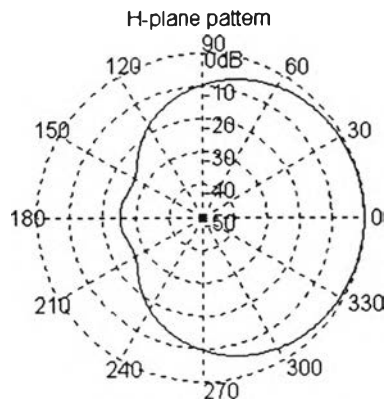


Beamwidth = 74° F / B = 21.89 dB

ค)

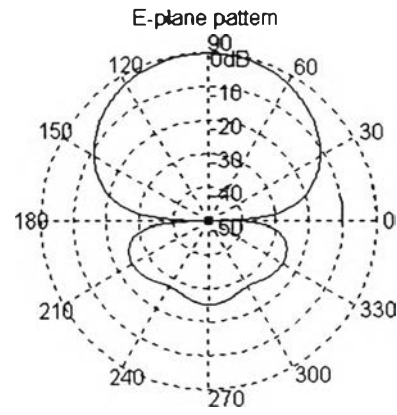
รูป 2.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาก็-ฮุดะ 5E ระนาบ H

รูป 2.12 และระนาบ E รูป 2.13 ก็มีผลใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม quickyagi ในระนาบ H รูป 2.14 และระนาบ E รูป 2.15



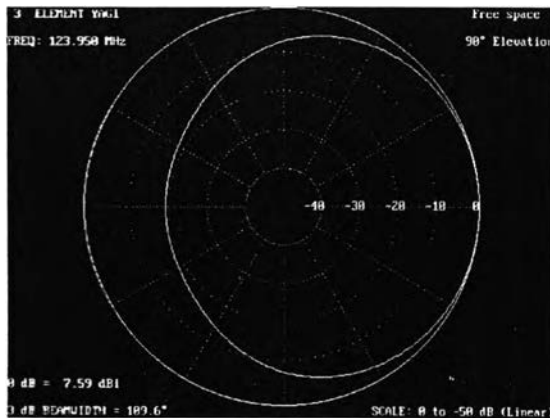
Beamwidth = 106° F / B = 25dB

รูป 2.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-อูตะ 3 องค์ประกอบระนาบ H ที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์แบบจับคู่จุด

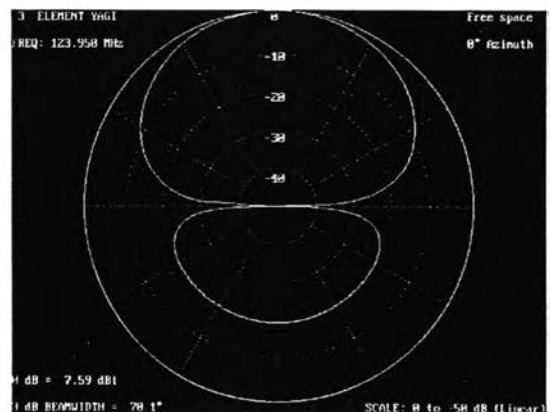


Beamwidth = 63° F / B = 25dB

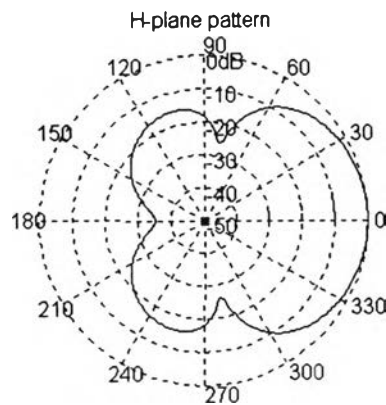
รูป 2.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-อูตะ 3 องค์ประกอบ ระนาบ E ที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์แบบจับคู่จุด



รูป 2.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-อูตะ 3 องค์ประกอบระนาบ H ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม quickyagi

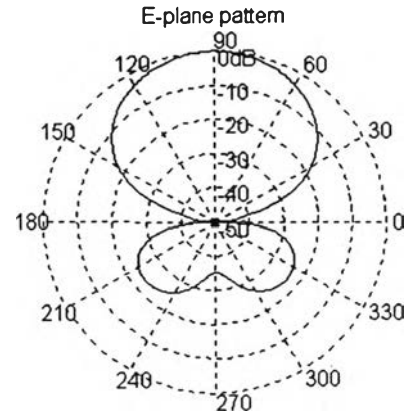


รูป 2.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-อูตะ 3 องค์ประกอบระนาบ E ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม quickyagi



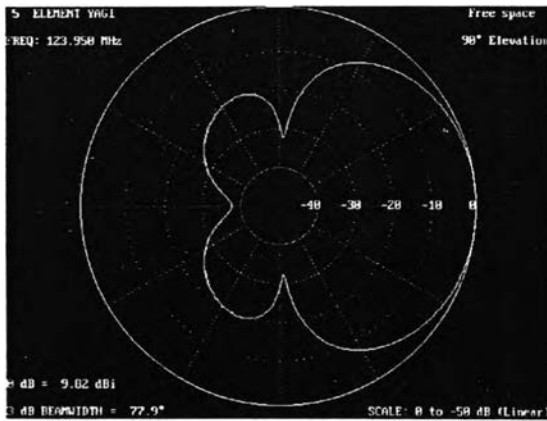
Beamwidth = 74° F / B = 35.26dB

รูป 2.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-
อุตะ 5 องค์ประกอบระนาบ H ที่วิเคราะห์
ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์แบบจับคู่จุด

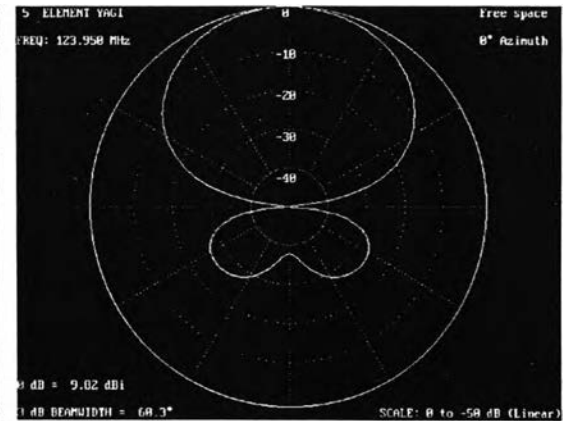


Beamwidth = 55° F / B = 35.24dB

รูป 2.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-
อุตะ 5 องค์ประกอบ ระนาบ E ที่วิเคราะห์
ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์แบบจับคู่จุด



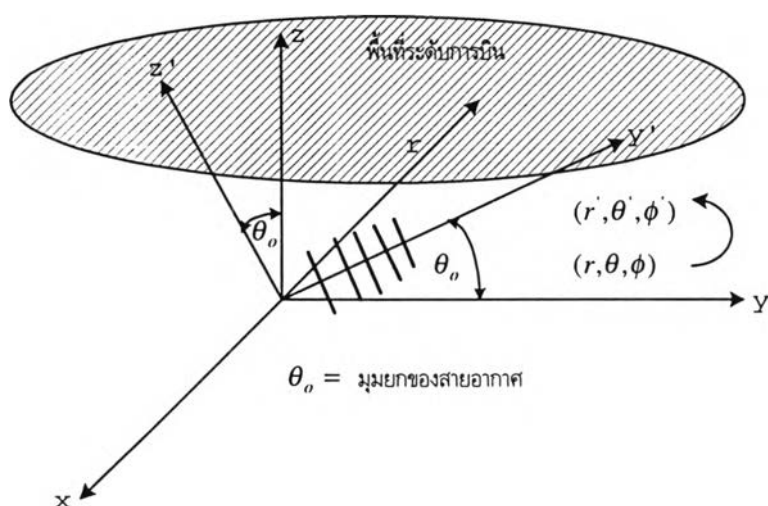
รูป 2.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-
อุตะ 5 องค์ประกอบระนาบ H ที่วิเคราะห์
ด้วยโปรแกรม quickyagi



รูป 2.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคี-
อุตะ 5 องค์ประกอบระนาบ E ที่วิเคราะห์
ด้วยโปรแกรม quickyagi

การหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระดับพื้นที่การควบคุม

การหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศของแต่ละสถานี จะต้องเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานที่กำหนดจากพื้นที่การควบคุม ซึ่งเกี่ยวข้องกับสายอากาศที่มีมุมยกของแต่ละสถานีภาคพื้นดินกระทำกับตำแหน่งต่าง ๆ ในพื้นที่การควบคุมดังแสดงใน รูป 2.16



รูป 2.16 แบบรูปการแผ่พลังงานในพื้นที่ควบคุมกระทำกับสายอากาศที่มีมุมยก

จากรูปจะต้องแปลงพิกัดจาก r, θ, ϕ ในพื้นที่ควบคุมเป็น r', θ', ϕ' เพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระดับพื้นที่การควบคุม เมื่อทำเป็นสมการเวกเตอร์ในพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้ว่า

$$\vec{r}' = \vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (2-28)$$

$$x' = x \quad (\text{เนื่องจากทิศทางของสายอากาศอยู่ในระนาบ } yz)$$

$$y' = y \cos \theta_0 + z \sin \theta_0 \quad (2-29)$$

$$z' = y \sin \theta_0 + z \cos \theta_0 \quad (2-30)$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ 0 & -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

$$x = r \sin \theta \cos \phi \quad (2-32)$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi \quad (2-33)$$

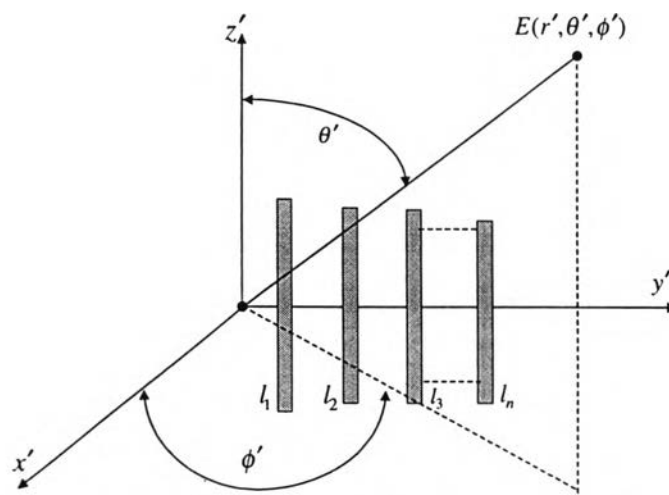
$$z = r \cos \theta \quad (2-34)$$

(r, θ, ϕ) เป็นตำแหน่งในพื้นที่การควบคุมของแต่ละสถานี

$$\tan \theta' = \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{z'} \quad \text{ดังนั้น} \quad \theta' = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{z'} \quad (2-35)$$

$$\tan \phi' = \frac{y'}{x'} \quad \text{ดังนั้น} \quad \phi' = \tan^{-1} \frac{y'}{x'} \quad (2-36)$$

โดยที่ค่า θ', ϕ' เป็นพิกัดทรงกลมของสายอากาศที่ใช้ในการหาค่าสนามไฟฟ้า เมื่อเขียนพิกัดของสายอากาศใหม่ ซึ่งใช้คำนวณสนามไฟฟ้าในพื้นที่ที่กำหนดแสดงดังรูป 2.17 โดยที่สายอากาศวางอยู่ในระนาบ $y'z'$ และจากพิกัดที่ได้จะสามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระดับการบินต่าง ๆ โดยจะต้องคำนวณมุมยกของสายอากาศเพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระดับการบินสูงสุด โดยคำนวณมุมยกของสายอากาศคำนวณจากระดับการบินสูงสุดและระยะควบคุมไกลที่สุด ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานที่ระดับต่ำสุดจะต้องคำนวณมุมที่ระดับการบินต่ำสุดว่ามีค่ากี่องศาแล้วคำนวณหาแบบรูปการแผ่พลังงานต่อไป



รูป 2.17 พิกัดของสายอากาศที่ใช้สำหรับหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่มีมุมยก