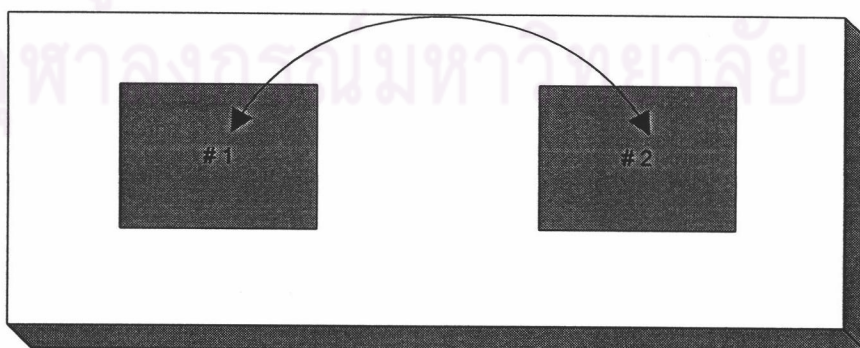


การวิเคราะห์มิวซลคัปปลิงระหว่างองค์ประกอบของแผงสายอากาศไมโครสตริป

จากบทที่ 2 ที่ได้กล่าวถึงลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริปที่มีอยู่องค์ประกอบเดียว ไม่ว่าจะเป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้า การกระจายกระแสซึ่งนำไปสู่แบบรูปการแผ่พลังงานที่ระยะสนามไกล รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่จะมีผลกระทบต่อคุณลักษณะดังกล่าวเมื่อมีการเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนขนาดของแผ่นตัวนำ การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กทริกของชั้นไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดป้อนกำลัง เป็นต้น และอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อออกแบบเป็นแผงสายอากาศ (array antennas) ก็คือการเกิดปรากฏการณ์มิวซลคัปปลิงระหว่างองค์ประกอบของแผงสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งในบทนี้จะอธิบายลักษณะการเกิดปรากฏการณ์และวิเคราะห์ถึงผลกระทบของมิวซลคัปปลิงที่มีต่อแบบรูปการแผ่พลังงานที่ระยะสนามไกลของแผงสายอากาศไมโครสตริปที่มีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ

กรรมวิธีและขั้นตอนในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์มิวซลคัปปลิงนั้นก็คือ การคำนึงถึงผลกระทบของการแผ่พลังงานออกมาในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (รูป 3.1 (ลูกศร)) จากองค์ประกอบใด ๆ ในแผงสายอากาศที่ไปตกกระทบที่องค์ประกอบใกล้เคียงแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดการกระจายกระแสเนื่องจากมิวซลคัปปลิงที่องค์ประกอบใกล้เคียงนั้น ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หาแบบรูปการแผ่พลังงานที่เกิดจากมิวซลคัปปลิงที่ระยะสนามไกล (E_m) แล้วนำไปรวมกับแบบรูปการแผ่พลังงานเดิมนั้นก็จะทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่รวมผลของมิวซลคัปปลิงที่ระยะสนามไกล



รูป 3.1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์มิวซลคัปปลิงในแผงสายอากาศไมโครสตริป

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานจะไม่คำนึงถึงมิวชวลคัปปลิง กล่าวคือสามารถหาค่าสนามไฟฟ้ารวมจากผลคูณของค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากองค์ประกอบต้นเดียว (ที่วางไว้ที่ตำแหน่งอ้างอิง) กับตัวประกอบแถวลำดับ (array factor) หรือเรียกวิธีแบบนี้ว่าผลคูณแบบรูป (pattern multiplication) ตัวอย่างเช่นในบทที่แล้วได้กล่าวถึงการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของของสายอากาศไมโครสตริปที่มีอยู่องค์ประกอบเดียวโดยอาศัยแบบจำลองชนิดโพรง โดยแบบจำลองชนิดโพรงที่เกิดขึ้นนี้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกแยกเป็นสองส่วนคือส่วนที่อยู่ภายในโพรงและส่วนที่อยู่ภายนอกโพรง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนที่อยู่ภายนอกโพรงสามารถหาได้จากการใช้ทฤษฎีสถานสมมูลซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกโพรงสามารถหาค่าได้หากทราบค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของโพรง โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกระแสแม่เหล็กเสมือนหรือแหล่งกระแสไฟฟ้าเสมือนที่ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกโพรง เนื่องจากแผ่นกราวด์มีขนาดใหญ่มากจนกระทั่งประมาณได้ว่ามีขนาดเป็นอนันต์ ทำให้เสมือนมีแหล่งกระแสเสมือนเกิดขึ้นด้านหลังของแผ่นกราวด์ตามทฤษฎีเงา ผลรวมของแหล่งกระแสเสมือนที่เกิดขึ้นด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นกราวด์สามารถแทนได้ด้วยแหล่งกระแสเสมือนบนระนาบเดียวกันกับแผ่นกราวด์และเนื่องจากแหล่งกระแสที่เกิดขึ้นมีทิศทางขนานกับแผ่นกราวด์เท่านั้น ฉะนั้นขนาดของแหล่งกระแสเสมือนที่ได้จึงมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าดังรูป 2.11 ค. แหล่งกระแสเสมือนของแบบจำลองสายอากาศในรูป 2.5 ที่หาได้จากทฤษฎีสถานสมมูลมีเพียงแหล่งกระแสแม่เหล็กเสมือนขนาดเท่ากับสนามไฟฟ้าในแนวแกน z และมีทิศทางเป็นไปตามสมการ 3.1

$$\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E} = \vec{a}_z \times nE_z \quad (3.1)$$

จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปด้วยแบบจำลองแบบโพรงนี้ จะต้องหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโพรงเป็นอันดับแรกเพื่อนำไปสู่ลักษณะสมบัติอื่น ๆ ของสายอากาศที่ต้องการศึกษา โดยมีเงื่อนไขสองประการคือแผ่นกราวด์ของสายอากาศมีขนาดใหญ่มากและความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกน้อยกว่า 0.02 เท่าของความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ซึ่งสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโพรงนั้นก็คือ

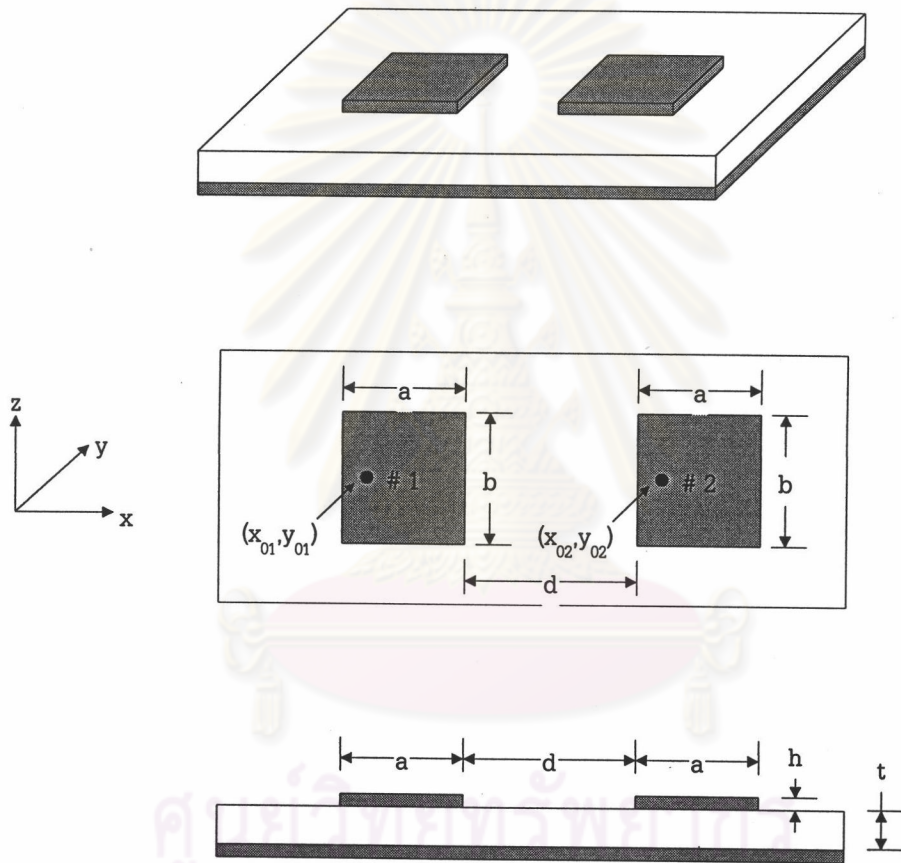
$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} C_{nm} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.17)$$

โดยที่พิจารณาเฉพาะโหมด TM_{10} นั้นจะทำให้ได้

$$E_z = C_{10} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.53)$$

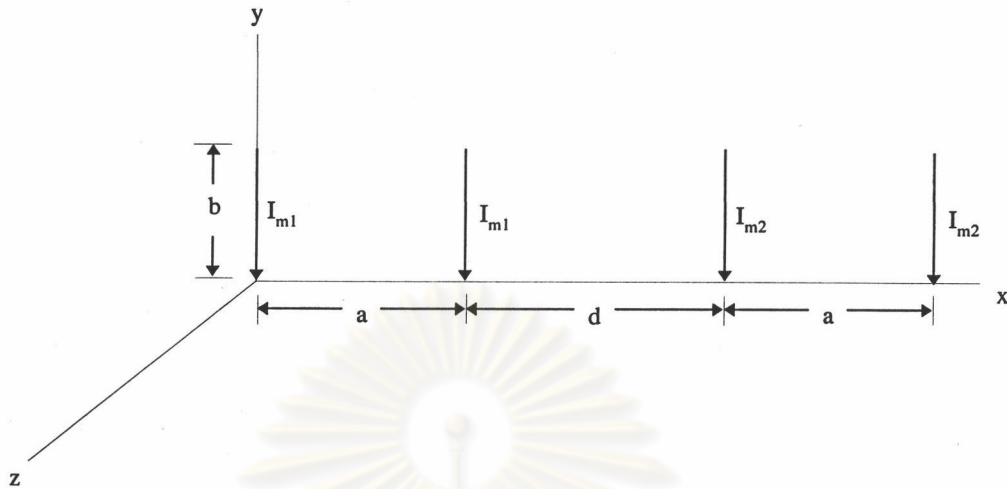
ซึ่งเมื่อนำค่าสนามไฟฟ้า E_z ในสมการ 2.53 ไปแทนในสมการเงื่อนไขขอบเขต (สมการ 3.1) ทำให้ได้การกระจายกระแสที่ขอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.12 และจากการกระจายกระแสดังกล่าวก็จะนำไปช่วยในการวิเคราะห์หาแบบรูปการแผ่พลังงานโดยการหาค่าของเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า ($\vec{F}(\vec{r})$) และจากสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะสนามไกล (สมการ 2.70 ถึง 2.72)

แต่ถ้าสายอากาศไมโครสตริปนั้นทำงานในลักษณะของแผงสายอากาศโดยมีองค์ประกอบอยู่ 2 องค์ประกอบและมีการวางตัวดังแสดงในรูป 3.2



รูป 3.2 แผงสายอากาศไมโครสตริปที่มี 2 องค์ประกอบ โดยที่ x_{01}, y_{01} คือตำแหน่งของการบ่อนกำลังที่องค์ประกอบที่ 1 ในแผงสายอากาศ x_{02}, y_{02} คือตำแหน่งของการบ่อนกำลังที่องค์ประกอบที่ 2 ในแผงสายอากาศ

การวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานที่ระยะสนามไกลก็จะเป็นลักษณะเดียวกันกับการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่มีองค์ประกอบเดียว กล่าวคือในการหาค่าเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า ($\vec{F}(\vec{r})$) ก็จะมีแหล่งกระแสแม่เหล็กเสมือนเพิ่มขึ้นไปอีก 2 ตำแหน่ง (ที่ $x = a + d$ และ $x = 2a + d$) เนื่องจากองค์ประกอบที่ 2 นั้นเอง ดังแสดงในรูป 3.3



รูป 3.3 แหล่งกระแสแม่เหล็กเสมือนของทั้ง 2 องค์กรประกอบ

และสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะสนามไกลก็จะมีองค์ประกอบเพิ่มขึ้นดังนี้

$$E_{\theta}(\theta, \phi) = -j\omega Z_0(F_{\phi_1}(\vec{r}) + F_{\phi_2}(\vec{r})) \quad (3.2)$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi) = j\omega Z_0(F_{\theta_1}(\vec{r}) + F_{\theta_2}(\vec{r})) \quad (3.3)$$

โดยที่ $\vec{F}_{\theta_1}(\vec{r})$ และ $\vec{F}_{\phi_1}(\vec{r})$ คือเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าขององค์กรประกอบที่ 1

$\vec{F}_{\theta_2}(\vec{r})$ และ $\vec{F}_{\phi_2}(\vec{r})$ คือเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าขององค์กรประกอบที่ 2

ดังนั้นถ้าแผงสายอากาศไมโครสตริปมีมากกว่า 2 องค์กรประกอบ (n องค์กรประกอบ) จะทำให้สมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะสนามไกลเขียนอยู่ในรูปทั่วไปดังสมการ 3.4 และ 3.5

$$E_{\theta}(\theta, \phi) = -j\omega Z_0(F_{\phi_1}(\vec{r}) + F_{\phi_2}(\vec{r}) + \dots + F_{\phi_n}(\vec{r})) \quad (3.4)$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi) = j\omega Z_0(F_{\theta_1}(\vec{r}) + F_{\theta_2}(\vec{r}) + \dots + F_{\theta_n}(\vec{r})) \quad (3.5)$$

โดยที่ $\vec{F}_{\theta_n}(\vec{r})$ และ $\vec{F}_{\phi_n}(\vec{r})$ คือเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าขององค์กรประกอบที่ n

แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะสนามไกล (สมการ 3.4 และ 3.5) นั้นยังไม่ได้คำนึงถึงปรากฏการณ์มิวชวลคัปปลิงหรือการคำนึงถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ที่แผ่ออกมารบกวนกับองค์ประกอบใกล้เคียง (ดังแสดงในรูป 3.1) ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้น โดยในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้นั้นมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้
ถ้าพิจารณาในกรณีที่ไม่มีแหล่งกระแส (source free) จะทำให้

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.6)$$

ทำให้ได้ว่า

$$\vec{D} = -\nabla \times \vec{F} \quad (3.7)$$

$$\vec{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{F} \quad (3.8)$$

และจากสมการ (2) ของแมกซ์เวลล์

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H}_F &= j\omega\epsilon\vec{E}_F \\ &= -j\omega\nabla \times \vec{F} \end{aligned}$$

จะได้

$$\nabla \times (\vec{H}_F + j\omega\vec{F}) = 0 \quad (3.9)$$

จากเวกเตอร์เอกลักษณ์ $\nabla \times (-\nabla\phi_m) = 0$

ดังนั้น

$$\vec{H}_F = -\nabla\phi_m - j\omega\vec{F} \quad (3.10)$$

และจากสมการ (1) ของแมกซ์เวลล์

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E}_F &= -\vec{M} - j\omega\mu\vec{H}_F \\ &= -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times (\nabla \times \vec{F}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

และ

$$\nabla \times \vec{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} [\nabla(\nabla \cdot \vec{F}) - \nabla^2 \vec{F}] \quad (3.12)$$

เพราะฉะนั้น
$$\nabla^2 \vec{F} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{F} = \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) - \epsilon \vec{M} + j\omega \mu \epsilon \nabla \phi_m \quad (3.13)$$

และกำหนดให้
$$\nabla \cdot \vec{F} = -j\omega \mu \epsilon \phi_m \quad (3.14)$$

$$\phi_m = -\frac{1}{j\omega \mu \epsilon} \cdot \nabla \times \vec{F} \quad (3.15)$$

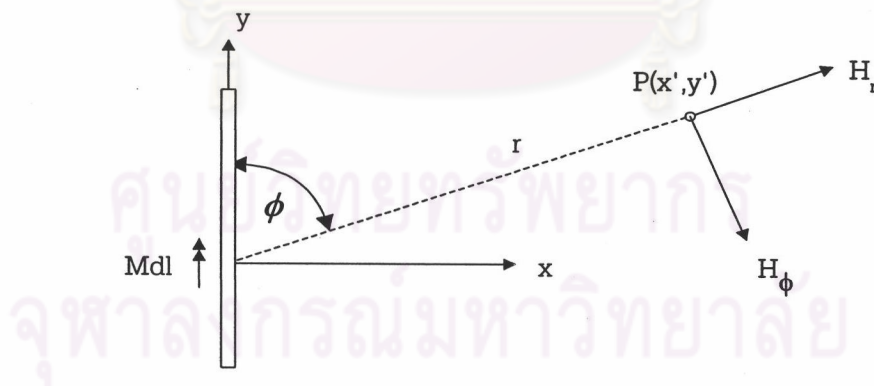
ทำให้ได้
$$\nabla^2 \vec{F} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{F} = -\epsilon \vec{M} \quad (3.16)$$

ดังนั้นจะได้สนามแม่เหล็กดังสมการ 3.17

$$\vec{H}_F = \frac{1}{j\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) - j\omega \vec{F} \quad (3.17)$$

โดยที่สมการของเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า (สมการ 2.69) คือ

$$\vec{F}(\vec{r}) = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \oint \vec{M}(\vec{r}') \frac{e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dl \quad (2.69)$$



รูป 3.4 ระบบพิกัดในการพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบสนามใกล้
ที่จุดสังเกตอยู่ในระนาบเดียวกับแหล่งกระแส

ซึ่งลักษณะของปัญหาในขณะนี้ (ดังรูป 3.4) เหมาะที่จะใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก \$(r, \phi, z)\$ มาช่วยในการวิเคราะห์ซึ่งทำให้สมการของเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าจะเป็นดังนี้

$$\vec{F}_y = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \oint \vec{M}(\vec{r}') \frac{e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dl (\cos\phi\vec{r} - \sin\phi\vec{\phi}) \quad (3.18)$$

ทำให้ได้สนามแม่เหล็กขององค์ประกอบ \vec{r} และองค์ประกอบ $\vec{\phi}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{H}_r(x, y) &= -j\omega\vec{F}_r - \frac{j}{\omega\mu\epsilon} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\vec{F}_r) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \vec{F}_\phi}{\partial \phi} \right) \right] \\ &= \frac{-jMdl e^{-jk_0 r}}{4\pi} \left(\frac{\omega\epsilon}{r} \cos\phi + \frac{\cos\phi}{\omega\mu} \left(\frac{-k_0^2}{r} + \frac{2jk_0}{r^2} + \frac{2}{r^3} \right) \right) \\ &= \frac{Mdl \cos\phi e^{-jk_0 r}}{2\pi Z_0 r^2} \left(1 + \frac{1}{jk_0 r} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_\phi(x, y) &= -j\omega\vec{F}_\phi - \frac{j}{\omega\mu\epsilon} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial \phi} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r\vec{F}_r) \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \vec{F}_\phi}{\partial \phi} \right) \right] \\ &= \frac{Mdl e^{-jk_0 r} \sin\phi}{4\pi} \left(\frac{j\omega\epsilon}{r} + \frac{j}{\omega\mu} \left(\frac{-jk_0}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \right) \\ &= \frac{jMdl e^{-jk_0 r} k_0 \sin\phi}{4\pi Z_0 r} \left(1 + \frac{1}{jk_0 r} - \frac{1}{(k_0 r)^2} \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

ซึ่งสมการสนามแม่เหล็กทั้งสององค์ประกอบ (\vec{r} และ $\vec{\phi}$) นั้นจะช่วยในการหาค่าสนามแม่เหล็กที่แผ่ไปตกกระทบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ขององค์ประกอบใกล้เคียงในแผงสายอากาศ ฉะนั้นสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งใด ๆ เนื่องจากแหล่งกระแสเสมือนจะมีค่าเท่ากับ

$$H_x(x, y) = \int [H_\theta(x, y) \cos\theta + H_r(x, y) \sin\theta] dl \quad (3.21)$$

$$H_y(x, y) = \int [-H_\theta(x, y) \sin\theta + H_r(x, y) \cos\theta] dl \quad (3.22)$$

จากสนามแม่เหล็กที่ได้จากสมการ (3.21) และ (3.22) นี้จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจากเงื่อนไขขอบเขต $\vec{J}(x, y) = \vec{n} \times \vec{H}(x, y)$ และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดการแผ่พลังงานอีกทอด

หนึ่งซึ่งสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะสนามไกลที่เกิดจากปรากฏการณ์มิวซลคัปปลิงได้ดังสมการ 3.24 และ 3.25

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int \vec{J}(x, y) \frac{\exp(-jk_0\vec{r})}{\vec{r}} dl \quad (3.23)$$

$$\vec{E}_{\theta m}(\theta, \phi) = -j\omega A_\theta(\vec{r}) \quad (3.24)$$

$$\vec{E}_{\phi m}(\theta, \phi) = -j\omega A_\phi(\vec{r}) \quad (3.25)$$

โดยที่ $\vec{A}(\vec{r})$ คือค้ำยเวกเตอร์แม่เหล็ก $\vec{E}_{\theta m}$ และ $\vec{E}_{\phi m}$ คือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการคัปปลิงในแผงสายอากาศ ไมโครสตริป และสนามไฟฟ้ารวมมีค่าเท่ากับ

$$\vec{E}_{total} = \vec{E} + \vec{E}_m \quad (3.26)$$

เมื่อ \vec{E} คือสนามไฟฟ้าที่ระยะสนามไกล (จากสมการ 3.4 และ 3.5)

\vec{E}_m คือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการคัปปลิงที่ระยะสนามไกล (จากสมการ 3.24 และ 3.25)

และ \vec{E}_{total} คือสนามไฟฟ้ารวมคือสนามไฟฟ้าที่รวมผลของมิวซลคัปปลิงซึ่งทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่รวมผลของมิวซลคัปปลิง

โดยที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะสนามไกลนั้นม็องค์ประกอบในทิศทางเคลื่อนที่น้อยมาก จึงสามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ (plane wave) ซึ่งสนามไฟฟ้ารวมที่ระยะสนามไกลมีค่าเท่ากับ

$$\vec{E} = E_\theta \vec{a}_\theta + E_\phi \vec{a}_\phi \quad (3.27)$$

$$|\vec{E}| = |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2 \quad (3.28)$$

ความหนาแน่นในการแผ่พลังงานในระนาบใด ๆ มีค่าเท่ากับ

$$P_{rad}(\theta, \phi) = \frac{1}{2Z_0} r^2 (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) \quad (3.29)$$

และเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของปรากฏการณ์มิวซลคัปปลิงสมการ 3.29 จะกลายเป็น

$$P_{rad}(\theta, \phi) = \frac{1}{2Z_0} r^2 (|E_\theta + E_{\theta m}|^2 + |E_\phi + E_{\phi m}|^2) \quad (3.30)$$

โดยที่กำลังงานรวมที่แผ่ออกไปทุก ๆ ระนาบมีค่าเท่ากับ

$$P_T = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2Z_0} |\vec{E}|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.31)$$

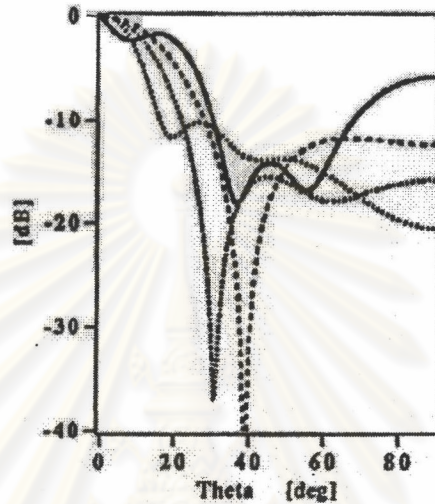
เนื่องจากในการวิเคราะห์นั้น ด้วยเหตุจากสมมติฐานที่ว่าแผ่นกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์นั้นจึงทำให้ในการอินทิเกรต (ในสมการ 3.31) เทียบกับมุม θ จึงอยู่ในช่วง 0 ถึง $\frac{\pi}{2}$ เท่านั้นไม่จำเป็นต้องอินทิเกรตถึง π

$$\text{ที่ซึ่ง} \quad D = \frac{4\pi P_{rad}}{P_T} \quad (3.32)$$

$$D(\text{dB}) = 10 \log\left(\frac{4\pi P_{rad}}{P_T}\right) \quad (3.33)$$

จากสมการ 3.29 และ 3.30 นั้นก็จะสามารถพิจารณาเทียบกันได้ระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานที่รวมผลของมิวซลคัปปลิงและแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่รวมผลของมิวซลคัปปลิง ซึ่งอาจจะพบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อแบบรูปการแผ่พลังงานไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มหรือการลดระดับของแบบรูป การเลื่อนตำแหน่งและระดับของจุดศูนย์ที่ตำแหน่งเชิงมุมต่าง ๆ หรือการบานออกของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ระนาบใด ๆ เมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่น้อยลงเรื่อย ๆ ดังเช่นงานของ Martin Gimersky และ Jens Bornemann (1992) ซึ่งสามารถสรุปความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อแบบรูปการแผ่พลังงานเนื่องจากมิวซลคัปปลิง(เส้นทึบ (solid line) แสดงถึงแบบรูปการแผ่พลังงานที่รวมผลของมิวซลคัปปลิงแบบสมมาตร และเส้นประ (dash line) แสดงถึงแบบรูปการแผ่พลังงานไม่รวมผลของมิวซลคัปปลิง) ดังนี้จุดศูนย์ ณ ตำแหน่งเชิงมุมที่ 40 องศา นั้นจะมีระดับเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ประมาณ -17 dB รวมถึงการเลื่อนตำแหน่งไปอยู่ตำแหน่งเชิงมุมที่ 37 องศาและแบบรูปจะมีลักษณะที่ไม่มีจุดศูนย์ ส่วนตั้งแต่ตำแหน่งเชิงมุมที่ 60 จนถึง 90

องศา นั้นจะค่อย ๆ มีระดับเพิ่มขึ้นไปจาก -16 dB ไปอยู่ที่ -6 dB ตามลำดับ โดยที่ในบทที่ 4 จะแสดงผลของการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของกรณีที่รวมผลและไม่รวมผลของมิวซอลคัปปลิงในลักษณะที่ไม่ได้มีการปรับบรรทัดฐาน (normalization) ให้อัตราขยายสูงสุดเป็น 0 dB เพื่อให้รู้ถึงผลกระทบของปรากฏการณ์นี้ต่ออัตราขยายของสายอากาศ



รูป 3.5 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่รวมผลของมิวซอลคัปปลิงและแบบรูปการแผ่พลังงานที่รวมผลของมิวซอลคัปปลิง Martin Gimersky และ Jens Bornemann (1992)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย