บทที่ 3

หลักการและการออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการที่ใช้ในการออกแบบส่วนต่างๆ ของงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

1. สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดทรงกระบอก
2. สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์และสายป้อนสัญญาณไมโครสตริป
3. ไฮบริดวงแหวน 180°

3.1 การออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นทรงกระบอก [1]

ในการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นทรงกระบอกนั้น เราจะเริ่มต้นจากการกำหนดค่ารัศมีของท่อนำคลื่นทรงกระบอกเท่ากับ 5 cm และทำการคำนวณหาค่าความถี่คัทออฟของโหมด TE_{11} ซึ่งเป็นโหมดเด่นของท่อนำคลื่นทรงกระบอกได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$(f_c)_{11}^{TE^z} = \frac{\chi'_{11}c}{2\pi a} = \frac{1.8412\times 3\times 10^8}{2\pi\times 5\times 10^{-2}} = 1.758\ GHz \qquad (1)$$

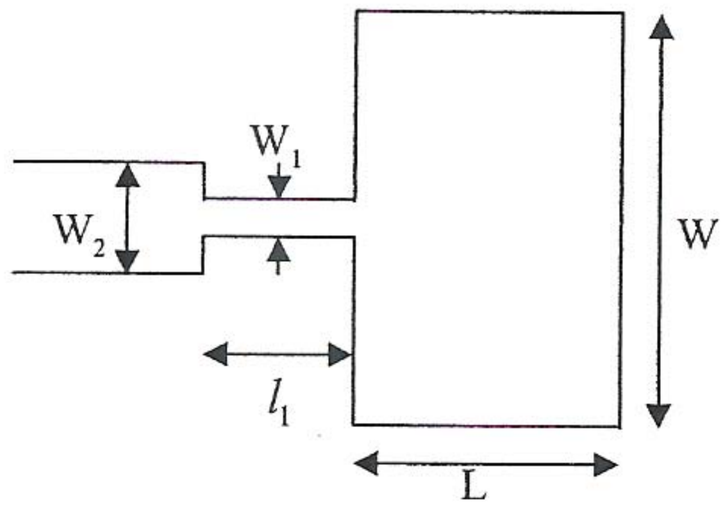
ซึ่งจากการคำนวณพบว่า ค่าความถี่ใช้งาน 2.4 GHz มีค่ามากกว่าความถี่คัทออฟของโหมด TE_{11} ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความถี่ 2.4 GHz สามารถผ่านเข้าสู่ท่อนำคลื่นทรงกระบอกที่มีค่ารัศมีเท่ากับ 5 cm ได้

หลังจากนั้น ทำการคำนวณหาค่าความยาวของท่อนำคลื่นทรงกระบอก (L) เพื่อที่จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถผ่านและรับได้ในท่อนำคลื่นทรงกระบอก ซึ่งในทางปฏิบัติ ค่าความยาวของท่อนำคลื่นทรงกระบอกควรจะมีค่าเป็น $n\lambda_g/4$ เมื่อ λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Guided Wavelength) และ n เป็นเลขจำนวนเต็มบวก ในกรณีนี้ เราจะพิจารณาหาค่า λ_g ของโหมด TE_{11} ดังแสดงในสมการที่ 2 และหาค่า L จากค่า λ_g ของโหมด TE_{11} ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\lambda g_{TE_{11}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1-\left(\frac{fc_{TE_{11}}}{f}\right)^2}} = \frac{12.5}{\sqrt{1-\left(\frac{1.758}{2.4}\right)^2}} = 18.36\ cm \qquad (2)$$

$$L \geq \frac{\lambda g_{TE_{11}}}{4} \geq 4.59\ cm \qquad (3)$$

สรุปได้ว่า งานวิจัยที่นำเสนอนี้จะใช้ท่อนำคลื่นทรงกระบอกที่มีค่ารัศมีเท่ากับ 5 cm และมีค่าความยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 4.59 cm



รูปที่ 3.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมกับ Quarter-Wavelength Transformer

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์และสายป้อนสัญญาณไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบขึ้นนี้เป็นแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก 2 ตัวที่วางในลักษณะขนานกัน (ซ้าย-ขวา) หรือแถวลำดับ เพื่อนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับไปป้อนให้กับพอร์ต 2 และพอร์ต 3 ของวงจรไฮบริดวงแหวน 180° ที่อยู่ทางด้านล่างหน้าเดียวกันของแผ่นวงจรพิมพ์ Glass Eproxy FR-4 โดยสายป้อนสัญญาณไมโครสตริปที่ใช้จะเป็นแบบ Quarter-Wavelength Transformer พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

1. ความถี่ปฏิบัติการ (f_r) เท่ากับ 2.4 GHz
2. $\varepsilon_r = 4.55$
3. $h = 1.6\ mm$
4. $tan\,\delta = 0.025$
5. ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ $Z_0 = 50\ \Omega$

ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

ขั้นที่ 1: คำนวณความกว้าง (W) ของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ได้จากสมการ

$$W = \frac{c}{2f_r}\left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

เราจะได้ค่า W เท่ากับ 37.52 mm

ขั้นที่ 2: คำนวณหาค่า Effective dielectric constant (ε_{eff}) ได้จากสมการ

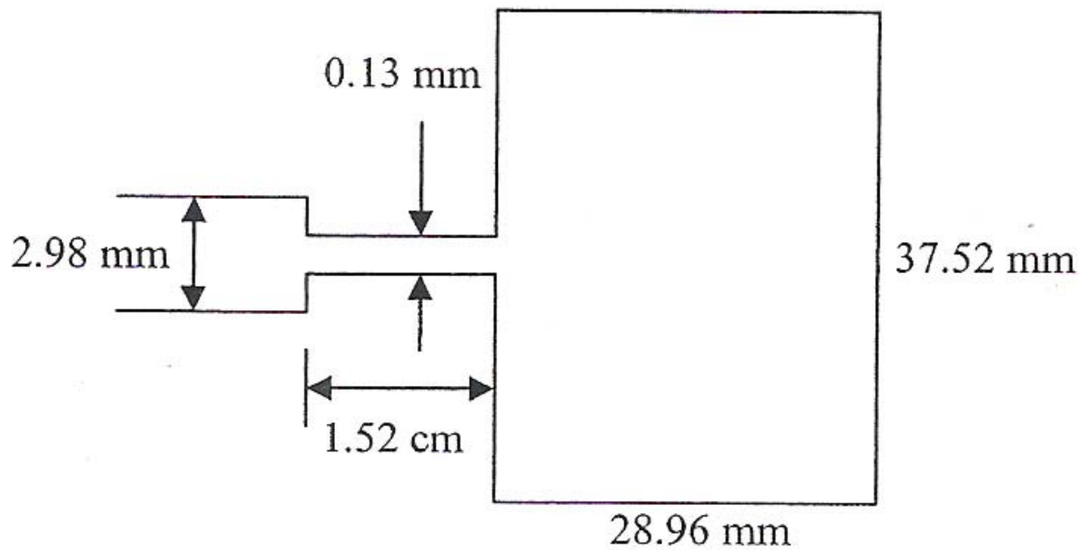
$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{\frac{-1}{2}}$$

เราจะได้ค่า ε_{eff} เท่ากับ 4.22

ขั้นที่ 3: คำนวณหาค่า Effective length (L_{eff}) ได้จากสมการ

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}}$$

เราจะได้ค่า L_{eff} เท่ากับ 30.43 mm



รูปที่ 3.2 ขนาดของแพทช์สี่เหลี่ยมที่มีการแมทชิ่งโดยใช้ Quarter-Wavelength Transformer

ขั้นที่ 4: คำนวณหาค่า length extension (ΔL) ได้จากสมการ

$$\Delta L = 0.412h\left(\frac{\varepsilon_{eff}+0.3}{\varepsilon_{eff}-0.258}\right)\left(\frac{\frac{W}{h}+0.264}{\frac{W}{h}+0.8}\right)$$

เราจะได้ค่า ΔL เท่ากับ 0.74 mm

ขั้นที่ 5: คำนวณหาความยาว (L) ของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ได้จากสมการ

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

เราจะได้ค่า L เท่ากับ 28.96 mm

ขั้นที่ 6: คำนวณหาค่า Input Impedance (R_{in}) และ Characteristic Impedance ของ Transformer (Z_{OT}) เนื่องจากค่า $W < \lambda_0$ เราจะพิจารณาค่า $G_r = W^2/90\lambda_0$ และหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$Y_{in} = 2G_r = \frac{1}{45}\frac{W^2}{{\lambda_0}^2} = \frac{1}{R_{in}}$$

$$R_{in} = \frac{45{\lambda_0}^2}{W^2} = \frac{45\times 12.5^2}{3.752^2} = 499.5$$

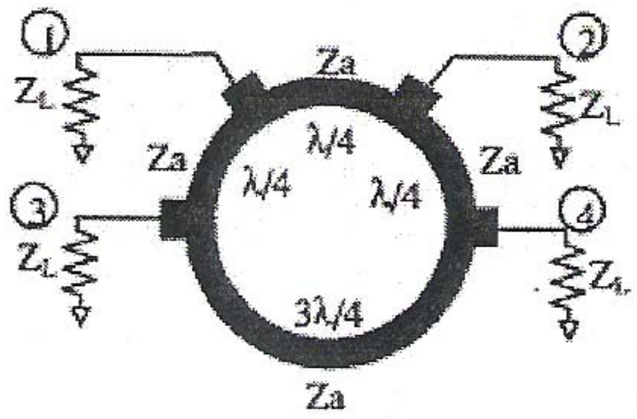
$$Z_{OT} = \sqrt{R_{in}\times 50} = 158.035$$

เราจะได้ค่า R_{in} เท่ากับ 499.5 โอห์ม และค่า Z_{OT} เท่ากับ 158.035 โอห์ม

ขั้นที่ 7: หาความกว้าง W_1 และ W_2 ได้จากสมการ

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{\exp H'}{8} - \frac{1}{4\exp H'}\right)^{-1} \text{ เมื่อ } H' = \frac{Z_0\sqrt{2(\varepsilon_r+1)}}{119.9} + \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right)$$

1. คำนวณหา W_1 โดยแทนค่า Z_{OT} เท่ากับ 158.035 โอห์ม จะได้ค่า W_1 เท่ากับ 0.13 mm
2. คำนวณหา W_2 โดยแทนค่า Z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม จะได้ค่า W_2 เท่ากับ 2.98 mm



รูปที่ 3.3 วงจรไฮบริดวงแหวน 180°

ขั้นที่ 8: คำนวณหาความยาวของ Transformer (l_1)

$$l_1 = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{6.08}{4}$$

เราจะได้ค่า l_1 เท่ากับ 15.2 mm

เมื่อคำนวณหาค่าต่างๆ เสร็จแล้ว เราจะได้ขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.3 การออกแบบวงจรไฮบริดวงแหวน 180° [3]

หลังจากที่สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ 2 ตัวได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาจากสายอากาศท่อนำคลื่นทรงกระบอกแล้ว สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปยังพอร์ต 2 และ 3 ของวงจรไฮบริดวงแหวน 180° แล้วทำให้เกิดสัญญาณผลต่างที่พอร์ต 1 (Delta Port) และทำให้เกิดสัญญาณผลรวมที่พอร์ต 4 (Sum Port) ซึ่งวงจรไฮบริดวงแหวน 180° นี้ถูกสร้างขึ้นโดยกำหนดให้มีค่าความยาวของสายนำสัญญาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2 มีดังนี้

1. คำนวณหาค่าความยาวของสายนำสัญญาณขนาด 90 องศาได้จากสมการ

$$L_{90-\deg} = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{6.08}{4} = 15.2\ mm$$

2. คำนวณหาค่าความยาวของสายนำสัญญาณขนาด 90 องศาได้จากสมการ

$$L_{270-\deg} = \frac{3\lambda_g}{4} = \frac{3\times 6.08}{4} = 45.6\ mm$$

3. คำนวณหาค่ารัศมีของวงจรไฮบริดวงแหวน 180° ได้จากสมการ

$$4W + L_{270-\deg} + 3L_{90-\deg} = 2\pi r_{Hybrid\ Ring}$$

$$4(0.298) + 4.56 + 3(1.42) = 2\pi r_{Hybrid\ Ring}$$

$$10.012 = 2\pi r_{Hybrid\ Ring}$$

$$r_{Hybrid\ Ring} = 15.9\ mm \text{ หรือ } D_{Hybrid\ Ring} = 31.8\ mm$$