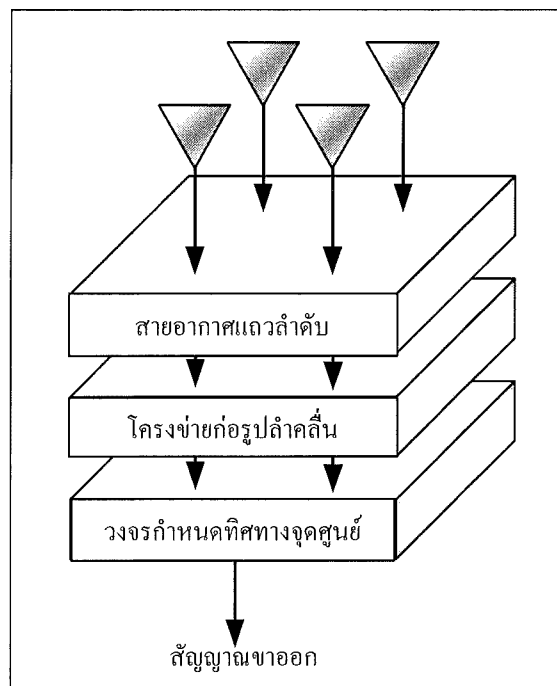


บทที่ 4

การออกแบบระบบสายอากาศสวิตช์การกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบระบบสายอากาศสวิตช์อย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เพื่อนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมชไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของระบบของงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยม โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และวงจรที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในการออกแบบวงจรดังกล่าวเราจะใช้โปรแกรม Microwave office และโปรแกรม CST Microwave Studio จำลองผลเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์จริงต่อไป



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

4.2 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศที่ใช้ในระบบสายอากาศสวิตช์ลากลั่นนั้นจะเป็นสายอากาศประเภทแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 นั่นคือ ในระบบจะใช้สายอากาศจำนวน 4 ต้น เนื่องจากเราจำเป็นต้องเลือกใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นได้รอบทิศทางในมุมแนวระนาบ เราจึงเลือกใช้สายอากาศชนิดโมโนโพล (monopole antenna) ที่สามารถรองรับความถี่ได้ที่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่เรานำไปใช้งาน รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศที่ใช้ในระบบสายอากาศสวิตช์ลากลั่นมีการวางตัวเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศ $d = \lambda / 4$ เนื่องจากเราได้จำลองแบบด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda / 2$ พบว่าสายอากาศชุดนี้สามารถก่อรูปลากลั่นหลักตามที่เรากำลังต้องการได้แต่ยังมีระดับของพูข้างหรือจุดศูนย์ที่สูงถึง -2.587 dB แสดงดังรูปที่ 3.3 และเมื่อเราเปลี่ยนระยะห่างระหว่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda / 4$ นั้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4.4 จากรูปจะเห็นว่าชุดสายอากาศที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda / 4$ สามารถก่อรูปลากลั่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและมีระดับพูข้างเท่ากับ -14.1 dB ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าชุดสายอากาศที่ใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda / 2$ ถึง 11.513 dB ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda / 4$ และนำไปใช้ได้เมื่อต้องการทิศทางของลากลั่นหลักมากกว่า 4 ทิศทาง ซึ่งสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = f\lambda \quad (4.1)$$

ความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9}$$

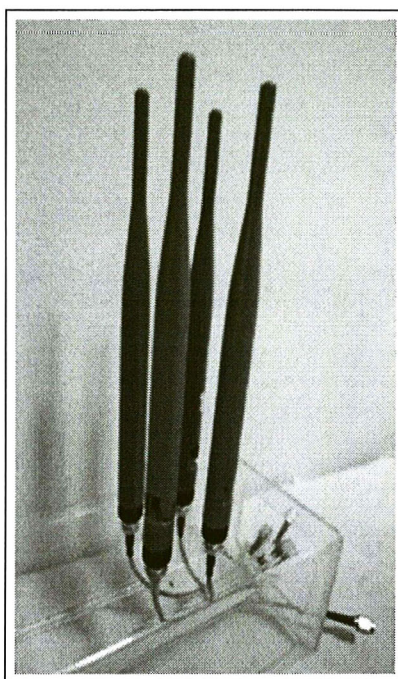
$\therefore \lambda = 12.24$ เซนติเมตร

โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศในสมการ (3.2)

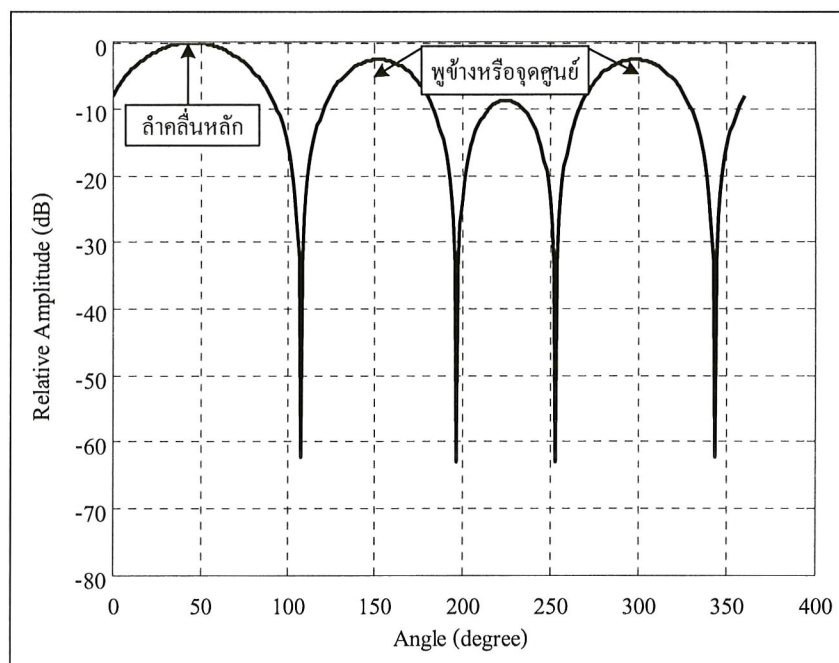
$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{12.24}{4} \quad (4.2)$$

ดังนั้น

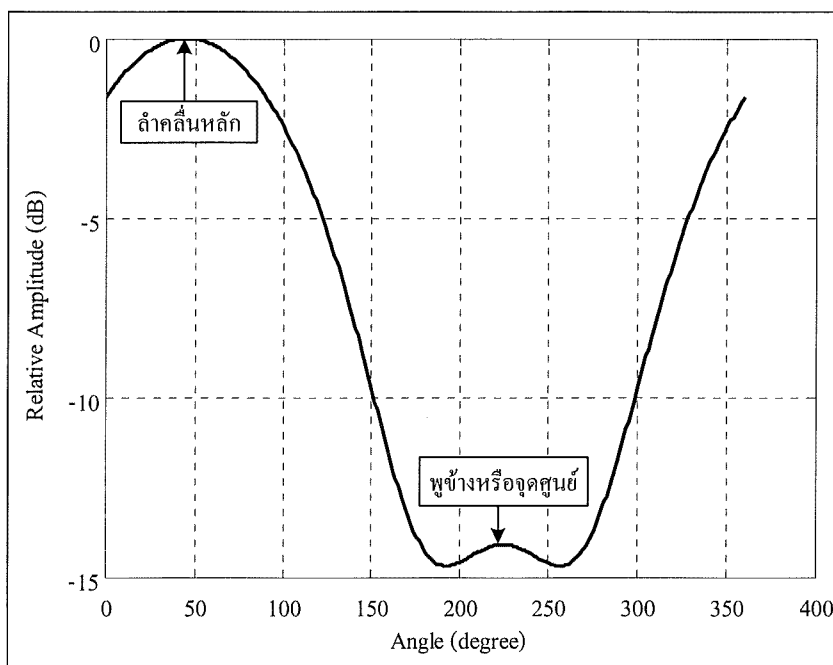
$$d = 3.06 \text{ เซนติเมตร}$$



รูปที่ 4.2 สายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบ 2×2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$



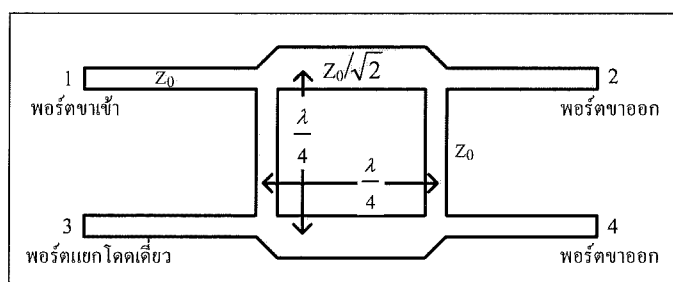
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$

จากรูปที่ 2.12 เราจะสังเกตเห็นว่า ที่ตำแหน่ง 0° เส้นกราฟการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง $+45$ ส่วนการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง -45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 4 จะมีการเลื่อนมุมเฟสนำการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 3 อยู่ซึ่งหมายความว่า เมื่อมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเข้ามาที่ตำแหน่งมุม θ ใด ๆ สายอากาศต้นที่ 1 และสายอากาศต้นที่ 4 ก็จะได้รับสัญญาณก่อน เมื่อเราสังเกตต่อไป เช่นที่มุม 45° จะเห็นว่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 4 นั้น การเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 1 จะมีการเลื่อนมุมเฟสนำการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 4 อยู่ แสดงว่าสายอากาศต้นที่ 1 จะได้รับสัญญาณก่อนสายอากาศต้นที่ 4 ซึ่งก็จะเช่นเดียวกันกับการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 3 ที่มุมเดียวกัน การเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 2 จะมีการเลื่อนมุมเฟสนำการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศต้นที่ 3 อยู่ แสดงว่าสายอากาศต้นที่ 2 จะได้รับสัญญาณก่อนสายอากาศต้นที่ 3 ดังนั้นเราจึงนำเอาข้อมูลเหล่านี้เป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้ออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (ปัตเตอร์เนตริกที่ปรับปรุงแล้ว) ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

4.3 การออกแบบโครงข่ายก่อรูปลาคี่นสำหรับสายอากาศแวลลาคี่บเชิงระนาบ

เนื่องจากการวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแวลลาคี่บเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ ดังนั้นโครงข่ายก่อรูปลาคี่นต้องทำการแก้ไขใหม่เพื่อให้ใช้ได้กับสายอากาศแวลลาคี่บเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมนี้ ซึ่งการออกแบบนั้นเราจะอาศัยการดัดแปลงมาจากบัตเลอร์เมตริก ที่ใช้กับสายอากาศแวลลาคี่บเชิงเส้น 4×1 ในการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° นั้น เราต้องอาศัยหลักการของการออกแบบมาจากวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° ก่อน หลังจากนั้นเราจึงต้องอาศัยการจำลองผลจากโปรแกรม Microwave office เพื่อช่วยในการปรับเปลี่ยนมุมเฟสของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริดให้ได้มุมเฟสตามที่เราต้องการ นอกจากนี้เรายังต้องทำการออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ (crossover) และวงจรเลื่อนเฟส (phase shifter) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้วอีกด้วย

4.3.1 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นฐานของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90°

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° นั้น ต้องอาศัยหลักการจากการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° โดยอ้างอิงจากหนังสือของ David, M.P. (1998) คือ อุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทางทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตขาเข้าและส่งออกไปยังพอร์ตขาออกอย่างเท่ากัน โดยพอร์ตขาออกทั้ง 2 จะมีความต่างเฟส 90° พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าจะเป็นพอร์ตแยกสัญญาณ เช่น เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามายังพอร์ต 1 สัญญาณจะถูกส่งออกที่พอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่า ๆ กัน โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้ง 2 มีความต่างเฟส 90° พอร์ต 3 เป็นพอร์ตแยกโคดเดี่ยว (isolation port) ซึ่งเป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกเลย ไฮบริดชนิดนี้มักจะสร้างมาจากไมโครสตริป หรือสตริป ดังแสดงในรูปที่ 4.5 คือ ลักษณะพื้นฐานของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° สังเกตเห็นว่าวงจรเชื่อมชนิดนี้จะสมมาตรกัน

แต่ละพอร์ตสามารถใช้เป็นพอร์ตขาเข้าได้ และพอร์ตขาออกจะเป็นพอร์ตที่อยู่ตรงกันข้ามกับพอร์ตที่เป็นพอร์ตขาเข้าเสมอ ส่วนพอร์ตแยกยังคงเป็นพอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าเช่นกัน ในการออกแบบเราจะใช้การคำนวณพื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริปโดยใช้ไมโครสตริป 50Ω ซึ่งทำการออกแบบบนแผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก d เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

การคำนวณหาความกว้างของไมโครสตริป W เราใช้สมการที่ (4.3)

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A-2}} & ; \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (4.3)$$

เมื่อ 1) $Z_0 = 50\Omega$ จาก

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (4.4)$$

แทนค่าจะได้

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.8 + 1}{2}} + \frac{4.8 - 1}{4.8 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) = 1.582$$

นำค่า A ที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{W}{d} &= \frac{8e^A}{e^{2A-2}} \\ &= \frac{8e^{1.582}}{e^{2(1.582)-2}} \end{aligned}$$

$$\frac{W}{d} = 1.796 \quad ; \frac{W}{d} < 2 \quad \text{จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น}$$

$$W = d(1.796) = (1.6)(1.796) = 2.87 \text{ มิลลิเมตร}$$

จาก
$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12(d/W)}} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1)}{2.87}}} \right) \\ &= 2.9 + \frac{1.9}{\sqrt{1 + 6.68}} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_e = 3.584$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

จาก
$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}(f)} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.584}(2.45 \times 10^9)} \quad (4.6)$$

$$\therefore \lambda = 64.68 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นที่ $90^\circ; \frac{\lambda}{4} = \frac{64.68}{4} = 16.17 \text{ มิลลิเมตร}$

เมื่อ 2) $\frac{Z_0}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35.35\Omega$ จาก

แทนค่าจะได้
$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\varepsilon_r})} = \frac{377\pi}{2(35.35)(4.8)} = 7.64 \quad (4.7)$$

จาก
$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right\} \right] ; \frac{W}{d} > 2$$

นำค่า B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{W}{d} &= \frac{2}{\pi} \left[7.64 - 1 - \ln(2(7.64) - 1) + \frac{4.8 - 1}{2(4.8)} \left\{ \ln(7.64 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.8} \right\} \right] \\ &= \frac{2}{\pi} [6.64 - 2.658 + 0.395(1.893 + 0.262)] \\ &= \frac{2}{\pi} (3.982 + 0.851)\end{aligned}$$

$$\frac{W}{d} = 3.076 \quad ; \frac{W}{d} > 2 \quad \text{จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น}$$

$$W = d(3.076) = (1.6)(3.076) = 4.921 \text{ มม.}$$

จากสมการที่ (4.5) แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned}\varepsilon_e &= \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1)}{3.076}}} \right) \\ &= 2.9 + \frac{1.9}{\sqrt{1 + 3.9}}\end{aligned}$$

$$\varepsilon_e = 3.756$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

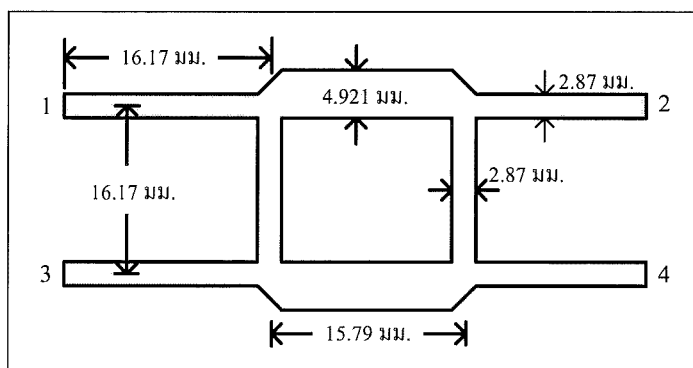
จากสมการที่ (4.6) แทนค่าจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.765(2.45 \times 10^9)}} = 63.18 \text{ มิลลิเมตร}$$

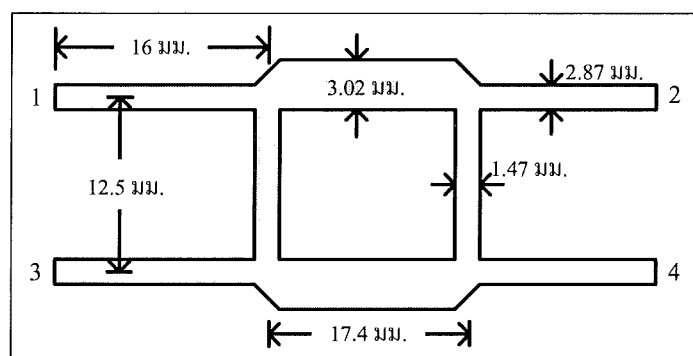
$$\text{ดังนั้นที่ } 90^\circ ; \quad \frac{\lambda}{4} = \frac{63.18}{4} = 15.79 \text{ มิลลิเมตร}$$

เรานำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้แทนในรูปที่ 4.3 และสามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.6

- ที่เส้นที่ Z_0 มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 2.87 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 16.17 มิลลิเมตร
- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 4.921 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 15.79 มิลลิเมตร

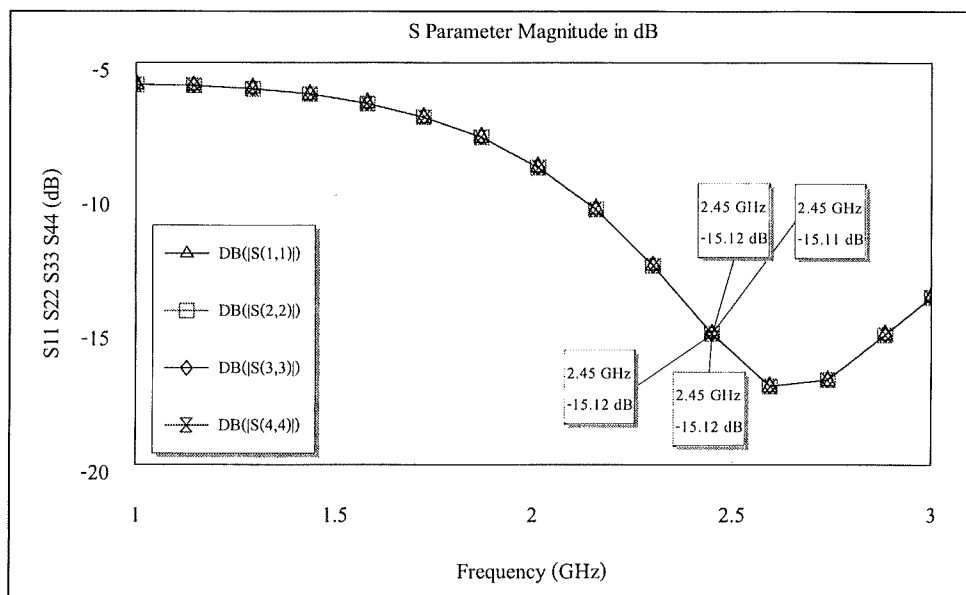


รูปที่ 4.6 ขนาดของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90°

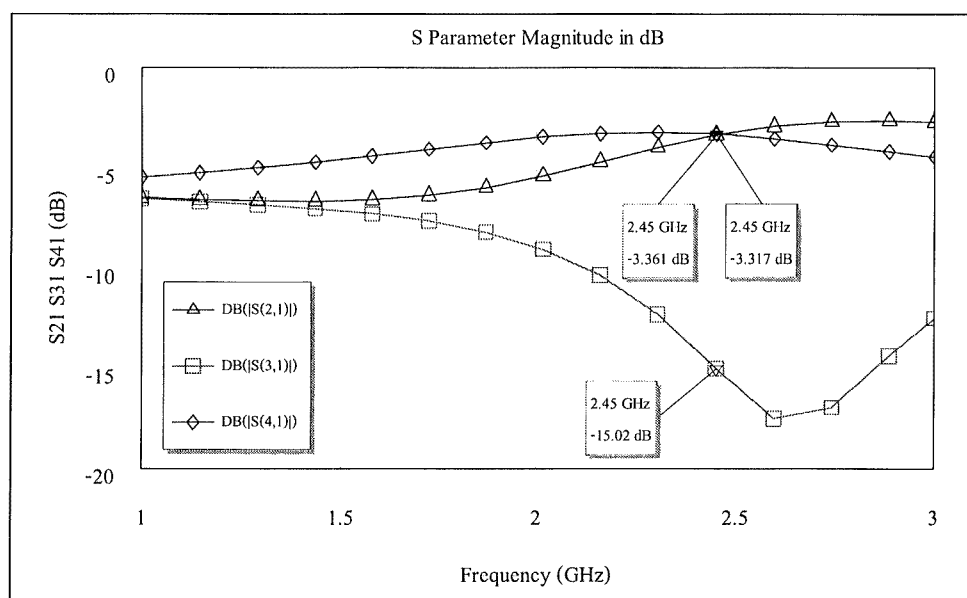


รูปที่ 4.7 ขนาดของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°

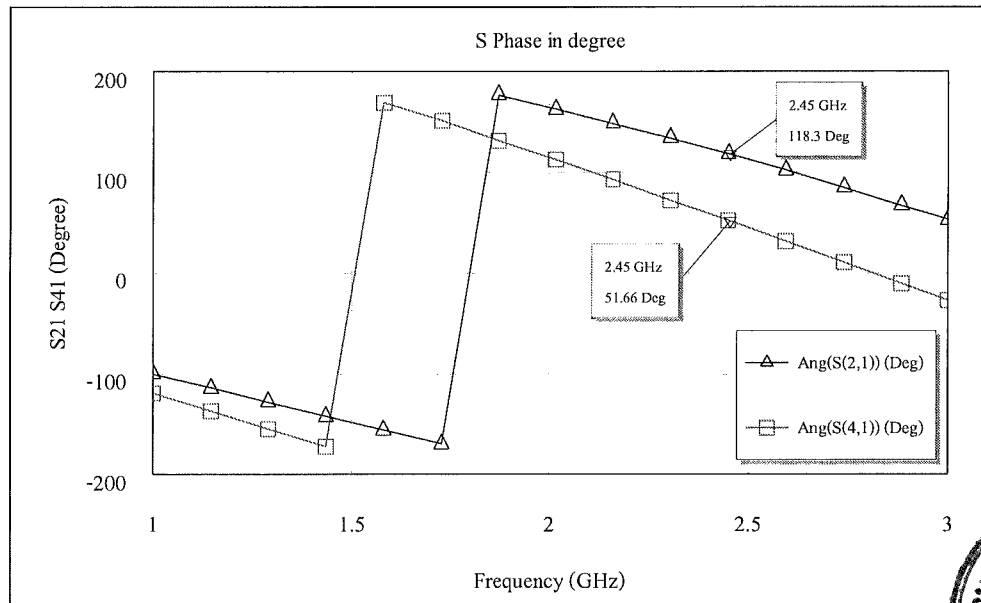
จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้เป็นเพียงค่าพารามิเตอร์ของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° จึงยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นเราจึงต้องทำการดัดแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผล ซึ่งในการจำลองผลนั้นนอกจากจะให้ได้นุมเฟสที่ต้องการแล้วยังต้องคำนึงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเคียว และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อให้มีค่าเหมาะสมอีกด้วย จากการจำลองผลนั้นมุมเฟสที่ได้ อาจจะมีค่าไม่ตรง 64° มากนัก แต่ทิศทางของลำคลื่นหลักทั้ง 4 ทิศทาง ก็ยังมีค่าใกล้เคียง 45° 135° 225° และ 315° ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำลองผลได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.7



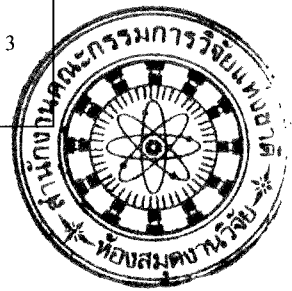
รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°



รูปที่ 4.9 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคตเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°



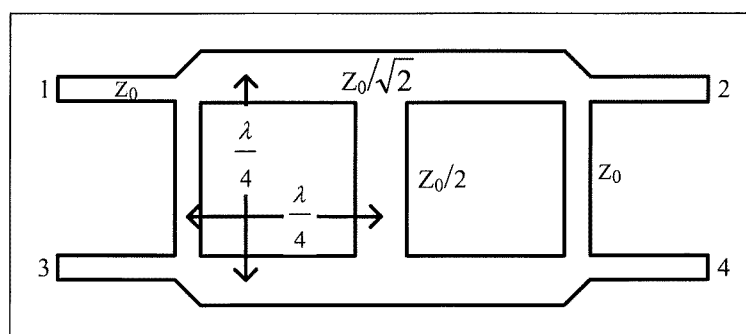
รูปที่ 4.10 มุมเฟสของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°



รูปที่ 4.8-4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม Microwave office ในรูปที่ 4.8 คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกลับในพอร์ตที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° จากค่าที่ได้พบว่าอุปกรณ์ของเรานั้น มีค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณอยู่ในค่าที่รับได้ คือมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่ดีดังแสดงใน Barrick, D., and Benmoussa, Z. (2006) จาก $VSWR = (1 + \Gamma) / (1 - \Gamma)$ เมื่อแทนค่า $VSWR = 2$ จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ Γ เท่ากับ 0.33 และนำมาแทนค่าเพื่อหาค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ R_L จาก $R_L = -20 \log|\Gamma|$ แทนค่า $\Gamma = 0.33$ ได้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB นั้นหมายความว่าอุปกรณ์ที่เราออกแบบนั้นจะต้องมีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB จึงจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งอยู่ในค่าที่สามารถรับได้จากการที่ได้ออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° พบว่าอุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดี และยังสามารถส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่า ๆ กันและมีสัญญาณออกมาจากพอร์ต 3 น้อยดังแสดงในรูปที่ 4.9 นอกจากนี้รูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่าเฟสที่ออกมาจากพอร์ต 2 และพอร์ต 4 มีค่าเท่ากับ 118.3° 51.66° ซึ่งทั้งสองพอร์ตนี้จะมีค่าความต่างเฟสเท่ากับ 66.64° จากผลการจำลองทั้งหมดพบว่าผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่เราได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นเราจะสามารถนำไปสร้างเพื่อนำไปใช้งานจริงได้

4.3.2 การออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ

วงจรไขว้สัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกสัญญาณ โดยหน้าที่หลักของไมโครสตริปแบบไขว้สัญญาณ คือจะทำหน้าที่ในการไขว้สัญญาณที่ถูกส่งเข้ามา ซึ่งอ้างอิงมาจาก Denidni, T.A., and Libar, T.E. (2003) ดังรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะพื้นฐานของวงจรไขว้สัญญาณ เมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 วงจรไขว้สัญญาณจะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ต 4 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ต 2 และพอร์ต 3 เป็นพอร์ตแยกโคตเดี่ยว คือพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกหรือให้สัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และในทำนองเดียวกัน เมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ต 3 วงจรไขว้สัญญาณจะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ต 2 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ต 1 และพอร์ต 4 เป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออก หรือให้สัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้



รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นฐานของวงจรไขว้สัญญาณ

ในการออกแบบและคำนวณนั้น เราก็คงจะใช้พื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริป 50 Ω ดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.3.1

$$\text{เมื่อ } 1) \frac{Z_0}{2} = \frac{50}{2} = 25\Omega \text{ จาก}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\epsilon_r})} \quad (4.8)$$

$$\text{แทนค่าจะได้} \quad B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\epsilon_r})} = \frac{377\pi}{2(25)(4.8)} = 10.81$$

$$\text{จาก } \frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right\} \right] \quad ; \frac{W}{d} > 2$$

นำค่า B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{W}{d} &= \frac{2}{\pi} \left[10.81 - 1 - \ln(2(10.81) - 1) + \frac{4.8 - 1}{2(4.8)} \left\{ \ln(10.81 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.8} \right\} \right] \\ &= \frac{2}{\pi} [9.81 - 3.026 + 0.395(2.283 + 0.262)] \\ &= \frac{2}{\pi} (6.784 + 1.005) \\ \frac{W}{d} &= 4.958 \quad ; \frac{W}{d} > 2 \quad \text{จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น} \\ W &= d(4.958) = (1.6)(4.958) = 7.933 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (4.5) แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1)}{4.958}}} \right) \\ &= 2.9 + \frac{1.9}{\sqrt{1 + 2.42}} \\ \varepsilon_e &= 3.926 \end{aligned}$$

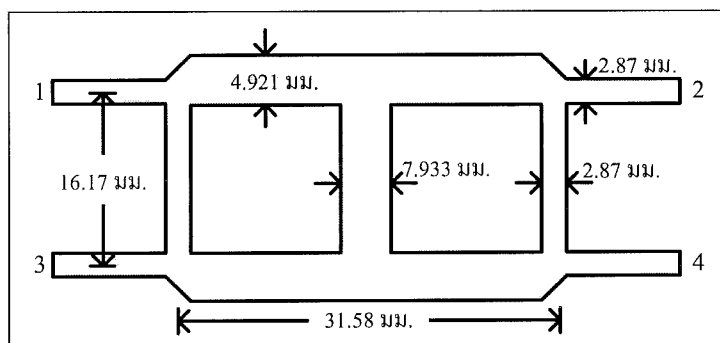
เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริงจากสมการที่ (4.6) แทนค่าจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.926(2.45 \times 10^9)}} = 61.79 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\lambda}{4} = \frac{61.79}{4} = 15.44 \text{ มิลลิเมตร}$$

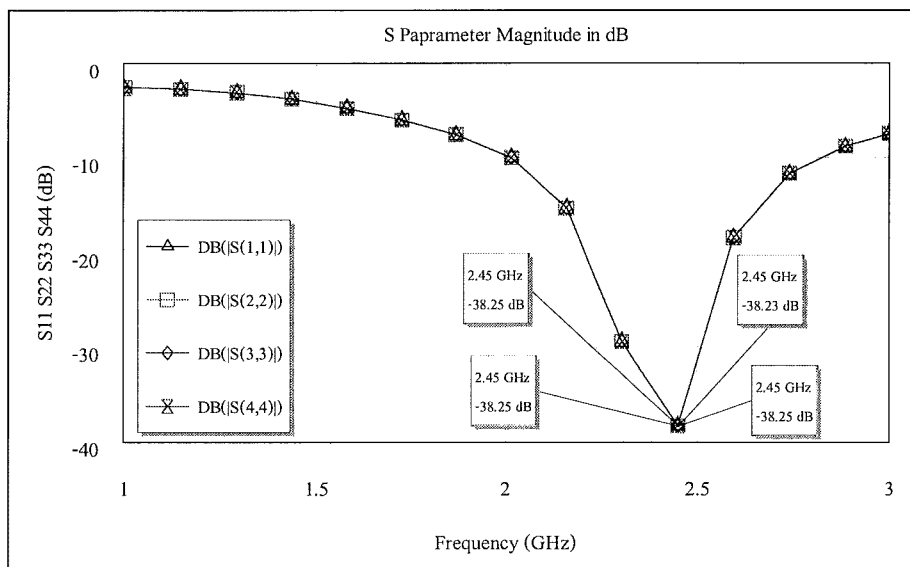
เรานำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้แทนในรูปที่ 3.11 และสามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.12

- ที่เส้นที่ Z_0 มีค่าดังนี้
 ความกว้าง = 2.87 มิลลิเมตร
 ความยาว = 16.17 มิลลิเมตร
- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ มีค่าดังนี้
 ความกว้าง = 4.921 มิลลิเมตร
 ความยาว = 15.79 มิลลิเมตร
- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{2}$ มีค่าดังนี้
 ความกว้าง = 7.933 มิลลิเมตร
 ความยาว = 15.44 มิลลิเมตร

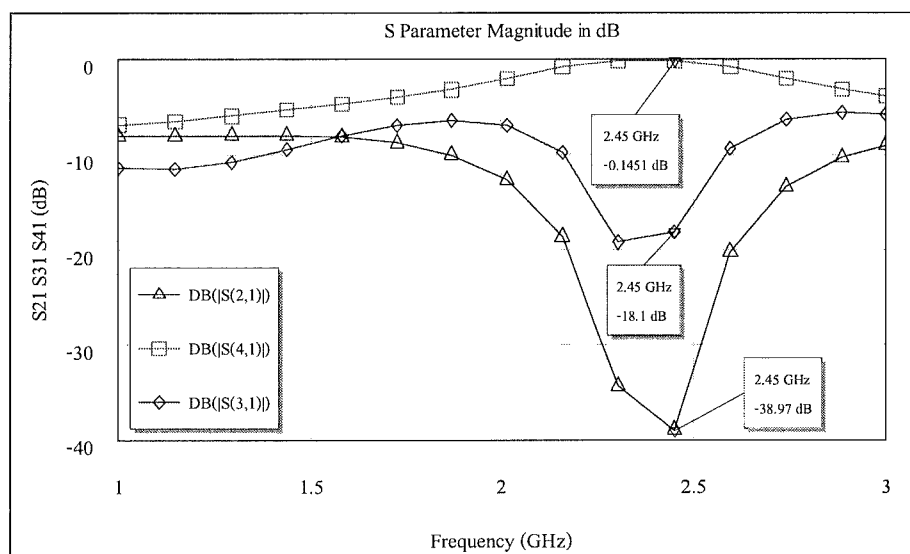


รูปที่ 4.12 ขนาดของวงจรไขว้สัญญาณ

รูปที่ 4.12 แสดงขนาดของวงจรไขว้สัญญาณที่คำนวณได้และนำไปจำลองผลด้วยโปรแกรม Microwave office ได้จำลองผลดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณนั้นมีการสะท้อนกลับน้อยหรือไม่มีสัญญาณออกเลย แสดงว่าวงจรไขว้สัญญาณนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไขว้ไปยังพอร์ต 4 ได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 ผ่านไปออกที่พอร์ต 4 นั้น มีมุมเฟสเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 3 ผ่านไปออกที่พอร์ต 2 แสดงดังรูปที่ 4.15 จากผลที่ได้พบว่าไปตามทฤษฎีและสามารถนำไปใช้สร้างจริงได้

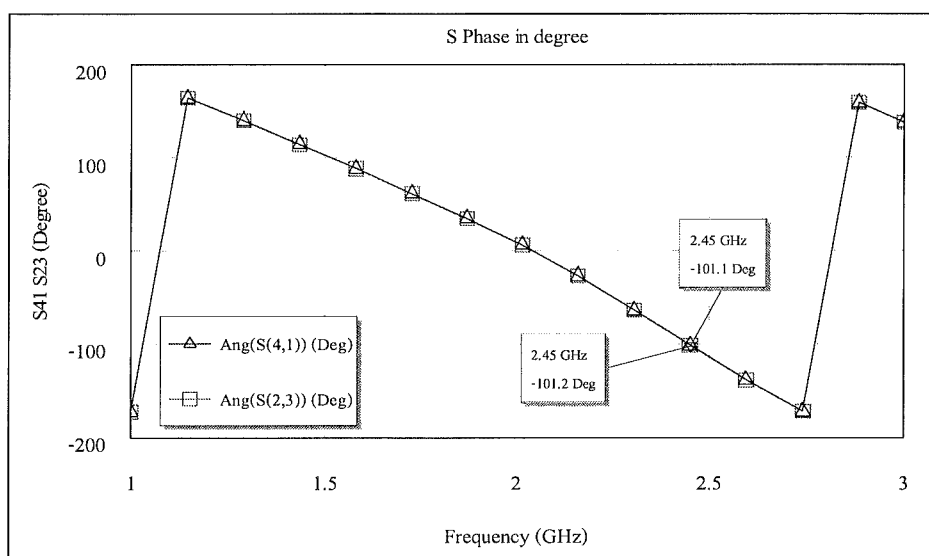


รูปที่ 4.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ

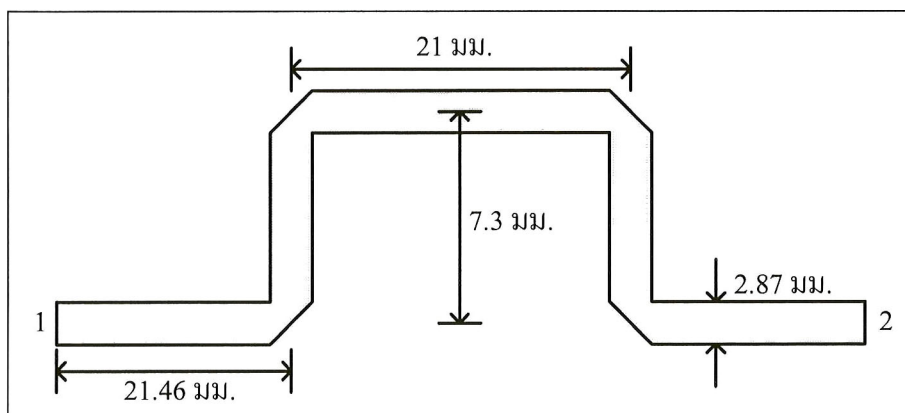


รูปที่ 4.14 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ

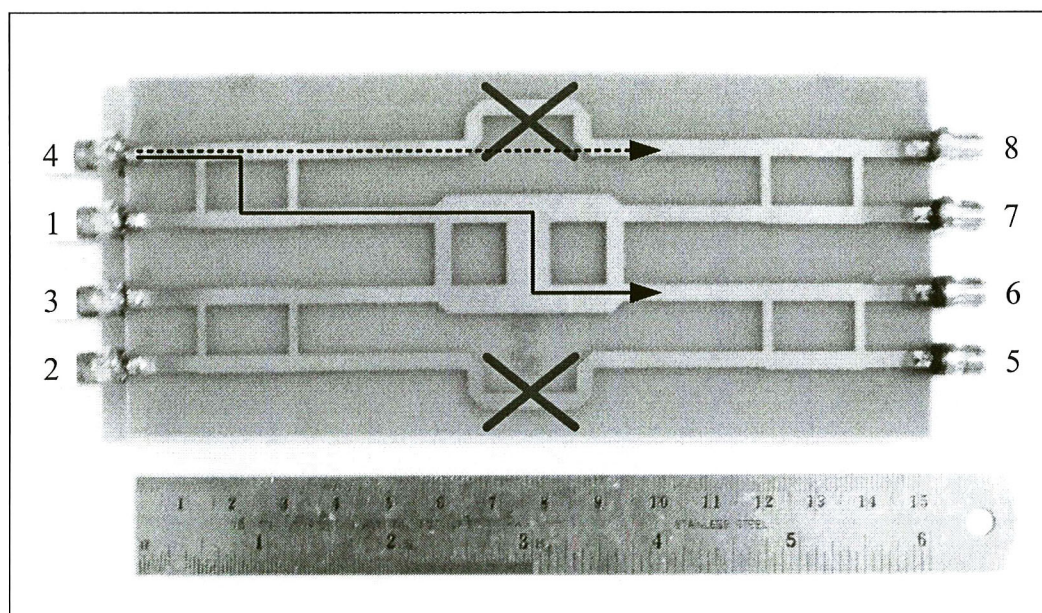
เมื่อค่าที่ได้จากคำนวณเป็นที่น่าพึงพอใจแล้วนั้น เราจึงได้ทำการรวมวงจรระหว่างวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° และวงจรไขว้สัญญาณเข้าด้วยกัน โดยจะมีวงจรเลื่อนเฟสเพิ่มเข้ามาซึ่งมีลักษณะและขนาดของวงจรเลื่อนเฟส ดังรูปที่ 4.16 ที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม Microwave office เนื่องจากเราจำเป็นต้องเพิ่มระยะทางเพื่อให้สัญญาณไหลจากวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° อีกข้างไปยังวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° ของข้างที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับวงจรไขว้สัญญาณ เพื่อที่จะทำให้มีระยะการไหลของสัญญาณ (หรือการเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณ) ให้มีค่าเท่ากับระยะทางการไหลของสัญญาณจากวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° อีกข้างไปยังวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° ของข้างที่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณในลักษณะไขว้เส้นทาง โดยจะมีการนำวงจรเลื่อนเฟสใส่ไว้ทั้ง 2 ข้าง ดังเช่นในรูปที่ 4.17 แสดงลักษณะการเดินทางของสัญญาณเมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ต 4 สัญญาณที่เดินทางไปตามเส้นประนั้นคือสัญญาณจะไม่มีผ่านวงจรไขว้สัญญาณ ในขณะที่เดียวกันก็จะมีสัญญาณที่เดินทางผ่านวงจรไขว้สัญญาณไปตามเส้นทึบซึ่งสัญญาณนี้ จะมีการเดินทางที่ช้ากว่าหรือเฟสต่ำกว่าสัญญาณที่ไม่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณ ดังนั้นเราจึงต้องมีการเพิ่มระยะทางของสัญญาณที่เดินทางตามเส้นประหรือไม่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณนั้นมีมุมเฟสในการเดินทางเท่ากับสัญญาณที่เดินทางผ่านวงจรไขว้สัญญาณ โดยการชดเชยมุมเฟสของสัญญาณให้มีค่าเท่ากับมุมเฟสของที่ออกมาจากวงจรไขว้สัญญาณ จากที่เราได้ทำการออกแบบวงจรไขว้สัญญาณมาแล้วนั้นพบว่า มุมเฟสของสัญญาณที่ถูกไขว้กันนั้นมีค่าเท่ากับ -101.1° ดังนั้นเราจึงต้องทำการออกแบบให้วงจรเลื่อนเฟสนั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ -101.1° เช่นกัน เพื่อเป็นการชดเชยเฟสให้กับสัญญาณที่ไม่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณ



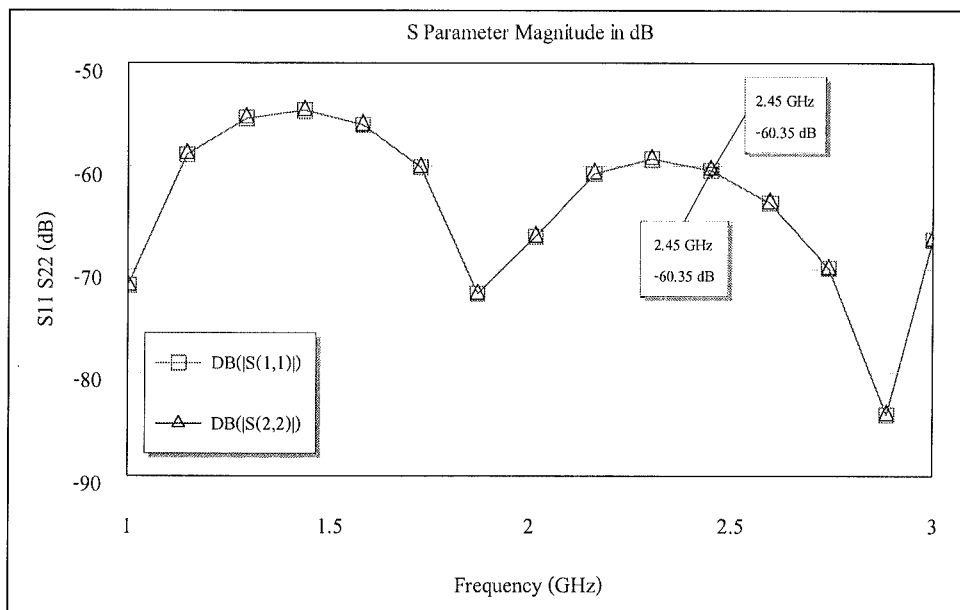
รูปที่ 4.15 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณ



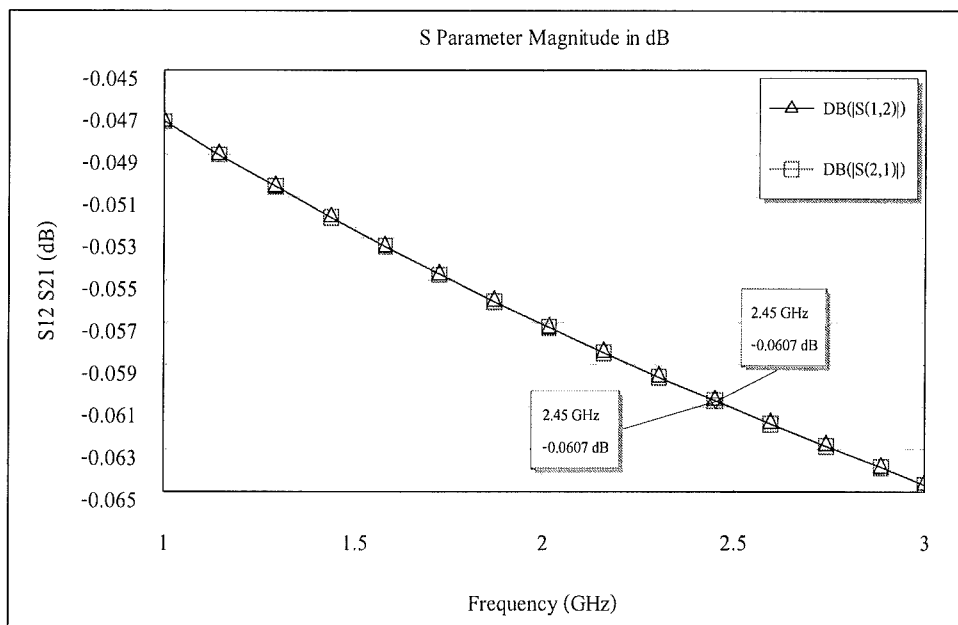
รูปที่ 4.16 ขนาดของวงจรเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.17 ลักษณะการเดินทางของสัญญาณในขณะที่ยังไม่มีวงจรเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.18 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.19 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อของวงจรเลื่อนเฟส

ในการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสนั้นได้ผลดังรูปที่ 4.18 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกลับในพอร์ต 1 และพอร์ต 2 นั้นสามารถส่งผ่านสัญญาณได้เนื่องจากค่าที่ได้มีน้อยกว่า -10 dB และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ได้ดี และมีมุมเฟสเท่ากับ -101.1° ตามที่เราต้องการซึ่งแสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ จากนั้นเราจึงทำการรวมวงจรทั้งหมดที่ได้ออกแบบมาเข้าด้วยกันเป็นบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.21

จากบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงที่เราสร้างขึ้นนั้น เราจะนำไปทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรช่วย ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ เริ่มจากการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกมาจากพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไบนั่นเอง ซึ่งควรต่ำกว่า -10 dB นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นสามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดี ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกจากอีกพอร์ตหนึ่งซึ่งอยู่ข้างเคียงกับพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไบนั่นเอง ซึ่งควรที่จะมีค่าที่ต่ำมาก หรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตขาเข้าไปยังพอร์ตขาออกของสัญญาณ ซึ่งควรจะมีค่าที่น้อย หรือควรมีค่าที่มากกว่า -10 dB และวัดค่ามุมเฟสของสัญญาณ

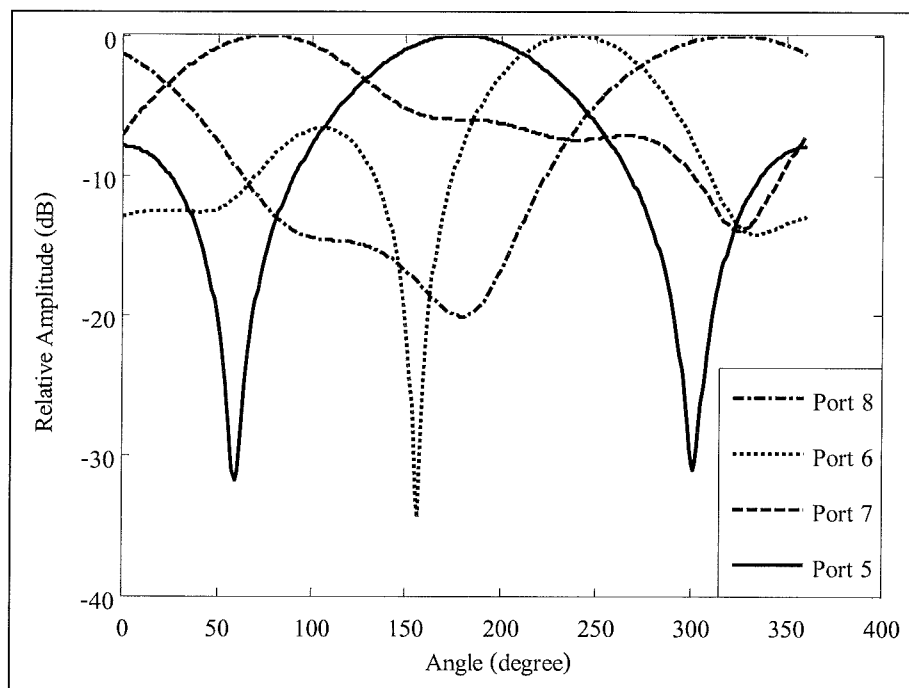
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดจริงของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง ซึ่งจะประกอบไปด้วย ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว และ ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ จากค่าที่ได้พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ในบางตัวนั้นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่เรากล่าวมาข้างต้น นั้นอาจเกิดจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์จริง แต่เมื่อเรานำมาทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกได้ดังตารางที่ 4.2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น จากค่าที่ได้มีมีความผิดพลาดไปจากตารางที่ 2.2 เล็กน้อยซึ่งอาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ แต่เมื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง ที่เราสร้างขึ้นผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22 จากรูปจะเห็นว่าทิศทางของลำคลื่นหลักได้ 4 ทิศทางที่เราต้องการนั้นมีค่าใกล้เคียงตามที่แสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี หากต้องการลำคลื่นหลักมากกว่า 4 ทิศทางนั้น เราต้องทำการออกแบบบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงใหม่ทั้งหมดโดยใช้หลักการในการออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอการจำลองแบบและการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของแบตเตอรี่เมตริกที่ถูกปรับปรุง

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ			
พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)
S11	-10.06	S55	-14.67
S22	-15.30	S66	-10.48
S33	-9.582	S77	-10.02
S44	-14.28	S88	-14.35
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดี่ยว			
พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)
S21	-6.57	S65	-6.479
S31	-16.86	S75	-17.32
S41	-14.44	S85	-14.20
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ			
พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)
S51	-14.36	S71	-10.22
S52	-14.49	S72	-14.13
S53	-8.30	S73	-22.50
S54	-8.90	S74	-8.42
S61	-23.56	S81	-8.23
S62	-8.32	S82	-8.81
S63	-10.21	S83	-14.41
S64	-14.44	S84	-14.32

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่วัดได้ของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2

พอร์ต ขาออก	สายอากาศ			
	2	3	1	4
5	-39.45	-84.31	-94.44	-152.25
6	-84.71	-137.84	7.58	-95.07
7	-94.42	3.14	-136.86	-85.17
8	-152.93	-96.23	-86.07	-42.10



รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้บัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

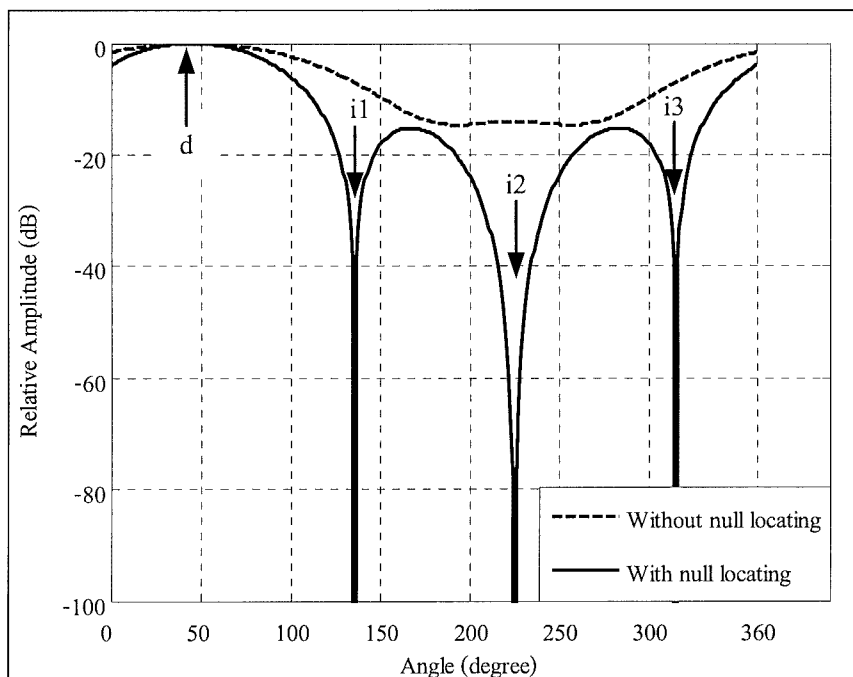
4.4 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์นั้น เราจะต้องอาศัยการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ก่อน เพื่อดูว่าวิธีที่เราจะใช้ในการกำหนดจุดศูนย์นั้นมีประสิทธิภาพ และใช้งานร่วมกับสายอากาศแบบสวิตช์ได้จริง หลังจากนั้นเราจึงทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จริงที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์และนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมชไร้สายได้

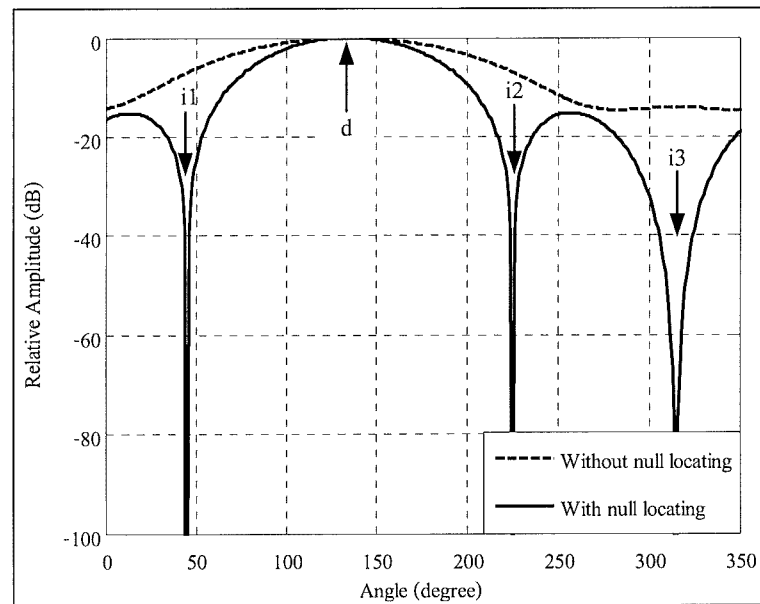
4.4.1 การจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

จากที่เราได้นำเสนอวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ไปแล้วในหัวข้อที่ 2.7 ในหัวข้อนี้เราจะนำเสนอการจำลองแบบและหา ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยใช้สมการที่ (2.21) – (2.27) เพื่อดูประสิทธิภาพของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลัก 4 ทิศทาง คือ 45° 135° 225° และ 315° ในการจำลองแบบนั้น เราจะเริ่มจากการกำหนดทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 45° และกำหนดให้ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° ผลที่ได้จากการจำลองคือ แบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่ใช้วิธีการกำหนดทิศทางจุดศูนย์และแบบรูปการแผ่พลังงานที่ใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยที่เส้นประ คือระบบ

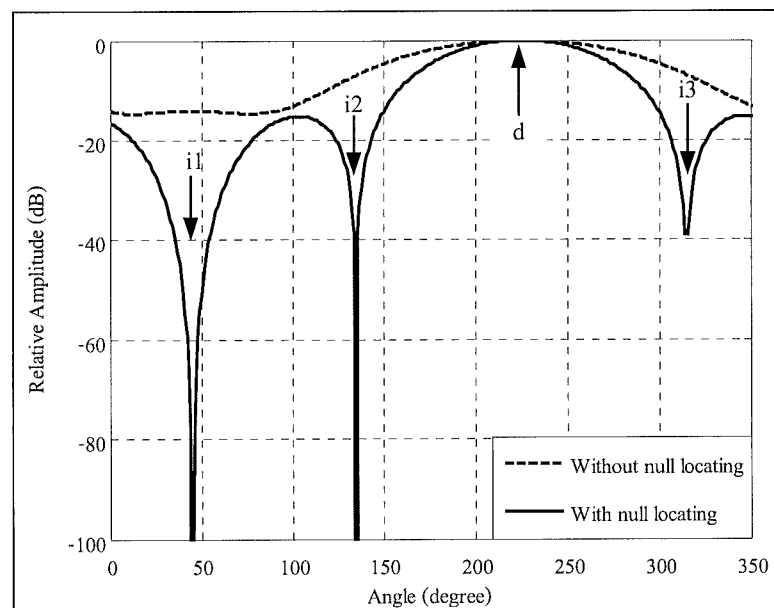
ที่ยังไม่มีการใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และเส้นทึบ คือระบบที่มีการใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23 คือแบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามา d ที่ 45° และทิศทางของสัญญาณแทรกสอด i ที่มาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° ตามลำดับ หลังจากนั้นเราจะทำการเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาเป็น 135° ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° แทน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24 ในทำนองเดียวกันเราก็ทำการเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาเป็น 225° ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° และเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาเป็น 315° ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



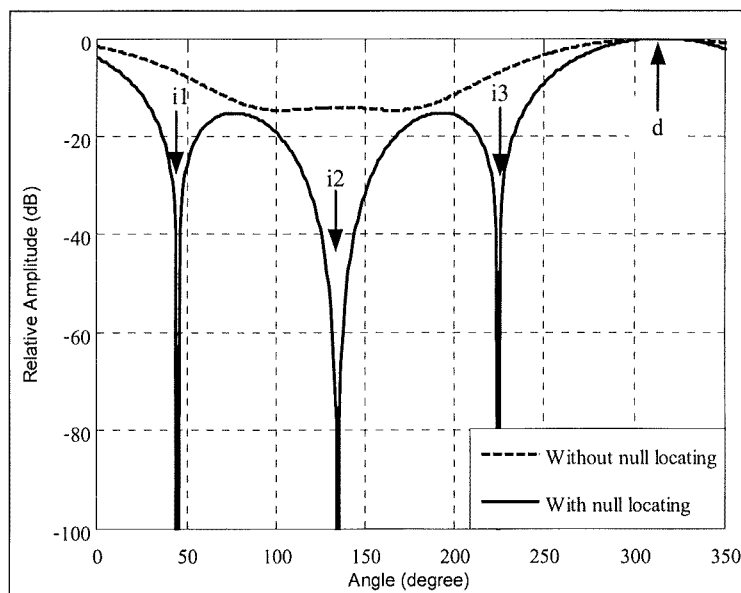
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°



รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315°



รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315°



รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225°

จากรูปที่ 4.23 - 4.26 จะเห็นว่าวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถกดจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดให้มีค่าต่ำกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลากลั่นที่ไม่ได้ใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ จึงทำให้ระบบสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้จริง ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดจุดศูนย์เพื่อนำมาใช้งานร่วมกับระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลากลั่น

4.4.2 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์

จากหัวข้อที่ 4.4.1 เราได้ทำการพิสูจน์แล้วว่าวิธีการที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นั้นสามารถนำมาใช้งานได้จริง ดังนั้นเราจึงได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้จากสมการที่ (2.27) ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผล เช่น เมื่อเราต้องการหันลากลั่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° เราจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 , k_2 และ k_3 ที่แสดงในตารางที่ 4.3 คูณกับพอร์ตขาออกของสัญญาณที่เป็นทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเราจึงจะสามารถกดจุดศูนย์ได้ จากค่าที่ได้ดังตารางพบว่าค่าที่ได้นั้นเป็นจำนวนเชิงซ้อนดังนั้นเราจึงต้องทำการแปลงค่าให้เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟสได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งค่าที่ได้นั้นเราจะใช้แอมพลิจูดเป็นอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ (attenuators) และใช้มุมเฟส

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผล

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดจุดศูนย์		
	k_1	k_2	k_3
45°	$-0.1972 - 0.3978i$	$-0.1194 + 0.1569i$	$-0.1972 - 0.3978i$
135°	$-0.1972 + 0.3978i$	$-0.1972 - 0.3978i$	$0.1972 + 0.0000i$
225°	$-0.1194 - 0.1569i$	$-0.1972 + 0.3978i$	$-0.1972 + 0.3978i$
315°	$-0.1972 + 0.3978i$	$0.1972 - 0.0000i$	$-0.1972 - 0.3978i$

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผลที่ถูกแปลงค่าให้เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟส

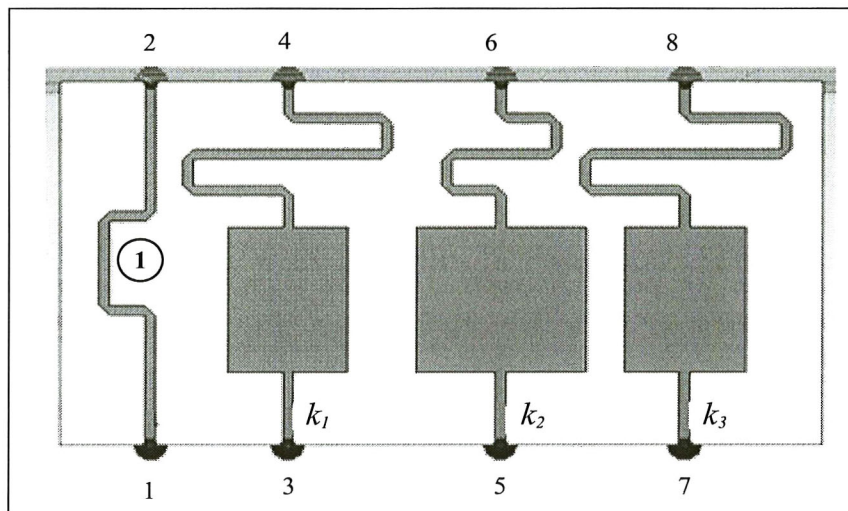
ทิศทาง ของ ลำคลื่น หลัก	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดจุดศูนย์					
	k_1		k_2		k_3	
	แอมพลิจูด	มุมเฟส	แอมพลิจูด	มุมเฟส	แอมพลิจูด	มุมเฟส
45°	-7.07 dB	-116.368°	-14.11 dB	127.27°	-7.07 dB	-116.368°
135°	-7.07 dB	116.368°	-7.07 dB	-116.368°	-14.11 dB	0°
225°	-14.11 dB	-127.27°	-7.07 dB	116.368°	-7.07 dB	116.368°
315°	-7.07 dB	116.368°	-14.11 dB	0°	-7.07 dB	-116.368°

เป็นอุปกรณ์เลื่อนเฟส (phaseshifters) โดยรูปแบบของอุปกรณ์นั้นเราจะใช้ไมโครสตริปแบบเส้นมา เป็นพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์ทั้งหมด ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Bialkowski, M.E., and Uthansakul, M. (2006)

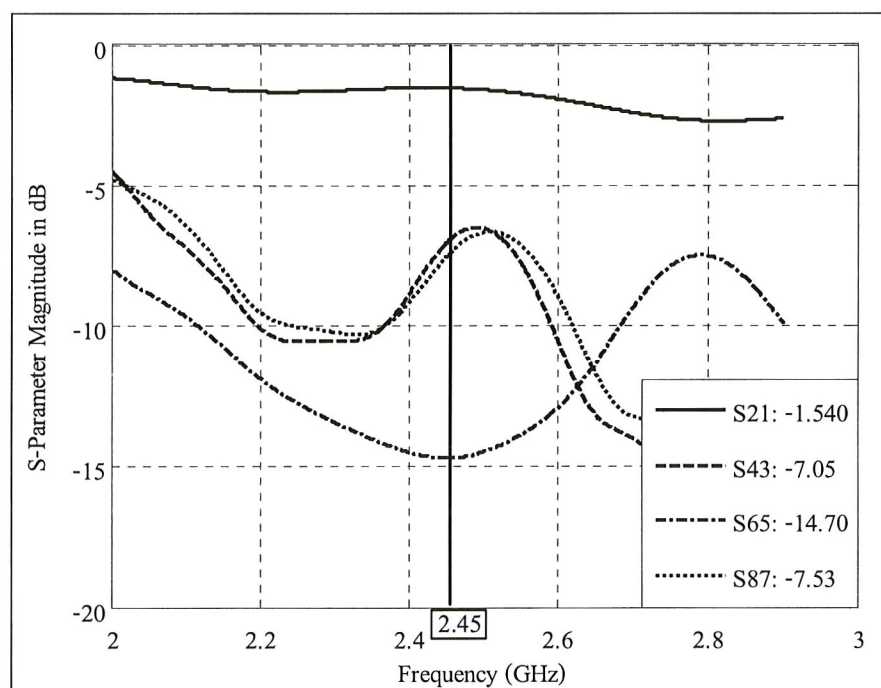
จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ตารางที่ 3.4 เราจะนำมาทำการออกแบบอุปกรณ์ โดยอาศัยการ จำลองแบบใน โปรแกรม CST Microwave Studio ในการ ปรับแอมพลิจูดและมุมเฟส ของอุปกรณ์ใช้ได้ตามที่เรากำลังต้องการ เราจึงทำการออกแบบอุปกรณ์กำหนดจุดศูนย์สำหรับการ หันลำคลื่นหลักไปทิศทางที่ 45° ได้ดังรูปที่ 3.27 คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดจุดศูนย์ ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315° จะเห็นว่าลายวงจรแต่ละอันมีขนาด และความยาวที่แตกต่างกันออกนั้นเป็นเพราะ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในทิศทางที่แตกต่างกันเช่นกัน จากการปรับขนาดและความยาวของไมโครสตริปในรูปที่ 4.27 มีวงจรที่ 1 นั้นเราจะออกแบบไว้เพื่อต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา

ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 45° โดยที่ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ จากการออกแบบนั้นทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดดังรูปที่ 4.28 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ $-1.540 k_1$ มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.05 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -14.70 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.53 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกันกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.29 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 15.63° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ -116.368° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ -100.88° ($-100.88 - 15.63 = -116.51$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -116.51° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.2010 - 0.4030i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 127.27° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ 146.00° ($146.00 - 15.63 = 130.37$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 130.37° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1220 + 0.1368i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ -116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ -92.79° ($-92.79 - 15.63 = -108.42$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -108.42° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1740 - 0.3970i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นี้มีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3

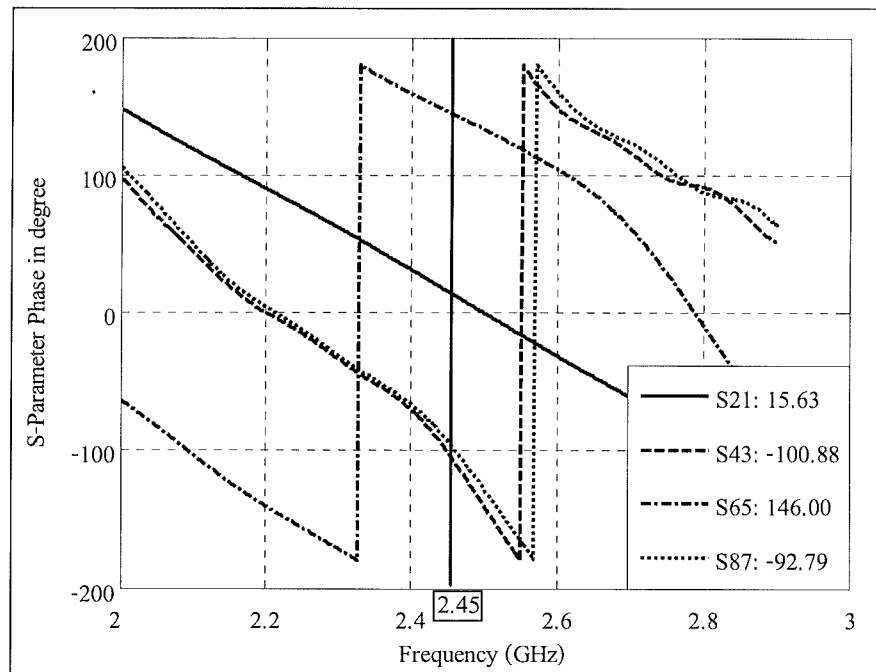
จากตารางที่ 4.4 จะแสดงให้เห็นว่าในทิศทางของการหันลำคลื่นหลักไปยัง 135° และ 315° นั้น สามารถใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ชุดเดียวกันได้ เพียงแค่ใช้การสลับพอร์ตเท่านั้น ดังนั้นเราจึงทำการออกแบบอุปกรณ์ชุดนี้ได้ดังรูปที่ 4.30 แสดงลักษณะของอุปกรณ์กำหนดจุดศูนย์สำหรับการหันลำคลื่นหลักไปทิศทางที่ 135° และกำหนดจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315° ซึ่งในรูปจะมีวงจรที่ 1 เพิ่มเข้ามาเพื่อนำไปต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 135° ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทาง 225° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°



รูปที่ 4.28 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°

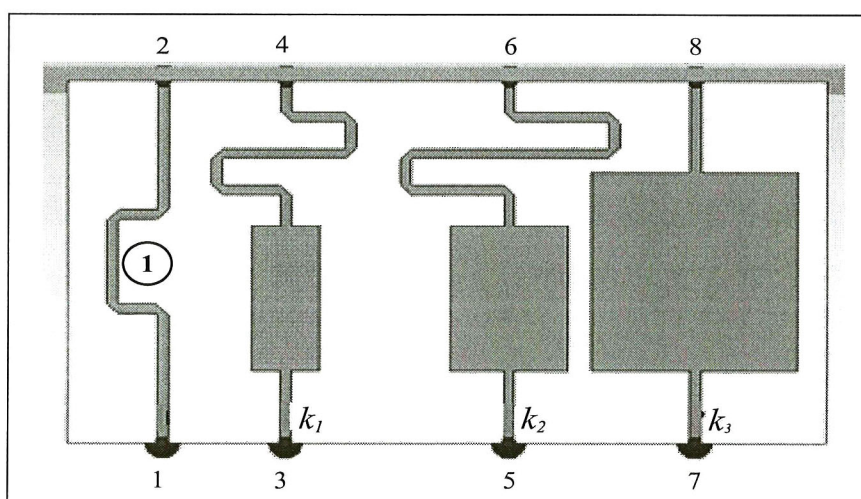


รูปที่ 4.29 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° , 225° และ 315°

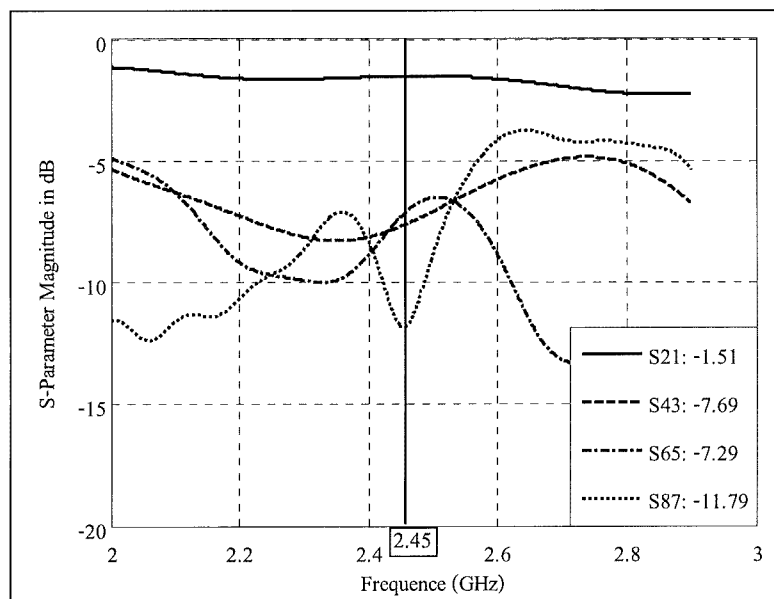
จากการออกแบบนั้นทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดดังรูปที่ 4.31 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ $-1.51 k_1$ มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.69 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.29 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -11.79 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.32 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ต ในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 23.24° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ 116.368° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ 141.01° ($141.01 - 23.24 = 117.77$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 117.77° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1754 + 0.3898i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ -116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ -92.08° ($-92.08 - 23.24 = -115.32$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -115.32° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.2110 - 0.3870i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 0°

จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ 48.34° ($48.34 - 23.24 = 25.1$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 25.1° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $0.2234 + j0.0917i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ k_3 มีค่าที่ผิดพลาดไปจากตารางที่ 4.3 ค่อนข้างมากแต่ค่า k_1 และ k_2 ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3

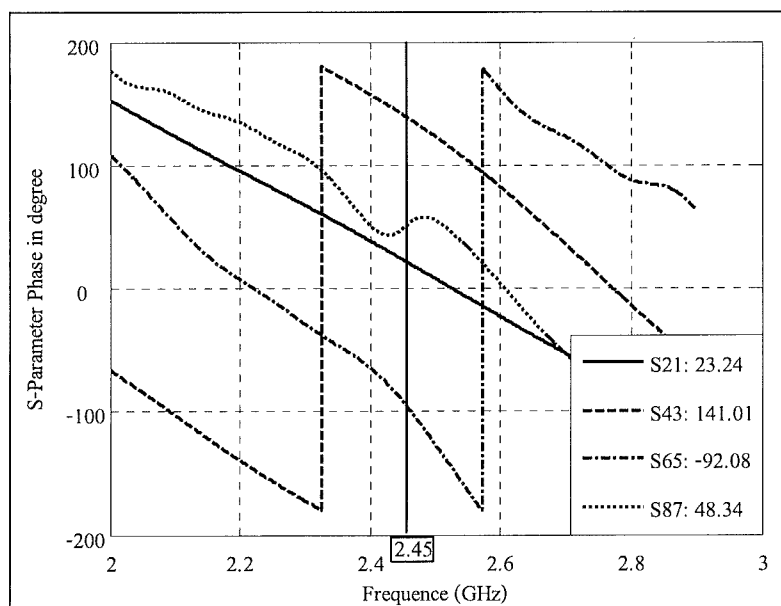
รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315° จากรูปจะมีวงจรที่ 1 เพิ่มเข้ามาเพื่อนำไปต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 225° ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° จากการออกแบบนั้นได้ผลของแอมพลิจูดดังรูปที่ 4.34 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -1.51 k_1 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -9.42 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.71 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.63 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 3.35 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 24.95° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ -127.27° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ -93.00° ($-93.00 - 24.95 = -117.95$)



รูปที่ 4.30 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°

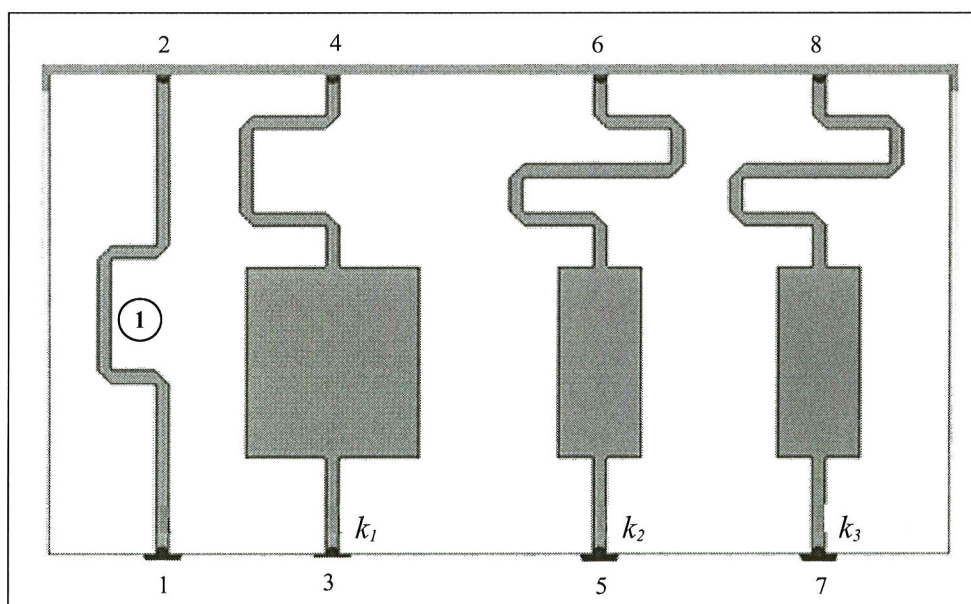


รูปที่ 4.31 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°

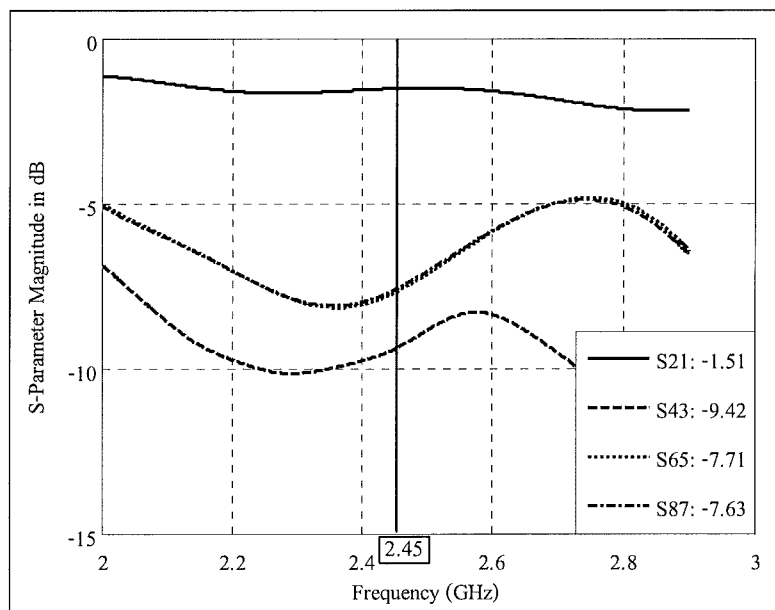


รูปที่ 4.32 กราฟมูฟเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°

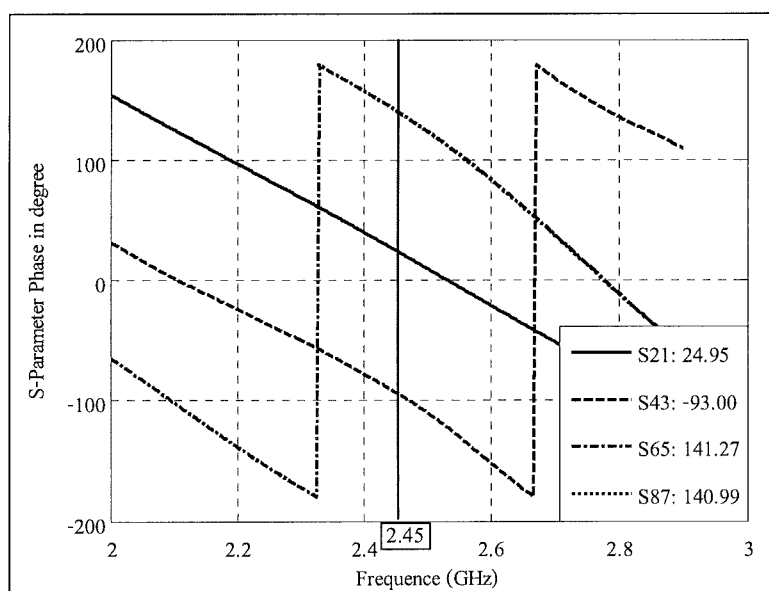
จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -117.95° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1270-0.1490i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ 141.27° ($141.27-24.95 = 116.32$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 116.32° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1961+0.3623i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ 140.99° ($140.99-24.95 = 116.04$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 116.04° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1950+0.3662i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมี ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นี้มีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.33 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°

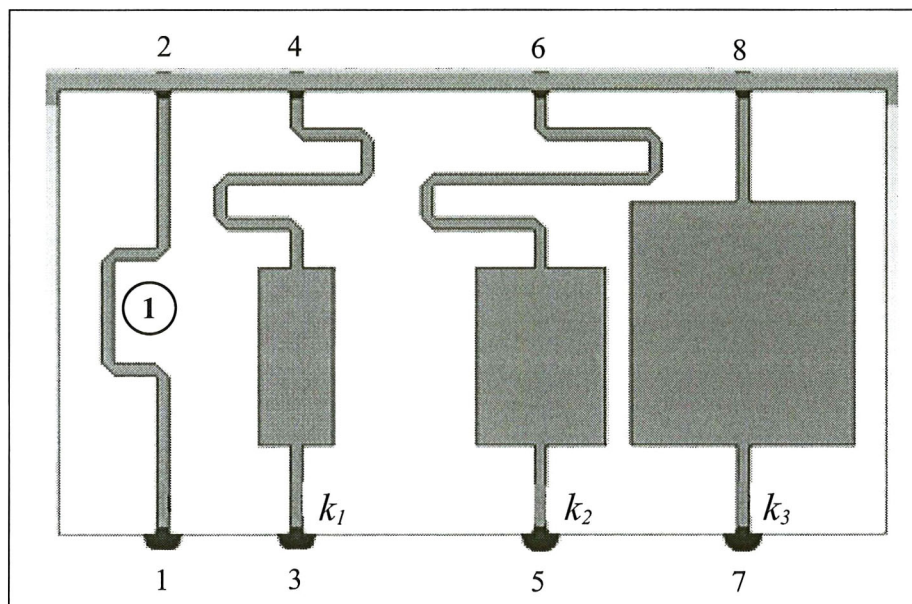


รูปที่ 4.34 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°

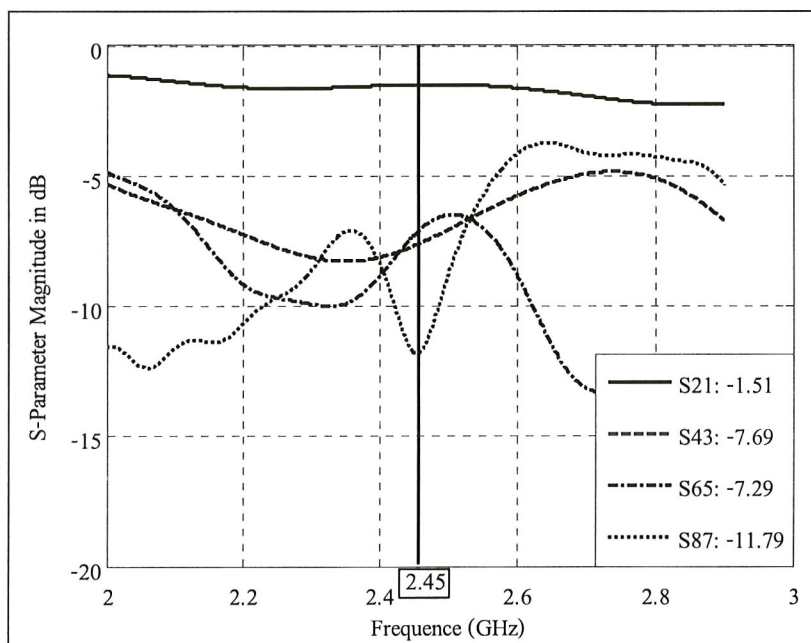


รูปที่ 4.35 กราฟมูเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°

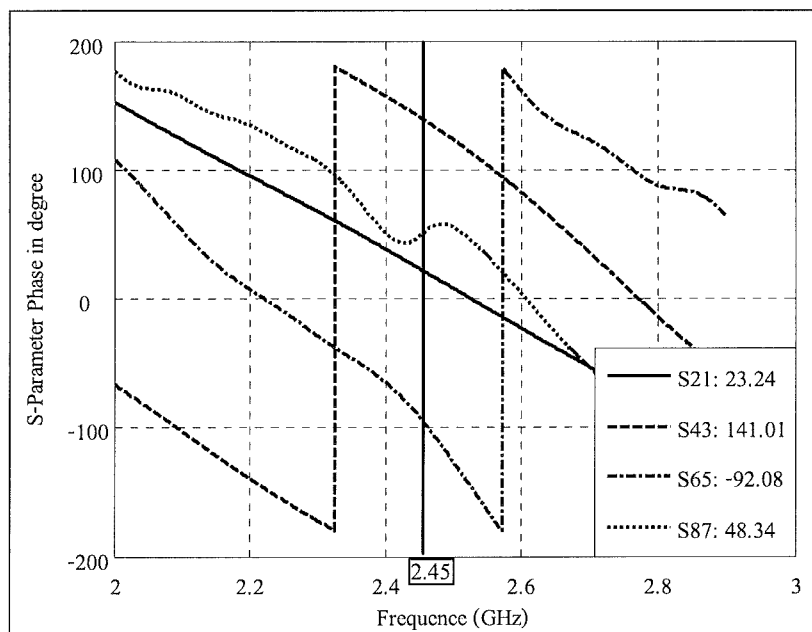
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ 315° นั้น สามารถใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ชุดเดียวกันได้ จากรูปที่ 3.36 ซึ่งในรูปจะมีวงจรที่ 1 เพิ่มเข้ามาเพื่อนำไปต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 315° ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° จากการออกแบบนั้นทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดดังรูปที่ 3.37 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ $-1.51 k_1$ มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.69 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -11.79 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.29 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.38 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 23.24° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ 116.368° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ 141.01° ($141.01 - 23.24 = 117.77$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 117.77° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1754 + 0.3898i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 0° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ 48.34° ($48.34 - 23.24 = 25.1$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 25.1° และแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $0.2234 + 0.0917i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ -116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ -92.08° ($-92.08 - 23.24 = -115.32$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -115.32° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.2110 - 0.3870i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมี ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ k_2 มีค่าที่ผิดพลาดไปจากตารางที่ 4.3 ค่อนข้างมาก แต่ค่า k_1 และ k_3 ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.36 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°



รูปที่ 4.37 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°



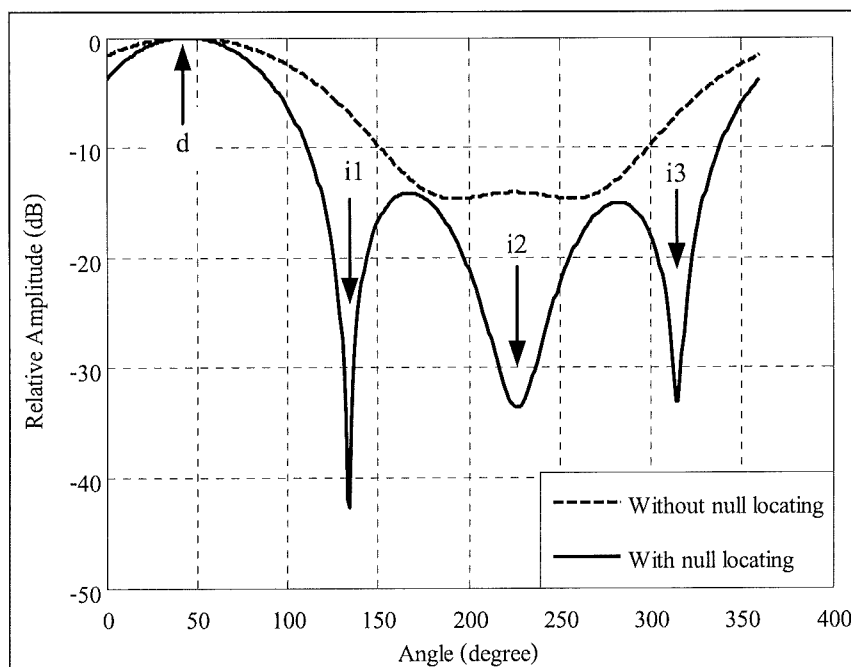
รูปที่ 4.38 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบ จากค่าที่ได้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองแบบในตารางที่ 4.3 และค่าที่ได้จากการออกแบบในตารางที่ 4.5 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงนำผลที่ได้นำมาป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์เพื่อดูประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบมาในข้างต้น

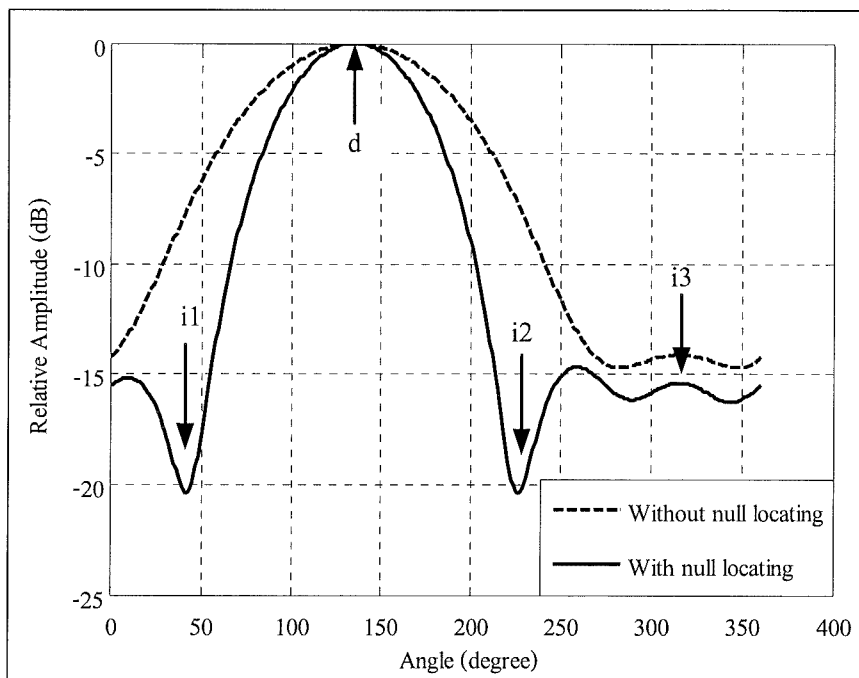
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบ

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดจุดศูนย์		
	k_1	k_2	k_3
45°	-0.2010-0.4030i	-0.1220+0.1368i	-0.1740-0.3970i
135°	-0.1754+0.3898i	-0.2110-0.3870i	0.2234+0.0917i
225°	-0.1270-0.1490i	-0.1961+0.3623i	-0.1950+0.3662i
315°	-0.1754+0.3898i	0.2234+0.0917i	-0.2110-0.3870i

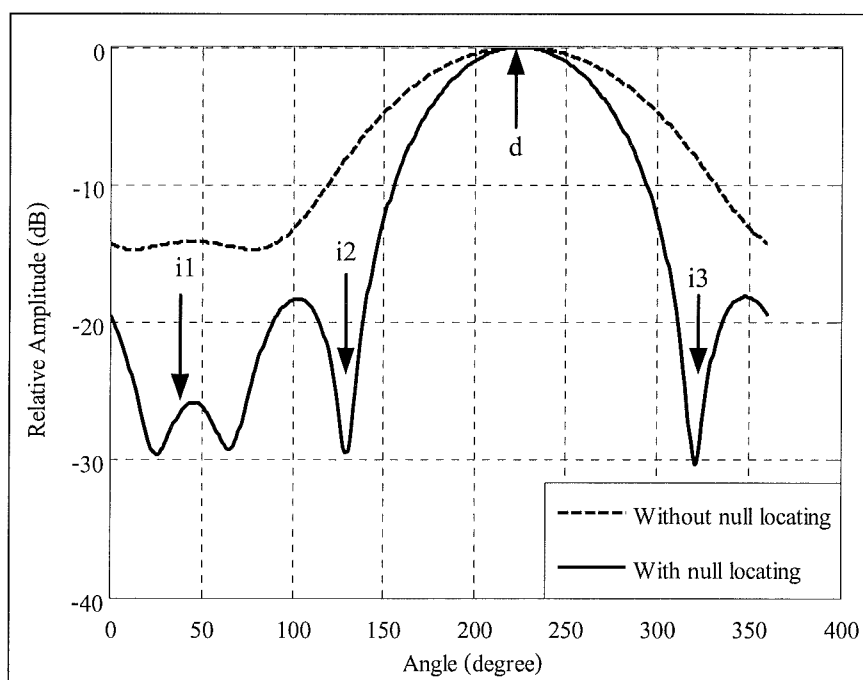
รูปที่ 4.39 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ออกแบบมานั้นสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้จริงเมื่อเราทำการเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักมาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° ผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° และ 225° ได้ดี แต่ในทิศทางที่ 315° นั้นยังไม่สามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° นั้น มีค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองผลในตารางที่ 4.3 แสดงในรูปที่ 4.40 แต่วงจรที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° นั้นก็ยังทำให้ระดับของพู่ขางต่ำลงได้ ซึ่งนั่นหมายความว่าอุปกรณ์ของเรานั้นก็ยังสามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นได้



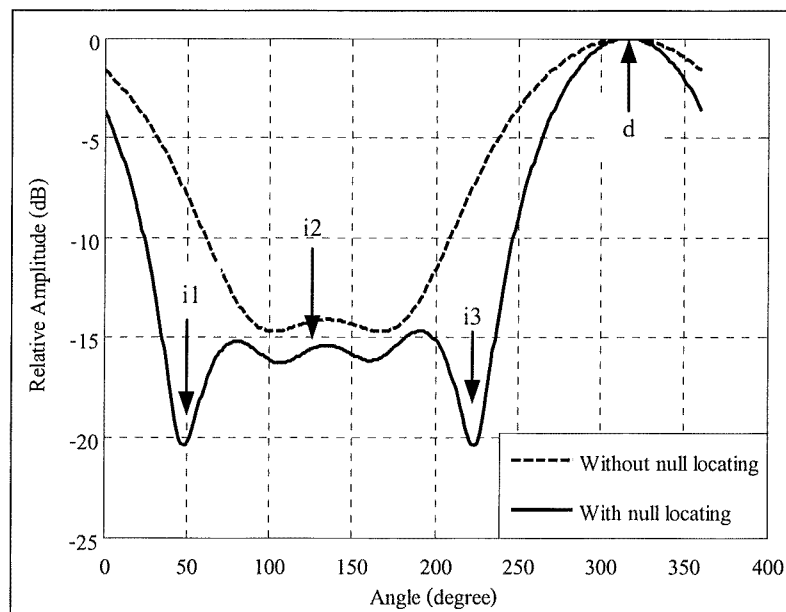
รูปที่ 4.39 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°



รูปที่ 4.40 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315°



รูปที่ 4.41 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315°



รูปที่ 4.42 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225°

รูปที่ 4.41 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° ซึ่งวงจรที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° นั้นมีมุลคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราออกแบบมานั้นสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาได้จริง สุดท้ายเมื่อเราทำการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° ผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° และ 315° ได้ดี แต่ในทิศทางที่ 225° นั้นยังไม่สามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° นั้น มีค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองผลในตารางที่ 4.3 แต่อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° นั้นก็ยังทำให้ระดับของพู่ขางต่ำลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.42 จากรูปที่ 4.39 - 4.42 ได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่เราได้ออกแบบมาทั้งหมดนั้นมีประสิทธิภาพในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้จริง

4.5 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบแบตเตอรี่เมตริกซ์ที่ถูกปรับปรุง การจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นส่วนประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลากลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ จากผลที่ได้พบว่าเราสามารถนำอุปกรณ์เหล่านี้ไปทำการสร้างและวัดผลจริงได้โดยที่เราจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป