

บทที่ 4

การวิเคราะห์และทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉาก สำหรับการสื่อสารไร้สาย

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากสำหรับการสื่อสารไร้สาย สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศนั้นจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (Finite Difference – Time Domain : FDTD) ในการวิเคราะห์และคำนวณ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณสายอากาศด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ FDTD เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศได้ดียิ่งขึ้นโดยเพิ่มการคำนวณในส่วนของอัตราขยายของสายอากาศ และประสิทธิภาพของสายอากาศ สำหรับสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วยสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด และสายอากาศ ไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ซึ่งแบบหลังสุดนี้จะทำการวัดทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศ

4.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉาก

สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากสำหรับการสื่อสารไร้สาย จะใช้วัสดุฐานรอง FR4 ที่มีคุณสมบัติดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	ϵ_r	=	4.5
ความหนาวัสดุฐานรอง	h	=	1.6 mm.
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)	σ	=	5.8×10^7 s/m
ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ	t	=	0.035 mm.
ค่าตัวประกอบการกระจาย	$\tan \delta$	=	0.02

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการส่งผ่านสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่ถูกต้องแบบเปิดวงจร (open-circuit) โดยส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบนั้น คือ การออกแบบสายส่งสัญญาณให้มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม (Z_0) โดยคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณ (W) จากสมการที่ (4.1) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความหนาของวัสดุฐานรอง (h) จากสมการที่ 2.18 – 2.21 สามารถที่จะคำนวณหา

ค่าตัวประกอบการกระจาย ($\tan \delta$) ได้เท่ากับ 0.02 ที่ซึ่งจากสมการจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (4.1ก)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.1ข)$$

การคำนวณค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ϵ_{eff})

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + \frac{12h}{W}} \quad ; \frac{W}{h} > 1 \quad (4.2)$$

คำนวณหาความยาวคลื่น (λ_0) ได้จาก

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (4.3)$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพัทธ์ในตัวนำ (λ_g)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{f} \quad (4.4)$$

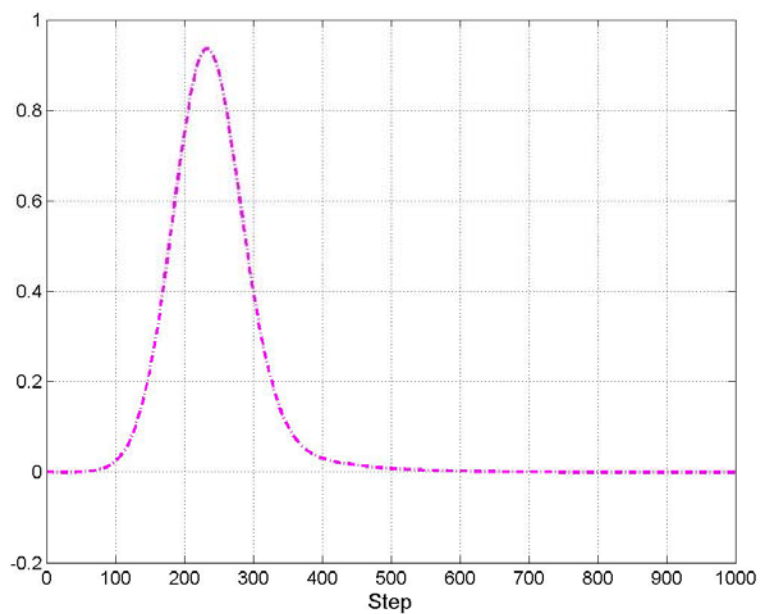
$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.5)$$

โดยที่

- c คือ ความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 m/s)
- f คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ
- ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์
- ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

4.2.1 การจำลองสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD)

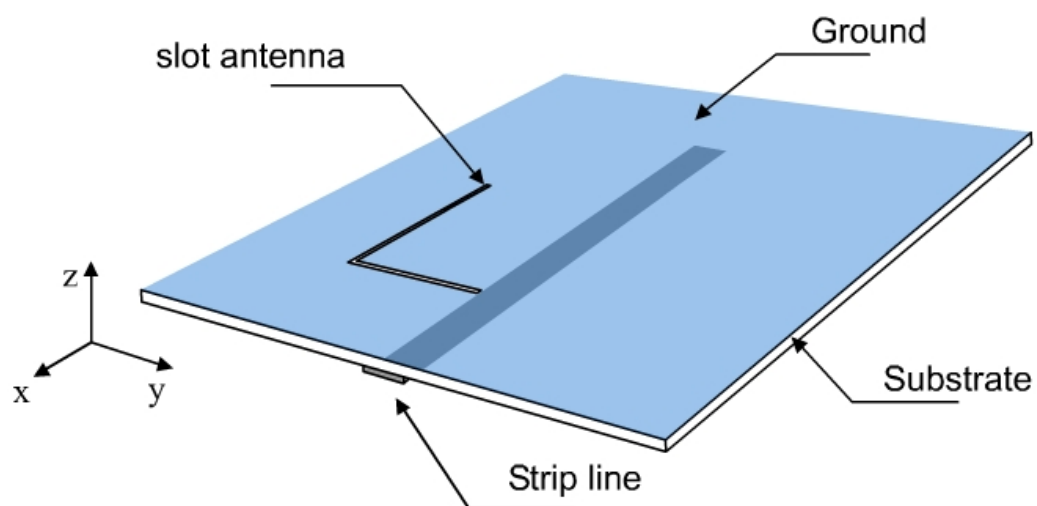
การวิเคราะห์สายอากาศในเชิงทฤษฎีด้วยวิธีแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศในบทความนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบผลต่างสลับเนื่องในโดเมนเวลา (FDTD) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ ในการออกแบบรูปจำลองโครงสร้างของสายอากาศได้กำหนดขนาดของหนึ่งหน่วยเซลล์ในทิศทาง z คือ $\Delta z = 0.16$ มิลลิเมตร ขนาดของหนึ่งหน่วยเซลล์ในทิศทาง x และ y คือ $\Delta x = \Delta y = 0.1$ มิลลิเมตร



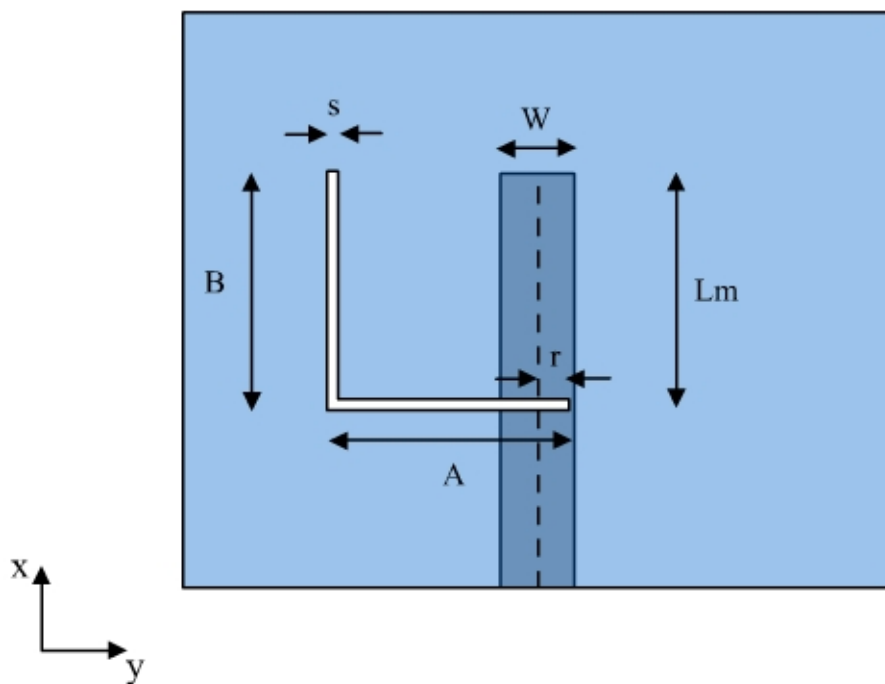
รูปที่ 4.1 แหล่งกำเนิดแรงดันที่เป็นพัลส์แบบเกาส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากรูปที่ 4.1 แสดงแหล่งกำเนิดแรงดันที่เป็นพัลส์แบบเกาส์ที่ป้อนให้กับโครงสร้างจำลองของสายอากาศ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันที่ถูกป้อนเข้าไปในโครงสร้างของสายอากาศที่จะทำการวิเคราะห์

4.3 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด



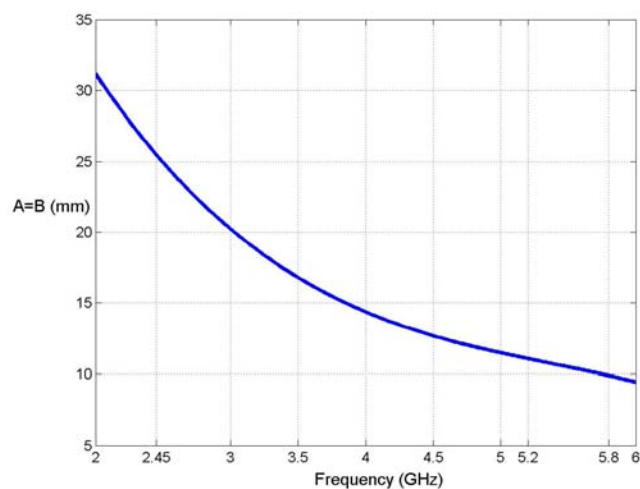
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด



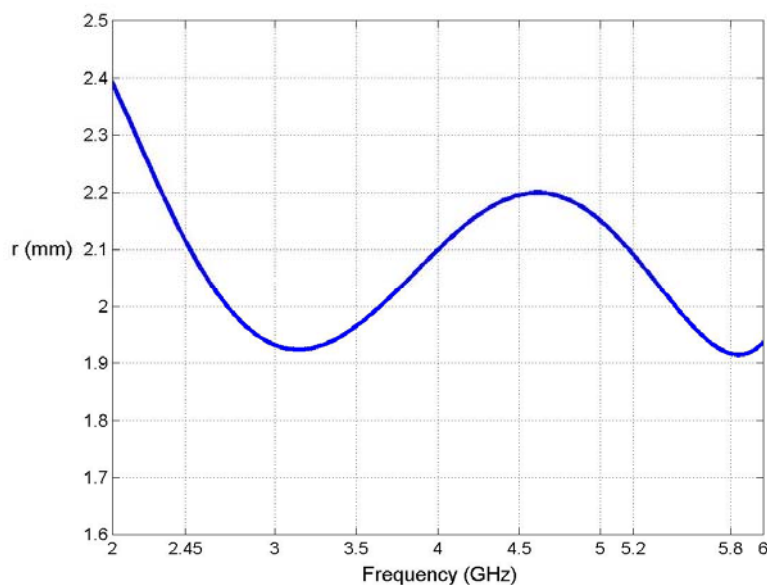
รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.3 ประกอบไปด้วย

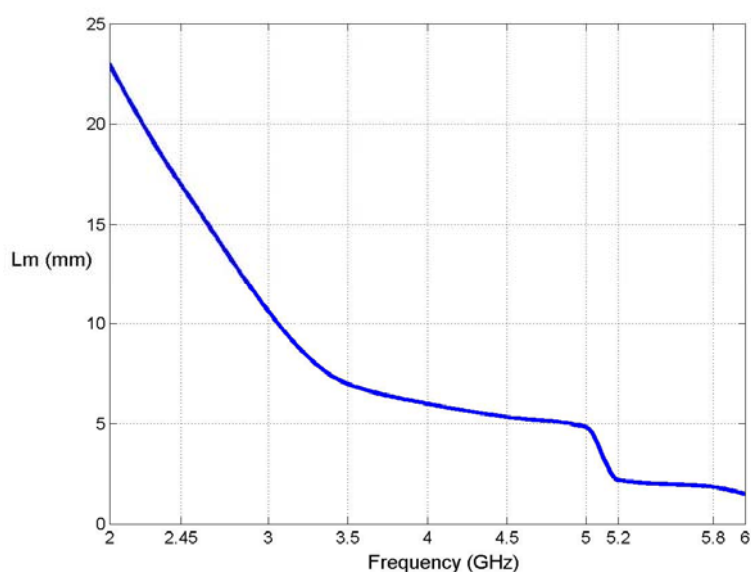
- A คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวนอน
- B คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวตั้ง
- S คือ ความกว้างของช่องเปิด
- W คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป
- Lm คือ ระยะห่างระหว่างขอบช่องเปิดในแนวนอนถึงขอบบนของไมโครสตริป
- r คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของสายส่งไมโครสตริปกับขอบด้านปลายของความยาวในแนวนอน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของด้าน กับความถี่



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะ r กับความถี่



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะ Lm กับความถี่

จากรูปที่ 4.3 – 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบไปด้วยช่องเปิดมุมฉากที่ถูกล้อมรอบบนระนาบกราวด์และมีวัสดุฐานรองเป็นแผ่น FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.5 และความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ

1.6 มิลลิเมตร โดยช่องเปิดจะถูกส่งสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป และการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นจะมีวิธีการออกแบบเพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการดังนี้

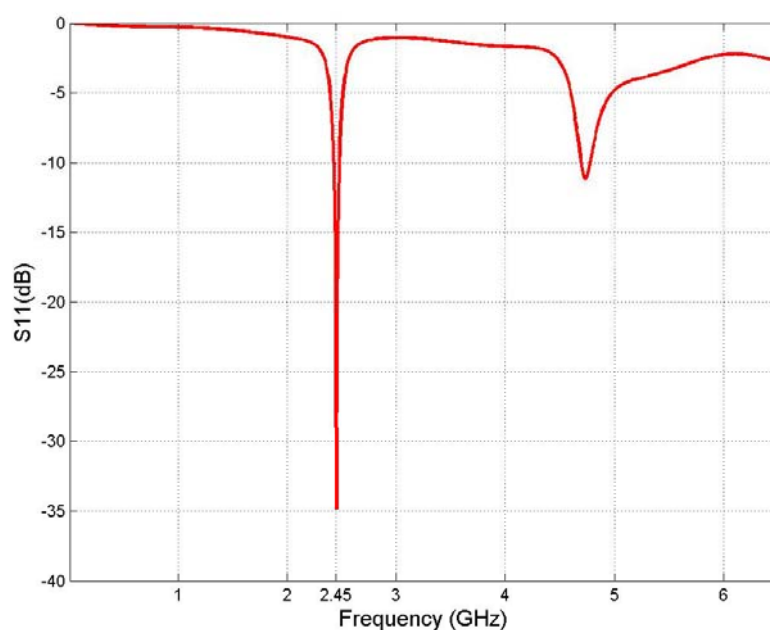
1. ออกแบบช่องเปิดให้มีความยาวด้าน $A = B$ มีค่าประมาณ $\frac{\lambda_g}{4}$

2. ออกแบบให้มีความยาวรวมของช่องเปิด $A + B \approx \frac{\lambda_g}{2}$

จากคุณสมบัติข้างต้นที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ความยาวรวมของช่องเปิดจะเป็นตัวกำหนดให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ส่วนความกว้างของช่องเปิด (S) จะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ และสำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็คือความยาว L_m กับ ระยะ r ดังนั้นจากหลักในการออกแบบทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1 โดยจะออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อที่จะนำไปใช้ในระบบ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g ที่มีแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.4-2.4835 GHz

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	
A	20.9 mm (0.28 λ_g)
L_m	19.6 mm (0.26 λ_g)
R	1.1 mm
S	0.7 mm

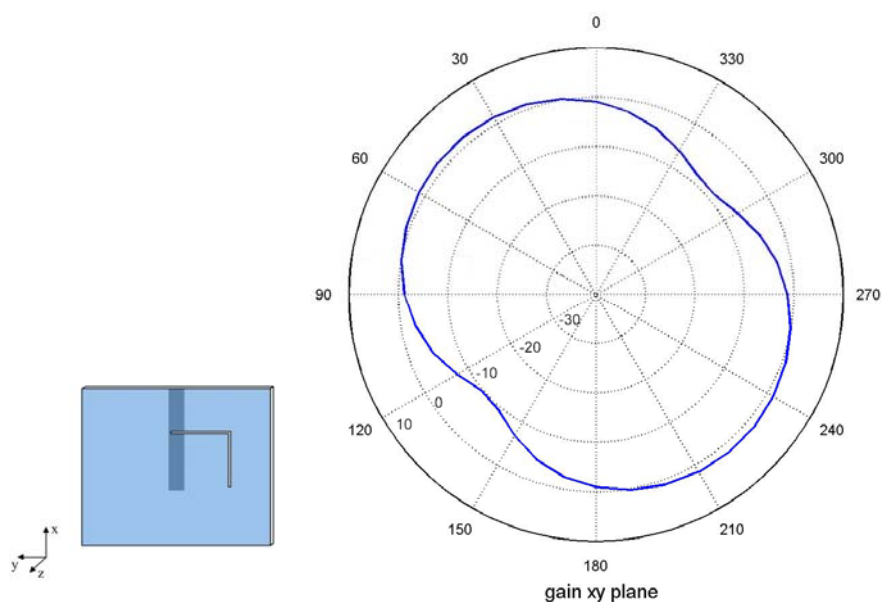


รูปที่ 4.7 แสดง S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด

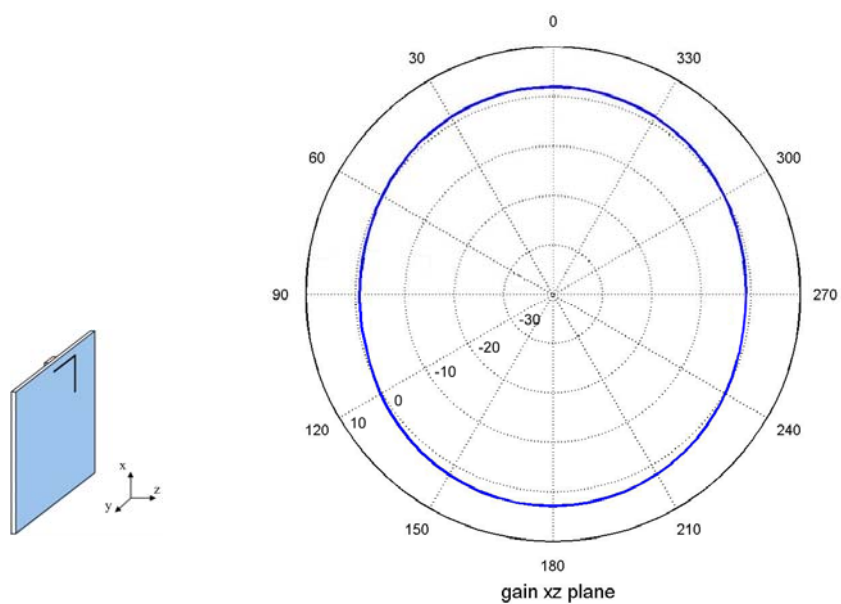
ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด

ความถี่เรโซแนนซ์	2.453 GHz
S_{11} พารามิเตอร์	-34.85 dB
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	1.037 : 1
อินพุตอิมพีแดนซ์	$48.5 - j0.967$ โอห์ม
แบนด์วิดท์	2.4 – 2.5 GHz
ประสิทธิภาพของสายอากาศ	99.67 %
อัตราขยายของสายอากาศ	3.09 dBi

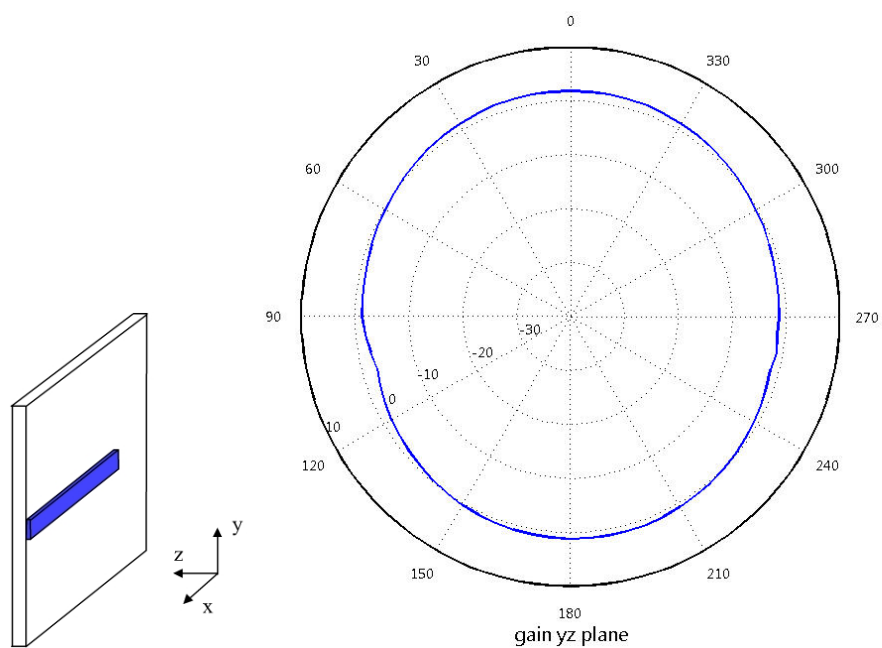
จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบช่องเปิดเดี่ยวจะทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีประมาณความถี่ 2.45 GHz และจะสังเกตความถี่หลังซึ่งเป็นความถี่ที่สองนั้นจะมีค่าน้อยมาก ทำให้ทราบว่าสายอากาศแบบนี้สามารถผลิตความถี่ได้ หนึ่งความถี่เท่านั้นสำหรับตารางที่ 4.2 แสดงคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ จะเห็นว่าสายอากาศแบบนี้มีอัตราขยายของสายอากาศสูงสุดที่ 3.09 dBi และประสิทธิภาพของสายอากาศประมาณ 99.67 %



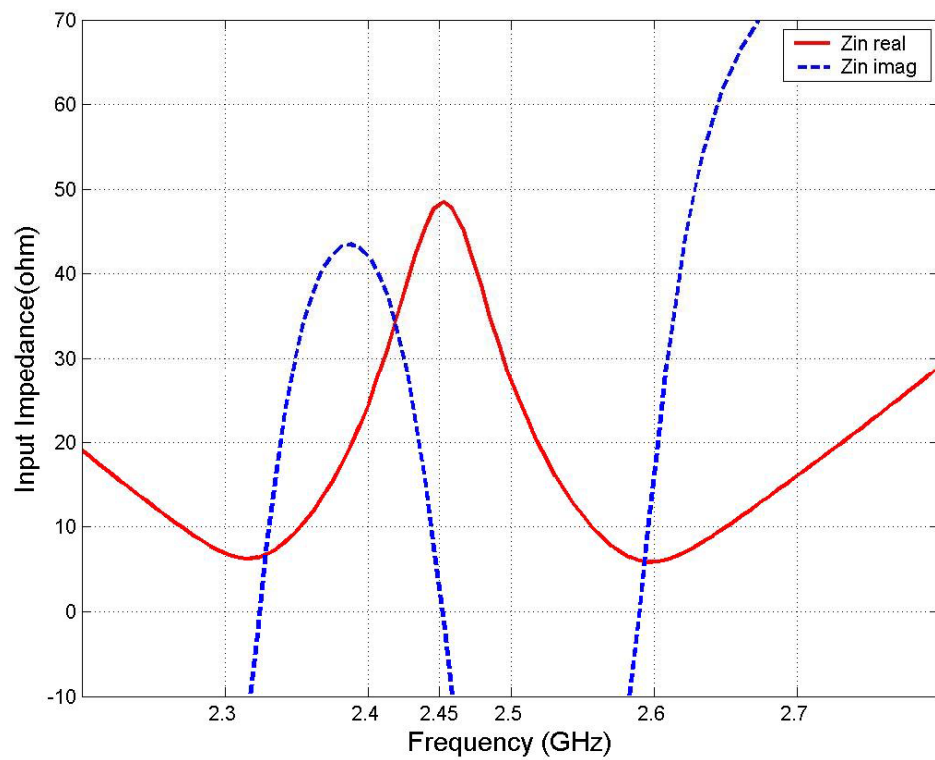
รูปที่ 4.8 แบบรูปอัตราขยายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด



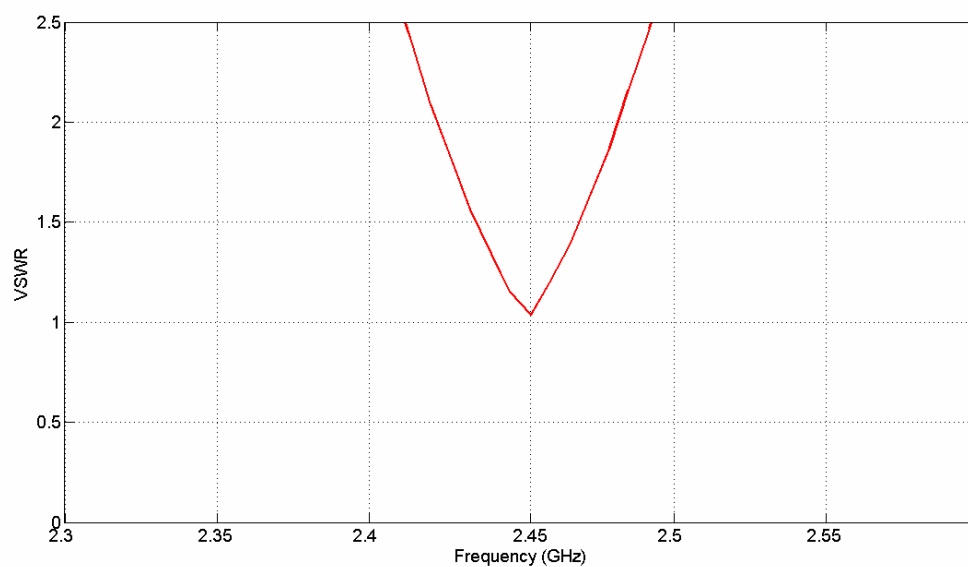
รูปที่ 4.9 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด



รูปที่ 4.10 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด



รูปที่ 4.11 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด

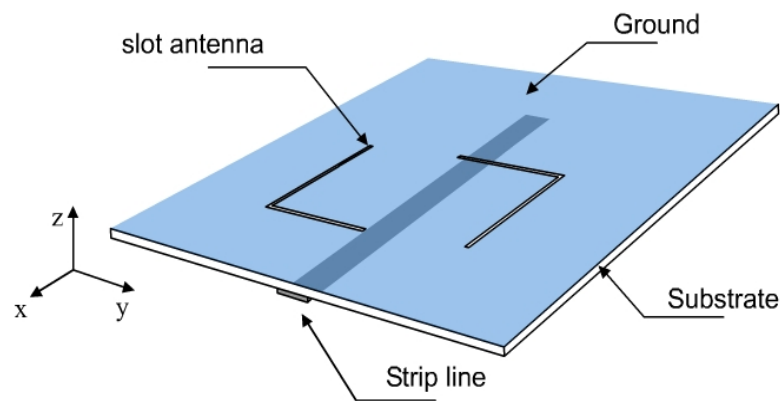


รูปที่ 4.12 ค่า VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด

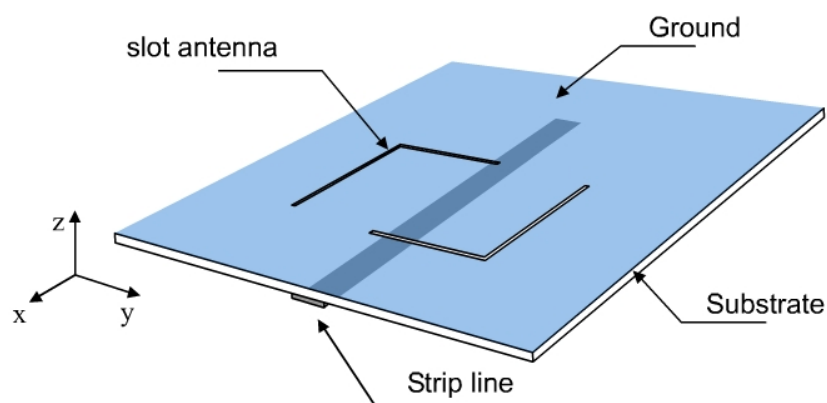
จากรูปที่ 4.9-4.10 แสดงแบบรูปอัตราขยายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศ จากรูปจะสังเกตได้ว่า ที่ระนาบ xy สายอากาศจะมีอัตราขยายสูงที่มุม 50 องศา กับ 230 องศา เนื่องมาก

ช่องเปิดเป็นแบบมุมฉากที่ซึ่งมีสนามมากที่สุดตรงมุมของช่องเปิด สำหรับระนาบ xz กับ yz นั้นจะมีอัตราขยายสูงที่มุม 0 องศา กับ มุม 180 องศา นั่นก็คือที่ด้านช่องเปิดกับด้านสายส่งไมโครสตริปตามลำดับ รูปที่ 4.11-4.12 แสดง อินพุตอิมพีแดนซ์ และ VSWR ของสายอากาศแบบ 1 ช่องเปิด โดยค่า อินพุตอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับ $48.5 - j0.967$ โอห์ม VSWR เท่ากับ 1.037:1

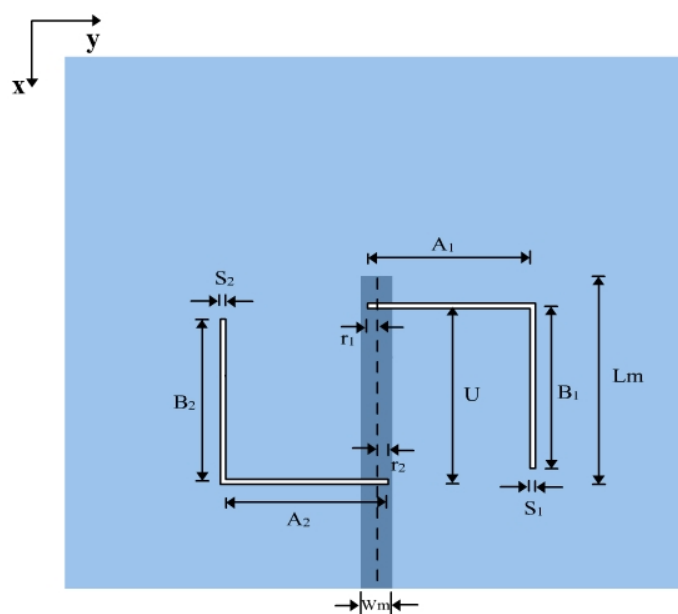
4.4 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด
รูปแบบที่ 1

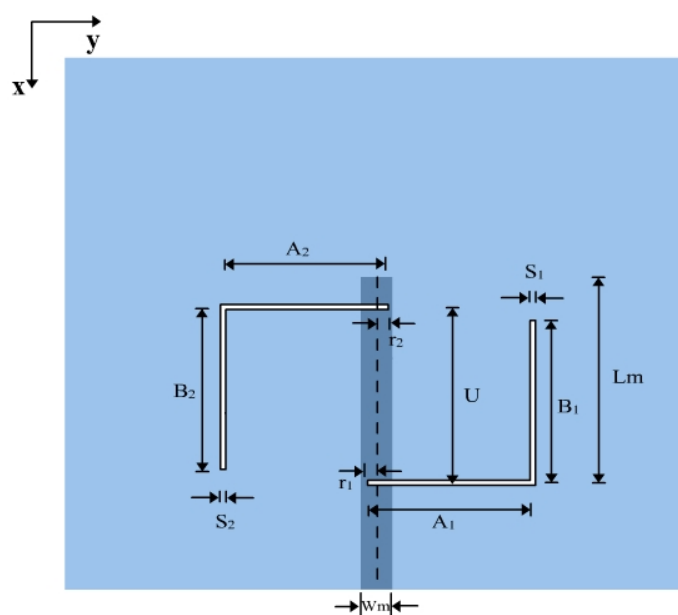


รูปที่ 4.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด
รูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.15 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด

รูปแบบที่ 1

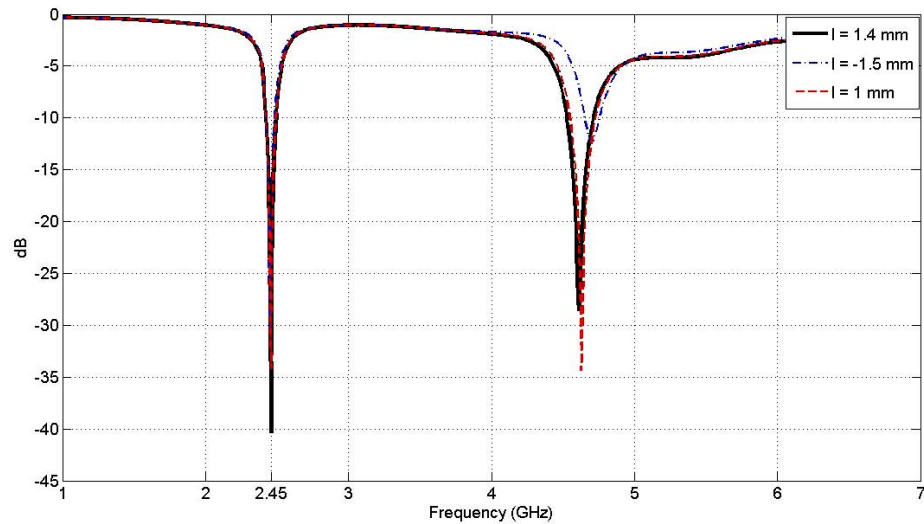


รูปที่ 4.16 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด

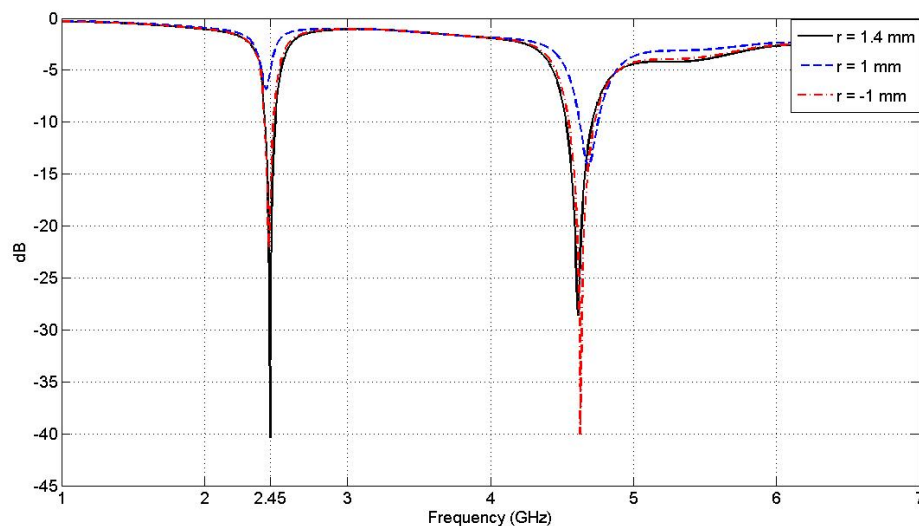
รูปแบบที่ 2

จากรูปที่ 4.13 - 4.16 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด รูปแบบที่ 1 และ รูปแบบที่ 2 โดยในการออกแบบจะวางช่องเปิด

มุลาก 2 ช่องเปิดเป็นแวลลาคับ ก็คือ มีช่องเปิดตัวที่ 1 อยู่ขอบด้านลางของระนาบกราวด์ของสายอากาศ และช่องเปิดตัวที่ 2 อยู่ที่ขอบด้านบนของระนาบกราวด์ของสายอากาศ สำหรับพารามิเตอร์ของสายอากาศจะเหมือนกับสายอากาศแบบ 1 ช่องเปิด โดยที่พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ความถี่



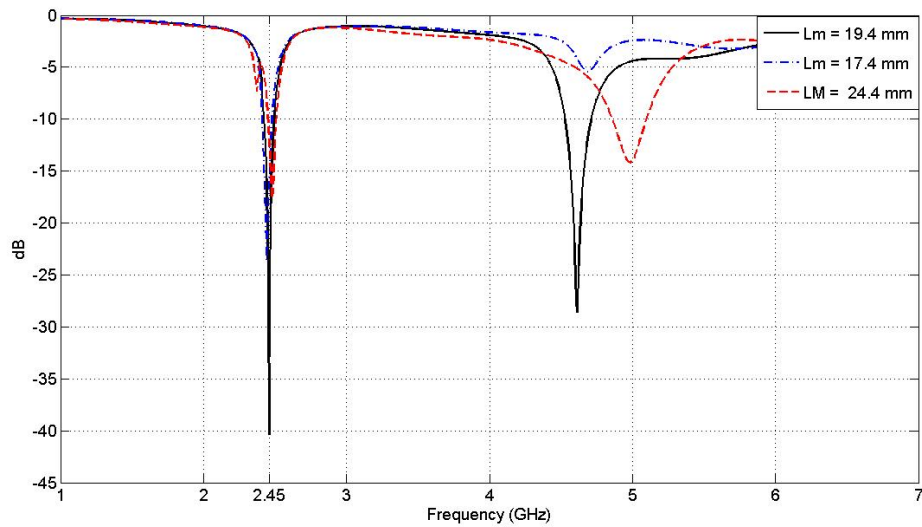
รูปที่ 4.17 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุลากแบบแวลลาคับ 2 ช่องเปิด เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ r_1



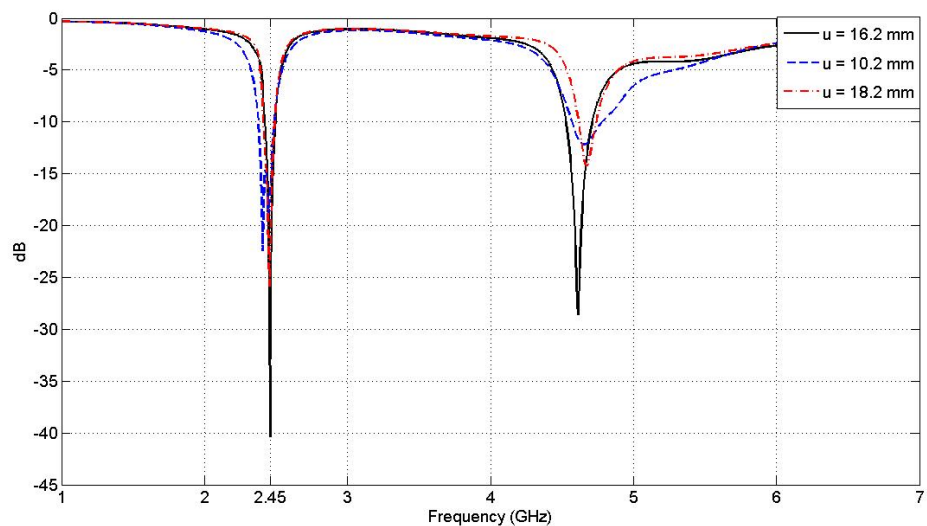
รูปที่ 4.18 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุลากแบบแวลลาคับ 2 ช่องเปิด เมื่อทำการปรับ r_2

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดง S_{11} พารามิเตอร์ ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปมุลากแวลลาคับ 2 ช่องเปิดรูปแบบที่ 1 เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ r_1 และ r_2 ตามลำดับ จากรูปจะ

เห็นได้ว่าพารามิเตอร์ r_1 และ r_2 จะมีผลต่อการเกิดแมทซ์ในความถี่ที่สอง โดยระยะ r_2 จะมีผลมากกว่าระยะ r_1



รูปที่ 4.19 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ L_m



รูปที่ 4.20 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ u

จากรูปที่ 4.19 ถึง รูป 4.20 แสดงผลของ S_{11} เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ L_m และ u ตามลำดับ จากรูป แสดงให้เห็นว่า การปรับพารามิเตอร์ L_m มีผลต่อการเกิดความถี่เรโซแนนซ์ ของความถี่ที่สอง ส่วนพารามิเตอร์ u จะมีผลกระทบต่อนแมทซ์เช่นเดียวกับ r_1 และ r_2 โดยพารามิเตอร์

ต่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิดที่ได้ทำการออกแบบไว้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

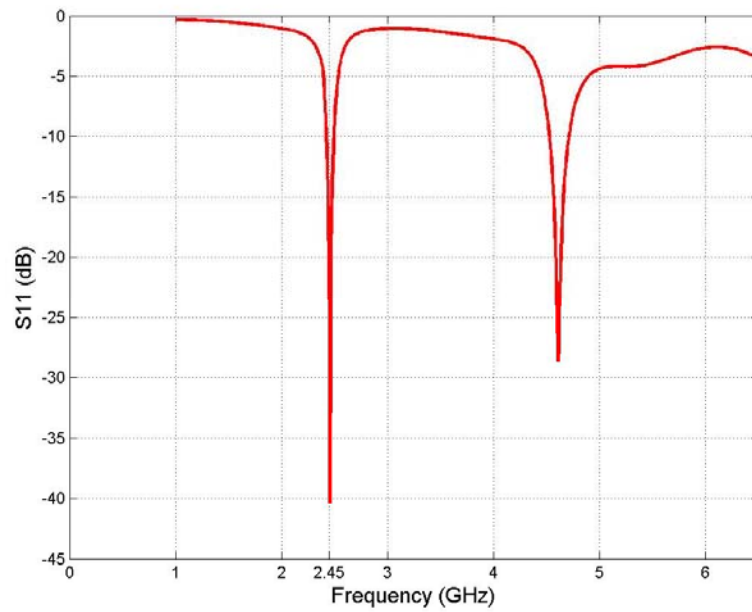
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2
$A_1 = A_2$	20.9 mm (0.28 λ_g)	20.9 mm (0.28 λ_g)
$B_1 = B_2$	20.9 mm (0.28 λ_g)	20.9 mm (0.28 λ_g)
Lm	19.4 mm (0.26 λ_g)	19.4 mm (0.26 λ_g)
$r_1 = r_2$	1.4 mm	1.4 mm
$S_1 = S_2$	0.7 mm	0.7 mm
U	16.2 mm	16.2 mm

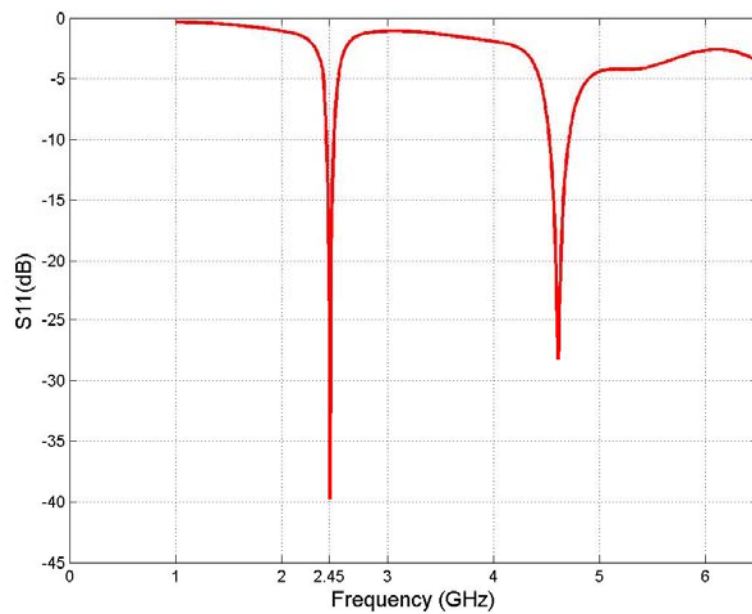
จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิดของทั้งสองรูปแบบ โดยทั้งสองรูปแบบนั้นจะมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกันแต่จะกลับด้านช่องเปิดซึ่งกันและกัน โดยที่ความยาวรวมของช่องเปิดจะมีค่าประมาณ 0.56 λ_g และคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศจะแสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.21 - 4.27

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด รูปมุมฉากแถวลำดับสองช่องเปิด	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2
ความถี่เรโซแนนซ์	2.45 GHz	2.45 GHz
S_{11} พารามิเตอร์	-40.35 dB	-39.75 dB
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	1.019 : 1	1.021 : 1
อินพุตอิมพีแดนซ์	50.95 – j0.1893 โอห์ม	51.04 – j0.06 โอห์ม
แบนด์วิดท์	2.39 – 2.492 GHz	2.39 – 2.493 GHz
ประสิทธิภาพของสายอากาศ	99.98 %	99.98 %
อัตราขยายของสายอากาศ	3.88 dBi	3.88 dBi

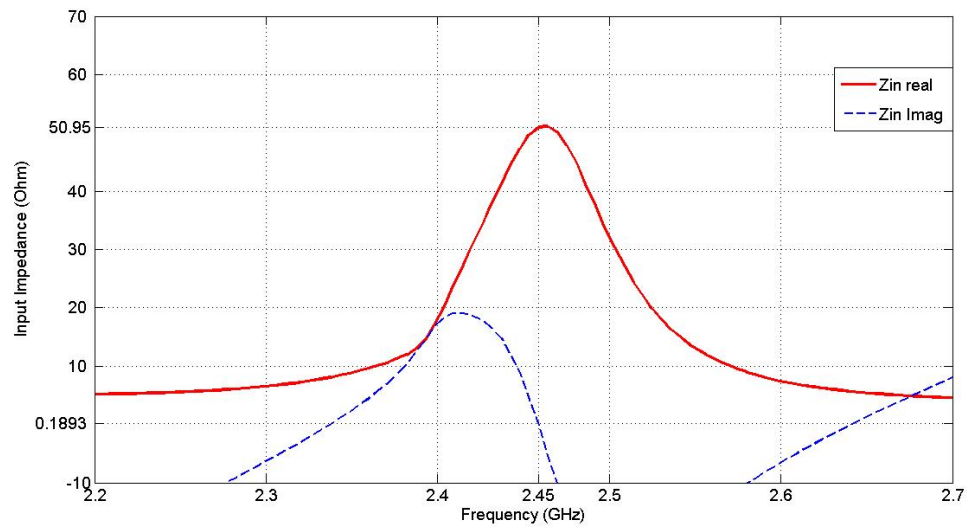


รูปที่ 4.21 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิดแบบที่ 1

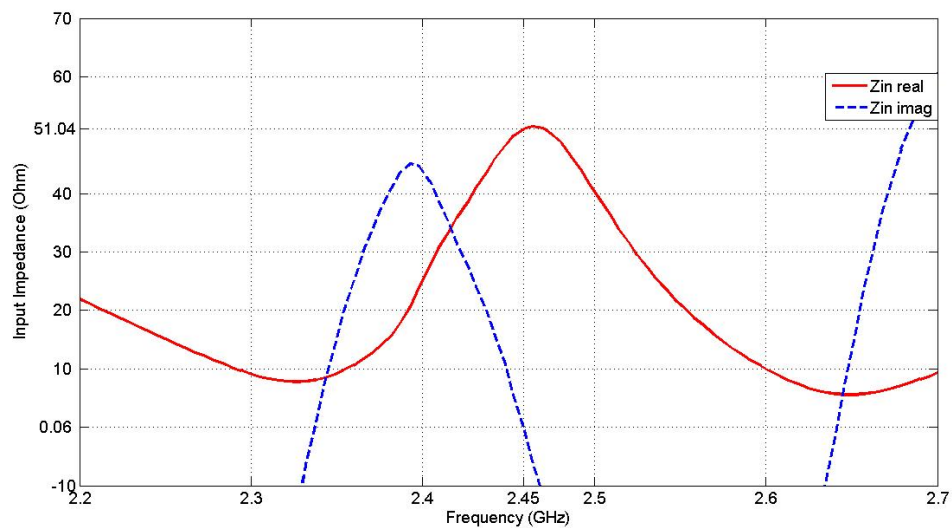


รูปที่ 4.22 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิดรูปแบบที่ 2

รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดง s_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบ 2 ช่องเปิด ทั้งสองแบบ จะเห็นว่าสายอากาศทั้งสองแบบจะมีความถี่ตอบสนองที่ 2.45 GHz

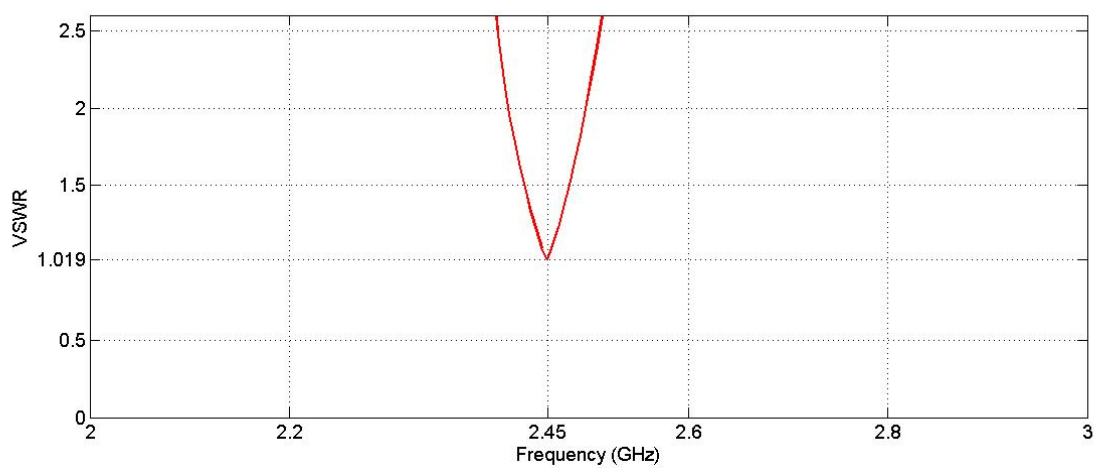


รูปที่ 4.23 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากแบบ 2 ช่องเปิด
รูปแบบที่ 1

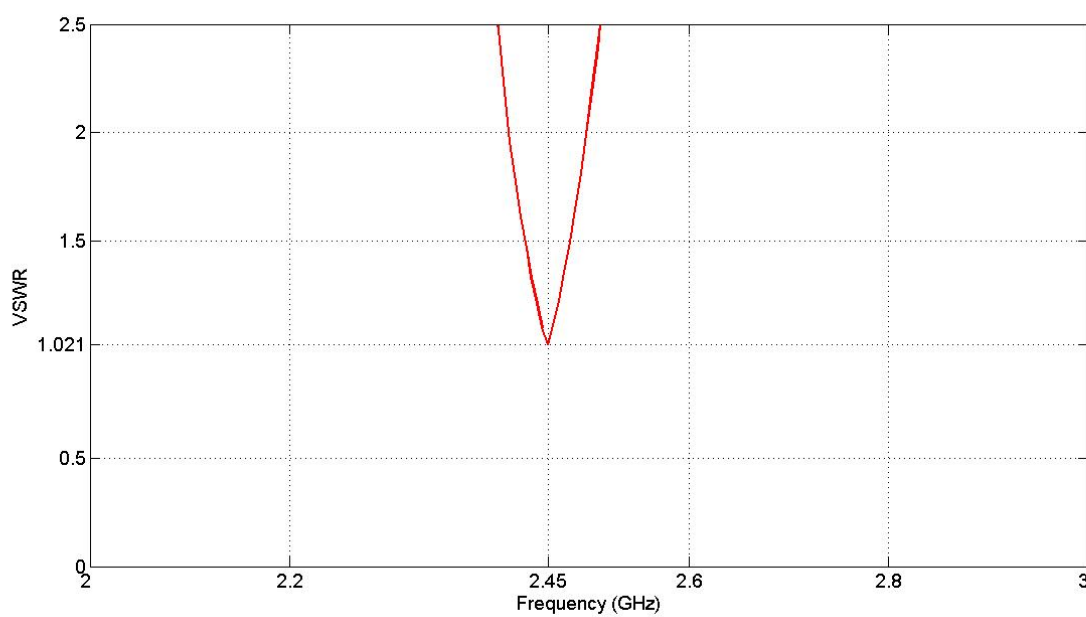


รูปที่ 4.24 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากแบบ 2 ช่องเปิด
รูปแบบที่ 2

รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ 2 ช่องเปิดโดยสายอากาศ
รูปแบบ ที่ 1 มีอินพุตอิมพีแดนซ์ เท่ากับ $50.95 - j0.1893$ โอห์ม และสายอากาศแบบ 2 ช่องเปิด
รูปแบบที่ 2 มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ เท่ากับ $51.04 - j0.06$ โอห์ม

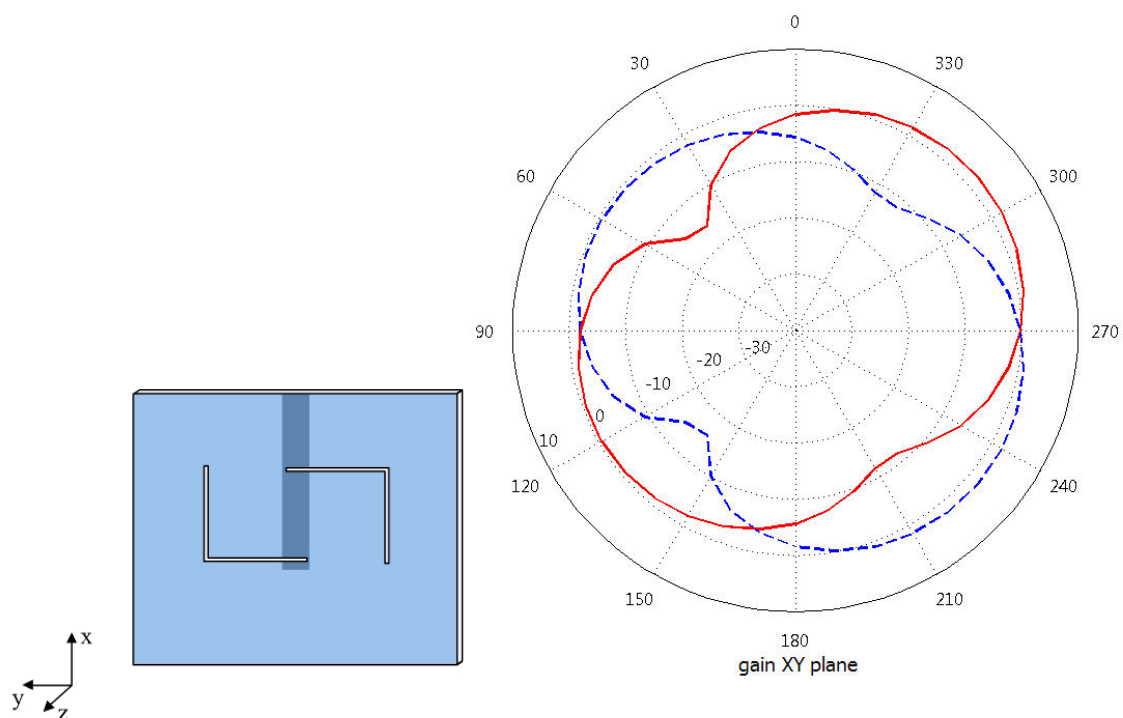


รูปที่ 4.25 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากแบบ 2 ช่องเปิดรูปแบบที่ 1

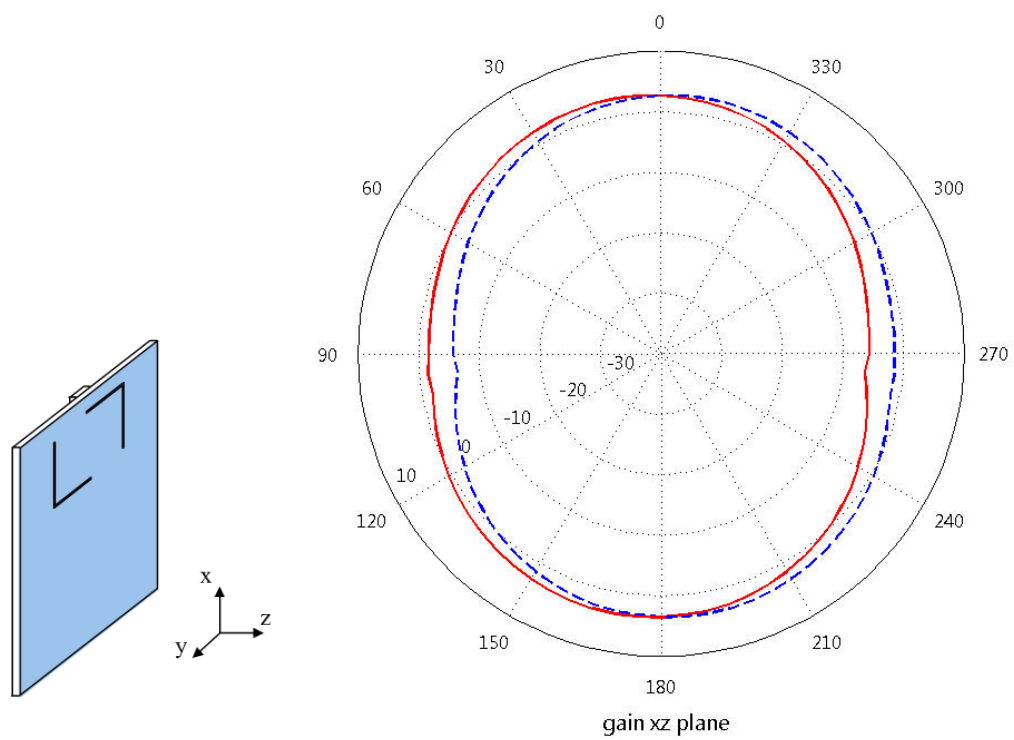


รูปที่ 4.26 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากแบบ 2 ช่องเปิดรูปแบบที่ 2

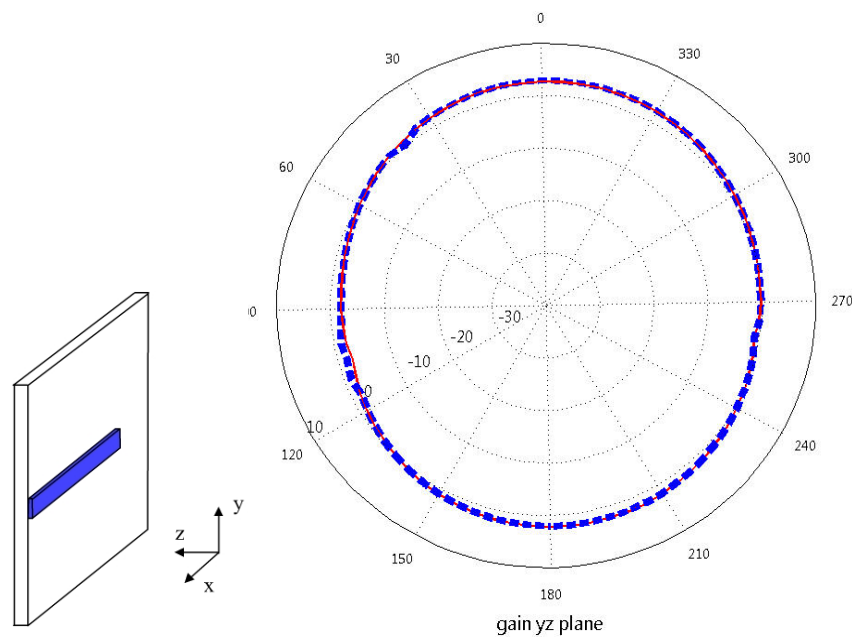
รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดง VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก 2 ช่องเปิดโดยในรูปแบบที่ 1 มี VSWR เท่ากับ 1.019:1 และรูปแบบที่ 2 เท่ากับ 1.021:1



รูปที่ 4.27 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด



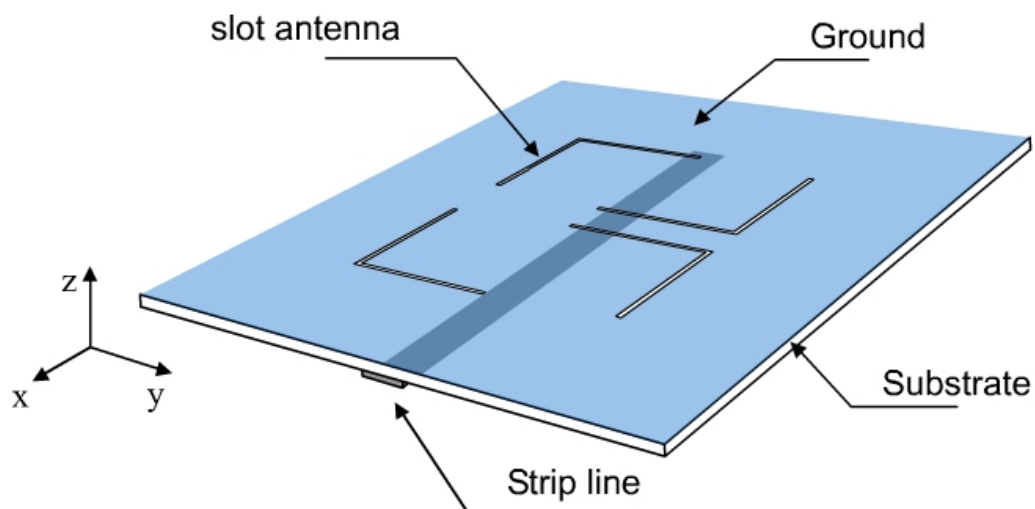
รูปที่ 4.28 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด



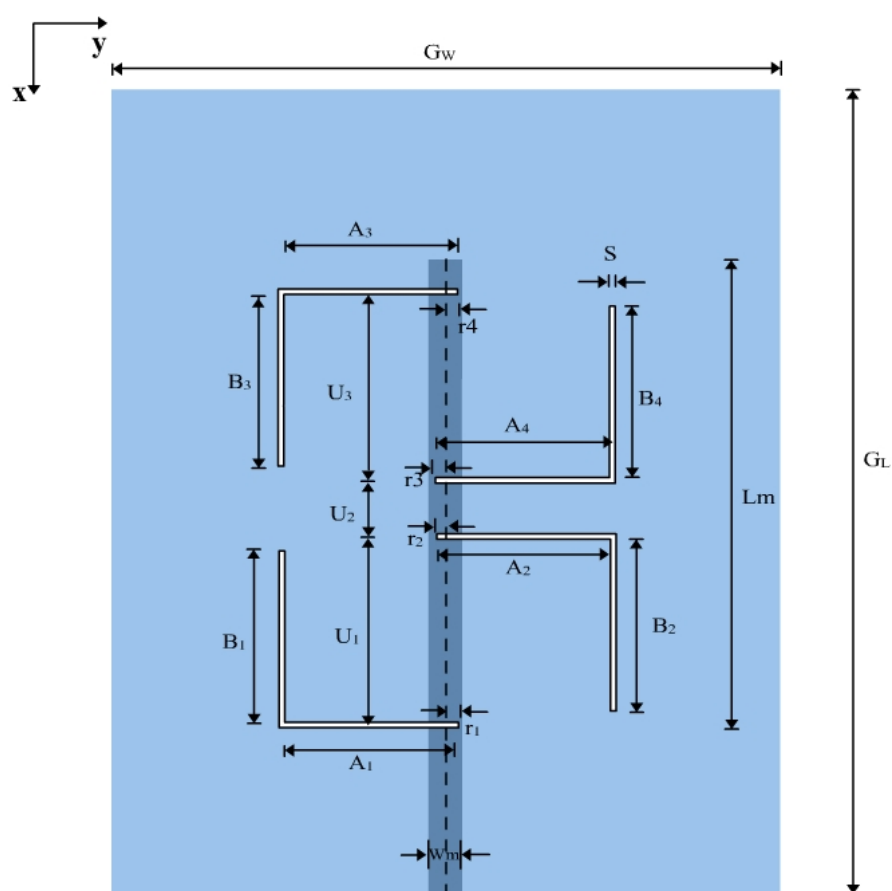
รูปที่ 4.29 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 2 ช่องเปิด

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถว 2 ช่องเปิดนี้จะมีอัตรายายของสายอากาศมากกว่าสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 1 ช่องเปิด โดยทั้ง 2 รูปแบบจะมีอัตรายายอยู่ที่ 3.88 dBi และจะมีประสิทธิภาพของสายอากาศประมาณ 99.98 % จากรูปที่ 4.22 และ 4.27 แสดงพารามิเตอร์ของสายอากาศทั้งสองรูปแบบ จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบนี้มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีในความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz และยังสามารถทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่สองที่ 4.61 GHz อีกด้วย แต่ในช่วงความถี่ที่สองนี้ยังไม่มีกำหนดมาตรฐานย่านความถี่ในการที่จะนำไปใช้งานระบบการสื่อสารไร้สาย จากรูปที่ 4.29 – 4.30 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy, xz และ yz ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ 2 ช่องเปิด ของทั้ง 2 รูปแบบ โดยที่เส้นประนั้นจะเป็นรูปแบบที่ 1 ส่วนเส้นทึบจะเป็นรูปแบบที่ 2 จากรูปจะเห็นได้ว่าในระนาบ xy ช่องเปิดที่ถูกจัดวางในรูปแบบที่ 1 นั้นจะมีอัตรายายสูงที่มุม 60 องศา กับ 240 องศา ส่วนรูปแบบที่ 2 จะมีมุมสูงสุดที่ 120 องศา กับ 320 องศา ซึ่งทั้งสองรูปแบบจะมีมุมที่ตรงข้ามกันอันเนื่องจากการจัดวางช่องเปิดให้มีवेक्टरที่ตรงข้ามกัน ส่วนระนาบ xz กับ yz ของทั้ง 2 รูปแบบจะมีลักษณะของการแผ่พลังงานที่ใกล้เคียงกัน โดยมีอัตรายายสูงสุดที่มุม 0 องศา และ 180 องศา

4.5 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด



รูปที่ 4.30 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด



รูปที่ 4.31 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด

รูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด โดยหลักในการออกแบบจะใช้จากการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบ 2 ช่องเปิดทั้งสองรูปแบบมาใช้เพื่อที่จะทำให้สายอากาศมีความถี่เรโซแนนซ์ 2 ความถี่ และมีแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลเป็นแบบรอบทิศทาง ซึ่งจากการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ 4 ช่องเปิดจะมีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นมา 3 พารามิเตอร์ก็คือ

U_1 คือ ระยะระหว่างช่องเปิดที่ 1 กับช่องเปิดที่ 2

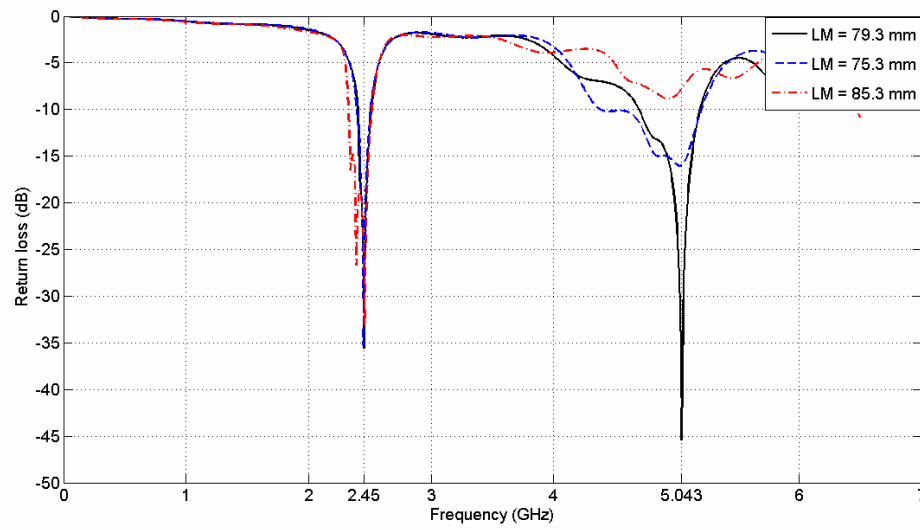
U_2 คือ ระยะระหว่างช่องเปิดที่ 2 กับช่องเปิดที่ 4

U_3 คือ ระยะระหว่างช่องเปิดที่ 3 กับช่องเปิดที่ 4

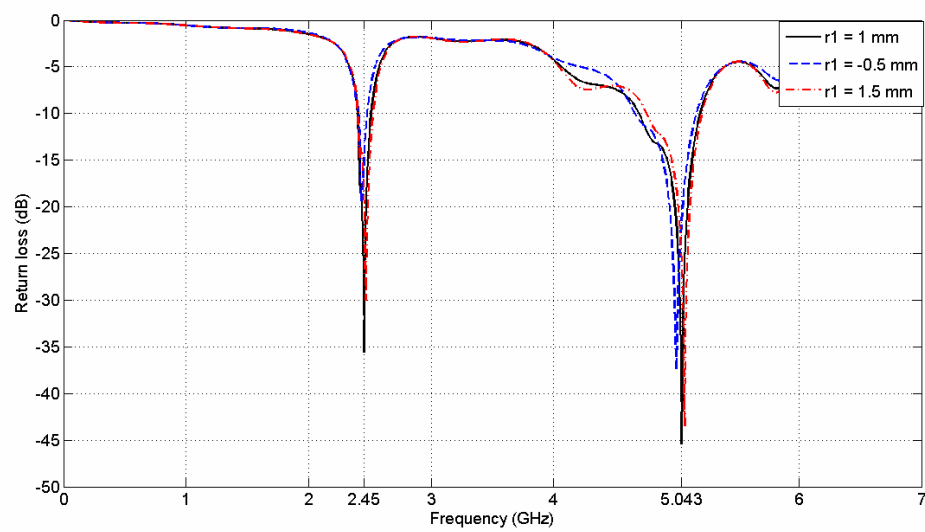
โดยที่พารามิเตอร์ของสายอากาศจะแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด

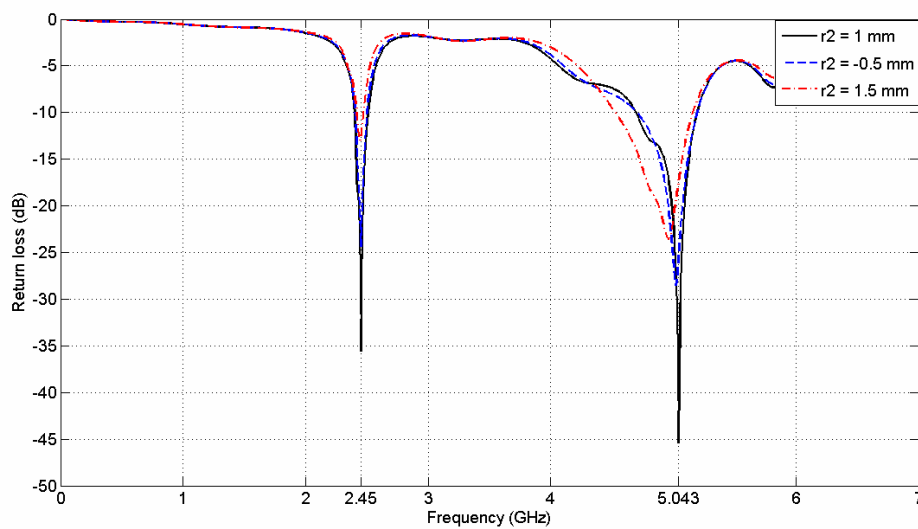
พารามิเตอร์ของสายอากาศ	
A_1	20.9 mm (0.283 λ_g)
B_1	21.4 mm (0.289 λ_g)
L_m	79.3mm (1.07 λ_g)
r_1	1 mm
U_1	13.2 mm
U_2	11.5 mm
A_2	20.9 mm (0.283 λ_g)
B_2	20.9 mm (0.283 λ_g)
r_2	1. mm
A_3	20.9 mm (0.283 λ_g)
B_3	20.9 mm (0.283 λ_g)
r_3	1 mm
U_3	25.3 mm (0.343 λ_g)
A_4	20.9 mm (0.283 λ_g)
B_4	21.4 mm (0.289 λ_g)
r_4	1 mm
$S_1 = S_2 = S_3 = S_4$	0.7 mm
W	3 mm



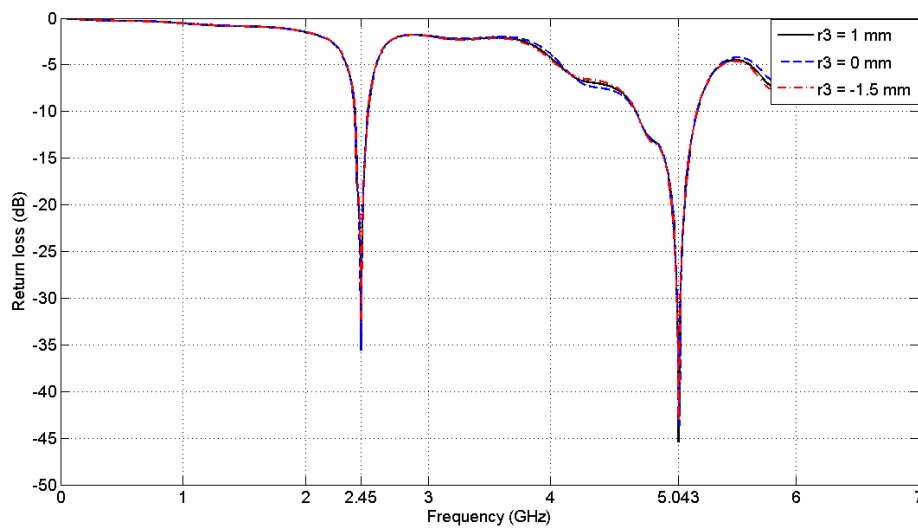
รูปที่ 4.32 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ L_m



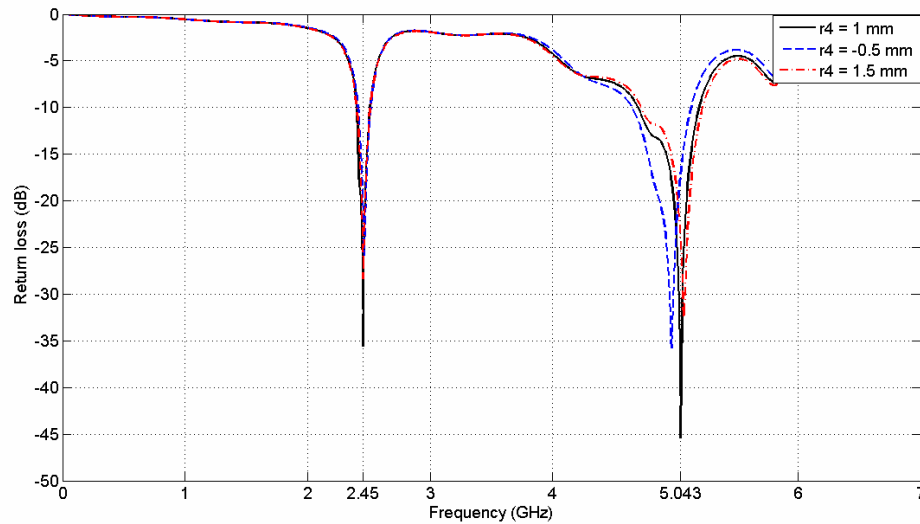
รูปที่ 4.33 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ r_1



รูปที่ 4.34 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ r_2

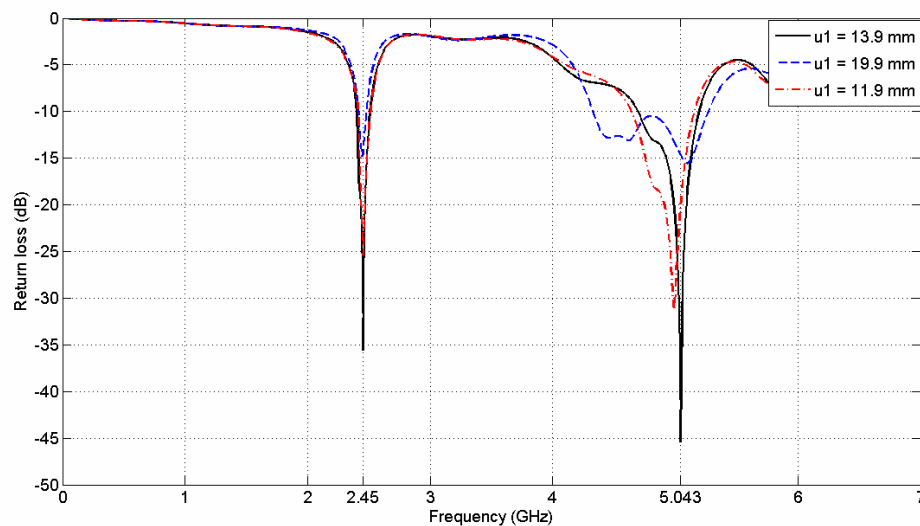


รูปที่ 4.35 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ r_3

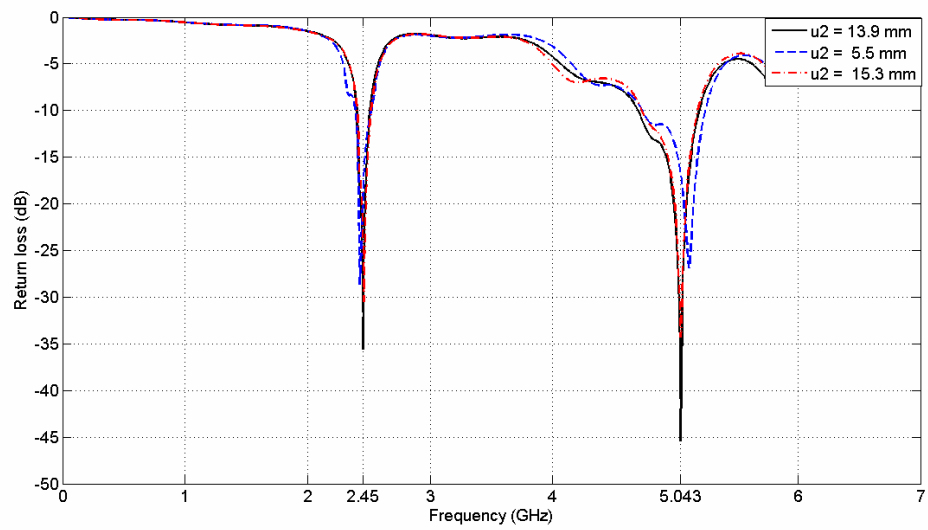


รูปที่ 4.36 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ r_4

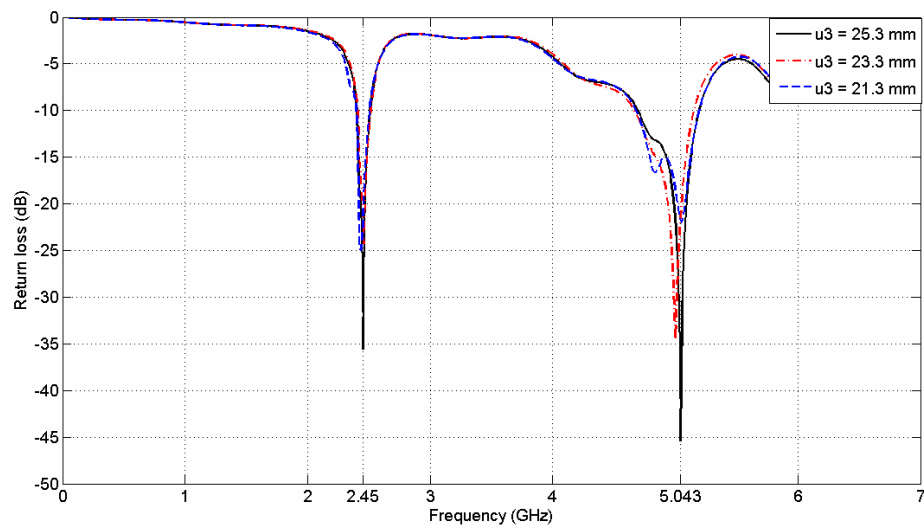
รูปที่ 4.34- 4.37 แสดงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์ r_1 , r_2 , r_3 , r_4 ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดโดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ ทีละตัว เพื่อที่จะดูผลกระทบ โดยจะเห็นว่าพารามิเตอร์ r_1 , r_2 , r_3 , r_4 จะมีผลกระทบต่อแมตซิ่งของสายอากาศเหมือนกันแต่พารามิเตอร์ r_4 และ r_2 จะมีผลต่อการแมตซิ่งมากกว่า



รูปที่ 4.37 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ u_1



รูปที่ 4.38 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4
ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ u_2

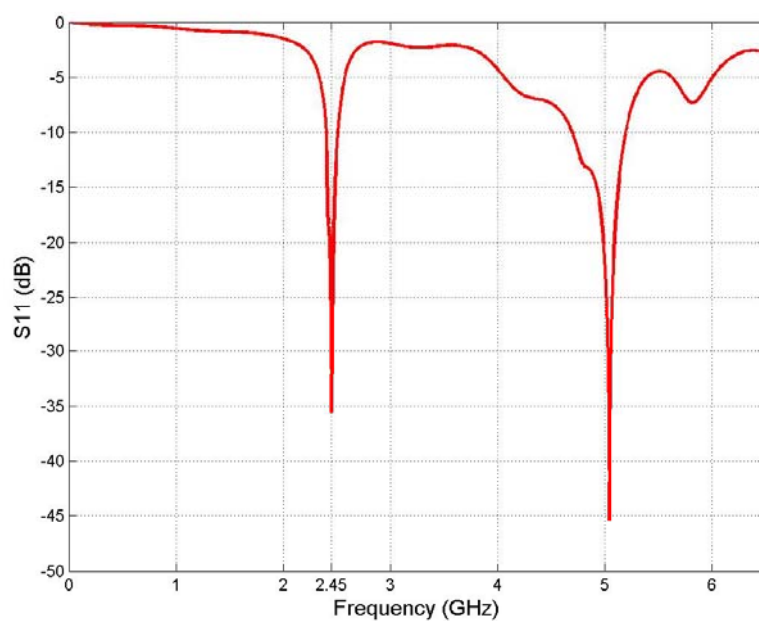


รูปที่ 4.39 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4
ช่องเปิดเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ u_3

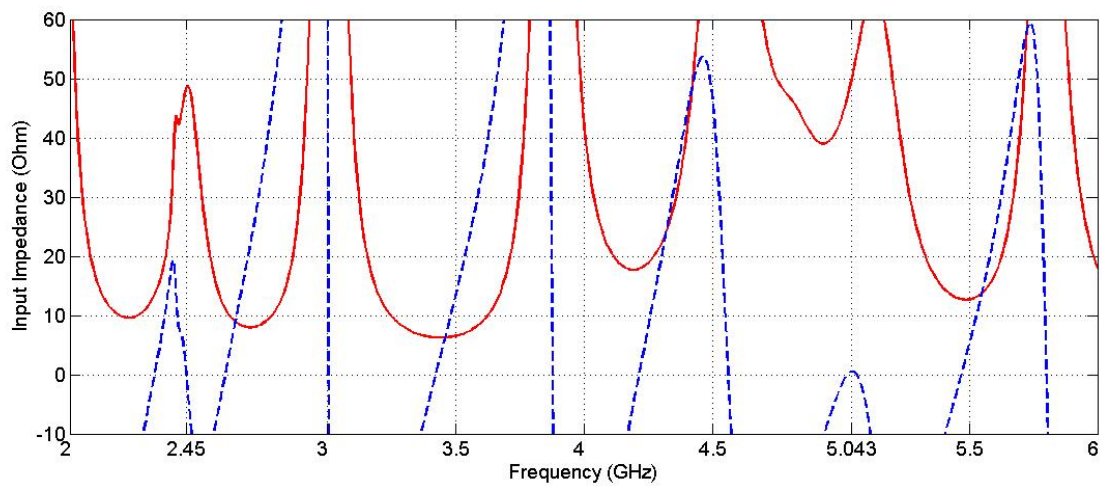
รูปที่ 4.38- 4.39 แสดงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์ u_1 , u_2 , u_3 ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด โดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ ทีละตัว เพื่อที่จะดูผลกระทบ โดยจะเห็นว่าพารามิเตอร์ u_1 , u_2 , u_3 จะมีผลกระทบต่อแมตซ์ชิงของสายอากาศเหมือนกับการปรับพารามิเตอร์ r แต่พารามิเตอร์ u_1 จะทำให้เกิดผลกระทบต่อการแมตซ์ชิงมากที่สุด

ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดที่ได้จากการจำลอง

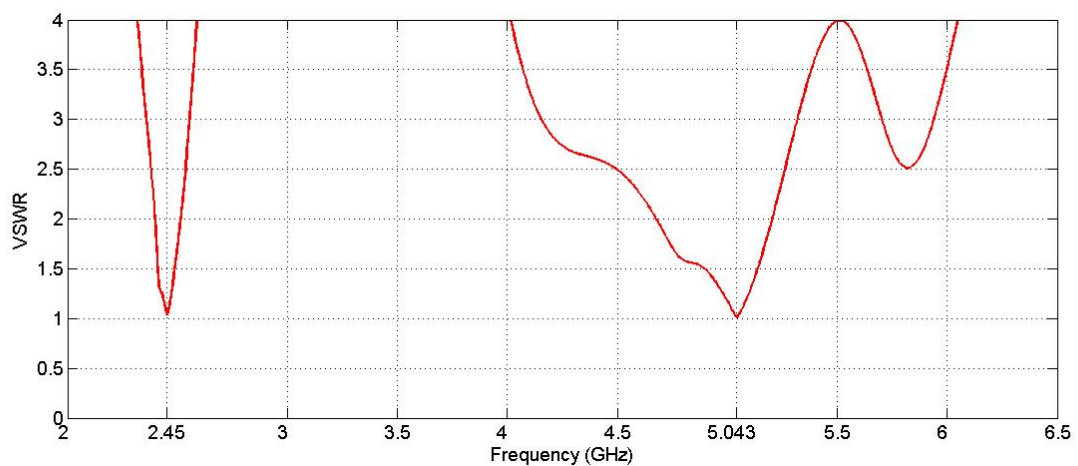
คุณลักษณะของสายอากาศ	ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง
ความถี่เรโซแนนซ์	2.45 GHz	5.043 GHz
S_{11} พารามิเตอร์	-35.79 dB	-43.11 dB
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	1.034 : 1	1.011 : 1
อินพุตอิมพีแดนซ์	$48.37 - j0.055$ โอห์ม	$49.8 + j0.4961$ โอห์ม
แบนด์วิดท์	2.4 – 2.512 GHz	4.698 – 5.2 GHz
ประสิทธิภาพของสายอากาศ	99.97 %	81.33 %
อัตราขยายของสายอากาศ	3.74 dBi	3.77 dBi



รูปที่ 4.40 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด

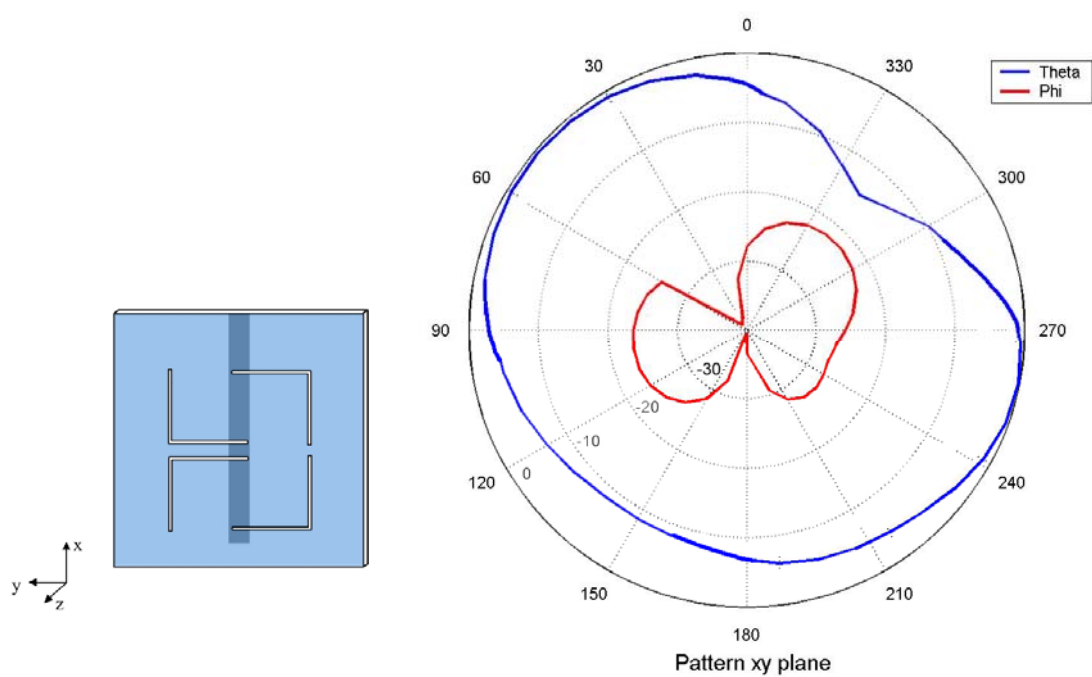


รูปที่ 4.41 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมจากแบบ 4 ช่องเปิด

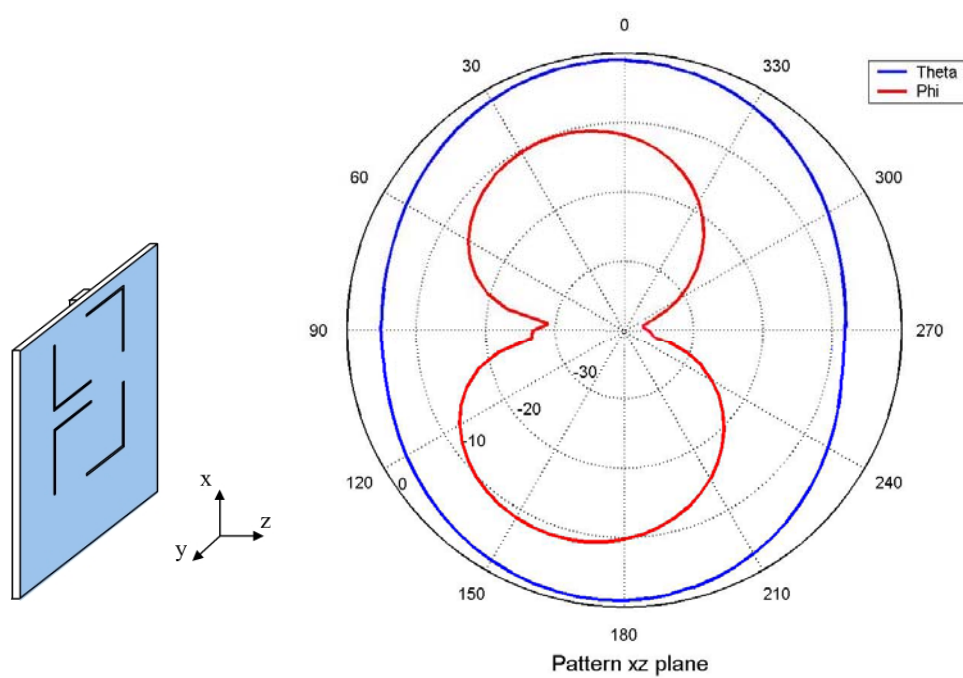


รูปที่ 4.42 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมจากแบบ 4 ช่องเปิด

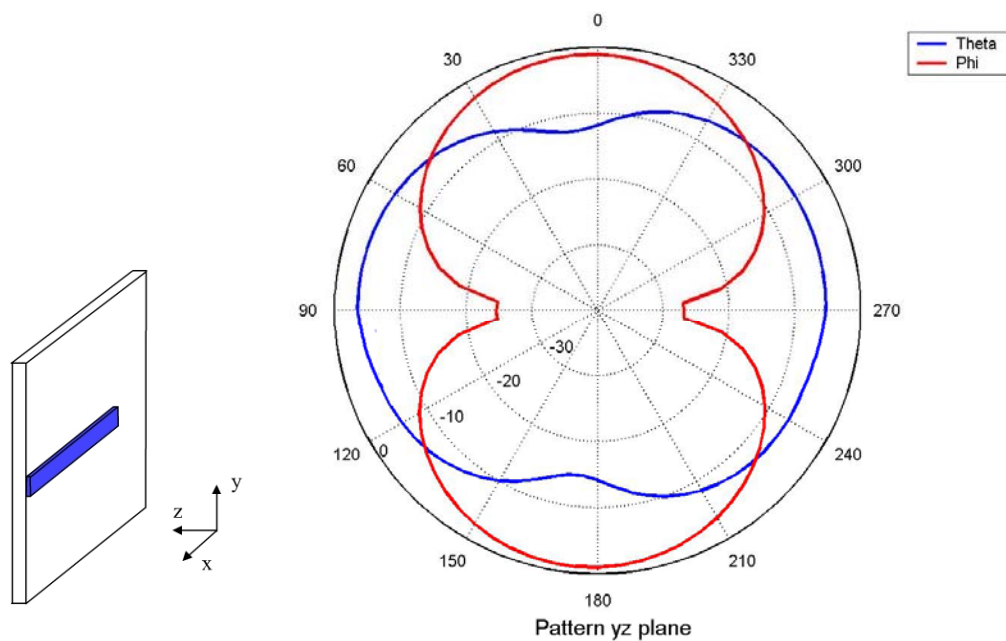
รูปที่ 4.41 – 4.42 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์และ VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมจากแบบ 4 ช่องเปิดโดยอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $48.37 - j0.055$ โอห์ม ที่ 2.45 GHz และ $49.8 + j0.4961$ โอห์ม ที่ความถี่ 5.043 GHz ค่า VSWR 1.034 : 1 ที่ 2.45 GHz และ 1.011 : 1 ที่ 5.043 GHz



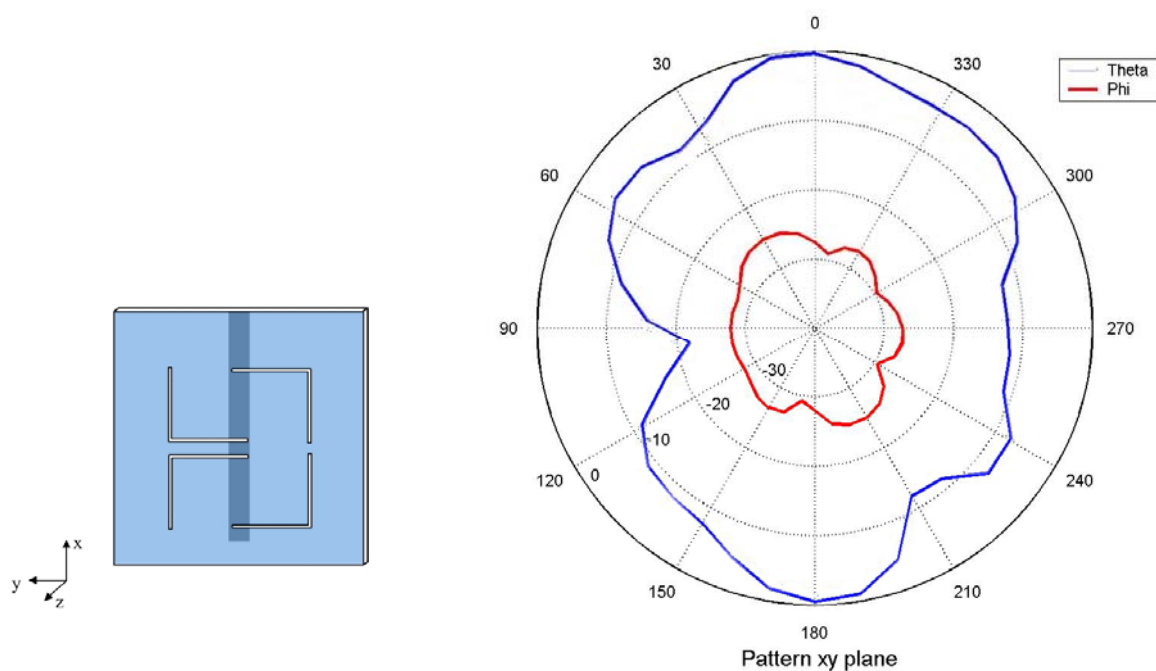
รูปที่ 4.43 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz



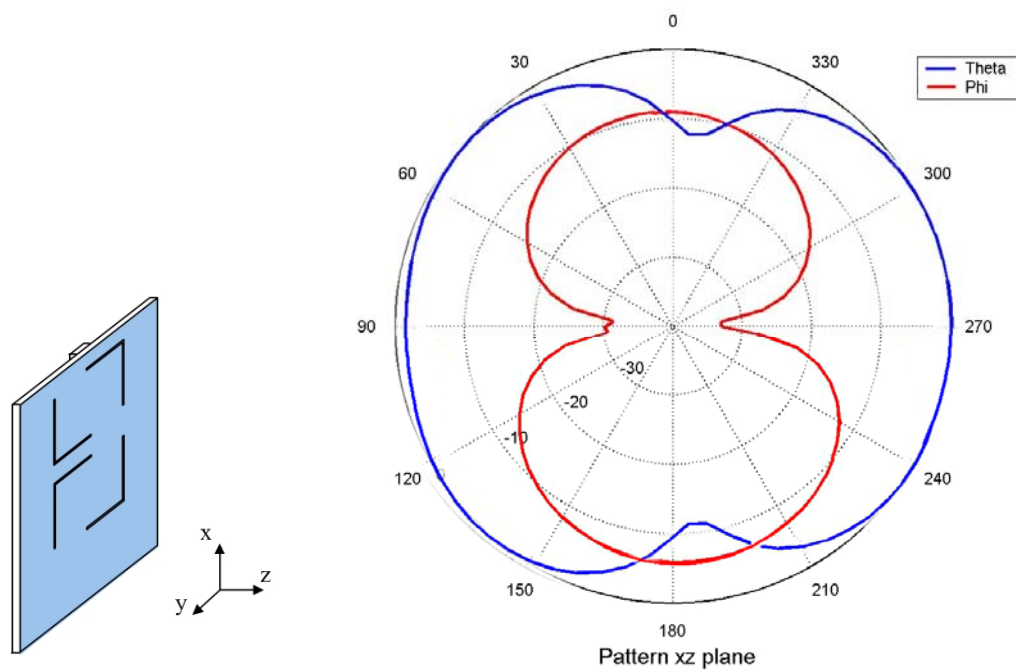
รูปที่ 4.44 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz



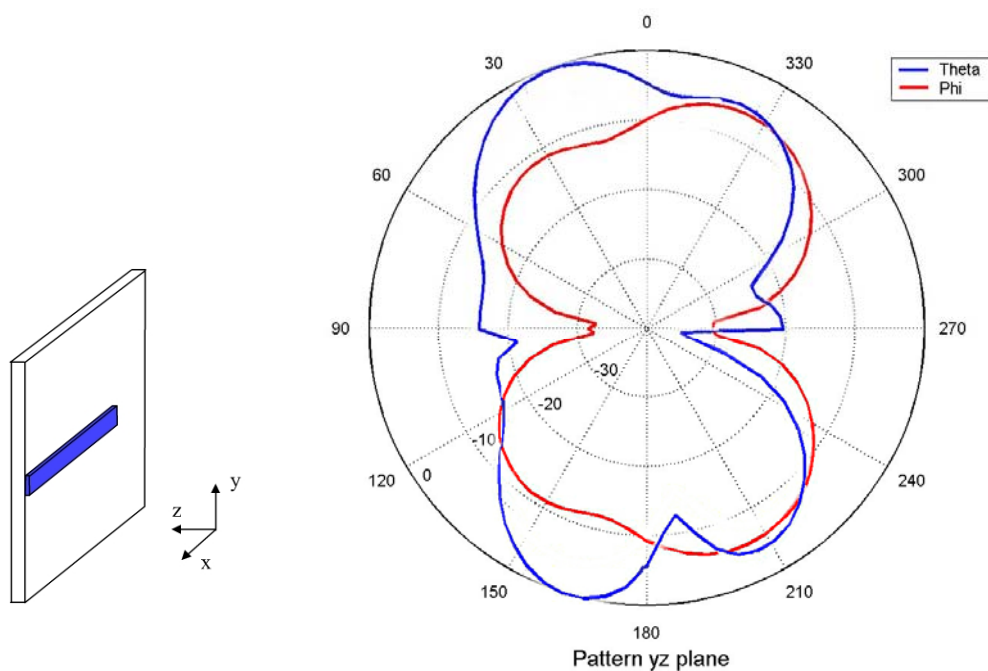
รูปที่ 4.45 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.46 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz

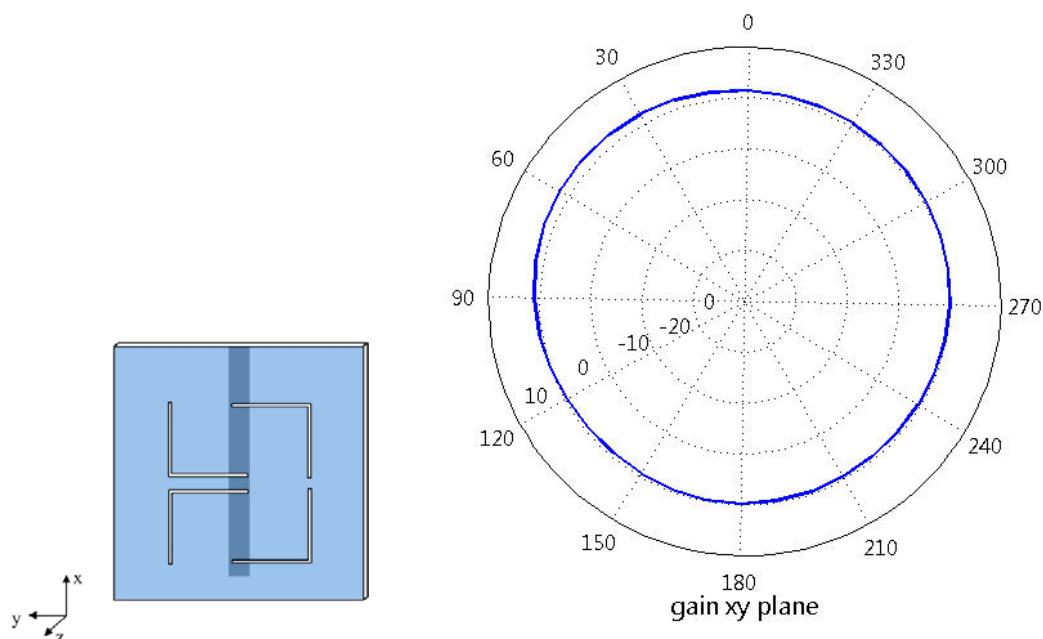


รูปที่ 4.47 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz

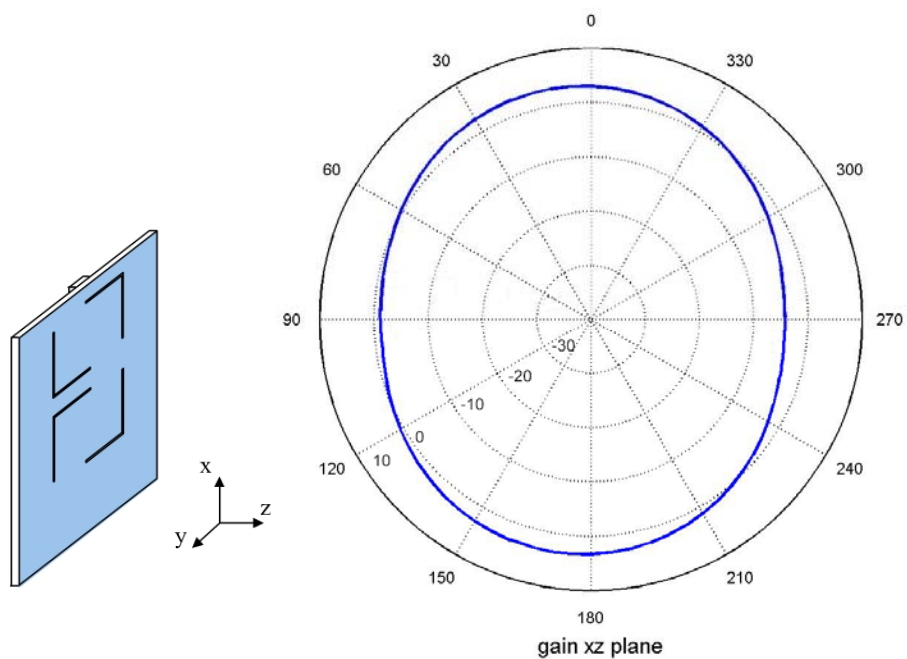


รูปที่ 4.48 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz

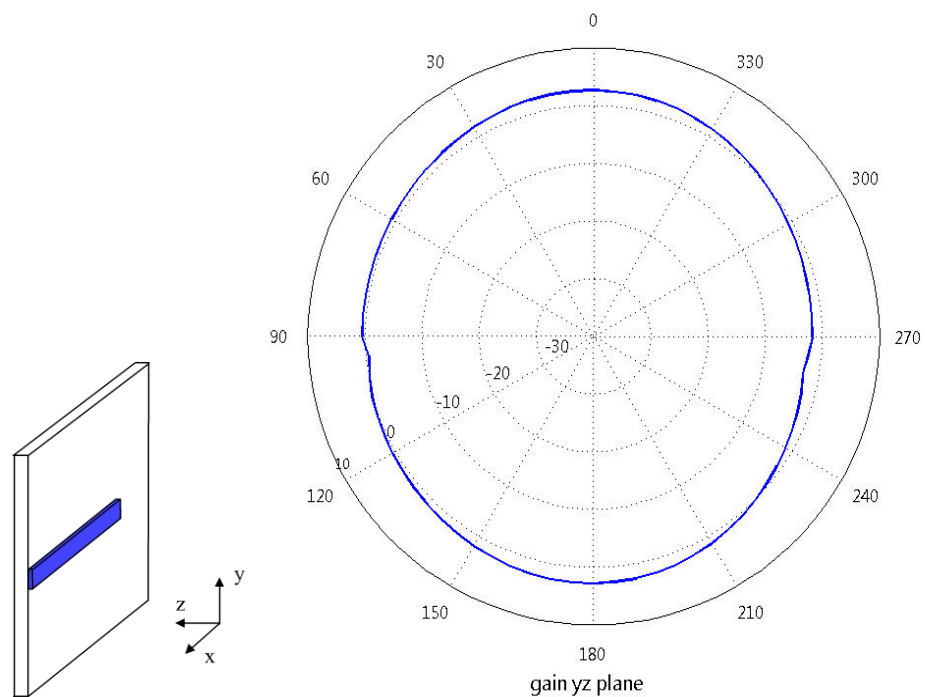
จากตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉาก แถวลำดับ 4 ช่องเปิด จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ใช้งานได้สองความถี่ นั่นก็คือ ความถี่ 2.45 GHz และ 5.043 GHz โดยที่ความถี่แรกนั้นจะเป็นความถี่ที่ออกแบบไว้ ส่วนความถี่ที่สองจะเป็นความถี่ที่เกิดจากฮาร์โมนิกของความถี่แรก โดยในย่านความถี่ที่สองนี้จะสามารถนำไปใช้ในมาตรฐาน IEEE802.11j ได้ รวมทั้งยังสามารถออกแบบให้มีความถี่ที่สองเป็นช่วง 5.2 GHz ได้เช่นกัน โดยทำการจัดวางช่องเปิดสายอากาศให้เหมาะสม แต่จากตารางจะเห็นว่าประสิทธิภาพของสายอากาศในความถี่ที่สองน้อยกว่าความถี่แรกเนื่องจากความถี่ที่สองเป็นฮาร์โมนิกของความถี่แรก ส่วนอัตราขยายของสายอากาศนั้นจะมีค่าอยู่ประมาณ 3.7 dBi ทั้งสองความถี่ โดยในความถี่ 2.45 GHz สายอากาศแบบนี้จะมีอัตราขยายที่มากกว่าสายอากาศ 1 ช่องเปิด แต่จะน้อยกว่า 2 ช่องเปิด เล็กน้อย



รูปที่ 4.49 แบบรูปอัตราขยายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz

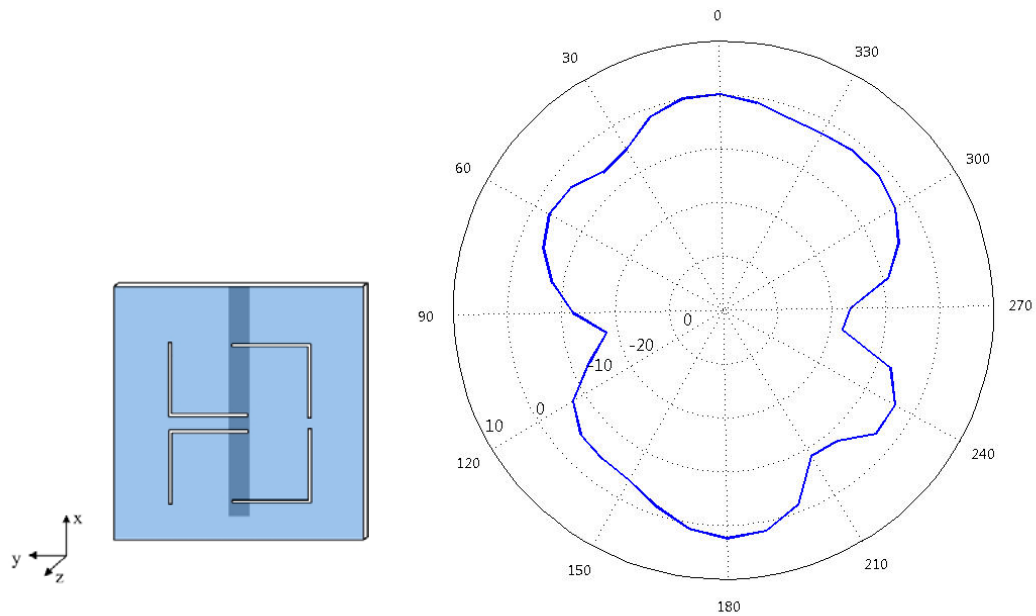


รูปที่ 4.50 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz

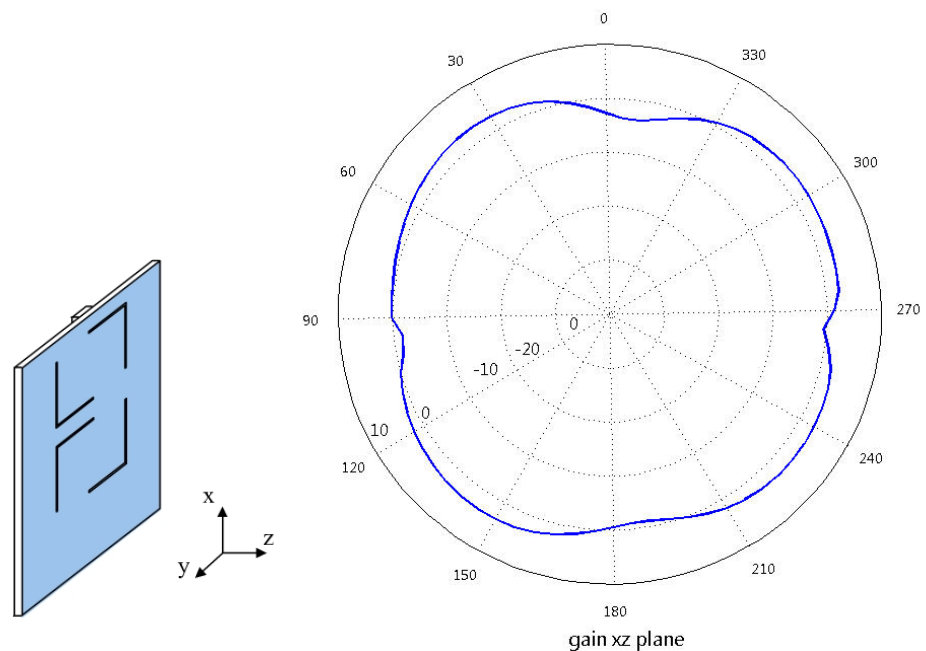


รูปที่ 4.51 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz

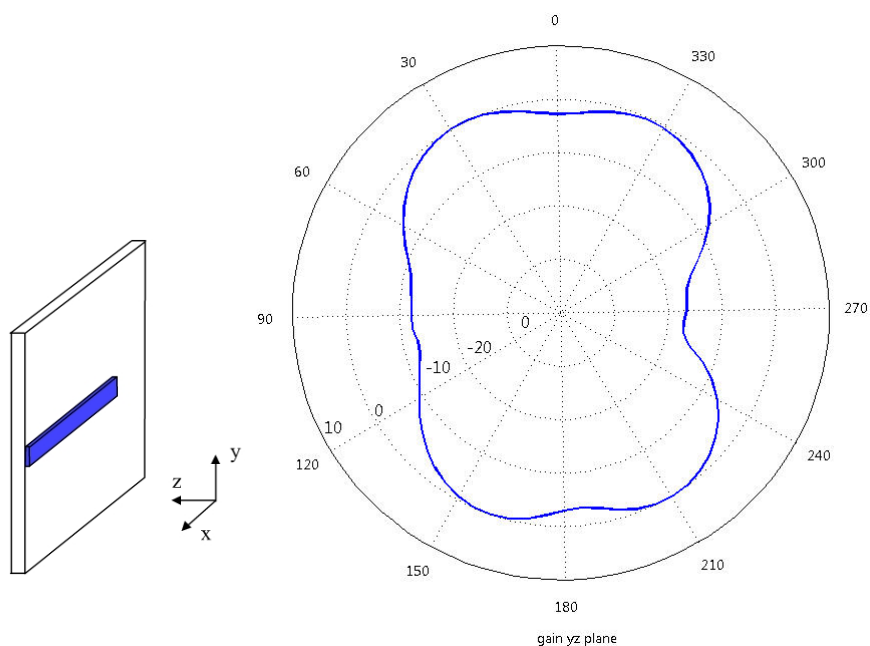
จากรูปที่ 4.49-4.51 จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีการแผ่พลังงานสนามระยะไกลแบบรอบทิศทางทั้งสามระนาบ



รูปที่ 4.52 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.05 GHz

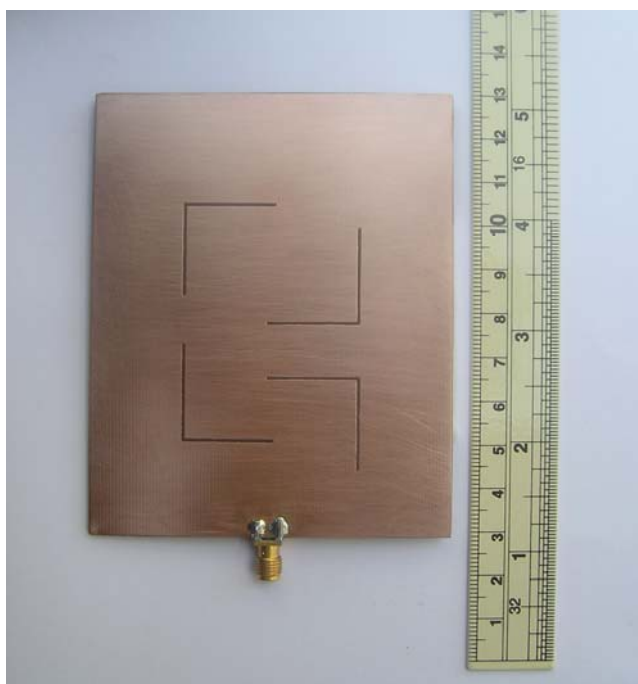


รูปที่ 4.53 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.05 GHz



รูปที่ 4.54 แบบรูปอัตรายายในการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.05 GHz

จากรูปที่ 4.52 - 4.54 จะเห็นได้ว่าการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศมีพลังงานต่ำในบางองศาเนื่องจากความถี่ที่สองนี้เป็นความถี่ฮาร์โมนิคของความถี่แรกที่ได้ออกแบบ

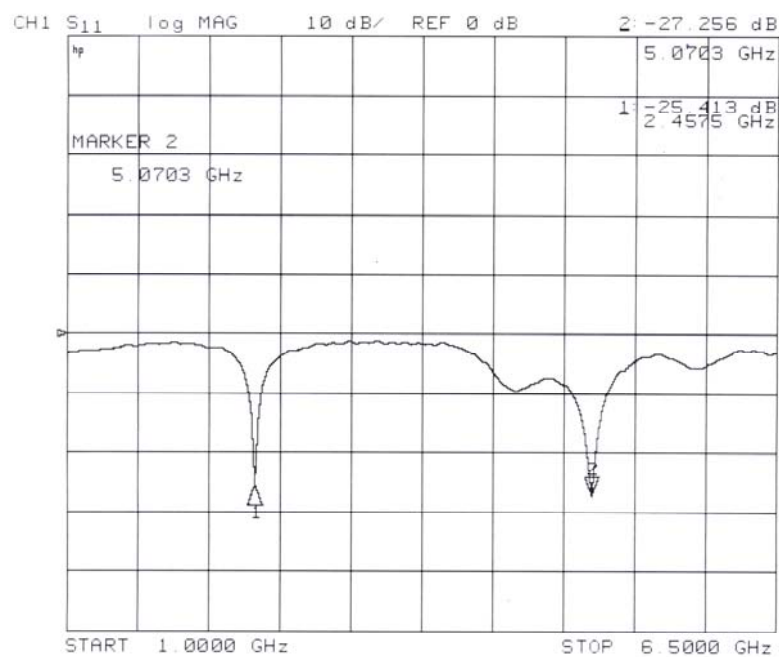


รูปที่ 4.55 โครงสร้างจริงของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ทางด้านหน้า

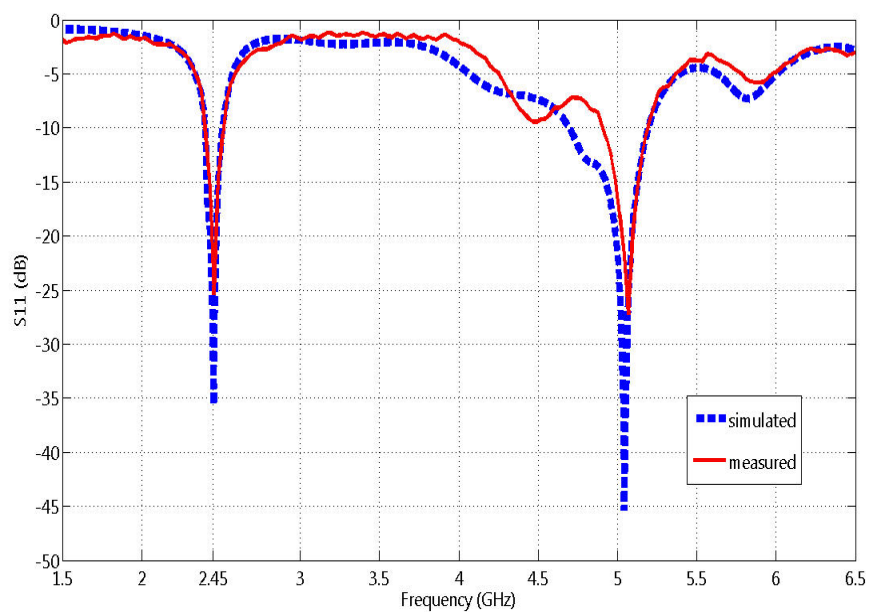


รูปที่ 4.56 โครงสร้างจริงของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด
ทางด้านหลัง

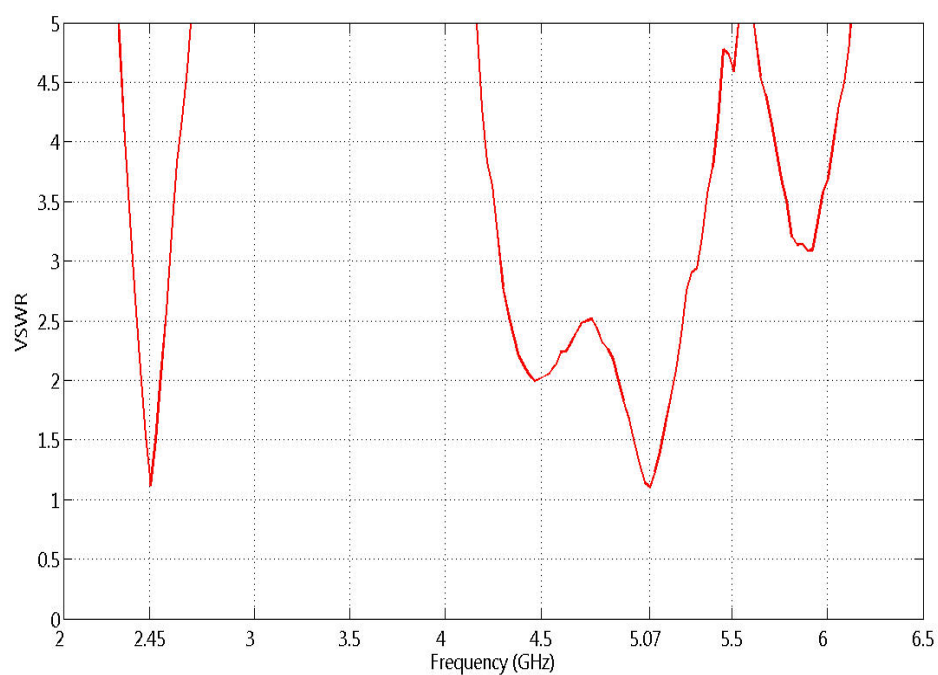
รูปที่ 4.55 และ 4.56 แสดงโครงสร้างจริงของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบ
แถวลำดับ 4 ช่องเปิดทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังโดย โดยผลที่ได้จากการวัดทดสอบจะแสดงดัง
รูปที่



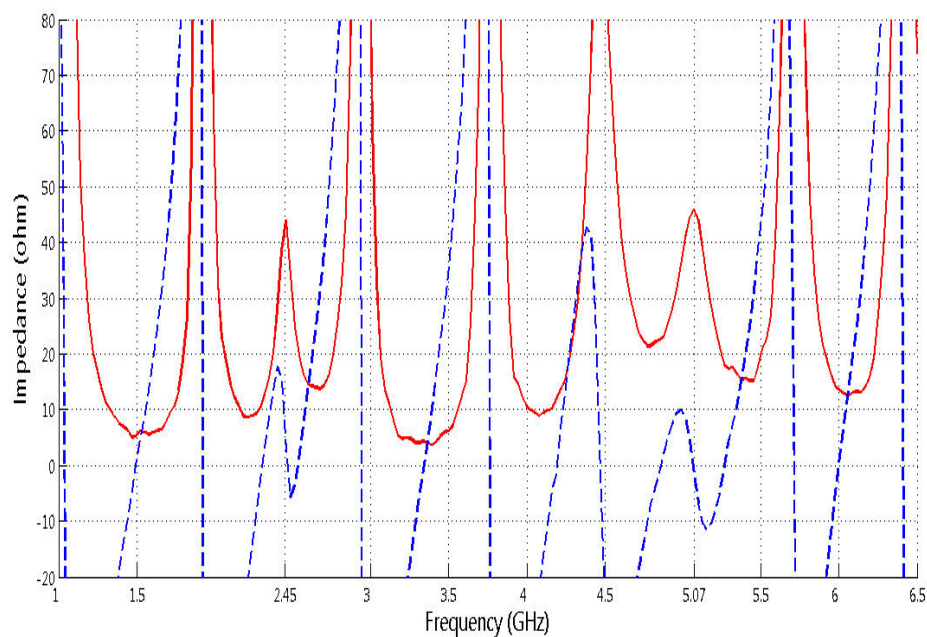
รูปที่ 4.57 S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดที่
ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Network analyzer



รูปที่ 4.58 การเปรียบเทียบ S_{11} พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดจากการจำลองเทียบกับการวัดทดสอบ



รูปที่ 4.59 การวัดทดสอบอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด

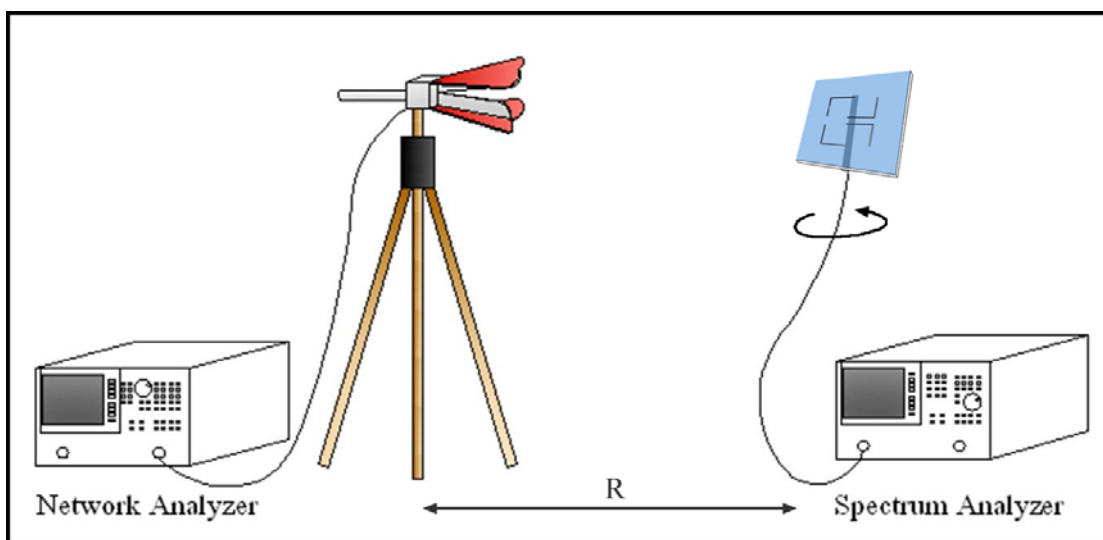


รูปที่ 4.60 การวัดทดสอบอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถว
ลำดับ 4 ช่องเปิด

ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิดที่ได้
จากการวัดทดสอบ

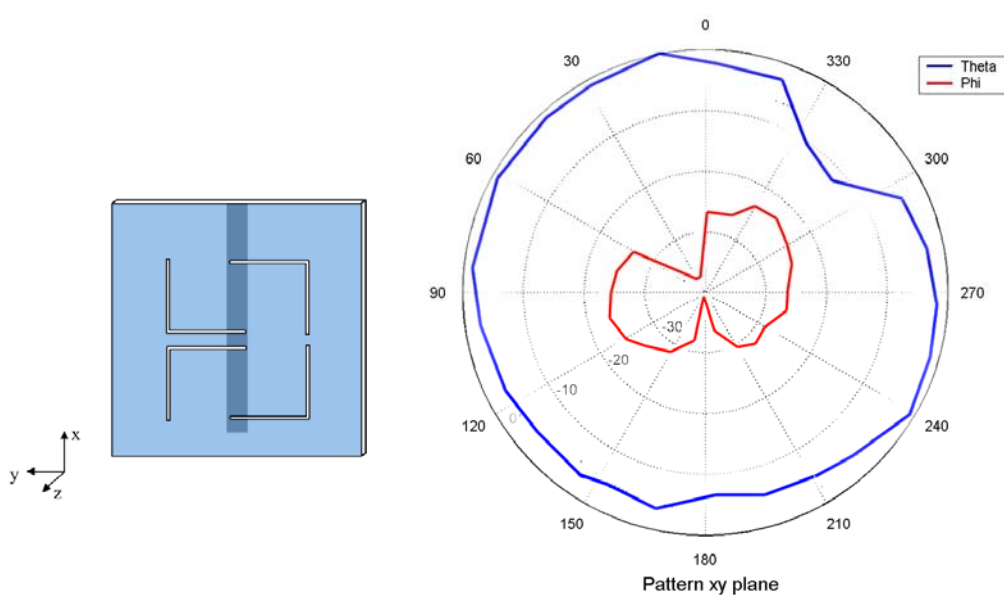
คุณลักษณะของสายอากาศ	ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง
ความถี่เรโซแนนซ์	2.4575 GHz	5.07 GHz
S_{11} พารามิเตอร์	-25.4130 dB	-27.2560 dB
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	1.1207 : 1	1.101 : 1
อินพุตอิมพีแดนซ์	44.059 + j1.4395 โอห์ม	45.877 - j1.4395 โอห์ม
แบนด์วิดท์	2.4025 – 2.5124 GHz	4.9 – 5.2 GHz
อัตราขยาย	3.5 dBi	3.3 dBi

จากรูปที่ 4.57 - 4.60 และ ตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าจากการวัดทดสอบสายอากาศจริงจะได้ผล
ที่ใกล้เคียงเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้คือ 2.4575 GHz และ
5.07 GHz และมีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย รวมทั้งยังมี
อัตราขยายของสายอากาศเป็นที่ยอมรับได้

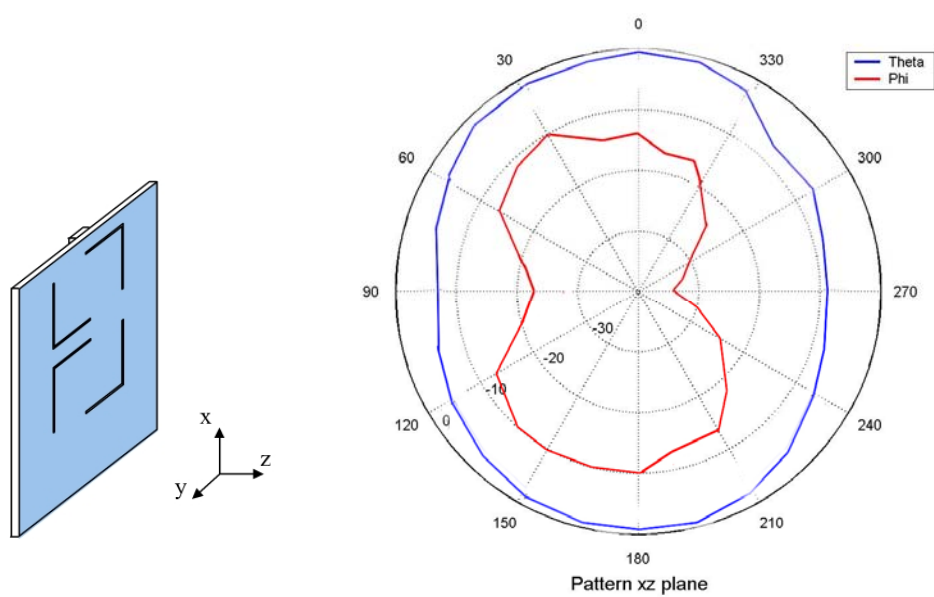


รูปที่ 4.61 แสดงการวัดและทดสอบสายอากาศ

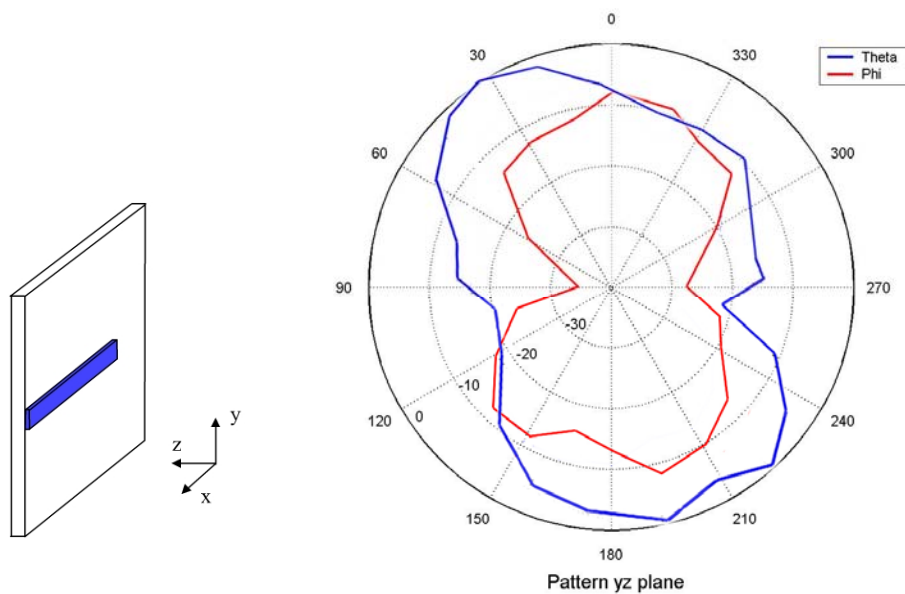
รูปที่ 4.61 แสดงการวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉาก ลำดับ 4 ช่องเปิด เครื่องมือที่สำคัญคือ Network Analyzer และ Spectrum Analyzer การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะใช้ Network Analyzer ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณความถี่ 2.45 GHz กับส่งสัญญาณความถี่ 5 GHz โดยให้กำลังส่งเป็น 0 dBm และใช้ Spectrum Analyzer เป็นตัววัดสัญญาณที่ด้านรับ โดยทำการปรับระนาบที่ด้านรับเพื่อดูความแตกต่างของสัญญาณที่สายอากาศสามารถรับได้ในแต่ละระนาบ



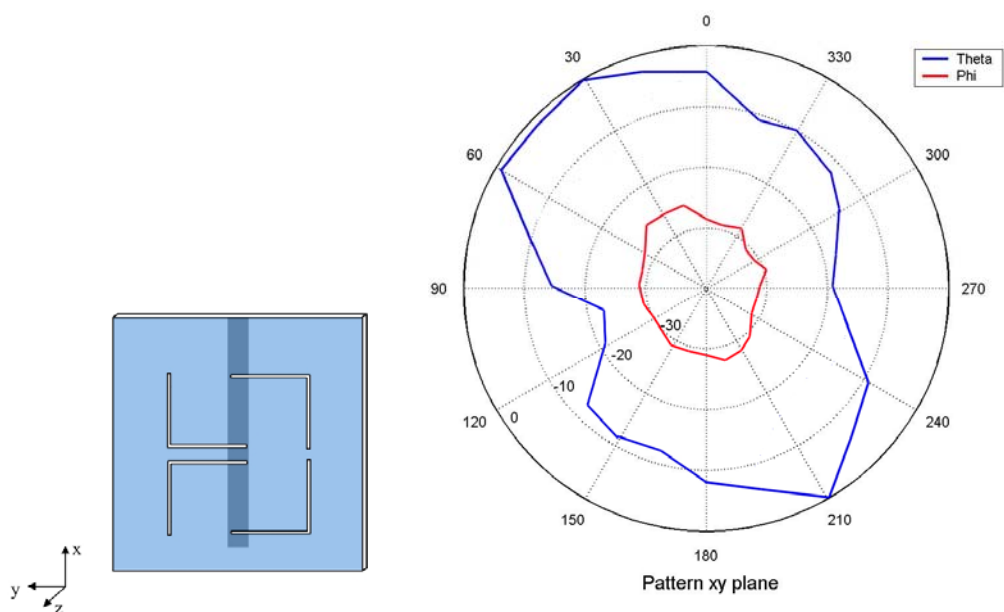
รูปที่ 4.62 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้จากการวัด



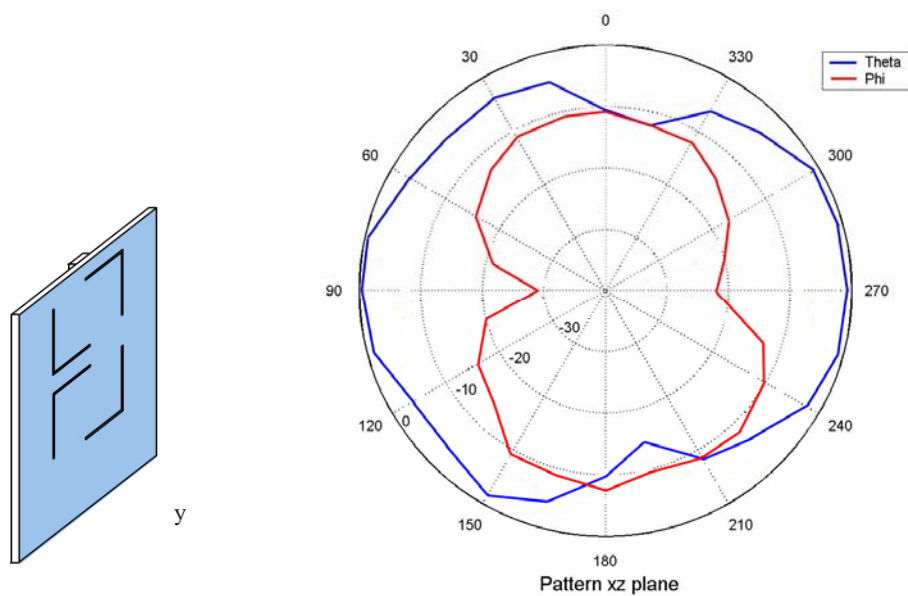
รูปที่ 4.63 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้จากการวัด



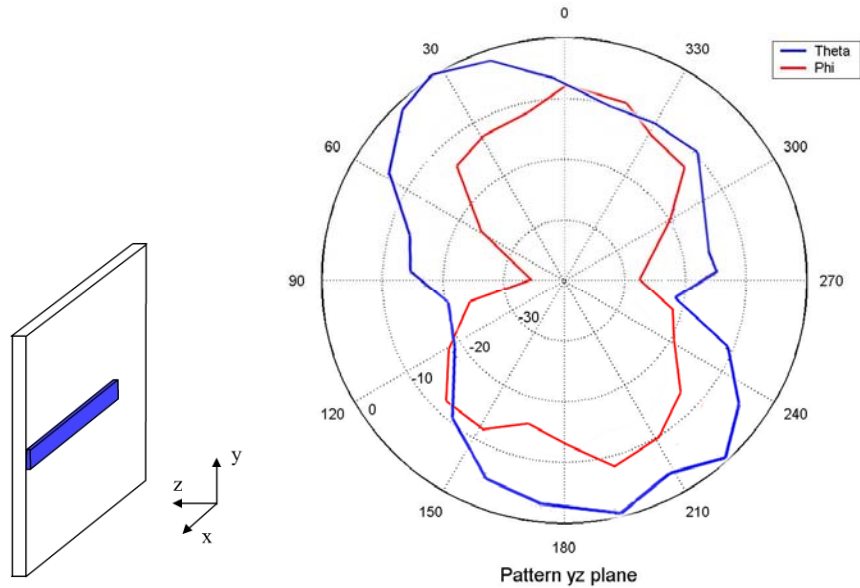
รูปที่ 4.64 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้จากการวัด



รูปที่ 4.65 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xy ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz ที่ได้จากการวัด



รูปที่ 4.66 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิด
มุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz ที่ได้จากการวัด



รูปที่ 4.67 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz ที่ได้จากการวัด

จากรูปที่ 4.62 – 4.64 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 2.45 GHz จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจะเป็นลักษณะเป็นแบบรอบทิศทางโดยมีค่ามากในระนาบ xy ที่มุม 10 องศา และ 240 องศา ระนาบ xz ที่มุม 0 องศา และ 180 องศา และ ระนาบ yz ที่มุม 30 องศา และ 190 องศา ส่วนรูปที่ 4.65 – 4.67 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับ 4 ช่องเปิด ที่ความถี่ 5.043 GHz โดยที่ระนาบ xy มีแบบรูปในการแผ่พลังงานระยะไกลมากที่สุดที่มุม 30 และ 210 องศา ส่วนระนาบ xz มีค่ามากที่สุดที่มุม 90 และ 270 องศา สำหรับระนาบ yz นั้นมีค่ามากที่สุดที่มุม 30 และ 190 องศา และจากแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลทั้งสองความถี่นั้น ในระนาบ xz และ yz จะมีค่าของ theta ใกล้เคียงกับ ค่าของ phi ส่วนระนาบ xy มีค่า theta มากกว่า phi ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สายอากาศแบบนี้มี โพราไรเซชันแบบลีเนียร์ที่มีทิศทาง ± 45 องศา