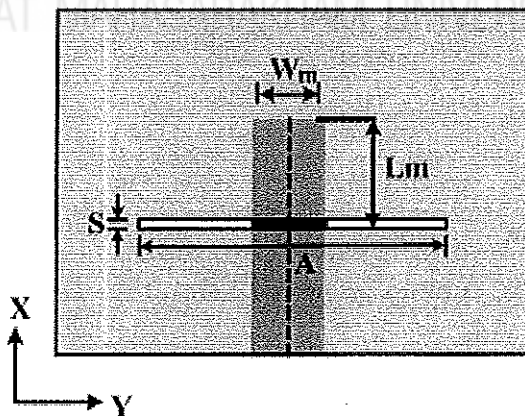


## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นผลการออกแบบและศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศรูปตัวยูที่มีการจัดวางในเชิงเรขาคณิต โดยการศึกษาจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ โครงสร้างที่เป็นสายอากาศ 1 องค์ประกอบ และโครงสร้างที่เป็นสายอากาศ 2 องค์ประกอบ ซึ่งทั้งสองส่วนจะใช้การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแบบไมโครสตริปที่มีรูปแบบการต่อแบบเปิดวงจร การศึกษาผลกระทบของการจัดวางสายอากาศชั้นแรกจะทำการศึกษาโครงสร้างที่มีองค์ประกอบเดียว จากนั้นจึงนำหลักการและผลที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์ไปออกแบบและประยุกต์ใช้ในการจัดวางสายอากาศที่มี 2 องค์ประกอบ ซึ่งทั้งสองส่วนนอกจากจะทำการศึกษาในเรื่องของวิธีการจัดวางในรูปแบบต่าง ๆ แล้ว ยังได้ทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของความกว้าง ความยาว และอัตราส่วนความยาวในแต่ละด้านของสายอากาศ เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยโครงสร้างของสายอากาศได้ออกแบบให้มีคุณสมบัติ เรโซแนนซ์ที่สองย่านความถี่ คือ ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามมาตรฐานของเครือข่ายไร้สาย (Wireless Lan)

#### 4.1 สายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรง



รูปที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรง

จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ทำการออกแบบ โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- A คือ ความยาวของช่องเปิด  
 S คือ ความกว้างของช่องเปิด  
 $W_m$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป  
 $L_m$  คือ ความยาวของสตัปเมตซ์ซึ่ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรง ซึ่งในการออกแบบสายอากาศให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการนั้น ถ้าเป็นสายอากาศโดยทั่ว ๆ ไป จะออกแบบให้สายอากาศยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นสัมพันธ์ แต่สายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ จะกำหนดให้ความกว้างของช่องเปิด (S) มีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และทำการออกแบบสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรง

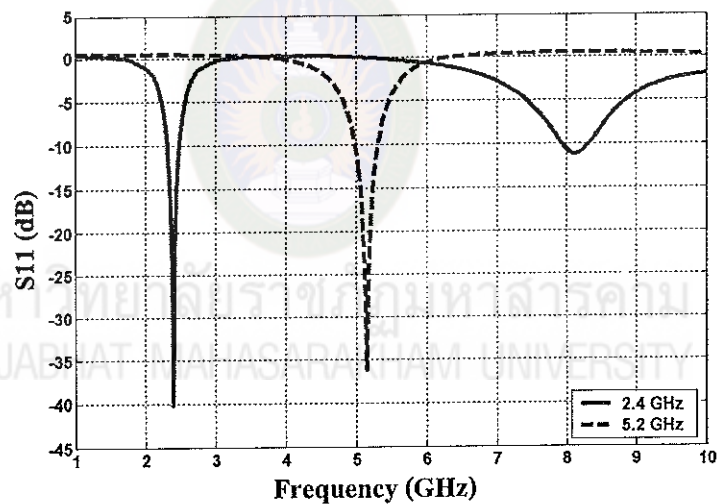
ความถี่ที่ ออกแบบ (GHz)	ความกว้างของ ช่องเปิด (S)		ความยาวของ ช่องเปิด (A)		ความยาวของ สตัปเมตซ์ซึ่ง ( $L_m$ )	
	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )
2.4	0.2	$0.0021\lambda_g$	40.2	$0.44\lambda_g$	3.4	$0.037\lambda_g$
5.2	0.2	$0.0047\lambda_g$	19.8	$0.46\lambda_g$	1.2	$0.029\lambda_g$

ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยหลักในการออกแบบนั้น ความยาวและความกว้างของช่องเปิดจะเป็นตัวกำหนดเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ โดยในสายอากาศแบบนี้จะต้องออกแบบให้มีความยาวของช่องเปิด (A) ประมาณ  $0.4\lambda_g$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ แล้วจึงทำการปรับขนาดให้เพิ่มหรือลดลงอีกเล็กน้อยเพื่อให้ได้ความถี่ตรงตามกับที่ต้องการออกแบบ และลักษณะในการวางช่องเปิดจะใช้ลักษณะการวางให้กึ่งกลางของช่องเปิดอยู่กึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (Center-fed Microstrip Slot Antenna) แล้วจึงทำการปรับเพื่อเมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยการปรับระยะ  $L_m$  เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ซึ่งระยะ  $L_m$  ที่ปรับจะมีความยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นสัมพันธ์หรือมากกว่า ซึ่งหลังจากทำการคำนวณรูปแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยวิธีการจำลองแล้วจะได้คุณลักษณะในด้านต่าง ๆ

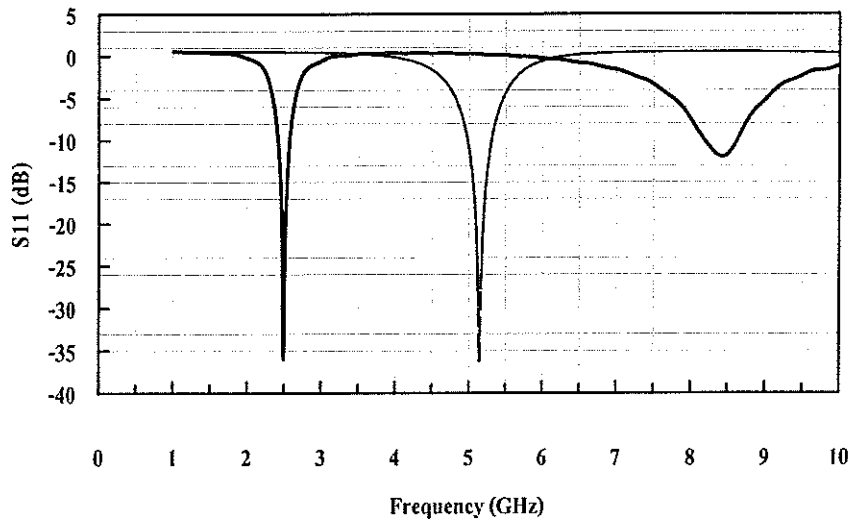
ของสายอากาศออกมา ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับจากโหลด ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ซึ่งแสดงได้ตามตารางที่ 4.2 และจากตารางจะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ และมีการสูญเสียจากการสะท้อนกลับจากโหลดที่ดี

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรง

ความถี่ที่ ออกแบบ (GHz)	ความถี่ เรโซแนนซ์ (GHz)	Zin Imag (Ohm)	Zin Real (Ohm)	VSWR	$S_{11}$ (dB)	%BW
2.4	2.40	0.15	49.05	1.01	-40.26	7.08%
5.2	5.19	48.95	1.11	1.03	-36.23	6.6%

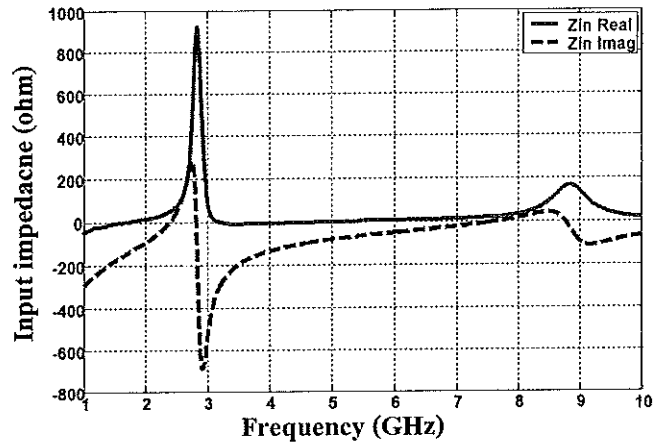


รูปที่ 4.2 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

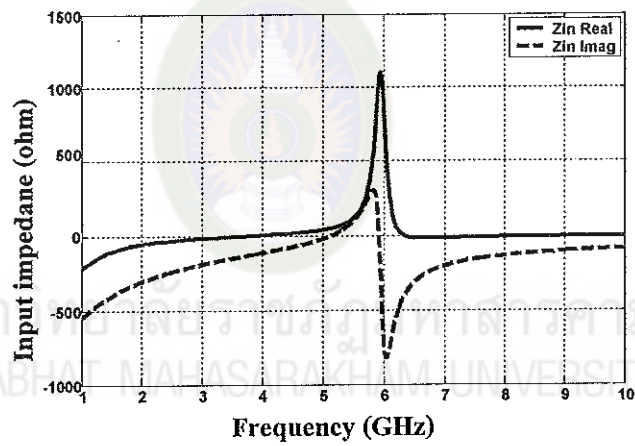


รูปที่ 4.3 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ได้จากวิธี MoM ( $S_{11} = -35.80$  dB ที่ 2.47GHz) และ ( $S_{11} = -36.23$  dB ที่ 5.15 GHz)

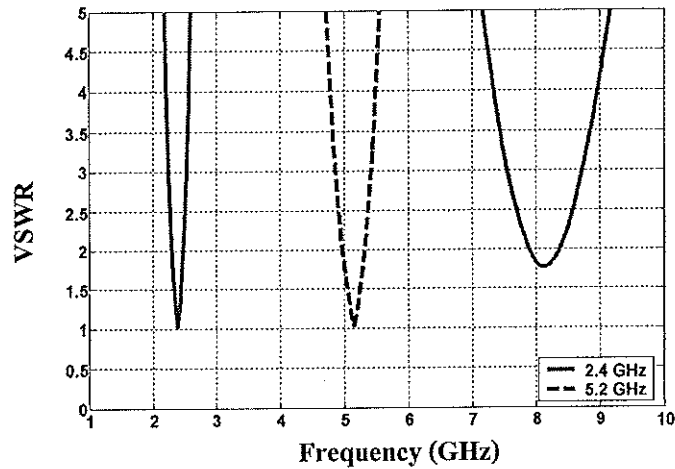
รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงผลการจำลองแบบ โครงสร้างของสายอากาศโดยการเปรียบเทียบระหว่างวิธี FDTD กับ วิธี MoM เพื่อให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของวิธี FDTD ที่ได้ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยทำการเปรียบเทียบกันเฉพาะค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 2.4 GHz และที่ 5.2 GHz ซึ่งจากค่า  $S_{11}$  พารามิเตอร์ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี FDTD นั้นมีค่าใกล้เคียงกับการจำลองด้วยวิธี MoM โดยค่าที่ได้มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับที่ออกแบบ และมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ต่ำ นั่นคือ มีความสูญเสียเนื่องจากการที่มีคลื่นสะท้อนกลับน้อย ซึ่งสามารถบอกได้ถึงการผลิตที่ดีโดยสังเกตได้จากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 โดยจะพบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงค่า VSWR ของการจำลองแบบ โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ 2.4 GHz และที่ 5.2 GHz ซึ่งมีค่าที่เข้าใกล้ 1 เช่นกัน



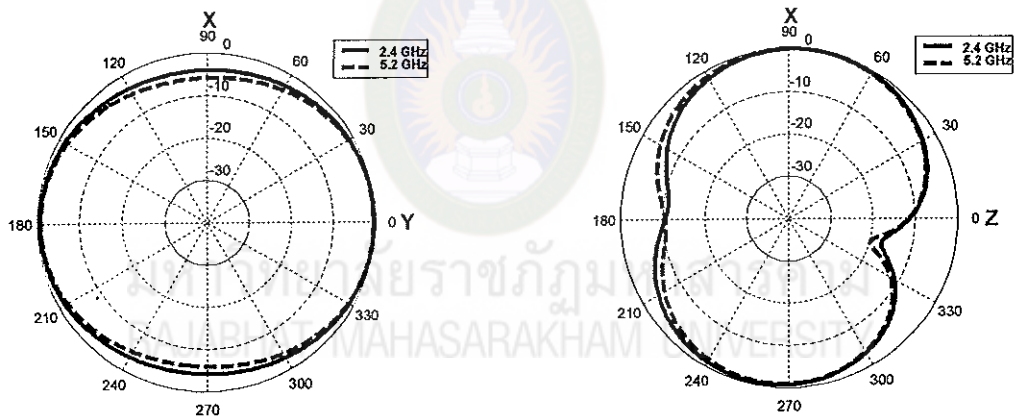
รูปที่ 4.4 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 2.4 GHz



รูปที่ 4.5 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 5.2 GHz



รูปที่ 4.6 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz



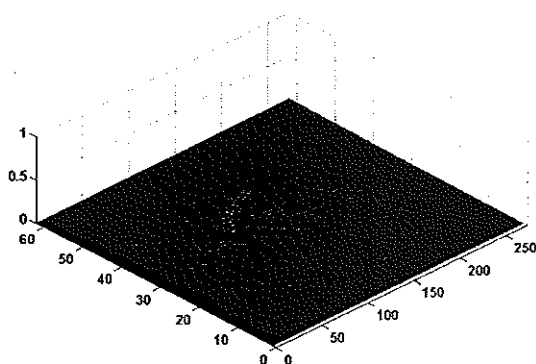
(ก) ระนาบ XY

(ข) ระนาบ XZ

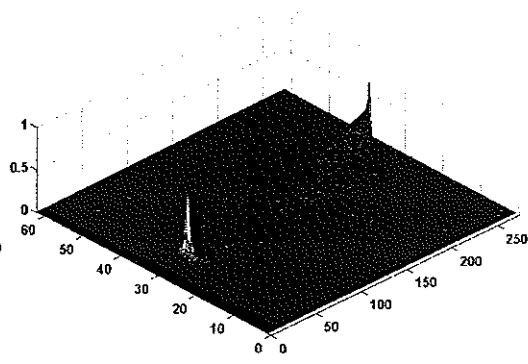
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลนั้น จะแสดงในลักษณะของภาพสองมิติ โดยจะแบ่งแสดงในสองระนาบ คือ ระนาบ xy และ ระนาบ xz ซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.9 โดยระนาบ xy นี้จะแสดงถึงรูปแบบการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็ก และในระนาบ xz แสดงถึงรูปแบบการแผ่พลังงานของ

สนามไฟฟ้า และจากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงจะมีแบบรูปเสมือนจะเป็นลักษณะในการแผ่พลังงานไปในสองทิศทางเดียว (Bi-directional)

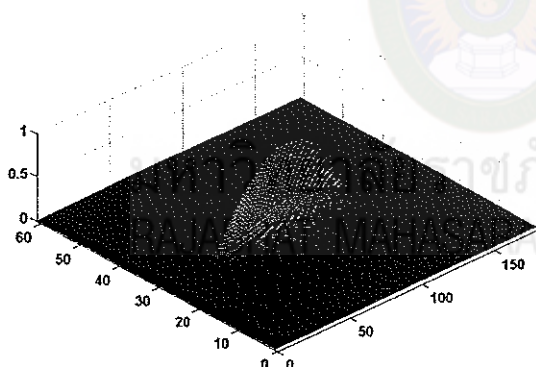


(ก) สนามไฟฟ้า

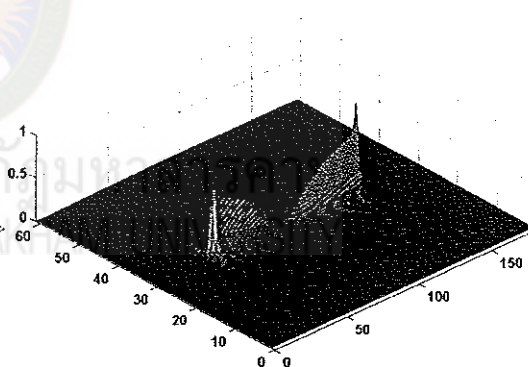


(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.8 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 2.4 GHz



(ก) สนามไฟฟ้า



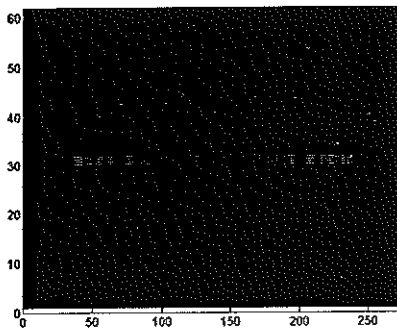
(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.9 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 5.2 GHz

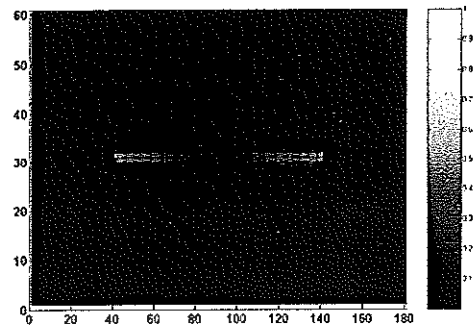
รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงความเข้มสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าจะมีความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดที่ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางของช่องเปิด และจะลดขนาดไปจนต่ำที่สุดที่ขอบปลายของช่องเปิดทั้งสองด้าน ในทางกลับกันความเข้มสนามแม่เหล็กจะมากที่สุดตรงขอบปลายของช่องเปิดทั้งสองด้าน ส่วนบริเวณกึ่งกลางของช่องเปิดจะมีความเข้มน้อย



โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของสายอากาศช่องเปิด โดยกระแสไฟฟ้าจะหนาแน่นมากในบริเวณปลายทั้งสองด้านของสายอากาศช่องเปิด ซึ่งจากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะมีมากที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของสายอากาศช่องเปิดรูปเส้นตรง



(ก) ที่ 2.4 GHz



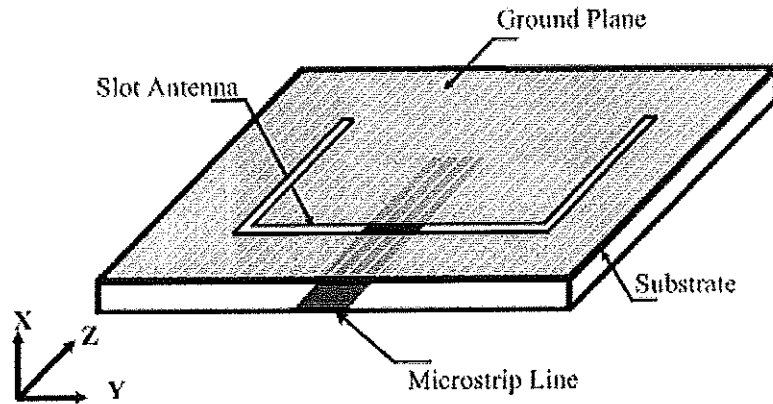
(ข) ที่ 5.2 GHz

รูปที่ 4.10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

#### 4.2 สายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยู 1 องค์ประกอบ

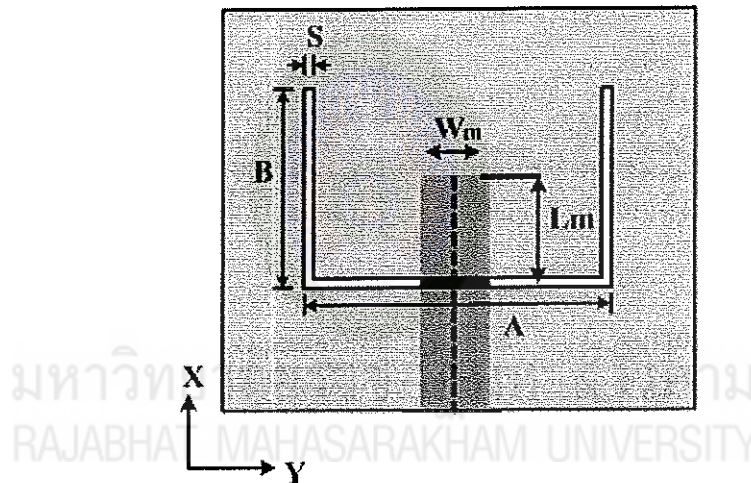
เมื่อทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโคร สตรีป ซึ่งประกอบไปด้วย ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตรีป ( $W_m$ ) และค่าความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_r$ ) แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการนำเอาค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นมาทำการกำหนดในโครงสร้างของสายอากาศตามที่ต้องการศึกษา ซึ่งในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโคร-สตรีปแบบช่องเปิดรูปตัวยูที่มี 1 องค์ประกอบ โดยมีโครงสร้างพื้นฐานมาจากช่องเปิดรูปเส้นตรงที่พับหรือหักงอบริเวณปลายของช่องเปิดรูปเส้นตรงทั้งสองด้านให้มีลักษณะเป็นรูปตัวยู และในการออกแบบจะออกแบบที่ความถี่ 2.4 GHz เพียงความถี่เดียวเท่านั้น และจะขอกกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz ในหัวข้อต่อไป รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูที่ใช้ในการศึกษาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้





รูปที่ 4.11 โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยู

#### 4.2.1 สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูหงาย



รูปที่ 4.12 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูหงาย

จากรูปที่ 4.12 แสดง โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูหงายที่ทำการออกแบบ โดยมี พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- A คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนนอน
- B คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนตั้ง
- S คือ ความกว้างของช่องเปิด
- $W_m$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป
- $L_m$  คือ ความยาวของสตัมป์แมตซ์ซิ่ง

ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยหลักในการออกแบบนั้น ความยาวรวมของช่องเปิดจะเป็นตัวกำหนดเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการ โดยต้องออกแบบให้มีความยาวรวมทั้ง 3 ด้านของช่องเปิด ( $A+2B$ ) ให้มีค่าประมาณ  $0.4\lambda_g$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ และลักษณะในการวางช่องเปิดจะใช้ลักษณะการวางให้กึ่งกลางของช่องเปิดอยู่กึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (Center-fed Microstrip Slot Antenna) แล้วจึงทำการปรับเพื่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยการปรับระยะ  $L_m$  เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ

#### 4.2.1.1 กรณีปรับเปลี่ยนความกว้างและความยาวรวมของช่องเปิด

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาสายอากาศรูปตัวยูที่มีการจัดวางในลักษณะหงาย ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของช่องเปิด (S) และความยาวรวมทั้ง 3 ด้านของช่องเปิด ( $A+2B$ ) ต่อความถี่ที่ออกแบบ

ขั้นแรกได้กำหนดความกว้างของช่องเปิดรูปตัวยูให้มีขนาดความกว้างของช่องเปิดเท่ากันทุกด้าน โดยกำหนดให้มีขนาดตั้งแต่ 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 และ 1.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการปรับความยาวรวมของช่องเปิดให้สัมพันธ์กับความกว้างที่ได้กำหนดไว้เพื่อที่จะให้สายอากาศ เรโซแนนซ์ตามความถี่ที่ออกแบบ โดยโครงสร้างของสายอากาศได้กำหนดให้ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนนอน (A) มีขนาดเป็น 2 เท่าของความยาวของช่องเปิดในแนวแกนตั้ง (B) หรือมีอัตราส่วนเป็น 2 ต่อ 1 (A:B) ซึ่งในที่นี้ได้ออกแบบสายอากาศอ้างอิงที่ความถี่ 2.4 GHz เพียงความถี่เดียวเท่านั้น ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

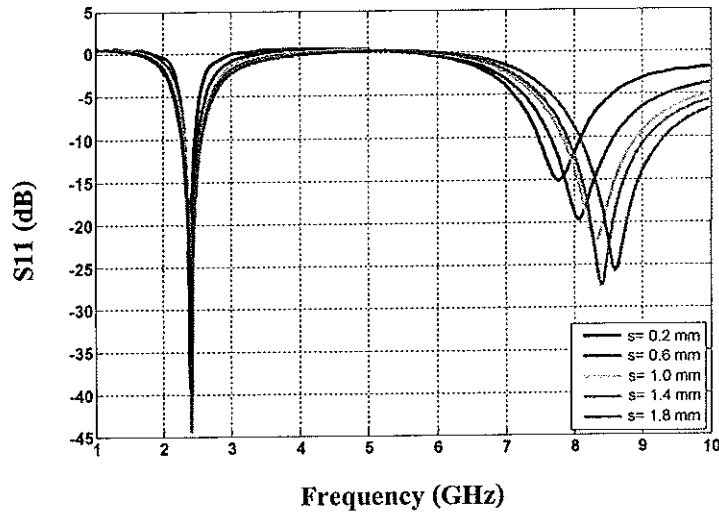
ตารางที่ 4.3 ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย

ความถี่ที่ออกแบบ (GHz)	ความกว้างของช่องเปิด (S)		ความยาวของช่องเปิด ( $A+2B$ )		ความยาวของสตัปแมตซ์ซิ่ง ( $L_m$ )	
	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )
2.4	0.2	$0.0021\lambda_g$	42.4	$0.46\lambda_g$	3.2	$(0.034\lambda_g)$
	0.6	$0.0065\lambda_g$	40	$0.43\lambda_g$	3.2	$(0.034\lambda_g)$
	1	$0.0100\lambda_g$	39.2	$0.42\lambda_g$	3.4	$(0.036\lambda_g)$
	1.4	$0.0151\lambda_g$	38.4	$0.41\lambda_g$	3.6	$(0.039\lambda_g)$
	1.8	$0.0195\lambda_g$	37.6	$0.40\lambda_g$	4	$(0.043\lambda_g)$

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาเพื่อออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู พารามิเตอร์ที่เป็นกุญแจสำคัญในการออกแบบคือ ความกว้างของช่องเปิด (S) และความยาวรวมทั้ง 3 ด้านของช่องเปิด (A+2B) ซึ่งได้แก่ความยาวด้านฐานรูปตัวยูในแนวแกนนอน (A) และความยาวในแนวแกนตั้ง (B) ทั้งสองด้าน ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้จะเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ ซึ่งจากตารางได้ทำการออกแบบที่ความถี่ 2.4 GHz โดยค่าความกว้างและความยาวที่ทำการคำนวณนั้นได้มีการอ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ซึ่งจากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีของสายอากาศแต่ละขนาด โดยความยาวรวมของสายอากาศนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของช่องเปิดที่เปลี่ยนไป โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง  $0.40\lambda_g$  ถึง  $0.46\lambda_g$  เมื่อความกว้างของช่องเปิดอยู่ระหว่างช่วง  $0.002\lambda_g$  ถึง  $0.019\lambda_g$  ตามลำดับ

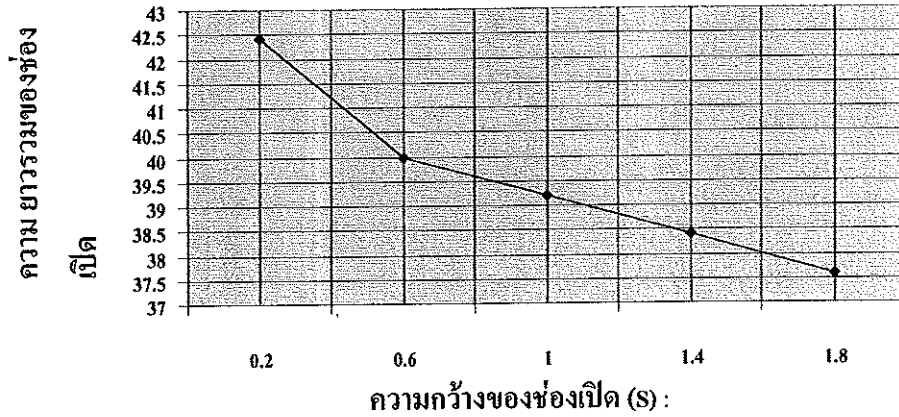
ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย

ความถี่ที่ ออกแบบ (GHz)	S (mm)	ความถี่ เรโซแนนซ์ (GHz)	Zin Imag (Ohm)	Zin Real (Ohm)	VSWR	$S_{11}$ (dB)	%BW
2.4	0.2	2.39	0.96	49.5	1.02	-39.25	6.27
	0.6	2.41	0.12	50.98	1.01	-40.13	8.71
	1	2.42	-1.11	50.82	1.02	-37.19	10.33
	1.4	2.41	-0.79	52.24	1.04	-32.64	10.78
	1.8	2.41	0.47	49.63	1.01	-44.4	12.44



รูปที่ 4.13 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย เมื่อทำการปรับความกว้างและความยาวรวมของช่องเปิด

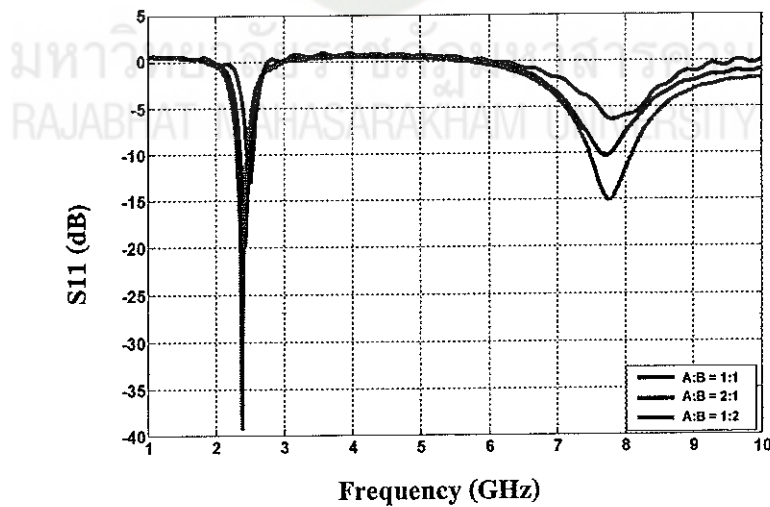
จากรูปที่ 4.13 แสดงการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย เมื่อทำการปรับความกว้างของช่องเปิดให้มีขนาดที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าสายอากาศมีแนวโน้มนำเรโซแนนซ์ที่ 2 ความถี่ คือที่ความถี่ด้านต่ำและด้านสูง ที่ความถี่ด้านต่ำจะเห็นได้ว่าสายอากาศเรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความถี่ที่ออกแบบ ส่วนความถี่ด้านสูงจะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ 8 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่อยู่ในย่าน X-band โดยความถี่ในย่านนี้เราสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับการสื่อสารผ่านดาวเทียม รวมทั้งในระบบเรดาร์ก็ได้ และในส่วนของ การปรับขนาดความกว้างของช่องเปิด พบว่าถ้าขนาดความกว้างของช่องเปิดแคบจะทำให้ได้แบนวิธของสายอากาศแคบตามไปด้วย ซึ่งคุณสมบัตินี้เราสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการสื่อสารที่ใช้ย่านสัญญาณแคบ (narrow band) ได้ แต่ถ้าปรับความกว้างของช่องเปิดให้เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าแบนวิธของสายอากาศเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่จะส่งผลกระทบต่ออัตราขยายของสายอากาศที่จะลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับความกว้างของช่องเปิดเพิ่มขึ้น การที่จะให้สายอากาศเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดิมที่ทำการออกแบบได้นั้น ความยาวรวมของช่องเปิดก็ต้องน้อยลงเป็นส่วนกลับกันกับความกว้างของช่องเปิดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 4.14



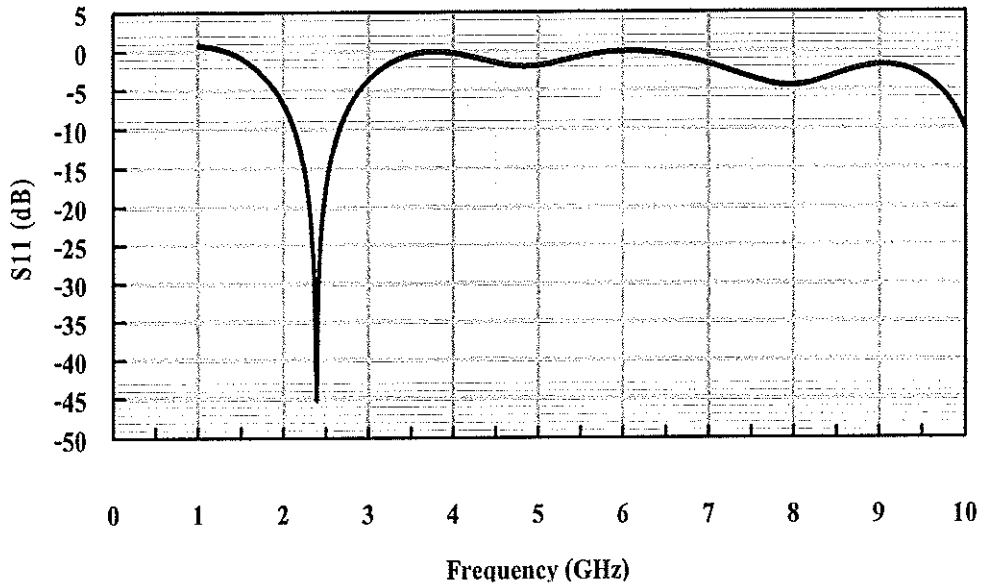
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง (S) และความยาวรวมของช่องเปิด (A+2B)

4.2.1.2 กรณีปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวในแนวแกนนอน (A) ต่อแนวแกนตั้ง (B)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างความยาวในแนวแกนนอน (A) ต่อความยาวในแนวแกนตั้ง (B) ทั้งสองของช่องเปิดรูปตัวยู โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างด้าน A และ B เป็น 1:1 2:1 และ 1:2 โดยยังคงกำหนดความยาวรวมของช่องเปิดให้มีค่าคงที่เป็น 42.6 mm (0.46λ<sub>g</sub>) ที่ความกว้างของช่องเปิดเท่ากับ 0.2 mm (0.0021λ<sub>g</sub>) ตามลำดับ



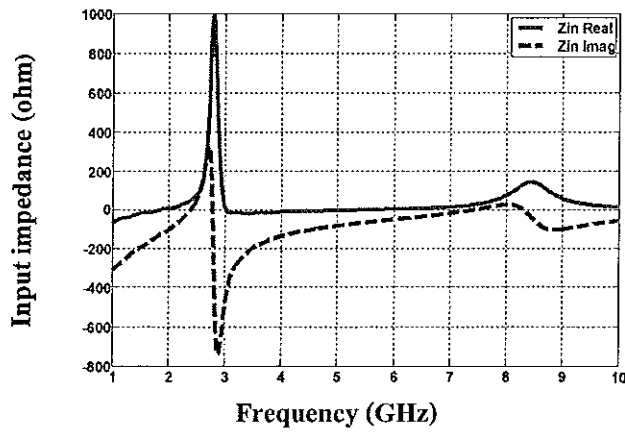
รูปที่ 4.15 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S<sub>11</sub>) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย เมื่อทำการปรับอัตราส่วนในแต่ละด้าน



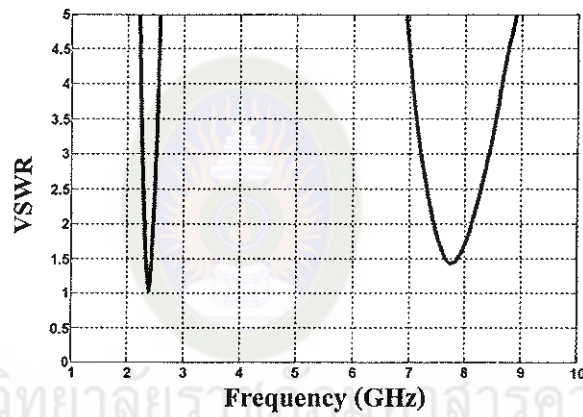
รูปที่ 4.16 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย ที่อัตราส่วน 2:1 จากวิธี MoM ( $S_{11} = -45.14$  dB ที่ 2.39 GHz)

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลการจำลองแบบ โครงสร้างของสายอากาศโดยการเปรียบเทียบกันระหว่างวิธี FDTD กับ วิธี MoM เพื่อให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของวิธี FDTD ที่ได้ใช้ ในบทความนี้ ซึ่งในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบกันเฉพาะค่า  $S_{11}$  พารามิเตอร์ รูปที่ 4.15 แสดงค่า ( $S_{11}$ ) พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูที่ 2.4 GHz โดยมีอัตราส่วนระหว่าง A ต่อ B เป็น 2:1 และจะเห็นว่าอัตราส่วนดังกล่าวจะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิด รูปตัวยูมากที่สุด เพราะว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี FDTD นั้นมีค่าใกล้เคียงกับการจำลองด้วยวิธี MoM โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับที่ออกแบบ และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับต่ำ นั่นคือ มีความสูญเสียเนื่องจากการที่มีคลื่นสะท้อนกลับน้อย ซึ่งสามารถบอกได้ถึงการผลิตที่ดีโดยสังเกตได้จากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยจะพบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม ส่วนรูปที่ 4.18 แสดงค่า VSWR ของการจำลองแบบ โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูป ตัวยูที่อัตราส่วน 2:1

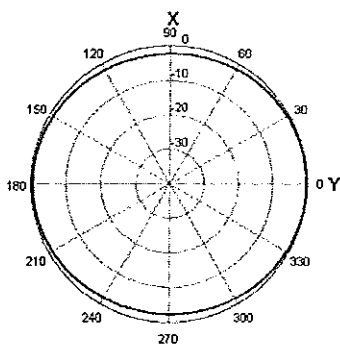




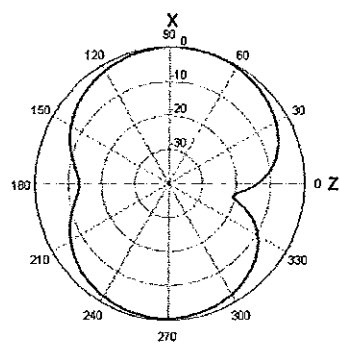
รูปที่ 4.17 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงายที่อัตราส่วน 2:1



รูปที่ 4.18 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงายที่อัตราส่วน 2:1



(ก) ระนาบ XY

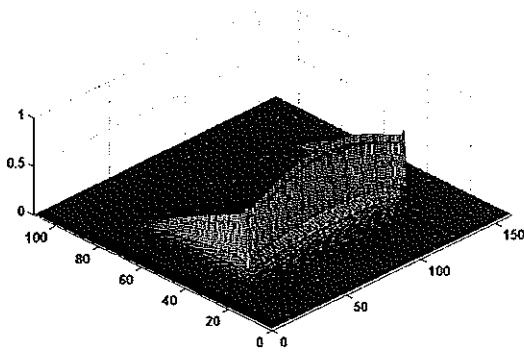


(ข) ระนาบ XZ

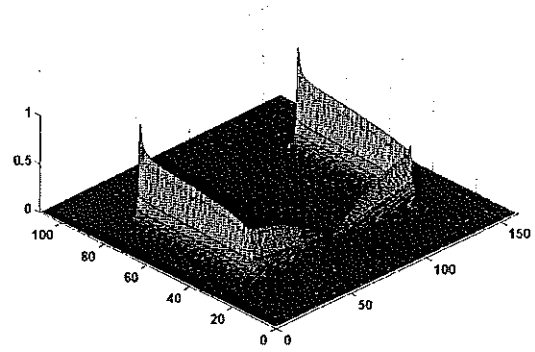
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงาย



รูปที่ 4.19 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ xy และ xz ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระนาบ xy จะเป็นการวิเคราะห์ในระนาบของสนามแม่เหล็ก ระนาบ xz จะเป็นการวิเคราะห์ในระนาบของสนามไฟฟ้า



(ก) สนามไฟฟ้า

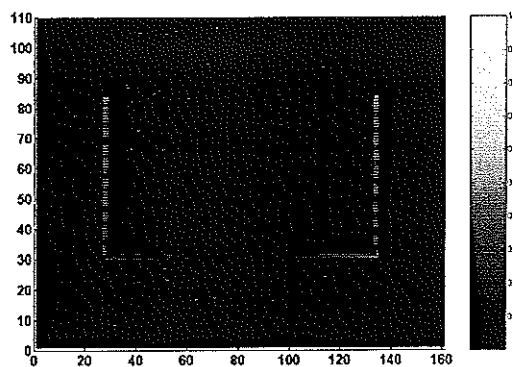


(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.20 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงายที่อัตราส่วน 2:1

รูปที่ 4.20 แสดงความเข้มสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า จะมีความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดที่ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางของช่องเปิด และจะลดขนาดไปจนต่ำที่สุดที่ปลายของแขนทั้งสองข้างของช่องเปิดรูปตัวยู ในทางกลับกันความเข้มสนามแม่เหล็กจะมากที่สุดตรงปลายของแขนทั้งสองข้างของช่องเปิด ส่วนที่กึ่งกลางของช่องเปิดจะมีความเข้มน้อย

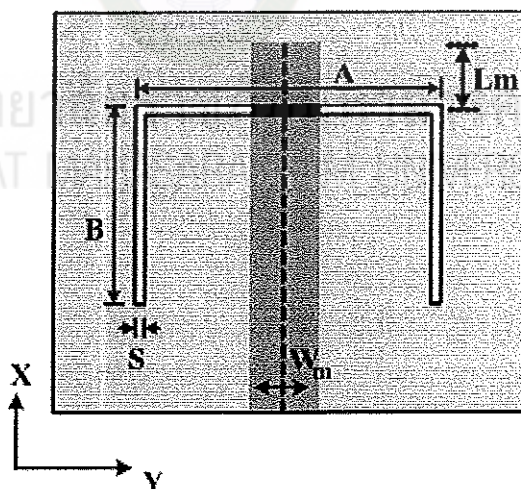
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของสายอากาศแบบช่องเปิด จากรูปจะพบว่ากระแสไฟฟ้าจะหนาแน่นมากในบริเวณปลายแขนทั้งสองด้านของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยู ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงายที่อัตราส่วน 2:1

#### 4.2.2 สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ

สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำนั้น จะมีลักษณะเหมือนกับการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงายทุกประการ โดยที่การหาขนาดความยาวด้านฐานรูปตัวยูคว่ำในแนวแกนอน (A) และความยาวในแนวแกนตั้ง (B) จะใช้ตามหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งรูปที่ 4.22 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ



รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ

จากรูปที่ 4.22 แสดง โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำที่ทำการออกแบบ โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- A คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนนอน  
 B คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนตั้ง  
 S คือ ความกว้างของช่องเปิด  
 $W_m$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป  
 $L_m$  คือ ความยาวของสแตมป์แมตซ์ซิ่ง

ตารางที่ 4.5 ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ

ความถี่ที่ ออกแบบ (GHz)	ความกว้างของ ช่องเปิด (S)		ความยาวของ ช่องเปิด (A+2B)		ความยาวของ สแตมป์แมตซ์ซิ่ง ( $L_m$ )	
	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )	มิลลิเมตร	เทียบ ( $\lambda_g$ )
2.4	0.2	$0.0021\lambda_g$	40.8	$0.44\lambda_g$	3.8	$0.041\lambda_g$

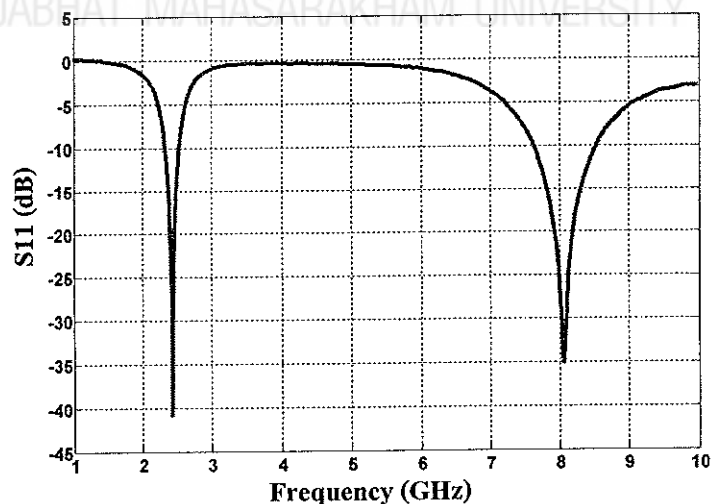
ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 4.5 โดยหลักในการออกแบบนั้น ความยาวรวมและความกว้างของช่องเปิดจะเป็นตัวกำหนดเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ โดยในสายอากาศแบบนี้จะต้องออกแบบให้มีความยาวรวมของช่องเปิด (A+2B) ประมาณ  $0.4\lambda_g$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ และลักษณะในการวางช่องเปิดจะวางในลักษณะคว่ำให้แขนทั้งสองข้างของช่องเปิดรูปตัวยูขนานไปกับสายป้อนสัญญาณ โดยจะวางช่องเปิดให้อยู่กึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (Center-fed Microstrip Slot Antenna) แล้วจึงทำการปรับเพื่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยการปรับระยะ  $L_m$  เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ซึ่งระยะ  $L_m$  ที่ปรับจะมีความยาวประมาณ  $0.041\lambda_g$  ซึ่งหลังจากทำการคำนวณรูปแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยวิธีการจำลองแล้ว เราจะได้คุณลักษณะในด้านต่าง ๆ ของสายอากาศออกมา ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับจากโหลด ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ซึ่งแสดงได้ตามตารางที่ 4.6 และจากตารางจะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ และมีการสูญเสียจากการสะท้อนกลับจากโหลดต่ำ

ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ

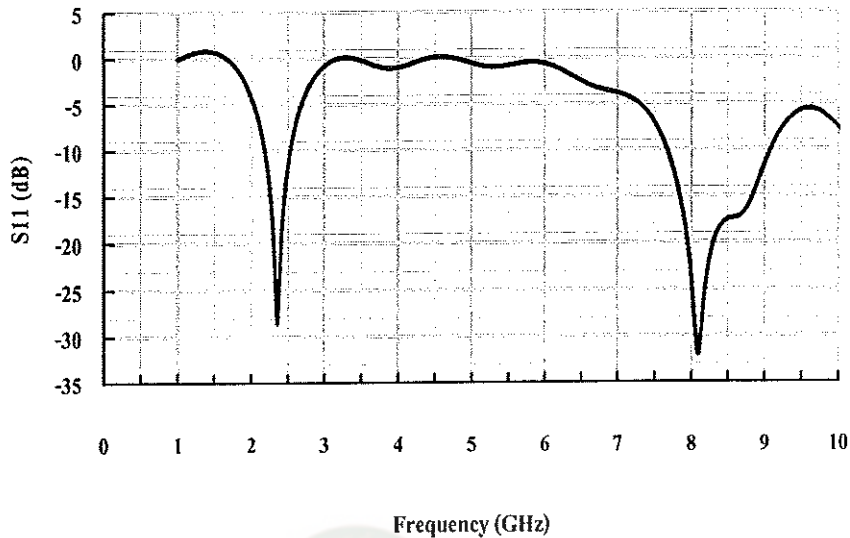
ความถี่ที่ ออกแบบ (GHz)	ความถี่ เรโซแนนซ์ (GHz)	Zin Imag (Ohm)	Zin Real (Ohm)	VSWR	$S_{11}$ (dB)	%BW
2.4	2.41	0.81	49.61	1.05	-40.90	8.67%

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ออกมาสองความถี่ คือ ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำ ความถี่นี้จะเป็นความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการหรือความถี่ที่ออกแบบ ส่วนอีกความถี่ คือ ความถี่เรโซแนนซ์ด้านสูง จะเป็นความถี่ที่เกิดจากผลกระทบจากการทำช่องเปิดที่เป็นเส้นตรงให้เป็นรูปตัวยู ซึ่งถือได้ว่าเป็นฮาร์โมนิกของความถี่แรก โดยลักษณะการเกิดความถี่จะเหมือนกันกับ โครงสร้างที่เป็นช่องเปิดรูปตัวยูหงาย คือ จะเกิดที่ช่วงความถี่ประมาณ 8 GHz และจะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ด้านสูงนี้จะมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีกว่าสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำซึ่งอาจเป็นผลมาจากรูปแบบของการจัดวางช่องเปิด ซึ่งการจัดวางในลักษณะคว่ำนี้จะทำให้แขนของช่องเปิดทั้งสองด้านวางขนานกับแนวของสายป้อนสัญญาณซึ่งเปรียบเสมือนการวางพาราสิติกไวร์ด้านข้างของสายป้อนสัญญาณ โดยจะทำให้ค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



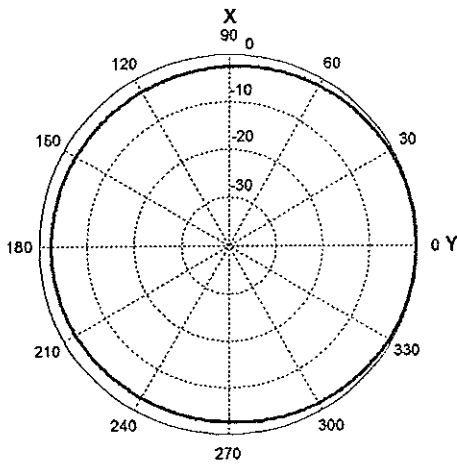
รูปที่ 4.23 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ



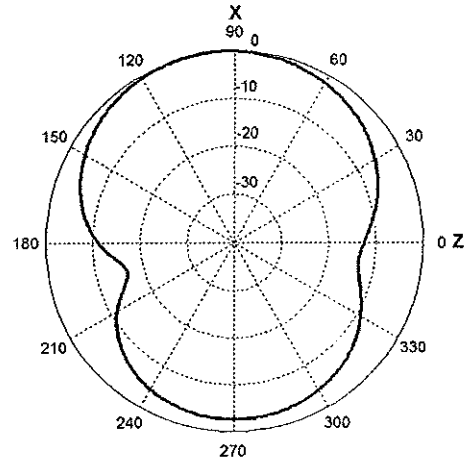
รูปที่ 4.24 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ จากวิธี MoM ( $S_{11} = -28.47$  dB ที่ 2.36 GHz)

สำหรับผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ แสดงในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มสูงที่ช่องเปิดในแนวแกนแนวนอน และส่วนปลายสุดของปลายช่องเปิดรูปตัวยูจะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด

สำหรับแบบรูปการแผ่ของสนามระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ทั้งนี้ยังมีรูปร่างคล้ายกับกับสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูหงายอีกด้วย

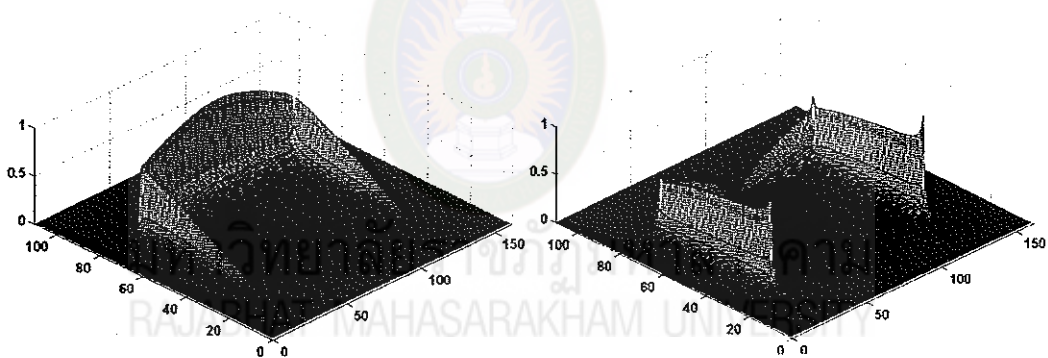


(ก) ระนาบ XY



(จ) ระนาบ XZ

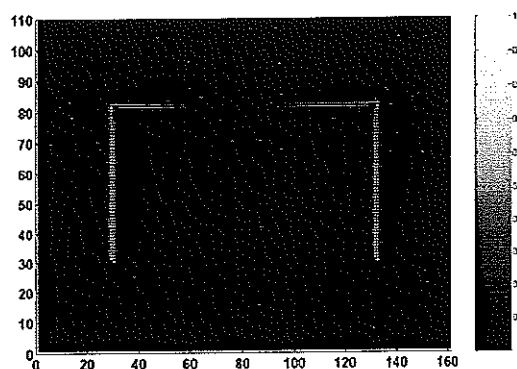
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ



(ก) สนามไฟฟ้า

(จ) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.23 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ



รูปที่ 4.27 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำ

สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศที่ผ่านมานั้น เริ่มต้นได้ทำการออกแบบสายอากาศเป็นช่องเปิดรูปเส้นตรง โดยโครงสร้างดังกล่าวได้ถูกใช้เป็น โครงสร้างพื้นฐานในการออกแบบและเปรียบเทียบผลการจำลองแบบที่ได้กับสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยู โดยการศึกษาจะทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่มีต่อค่าคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งในส่วนของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของช่องเปิดต่อความยาวรวมทั้งสามด้านของช่องเปิด ( $A+2B$ ) และการปรับอัตราส่วนระหว่างความยาวในแนวแกนนอนต่อความยาวในแนวแกนตั้ง โดยกำหนดให้ความยาวรวมของช่องเปิดลงที่ ซึ่งผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เหล่านี้ได้แสดงให้เห็นผลที่เกิดขึ้นต่อค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่แตกต่างกัน

ผลการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูที่ใช้รูปแบบการป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งต่อแบบเปิดวงจรนั้นจะเห็นได้ว่า สายอากาศจะเรโซแนนซ์ที่ 2 ความถี่ คือ ที่ 2.4 GHz และประมาณ 8 GHz แม้ว่าจะปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติเรโซแนนซ์ที่ 2 ความถี่ แต่จะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ในด้านสูงที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ตรงตามมาตรฐานความถี่ใช้งานของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN)

สำหรับเป้าหมายสำคัญในการออกแบบสายอากาศดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนแรก คือการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEEE 802.11 คือ IEEE 802.11 a/b/g ตามลำดับ

ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูให้มี 2 องค์ประกอบที่มีขนาดแตกต่างกัน เพื่อให้จะให้สายอากาศโครงสร้างดังกล่าวสามารถเรโซแนนซ์ได้ที่ 2 ความถี่ตรงตาม



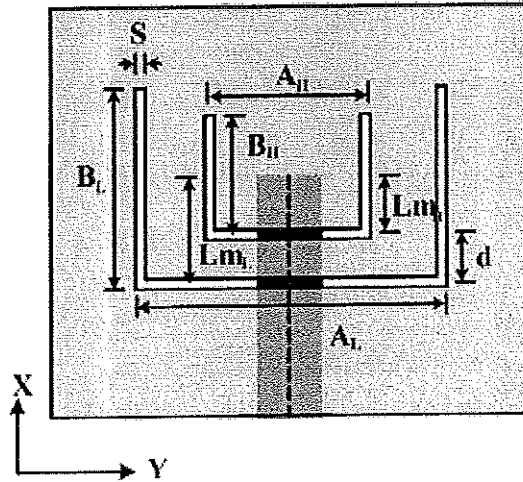
มาตรฐานความถี่ใช้งานของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) คือ IEEE 802.11 b/g ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz และ IEEE 802.11 a ที่ย่านความถี่ 5.2 GHz ตามลำดับ

ดังนั้นการศึกษาในขั้นตอนนี้ต่อไปก็คือ การนำสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูที่ออกแบบในแต่ละความถี่ซึ่งจะมีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาดมาจัดวางในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งทำการปรับค่าพารามิเตอร์สำคัญเพื่อให้สายอากาศสามารถเรโซแนนซ์ได้ที่ 2 ความถี่ตรงตามมาตรฐานของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย และจากนั้นก็นำไปสู่การศึกษาค่าคุณลักษณะอื่น ๆ ของสายอากาศร่วมด้วย ซึ่งนำเสนอได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

#### 4.3 สายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยู 2 องค์ประกอบ

ในหัวข้อที่ 4.2 ได้กล่าวถึงการศึกษา ออกแบบและนำเสนอผลของค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดรูปเส้นตรง และช่องเปิดรูปตัวยู 1 องค์ประกอบที่มีการจัดวางในรูปแบบหงายและคว่ำ ซึ่งมีการใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปต่อแบบเปิดวงจรมาแล้ว หัวข้อต่อไปนี้จะได้นำหลักการในหัวข้อที่ผ่านมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศที่มีโครงสร้างเป็น 2 องค์ประกอบ ซึ่งโครงสร้างสายอากาศจะเป็นสายอากาศรูปตัวยู 2 องค์ประกอบ นำมาจัดวางซ้อนแบบหงาย และวางซ้อนแบบหงายคว่ำ แล้วทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบของการจัดวาง และขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะของสายอากาศตรงตามความถี่ที่ออกแบบที่ดีที่สุด ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจำลองโครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบนั้น โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD) ซึ่งนำเสนอตามลำดับดังนี้

### 4.3.1 สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงาย



รูปที่ 4.28 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงาย

จากรูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายที่ทำการออกแบบโดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

$A_L$  คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนอนรูปใหญ่

$B_L$  คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนตั้งรูปใหญ่

$A_H$  คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนอนรูปเล็ก

$B_H$  คือ ความยาวของช่องเปิดในแนวแกนตั้งรูปเล็ก

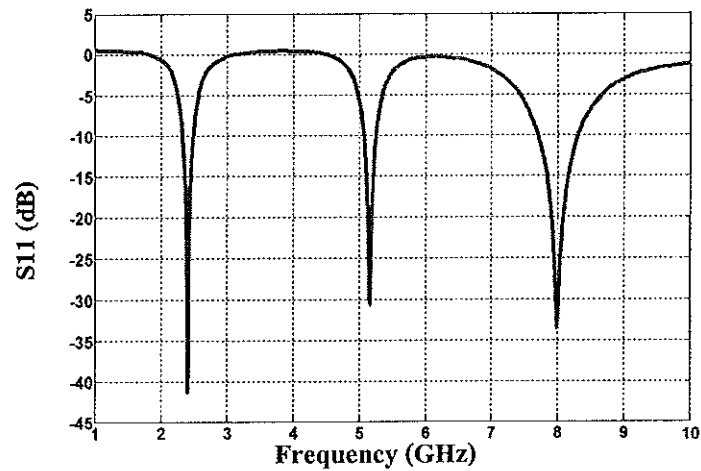
$S$  คือ ความกว้างของช่องเปิด

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างช่องเปิด

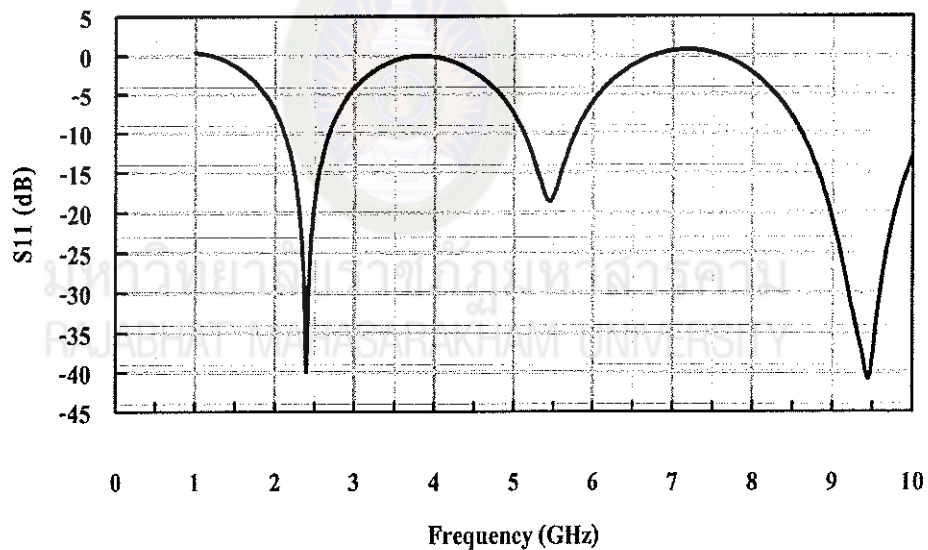
$L_{mL}$  คือ ความยาวของสตัปแมตซ์ซึ่งรูปใหญ่

$L_{mH}$  คือ ความยาวของสตัปแมตซ์ซึ่งรูปเล็ก

ในการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศรูปตัวยูสององค์ประกอบวางซ้อนแบบหงายได้ทำการออกแบบให้สายอากาศเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยช่องเปิดรูปตัวยูรูปใหญ่นั้นจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.4 GHz และช่องเปิดรูปตัวยูรูปเล็กจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 5.2 GHz โดยหลักในการออกแบบขนาดโครงสร้างในแต่ละขนาดจะใช้หลักการ



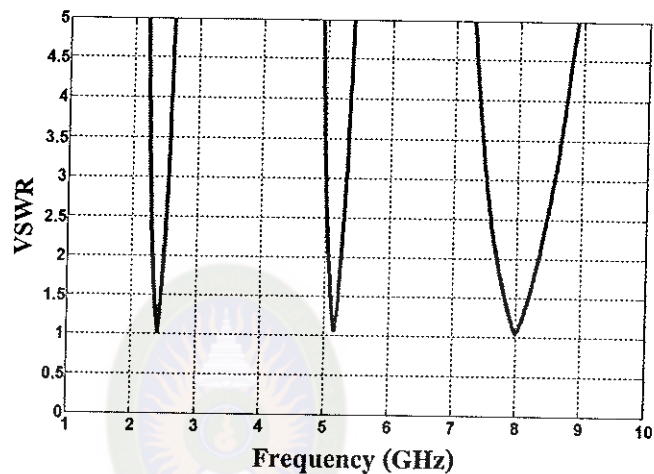
รูปที่ 4.29 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวาง  
 ซ้อนแบบหงาย



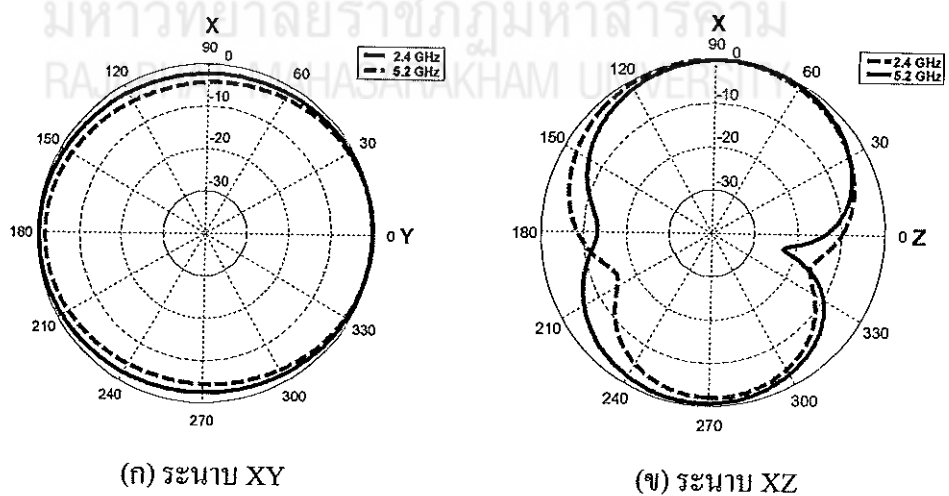
รูปที่ 4.30 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวาง  
 ซ้อนแบบหงาย จากวิธี MoM ( $S_{11} = -39.75$  dB ที่ 2.40 GHz และ  $S_{11} = -18.54$  dB ที่  
 5.29 GHz)

ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับที่จำลองด้วยวิธี MoM แสดงได้ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่า แม้จะมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ใกล้เคียงกัน แต่ผลที่ได้จากวิธี FDTD จะมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีกว่าวิธี MoM ค่อนข้างมาก

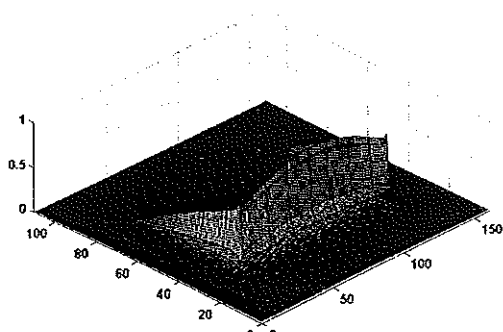
จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของทั้งสองความถี่มีค่าเข้าใกล้หนึ่งซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีทั้งที่ความถี่ 2.4 GHz และที่ความถี่ 5.2 GHz



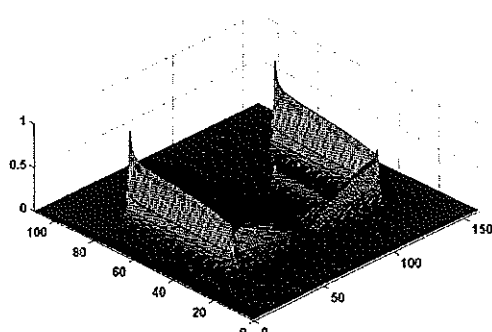
รูปที่ 4.31 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงาย



รูปที่ 4.32 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

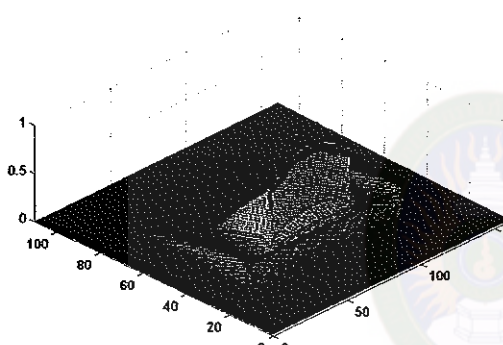


(ก) สนามไฟฟ้า

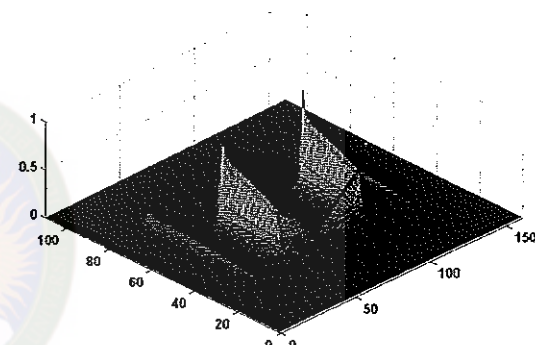


(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.33 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายที่ความถี่ 2.4 GHz

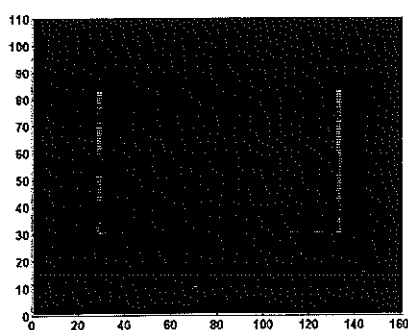


(ก) สนามไฟฟ้า

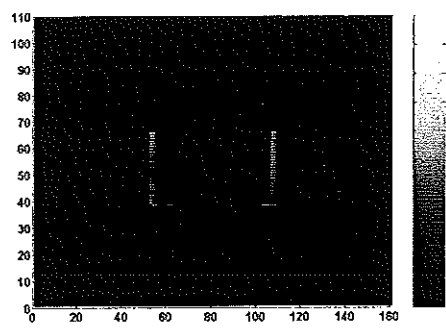


(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.34 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายที่ความถี่ 5.2 GHz



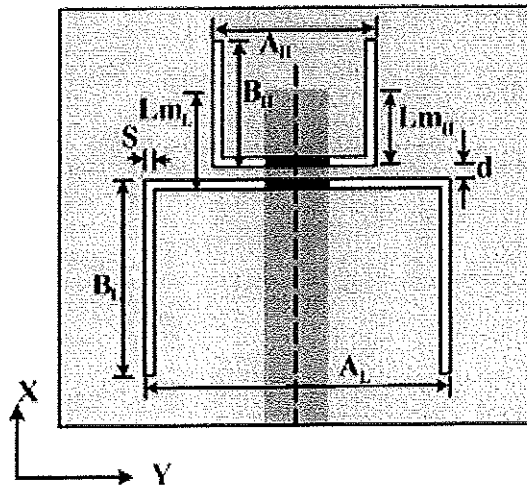
(ก) ที่ 2.4 GHz



(ข) ที่ 5.2 GHz

รูปที่ 4.35 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

### 4.3.2 สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ



รูปที่ 4.36 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ

จากรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าสายอากาศประกอบด้วยช่องเปิดรูปตัวยู 2 ช่องที่มีขนาดแตกต่างกันวางอยู่บนแผ่นตัวนำเดียวกัน โดยได้ออกแบบให้แต่ละขนาดมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่แตกต่างกัน โดยช่องเปิดรูปใหญ่นั้นได้ออกแบบให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยมีขนาดความยาวรวมทั้งสามด้านของช่องเปิดเท่ากับ 41.2 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ  $0.44\lambda_g$  อัตราส่วนระหว่างความยาวในแนวแกนนอน (A) ต่อความยาวในแนวแกนตั้ง (B) กำหนดให้เท่ากับ 2:1 และความกว้างเปิดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร สำหรับช่องเปิดรูปเล็กนั้นได้ออกแบบให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 5.2 GHz โดยมีขนาดความยาวรวมของช่องเปิดเท่ากับ 22 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ  $0.52\lambda_g$  และมีอัตราส่วนความยาวและขนาดของช่องเปิดเช่นเดียวกันกับช่องเปิดรูปใหญ่

สำหรับขนาดที่ใช้ในการจำลองแบบแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 โดยได้มีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัวคือ ระยะห่างระหว่างช่องเปิด ( $d$ ) ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวต้องกำหนดให้มีค่าที่สัมพันธ์กับระยะสแต็บแมตซ์ซิ่ง ( $Lm$ ) โดยจะต้องมีค่าไม่มากเกินไป เพราะถ้าระยะห่างระหว่างช่องเปิดมาก ก็จะทำให้ระยะ  $Lm_U$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามซึ่งจะส่งผลให้ค่าแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนแปลง

สายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูที่มีขนาดดังกล่าวนี้จะเกิดความถี่เรโซแนนซ์ได้ในย่านความถี่ที่ต้องการของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้เช่นเดียวกันกับสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรง แต่สิ่งที่

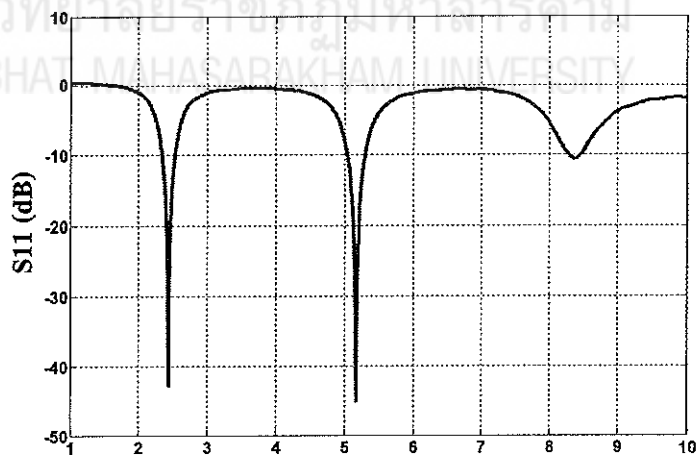
สังเกตได้คือความยาวรวมทั้งสามด้านของช่องเปิดจะมีค่าที่มากกว่าความยาวของช่องเปิดรูปเส้นตรงอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 4.9 ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ

พารามิเตอร์	$A_H$ (mm)	$B_H$ (mm)	$A_L$ (mm)	$B_L$ (mm)	$W_m$ (mm)	$Lm_H$ (mm)	$Lm_L$ (mm)	d (mm)
ขนาด (mm)	11 $0.25\lambda_g$	5.5 $0.13\lambda_g$	20.6 $0.22\lambda_g$	10.3 $0.11\lambda_g$	4.8 $0.05\lambda_g$	2.6 $0.06\lambda_g$	3.4 $0.04\lambda_g$	0.6 $0.006\lambda_g$

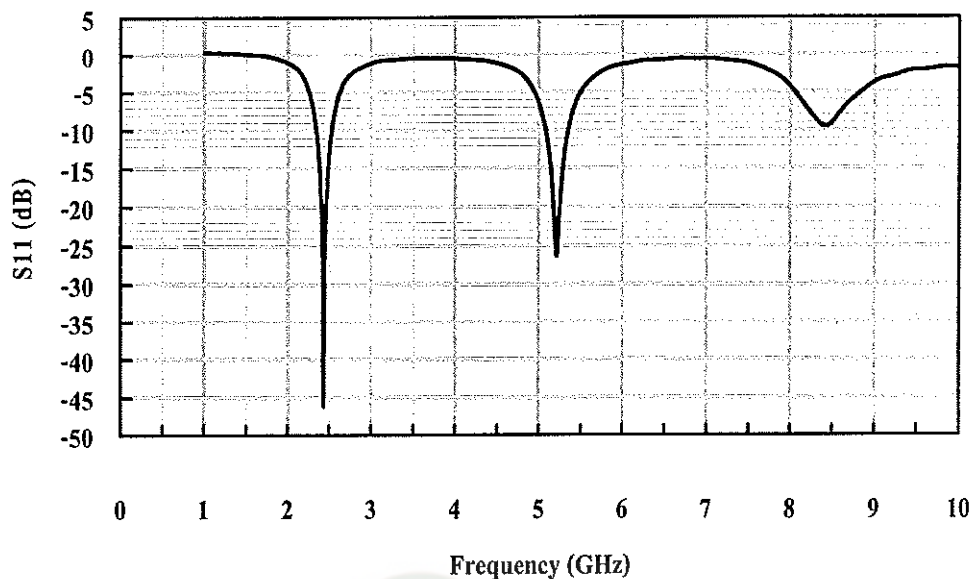
ตารางที่ 4.10 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ

ความถี่ที่ ออกแบบ (GHz)	ความถี่ เรโซแนนท์ (GHz)	Zin Imag (Ohm)	Zin Real (Ohm)	VSWR	$S_{11}$ (dB)	%BW
2.4	2.41	0.34	49.36	1.01	-42.81	8.23%
5.2	5.19	-0.55	50.05	1.01	-45.06	5.22%



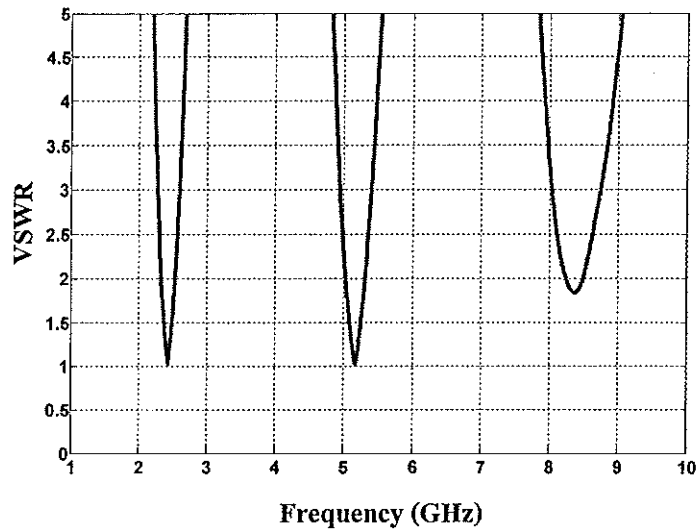
รูปที่ 4.37 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ



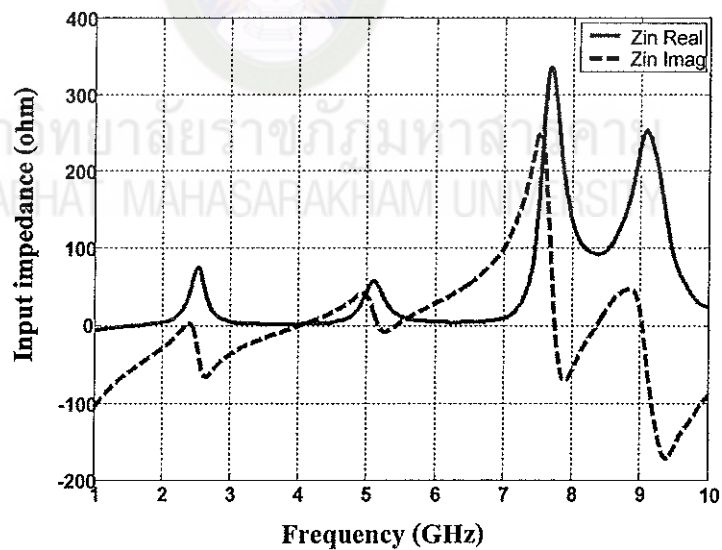


รูปที่ 4.38 การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ จากวิธี MoM ( $S_{11} = -46.13$  dB ที่ 2.43 GHz และ  $S_{11} = -26.30$  dB ที่ 5.21 GHz)

ผลของค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูที่จำลองด้วยวิธี FDTD แสดงในรูปที่ 4.37 และค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับที่จำลองด้วยวิธี MoM แสดงได้ดังรูปที่ 4.38 ซึ่งผลที่ได้จะเห็นได้ว่า แม้จะมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกัน แต่ผลที่ได้จากวิธี FDTD จะมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์มากกว่าวิธี MoM

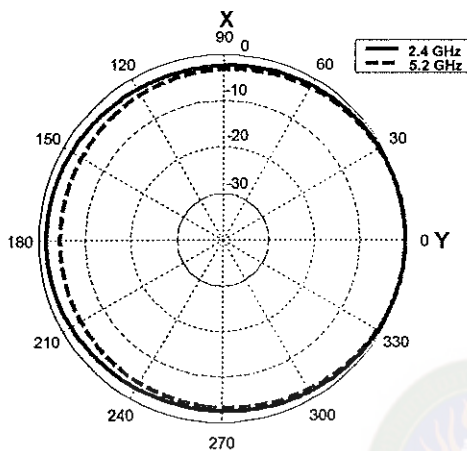


รูปที่ 4.39 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ สำหรับค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ( $VSWR$ ) ของสายอากาศ แสดงให้เห็นว่าที่จุดที่มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด จะมีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือ คลื่นนิ่งมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.39

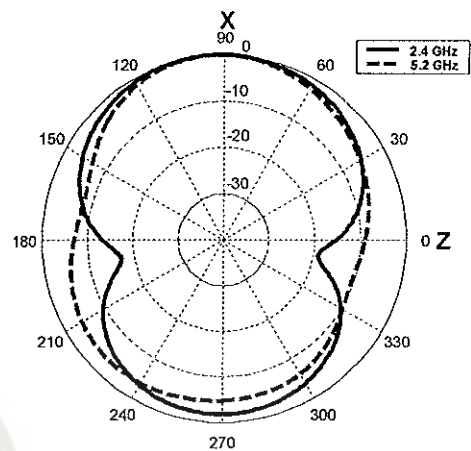


รูปที่ 4.40 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ

สำหรับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_m$ ) ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่ที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดจะมีค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์ค่าจริงเข้าใกล้ 50 โอห์ม และค่าจินตภาพเข้าใกล้ 0 นั่นคือแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์กับสายส่ง 50 โอห์ม ทั้งสองย่านความถี่นั่นเอง

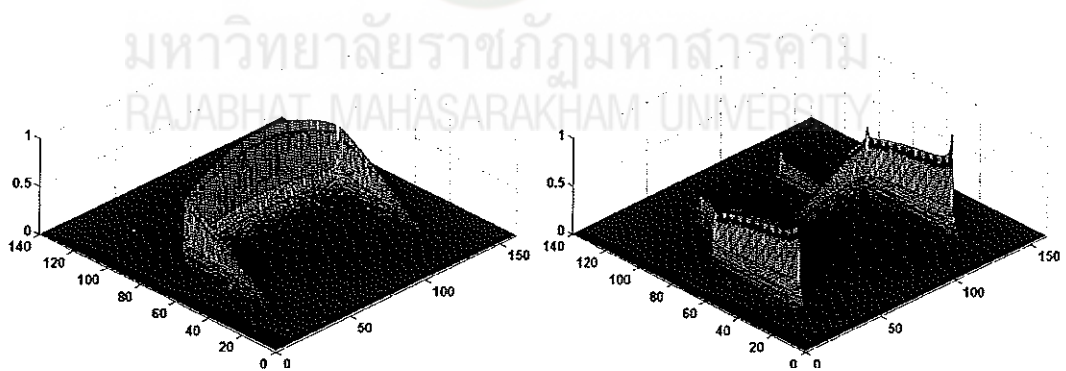


(ก) ระนาบ XY



(ข) ระนาบ XZ

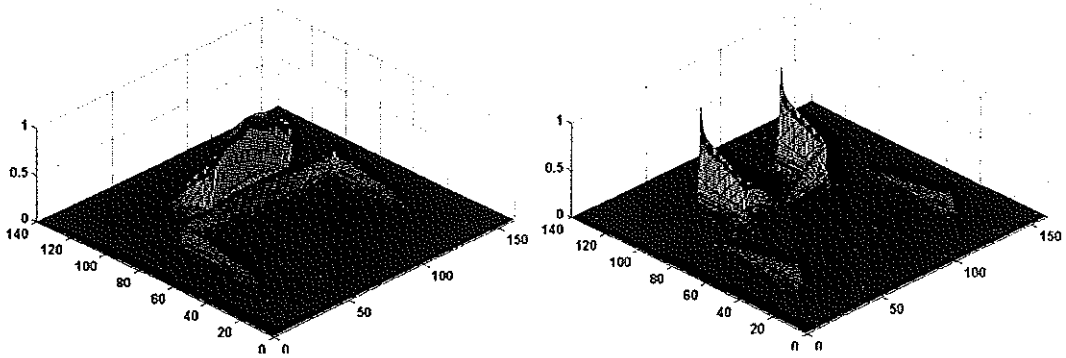
รูปที่ 4.41 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำ



(ก) สนามไฟฟ้า

(ข) สนามแม่เหล็ก

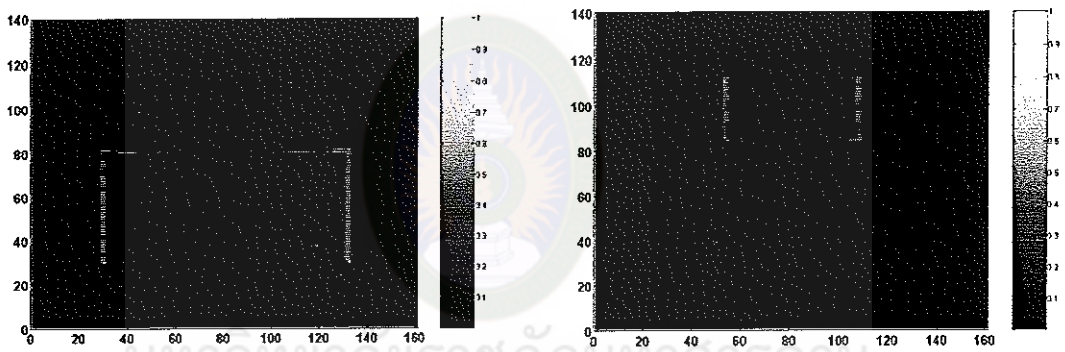
รูปที่ 4.42 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำที่ความถี่ 2.4 GHz



(ก) สนามไฟฟ้า

(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.43 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำที่ความถี่ 5.2 GHz



(ก) ที่ 2.4 GHz

(ข) ที่ 5.2 GHz

รูปที่ 4.44 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูวางซ้อนแบบหงายคว่ำที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศจากรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นได้ว่าเป็นแบบบรอดไซด์ (Broadside) และเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ทั้งที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ซึ่งจะคล้ายกันกับสายอากาศแบบช่องเปิดรูปเส้นตรงและรูปตัวยู 1 องค์ประกอบ

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยู 2 องค์ประกอบวางซ้อนแบบหงายคว่ำทั้งที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.42 และ 4.43 จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มสูงที่บริเวณกึ่งกลางของช่องเปิดและจะลดลงเรื่อย ๆ ไปจนถึงแขน

ทั้งสองด้านของรูปตัวยู และสนามแม่เหล็กจะมีความเข้มสูงสุดที่บริเวณปลายแขนทั้งสองของช่องเปิดรูปตัวยูซึ่งก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับช่องเปิดรูปเส้นตรงและรูปตัวยู 1 องค์ประกอบ

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวยูนั้น จะมีความเข้มสูงสุดที่บริเวณปลายแขนทั้งสองด้านของช่องเปิดรูปตัวยูทั้งในส่วนของความถี่ด้านต่ำและด้านสูง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.44 และจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของกระแสนั้นจะสัมพันธ์กันกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ทั้งที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY