

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย

SWITCHED BEAM ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATION

โดย

นางสาวรัชชวรรณ ตั้งเหล่าวัฒนชัย

นายรัฐนันท์ บัญญัตินพรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย
SWITCHED BEAM ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATION

โดย
นางสาวรัชวรรณ ตั้งเหล่าวัฒนชัย
นายรัฐนันท์ บัญญัตินพรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา วิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

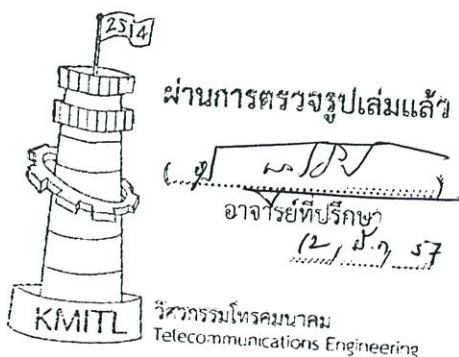
สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย
SWITCHED BEAM ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATION

โดย

นางสาว รัชวรรณ	ตั้งเหล่าวัฒน์ชัย	53011348
นาย รัฐนันท์	บัญญัติสินพรัตน์	53011351

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา วิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556



ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย

SWITCHED BEAM ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATION

ผู้จัดทำ

- | | | |
|------------------|-------------------|----------|
| 1. นางสาวรัชวรรณ | ตั้งเหล่าวัฒน์ชัย | 53011348 |
| 2. นายรัฐนันท์ | บัญญัตินพรัตน์ | 53011351 |



(รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจากรองศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์และเป็นผู้ช่วยเหลือแนะนำทางการศึกษา รวมทั้งยังอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าอย่างดียิ่งตลอดขอขอบคุณในความเมตตาจากห้องปฏิบัติการวิจัยสายอากาศ และประยุกต์แม่เหล็กไฟฟ้า (Antenna and Electromagnetics Applications Research Lab) ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์อันเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับงานของข้าพเจ้า ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ที่สนับสนุนทางการศึกษาของข้าพเจ้าที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณพี่ๆและสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยสายอากาศ และประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าทุกท่านสำหรับคำแนะนำ กำลังใจและข้อคิดดีๆตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณคุณสิทธิชัย เต็นตรี และคุณบัญชา เหลืองแดงที่คอยแนะนำแนวทางตลอดจนแนวคิดในการทำงานรวมถึงการสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆด้าน และช่วยเหลือปริญญาานิพนธ์ของข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าทุกคน ที่มอบความปรารถนาดีอันเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ข้าพเจ้า อีกทั้งยังส่งเสริมทางการศึกษาของข้าพเจ้าอย่างดียิ่งรวมถึงให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องของข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

รัชวรรณ ตั้งเหล่าวัฒน์ชัย
รัฐนันท์ บัญญัตินพรัตน์

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย
SWITCHED BEAM ANTENNA
FOR WIRELESS COMMUNICATION

โดย นางสาว รัชวรรณ ตั้งเหล่าวัฒน์ชัย 53011348
นาย รัฐนันท์ บัญญัตินพรัตน์ 53011351

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสามองค์ประกอบสำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยสายอากาศที่นำเสนอในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้นั้นออกแบบสำหรับใช้งานที่ความถี่ในช่วง 2.400–2.484 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยตัวสะท้อนคลื่น ขนาด 55 mm x 40 mm และแผ่นปรสิต ขนาด 30 mm x 28 mm ซึ่งสร้างจากแผ่นพิมพ์ FR-4 หน้าเดียว ที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 ซึ่งเป็นวัสดุที่หาง่ายและราคาถูก มีการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับแผ่นปรสิต ทำให้มีอัตราขยายที่สูง มีการป้อนสัญญาณโดยใช้โพรงรูปตัวแอล สร้างจากทองแดง ขนาดความสูง 15 mm x 0.5 mm และความยาว 12 mm x 0.5 mm ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น ซึ่งหลังจากการออกแบบได้จำลองพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทดสอบคุณลักษณะ โดยมีอัตราขยายเท่ากับ 4.19 dBi แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว จากนั้นนำสายอากาศ 3 ตัวมาประกอบกันเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ทำการออกแบบทดสอบวงจรสวิตช์อาร์เอฟ โดยมีโครงสร้างเป็นสวิตช์แบบ SPDT เพื่อทำหน้าที่สวิตช์เปิด-ปิด ให้สัญญาณอาร์เอฟผ่าน โดยควบคุมการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับขั้วคาโทดด้านใดด้านหนึ่งของวงจร โดยทำงานร่วมกับวงจรแบ่งกำลังงานที่ทำหน้าที่แบ่งกำลังงานให้กับองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นอย่างเท่าๆกัน เมื่อนำแต่ละส่วนมาทำงานร่วมกัน จะทำให้เราสามารถสวิตช์ลำคลื่นให้ไปในทิศทางที่เราต้องการได้ โดยควบคุมความต่างเฟสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบของแถวลำดับ ซึ่งการป้อนเฟสต่างนี้สามารถทำได้โดยใช้สายนำสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน มาเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศแถวลำดับวงจรสวิตช์อาร์เอฟ และวงจรแบ่งกำลังงาน

ABSTRACT

This thesis presents a switched beam antenna operated for the WLAN system in the frequency band of 2.400-2.484 GHz. The proposed antenna consists of the reflector with the size of 55 mm x 40 mm and the parasitic patch with the size of 30 mm x 28 mm that are fabricated on FR-4 with the permittivity of 4.3. There is an air gap between the reflector and the parasitic patch that improves the antenna gain. The L-probe feeding technique is used to improve the bandwidth of the antenna. The L-Probe is fabricated by copper with the size 27 mm x 0.5 mm. The prototype antenna is fabricated in order to measure the characteristics of the antenna such as $|S_{11}|$, gain, and radiation pattern. The gain of the antenna is 4.19 dBi and the radiation pattern is uni-directional beam. Then, 3 antennas are combined to form the linear array for the gain and radiation pattern improvements. The RF switch is designed to control the RF signals by controlling the bias DC voltage to one of the cathode of the RF switch. The switched beam system is the combination of the linear array antenna, the RF switch and the power splitter. The direction of the main beam can be controlled by the different phases of the array elements. For the different phase inputs, we can implement by using different phases of transmission lines that is connected to the linear array, the RF switch and the power splitter.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN)	3
2.3 ประวัติและมาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN	4
2.3.1 ประวัติของเทคโนโลยี WLAN	4
2.3.2 มาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN	5
2.4 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริป	6
2.4.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป	7
2.5 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ	8
2.5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	8
2.5.2 อัตราขยาย (Gain)	10
2.5.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	10
2.5.4 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio)	11
2.5.5 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)	12
2.5.6 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	12
2.6 สายอากาศแถวลำดับ	13

สารบัญ (ต่อ)

	2.7 แกลลุ่มดับสององค์ประกอบ	14
	2.8 แกลลุ่มดับเชิงเส้นจำนวน N ตัว	16
	2.8.1 แกลลุ่มดับแบบบรอดไซด์	20
	2.8.2 แกลลุ่มดับแบบเอนด์ไฟร์	20
	2.8.3 แกลลุ่มดับปรับเฟส	21
	2.9 การจัดวางองค์ประกอบของแกลลุ่มดับ	21
	2.10 สายอากาศฉลวด	24
	2.10.1 ระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลุ่มคี่	26
	2.11 สรุป	28
บทที่ 3	การออกแบบและการจำลอง	29
	3.1 บทนำ	29
	3.2 โครงสร้างของสายอากาศ	29
	3.2.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของสายอากาศ	30
	3.3 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของสายอากาศ	31
	3.3.1 การปรับปรุงระยะห่างระหว่างระนาบกราวนด์ และแผ่นแพตช์ (H)	31
	3.3.2 การปรับปรุงความสูงของโพรงรูปตัวแอล (L_v)	32
	3.3.3 การปรับปรุงความกว้างแผ่นระนาบกราวนด์ (W_g)	32
	3.3.4 การปรับปรุงความยาวของโพรงรูปตัวแอล (L_h)	33
	3.3.5 การปรับปรุงความยาวแผ่นระนาบกราวนด์ (L_g)	34
	3.3.6 การปรับปรุงความกว้างแผ่นแพตช์ (W_p)	34
	3.3.7 การปรับปรุงความยาวแผ่นแพตช์ (L_p)	35
	3.4 ผลการจำลองหลังการปรับปรุงพารามิเตอร์	36
	3.4.1 $ S_{11} $ ของสายอากาศ	36
	3.4.2 อัตราขยายของสายอากาศ	37
	3.4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	37
	3.5 ระบบสายอากาศสวิตช์ลุ่มคี่	39
	3.5.1 สายอากาศแกลลุ่มดับแบบเชิงเส้นและการออกแบบ ทิศทางของลุ่มคี่หลัก	40
	3.5.2 วงจรสวิตช์อาร์เอฟ	43
	3.5.3 วงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน	47

สารบัญ (ต่อ)

	3.6 สรุป	48
บทที่ 4	การสร้าง การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ	49
	4.1 การสร้างและทดสอบสายอากาศ	49
	4.2 เครื่องและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบ	50
	4.3 ผลการทดสอบของสายอากาศ	50
	4.3.1 การทดสอบ $ S_{11} $	51
	4.3.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	52
	4.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	55
	4.4 การทดสอบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ	59
	4.5 การทดสอบวงจรแบ่งกำลังงาน	61
	4.6 การทดสอบระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น	62
	4.7 สรุป	75
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	77
	5.1 สรุปเนื้อหาของปริิญาานิพนธ์	78
	5.2 ข้อเสนอแนะ	79
	5.2.1 วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น	79
	5.2.2 แนวทางพัฒนา	79
บรรณานุกรม		80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคโนโลยี WLAN	3
2.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	7
2.3 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	8
2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว	9
2.5 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)	12
2.6 การจัดวางแถวลำดับสององค์ประกอบ ที่วางตามแนวแกน z	14
2.7 การหาสนามระยะไกลของแถวลำดับองค์ประกอบ N ตัวที่มีองค์ประกอบเป็นไอโซทรอปิกวางตามแนวแกน z	16
2.8 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 4×1	22
2.9 ระบบสายอากาศฉลาดเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ	25
2.10 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น	27
3.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz	29
3.2 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นแพตช์ (H)	31
3.3 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความสูงของโพรงรูปตัวแอล (L_v)	32
3.4 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความกว้างแผ่นระนาบกราวด์ (W_g)	33
3.5 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความยาวของโพรงรูปตัวแอล (L_h)	33
3.6 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความยาวแผ่นระนาบกราวด์ (L_g)	34
3.7 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความกว้างแผ่นแพตช์ (W_p)	35
3.8 $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความยาวแผ่นแพตช์ (L_p)	35
3.9 ผลการจำลอง $ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	36
3.10 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ	37
3.11 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz	38
3.12 ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น	39
3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2	41

สารบัญรูป (ต่อ)

3.14	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 2 และองค์ประกอบที่ 3	42
3.15	วงจรสมมูลไดโอดแบบพิน	43
3.16	กระแสแปรผันกับความต้านทาน	44
3.17	โครงสร้างสวิตช์อาร์เอฟแบบเอสพีดีที	45
3.18	ผลการจำลอง $ S_{11} $ และ $ S_{22} $ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ	46
3.19	ผลการจำลอง $ S_{12} $ และ $ S_{21} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	47
3.20	วงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน	48
4.1	สายอากาศต้นแบบ	49
4.2	การทดสอบ $ S_{11} $	51
4.3	ผลการทดสอบและการจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ	52
4.4	การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	54
4.5	ผลการทดสอบและผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ	54
4.6	การติดตั้งสายอากาศสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	56
4.7	ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz	57
4.8	วงจรสวิตช์อาร์เอฟต้นแบบ	59
4.9	ผลจำลองและผลทดสอบ $ S_{11} $ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ	60
4.10	ผลจำลองและผลทดสอบ $ S_{22} $ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ	60
4.11	ผลจำลองและผลทดสอบ $ S_{12} $ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ	61
4.12	วงจรแบ่งกำลังงาน	61
4.13	$ S_{11} $ $ S_{22} $ $ S_{12} $ และ $ S_{21} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของวงจรแบ่งกำลังงาน	62
4.14	โครงสร้างระบบสายอากาศสวิตช์ลําคลื่น	64
4.15	การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของระบบสายอากาศสวิตช์ลําคลื่น	65
4.16	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อให้สายอากาศด้านซ้ายทำงาน	66
4.17	อัตราขยายของสายอากาศที่มุม -20 องศา เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน	67
4.18	$ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน	67

สารบัญรูป (ต่อ)

4.19	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อให้สายอากาศ ด้านขวาทำงาน	68
4.20	อัตราขยายที่มุม 25 องศา เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน	69
4.21	$ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน	69
4.22	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อให้สายอากาศ ด้านซ้ายทำงาน	70
4.23	อัตราขยายของสายอากาศที่มุม -30 องศา เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน	71
4.24	$ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน เมื่อเฟสต่างขององค์ประกอบ 155 องศา	72
4.25	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อให้สายอากาศด้านขวาทำงาน	73
4.26	อัตราขยายที่มุม 30 องศา เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน	74
4.27	$ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน เมื่อเฟสต่างขององค์ประกอบ 155 องศา	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ	30
3.2	ค่าพารามิเตอร์สายอากาศเริ่มต้น	31
3.3	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ	36
3.4	คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	39
4.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศที่สมบูรณ์	50
4.2	เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz	58
5.1	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 2.45 GHz	78

บทที่ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารเป็นปัจจัยสำคัญในการติดต่อระหว่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลาเพื่อตอบสนองความต้องการในด้านความเร็วของการรับส่งข้อมูล สำหรับเทคโนโลยีที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันคือการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication System) เช่นระบบ WLAN (Wireless Local Area Network) เป็นเทคโนโลยีที่ไม่จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณ สามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะที่มีระดับสัญญาณเพียงพอ ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการติดต่อสื่อสาร

ดังนั้น สายอากาศถือว่ามีหน้าที่สำคัญที่สามารถช่วยในการสื่อสารรับ-ส่งข้อมูล จึงจำเป็นต้องมีการการเลือกสายอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน สายอากาศที่นำมาใช้งานในระบบ WLAN มีหลายชนิด เช่น สายอากาศช่องเปิด (Aperture Antennas) สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antennas) และ สายอากาศสะท้อนคลื่น (Reflector Antennas) เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปมีข้อดี คือ ราคาถูก น้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือแบนด์วิดท์ต่ำ จึงเลือกใช้สายอากาศไมโครสตริปมาใช้ในการออกแบบ

ระบบสายอากาศที่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ในทิศทางต่างๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสารไร้สาย อีกทั้งช่วยลดการแทรกสอดของสัญญาณที่ไม่ต้องการ (Undesired Signal) ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนี้ประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz จำนวน 3 ตัวประกอบกันเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ และวงจรสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ซับซ้อน เหมาะกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) นำเสนอสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย ที่ความถี่กลางใช้งาน 2.45 GHz
- 2) ศึกษา ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ทิศทางเดียว
- 3) ศึกษา ออกแบบและสร้างสายอากาศแถวลำดับเพื่อปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยาย
- 4) ศึกษา ออกแบบและสร้างวงจรสวิตช์ลำคลื่น
- 5) ประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สายได้

1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

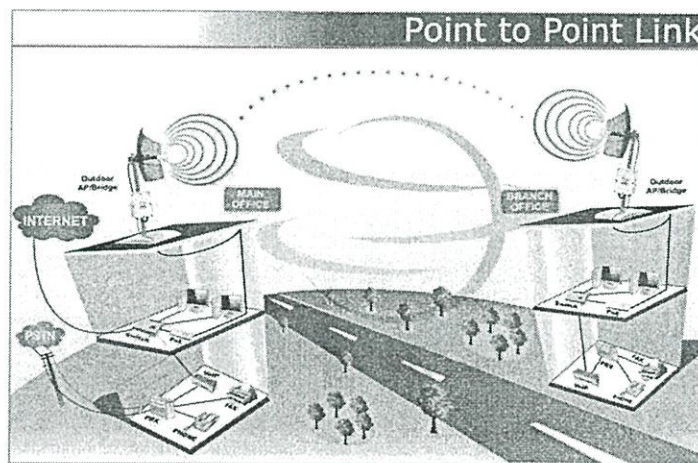
ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น สำหรับการสื่อสารไร้สายซึ่งต้องการออกแบบให้สามารถสวิตซ์ลำคลื่นที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และมีอัตราขยายสูงได้ โดยเริ่มทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ส่งผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากนั้นทำการจำลองสายอากาศต้นแบบโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio และทำการปรับปรุงคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการ เมื่อได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสมจึงทำการสร้างสายอากาศ และประกอบรวมกับวงจรเพื่อทำให้สายอากาศสามารถสวิตซ์ลำคลื่นได้ จากนั้นทำการทดสอบสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic Chamber) ทำการบันทึกผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองและเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงสายอากาศ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของระบบ WLAN ความถี่ 2.4 GHz มาตรฐานที่ใช้งานของระบบ ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศแถวลำดับ การจัดวางขององค์ประกอบแถวลำดับ รวมถึงระบบสายอากาศสวิตซ์ลำดับ

2.2 เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN)



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยี WLAN [1]

จากรูปที่ 2.1 แสดงการเชื่อมต่อ WLAN แบบ Point to Point ระหว่าง 2 สำนักงานที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกัน โดยทางด้านส่งจะส่งข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุ โดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณ ปัจจุบันเทคโนโลยีเครือข่าย LAN แบบไร้สาย หรือ WLAN (Wireless LAN) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากประโยชน์ของ WLAN มีอยู่มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง WLAN สร้างความสะดวกและอิสระในการใช้งานและติดตั้งเครือข่าย ทำให้การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในบ้านหรือสำนักงานเข้าด้วยกันหรือต่อเข้ากับเครือข่ายไม่จำเป็นจะต้องใช้สายนำสัญญาณให้เกิดความยุ่งยาก อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั้งแบบตั้งโต๊ะและพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายจากตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณได้อย่างอิสระ

เทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ผ่านสื่อไร้สายที่รู้จักกันมีอยู่หลายเทคโนโลยี เช่น Bluetooth IEEE 802.11 IrDA HiperLAN HomeRF และ GPRS เป็นต้น แต่เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับ WLAN คือเทคโนโลยีตามมาตรฐาน IEEE 802.11 เนื่องจากอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN มีราคาไม่แพงนักและถูกลงเรื่อยๆ อีกทั้งมีสมรรถนะในการรับส่งข้อมูลค่อนข้างสูง ง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน IEEE 802.11 WLAN ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ และมีแนวโน้มว่าในอนาคตอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่างๆ จะมีอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ติดตั้งจากโรงงานหรือ Built-in มาด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ความง่ายและสะดวกต่อการติดตั้งและใช้งานของอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ก็นำมาซึ่งความไม่ปลอดภัยของเครือข่ายด้วยเช่นกัน อีกทั้งเทคโนโลยี IEEE 802.11 WLAN อยู่ในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น ทำให้ยังมีช่องโหว่ด้านความปลอดภัยอีกมาก ดังนั้นผู้ที่เลือกใช้ IEEE 802.11 WLAN ควรมีความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีและตระหนักถึงช่องโหว่ต่างๆ รวมถึงการรักษาความปลอดภัยอย่างเหมาะสม ซึ่งบทความนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11 รวมถึงช่องโหว่และการรักษาความปลอดภัยสำหรับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN

2.3 ประวัติและมาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN

2.3.1 ประวัติของเทคโนโลยี WLAN

มาตรฐาน IEEE 802.11 หรือ WLAN ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ WLAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ WLAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของ PHY Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 Mbps 2 Mbps 5.5 Mbps 11 Mbps และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่สาธารณะ 2.4 GHz 5 GHz และ อินฟราเรด (1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่าย LAN แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบผู้ใช้ ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy)

เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้นได้แก่ IEEE 802.11 IEEE 802.11b IEEE 802.11e IEEE 802.11g และ IEEE 802.11i

2.3.2 มาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN

▪ IEEE 802.11b

ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial-Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น บลูทูธ โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ IEEE 802.11 หรือ WLAN ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b นี้และใช้เครื่องหมายการค้าที่รู้จักกันดีในนาม Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatability Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่น ๆ ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้

▪ IEEE 802.11a

ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้ สาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ที่มีขนาดประมาณ 100 เมตร สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b WLAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b WLAN มาก

- IEEE 802.11g

ได้นำเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้ (Backward Compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด ตามแผนการแล้วมาตรฐาน IEEE 802.11g ได้รับการตีพิมพ์ประมาณช่วงกลางปี พ.ศ. 2546

- IEEE 802.11e

ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ QoS สำหรับการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับมัลติมีเดีย เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

- IEEE 802.11i

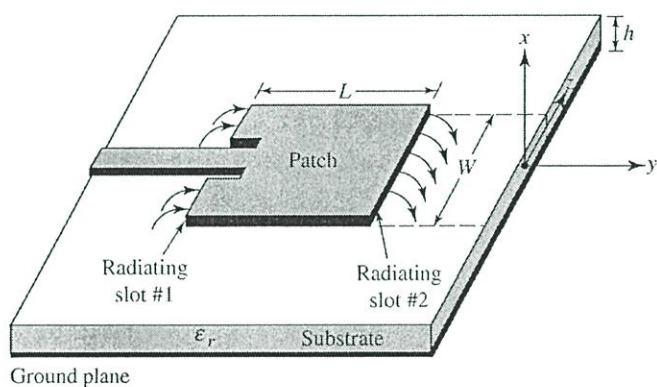
ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN มีช่องโหว่อยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูลด้วยคีย์ที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลง ขณะทำงานชุด IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

2.4 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริป (Microstrip Patch) และลักษณะการป้อนของสัญญาณสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นระนาบ (Patch) และระนาบกราวด์แบบช่องเปิดมีหลายลักษณะ เช่น วงกลม แผ่นวงรี แผ่นสี่เหลี่ยม แผ่นห้าเหลี่ยมด้านเท่า และแผ่นวงแหวน เป็นต้น ส่วนการป้อนสัญญาณของไมโครสตริปสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือการป้อนสัญญาณแบบตรงกลาง และการป้อนสัญญาณแบบเยื้องจากตรงกลาง

ส่วนโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่าแผ่นระนาบกราวด์ (Ground Plane) และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณลายวงจหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นวงจรมิมพ์ โดยมีไดอิเล็กทริก (Dielectric Substrate) อยู่ตรงกลาง ตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงซึ่งความหนาของทองแดง (t) ประมาณ 0.01778 mm ถึง 0.03556 mm ส่วนความหนาของวัสดุฐานรอง (h)

มีหลายขนาดแต่ที่นิยมนำมาออกแบบคือ 0.8 มิลลิเมตร 1.6 มิลลิเมตร เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุฐานรองแสดงด้วยสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือ ϵ_r และค่าของ Loss Tangent หรือ $\tan \delta$ คือ ระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้า และระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป [2]

โดยที่ W คือ ความกว้างของแผ่นระนาบ
 L คือ ความยาวของแผ่นระนาบ
 h คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง
 ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์

2.4.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟแบบอื่นๆ โดยสายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 50 GHz ซึ่งข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดของสายอากาศไมโครสตริปมีดังนี้

- น้ำหนักเบา (light weight), ขนาดเล็ก (low volume)
- สามารถผลิตได้ง่าย และราคาถูก (low fabrication cost)
- สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ทั้งแบบเส้นตรง และแบบวงกลม
- สามารถป้อนสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ได้พร้อม ๆ กับการสร้างสายอากาศ
- สามารถสร้างเป็นสายอากาศแถวลำดับ (Array) ได้ง่าย

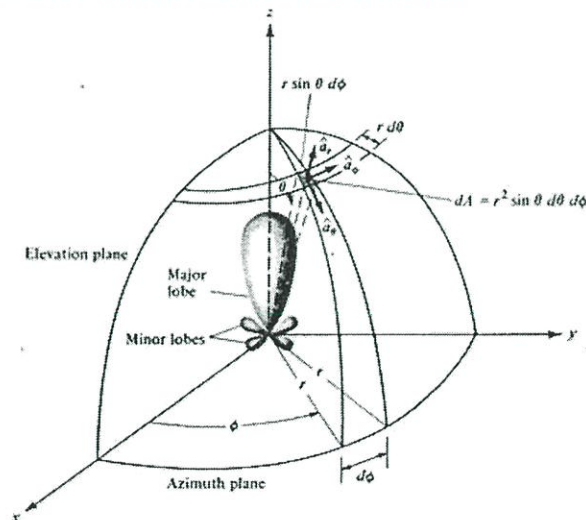
ข้อเสียที่เห็นได้ชัดของสายอากาศไมโครสตริป

- มีอัตราขยายค่อนข้างต่ำ
- มีช่วงความถี่ที่ไ้รับและส่งสัญญาณแคบเกินไป (narrow bandwidth)
- มีการสูญเสียมาก โดยมักเกิดจากการสูญเสียที่จุดต่อ และจุดป้อนสัญญาณ
- มีการแพร่กระจายคลื่นต่ำ คือมีการแผ่พลังงานได้เพียงครึ่งระบบ
- สายอากาศอาจเกิดออกไซด์บริเวณผิว ทำให้มีการสูญเสียมากขึ้น
- ต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อรักษาคุณสมบัติของสารที่ใช้ทำสายอากาศ

2.5 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ

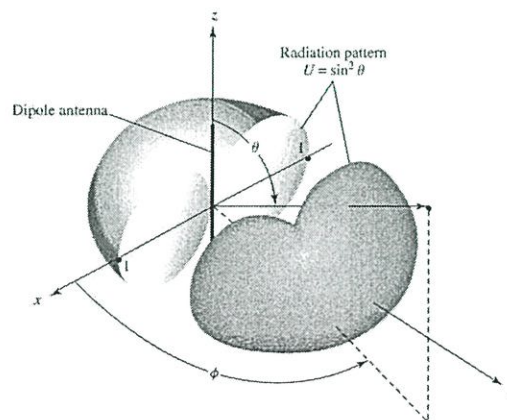
2.5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) ได้ถูกนิยามว่า “เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งแสดงในรูปพิกัดตำแหน่ง (Space Coordinate) ในการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (Directional Coordinate) เสมอ” คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สามารถที่จะแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 2.3 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ [3]

จากรูปที่ 2.3 เส้นการกวาดของกำลังงานที่รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Field Pattern) และอีกวิธีหนึ่ง ถ้าเป็นแบบรูปที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่ง เราจะเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (Amplitude Field Pattern) ในทางปฏิบัตินั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ จะถูกวัดและบันทึกในรูปของแบบรูปสองมิติโดยการพล็อตแบบรูปตามฟังก์ชันของมุม θ และ ϕ ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกันแบบรูปแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) แบบมีทิศทาง (Direction) และแบบรอบทิศทาง ในระนาบเดียว (Omni-direction) ตัวแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ “สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่มีมีการสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่กำลังออกมาเท่ากันทุกทิศทาง” ถึงแม้ว่าตัวแผ่กำลังงานแบบนี้จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีอยู่จริง สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ “สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ” ซึ่งคำนี้มักจะนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave Dipole) ซึ่งตัวอย่างของสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) นั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะไม่มีทิศทาง แต่ส่วนที่มีทิศทางจะอยู่ในระนาบมุมยก (Elevation Plane) ซึ่งเราเรียกแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้ว่าเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-directional Pattern) โดยมีนิยามว่า “เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่ กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมกวาด (Azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบมีทิศทาง ในกรณีนี้คือมุมเงย (Elevation)



รูปที่ 2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว [3]

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายกำลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแพร่กระจายคลื่น” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ในทางปฏิบัติแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกต้องควรจะต้องจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

2.5.2 อัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่ได้รับเข้ามา
2. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

2.5.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศการสูญเสียต่างๆหาได้จาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมชซิ่งกันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
2. การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน

ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.1)

$$e_r = e_r e_c e_d \quad (2.1)$$

- e_r คือ ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ
 $e_r = (1 - |\Gamma|^2)$ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตซ์ซึ่งกัน
 e_c คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ
 e_d คือ ประสิทธิภาพของฉนวน (Dielectric)

โดยทั่วไป e_c และ e_d จะรวมเป็นตัวเดียวกันตามสมการที่ (2.2)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.2)$$

R_r ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

R_L ความต้านทานที่โหลด

2.5.4 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio)

อัตราส่วนระหว่างแรงดันค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่งเรียกว่า อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ดังสมการที่ (2.3)

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.3)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.4)$$

Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage Reflection Coefficients) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน ยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.4)

V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ

V_i คือ แรงดันตกกระทบ

Z_L คือ โหลดอิมพีแดนซ์

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในกรณีที่ต่อไว้ด้วยแมตซ์ซึ่งโหลดนั่นค่า VSWR เป็น 1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด

2.5.5 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.5 ของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตช์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ โดยการสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)



รูปที่ 2.5 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) [4]

จากรูป P_i คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต
 P_r คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ
 P_o คือ กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต

$$S_{11} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (dB) \quad (2.5)$$

สำหรับการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าความสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าความสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด

2.5.6 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย VSWR $\cong 2$ หรือ พิจารณาจากการสูญเสียย้อนกลับ $|S_{11}|$ ที่ระดับ -10 dB ดังสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7)

$$BW_{narrowband} (\%) = \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100 \quad (2.6)$$

$$BW_{broadband} (\%) = \frac{f_u}{f_l} \times 100 \quad (2.7)$$

เมื่อ BW คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

- f_u คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่
 f_l คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่
 f_c คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

2.6 สายอากาศแถวลำดับ (array antenna)

จากการศึกษา วิเคราะห์และอภิปรายคุณสมบัติของการแผ่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งโดยปกติมีความกว้างลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานค่อนข้างกว้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางต่ำ (มีอัตราขยายต่ำ) แต่ในงานหลาย ๆ อย่างต้องการใช้สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ค่อนข้างสูง (อัตราขยายที่ค่อนข้างสูง) เพื่อที่จะทำให้การสื่อสารใช้ได้ในระยะไกลมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มสภาพเจาะจงทิศทางนี้สามารถทำได้โดยเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า (Electrical Size) ของสายอากาศ

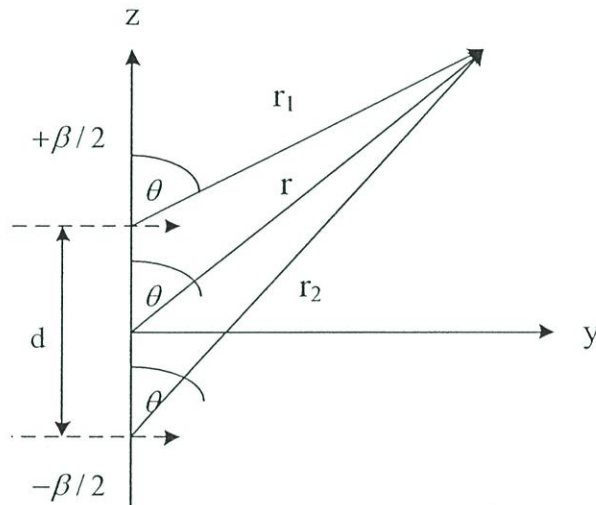
การเพิ่มขนาดของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นที่จะเพิ่มขนาดของสายอากาศ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งทำได้โดยจัดองค์ประกอบที่แผ่พลังงานให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง เมื่อสายอากาศถูกจัดตั้งกล่าวจะเรียกว่า แถวลำดับ (Array) ส่วนใหญ่แล้วจะเลือกให้แต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับจะเหมือนกัน แต่ในความเป็นจริงก็ไม่จำเป็นต้องเหมือนกันแต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ออกแบบ และง่ายต่อการนำไปใช้ โดยองค์ประกอบดังกล่าวจะเป็นรูปแบบสายอากาศใด ๆ ก็ได้ (เส้นลวด อะพอเจอร์ ไมโครสตริป)

สนามรวมของแถวลำดับจะคำนวณจากการรวมเวกเตอร์ของสนามการแผ่พลังงานขององค์ประกอบเดี่ยว โดยสมมติว่ากระแสในแต่ละองค์ประกอบเหมือนกันและไม่เกี่ยวข้องกัน (ไม่เกิดการคัปปลิง Coupling) เพื่อที่จะให้เกิดสภาพเจาะจงทิศทางมากขึ้น การหาสนามรวมของแถวลำดับทำได้โดยการบวกเวกเตอร์ของสนามที่แผ่กระจายจากแต่ละองค์ประกอบ จะต้องเสริมกันที่ทิศทางที่ต้องการและหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการ มีปัจจัยอย่างน้อย 5 ประการด้วยกันที่จะควบคุมรูปร่างของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ดังต่อไปนี้คือ

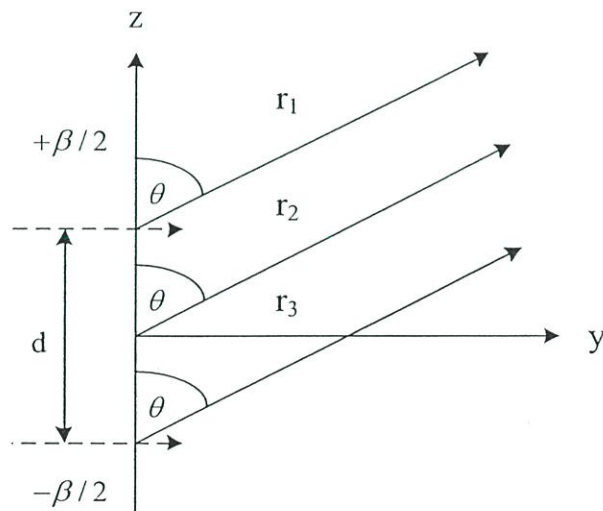
1. การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับ (เป็นเส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม ทรงกลมฯ)
2. ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ
4. เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ
5. แบบรูปของแต่ละองค์ประกอบ

2.7 แฉวลำดับสององค์ประกอบ

สมมติว่าสายอากาศที่สนใจเป็นสายอากาศไดโพลจิว 2 ตัว วางตามแนวนอนและเรียงตามแกน z ดังแสดงในรูป 2.6 และสมมติว่าไม่มีคัปปลิ่งระหว่างสายอากาศทั้งสอง ดังนั้นสนามที่แผ่พลังงานออกมาจากสายอากาศจิวทั้งสองจะเกิดจากผลรวมของสนามจากสายอากาศทั้งสองในระนาบ $y-z$ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้



(ก) ไดโพลจิว



(ข) จุดสังเกตที่สนามระยะไกล

รูปที่ 2.6 การจัดวางแฉวลำดับสององค์ประกอบ ที่วางตามแนวแกน z [3]

$$E_t = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j \eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 + (\beta/2)]}}{r_2} \cos \theta_2 \right\} \quad (2.8)$$

เมื่อ β คือ ความต่างเฟสระหว่างกระแสที่ใช้กระตุ้นขององค์ประกอบทั้งสอง โดยขนาดของการกระตุ้นทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งสนามระยะไกลแสดงดังรูปที่ (2.6 ข) และมีค่าดังนี้

$$\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta \quad (2.9 ก)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &\approx r - \frac{d}{2} \cos \theta \\ r_2 &\approx r + \frac{d}{2} \cos \theta \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{สำหรับการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลง} \\ \text{ของเฟส} \end{array} \quad (2.9 ข)$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r \quad (2.9 ค)$$

แทนค่าสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.8) จะลดลงเหลือ

$$E_t = \hat{a}_\theta j \eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \left\{ e^{+j(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)/2} \right\} \quad (2.10)$$

$$E_t = \hat{a}_\theta j \eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \left\{ 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \right\}$$

จากการสังเกตที่สมการ (2.10) จะเห็นได้ว่าสนามรวมของแวลลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางในตำแหน่งจุดกำเนิดคูณกับตัวประกอบตัวหนึ่งที่อยู่จกกันในเรื่อง ตัวประกอบแวลลำดับ (Array Factor: AF) ดังนั้นสำหรับแวลลำดับทั้งสององค์ประกอบจะมีตัวประกอบแวลลำดับ (AF) คือ

$$AF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (2.11)$$

ซึ่งนอร์แมลไรซ์แล้วจะได้

$$(AF)_n = \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (2.11 ก)$$

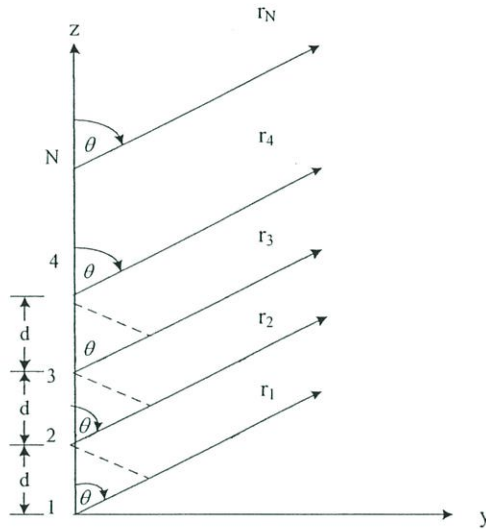
ตัวประกอบแวลลำดับเป็นฟังก์ชันของการจัดวางของแวลลำดับและเฟสที่กระตุ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่าง d และหรือเฟส β ระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง เราจะสามารถควบคุมคุณลักษณะของตัวประกอบแวลลำดับและสนามรวมของแวลลำดับได้

จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า สนามของแวลลำดับที่สนามระยะไกลขององค์ประกอบสองตัวที่มีลักษณะเหมือนกันจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของสนามขององค์ประกอบตัวเดี่ยวที่จุดอ้างอิง (ปกติที่จุดกำเนิด) กับตัวประกอบแวลลำดับของแวลลำดับ นั่นคือ

$$E(\text{total}) = [E(\text{single element at frequency point})] \times [\text{array factor}] \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) จะเรียกว่า การคูณแบบรูป (Pattern Multiplication) สำหรับแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน

2.8 แถวลำดับเชิงเส้นจำนวน N ตัว: ขนาดและระยะเสมอ



รูปที่ 2.7 การหาสนามระยะไกลของแถวลำดับองค์ประกอบ N ตัวที่มีองค์ประกอบเป็นไอโซทรอปิกวางตามแนวแกน Z [3]

แถวลำดับที่มีองค์ประกอบเหมือนกันทั้งหมดซึ่งมีขนาดเท่ากันและมีเฟสที่เพิ่มขึ้นจะเรียกการจัดเรียงแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบสม่ำเสมอ (Uniform Array) องค์ประกอบแถวลำดับที่ใช้ในการพิจารณาจะเป็นแหล่งจ่ายแบบจุดหรือไอโซทรอปิกแต่ละสนามรวมสามารถหาได้จากผลคูณของตัวประกอบแถวลำดับของแหล่งจ่ายไอโซทรอปิกกับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวขององค์ประกอบจริงโดยใช้สมการที่ (2.12) ตัวประกอบแถวลำดับกำหนดให้เป็น

$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)}$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.13)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.14)$$

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \quad (2.14 \text{ ก})$$

เนื่องจากตัวประกอบแถวลำดับรวมของแถวลำดับแบบสมมาตรเป็นผลรวมของเอ็กโปเนนเชียล โดยแสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์จากเฟสเซอร์จำนวน N ตัว ที่มีขนาดหนึ่งหน่วย และมีเฟสเพิ่มขึ้น ψ เมื่อเทียบกับตัวก่อน ตัวประกอบแถวลำดับในสมการที่ (2.14) สามารถแสดงในรูปแบบอื่นได้ เพื่อให้ง่าย สะดวก โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{คุณสมบัติ (2.14) ทั้งสองข้างด้วย } e^{j\psi} \text{ โดย} \\ (\text{AF})e^{jN\psi} = e^{j\psi} + e^{2j\psi} + e^{3j\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} + e^{jN\psi} \quad (2.15)$$

ลบสมการที่ (2.14) จากสมการที่ (2.15) จะเหลือ

$$\text{AF}(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.16)$$

ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{AF} = \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] = e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right] = e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.17)$$

ถ้าจุดอ้างอิงอยู่ตรงกลางของแถวลำดับ ตัวประกอบแถวลำดับจะลดเหลือ

$$\text{AF} = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.17 \text{ ก})$$

เมื่อขนาดของ ψ มีขนาดเล็ก สมการข้างต้นจะประมาณได้เป็น

$$\text{AF} \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{\psi}{2}} \right] \quad (2.17 \text{ ข})$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.17 ก) หรือ (2.17 ข) มีค่าเท่ากับ N ทำการนอร์มัลไลซ์ตัวประกอบแถวลำดับ โดยการหาค่าสูงสุดเพื่อที่จะทำให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง สมการที่ (2.17 ก) และ (2.17 ข) นอร์มัลไลซ์ได้เป็น

$$(\text{AF})_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.17 \text{ ค})$$

และประมาณค่าได้เป็น

$$(AF)_n \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.17 \text{ ง})$$

ในการหาค่าของแอมพลิจูดโดยเขตสมการที่ (2.17 ค) หรือ (2.17 ง) ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right) = 0 \Rightarrow \frac{N}{2}\psi|_{\theta=\theta_n} = \pm n\pi \Rightarrow \theta_n = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2n}{N}\pi\right)\right] \quad (2.18)$$

$n=1, 2, 3, \dots$ และ $n \neq N, 2N, 3N, \dots$ สำหรับสมการที่ (2.17 ค)

ในกรณีของ $n = N, 2N, 3N, \dots$ จะเกิดค่าสูงสุดเพราะสมการจะลดเหลือในรูปของ $\sin(0)/0$ ค่าของ n ใช้สำหรับคำนวณอันดับของนัล (อันดับที่หนึ่ง สอง สาม ไปเรื่อยๆ) กรณีที่มีค่าเท่ากับศูนย์การหาค่าอาร์คโคไซน์ (\cos^{-1}) ก็ต้องมีค่าไม่เกินหนึ่ง ดังนั้นจำนวนของนัลที่เกิดขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะระหว่างองค์ประกอบ d และเฟสที่ใช้กระตุ้นที่แตกต่างกัน β ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.17 ค) จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{2} &= \frac{1}{2}(kd \cos\theta + \beta)|_{\theta=\theta_m} = \pm m\pi \\ \Rightarrow \theta_m &= \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm 2m\pi)\right], m=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2.19)$$

ตัวประกอบแอมพลิจูดของสมการที่ (2.17 ค) มีค่าสูงสุดเพียงค่าเดียวและเกิดขึ้นเมื่อ $m=0$ ในสมการที่ (2.19)

$$\theta_m = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda\beta}{2\pi d}\right] \quad (2.20)$$

ซึ่งมุมจากจุดสังเกตนั้นคือ $\psi = 0^\circ$

จุดที่ 3-dB สำหรับตัวประกอบแอมพลิจูดของสมการที่ (2.17 ค) เกิดเมื่อ

$$\begin{aligned} \frac{N}{2}\psi &= \frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)|_{\theta=\theta_h} = \pm 1.391 \\ \Rightarrow \theta_h &= \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$\theta_h = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \quad (2.21 \text{ ก})$$

สำหรับค่าของ d ($d \approx \lambda$) ขนาดใหญ่ สมการจะลดลงเหลือ

$$\theta_h \approx \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d} \left(-\beta \pm \frac{2.782}{N} \right) \right] \quad (2.21 \text{ ข})$$

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) Θ_h สามารถหาได้จากมุมสูงสุดมุมแรก (θ_m) และที่จุดครึ่งกำลัง (θ_h) นำมาคำนวณ สำหรับแบบรูปที่สมมาตร

$$\Theta_h = 2|\theta_m - \theta_h| \quad (2.21 \text{ ค})$$

สำหรับตัวประกอบแถวลำดับในสมการที่ (2.21 ค) จะเกิดสูงสุดสองจุด ซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการที่ (2.17 ค) นั่นคือ

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{N}{2}\psi\right) &= \sin\left[\frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)\right]_{\theta=\theta_s} \approx \pm 1 \Rightarrow \frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)_{\theta=\theta_s} \\ &\approx \pm \left(\frac{2s+1}{s}\right)\pi \Rightarrow \theta_s \approx \cos^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]\right\}, s=1,2,3,\dots \end{aligned} \quad (2.22)$$

และยังสามารถเขียนได้เป็น

$$\theta_s \approx \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]\right\}, s=1,2,3,\dots \quad (2.23)$$

กรณีค่าของ d ($d \gg \lambda$) ขนาดใหญ่ สมการจะลดลงเหลือ

$$\theta_s \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right], s=1,2,3,\dots \quad (2.23 \text{ ก})$$

ค่าสูงสุดของลำคลื่นย่อยแรกจากสมการที่ (2.17 ค) สามารถประมาณได้ดังนี้

$$\frac{N}{2}\psi = \frac{N}{2}(kd \cos\theta + \beta)_{\theta=\theta_s} \approx \pm \left(\frac{3\pi}{2}\right) \quad (2.24)$$

$$\text{เมื่อ } \theta_s \approx \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{3\pi}{2}\right)\right] \quad (2.24 \text{ ก})$$

ขนาดของสมการที่ (2.17 ง) จะลดลงเหลือ

$$(AF)_n \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right]_{\theta=\theta_s} = \frac{2}{3\pi} = 0.212 \quad (2.25)$$

ซึ่งมีค่าในหน่วย dB คือ

$$(AF)_n = 20\log_{10}\left(\frac{2}{3\pi}\right) = -13.46 \text{ dB} \quad (2.25 \text{ ก})$$

จะพบว่าค่าสูงสุดของลำคลื่นย่อยแรกของตัวประกอบแถวลำดับจากสมการที่ (2.17 ง) มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดของลำคลื่นหลักอยู่ที่ 13.46 dB

2.8.1 แกลวลำดับแบบบรอดไซด์

แกลวลำดับแบบบรอดไซด์มีการแผ่คลื่นแรงที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของแกลวลำดับจากสมการที่ (2.17 ค) หรือ (2.17 ง) ค่าสูงสุดแรกของตัวประกอบเกิดขึ้นเมื่อ

$$\psi = kd \cos \theta + \beta = 0 \quad (2.26)$$

เนื่องจากเราต้องการค่าสูงสุด ค่าแรกในทิศทาง $\theta_0 = 90^\circ$ ดังนั้น

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Big|_{\theta=90^\circ} = \beta = 0 \quad (2.27)$$

ดังนั้น จะให้เกิดค่าสูงสุดของตัวประกอบแกลวลำดับสำหรับแกลวลำดับเชิงเส้นสม่ำเสมอในทิศทางบรอดไซด์ในแนวตามแกนของแกลวลำดับ จะต้องให้องค์ประกอบทั้งหมดมีเฟสเดียวกัน (นอกจากนั้นขนาดต้องเท่ากันด้วย) โดยระยะห่างระหว่างองค์ประกอบจะมีค่าเท่าใดก็ได้ เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าไม่มีค่าสูงสุดปรากฏในทิศทางอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า ลำคลื่นเกรตติง (Grating lobes) ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบต้องมีค่าไม่เท่ากับจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ($d \neq n\lambda, n=0,1,2,\dots$) เมื่อ $\beta=0^\circ$ ถ้า $d = n\lambda, n=0,1,2,\dots$ และ $\beta=0^\circ$ ดังนั้น

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Big|_{\substack{\beta=0 \\ n=1,2,3,\dots}}^{d=n\lambda} = 2\pi n \cos \theta \Big|_{\theta=0^\circ, 180^\circ} = \pm 2n\pi \quad (2.28)$$

ค่าของ ψ ที่ได้เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.17 ค) จะทำให้ตัวประกอบแกลวลำดับเกิดค่าสูงสุด ดังนั้น สำหรับแกลวลำดับสม่ำเสมอเมื่อ $\beta=0^\circ$ และ $d = n\lambda$ นอกจากตัวประกอบแกลวลำดับจะเกิดค่าสูงสุดในทิศทางบรอดไซด์ ($\theta=90^\circ$) ตามแนวแกนของแกลวลำดับแล้ว ยังมีค่าสูงสุดตามแนวแกนของแกลวลำดับ ($\theta_0 = 0^\circ, 180^\circ$ ก็คือ การแผ่พลังงานแบบเอนด์ไฟร์ (End-fire radiation)

2.8.2 แกลวลำดับแบบเอนด์ไฟร์

แกลวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ที่มีการแผ่คลื่นแรงที่สุดในทิศแนวแกนของแกลวลำดับ ซึ่งอาจเกิดตามแนวทิศทาง $\theta_0 = 0^\circ$ หรือ $\theta_0 = 180^\circ$ เพื่อให้เกิดค่าสูงสุดค่าแรกพุ่งไปในทิศทาง $\theta_0 = 0^\circ$

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Big|_{\theta=0^\circ} = kd + \beta = 0 \Rightarrow \beta = -kd \quad (2.29 ก)$$

ถ้าต้องการให้เกิดค่าสูงสุดค่าแรกพุ่งไปในทิศทาง $\theta_0 = 180^\circ$ ดังนั้น

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Big|_{\theta=180^\circ} = -kd + \beta = 0 \Rightarrow \beta = kd \quad (2.29 ข)$$

ดังนั้น การแผ่พลังงานจะออกในทิศทางเอนด์ไฟร์ ก็ต่อเมื่อ $\beta = -kd$ (สำหรับ $\theta_0 = 0^\circ$) หรือ $\beta = kd$ (สำหรับ $\theta_0 = 180^\circ$) ถ้าแต่ละองค์ประกอบวางห่างกันด้วยระยะ $d = \lambda/2$ การแผ่พลังงานเอนด์ไฟร์จะออกทั้งสองทิศทาง ($\theta_0 = 0^\circ$ และ 180°) ถ้าระยะห่างมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ($d = n\lambda, n=1,2,3,\dots$) ดังนั้น ทิศทางของแบบรูปสูงสุดจะเกิดที่มุมทั้งสองนอกจากนี้ยังมีค่าสูงสุดที่มุมบรอดไซด์ด้วย ดังนั้น กรณีของ $d = n\lambda, n=1,2,3,\dots$ จะเกิดจุดสูงสุดสี่ทิศทาง โดยทั้งสองทิศทางไปตาม

แนวบรอดไซด์และอีกสองทิศทางไปตามแนวแกนของแถวลำดับ เพื่อที่จะให้เกิดมุมสูงสุดระหว่างองค์ประกอบที่มากที่สุดต้องน้อยกว่า $\lambda/2 (d_{\max} < \lambda/2)$

2.8.3 แถวลำดับปรับเฟส

สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสจะแผ่คลื่นที่มีค่าสูงสุดในทิศทาง θ_0 ใดๆ ด้วยการปรับเฟสระหว่างองค์ประกอบจะต้องมีค่าเป็น

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Big|_{\theta=\theta_0} = -kd \cos \theta_0 + \beta = 0 \Rightarrow \beta = -kd \cos \theta_0 \quad (2.30)$$

ดังนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมเฟสที่แตกต่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบ การแผ่พลังงานสูงสุดจะเอียงไปตามทิศทางใดๆ ที่ต้องการตามที่ต้องการได้

2.9 การจัดวางองค์ประกอบของแถวลำดับ

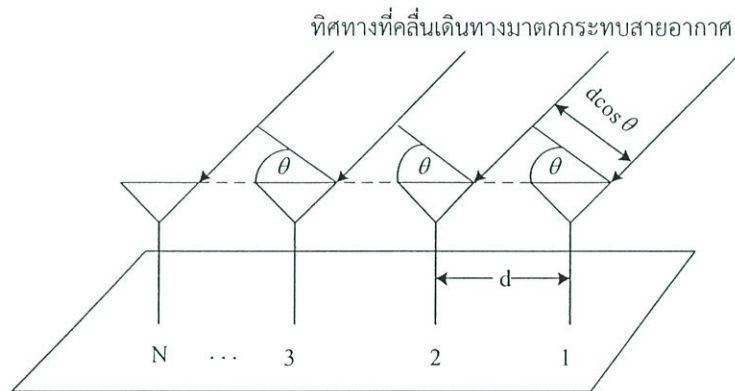
สายอากาศแถวลำดับ เป็นการนำเอาสายอากาศมาวางเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ โดยอาจมีการป้อนสัญญาณเข้าที่สายอากาศตัวเดียวหรือหลายตัวเพื่อแผ่กระจายคลื่นออกไป ระบบสายอากาศแก่งจำเป็นต้องใช้สายอากาศในรูปแถวลำดับเท่านั้น จึงจะสามารถหันทุคลื่นหลัก (Main Lobe) ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ (Nulls) และพुरอง (Side Lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดด้วยกระบวนการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละตัว สายอากาศแถวลำดับมีการวางตัวในหลายรูปแบบ เช่น แบบเชิงเส้นและแบบระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array Antenna) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีโครงสร้างเรียบง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศหลายตัว แต่ละตัววางเรียงกันเป็นเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.8 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ตัวหรือ $N \times 1$ ในการวางตัวสายอากาศแถวลำดับจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละตัวนั้นมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.31)

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.31)$$

ถ้าสมมุติให้สายอากาศทุกตัวมีระยะห่างจากตัวข้างๆเท่ากัน และมีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่สายอากาศแต่ละตัวที่ถัดมาจากตัวที่ 1 หรือตัวอ้างอิงจะมีเฟสมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวก่อนหน้าดังแสดงตามรูปที่ 2.8 ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (Uniform Array) เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศ

ตัวเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 4×1 [5]

$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.32)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.33)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.34)$$

เมื่อ $\psi = kd \cos \theta + \beta$ k คือ หมายเลขคลื่น (Wave Number) $= \frac{2\pi}{\lambda}$ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวและ β คือ ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละตัว จากสมการ (2.34) เราสามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$(AF)e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j\psi(N-1)} + e^{jN\psi} \quad (2.35)$$

แทนสมการ (2.34) ลงใน (2.35) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

$$(AF)(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.36)$$

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$AF = \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.37)$$

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นระยะห่างของสายอากาศ $d=0$ และ $\beta=0$ ดังนั้น $\psi = kd \cos\theta + \beta = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.37) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.38)$$

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมากๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

$$AF \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{\psi}{2}} \right] \quad (2.39)$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.38) และ (2.39) จะมีค่าเท่ากับ N เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเป็นมาตรฐานเราจึงต้องกำหนดให้ค่าสูงสุดของแต่ละสมการเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสมการมาตรฐานของตัวประกอบแถวลำดับคือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.40)$$

หรือ

$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.41)$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบค่าตัวประกอบแถวลำดับเราจะสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$E(\text{total}) = [E(\text{single element at frequency point})] \times [\text{array factor}] \quad (2.42)$$

2.10 สายอากาศฉลาด

สายอากาศฉลาด (Smart Antenna) ได้เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมาแต่เดิมระบบสายอากาศฉลาดได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับงานสื่อสารไร้สายจนเป็นที่นิยม ซึ่งระบบสายอากาศฉลาดจะประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลายๆต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆกัน ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและทางตำแหน่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สาย เช่น

1. เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้น และทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น
2. เนื่องจากระบบสายอากาศฉลาดจะหันพู่หลักไปเฉพาะในทิศทางที่ต้องการเท่านั้นจึงไม่เสียพลังงานไปในทิศทางอื่น ทำให้ประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
3. ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น
4. ลดสัญญาณแทรกสอด

ระบบสายอากาศประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับและชุดประมวลผลสัญญาณ ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่นของพู่หลักไปยังทิศทางสัญญาณที่ต้องการในขณะที่หันจุดศูนย์หรือพูรองไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหันลำคลื่น สามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.9 จากรูป D คือความต่างเฟสของสัญญาณที่มากกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ w คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ θ_d และ θ_i คือมุมที่มากกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกคือ

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.43)$$

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นจะได้

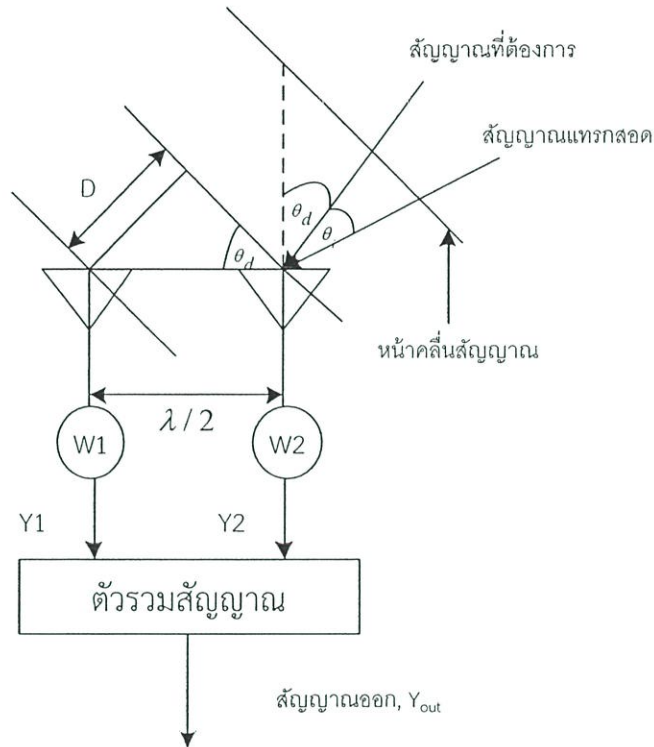
$$y_{2d} = A \quad (2.44)$$

$$y_{2i} = A \quad (2.45)$$

$$y_{id} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.46)$$

$$y_{ii} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.47)$$

เมื่อ y_{id} y_{ii} y_{2d} และ y_{2i} คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 และ สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 ตามลำดับนั้น



รูปที่ 2.9 ระบบสายอากาศผลัดเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ [5]

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2(A_d + A_i) \quad (2.48)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.49)$$

แทนค่าในสมการที่ (2.48) และ (2.49) ลงในสมการ (2.43) จะได้

$$y_{out} = A_i(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) + A_d(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) \quad (2.50)$$

เราต้องการพจน์ของ A_i เท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ A_d เท่ากับ A_d เพื่อยังคงรักษาสัญญาณที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นต้องทำให้

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 0 \quad (2.51)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 1 \quad (2.52)$$

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.51) เราจะได้

$$w_2 = -w_1 e^{j\theta_d} \quad (2.53)$$

แทนสมการที่ (2.53) ลงใน (2.52) จะได้

$$-w_1 e^{j\theta_d} + w_1 e^{j\theta_i} = 1 \quad (2.54)$$

$$w_1(e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}) = 1 \quad (2.55)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศต้นที่ 1 เท่ากับ

$$w_1 = \frac{1}{(e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i})} \quad (2.56)$$

เช่นเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.53) เราจะได้

$$w_1 = \frac{-w_2}{e^{j\theta_i}} \quad (2.57)$$

แทนสมการที่ (2.51) ลงใน (2.52) จะได้

$$w_2 - \frac{w_2 e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} = 1 \quad (2.58)$$

$$w_2 \left(1 - \frac{e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \quad (2.59)$$

$$w_2 \left(\frac{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \quad (2.60)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 เท่ากับ

$$w_2 = \left(\frac{e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}} \right) \quad (2.61)$$

เมื่อแทนค่าสมการ(2.57) และ (2.61) เข้าไปในสมการที่ (2.43) สุดท้ายเราจะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.62)$$

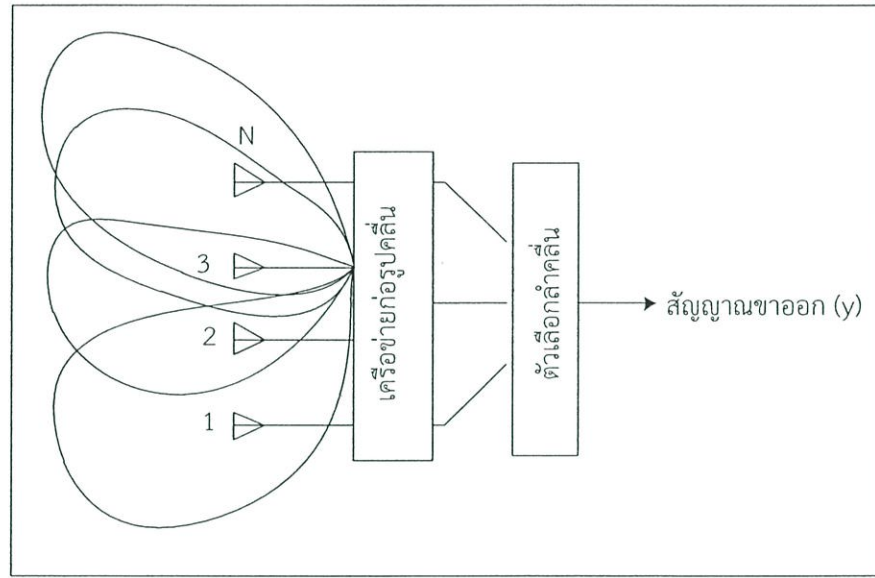
ระบบสายอากาศฉลาดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ ระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น (switched beam antenna systems) และระบบสายอากาศแบบปรับตัว (adaptive antenna systems) ซึ่งขออธิบายเพียงแบบระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นเท่านั้น

2.10.1 ระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น

ระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น (Switched Beam Antenna Systems) ประกอบไปด้วยสายอากาศลำดับแถว โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (Beamforming Network) ซึ่งสามารถสร้างลำคลื่นได้ M ลำคลื่นในเวลาเดียวกัน และตัวเลือกลำคลื่น (Beam Selector) จามที่แสดงในรูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (Weighth,T) สำหรับสัญญาณขาออกที่มีลำคลื่นชี้ไปยังทิศทางที่ m^{th} สามารถแสดงในสมการ (2.63) ดังนี้

$$T_m = [w_{0,m} \ w_{1,m} \ \dots \ w_{N-1,m}] \quad (2.63)$$

เมื่อ $w_{n,m}$ คือค่าถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ n^{th} สำหรับการก่อรูปลำคลื่นในทิศทางที่ m^{th} ซึ่งสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น [5]

$$y = T^{-1}x \quad (2.64)$$

เมื่อ x คือสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์การทำงานของสายอากาศแบบสลับลำดับคลื่นประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ
2. เลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นที่ถูกเลือกไว้อย่างเหมาะสม
3. ใช้ลำคลื่นในทิศทางที่เลือกเมื่อผู้ใช้ไม่มีการเคลื่อนที่
4. สับเปลี่ยนลำคลื่นเดิมไปยังลำคลื่นใหม่เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่นนอกจากนี้การรวมสัญญาณ

ขาออกของสายอากาศหลายๆตัวทำให้สายอากาศแบบปรับลำคลื่นสามารถสร้างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งทำให้ระบบมีทางเลือกของรูปแบบการแผ่พลังงานที่มากกว่าการใช้สายอากาศต้นเดียวและสามารถสรุปข้อดีข้อเสียของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นได้ดังนี้

- ข้อดี
1. มีความซับซ้อนน้อย
 2. สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการปรับเปลี่ยนลำคลื่น
 3. ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

- ข้อเสีย
1. อัตราการขยายสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
 2. การลดจำนวนสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด
 3. ในกรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจน มีการบดบังสัญญาณ มีการแทรกสอดของสัญญาณหรือมีสัญญาณมาถึงในมุมกว้างหลายๆมุม อาจมีความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้

2.11 สรุป

ในบทที่ 2 ได้ทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี WLAN ความถี่ 2.4 GHz ประวัติและมาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN รวมถึงทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริป โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งประกอบด้วยตัวนำ 3 ชั้น คือ แผ่นแพร่กระจายคลื่น วัสดุฐานรอง และ ระบายกราวนด์ อีกทั้งยังศึกษาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย $|S_{11}|$ และ แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ เป็นต้น จากนั้น ทำการศึกษาสายอากาศแถวลำดับและระบบสายอากาศผลัด รวมถึงระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น หลังจากที่ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแล้ว จะทำการออกแบบและจำลอง ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

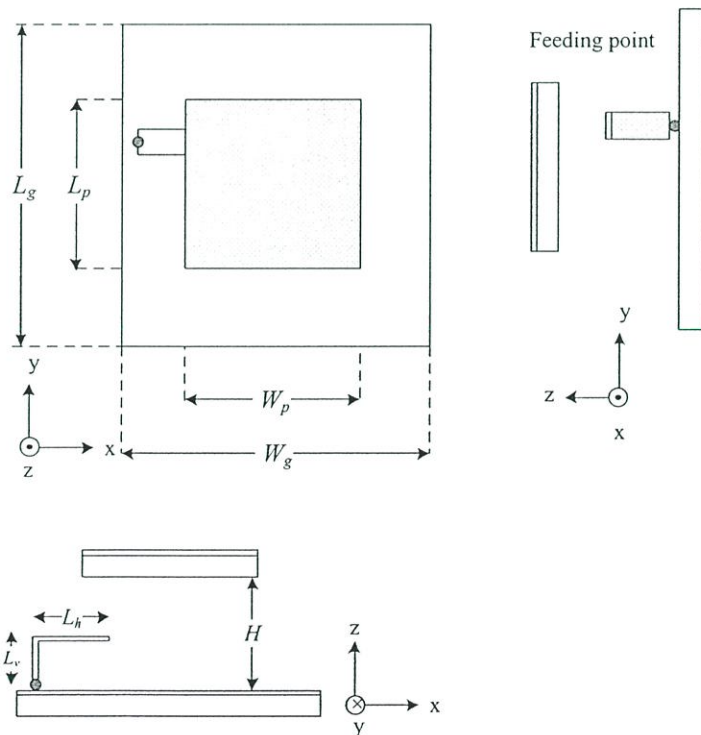
บทที่ 3

การออกแบบและการจำลอง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งข้อดีของสายอากาศไมโครสตริป คือ ราคาถูก น้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด และโครงสร้างไม่ซับซ้อน ในบทนี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยจะเริ่มออกแบบจากการศึกษาสายอากาศไมโครสตริปที่มีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปตัวแอล [7] ทำการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ โดยอ้างอิงจากความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นทำการจำลองผลเพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของสายอากาศ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศที่จะสร้างขึ้น มีการออกแบบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ เพื่อกำหนดโหมดการทำงานของสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดจะนำเสนอต่อหัวข้อต่อไป

3.2 โครงสร้างของสายอากาศ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ สายอากาศถูกสร้างจากแผ่นพิมพ์ FR-4 โดยประกอบด้วยสองชั้น คือตัวสะท้อนคลื่นและแผ่นแพตช์ปรสิติก มีการบ่อนสัญญาณแบบ โพรบรูปตัวแอลสร้างจากทองแดง และใช้ SMA Connector เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับ สายนำสัญญาณ โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
L_g	ความยาวแผ่นระนาบกราวนด์
L_p	ความยาวแผ่นแพตช์
W_g	ความกว้างแผ่นแพตช์
W_p	ความกว้างแผ่นระนาบกราวนด์
L_v	ความสูงโพรบ
L_h	ความกว้างโพรบ
H	ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นแพตช์

3.2.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของสายอากาศ

จากการศึกษาสายอากาศไมโครสตริปที่มีการบ่อนสัญญาณด้วยโพรบรูปตัวแอล[4] ทำให้เราสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์หลักๆของสายอากาศ โดยอ้างอิงจากความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

$$\text{โดยที่ } f = 2.45 \text{ GHz}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 12.24 \text{ cm}$$

จากนั้นทำการคำนวณขนาดของระนาบกราวนด์และขนาดของแผ่นแพตช์

$$\text{โดยที่ } W_g = L_g = \frac{\lambda}{2} \approx 60 \text{ mm}$$

$$W_p = L_p = \frac{\lambda}{4} \approx 30 \text{ mm}$$

ความสูงและความยาวของโพรบรูปตัวแอล [7] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$L_h = 0.15\lambda \approx 18 \text{ mm}$$

$$L_v = 0.10\lambda \approx 12 \text{ cm}$$

และระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นแพตช์ (H) [7] จาก

$$H = 0.15\lambda \approx 18 \text{ cm}$$

โดยจุดป้อนสัญญาณเริ่มต้น คือ $X_f = 30$ และ $Y_f = -6$ ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเริ่มต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

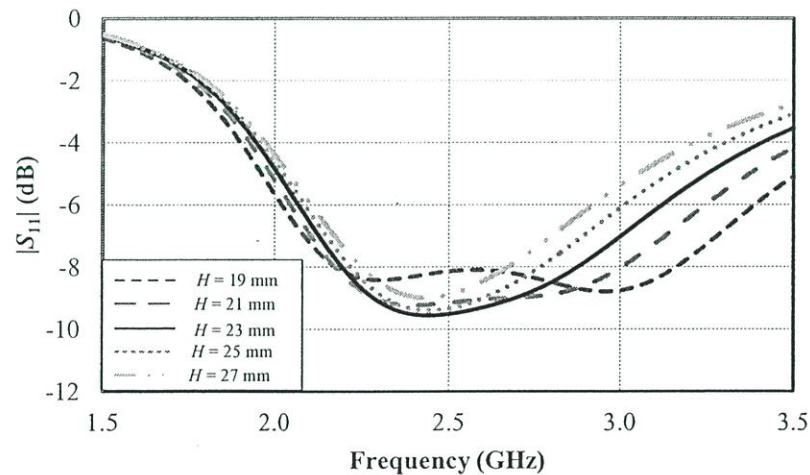
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สายอากาศเริ่มต้น

สัญลักษณ์	ขนาด (mm)
L_g	60
L_p	30
W_g	60
W_p	30
L_h	18
L_v	12
H	18

3.3 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของสายอากาศ

3.3.1 การปรับปรุงระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นแพตช์ (H)

เมื่อปรับปรุงระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นแพตช์ (H) เป็น 19 21 23 25 และ 27 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

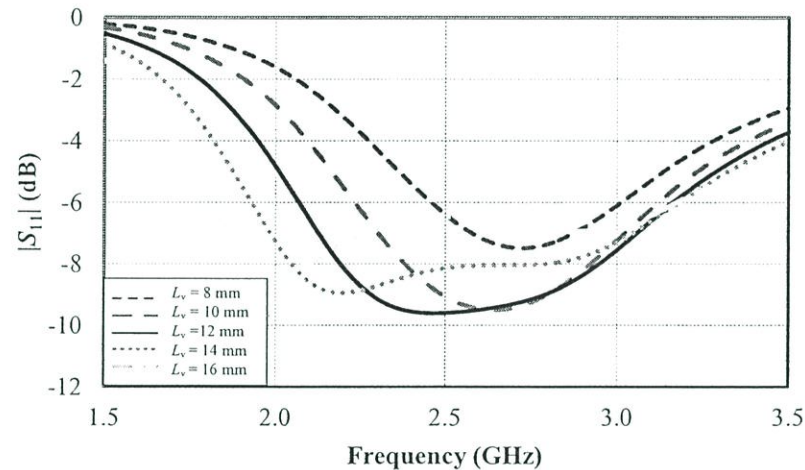


รูปที่ 3.2 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นแพตช์ (H)

จากรูปที่ 3.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับปรุงระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นแพตช์ (H) มีผลต่อเลื่อนเฟสของความถี่เพียงเล็กน้อย พบว่าที่ H เท่ากับ 23 mm ให้ $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุด

3.3.2 การปรับปรุงความสูงของโพรงรูปตัวแอล (L_v)

เมื่อปรับปรุงความสูงของโพรงรูปตัวแอล (L_v) เป็น 8 10 12 14 และ 16 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

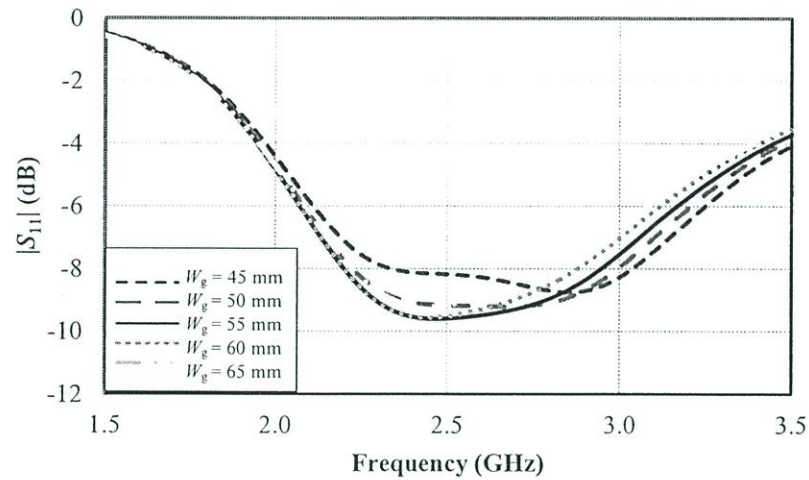


รูปที่ 3.3 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความสูงของโพรงรูปตัวแอล (L_v)

จากรูปที่ 3.3 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับปรุงความสูงของโพรงรูปตัวแอล (L_v) มีผลต่อการเลื่อนเฟสของความถี่พอสมควร แต่สายอากาศก็ยังไม่สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2.45 GHz พบว่าที่ L_v เท่ากับ 12 mm ให้ $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุด

3.3.3 การปรับปรุงความกว้างแผ่นระนาบกราวด์ (W_g)

เมื่อปรับปรุงความกว้างแผ่นระนาบกราวด์ (W_g) เป็น 45 50 55 60 และ 65 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

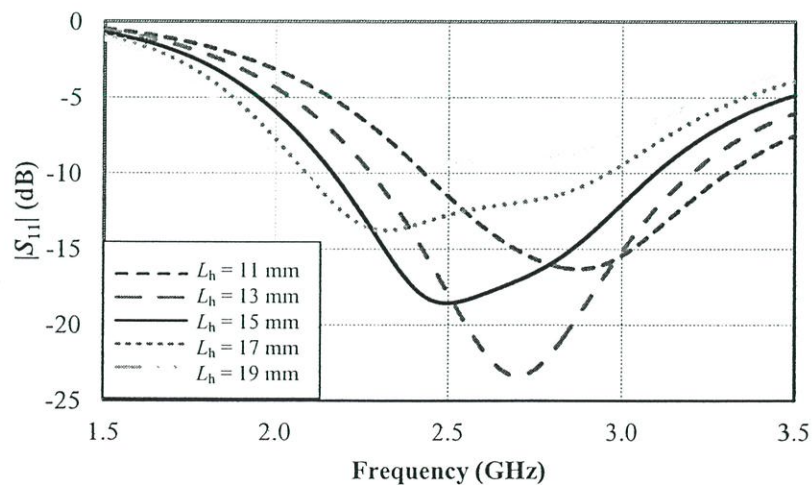


รูปที่ 3.4 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความกว้างแผ่นระนาบกราวด์ (W_g)

จากรูปที่ 3.4 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับปรุงความกว้างแผ่นระนาบกราวด์ (W_g) ผลการจำลองให้ $|S_{11}|$ ที่ใกล้เคียงกัน และได้เลือก W_g เท่ากับ 55 mm เพราะมี $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุดการป้อนสัญญาณที่ $X_f = 30$ และ $Y_f = -6$ ไม่ให้ผล $|S_{11}|$ ตามที่เราต้องการ จึงทำการเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณเป็น $X_f = 50$ และ $Y_f = -6$ หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่อไป

3.3.4 การปรับปรุงความยาวของโพรงรูปตัวแอล (L_h)

เมื่อปรับปรุงความยาวของโพรงรูปตัวแอล (L_h) เป็น 11 13 15 17 และ 19 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5

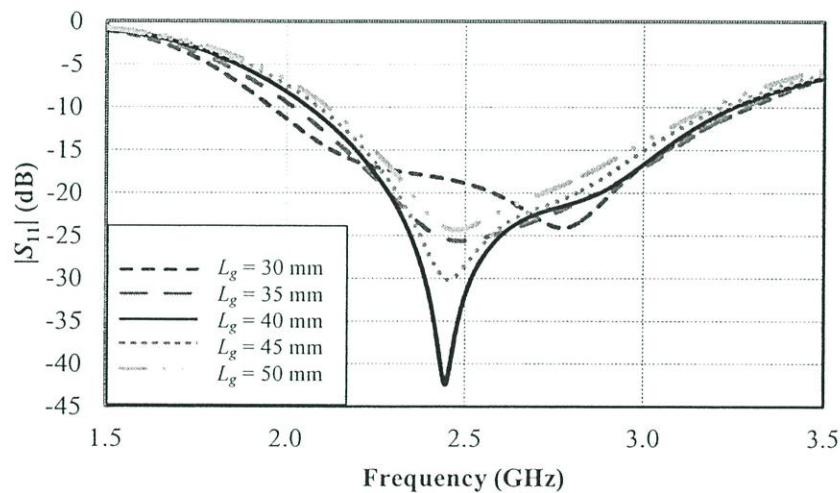


รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความยาวของโพรงรูปตัวแอล (L_h)

จากรูปที่ 3.5 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับปรุงความยาวของโพรงรูปตัวแอล (L_h) มีผลต่อความแม่นยำของสายอากาศและการเลื่อนเฟสของความถี่ พบว่า L_h เท่ากับ 15 mm มีแนวโน้มที่ดีในการนำไปปรับปรุงพารามิเตอร์ต่อไป และมี $|S_{11}|$ ที่ดี

3.3.5 การปรับปรุงความยาวแผ่นระนาบกราวด์ (L_g)

เมื่อปรับปรุงความยาวแผ่นระนาบกราวด์ (L_g) เป็น 30 35 40 45 และ 50 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

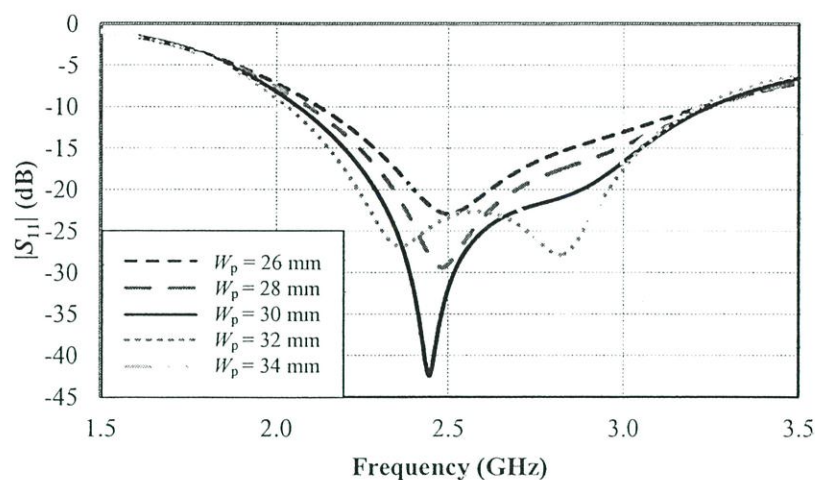


รูปที่ 3.6 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับปรุงความยาวแผ่นระนาบกราวด์ (L_g)

จากรูปที่ 3.6 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับปรุงความยาวแผ่นระนาบกราวด์ (L_g) ส่งผลต่อความแม่นยำของสายอากาศ และเลื่อนเฟสของความถี่เล็กน้อย พบว่า L_g เท่ากับ 40 mm มี $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุด

3.3.6 การปรับปรุงความกว้างแผ่นแพตช์ (W_p)

เมื่อปรับปรุงความกว้างแผ่นแพตช์ (W_p) เป็น 26 28 30 32 และ 34 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

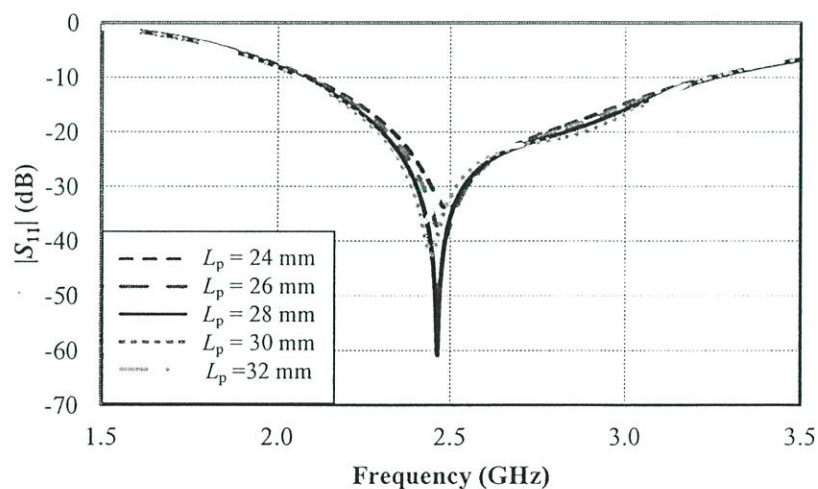


รูปที่ 3.7 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับความกว้างแผ่นแพตช์ (W_p)

จากรูปที่ 3.7 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับความกว้างแผ่นแพตช์ (W_p) ส่งผลต่อการเลื่อนเฟสของความถี่และความแม่นยำของสายอากาศ โดย W_p เท่ากับ 30 mm ให้ $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุด

3.3.7 การปรับความยาวแผ่นแพตช์ (L_p)

เมื่อปรับความยาวแผ่นแพตช์ (L_p) เป็น 24 26 28 30 และ 32 mm ตามลำดับ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อปรับความยาวแผ่นแพตช์ (L_p)

จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อปรับความยาวแผ่นแพตช์ (L_p) ส่งผลต่อการเลื่อนเฟสของความถี่เล็กน้อยและความแม่นยำของสายอากาศโดย L_p เท่ากับ 28 mm ให้ $|S_{11}|$ ที่ดี

หลังจากการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศที่จะนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ สรุปได้ดังตารางที่ 3.3

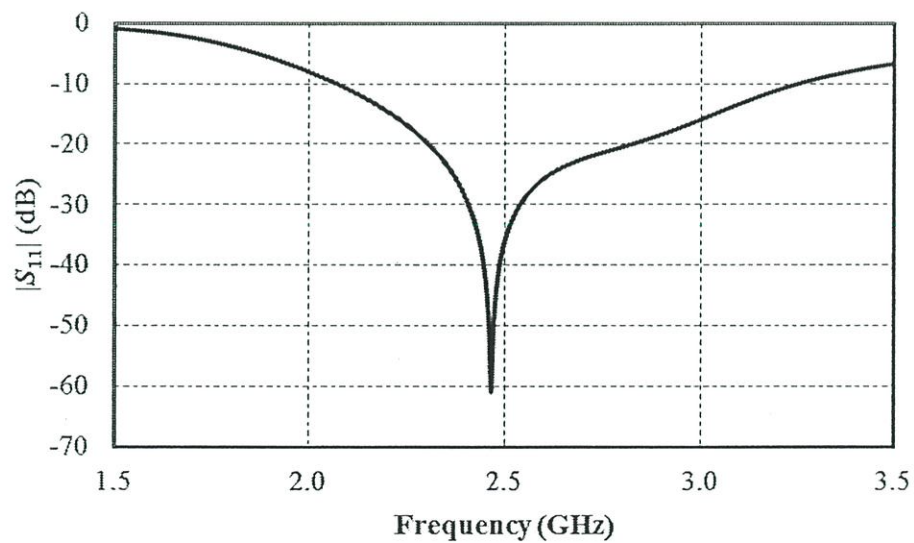
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ

สัญลักษณ์	ขนาด (mm)
L_g	40
L_p	28
W_g	55
W_p	30
L_h	15
L_v	12
H	23

3.4 ผลการจำลองหลังการปรับปรุงพารามิเตอร์

3.4.1 $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณา $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศไมโครสตริป โดยพิจารณาตลอดย่านความถี่ใช้งาน $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

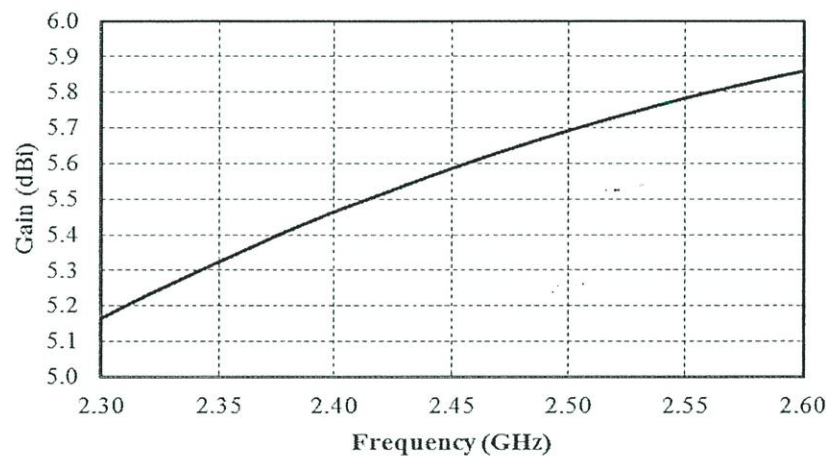


รูปที่ 3.9 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

จากรูปที่ 3.9 เป็นการพิจารณา $|S_{11}|$ ในย่านความถี่ 1.5-3.5 GHz พบว่าสายอากาศมี $|S_{11}|$ ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานโดย $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -43.22 dB ซึ่งหมายความว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

3.4.2 อัตราขยายของสายอากาศ

หัวข้อนี้เป็นการพิจารณาอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม โดยพิจารณาอัตราขยายที่มุม 0 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร อัตราขยายของสายอากาศ ในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.10

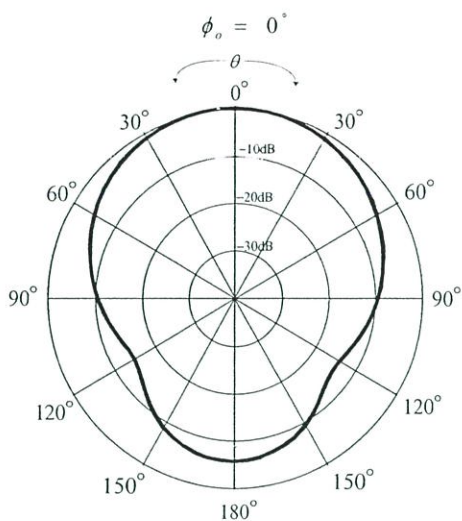


รูปที่ 3.10 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ

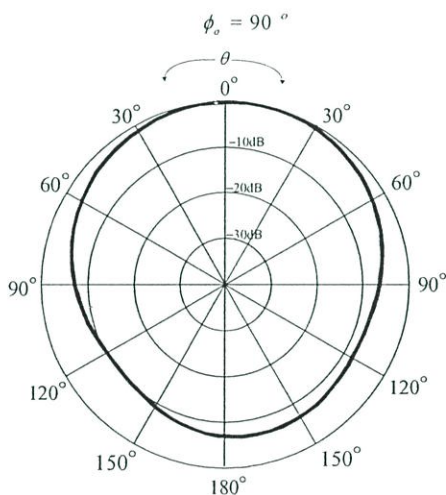
จากรูปที่ 3.10 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศตั้งแต่ความถี่ 2.3-2.6 GHz โดยอัตราขยายที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.59 dBi

3.4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

หัวข้อนี้เป็นการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง โดยทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ใช้งานทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งในระนาบ xz และ yz แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

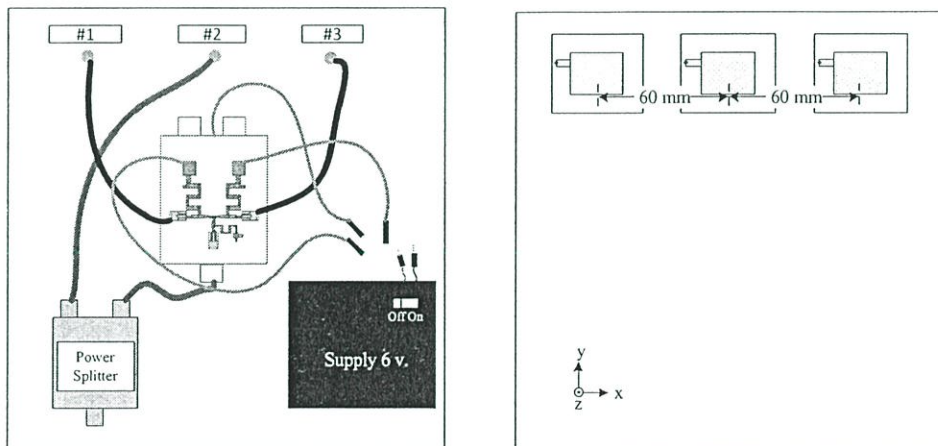
จากรูปที่ 3.11 (ก) และ (ข) ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz จากการจำลอง ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 88.5° และ 96.6° ตามลำดับ อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 6.8 dB และแสดงค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

คุณลักษณะของสายอากาศ		ผลการจำลอง
$ S_{11} $ (dB)		-43.22
อัตราขยาย (dBi)		5.59
โพลาไรซ์		เชิงเส้น
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น		ทิศทางเดียว
HPBW (องศา)	ระนาบ xz	88.5
	ระนาบ yz	96.6
F/B (dB)	ระนาบ xz	6.8
	ระนาบ yz	

3.5 ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

ในระบบสวิตช์ลำคลื่นที่เราออกแบบเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง สายอากาศแถว ลำดับแบบเชิงเส้น 3 ตัว วงจรสวิตช์อาร์เอฟ และวงจรแบ่งกำลังงาน โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.12



(ก) ส่วนวงจรสวิตช์

(ข) สายอากาศลำดับแถว

รูปที่ 3.12 ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

จากรูปที่ 3.12 แสดงถึงระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกัน 3 ส่วน ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

3.5.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและการออกแบบทิศทางของลำคลื่นหลัก

เนื่องจากต้องการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ และปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จึงทำการออกแบบเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นด้วยสายอากาศไมโครสตริป 3 ตัว ซึ่งถ้าเราวางสายอากาศในแนวแกน x โดยกำหนดให้ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเป็น $\frac{\lambda}{2}$ หรือประมาณเท่ากับ 60 mm โดยให้สายอากาศทำงานที่ละ 2 ตัว สายอากาศตัวที่อยู่ตรงกลาง (ตัวที่ 2) เป็นตัวอ้างอิงเฟส โดยเลือกให้สายอากาศด้านซ้าย (ตัวที่ 1) หรือด้านขวา (ตัวที่ 3) ตัวใดตัวหนึ่งทำงาน โดยในการออกแบบทิศทางที่จะให้ลำคลื่นหลักชี้ไปสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยทำการป้อนเฟสต่างที่ป้อนให้กับแต่ละองค์ประกอบ

$$\beta = -kd \cos \theta_0 \quad (3.1)$$

เมื่อ β = เฟสต่างที่ป้อนให้กับองค์ประกอบ

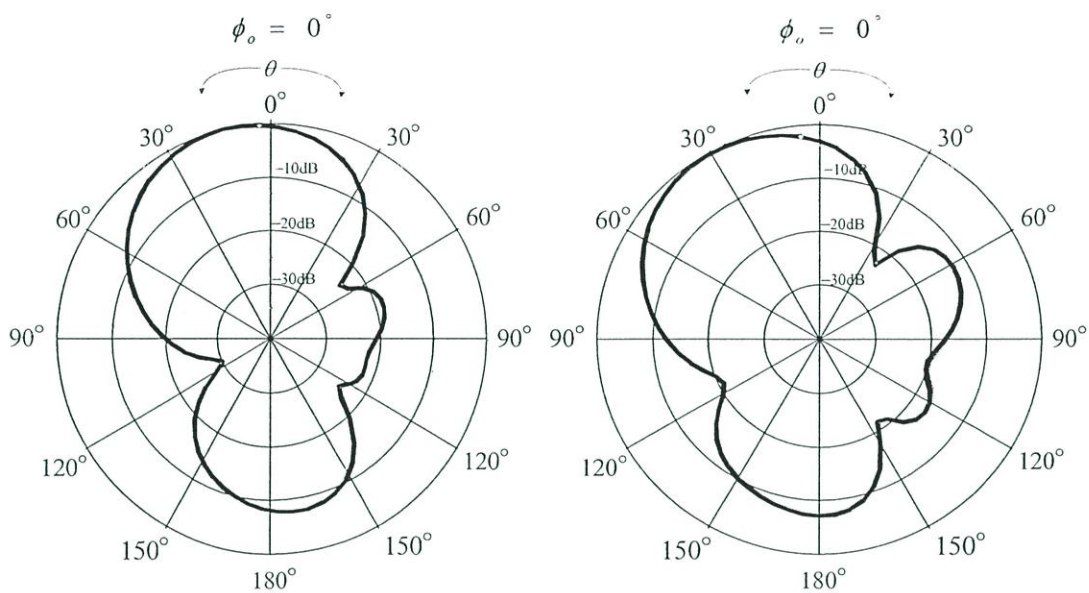
$$k = \text{ค่าคงที่เฟส โดยมีค่าเท่ากับ } \frac{2\pi}{\lambda}$$

d = ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ

θ_0 = มุมที่ต้องการให้ลำคลื่นหลักชี้ไป

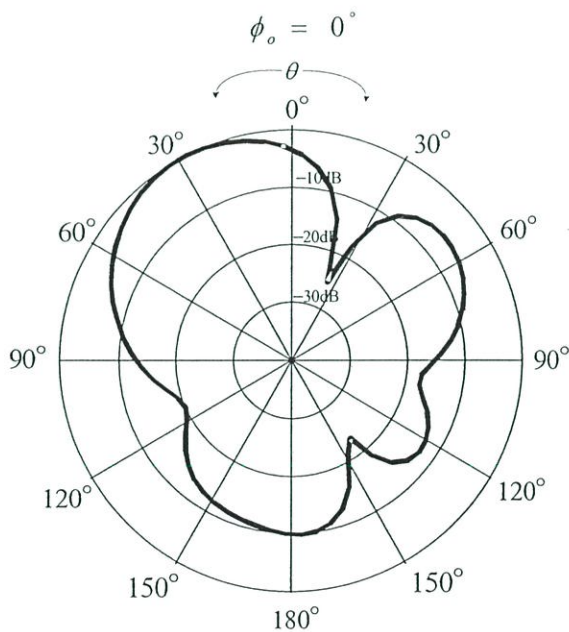
ในปริภูมิตฤษฎีนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ (d) เท่ากับ 60 mm และค่าคงที่เฟสที่ความถี่ 2.45 GHz (k) เท่ากับ 51.33 โดยสามารถเลือกทิศทางลำคลื่นหลัก (θ_0) โดยควบคุมเฟสต่างที่ป้อนให้กับองค์ประกอบ (β) ซึ่งการป้อนเฟสต่างนี้ได้ใช้สายนำสัญญาณที่มีเฟสเท่ากัน 2 คู่ มาใช้เพื่อทำให้เกิดเฟสต่าง ซึ่งข้อดีของการใช้สายนำสัญญาณ 2 คู่ที่มีเฟสเท่ากันมาใช้เพื่อทำให้เกิดเฟสต่างนั้น คือความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งาน โดยเราสามารถกำหนดเฟสต่างที่ป้อนให้กับองค์ประกอบจากการเลือกสายนำสัญญาณที่ใช้ต่อกับสายอากาศและส่วนวงจรสวิตซ์

โดยผลการจำลองด้วยการป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 เท่ากับ 30 60 และ 90 องศา ตามลำดับ ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และถ้าป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 2 และองค์ประกอบที่ 3 เท่ากับ 30 60 และ 90 องศา เช่นเดียวกับองค์ประกอบที่ 1 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



(ก) ป้อนเฟสต่าง 30 องศา

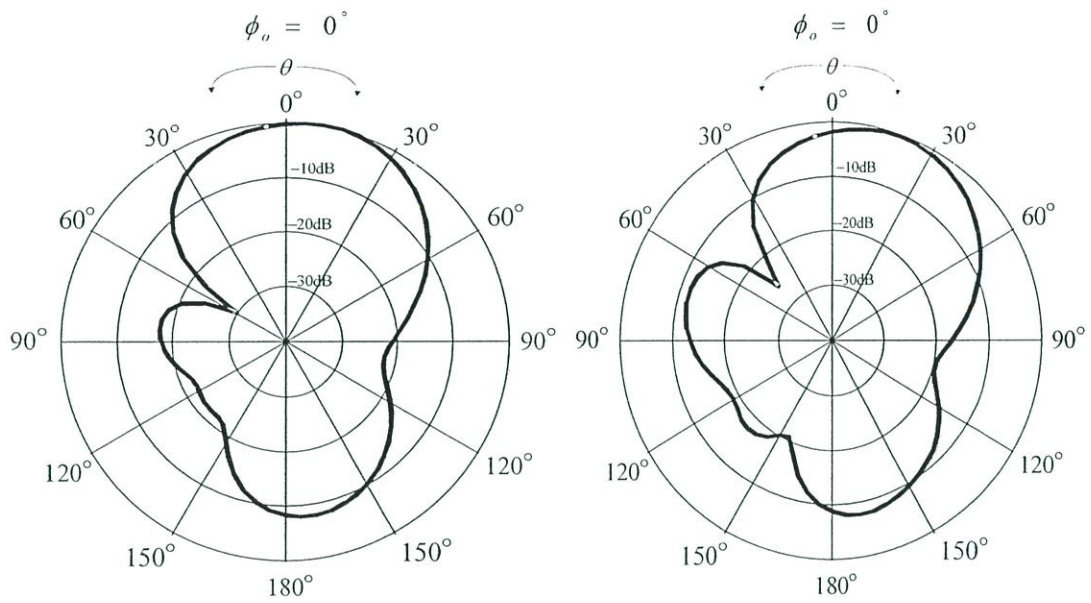
(ข) ป้อนเฟสต่าง 60 องศา



(ค) ป้อนเฟสต่าง 90 องศา

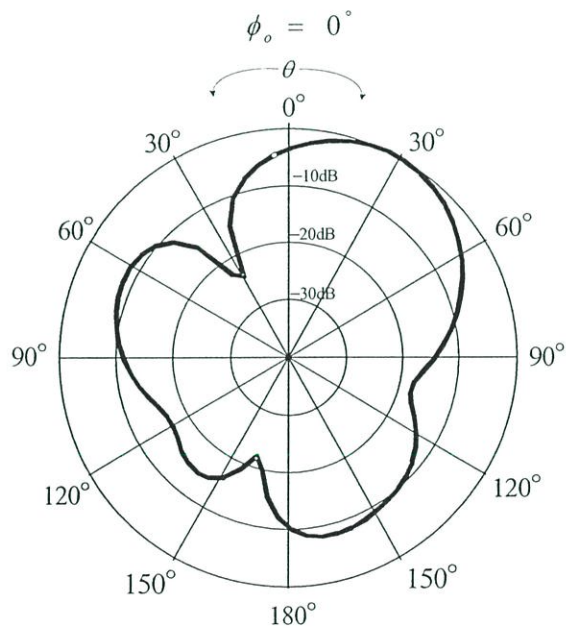
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2

จากรูปที่ 3.13 เมื่อป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 30 องศา ทิศทางลำคลื่นหลักจะชี้ไปที่ 10 องศา ถ้าป้อนต่างกัน 60 องศา ทิศทางลำคลื่นหลักจะชี้ไปที่ 20 องศา และหากป้อนต่างกัน 90 องศา ทิศทางลำคลื่นหลักจะชี้ไปที่ 30 องศา



(ก) ป้อนเฟสต่าง 30 องศา

(ข) ป้อนเฟสต่าง 60 องศา



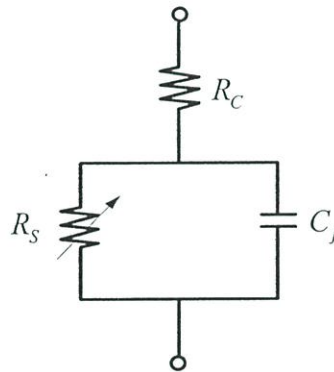
(ค) ป้อนเฟสต่าง 90 องศา

รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 2 และองค์ประกอบที่ 3

จากรูปที่ 3.14 เมื่อป้อนเฟสต่างให้กับองค์ประกอบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 30 องศา ทิศทางลำคลื่นหลักจะชี้ไปที่ 15 องศา ถ้าป้อนต่างกัน 60 องศา ทิศทางลำคลื่นหลักจะชี้ไปที่ 25 องศา และหากป้อนต่างกัน 90 องศา ทิศทางลำคลื่นหลักจะชี้ไปที่ 30 องศา

3.5.2 วงจรสวิตช์อาร์เอฟ (Radio Frequency Switch: RF Switch)

วงจรสวิตช์อาร์เอฟ ทำหน้าที่ในควบคุมการเปิด-ปิด สลับสับเปลี่ยนการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อื่นในวงจรหรือเชื่อมต่อกับวงจร สำหรับการใช้งานทางด้านสายอากาศทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนทิศทางรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นหรือการปรับโพลาไรซ์ของตัวสายอากาศ วงจรสวิตช์อาร์เอฟส่วนใหญ่จะได้ไดโอดแบบพิน (Pin diode) เป็นตัวควบคุมการทำงาน โครงสร้างไดโอดแบบพินประกอบไปด้วย ชั้นไอ (I type: Intrinsic) หรือชั้นอินทรินสิคกึ่งกลางระหว่างชั้นพี (P type) และชั้นเอ็น (N type) ในส่วนของชั้นไอเปรียบเสมือนตัวต้านทานปรับค่าได้ (Variable Resistor) และมีขนาดความกว้างของชั้น W , สำหรับการทำงานของไดโอดแบบพินสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี คือ กรณีเมื่อถูกไบอัสกระแสแบบเดินหน้า อิมพีแดนซ์ภายในตัวไดโอดจะต่ำมาก (Low Impedance) จะส่งผลทำให้ค่าตัวเก็บประจุในตัวไดโอดเพิ่มขึ้น และขนาดความกว้างของชั้นเพิ่มขึ้นตาม และในกรณีไบอัสกระแสแบบย้อนกลับค่าตัวเก็บประจุในตัวไดโอดลดลง ซึ่งส่งผลให้อิมพีแดนซ์ภายในตัวไดโอดสูงมาก (High Impedance) และส่งผลให้ขนาดความกว้างของชั้นลดลงด้วย โดยวงจรสมมูลไดโอดแบบพินสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลไดโอดแบบพิน

จากรูปที่ 3.15 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวไดโอดแบบพิน R_S ได้จาก

$$R_S = \frac{W^2}{2\mu\tau I_{DC}} \quad (3.2)$$

เมื่อ

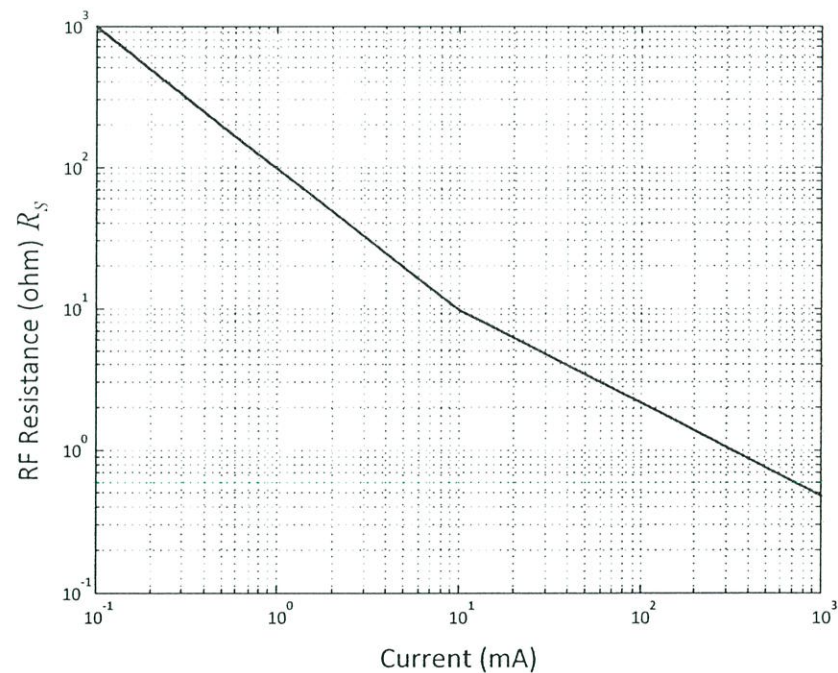
W , คือ ขนาดความกว้างของชั้นไอ

μ คือ ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล

τ คือ ค่าครึ่งชีวิต (haft life)

I_{DC} คือ กระแสไฟฟ้าตรง

เมื่อทำการวิเคราะห์ไดโอดแบบพินในข้างต้นแล้ว ต่อจากนี้จะเป็นการพิสูจน์คุณสมบัติเสมือนตัวต้านทานปรับค่าได้ ด้วยการจำลองผลทางโปรแกรมจะได้ดังรูปที่ 3.16 พบว่าเมื่ออิมพีแดนซ์ภายในตัวไดโอดแบบพินมีค่าต่ำ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัสแบบเดิหน้าจะสูงขึ้นเรื่อยๆ และในทางกลับกันอิมพีแดนซ์ภายในตัวไดโอดแบบพินมีค่าสูง กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไบอัสแบบย้อนกลับก็จะมีค่าน้อยตาม เช่นกัน

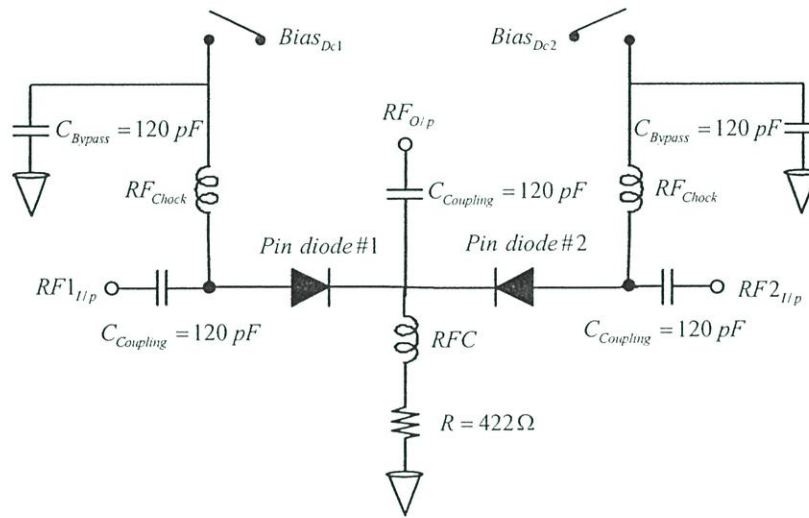


รูปที่ 3.16 กระแสแปรผันกับความต้านทาน

สำหรับการออกแบบในปริภูมิตฤษฎีไดโอดแบบพินเบอร์ BAP64-05 [8] ของบริษัท Philip Semiconductor นำมาประยุกต์และออกแบบให้เป็นวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบสองทิศทางเปลี่ยนสลับการต่อเพื่อไปยังตำแหน่งที่เลือกไว้ (Single Pole Double Throw switch

:SPDT) ดังรูปที่ 3.17 และการไบอัสแบบเดินหน้าสามารถกำหนดลิมิตค่ากระแส I_{DC} ได้จากสมการที่ 3.3

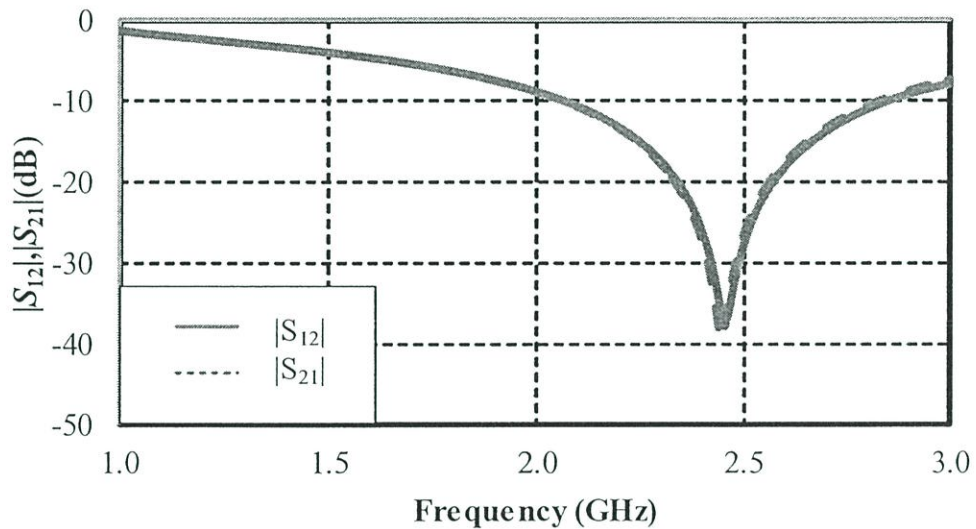
$$R = \frac{Bias_{DC} - 0.9}{I_{DC}} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.17 โครงสร้างสวิตช์อาร์เอฟแบบเอสพีดีที

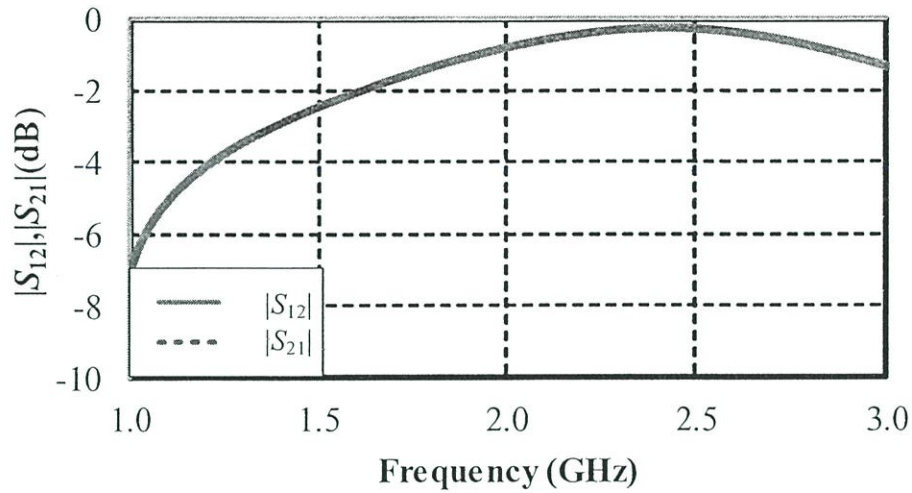
จากรูปที่ 3.17 เมื่อต้องการใช้งานทางด้านพอร์ตอินพุตอาร์เอฟ1 $RF1_{I/p}$ จะต้องเปิดสวิตช์ที่แหล่งจ่ายไฟที่ 1 และปิดสวิตช์ที่แหล่งจ่ายไฟที่ 2 ไดโอดแบบพินตัวที่ 1 จะได้รับกระแสไฟไบอัสแบบเดินหน้านั้นแสดงว่าไดโอดตัวที่ 1 อยู่ในสถานะทำงาน สำหรับไดโอดแบบพินตัวที่ 2 อยู่ในสถานะไม่สามารถทำงานได้ เช่นเดียวกันเมื่อต้องการใช้พอร์ตอินพุตอาร์เอฟ 2 $RF2_{I/p}$ เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟที่ 2 และปิดแหล่งจ่ายไฟที่ 1 สำหรับโครงสร้างสวิตช์อาร์เอฟแบบเอสพีดีที ประกอบไปแหล่งจ่ายไฟถูกต้องด้วยตัวเก็บประจุบายพาสมีค่าเท่ากับ 120 pF อีกด้านของตัวเก็บประจุถูกต้องลงระนาบกราวด์เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันไฟกระแสสลับไหลลงสู่ระนาบกราวด์ (Ground plane) และอาร์เอฟใช้คได้ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุบายพาส อาร์เอฟใช้คมีลักษณะเป็นสายนำสัญญาณกำหนดให้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 70 Ω และสายนำสัญญาณยาวเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น ซึ่งมีความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณเท่ากับ 0.55 mm และ 15.39 mm ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณความถี่วิทยุไหลไปรบกวนแหล่งจ่ายไฟ ได้ต่อเข้าที่หัวอาโนด

(Anode) ของตัวไดโอดแบบพิน ส่วนทางด้านพอร์ตอินพุตอาร์เอฟทั้ง 2 พอร์ตและพอร์ตเอาต์พุตถูกต่อด้วยตัวเก็บประจุคัปปลิง $C_{Coupling}$ มีค่าเท่ากับ 120 pF และขั้วคาโทด (Cathode) ของตัวไดโอดแบบพินจะถูกต่อด้วยอาร์เอฟโซลิดและมีตัวต้านทานจำกัดกระแสซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.2 ค่าความต้านทานเท่ากับ 422 Ω โดยกำหนดให้กระแสมีค่าเท่ากับ 12 mA และแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 6 V เมื่อได้กำหนดค่าดังกล่าวทำการจำลองผลบนโปรแกรมดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ

จากรูปที่ 3.18 ผลการจำลองสวิตช์แบบเอสพีดีที พบว่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -39.393 dB และ -36.551 dB ตามลำดับ มีค่าการสูญเสียการแทรกสอดของตัววงจร (Insertion Loss) หรือ $|S_{12}|$ แสดงดังรูปที่ 3.19

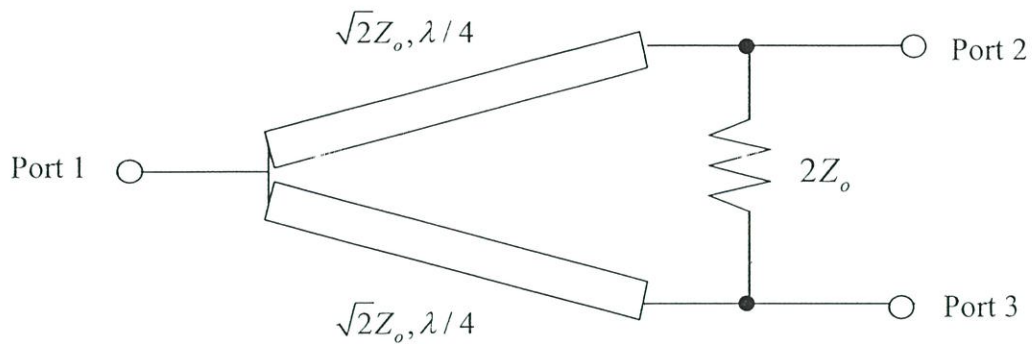


รูปที่ 3.19 ผลการจำลอง $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

จากรูปที่ 3.19 ผลการจำลองค่าการสูญเสียการแทรกสอดของตัววงจร $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ ของตัววงจร ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้มีค่าเท่ากันที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz คือเท่ากับ -0.258 dB

3.5.3 วงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน (Wilkinson's Power Divider)

สำหรับ 3 วงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสันประกอบไปด้วยพอร์ตขาเข้า พอร์ต 1 และ พอร์ตขาออกจำนวนสองพอร์ต คือ พอร์ต 2, พอร์ต 3 โดยมีสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น $\sqrt{2}Z_0$ และมีความยาวสายเท่ากับหนึ่งในสี่ส่วนของความยาวคลื่น (Quarter wave transformer: $\frac{\lambda}{4}$) ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์ และมีตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $2Z_0$ เชื่อมต่อระหว่างพอร์ต พอร์ต 2 และ พอร์ต 3 เพื่อช่วยเรื่องการแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการออกแบบและจำลองผลของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แผ่นแพตช์ แผ่นระนาบกราวนด์ และโพรบแพร่กระจายคลื่นรูปตัวแอล ทำให้ได้แบนด์วิดท์และอัตราขยายที่สูง โดยเริ่มจากการคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นให้สายอากาศ โดยเมื่อนำมาจำลองสายอากาศเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความยาวของโพรบรูปตัวแอล (L_h) ระยะห่างระหว่างระนาบกราวนด์และแผ่นแพตช์ (H) และความยาวแผ่นแพตช์ (L_p) เป็นต้น เพื่อให้ได้ $|S_{11}|$ และที่ต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน เมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว แล้วจึงทำการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศคุณลักษณะโดยสายอากาศมีโพลาริซเซชันเชิงเส้น สามารถใช้งานที่ความถี่กลาง 2.45 GHz โดยมี $|S_{11}|$ เท่ากับ -43.22 dB มีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 5.59 dBi แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 88.5 องศา และ 96.6 องศา ตามลำดับ และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 6.8 dB จากนั้นนำสายอากาศไมโครสตริป 3 ตัวมาประกอบกันเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น ออกแบบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ โดยมี $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -39.393 dB และ -36.551 dB ตามลำดับ และมีค่าการสูญเสียการแทรกสอดของตัววงจร หรือ $|S_{12}|$ ของตัววงจร ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -0.258 dB และหลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการจำลอง จึงใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ประกอบด้วย $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

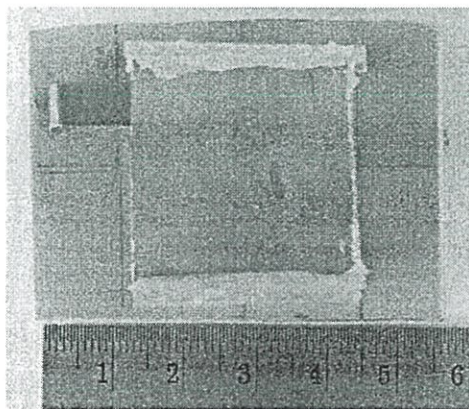
บทที่ 4

การสร้าง การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ

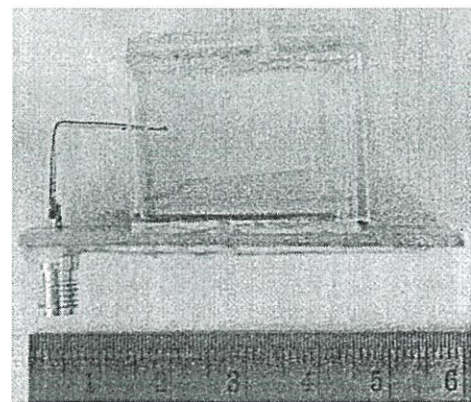
ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและผลการทดสอบ การตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศไมโครสตริปที่นำไปประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN และวงจรสวิตช์อาร์เอฟ โดยนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองผลในบทที่ 3 มาสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบและนำผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลอง ซึ่งประกอบด้วยผลของ $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศในการตัดสินใจนำไปใช้งาน

4.1 การสร้างและทดสอบสายอากาศ

สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศไมโครสตริป อัตราขยายสูง ซึ่งเป็นสายอากาศที่ตอบสนองที่ความถี่ 2.45GHz สายอากาศถูกสร้างด้วยจากแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ที่มีความหนา 1.6 mm เนื่องจากมีความแข็งแรง ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และต้นทุนต่ำ โดยสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอนี้ได้มาจากการจำลองโครงสร้างในบทที่ 3 และได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยสายอากาศต้นแบบแสดงได้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับในการสร้างสายอากาศต้นแบบแสดงในตารางที่ 4.1



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.1 สายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งสร้างจากแผ่นพิมพ์ FR4 โดยประกอบด้วยสองชั้น คือตัวสะท้อนคลื่นและแผ่นแพตช์ปรสิต มีการป้อนสัญญาณแบบ โพรบรูปตัวแอล สร้างจากทองแดง และใช้ SMA connector เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ กับสายนำสัญญาณ โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่สมบูรณ์

สัญลักษณ์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_g	40
L_p	28
W_g	55
W_p	30
L_h	15
L_v	12
H	23

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer HP 8720C)
2. สายนำสัญญาณ (Transmission Line)
3. สายอากาศต้นแบบ 2 ตัว
4. ห้องไร้การสะท้อน (Anechoic Chamber)

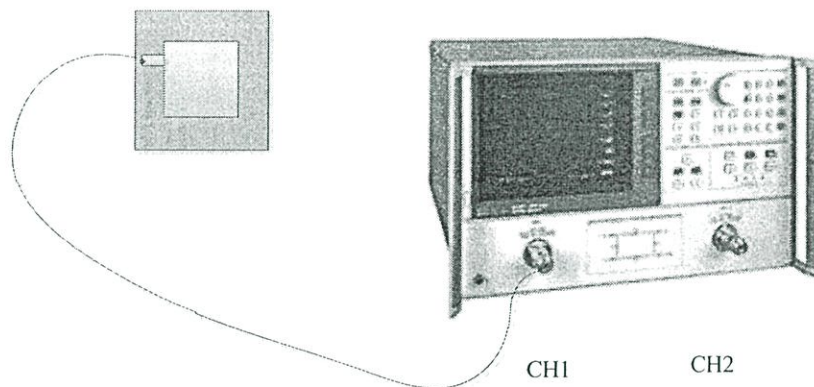
4.3 ผลการทดสอบของสายอากาศ

เมื่อสร้างสายอากาศต้นแบบแล้ว จะดำเนินการทดสอบและนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

4.3.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ($|S_{11}|$)

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ $|S_{11}|$ ของกำลังงานหรือระดับการสะท้อนของกำลังงานซึ่งอยู่ในรูปพารามิเตอร์การสะท้อน แสดงผ่านทาง $|S_{11}|$ ในหน่วยของ dB การทดสอบอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ในการทดสอบสามารถที่จะแสดงพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งก็ได้ เนื่องจากทุกพารามิเตอร์มีความสัมพันธ์กันตามสมการดังที่จะแสดงต่อไป

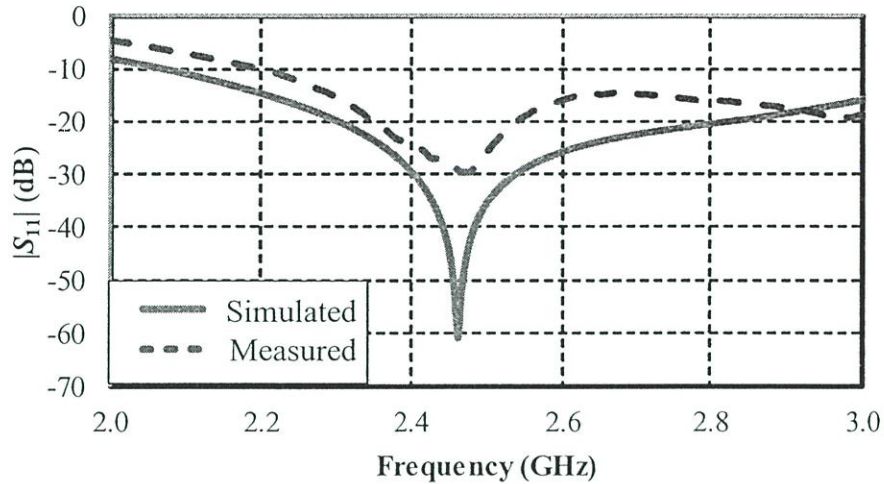
เมื่อ $|S_{11}|$ อยู่ในหน่วย dB และ Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศและ Z_o คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณที่นำมาต่อที่หัวของสายอากาศ สำหรับการทดสอบจะแสดงค่าพารามิเตอร์การสะท้อนผ่านทางค่าการสูญเสียย้อนกลับ $|S_{11}|$ ในหน่วย dB เพียงค่าเดียว โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer HP 8720C) โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ และการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การทดสอบ $|S_{11}|$

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (4.1)$$

ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 GHz ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบและการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้การจำลองและจากการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณโครงข่าย ซึ่งผลการเปรียบเทียบระหว่าง $|S_{11}|$ จากทดสอบและจำลอง โดยผลจากการจำลอง $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งาน คือ 2.4 ถึง 2.48 GHz ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มี $|S_{11}|$ เท่ากับ -43.22 dB โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ เท่ากับ 48.4 % และจากผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -28.13 dB มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ เท่ากับ 41.5% ซึ่งหมายความว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ จะเห็นได้ว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ขณะเดียวกันโดยมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย สาเหตุเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบ อาจจะมีการคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และวัสดุที่ใช้ในการทำสายอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลอง

4.3.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

ในการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ จะทำการทดสอบอัตราขยายสมบูรณ์ของสายอากาศโดยใช้สายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายที่แท้จริงจากนั้นทำการคำนวณหาค่าอัตราขยายสมบูรณ์ได้จากสมการของฟรีส ในหน่วย dBi ดังสมการดังต่อไปนี้

$$(G_{or})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.2.2a)$$

เมื่อ R คือระยะสนามระยะไกล

$$R \geq \frac{2(D^2)}{\lambda} \quad (4.2.2b)$$

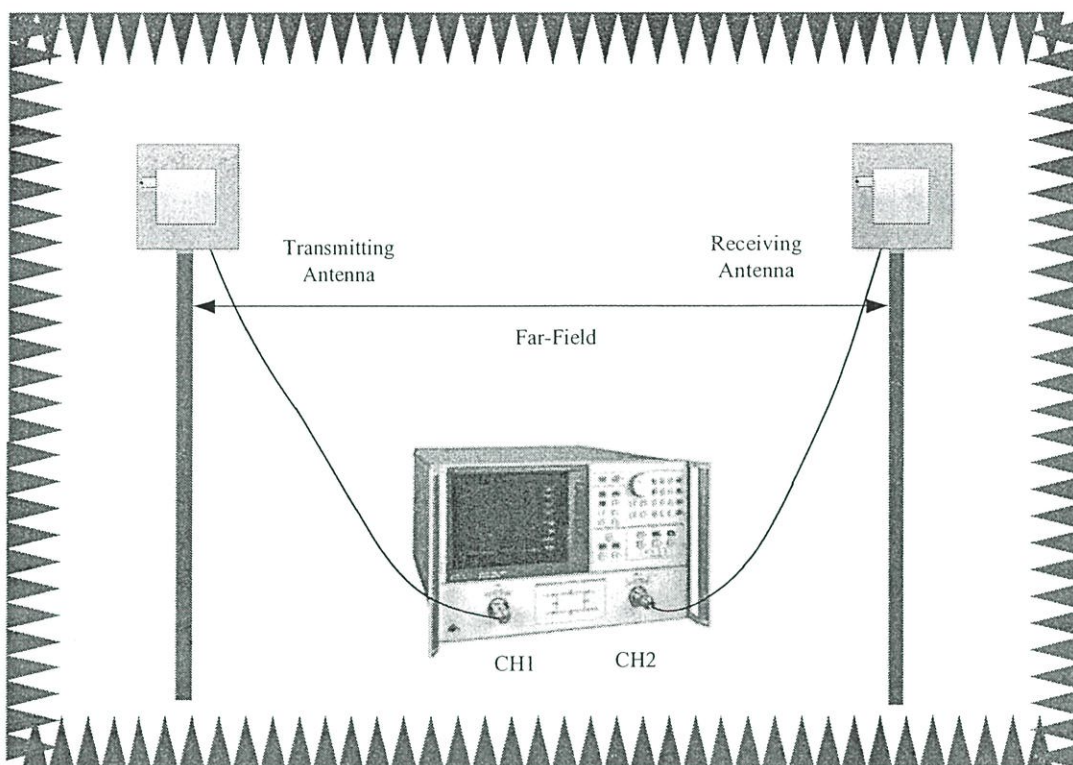
และ D คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศแต่ถ้ากรณีทีพิจารณาการทดสอบสายอากาศส่งและรับพร้อมกัน

$$D = D_T + D_R \quad (4.2.2c)$$

โดยที่ D_T คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศส่ง

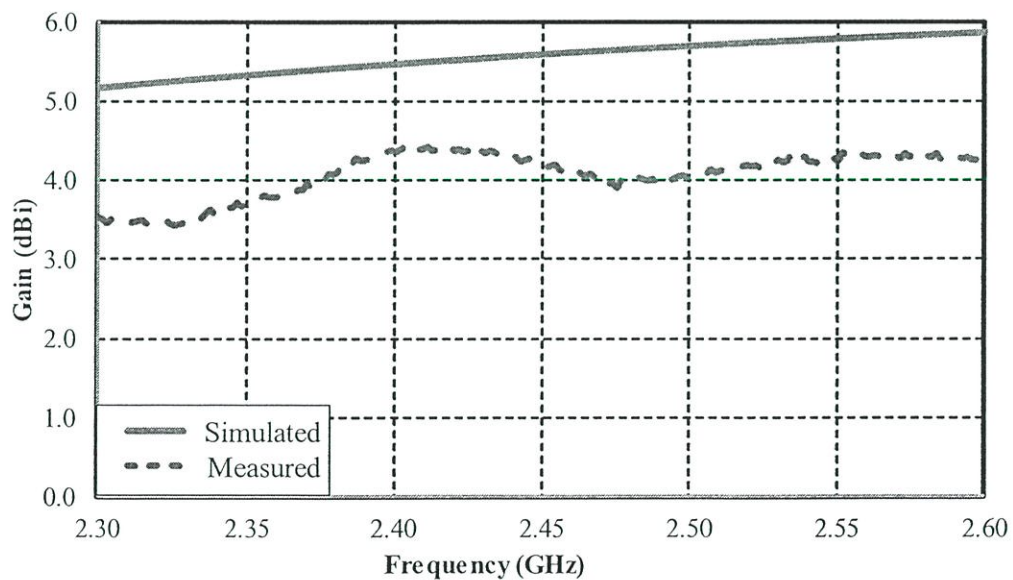
D_R คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศรับ

ทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายผ่านทางพารามิเตอร์การส่งผ่าน S_{21} โดยที่พารามิเตอร์ S_{21} ก็คือพารามิเตอร์ในรูปของฟังก์ชันคลื่นคืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ของคลื่นที่ส่งผ่านเครือข่ายไปยังโหลดต่อสัมประสิทธิ์ของคลื่นที่ส่งเข้าไปในเครือข่าย พิจารณาได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังทางด้านรับที่ช่อง 2 (P_r) ต่อกำลังส่งที่ช่องที่ 1 (P_t) ภายใต้เงื่อนไขแมตซ์โพลาริซและมีระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีระยะมากกว่า หรือเท่ากับขอบเขตของสนามระยะไกล (far field) การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศแสดงได้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ

ซึ่งผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง แสดงดังในรูปที่ 4.5



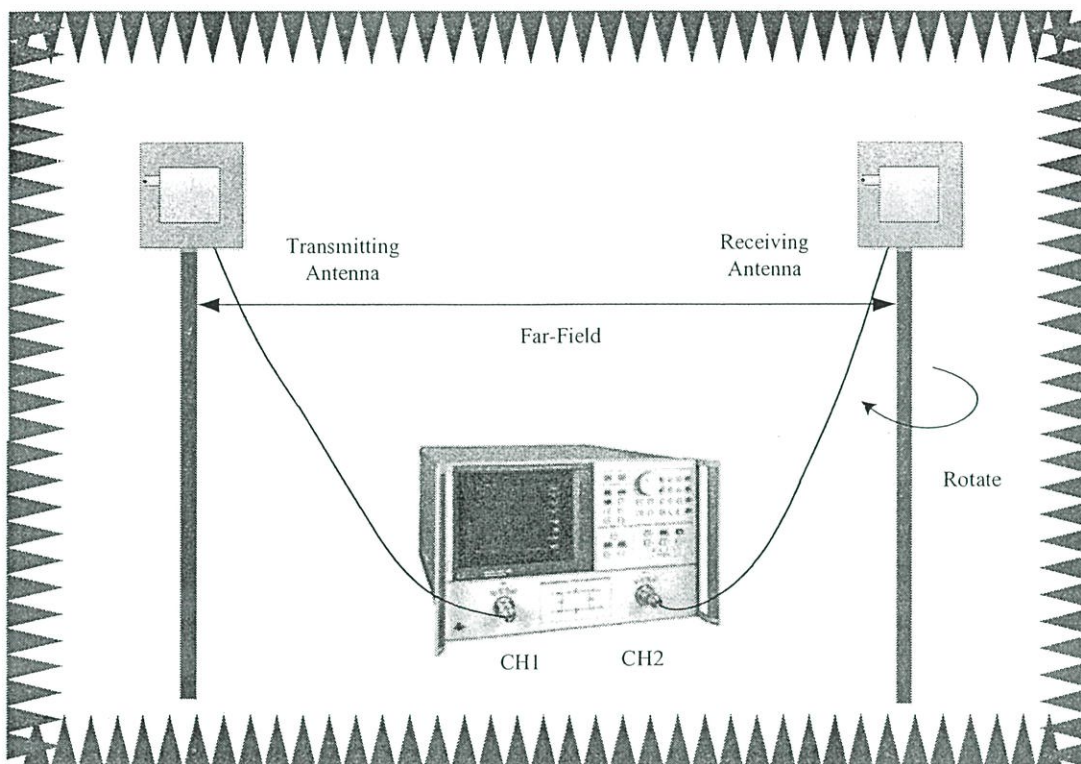
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบและผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าผลของอัตราขยายในทิศทางที่ต้องการ ($\theta = 0^\circ$ และ $\phi = 0$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามผลของอัตราขยายที่ได้ในแต่ละความถี่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่ ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและจากตัวสายอากาศต้นแบบเอง ซึ่งในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองจะไม่มีปัจจัยเหล่านี้เข้ามาเกี่ยวข้อง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปโดยผลของอัตราขยายที่ได้จากการจำลองและการทดสอบ โดยที่ความถี่ 2.45 GHz ผลการจำลองมีอัตราขยายเท่ากับ 5.59 dBi ส่วนผลการทดสอบได้อัตราขยายเท่ากับ 4.19 dBi

4.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศส่ง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะพิจารณาที่สนามระยะไกล ที่ฟังก์ชันทิศทางรอบตัวของสายอากาศ ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมักนิยมทดสอบใน 3 ระนาบหลัก คือ ระนาบ xy ระนาบ xz และระนาบ yz ในรูปแบบพิกัดเชิงขั้วเมื่อ ระยะ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีระยะมากกว่า หรือ เท่ากับ ระยะสนามไกล ในที่นี้จะพิจารณาถึงการทดสอบเพียง 2 ระนาบ คือ xz และ yz สำหรับในการทดสอบได้ทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีมีการสะท้อน (Anechoic Microwave Chamber) แสดงการติดตั้งสำหรับการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่สนามระยะไกล (Far field)

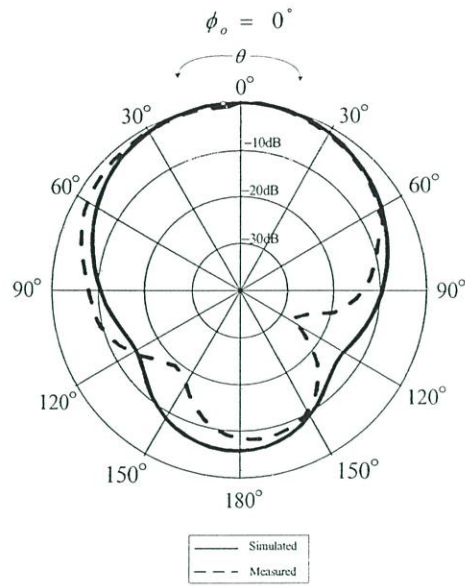
ซึ่งที่สนามระยะไกลนี้การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ซึ่งดังนั้นในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่างมากกว่าหรือเท่ากับ 30.23 cm ซึ่งในการทดสอบได้วางสายอากาศตัวส่งและตัวรับ มีระยะห่างเท่ากับ 100 cm โดยสายอากาศที่ทำการทดสอบนั้นต้องใช้สายอากาศคู่เหมือน คือ สายอากาศด้านส่งและด้านรับมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ สายอากาศด้านรับจำเป็นต้องหมุนรอบตัวเอง 360 องศา และตั้งระดับความสูงของสายอากาศด้านรับและด้านส่ง จำเป็นต้องมีความสูงที่เท่ากัน



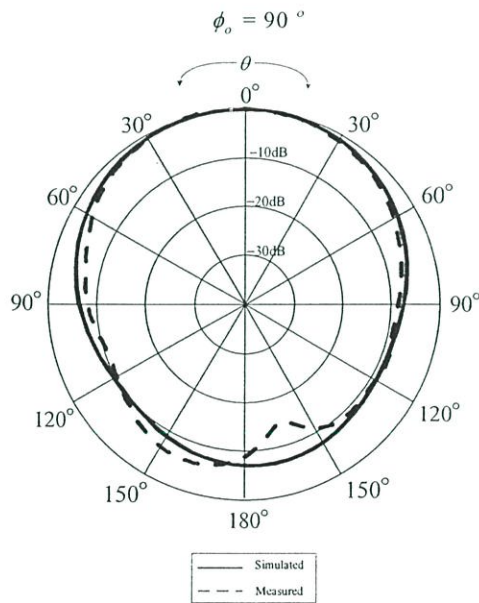
รูปที่ 4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากรูปที่ 4.6 ทำการติดตั้งสายอากาศระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง กำหนดระยะห่างมากกว่าหรือเท่ากับระยะห่าง (far field) ซึ่ง R มีค่าเท่ากับ 200 m เพื่อวัดแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นภายในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic Chamber room)

ในหัวข้อนี้จะได้เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศไมโครสตริป โดยนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกันที่ความถี่ 2.45 GHz ดังแสดงในรูป 4.7 (ก) และ (ข)



(ก) ระนาบ xz ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ระนาบ yz ความถี่ 2.45 GHz

รูปที่ 4.7 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
ของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) แสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz
และ ระนาบ yz ที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบกับการ

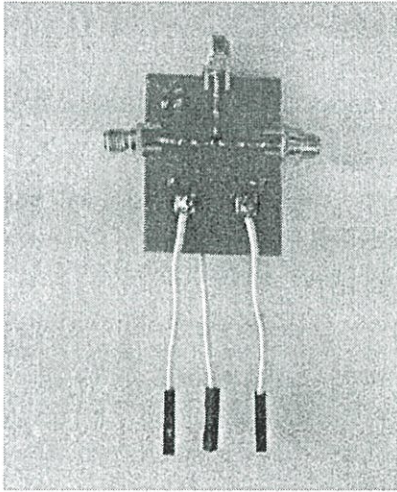
จำลองมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวและแนวโน้มนำไปในทางเดียวกันและมีค่าสูงในทิศทางบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ โดยผลการทดสอบ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 105 องศา และ 95 องศา ตามลำดับ มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) ในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 8.69 dB และ 10.00 dB ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มนำที่สอดคล้องกันกับผลการจำลองที่ได้ศึกษา แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz

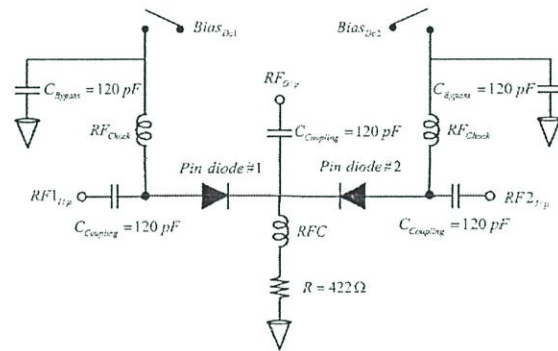
คุณลักษณะของสายอากาศ		ผลการจำลอง	ผลการทดสอบ
$ S_{11} $ (dB)		-43.22	-28.13
อัตราขยาย (dBi)		5.59	4.19
เปอร์เซ็นต์แบนวิดธ์ (%)		48.40	41.50
โพลาริไรซ์		เชิงเส้น	
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น		ทิศทางเดียว	
HPBW (องศา)	ระนาบ xz	88.50	105.00
	ระนาบ yz	96.60	95.00
F/B (dB)	ระนาบ xz	6.80	8.69
	ระนาบ yz	6.80	10.00

4.4 การทดสอบวงจรสวิตช์อาร์เอฟ

ในวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ประกอบด้วยพอร์ทอินพุทสัญญาณอาร์เอฟสองพอร์ท โดยเมื่อต้องการใช้งานพอร์ทใดพอร์ทหนึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการป้อนไฟ 6 V ให้กับขั้วคาโทดของพอร์ทนั้น โดยวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



(ก)



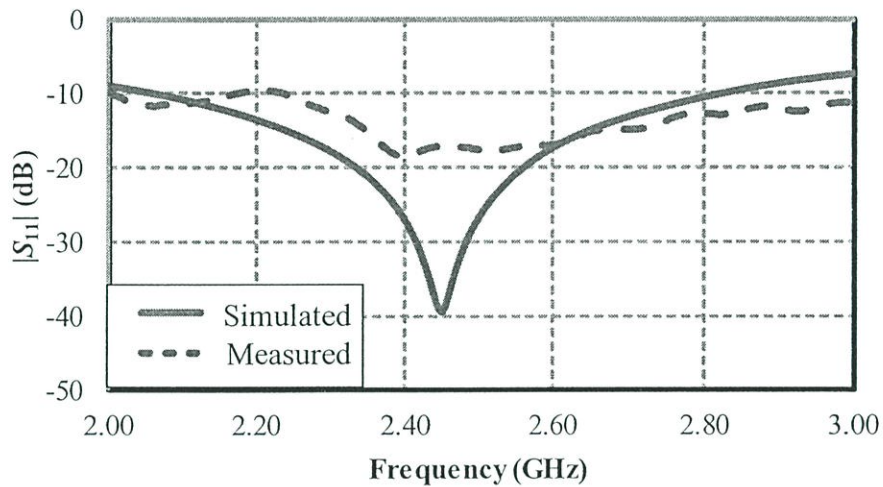
(ข)

รูปที่ 4.8 วงจรสวิตช์อาร์เอฟต้นแบบ

จากรูปที่ 4.8 วงจรสวิตช์อาร์เอฟ ในการทดสอบวงจรสวิตช์อาร์เอฟเป็นการทดสอบ $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ และ $|S_{12}|$ ของตัววงจร โดยจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 V (โดยใช้ถ่าน 1.5 V 4ก้อน ต่ออนุกรมกัน) ให้กับ พอร์ทที่ 2 ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ จากนั้นทำการวัดสัญญาณที่ได้ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

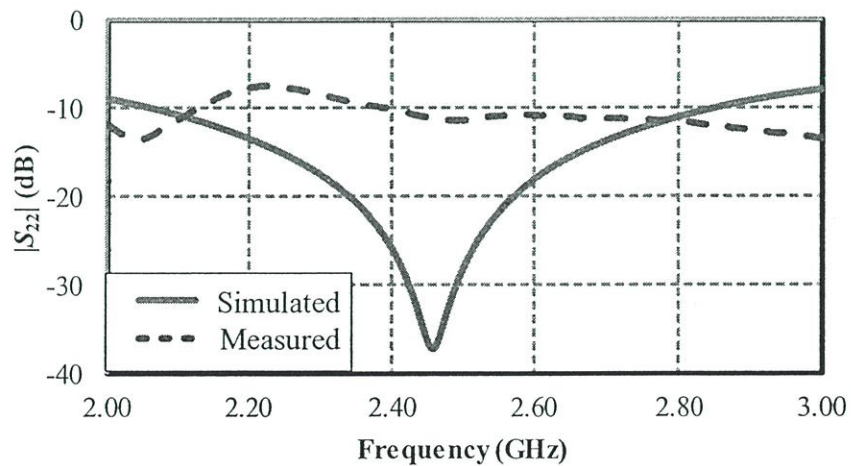
- 1 .เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer HP 8720C)
2. สายนำสัญญาณ 2 เส้น
3. วงจรสวิตช์อาร์เอฟต้นแบบ
4. ถ่าน 1.5 V 4 ก้อนต่ออนุกรมกัน (แรงดันรวม 6 V)

โดยเมื่อทำการป้อนไฟแล้ว ผลการเปรียบเทียบ $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ และ $|S_{12}|$ ของวงจร สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



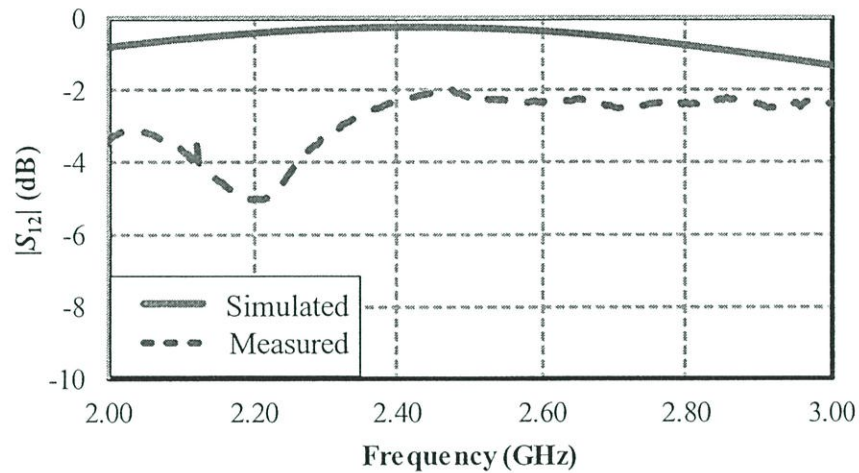
รูปที่ 4.9 ผลจำลองและผลทดสอบ $|S_{11}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ

จากรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบ $|S_{11}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -17.13 dB



รูปที่ 4.10 ผลจำลองและผลทดสอบ $|S_{22}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ

จากรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบ $|S_{22}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลการทดสอบ $|S_{22}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -11.05 dB

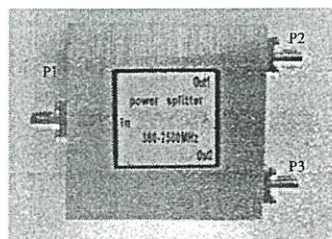


รูปที่ 4.11 ผลจำลองและผลทดสอบ $|S_{12}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ

จากรูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบ $|S_{12}|$ ของวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลการทดสอบ $|S_{12}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -2.09 dB

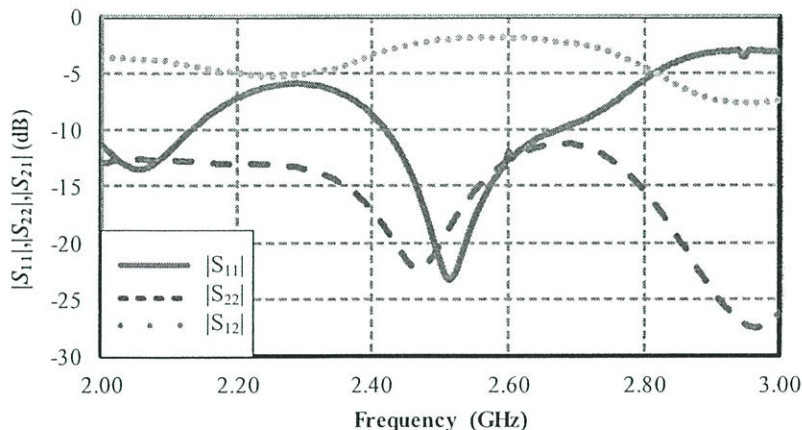
4.5 การทดสอบวงจรแบ่งกำลังงาน

วงจรแบ่งกำลังงานประกอบด้วย 3 พอร์ต คือหนึ่งพอร์ตอินพุตและสองพอร์ตเอาต์พุต ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรแบ่งกำลังงาน

จากรูปที่ 4.12 วงจรแบ่งกำลังงานที่ประกอบด้วย 3 พอร์ต เพื่อควบคุมการแบ่งกำลังงานจากนั้นทำการทดสอบวงจรแบ่งกำลังงาน จะทดสอบค่าคุณลักษณะที่สำคัญของตัววงจร คือ $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ โดย $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ จะต้องมีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ มีประมาณ -3 dB ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของวงจรแบ่งกำลังงาน

จากรูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ของวงจรที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.755 dB และ -21.332 dB ตามลำดับ $|S_{12}|$ และ $|S_{21}|$ มีค่าเท่ากันเท่ากับ -2.635 dB

4.6 การทดสอบระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศไมโครสตริป 3 ตัว จัดเรียงกันเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้นในแนวแกน x จะทำให้สายอากาศสามารถปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ได้ดีขึ้น โดยทำงานร่วมกับวงจรแบ่งกำลังงานและวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ซึ่งจะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศสามารถปรับลำคลื่นหลักให้ชี้ไปมุมที่ต้องการได้ด้วยการปรับเฟสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบตั้งสมการที่ 4.1

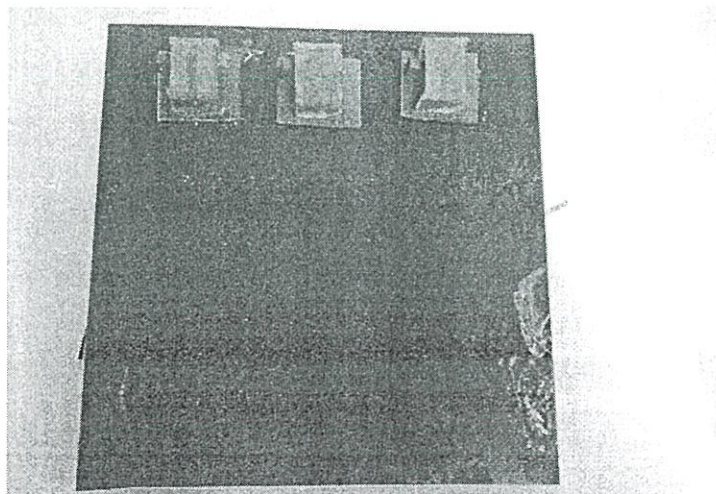
$$\beta = -kd \cos \theta_0 \quad (4.1)$$

- เมื่อ β = เฟสต่างที่ป้อนให้กับองค์ประกอบ
 k = ค่าคงที่เฟส โดยมีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda}$
 d = ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ
 θ_0 = มุมที่ต้องการให้ลำคลื่นหลักชี้ไป

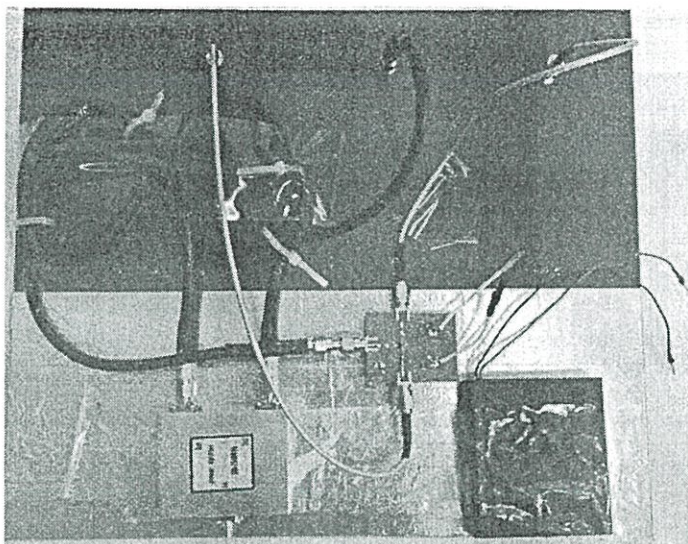
โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น 3 ตัว
2. วงจรสวิตช์อาร์เอฟต้นแบบ
3. วงจรแบ่งกำลังงาน
4. สายนำสัญญาณ 3 คู่ โดยคู่แรกมีเฟสเท่ากัน คือ 110 องศาที่ความถี่ 2.45 GHz คู่ที่สองมีเฟสเท่ากัน คือ 165 องศาที่ความถี่ 2.45 GHz และ คู่สุดท้ายมีเฟสเท่ากัน คือ 320 องศาที่ความถี่ 2.45 GHz
5. สายอากาศมาตรฐานล้อยกริวดิก

ในทดสอบใช้สายอากาศมาตรฐานล้อยกริวดิกเป็นสายอากาศส่ง และใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นเป็นสายอากาศรับ โดยในส่วนของสายอากาศรับมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.14



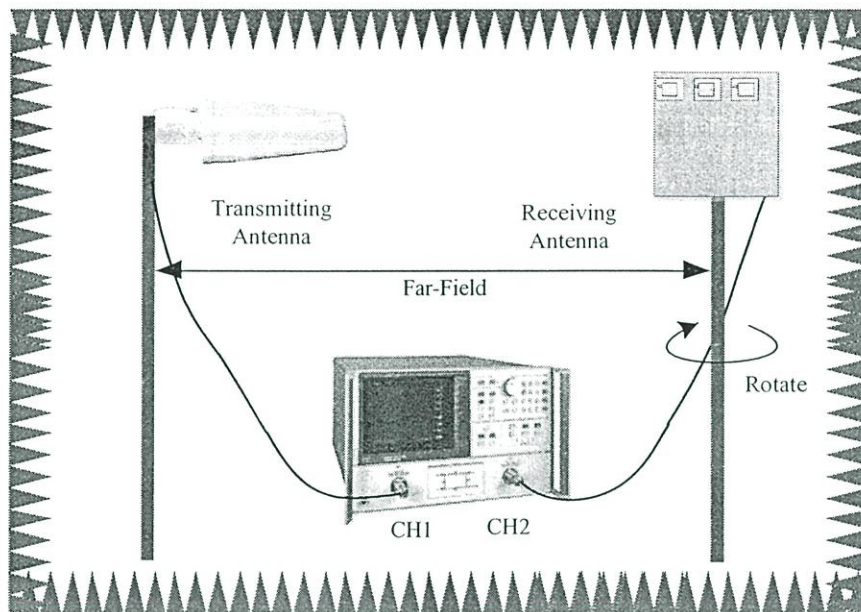
(ก) ด้านหน้า



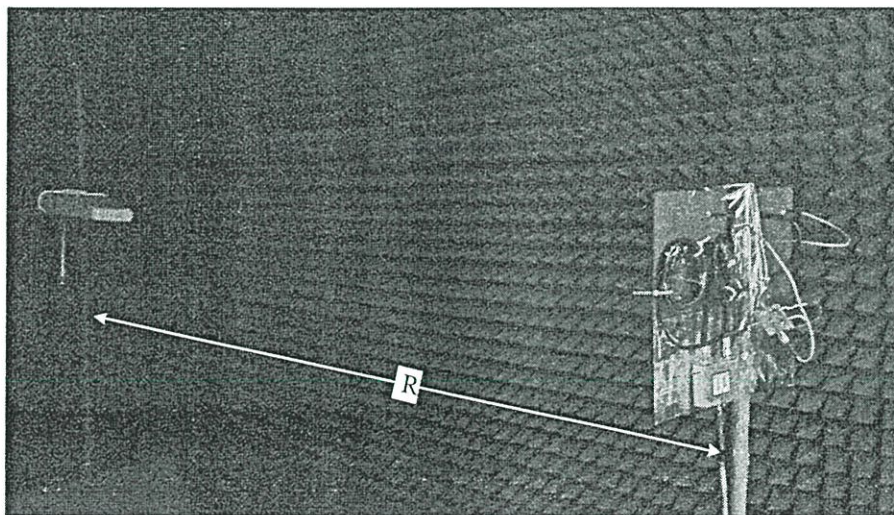
(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.14 โครงสร้างระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

จากรูปที่ 4.14 วงจรแบ่งกำลังงานจะทำหน้าที่แบ่งสัญญาณออกไปที่วงจรสวิตซ์อาร์เอฟและสายอากาศตัวกลาง ซึ่งสายอากาศตรงกลางจะมีเฟสเป็น 165 องศา (เฟสอ้างอิง) ตามสายสัญญาณที่ใช้ต่อ จากนั้นที่พอร์ต 2 ของวงจรสวิตซ์อาร์เอฟจะต่อกับสายอากาศด้านซ้าย ซึ่งสายอากาศด้านซ้ายจะมีเฟสเป็น 110 องศา ตามสายนำสัญญาณที่ใช้ต่อ ทำให้เฟสต่างระหว่างสายอากาศด้านซ้ายกับสายอากาศตรงกลางเป็น 55 องศา ในทางเดียวกันพอร์ตที่ 3 ของวงจรสวิตซ์อาร์เอฟก็จะต่อกับสายอากาศด้านขวา ซึ่งทำให้มีเฟสต่าง 55 องศา เช่นเดียวกับสายอากาศตัวซ้าย โดยสามารถเลือกให้สายอากาศด้านซ้ายหรือด้านขวาตัวใดตัวหนึ่งทำงาน โดยการป้อนไฟ 6 V ให้กับขั้วคาโทดด้านใดด้านหนึ่งของวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ และสามารถจำลองการติดตั้งเพื่อทดสอบได้ ดังรูปที่ 4.15



(ก) การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

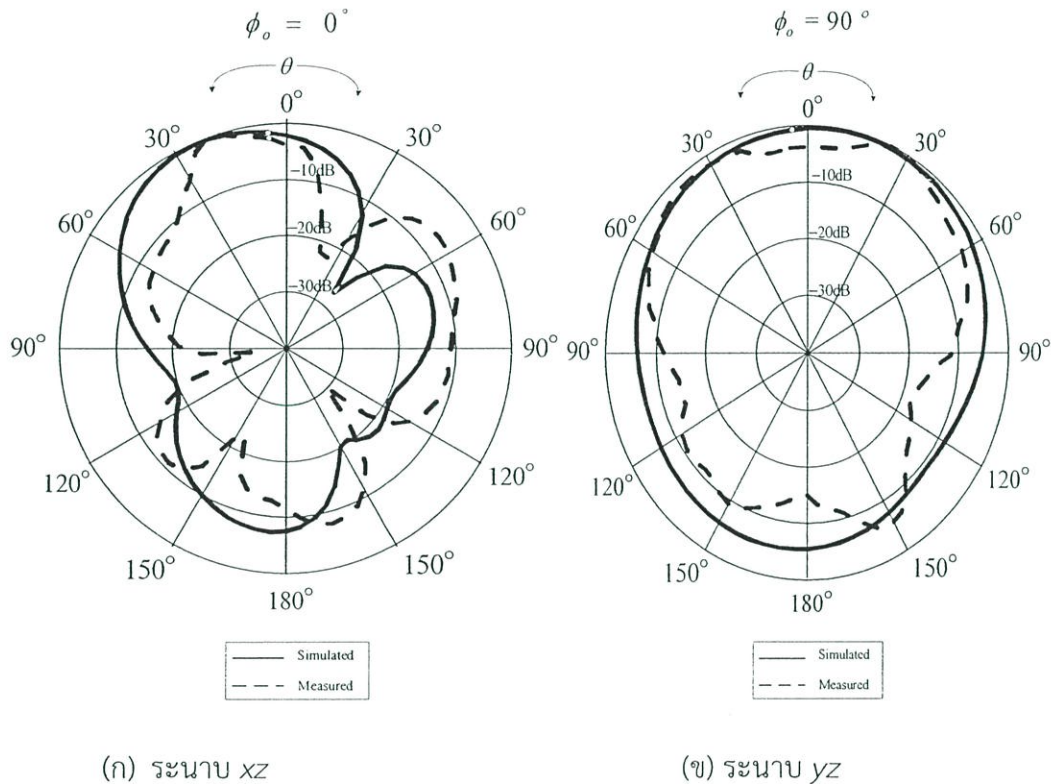


(ข) การติดตั้งสายอากาศในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 4.15 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

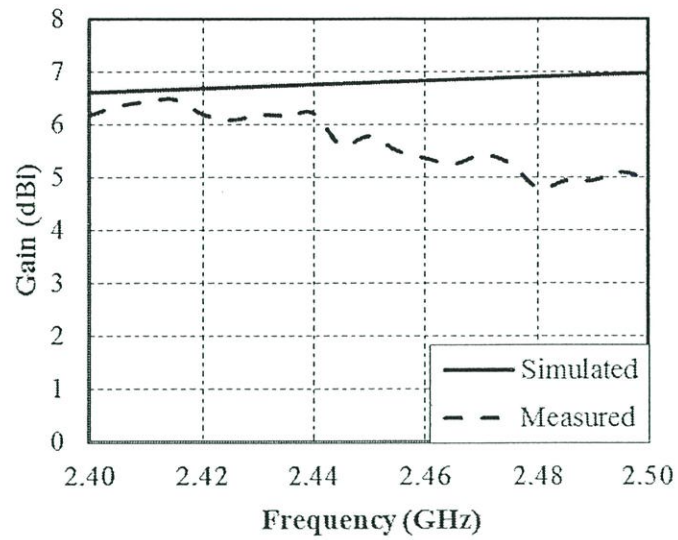
จากรูปที่ 4.15 กำหนดสายอากาศมาตรฐานล็อกพริออดิกเป็นสายอากาศส่ง และใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นเป็นสายอากาศรับ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความถี่ 2.45 GHz เฟสต่างขององค์ประกอบเท่ากับ 55 องศา

เมื่อให้สายอากาศตัวที่ 1 หรือด้านซ้ายทำงาน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 และเมื่อให้สายอากาศตัวที่ 3 หรือด้านขวาทำงาน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



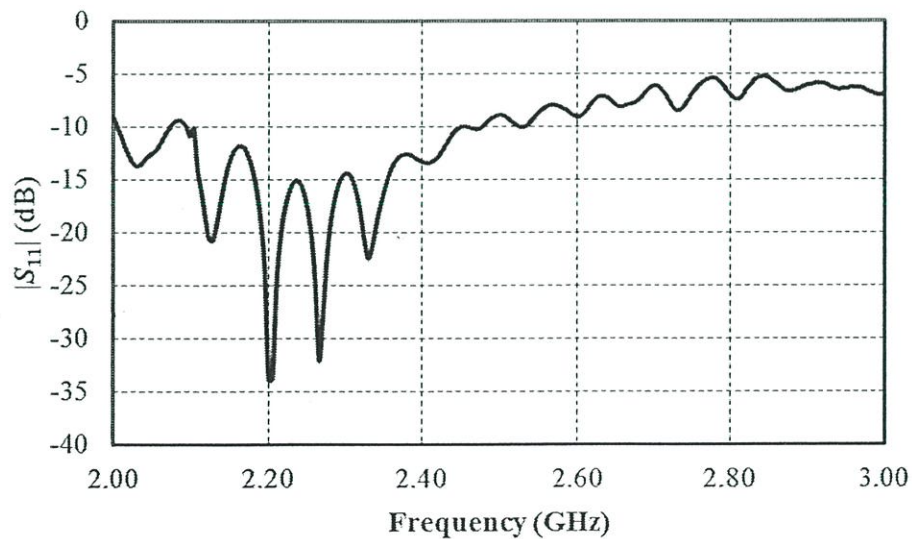
รูปที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz
เมื่อให้สายอากาศด้านซ้ายทำงาน

จากรูปที่ 4.16 (ก) เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz โดยพบว่าผลการทดสอบ มีลำคลื่นหลักชี้ไปทางด้านซ้าย 20 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนที่มุมอื่นๆ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 20 องศา จากรูป 4.16 (ข) ในระนาบ yz ผลการทดสอบ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 60 องศา และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง โดยมีอัตราขยายที่มุม -20 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4.17



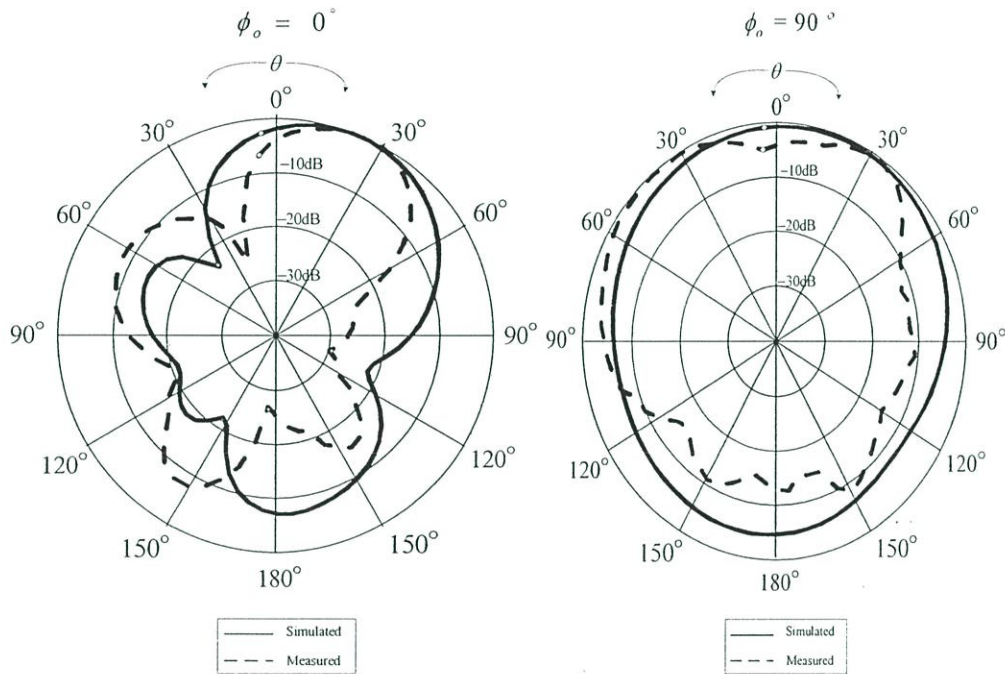
รูปที่ 4.17 อัตราขยายของสายอากาศที่มุม -20 องศา เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน

จากรูปที่ 4.17 อัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน โดยแสดงตั้งแต่ 2.4 - 2.5 GHz ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.77 dBi และ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน

จากรูปที่ 4.18 $|S_{11}|$ ของสายอากาศครอบคลุมความถี่ใช้งาน โดยที่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -10.059 dB ซึ่งหมายความว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้

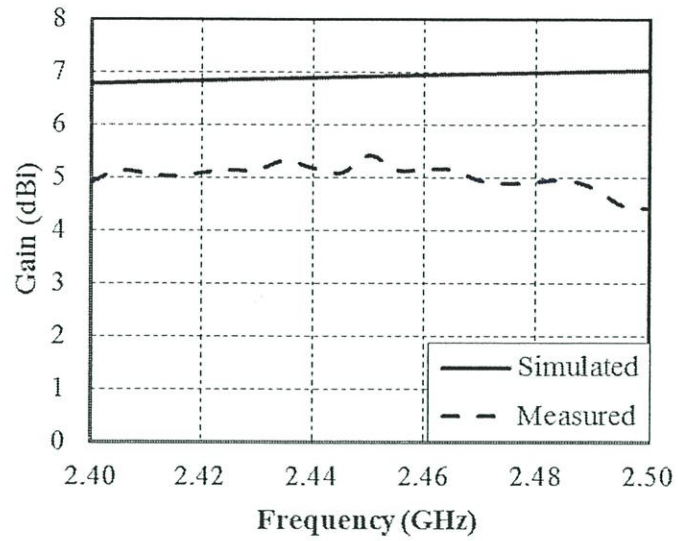


(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

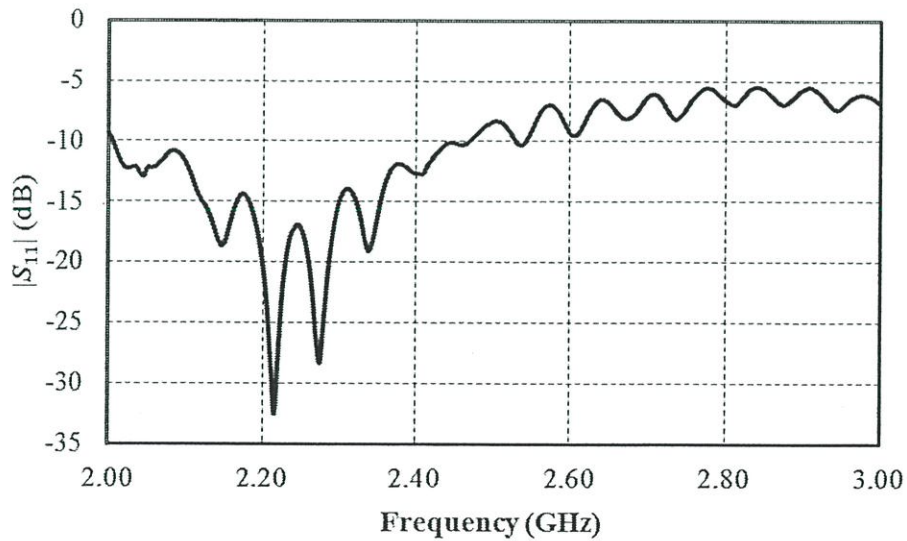
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz
เมื่อให้สายอากาศด้านขวาทำงาน

จากรูปที่ 4.19 (ก) เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz โดยพบว่าผลการทดสอบ มีลำคลื่นหลักชี้ไปทางด้านขวา 25 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนที่มุมอื่นๆ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 35 องศา จากรูป 4.19 (ข) ในระนาบ yz ผลการทดสอบ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 70 องศา และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง โดยมีอัตราขยายที่มุม 25 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 อัตราขยายที่มุม 25 องศา เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน

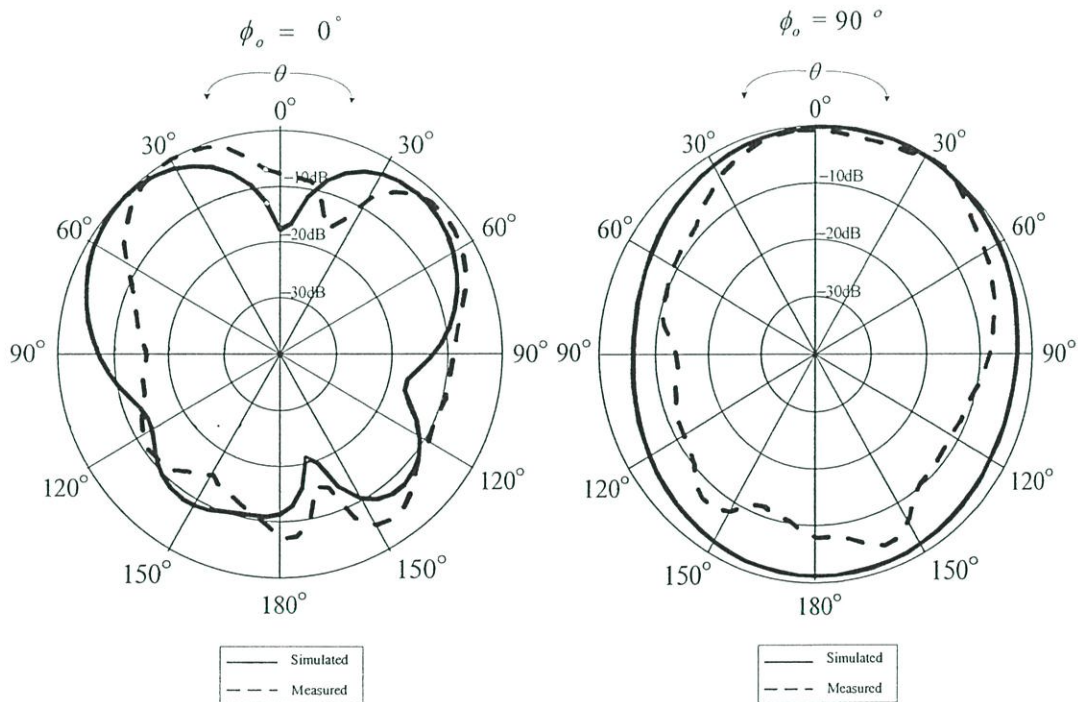
จากรูปที่ 4.20 อัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน โดยแสดง ตั้งแต่ 2.4 - 2.5 GHz ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.41 dBi และ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน

จากรูปที่ 4.21 $|S_{11}|$ ของสายอากาศครอบคลุมความถี่ใช้งาน โดยที่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -10.148 dB ซึ่งหมายความว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้

จากนั้นได้ทำการเปลี่ยนสายนำสัญญาณ โดยใช้สายนำสัญญาณอีก 1 คู่ ซึ่งมีเฟสที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 320 องศา เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสวิตช์อาร์เอฟและสายอากาศตัวที่ 1 และสายอากาศตัวที่ 3 ซึ่งสายอากาศตัวที่ 2 มีเฟสเท่ากับ 165 องศา ทำให้เฟสต่างที่ป้อนให้ระหว่างองค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 155 องศา โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อสายอากาศด้านซ้าย (ตัวที่ 1) ทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.22 และเมื่อให้สายอากาศด้านขวา (ตัวที่ 3) ทำงาน แสดงได้ดังรูปที่ 4.25



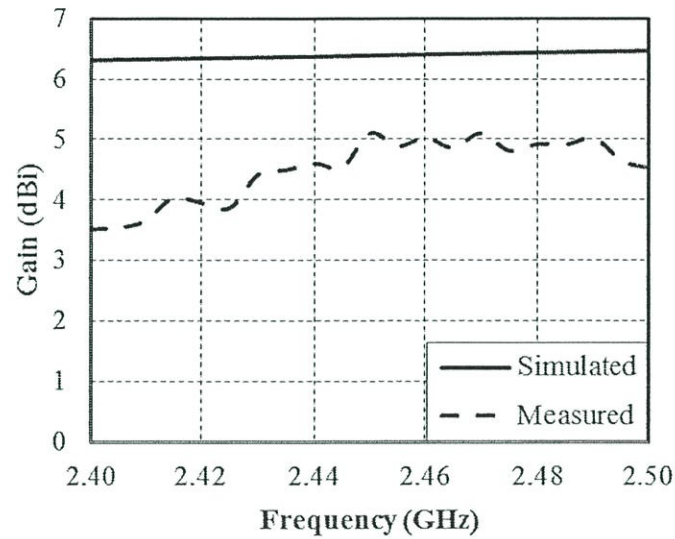
(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz
เมื่อให้สายอากาศด้านซ้ายทำงาน

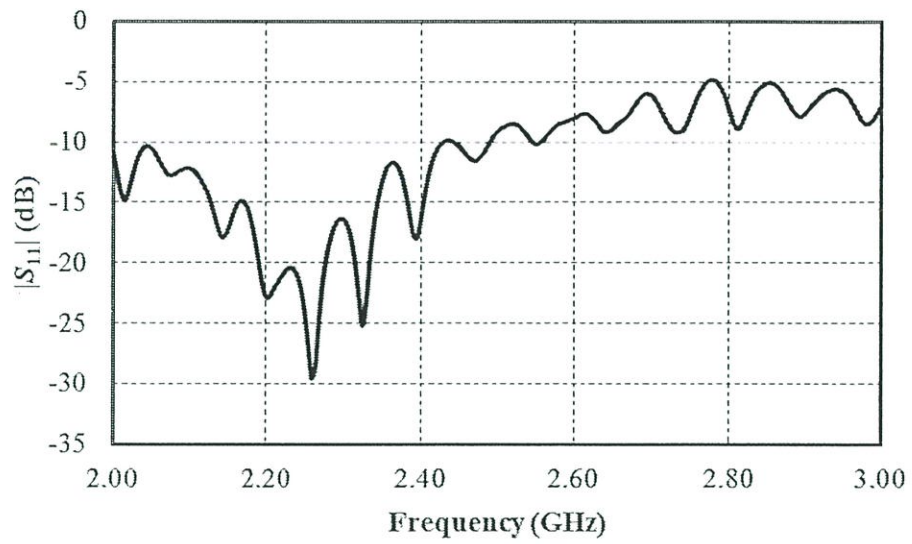
จากรูปที่ 4.22 (ก) เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz โดยพบว่าผลการทดสอบ มีลำคลื่นหลักชี้ไปทางด้านซ้าย 30 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง แต่ก็ยังมีความ

ผิวด้านที่มุมอื่นๆ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 30 องศา จากรูป 4.22 (ข) ในระนาบ yz ผลการทดสอบ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 75 องศา และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง โดยมีอัตราขยายที่มุม -30 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4.23



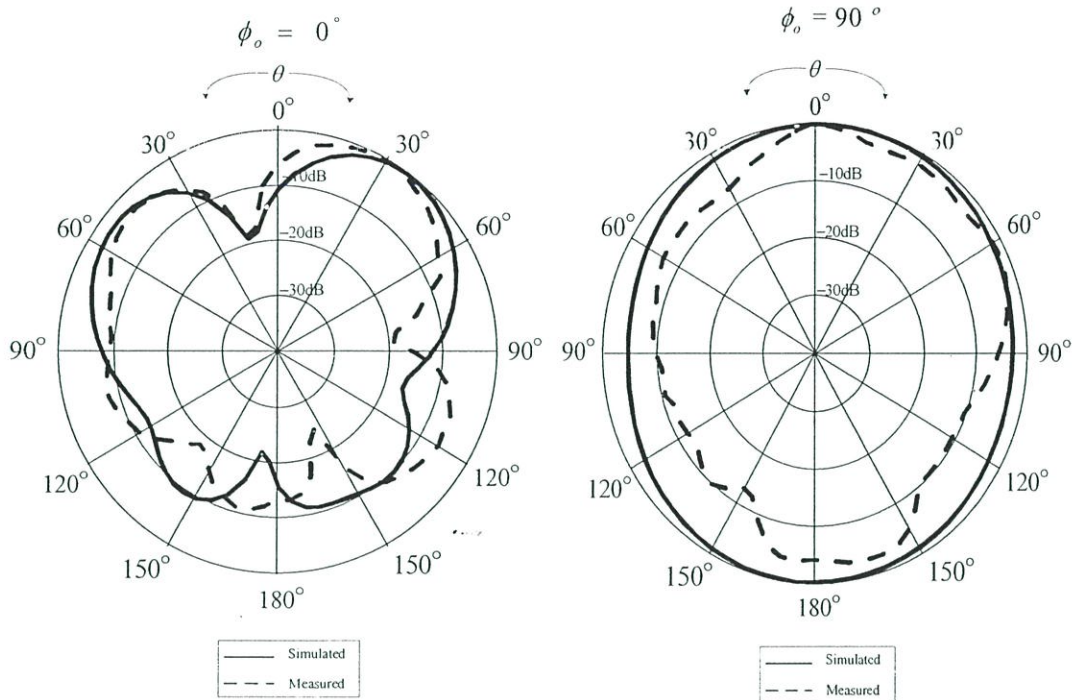
รูปที่ 4.23 อัตราขยายของสายอากาศที่มุม -30 องศา เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน

จากรูปที่ 4.23 อัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน โดยแสดงตั้งแต่ 2.4 - 2.5 GHz ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.09 dBi และ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน
เมื่อเฟสต่างขององค์ประกอบ 155 องศา

จากรูปที่ 4.24 $|S_{11}|$ ของสายอากาศครอบคลุมความถี่ใช้งาน โดยที่ 2.45 GHz มีค่า
เท่ากับ -10.426 dB ซึ่งหมายความว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้

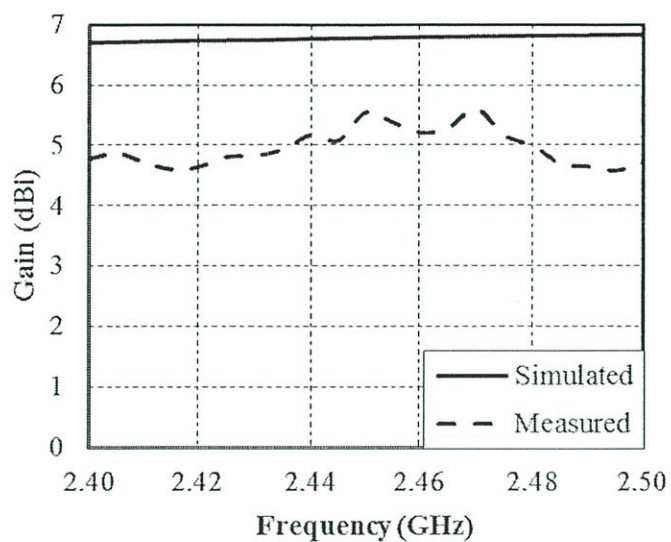


(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

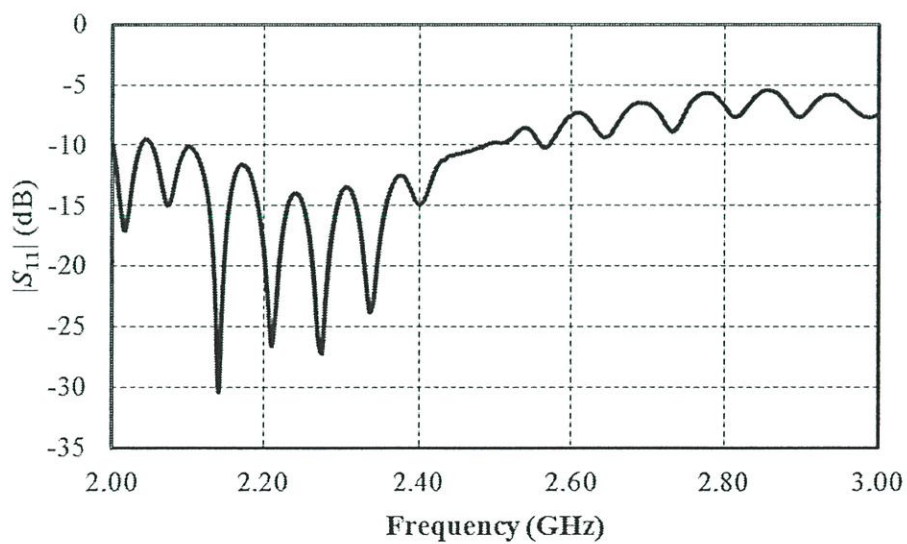
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz
เมื่อให้สายอากาศด้านขวาทำงาน

จากรูปที่ 4.25 (ก) เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz โดยพบว่าผลการทดสอบ มีลำคลื่นหลักชี้ไปทางด้านขวา 30 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนที่มุมอื่นๆ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 45 องศา จากรูป 4.19 (ข) ในระนาบ yz ผลการทดสอบ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 90 องศา และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง โดยมีอัตราขยายที่มุม 30 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.26 อัตราขยายที่มุม 30 องศา เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน

จากรูปที่ 4.26 อัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน โดยแสดง ตั้งแต่ 2.4 - 2.5 GHz ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.54 dBi และ $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อสายอากาศด้านขวาทำงาน เมื่อเฟสต่างขององค์ประกอบ 155 องศา

จากรูปที่ 4.27 $|S_{11}|$ ของสายอากาศครอบคลุมความถี่ใช้งาน โดยที่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -10.729 dB ซึ่งหมายความว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้

4.7 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป ทิศทางเดียวที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz โดยศึกษา $|S_{11}|$ อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยผลจากการจำลอง $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งาน 2.4- 2.48 GHz และที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มี $|S_{11}|$ เท่ากับ -28.13 dB โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 41.5 % จะเห็นได้ว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ส่วนผลการจำลองและผลของทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ โดยที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ได้เท่ากับ 4.19 dBi และสุดท้ายเป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยนำผลของการจำลองและผลจากทดสอบมาเปรียบเทียบกัน โดยที่ความถี่ 2.45 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว จากผลการทดสอบ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 105 องศา และ 95 องศา ตามลำดับ มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 8.69 dB และ 10.00 dB โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบมีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องไปในทางเดียวกัน อาจมีผลมาจากความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศไมโครสตริปที่มีขนาดเล็ก ทำให้รายละเอียดต่ำผิดพลาดได้ง่าย รวมถึงปัจจัยต่างๆที่เข้ามาเกี่ยวข้องในการสร้างสายอากาศ เช่น สภาพแวดล้อมต่างๆ อุปกรณ์ในขณะทดสอบ รวมถึงคุณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศ ในขณะที่การจำลองสายอากาศนั้นจะไม่มีผลจากปัจจัยภายนอก และไม่มีการสูญเสียต่างๆ ที่เป็นอุปสรรคในการสร้างสายอากาศเข้ามาเกี่ยวข้อง จากนั้นทำการทดสอบวงจรสวิตช์อาร์เอฟ โดยผลการทดสอบ $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ของวงจรมีค่าเท่ากับ -17.13 dB และ 11.05 dB ตามลำดับ มีค่าการแทรกสอดของตัววงจรหรือ $|S_{12}|$ เท่ากับ -2.09 dB ซึ่งหมายความว่าวงจรสวิตช์อาร์เอฟสามารถทำงานได้ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ส่วนของวงจรแบ่งกำลังงาน จากการทดสอบ มี $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ และ $|S_{12}|$ ของตัววงจรเท่ากับ -12.755 dB -21.332 dB และ -2.635 dB ตามลำดับ ซึ่ง $|S_{12}|$ มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB แสดงว่าที่พอร์ตเอาต์พุตมีการแบ่งกำลังงานไปครึ่งหนึ่ง สุดท้ายทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเป็นการทำงานร่วมกัน

ของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น 3 ตัววางตัวในแนวแกน x วงจรสวิตช์อาร์เอฟ และวงจรแบ่งกำลังงาน โดยมีการป้อนเฟสระหว่างองค์ประกอบให้มีค่าต่างกันเท่ากับ 55 องศา (โดยใช้สายนำสัญญาณเฟส 165 องศา และ 110 องศา) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อสายอากาศด้านซ้ายทำงาน และด้านขวาไม่ทำงาน ในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz ลำคลื่นหลักจะชี้ไปในทางด้านซ้าย 20 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ โดยมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 5.77 dBi ส่วนในระนาบ yz ก็มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สอดคล้องกับผลการจำลอง แต่หากให้สายอากาศด้านขวาทำงาน และด้านซ้ายไม่ทำงาน ในระนาบ yz ที่ความถี่ 2.45 GHz ลำคลื่นหลักจะชี้ไปทางด้านขวา 25 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ โดยมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 5.41 dBi ส่วนในระนาบ yz ก็มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สอดคล้องกับผลการจำลอง เมื่อทำการเปลี่ยนเฟสต่างที่ป้อนให้กับองค์ประกอบเท่ากับ 155 องศา ถ้าให้สายอากาศด้านซ้ายทำงาน และด้านขวาไม่ทำงาน ในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz ลำคลื่นหลักจะชี้ไปในทางด้านซ้าย 30 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ โดยมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 5.09 dBi ส่วนในระนาบ yz ก็มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สอดคล้องกับผลการจำลอง แต่หากให้สายอากาศด้านขวาทำงาน และด้านซ้ายไม่ทำงาน ในระนาบ yz ที่ความถี่ 2.45 GHz ลำคลื่นหลักจะชี้ไปทางด้านขวา 30 องศา จากด้านหน้าของสายอากาศ โดยมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 5.54 dBi ส่วนในระนาบ yz ก็มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สอดคล้องกับผลการจำลอง ทำให้ทราบว่าระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารไร้สาย (WLAN) โครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งสร้างจากแผ่นพิมพ์ FR-4 ซึ่งหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วย 2 ชั้นคือ ตัวสะท้อนคลื่น และแผ่นแพตช์ปรสิต โดยการป้อนสัญญาณจะใช้โพรบรูปตัวแอล ซึ่งเป็นแผ่นทองแดงและทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น ใช้ SMA connector เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ โดยจุดประสงค์หลักในการสร้างสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสารของระบบ ระบบสายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่น โดยการควบคุมผ่านวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ซึ่งทำหน้าที่ในการเป็นสวิตช์เปิด-ปิดให้สัญญาณอาร์เอฟผ่าน และมีการใช้งานร่วมกับวงจรแบ่งกำลังงาน เพื่อแบ่งกำลังงานให้แก่ละองค์ประกอบของสายอากาศแกลวลำดับอย่างเท่าๆกัน ทำให้ลำคลื่นหลักให้เข้าไปในทิศทางที่ต้องการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในบทนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ในหัวข้อที่ 5.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งประกอบด้วยผลที่ได้จากการศึกษา ผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปใช้งานที่ 2.45 GHz วงจรสวิตช์อาร์เอฟ และวงจรแบ่งกำลังงาน ส่วนในหัวข้อ 5.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไป

5.1 สรุปเนื้อหาของปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนสายอากาศ และ ส่วนวงจรสวิตช์ลำคลื่น โดยในส่วนแรกจะเริ่มด้วยการอธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการของสายอากาศเบื้องต้น พร้อมทั้งทำการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ จากนั้นทำการปรับปรุงพารามิเตอร์นี้โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อจำลองแบบของสายอากาศ แล้ววิเคราะห์คุณลักษณะ จนได้คุณลักษณะที่เหมาะสม เพียงพอที่จะสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นจึงทำการสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่ $|S_{11}|$ อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่าผลการเปรียบเทียบของ $|S_{11}|$ - อัตราขยายและ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ก็มีผลคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียจากตัวเชื่อมต่อสายนำสัญญาณและสภาพแวดล้อมที่อาจจะส่งต่อการทดสอบจริง ซึ่งในการจำลองไม่มีสภาพแวดล้อมดังกล่าวมาเกี่ยวข้องและจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่าโครงสร้างของสายอากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการบ่งบอกคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในกรณีต่างๆ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อสายอากาศไมโครสตริปใช้งานที่ 2.45 GHz ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz

สัญลักษณ์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_g	40
L_p	28
W_g	55
W_p	30
L_h	15
L_v	12
H	23

หลังจากปรับปรุงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมแล้วจึงใช้สายอากาศไมโครสตริป 3 ตัวประกอบรวมกันเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ได้แก่ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยมีการออกแบบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ เพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตซ์เปิด-ปิดให้สัญญาณอาร์เอฟผ่าน โดยควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับชั่วคราวของวงจร ทำงานร่วมกับวงจรแบ่งกำลังงาน ซึ่งจะทำการกำลังงานที่เข้าไปสู่องค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับถูกแบ่งอย่างเท่าๆกัน ระบบสายอากาศสวิตซ์ลำดับนี้สามารถควบคุมทิศทางของลำคลื่นหลักให้ชี้ไปในทิศทางใดๆ ขึ้นอยู่กับเฟสต่างที่ป้อนให้กับองค์ประกอบ โดยควบคุมจากการใช้สายนำสัญญาณ 4 เส้น โดย 2 เส้นแรกมีเฟสเท่ากัน ส่วนอีก 2 เส้นก็กำหนดให้มีเฟสเท่ากันอีกค่าหนึ่ง และการสวิตซ์ของวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ ซึ่งผลการทดสอบของระบบสวิตซ์ลำดับ พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการสร้างสายอากาศไมโครสตริปความถี่ 2.45 GHz พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบ จะมีผลคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลองเนื่องจากการสูญเสียจากตัวเชื่อมต่อสายนำสัญญาณและสภาพแวดล้อมในการทดสอบ การทดสอบของวงจรสวิตช์อาร์เอฟก็ทำให้ทราบว่าวงจรสามารถนำไปใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ แต่ผลก็ยังคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองอยู่พอสมควร เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาใช้สร้างมีขนาดเล็กและต้องใช้ความละเอียดในการสร้างสูง

5.2.1 วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น

สำหรับอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้โครงสร้างปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริปใช้งานที่ 2.45 GHz คือการจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจำเป็นจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก และในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางตัวจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ อันได้แก่ $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จะต้องตรวจสอบ $|S_{11}|$ ให้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ อีกทั้งในการสร้างสายอากาศต้นแบบ และวงจรสวิตช์อาร์เอฟต้นแบบ ซึ่งมีขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้ความละเอียดสูงเพื่อที่จะทำให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับผลการจำลองมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบมีเกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่สายอากาศและวงจรสวิตช์อาร์เอฟ ยังสามารถทำงานที่ความถี่ที่เราต้องการใช้งาน คือ 2.45 GHz ได้

5.2.2 แนวทางพัฒนา

สำหรับปัญหานี้ได้ทำการออกแบบระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยตัวระบบประกอบไปด้วยสายอากาศไมโครสตริป 3 ตัวประกอบเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ วงจรสวิตช์อาร์เอฟ และวงจรแบ่งกำลังงาน เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนี้ด้วยการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ เพื่อให้มีอัตราขยายที่สูงขึ้น และสามารถปรับทิศทางการสวิตช์ลำคลื่นได้ดีขึ้น ออกแบบวงจรสวิตช์อาร์เอฟให้มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น อาจจะใช้เป็นโครงสร้างแบบ SP4T สวิตช์ หรือ SP8T เพื่อควบคุมการส่งผ่านสัญญาณอาร์เอฟได้หลากหลายยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Wi-Fi Communication Point to Point Link, <http://trade.indiamart.com/details.mp?offer=2177342688>
- [2] ระบบเครือข่ายแลนไร้สาย IEEE 802.11 (Wireless LAN), http://www.thaicert.nectec.or.th/paper/wireless/IEEE80211_1.php
- [3] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory: Analysis and Design*”, John Wiley & Son, Inc., 2005.
- [4] I. J. Bahl and P. Bhartia, “*Microstrip Antenna*”, Artech House, 1980.
- [5] R. Garg, p. Bhartia, I. Bahl and A. Ittipiboon, “*Microstrip Antenna Design Handbook*”, Imprint Boston : Artech House, 2001.
- [6] D. M. Pozar, “*Microwave Engineering*”, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005
- [7] P. Hazdra, M. Mazanek and J. Cermak, “*Wideband Rectangular Microstrip Patch Antenna Using L-Probe Feeding System*”, Radio Engineering, Vol 16, No.3, September 2007.
- [8] BAP64-05 (Phillips), <http://doc.chipfind.ru/philips/bap6405.htm>