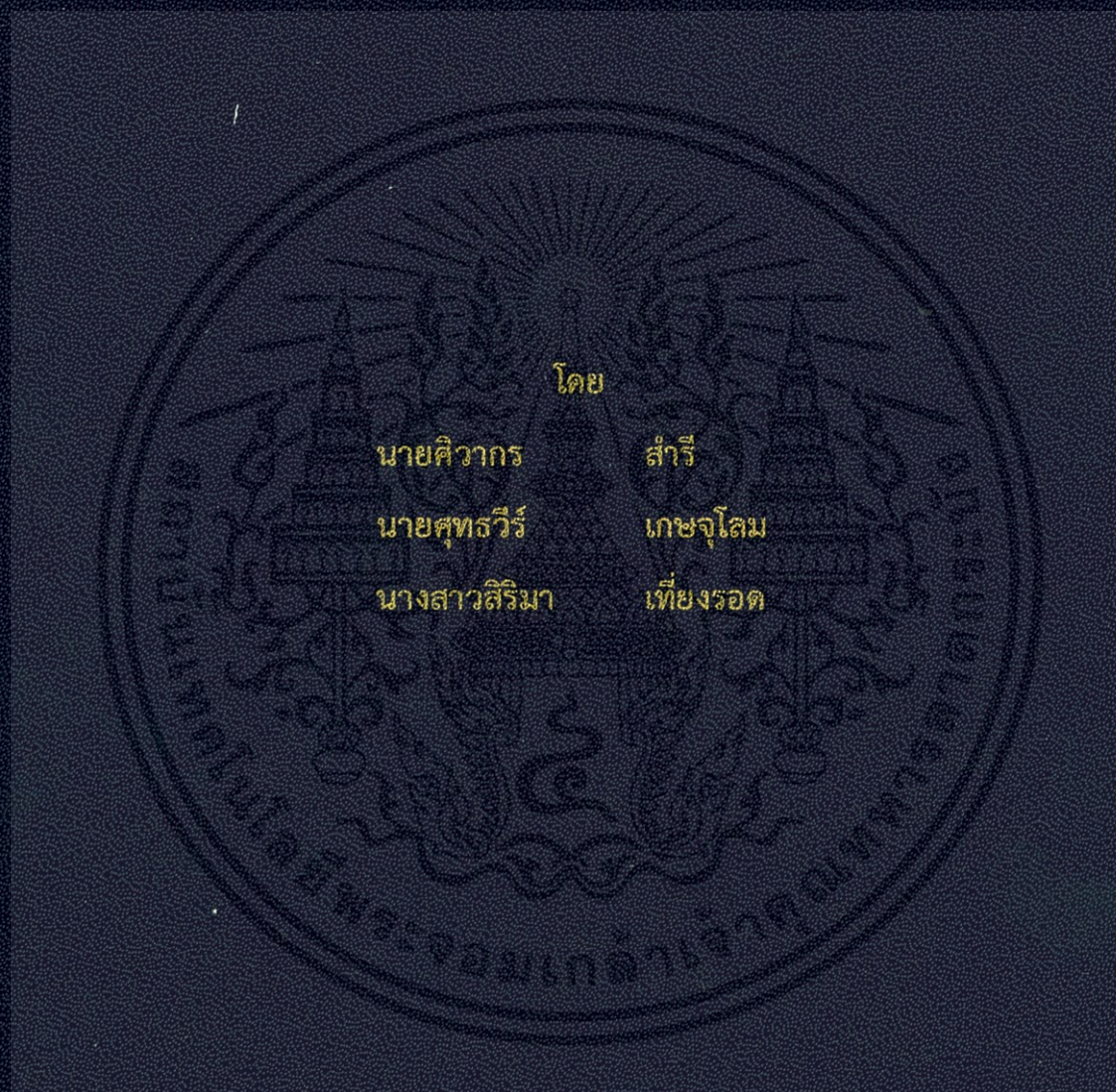


การสื่อสารไร้สายในพุ่มไม้

WIRELESS COMMUNICATIONS IN A TREE CANOPY



โดย

นายศิวากร

สำรี

นายศุภรวิร์

เกษจุโลม

นางสาวสิริมา

เที่ยงรอด

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

# การสื่อสารไร้สายในพุ่มไม้

WIRELESS COMMUNICATIONS IN A TREE CANOPY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสื่อสารไร้สายในพุ่มไม้

## WIRELESS COMMUNICATIONS IN A TREE CANOPY

โดย

นายคิวกกร	สำรี	53011584
นายศุทธวีร์	เกษจุโลม	53011585
นางสาวสิริมา	เที่ยงรอด	53011707

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

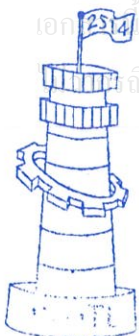
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ผ่านการตรวจรับเล่มแล้ว

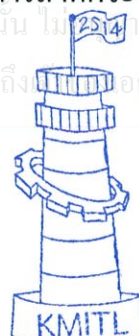
(.....)  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
15/3/56



วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(.....)  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน  
14/3/56



วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสื่อสารในพุ่มไม้

WIRELESS COMMUNICATIONS IN A TREE CANOPY

ผู้จัดทำ

- |                 |           |          |
|-----------------|-----------|----------|
| 1. นายศิวากร    | สำรี      | 53011584 |
| 2. นายศุภธวีร์  | เกษจุโลม  | 53011585 |
| 3. นางสาวสิริมา | เที่ยงรอด | 53011707 |

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ศ.ดร. โมนัย ไกรฤกษ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการจนเสร็จตามวัตถุประสงค์ที่จัดทำตั้งใจไว้ทุกประการโดยได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการศึกษา ออกแบบ และการสร้าง จากอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำที่ดีในการดำเนินงานและช่วยเหลือสนับสนุนในทุกด้านตลอดจน พี่ๆปริญญาโทและเอก ที่ให้คำแนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ทำให้ปริญญาานิพนธ์บรรลุตามวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งใจไว้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้ หายสุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารไร้สายในพุ่มไม้  
WIRELESS COMMUNICATIONS IN A TREE CANOPY

โดย นาย ศิวากร สำรี	53011584
นาย ศุภวีร์ เกษจุโลม	53011585
นางสาว สิริมา เทียงรอด	53011707

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบเพื่อติดตั้งระบบกล้องบันทึกวิดีโอไร้สายในพุ่มไม้ โดยช่องสัญญาณในพุ่มไม้ จะเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบต่างๆ ของต้นไม้ เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ และลำต้น สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณลดลง ปริญญานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการลดปัญหาโดยการ ออกแบบสายอากาศที่สามารถจัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ เพื่อนำมาใช้ในระบบ สายอากาศที่ นำมาใช้ คือสายอากาศยาภิแพทซ์ ที่มีองค์ประกอบการป้อนและองค์ประกอบการสะท้อน เป็นตัว ควบคุมให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยสายอากาศในองค์ประกอบดังกล่าวมีจุดป้อน สัญญาณ 2 พอร์ต ทำงานที่ความถี่ 2.41 GHz และ 2.45 GHz โดยในการออกแบบสายอากาศ จะใช้ โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการคำนวณและหาค่าที่เหมาะสม จากผลการวัดสายอากาศที่สร้าง ขึ้น พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.41 GHz และ 2.45 GHz ตามตำแหน่งการป้อนของ แต่ละพอร์ต โดยมีอัตราขยาย 4.03 dBi และ 5.87 dBi ตามลำดับ และสามารถนำไปติดตั้งเพื่อใช้งาน จริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ABSTRACT**

THIS THESIS PRESENTS THE SYSTEM DESIGN FOR INSTALLING WIRELESS VIDEO CAMERAS IN A TREE CANOPY. THE PROPAGATION CHANNEL IN A TREE CANOPY VARIES BY ITS LEAVES, BRANCHES AND STEMS OF A TREE. THEREFORE, THE SIGNAL QUALITY WOULD DROP FROM INTERFERENCE, MULTIPATH AND FADING. THIS THESIS PRESENTS THE MULTIBEAM ANTENNA IN WHICH TWO RADIATION PATTERNS CAN BE DESIGNED. THE DESIGNED SYSTEM UTILIZES THE YAGI-PATCH ANTENNA WHERE THE DRIVEN AND REFLECTOR ELEMENT ARE USED TO FORM THE UNIDIRECTIONAL PATTERN. THE ANTENNA HAS 2-PORT FEED PROBE AT DRIVEN ELEMENT AND OPERATES AT 2.41 GHZ AND 2.45 GHZ, RESPECTIVELY. THE ELECTROMAGNETIC SIMULATION PROGRAM IS USED TO DESIGN THE PROPER DIMENSIONS OF THE ANTENNA. THE MEASUREMENT RESULT CONFIRMS THAT THE ANTENNA WORKS AT THE DESIGN FREQUENCY AND THE ANTENNA GAIN IS 4.03 DBI AND 5.87 DBI, RESPECTIVELY.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	XI
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>
	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1
1.2	วัตถุประสงค์
	2
1.3	ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>
	3
2.1	ทฤษฎีและหลักการของระบบสื่อสารไร้สาย
	3
2.2	ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของสายอากาศ
	9
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>
	36
3.1	การออกแบบระบบและการทดสอบอุปกรณ์ในระบบ
	36
3.2	การออกแบบและการจำลองผลของสายอากาศยาก็แพทช์
	40
3.3	สายอากาศยาก็แพทช์ต้นแบบ
	48
3.4	การทดลองสายอากาศเมื่อมีลักษณะช่องสัญญาณพุ่มไม้
	53
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลอง</b>
	55
4.1	ผลการทดลองและบทวิเคราะห์การทดสอบช่องสัญญาณ
	55
4.2	ผลการทดลองและบทวิเคราะห์การทดสอบอุปกรณ์ส่งสัญญาณ
	56
4.3	ผลการทดลองและบทวิเคราะห์การออกสายอากาศยาก็แพทช์
	56
4.4	ผลการทดลองและบทวิเคราะห์สายอากาศลักษณะช่องสัญญาณพุ่มไม้
	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดลองการลดทอนของสายส่วนภาครับสัญญาณ	64
บทที่ 5   สรุปผลและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผล	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก ก BUMBLEBEE SPECTRUM ANALYZER	70
ภาคผนวก ข Coaxial Cable RG58	74
ภาคผนวก ค SMA Connector	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างของต้นไม้	2
2.1	องค์ประกอบของระบบสื่อสารไร้สาย	3
2.2	โครงสร้างของระบบและการเกิดการลดทอนในช่องสัญญาณ	4
2.3	แสดงการ FADING ในรูปแบบต่าง	4
2.4	เส้นทางการเดินทางของคลื่น	6
2.5	กราฟค่าMEAN SIGNAL POWER และ MEAN NOISE POWER	8
2.6	THEORETICAL RAYLEIGH PDF	8
2.7	THEORETICAL Rician PDF	8
2.8	สายอากาศไมโครสตริปและระบบโคออดิเนต	11
2.9	แผ่นตัวนำรูปทรงต่างๆ	11
2.10	ชนิดของการป้อนสำหรับสายอากาศไมโครสตริป	13
2.11	วงจรมุมูลสำหรับการป้อนรูปที่ 2.10	13
2.12	สายนำสัญญาณไมโครสตริป เส้นสนามไฟฟ้าและโครงสร้างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพ	15
2.13	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพเทียบกับความถี่	17
2.14	โครงสร้างทางกายและยาวประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	18
2.15	แพทช์สี่เหลี่ยมและวงกลม	19
2.16	แพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงจรมุมูล	20
2.17	ค่าความนำของช่องเทียบกับความกว้างของช่อง	20
2.18	การป้อนแบบอินเซตและการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานด้านเข้านอมอลไลซ์	22
2.19	การกระจายของประจุและความเข้มของกระแสที่เกิดจากแพทช์ไมโครสตริป	25
2.20	โครงสร้างสายอากาศยาภิ-อูดะและองค์ประกอบต่างๆ	27
2.21	อาร์เรย์สององค์ประกอบของไดโพล เรโซแนนซ์ยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ประกอบด้วยตัวขับและพาราซิติกอย่างละหนึ่งตัว	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.22	การจัดวางของสายอากาศยาก็-อูตะโดยทั่วไป	28
2.23	อาร์เรย์สององค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว $L = 0.47\lambda$	29
2.24	อาร์เรย์สององค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว $L = 0.47\lambda$ ตัวสะท้อนยาว $0.482\lambda$ และตัวไดเร็กเตอร์ยาว $0.442\lambda$ วางห่างกัน $0.2\lambda$ โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบคือ $0.00425\lambda$	29
2.25	อาร์เรย์สามองค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว $L = 0.47\lambda$ ตัวสะท้อนยาว $0.482\lambda$ และตัวไดเร็กเตอร์ยาว $0.442\lambda$ วางห่างกัน $0.2\lambda$ โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบคือ $0.00425\lambda$	29
2.26	อัตราขยายเทียบหน่วย dBd ของไดโพลกับตัวสะท้อนเมื่อระยะห่าง $S_R$ ที่ต่างกัน	31
2.27	อัตราขยายสายอากาศยาก็-อูตะทั่วไปเทียบกับจำนวนขององค์ประกอบ โดยระยะห่าง $S_R = S_D = 0.15\lambda$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด เท่ากับ $0.0025\lambda$	31
2.28	สายเส้นที่ใช้ในการออกแบบตามตารางที่ 2.1	34
2.29	ผลกระทบของมุมโลหะต่อความยาวพาราสิติกของยาก็	34
2.30	ขนาดของกระแสสัมพัทธ์สำหรับยาก็จำนวน 27 องค์ประกอบ (27E)	35
2.31	ความเร็วเฟสสัมพัทธ์ $c/v = \lambda/\lambda_g$ สำหรับสายอากาศคลื่นผิวที่มีอัตราขยายสูงสุดเทียบกับฟังก์ชันของความยาวสายอากาศ $h/\lambda$	35
3.1	ตำแหน่งระบบการติดตั้งกล่องบันทึกวิดีโอไร้สาย	36
3.2	การสูญเสียจากระยะทางที่ตำแหน่งต่างๆ	37
3.3	การติดตั้งการทดลองช่องสัญญาณ	38
3.4	การติดตั้งการทดลองอุปกรณ์ส่งสัญญาณ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	อาร์เรย์สององค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว $L = 0.47\lambda$ และตัวสะท้อนยาว $0.482\lambda$ วางห่างกัน $0.15\lambda - 0.25\lambda$ โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบคือ $0.00425\lambda$	41
3.6	โครงสร้างสายอากาศยาคิแพทซ์	43
3.7	การจำลองที่ $ S_{11} $ สำหรับค่า $W_y$ ต่างๆ	44
3.8	การจำลองที่ $ S_{22} $ สำหรับค่า $W_x$ ต่างๆ	45
3.9	การจำลองที่ $ S_{21} ,  S_{12} $ สำหรับค่า $f_x, f_y$ ต่างๆ	46
3.10	ตัวอย่างทิศทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ	46
3.11	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นค่า $\alpha_x$ ต่างๆ	47
3.12	$ S_{11} $ ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	48
3.13	$ S_{22} $ ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	49
3.14	$ S_{22} $ ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	49
3.15	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของจุดบ่อนที่ 1 ที่ความถี่ 2.41 GHz ที่ได้จากการจำลอง (ก) AZIMUTH PLANE (ข) ELEVATION PLANE	50
3.16	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของจุดบ่อนที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้จากการจำลอง (ก) Azimuth plane (ข) Elevation plane	51
3.17	องค์ประกอบลักษณะในการติดตั้งเพื่อทดลองช่องสัญญาณพุ่มไม้ในลักษณะต่างๆ	53
3.18	ช่องสัญญาณพุ่มไม้กรณีที่ 1	54
3.19	ช่องสัญญาณพุ่มไม้กรณีที่ 2	54
3.20	ช่องสัญญาณพุ่มไม้กรณีที่ 3	54
4.1	กำลังงานของสัญญาณที่เครื่องรับรับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทาง	55
4.2	บริเวณที่ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงระยะทาง	55
4.3	(ก) EIRP และ (ข) ความถี่การทำงานของเครื่องส่งเมื่อทำการลดแรงดันไฟเลี้ยงลง	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

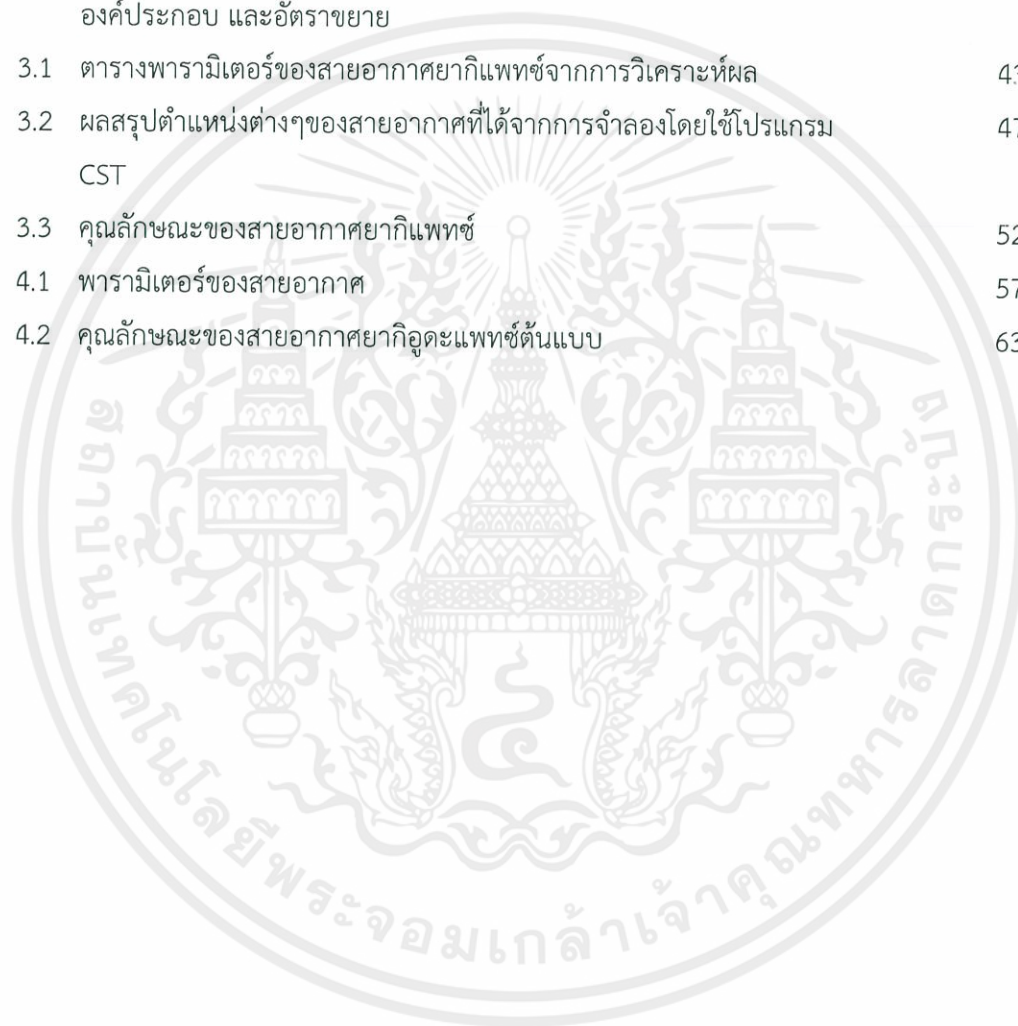
## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	สายอากาศยาก็อูตะแพทช์ต้นแบบ	57
4.5	การติดตั้งอุปกรณ์	58
4.6	ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศ	58
4.7	ค่า $ S_{22} $ ของสายอากาศ	59
4.8	ค่า $ S_{21} $ และ $ S_{12} $ ของสายอากาศ	59
4.9	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการส่งผ่านของสายอากาศ	60
4.10	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจุดบ่อนที่ 1 ที่ความถี่ 2.41 GHz	61
4.11	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจุดบ่อนที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz	61
4.12	ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของกำลังสัญญาณที่ได้รับ	64
4.13	เปรียบเทียบการลดทอนของสาย	65
4.14	เปรียบเทียบการลดทอนของหัวเชื่อมต่อ	65
5.1	เปรียบเทียบการรับสัญญาณระหว่างสายอากาศยาก็อูตะแพทช์และสายอากาศโมนโพล	66
5.2	อุปกรณ์ในระบบที่ใช้ในการติดตั้ง	67
5.3	(ก) สถานที่จริงที่ได้ทำการติดตั้ง (ข) ภาพที่ได้จากการติดตั้งบันทึกผล	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดความยาวของแต่ละองค์ประกอบ ความยาวบวม ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ และอัตราขยาย	33
3.1	ตารางพารามิเตอร์ของสายอากาศยาภิแพทช์จากการวิเคราะห์ผล	43
3.2	ผลสรุปตำแหน่งต่างๆของสายอากาศที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST	47
3.3	คุณลักษณะของสายอากาศยาภิแพทช์	52
4.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศ	57
4.2	คุณลักษณะของสายอากาศยาภิอู๊ดะแพทช์ต้นแบบ	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากทางคณะผู้จัดทำได้สังเกตเห็นความเสียหายของผลมะม่วงที่เกิดจากการทำลายของสัตว์ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญมากทางการเกษตร เพราะส่งผลถึงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของเกษตรกร ทางคณะผู้จัดทำจึงต้องการออกแบบระบบ เพื่อติดตามเฝ้าสังเกตพฤติกรรมของสัตว์เพื่อเฝ้าระวังการทำลายผลมะม่วงของสัตว์เหล่านั้น โดยนำระบบกล้องบันทึกวิดีโอไร้สายมาใช้บันทึกภาพพฤติกรรมของสัตว์ที่มาทำลายผลมะม่วง แต่เนื่องด้วยผลกระทบของช่องสัญญาณ (Channel) ระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งไม่เป็นอวกาศว่าง (Free space) เมื่อทำการส่งสัญญาณจากกล้องวิดีโอที่ติดตั้งบนพุ่มไม้มายังเครื่องรับภายในบริเวณที่สามารถติดตั้งหน้าจอแสดงผลได้นั้น เป็นช่องสัญญาณที่ประกอบไปด้วย ใบไม้ กิ่งไม้ ลำต้น และสภาพอากาศดังรูปที่ 1.1 ทำให้สัญญาณเดินทางมายังเครื่องรับประกอบไปด้วยหลายส่วน ไม่ว่าจะเส้นทางตรง (Direct path) ที่มาจากเครื่องส่ง รวมทั้งคลื่นหลายวิถี (Multipath) ที่เกิดจากการสะท้อน (Reflect) เลี้ยวเบน (Diffract) และการกระเจิง (Scatter) เมื่อคลื่นเดินทางมายังเครื่องรับอาจมีการเสริมหรือหักล้างกันของคลื่นขึ้นอยู่กับระยะทางที่คลื่นเดินทาง สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise source) นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนจากความร้อนของเครื่อง (Thermal noise) รวมทั้งการแทรกสอดจากชั้นบรรยากาศ อิทธิพลเหล่านี้ทำให้กำลังสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้น ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีค่าไม่คงที่ หรือเกิดการจางหายของสัญญาณได้

ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ศึกษาลักษณะจำเพาะของช่องสัญญาณ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพและทำการทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ในระบบโดยเพื่อให้ทราบถึงกำลังงานที่เพียงพอสำหรับการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณดังกล่าว เพื่อเป็นการลดปัญหาที่เกิดจากการลดสัญญาณจากการแทรกสอดระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง จึงสร้างสายอากาศใหม่เพื่อนำมาทดแทนสายอากาศรับสัญญาณเดิม ซึ่งเป็นสายอากาศแบบโมโนโพล (Monopole antenna) ซึ่งมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นรอบทิศทาง (Omnidirectional pattern) วิธีการแก้ปัญหาหนึ่งคือการนำสายอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้ (Reconfigurable antenna) เช่นการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ ความถี่การใช้งาน แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) และทิศทางของสนามไฟฟ้า (Polarization) และอัตราขยาย (Gain) ในที่นี้จึงทำการออกแบบสายอากาศยาก็แพทช์มาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เพื่อให้สามารถรับสัญญาณเฉพาะทิศทางได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของต้นไม้

## 1.2 วัตถุประสงค์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1) นำการศึกษาช่องสัญญาณในพุ่มไม้ มาออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายในพุ่มไม้ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถบันทึกภาพการแผ่รังสีเกิดสิ่งมีชีวิตที่เข้ามาทำลายผลมะม่วงได้

2) สายอากาศยาภิแพทซ์ที่สามารถทำงานได้ โดยมีจุดป้อนสัญญาณ 2 พอร์ต แต่ละพอร์ตทำงานที่ความถี่ 2.41 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเฉพาะทิศทางตรงกับทิศทางการติดตั้งเครื่องส่ง

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ออกแบบระบบการสื่อสารไร้สาย ซึ่งมีช่องสัญญาณเป็นพุ่มไม้ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนำเสนอการออกแบบสายอากาศยาภิแพทซ์ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมี

ทิศทางเฉพาะทิศทาง เพื่อสามารถรับสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากขึ้น โดยสายอากาศดังกล่าวมีจุดป้อนสัญญาณ 2 พอร์ต แต่ละพอร์ตทำงานที่ความถี่ 2.41 GHz และ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

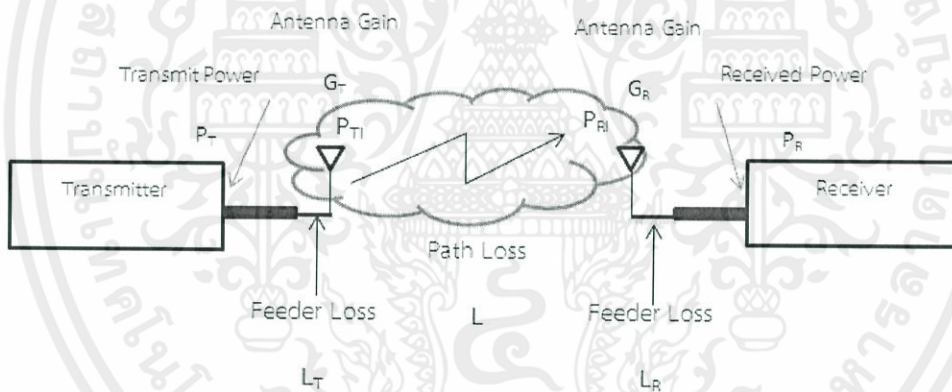
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการของระบบสื่อสารไร้สาย

##### 2.1.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของระบบสื่อสารไร้สาย

ระบบสื่อสารไร้สายในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยเครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังส่ง  $P_T$  ส่งกำลังผ่านสายส่งที่มีการสูญเสีย  $L_T$  ออกอากาศผ่านสายอากาศที่มีอัตราขยาย  $G_T$  คลื่นวิทยุจะเดินทางผ่านตัวกลาง เช่น อวกาศว่าง (Free space) มายังเครื่องรับวิทยุ ทำให้ได้กำลังรับ  $P_R$  เมื่อใช้สายอากาศที่มีอัตราขยาย  $G_R$  และสายส่งที่มีการสูญเสีย  $L_R$  ในกรณีของอวกาศว่าง เราหาการสูญเสียได้จากสมการของฟรีส (Friis equation)



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของระบบสื่อสารไร้สาย [1]

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_T L R} \quad (2.1)$$

$$L = \frac{P_T}{P_R} = \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.2)$$

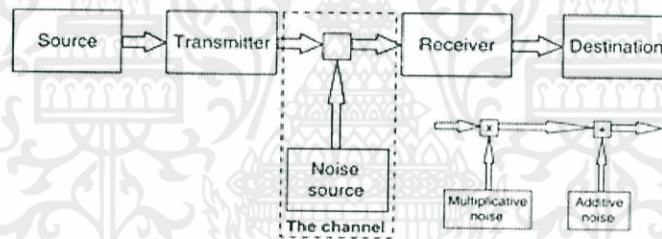
$D$  เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง และ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น เมื่อทำเป็นเดซิเบล จะเขียนสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

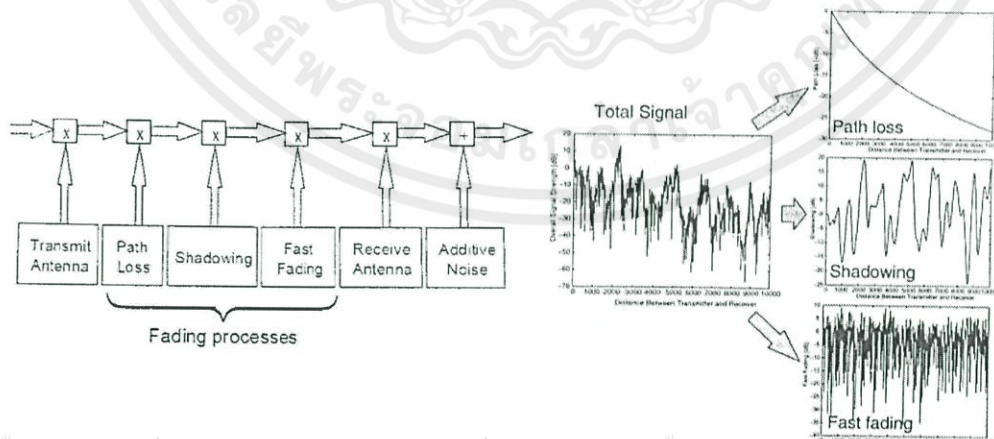
$$L(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{P_T}{P_R} \right) \quad (2.3)$$

ในทางปฏิบัติแล้วช่องสัญญาณ (Channel) ที่อยู่ระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับอาจไม่เป็นอวกาศว่าง ทำให้มีคลื่นที่เดินทางผ่านเครื่องส่งมายังเครื่องรับประกอบด้วยหลายส่วน ไม่ว่าจะ เป็นคลื่นเดินทางตรงมาจากเครื่องส่ง รวมทั้งคลื่นหลายวิถี (Multipath) ที่เกิดจากการสะท้อน (Reflect) จากผนังเรียบของอาคาร เลี้ยวเบน (Diffract) จากขอบของอาคาร กระเจิง (Scatter) จากผิวขรุขระจากสิ่งต่างๆที่มีในช่องสัญญาณ รูปที่ 2.1 ประกอบ ซึ่งคลื่นเหล่านี้เมื่อมาถึงเครื่องรับ จะรวมกันแบบเฟสเซอร์ (Phasor) ที่คิดผลของเฟสด้วย ทำให้อาจเสริมหรือหักล้างกันขึ้นอยู่กับ ระยะทางที่คลื่นเดินทาง สิ่งเหล่านี้จะเป็นบ่อเกิดของสัญญาณรบกวน (Noise source) ที่จะมีค่า เป็นผลคูณกับคลื่นที่ส่งมาจากสายอากาศส่ง

นอกจากนี้สัญญาณรบกวนจากความร้อนในเครื่อง (Thermal noise) รวมทั้งจาก บรรยากาศรวมถึงการแทรกสอด (Interference) ต่างๆจะมีผลในลักษณะผลบวกต่อสัญญาณที่ถูก ส่งมาจากเครื่องส่ง อิทธิพลเหล่านี้ทำให้ขนาดของกำลังที่เครื่องรับมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาได้ ทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าไม่คงที่ มีการจางหาย (Fading) ของสัญญาณ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบและการเกิดการลดทอนในช่องสัญญาณ [1]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.3 แสดงการ Fading ในรูปแบบต่าง [1]  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่สิ่งนี้เนื้อหาและข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น

กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น คือการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระเจิง (Scattering)

#### 2.1.2.1 การสะท้อน (Reflection)

การสะท้อนของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่จากสื่อกลางหนึ่งไปสู่อีกสื่อกลางหนึ่ง โดยสื่อกลางชนิดที่สองจะต้องมีพื้นผิวที่ใหญ่กว่า (มากกว่าความยาวคลื่น) เมื่อเทียบกับความยาวของคลื่นที่มาตกกระทบ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนออก และส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่สื่อกลางชนิดที่สอง ตัวอย่างวัตถุ เช่น ดึก กำแพง และพื้นผิวของขอบโลก เป็นต้น

#### 2.1.2.2 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวาง (Sharp Edge) อยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางตรง (Line of Sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสามารถผ่านไปได้ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมวัตถุนั้นๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้สามารถรับสัญญาณได้บางส่วนถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวาง ด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

#### 2.1.2.3 การกระเจิง (Scattering)

เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับวัตถุหรือพื้นผิวที่มีขนาดเล็ก (น้อยกว่าความยาวคลื่น) เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงไปในทุกทิศทาง ตัวอย่างวัตถุเช่น ป้ายจราจร เสา โคมไฟตามถนน ใบไม้ และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น

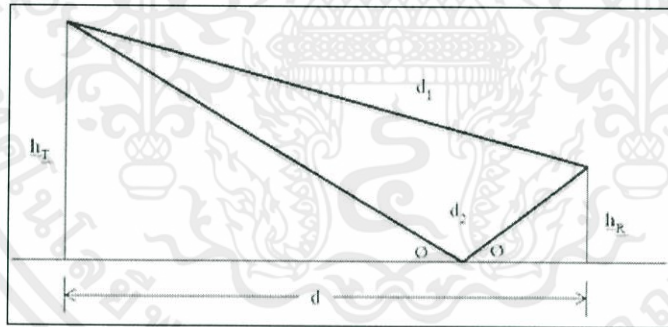
การเกิดการจางหายของสัญญาณเกิดจากปรากฏการณ์ต่างๆ ได้แก่ การสูญเสียตามเส้นทาง (Path loss) ที่ทำให้กำลังลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น การบดบังจากสิ่งกีดขวาง (Shadowing) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างช้าๆ ที่เวลาต่างๆ และการจางหายอย่างรวดเร็ว (Fast fading) ทำให้มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ปรัชญาการณการต่างๆของการจางหายของคลื่น

#### 2.1.3.1 การสูญเสียตามเส้นทาง (Path Loss)

การสูญเสียกำลังในอวกาศว่าง (Free Space Path Loss) เกิดจากการที่คลื่นแพร่กระจายออกไปด้วยมุมที่กว้างทำให้ความเข้มของกำลังคลื่นสัญญาณอ่อนลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นแบบยกกำลังสอง การสูญเสียกำลังของสัญญาณในอวกาศนี้ได้านิยามให้เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา โดยที่คลื่นมีการแพร่กระจายในบริเวณที่ว่างเปล่า (Free Space Propagation) การสูญเสียกำลังเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane Path Loss) ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของพื้นผิวต่อการส่งผ่านสัญญาณโดยเปรียบเทียบกับ การส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่าง ทั้งนี้สมมติให้การส่งผ่านสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวที่ราบเรียบไม่มีสิ่งก่อสร้างใดๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วนคือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรงและส่วนที่สะท้อนพื้นผิวดังที่แสดงในรูป ซึ่งจะเห็นว่ามี ความแตกต่างจากในกรณีของการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศตรงที่ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณจากส่วนที่สะท้อนกับพื้นผิว ถ้าหากเราสมมติว่าพื้นผิวที่สะท้อนมีลักษณะราบเรียบและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี คลื่นที่กระทบกับผิวจะสะท้อนออกไปเกือบทั้งหมดโดยที่มีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา



รูปที่ 2.4 เส้นทางการเดินทางของคลื่น [1]

เนื่องจากคลื่นทั้งสองเดินทางในเส้นทางที่แตกต่างกันซึ่งมีระยะห่างที่ต่างกัน ดังนั้นสัญญาณทั้งสองส่วนเมื่อเดินทางถึงสายอากาศที่ภาครับอาจจะมีเฟสที่แตกต่างกัน

#### 2.1.3.2 การบดบังจากสิ่งกีดขวาง (Shadowing)

เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสภาพแวดล้อมรอบข้าง เช่น อาคาร และเนินเขา เป็นต้น ส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ แต่เมื่อเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นสัญญาณที่ได้รับก็จะมีกำลังดังเดิม ดังนั้นระดับของสัญญาณไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเท่ากับขนาดของสิ่งกีดขวาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบลเมตร

### 2.1.3.3 การจางหาย (Fading)

การที่สัญญาณถูกลดทอนลงไปทำให้มีความแรงสัญญาณอ่อนลง ทั้งนี้จะไม่สามารถทำนายได้แน่นอนเพราะเกิดขึ้นจากเงื่อนไขของบรรยากาศขณะนั้นจากสภาพอากาศและภูมิประเทศบางลักษณะก็ทำให้เกิดการเฟดดิ้งมากกว่าธรรมดา

### 2.1.3.4 อินเตอร์เฟอเรนซ์ (Interference)

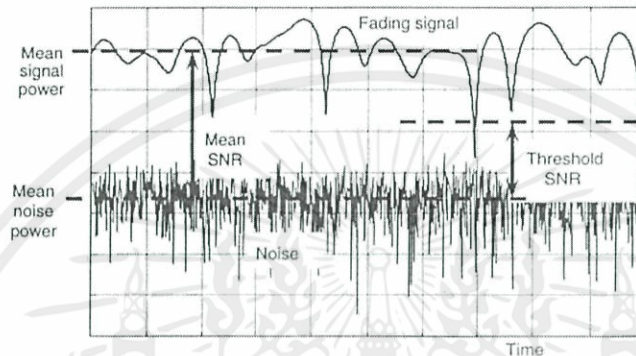
อินเตอร์เฟอเรนซ์ หรือการแทรกสอด เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณตั้งแต่สองสัญญาณขึ้นไปเข้ามารวมตัวกัน แต่โดยทั่วไปในการไฟฟ้าสื่อสาร การแทรกสอด หมายถึงปรากฏการณ์ที่สัญญาณจากภายนอกอื่นเข้ามาปะปนกับสัญญาณข่าวสารที่ต้องการในการสื่อสารนั้น การแทรกสอดจึงสามารถรวมความไปถึงการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนที่อาจส่งผลให้การสื่อสารนั้นล้มเหลวลงได้ แต่โดยทั่วไปแล้ว จะแยกการพิจารณาเรื่องของสัญญาณรบกวนออกเป็นอีกเรื่องหนึ่งโดยเฉพาะ ในบางครั้ง สัญญาณแทรกสอดอาจเป็นสัญญาณเดียวกันกับสัญญาณที่ต้องการใช้ในการสื่อสารนั้น แต่สัญญาณมีการเดินทางมาถึงเครื่องรับด้วยวิธีการหรือเส้นทางที่แตกต่างกันออกไป เปรียบเสมือนกับเครื่องรับได้รับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งเข้ามาพร้อมกัน จึงส่งผลให้สัญญาณที่รับได้มีการเสริมหรือหักล้างกัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับเฟสของสัญญาณที่เดินทางมาถึงยังจุดที่เครื่องรับสัญญาณวางอยู่

เมื่อรวมการจางหายของสัญญาณจากปรากฏการณ์ต่างๆเข้าด้วยกันจะเป็นผลให้สัญญาณมีความแรงลดลงตามระยะทาง และมีการเปลี่ยนแปลงทั้งช้าและเร็วรวมกันดังแสดงในรูป 2.2

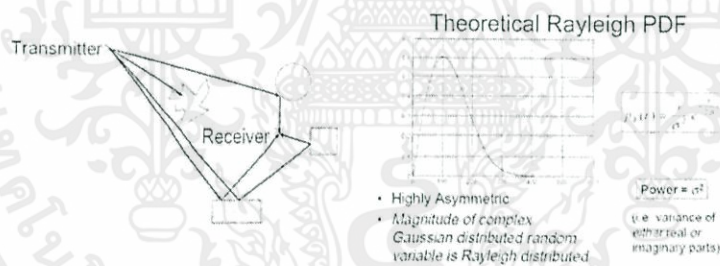
เมื่อแสดงสัญญาณจางหายในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสัญญาณมีระดับค่าเฉลี่ยอยู่ระดับสูงกว่าค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนประมาณ 37 dB (เมื่อ 1 ช่องเท่ากับ 10 dB) อย่างไรก็ตามในบางช่วงสัญญาณต่ำกว่าค่าเฉลี่ยมาก ทำให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio : SNR) มีค่าต่ำ ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของการสื่อสาร ดังนั้นจะต้องมีการตั้งค่าเริ่มต้นของค่า SNR (Threshold SNR) ที่หากมีค่าต่ำกว่าจะใช้งานไม่ได้ เพื่อพยายามปรับระบบให้มีค่า SNR สูงกว่านี้

เมื่อนำค่ากำลังของสัญญาณในรูปที่ 2.5 มาวาดกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function : PDF) ในที่นี้แสดงด้วยรูปประฆังคว่ำ การนำค่า PDF ไปทำปริพันธ์จะได้กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative density function : CDF) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

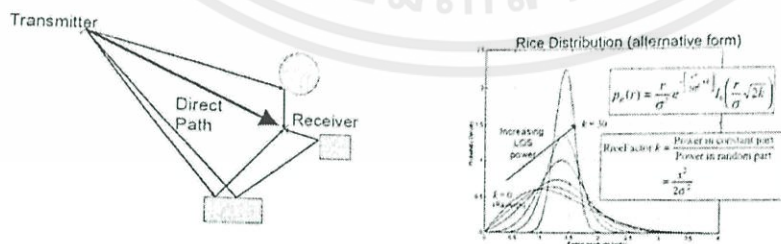
function : CDF) ที่แสดงความน่าจะเป็นที่สัญญาณจะมีโอกาสน้อยกว่าค่าในแกนนอนอยู่เท่าไร ข้อมูลนี้จะทำให้เราทราบความเชื่อถือ (Reliability) ของระบบว่าจะทำงานได้ที่เปอร์เซ็นต์เมื่อระดับ SNR มีค่าต่างๆ



รูปที่ 2.5 กราฟค่า mean signal power และ mean noise power [1]



รูปที่ 2.6 Theoretical Rayleigh PDF [1]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.7 Theoretical Rician PDF [1] มอนอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่องสัญญาณสื่อสารไร้สาย อาจจำแนกได้เป็นสองประเภทคือ แบบที่มองเห็นในแนวสายตา (Line of sight) ระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง และแบบที่มองไม่เห็นในแนวสายตา ระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง (Non-line of sight) ที่แต่ละกรณีมีการแจกแจงความแรงของสัญญาณเป็นแบบ Rician และ Rayleigh ตามลำดับ

ในกรณีช่องสัญญาณแบบ Rician

$$P_R = \frac{r}{2\sigma^2} e^{\frac{r^2 k}{2\sigma^2}} I_0 \left( \frac{r\sqrt{2K}}{\sigma} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อจะแสดงค่า Rician factor K ด้วยอัตราส่วนระหว่างส่วนที่คงที่ต่อกำลังในส่วนสัญญาณสุ่ม หรือกำลังจากเส้นทางตรงต่อกำลังจากเส้นทางหลายวิถี มีค่า

$$K = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (2.5)$$

ที่ค่า K ต่างๆจะทำให้ลักษณะการแจกแจงขนาดสัญญาณแตกต่างกันไป

สำหรับช่องสัญญาณแบบ Rayleigh

$$P_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ K มีค่ามากแสดงถึงสัญญาณตรงมีค่ามากกว่าสัญญาณหลายวิถี ทำให้สัญญาณในแกนของเวลา มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงน้อยกว่าในกรณี K มีค่าน้อย และจะมีผลก่อให้เกิดอัตราการผลิตของบิต (Bit error rate : BER) แตกต่างกัน

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของสายอากาศ

### 2.2.1 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)

#### 2.2.1.1 คุณลักษณะเบื้องต้น

สายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูป 2.8 ประกอบด้วยสตริป (แพทช์) โลหะบางมาก ( $t \ll \lambda_0$  เมื่อ  $\lambda_0$  คือความยาวคลื่นในอากาศ) วางบนฐานรอง ( $h \ll \lambda_0$  ปกติ  $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.005\lambda_0$ ) เหนือระนาบกราวน์ แพทช์ไมโครสตริปถูกออกแบบเพื่อที่จะให้เกิดค่าสูงสุดของรูปที่ตัดฉากกับแพทช์ (ตัวแผ่พลังงานแบบบรอดไซด์-Broadside) โดยการเลือกโหมดที่เหมาะสมในการกระตุ้น (Excite) นอกจากนั้นเมื่อเลือกโหมดอย่างเหมาะสมสายอากาศไมโครสตริปยังสามารถแผ่พลังงานเป็นแบบเอนไฟด์ (End-fire radiation) ได้ สำหรับแพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular patch) ความยาวของแพทช์  $L$  ปกติอยู่ในช่วง  $\lambda_0/3 \leq L \leq \lambda_0/2$  ระหว่างแพทช์และ

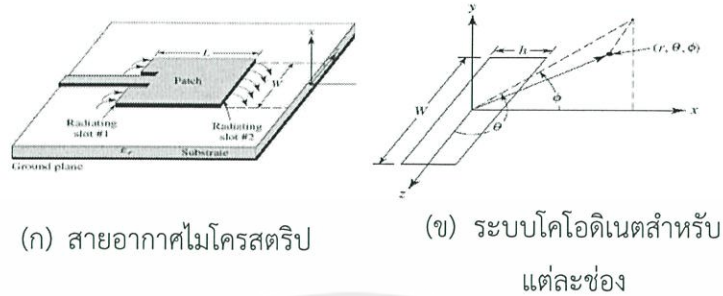
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบกราวด์ถูกแยกออกจากกันโดยแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric sheet) แสดงดังรูป 2.8 (ก) ซึ่งอาจจะเรียกว่า ฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric substrate)

วัสดุฐานรองมีหลายแบบที่ใช้สำหรับออกแบบสายอากาศไมโครสตริปและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฐานรองปกติจะใช้ค่าที่อยู่ในช่วง  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$  และหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศคือความหนาของฐานรอง โดยถ้าความสูงของฐานรองหนาและกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศดีขึ้น แบนด์วิดท์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สนามสำหรับการแผ่พลังงานไม่หนาแน่น แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ในขณะที่ส่วนฐานรองที่บางกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงจะเหมาะสำหรับการออกแบบวงจรมิโครเวฟเพราะต้องการสนามที่เข้มข้นที่จะให้การแผ่พลังงานและการคัปปลิงน้อยซึ่งทำให้ขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการสูญเสียที่สูงจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลงและแบนด์วิดท์แคบลง เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปบ่อยครั้งถูกออกแบบรวมเข้ากับวงจรมิโครเวฟดังนั้นการออกแบบจึงจำเป็นต้องเลือกระหว่างประสิทธิภาพของสายอากาศที่ดีและการออกแบบวงจที่ดี (เลือกระหว่างค่าที่ไดอิเล็กตริกที่สูงประสิทธิภาพจะลดลงและขนาดจะลดลงด้วย)

บ่อยครั้งสายอากาศไมโครสตริปถูกเรียกว่า สายอากาศแพทช์โดยแผ่พลังงานและสายป้อนจะถูกวางบนฐานรอง แพทช์แผ่พลังงานอาจจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า สตรีปบาง (ไดโพล) วงกลม วงรี สามเหลี่ยมหรือรูปอื่นๆ ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปแล้วรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า ไดโพล และวงกลม จะถูกเลือกใช้ในการออกแบบเพราะง่ายต่อการวิเคราะห์และสร้าง รวมทั้งคุณลักษณะการแผ่พลังงานเป็นที่น่าสนใจ โดยเฉพาะค่าโพลาไรเซชันไขว้ที่ต่ำ (Low cross polarization) โดยไดโพลไมโพลไมโครสตริปถูกนำมาออกแบบเพราะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างและใช้พื้นที่น้อยมีโพลาไรเซชันเส้นและขณะที่แพทช์ต่างๆไปสามารถทำได้โดยใช้แพทช์เดี่ยวหรือนำมาต่ออาร์เรย์ซึ่งทำให้แบบรูปมีทิศทางมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศไมโครสตริป

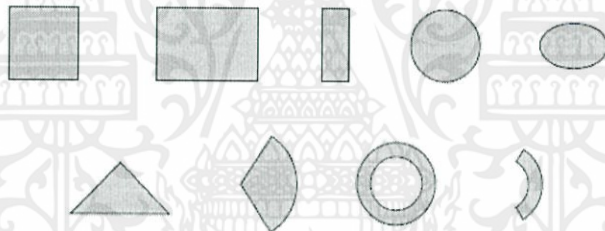
(ข) ระบบโคโอดิเนตสำหรับ

แต่ละช่อง



(ค) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 2.8 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด [2]



รูปที่ 2.9 แผ่นตัวนำรูปทรงต่างๆ [2]

### 2.2.1.2 วิธีการป้อน

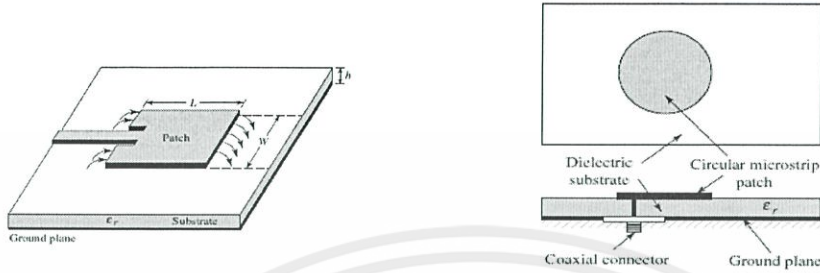
วิธีการป้อน (Feeding techniques) สายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างการป้อน 4 แบบที่ได้รับความนิยมใช้งานคือ สายไมโครสตริป (Microstrip line) โคแอกเซียล (Coaxial line) คัปปลิ่งโดยใช้ช่อง (Aperture coupling) และคัปปลิ่งเมื่อวางไว้ใกล้ๆ (Proximity coupling) แสดงดังรูปที่ 2.10 และวงจรมุมแสดงดังรูปที่ 2.11 สายป้อนแบบไมโครสตริปคือการนำสตริปซึ่งปกติจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับแพทช์ต่อไปยังตัวแพทช์โดยการป้อนแบบสายไมโครสตริปนั้นง่ายต่อการสร้าง การแมตช์ได้สะดวกโดยการควบคุมตำแหน่งการป้อนและมีวงจรมุมที่ง่าย อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนาของฐานรองเพิ่มขึ้น คลื่นที่ผิวและการแผ่พลังงาน

เอกสา แปลกปลอมจะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งในการออกแบบทางปฏิบัติ จะมีแบนด์วิดท์ที่ค่อนข้างแคบและจำกัดชนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ปกติ 2%-5%) การป้อนแบบโคแอกเซียล โดยตัวนำด้านในของสายโคแอกเซียลต่อเข้ากับแพทช์ที่ใช้แผ่พลังงานขณะที่ตัวนำด้านนอกต่อเข้ากับระนาบกราวด์อาจจะเรียกว่า การป้อนแบบโพรบ (Probe feed) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการสร้างและการแมตช์รวมทั้งมีค่าการแผ่พลังงานแปลกปลอมน้อย อย่างไรก็ตาม มันจะมีแบนด์วิดท์ที่แคบและมีวงจรมุมลที่ค่อนข้างยุ่งยากโดยเฉพาะเมื่อความหนาของฐานรองสูง ( $h > 0.02\lambda_0$ )

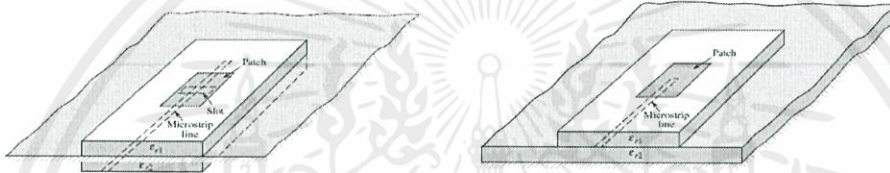
ทั้งการป้อนแบบใช้สายไมโครสตริปและโคแอกเซียลจะมีโครงสร้างที่ไม่สมมาตรซึ่งจะทำให้เกิดโหมดในอันดับที่สูง (Higher order modes) ซึ่งจะเพิ่มค่าโพลาริเซชันเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะขจัดปัญหาเหล่านี้ไปจะใช้การป้อนแบบคัปปลิ่งผ่านช่องที่ไม่มีการสัมผัสแสดงดังรูป 2.10 (ค) และ (ง) การป้อนแบบคัปปลิ่งผ่านช่องในรูปที่ 2.10 เป็นวิธีที่ยากที่สุดใน 4 วิธีที่กล่าวมาในการสร้างและค่อนข้างที่จะมีแบนด์วิดท์ที่แคบ อย่างไรก็ตามแบบจำลองค่อนข้างง่ายและมีการแผ่พลังงานแปลกปลอมด้วย การคัปปลิ่งผ่านช่องประกอบด้วยฐานรองสองชั้นถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบกราวด์ ด้านล่างสุดของฐานรองแผ่นล่างมีสายนำสัญญาณไมโครสตริปป้อนซึ่งพลังงานจะถูกคัปปลิ่งผ่านช่องบนระนาบกราวด์ที่แยกกันระหว่างฐานรอง การจัดวางสามารถที่จะทำการออฟติไมซ์ทั้งของสายป้อนและตัวแผ่พลังงาน โดยทั่วไปฐานรองที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงจะถูกใช้เป็นฐานรองแผ่นล่าง ส่วนฐานรองที่หนาและค่าไดอิเล็กตริกต่ำจะใช้สำหรับฐานรองด้านบน ระนาบกราวด์ระหว่างฐานรองใช้สำหรับแยกกระหว่างสายป้อนกับตัวแผ่พลังงานและเพื่อให้การรบกวนของการแผ่พลังงานแปลกปลอมน้อยที่สุดที่จะไม่รบกวนแบบรูปและไม่รบกวนต่อโพลาริเซชัน สำหรับการออกแบบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของฐานรอง ความกว้างของสายป้อน และขนาดของช่อง รวมทั้งตำแหน่งจะต้องทำการออฟติไมซ์ในการออกแบบ การแมตช์สามารถทำได้โดยการควบคุมความกว้างของสายป้อนและความยาวของช่อง การคัปปลิ่งผ่านช่องสามารถใช้แบบจำลองโดยใช้ทฤษฎีของ Bethe ซึ่งใช้พิจารณากรณีการคัปปลิ่งผ่านช่องเล็กๆ ในระนาบตัวนำ ในทฤษฎีของช่องถูกแสดงด้วยไดโพลไฟฟ้าสมมูลในการพิจารณาในองค์ประกอบตั้งฉากของสนามไฟฟ้า ส่วนไดโพลแม่เหล็กใช้พิจารณาในองค์ประกอบแนวสัมผัส (Tangential) ของสนามแม่เหล็ก ถ้าช่องอยู่ตรงกลางใต้แพทช์การคัปปลิ่งของสนามแม่เหล็กจะมีความสำคัญกว่า (Dominant) เมื่อโหมดโดมิแนนซ์สำหรับทางอุดมคติสนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ขณะที่สนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุด ซึ่งการทำอย่างนี้ทำให้ไม่มีโพลาริเซชันผสมและไม่มีโพลาริเซชันไขว้ในระนาบหลัก การคัปปลิ่งแบบพรอกซิมิตีจะทำให้เกิดแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด (มากกว่า 13%) ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการแผ่พลังงานแปลกปลอมน้อย อย่างไรก็ตาม การสร้างค่อนข้างยุ่งยาก ความยาวของสายป้อนและอัตราส่วนความกว้างต่อสายของ

เอกสารนี้สามารถใช้ควบคุมการแมตช์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การป้อนสายไมโครสตริป

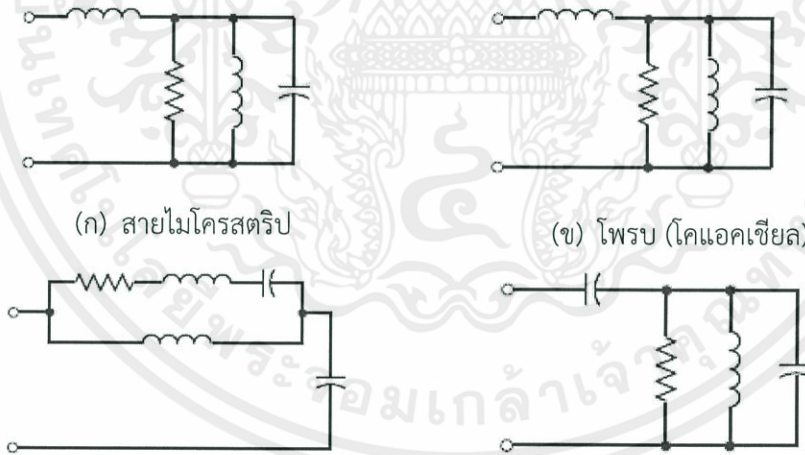
(ข) การป้อนแบบโคแอกเซียล



(ค) การป้อนแบบคัปปลิ่งช่อง

(ง) การป้อนแบบคัปปลิ่งพروقซิมิตี

รูปที่ 2.10 ชนิดของการป้อนสำหรับสายอากาศไมโครสตริป [2]



(ก) สายไมโครสตริป

(ข) โพรบ (โคแอกเซียล)

(ค) คัปปลิ่งช่อง

(ง) คัปปลิ่งอีพروقซี

รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลสำหรับการป้อนรูปที่ 2.10 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.3 แพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

แพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular patch) เป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะง่ายต่อการวิเคราะห์ทั้งแบบสายนำสัญญาณและแบบควาวิตี้ ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำมากสำหรับฐานรองที่บางการวิเคราะห์จะเริ่มต้นจากแบบจำลองโดยใช้สายนำสัญญาณ (Transmission-line model) เพราะง่ายต่อการทำความเข้าใจ

#### 1) แบบจำลองสายนำสัญญาณ

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่ผลการวิเคราะห์แม่นยำน้อยที่สุด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ไม่หลากหลาย อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ช่วยให้เข้าใจวิธีอื่นๆมากขึ้น เหมือนกับที่จะแสดงในหัวข้อที่ 2.2.1.4 ที่ใช้แบบจำลองควาวิตี้ของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเป็นอาร์เรย์ของช่องแควการแผ่พลังงานสองช่องโดยแต่ละช่องมีความกว้าง  $w$  และสูง  $h$  แยกห่างกัน  $L$  โดยแบบจำลองสายนำสัญญาณที่ใช้แสดงสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มีสองช่องถูกแบ่งออกเป็นสองตัวแปรคือ อิมพีแดนซ์ต่ำ  $Z_c$  และความยาวของสายนำสัญญาณ  $L$  ก.ผลกระทบของขอบ (Fringing effects)

เพราะขนาดของแพทช์มีขนาดจำกัดทั้งตามแนวยาวและกว้าง สนามที่ขอบเขตแพทช์จะเกิดสนามภายใต้ขอบ โดยรูป 2.12 (ก) และ (ข) แสดงขนาดตามความยาวสำหรับช่องแผ่พลังงานสองช่องของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งผลรวมของสนามที่ขอบจะเป็นฟังก์ชันของแพทช์และความสูงของฐานรองสนามที่ขอบของระนาบ  $E$  หลัก (ระนาบ  $x-y$ ) เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของความยาวของแพทช์  $L$  ต่อความสูงฐานรอง  $h(L/h)$  และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมี  $L/h \gg 1$  ดังนั้นสนามที่ขอบจะลดลง อย่างไรก็ตาม จะยังคงมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

สายนำสัญญาณไมโครสตริปดังรูปที่ 2.12 (ก) และเส้นสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.12 (ข) จะพบว่าเส้นสนามมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non-homogeneous) เนื่องจากไดอิเล็กตริกสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปไดอิเล็กตริกทั้งสองเป็นของฐานรองและอากาศ โดยสังเกตเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ภายในฐานรองเพราะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่าและบางส่วนจะอยู่ในอากาศ ขณะที่  $W/h \gg 1$  และ  $\epsilon_r \gg 1$  เส้นสนามไฟฟ้าจะกระจุกรวมกันอยู่ภายในฐานรอง สนามที่ขอบของสายนำสัญญาณไมโครสตริปทำให้ขนาดทางไฟฟ้าใหญ่กว่าขนาดทางกายภาพ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นบางส่วนในฐานรองและบางส่วนในอากาศ โดยค่าคงที่ประสิทธิผล  $\epsilon_{\text{eff}}$  (Effective dielectric constant) จึงถูกใช้ในการอธิบายสนามที่ขอบและการแผ่พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล จะสมมติให้ตัวนำของสายนำสัญญาณไมโครสตริปซึ่งมีขนาดและความสูงเหนือระนาบกราวด์เท่าของเดิมถูกฝังเข้าไปในไดอิเล็กตริกค่าหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.12 (ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ถูกนิยามโดย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกสมำเสมอซึ่งเส้นสนามที่แสดงในรูปที่ 2.12 (ค) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบเดียวกันกับค่าคงที่การแผ่พลังงานในทางปฏิบัติ เหมือนเส้นสนามจริงในรูปที่ 2.12 (ก) สำหรับเส้นสนามในอากาศเหนือฐานรองค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะมีค่าอยู่ในช่วง  $1 < \epsilon_{reff} < \epsilon_r$  สำหรับการใช้งานโดยส่วนใหญ่ถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฐานรองจะมีค่ามากกว่าหนึ่งมากๆ ( $\epsilon_r \gg 1$ ) ค่าของ  $\epsilon_{reff}$  จะมีค่าเข้าใกล้ค่าไดอิเล็กตริกค่าจริงของฐานรอง  $\epsilon_r$  ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลยังเป็นฟังก์ชันของความถี่ด้วย โดยถ้าความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้น เส้นสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะกระจุกในฐานรอง ดังนั้น สายไมโครสตริปจึงประพฤติตัวเหมือนสายนำสัญญาณสมำเสมอที่มีค่าไดอิเล็กตริกค่าหนึ่ง (มีเพียงฐานรอง) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลมีค่าใกล้ค่าไดอิเล็กตริกของฐานรอง ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเทียบกับฟังก์ชันของความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลสำหรับสายไมโครสตริปที่มีฐานรองที่แตกต่างกันสามค่า แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 สายนำสัญญาณไมโครสตริป เส้นสนามไฟฟ้าและโครงสร้างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล [2]

สำหรับที่ความถี่ต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลโดยพื้นฐานจะมีค่าคงที่ ขณะที่ความถี่กลาง ๆ จะมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและในที่สุดจะเข้าสู่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฐานรอง ค่าเริ่มต้น (ที่ความถี่ต่ำ ๆ) ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ถูกอ้างอิงด้วย ค่าคงหยุดนิ่ง (Static value) และมีค่า  $W / h > 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} = \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.7)$$

ข. ความยาวประสิทธิผล ความถี่เรโซแนนซ์ และความกว้างประสิทธิผล

เพราะผลกระทบของสนามที่ขอบ ขนาดของแพทช์ทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปดูเหมือนว่าจะใหญ่กว่าขนาดทางกายภาพ สำหรับสนามที่ขอบของระนาบ  $E$  หลัก (ระนาบ  $x - y$ ) แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.14 เมื่อขนาดของแพทช์ตามแนวยาวถูกขยายออกไปในแต่ละด้านด้วยระยะ  $\Delta L$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ได้อิเล็กทริกประสิทธิผล  $\varepsilon_{\text{reff}}$  และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง  $W / h$  ค่าโดยประมาณสามารถหาได้โดย

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.8)$$

เนื่องจากความยาวของแพทช์ในแต่ละด้าน ถูกขยายด้วย  $\Delta L$  ความยาวประสิทธิผลของแพทช์ในตอนนี้คือ ( $L = \lambda / 2$  สำหรับโหมดหลัก  $TM_{010}$  และไม่มีการแผ่พลังงานที่ขอบ)

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (2.9)$$

สำหรับโหมดหลัก  $TM_{010}$  ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปจะเป็นฟังก์ชันของความยาวโดยปกติสามารถเขียนได้ดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $v_0$  คือ ความเร็วแสงในอวกาศว่าง เนื่องจากสมการที่ (2.11) ไม่ได้รวมผลของสนามค่าขอบเข้าไปด้วย ดังนั้นจะรวมผลกระทบของสนามค่าขอบดังกล่าวเข้าด้วย จะได้สมการดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L_{\text{eff}}\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{1}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (2.11)$$

$$= q \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าองค์ประกอบ  $\epsilon_r$  อ้างอิงถึง องค์ประกอบค่าขอบ (Fringe factor) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้ความยาวลดลง ขณะที่ความสูงเพิ่มขึ้น สนามค่าขอบจะเพิ่มขึ้นตามด้วยและนำไปสู่การแยกกันมากขึ้นระหว่างขอบการแผ่พลังงานและความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำลง

ค. การออกแบบ

ขั้นตอนการออกแบบ โดยเริ่มจากการกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพื้นฐานของ ( $\epsilon_r$ ) ความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r$ ) และความสูงของฐานรอง ( $h$ ) ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

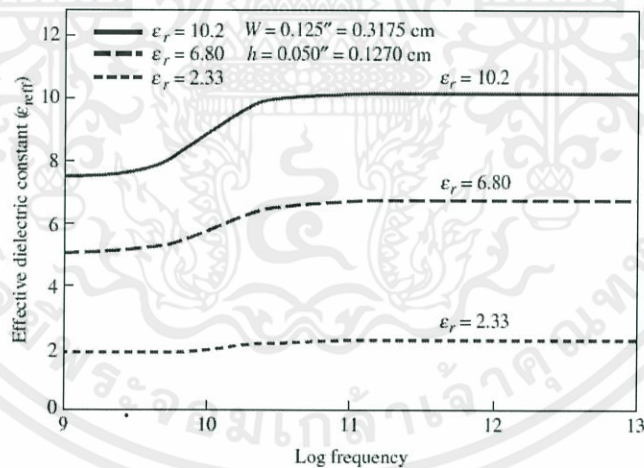
กำหนดค่า:

$$\epsilon_r, f_r, \epsilon_r, f_r \text{ (ในหน่วย Hz)}$$

$$h$$

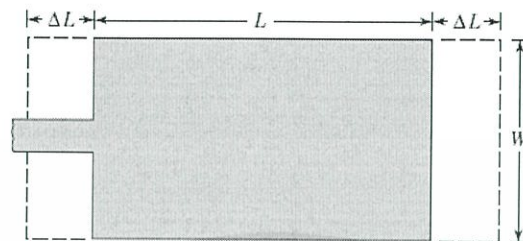
คำนวณ:

$$W, L$$

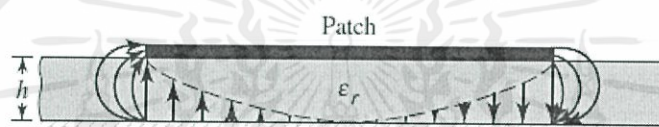


รูปที่ 2.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเทียบกับความถี่ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางกายและยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [2]

ง. ความนำ

ช่องการแผ่พลังงานแต่ละช่องถูกแสดงด้วยแอดมิตแตนซ์สมมูลแบบ

ขนาน  $Y$  (ประกอบด้วยค่าความนำ  $G$  และซัพเซสแตนซ์  $B$ ) แสดงดังรูปที่ 2.15 ช่องทั้งสองถูกแบ่งและตั้งชื่อด้วย #1 และ #2 แอดมิตแตนซ์สมมูลของช่อง #1 บนพื้นฐานของช่องขนาดใหญ่ไม่จำกัดและสม่ำเสมอ แสดงได้ดังนี้

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (2.14)$$

เมื่อช่องมีความกว้าง  $W$

$$G_1 = \frac{W}{120} \lambda_0 \left[ 1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (2.15)$$

$$B_1 = \frac{W}{120 \lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0 h)] \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (2.16)$$

เนื่องจากช่องที่สอง #2 เหมือนกันกับ #1 ดังนั้นแอดมิตแตนซ์สมมูล คือ

$$Y_2 = Y_1, G_2 = G_1, B_2 = B_1 \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความนำของช่องหนึ่งเดียวสามารถได้รับจากการหาจากการกระจายของสนามโดยวิธีแบบจำลอง  
ควาวิตี โดยทั่วไป ค่าความนำถูกนิยามโดย

$$G_1 = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} \quad (2.18)$$

ใช้สนามไฟฟ้าของสมการที่ กำลังงานการแผ่พลังงานสามารถเขียนได้จาก

$$P_{rad} = \frac{|V_0|^2}{2\pi\eta_0} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (2.19)$$

ดังนั้น ค่าความนำของสมการที่ (2.14) สามารถกระจายได้เป็น

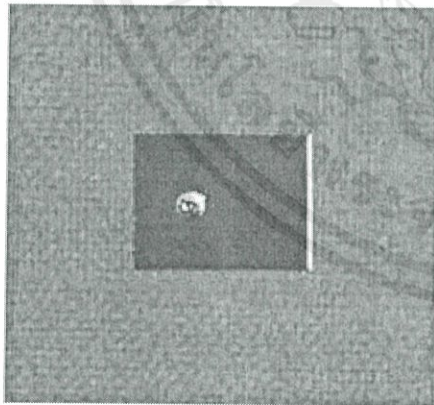
$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ

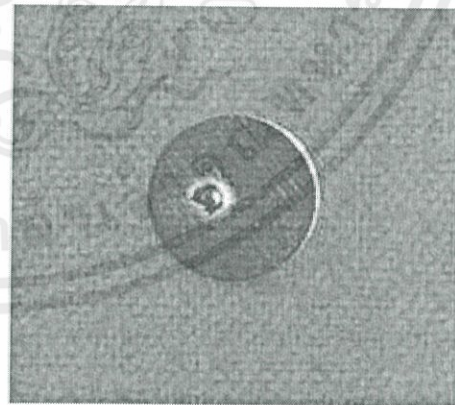
$$I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (2.21)$$

$$= -2 + \cos(X) + XS(X) + \frac{\sin(X)}{X} \quad (2.22)$$

$$X = k_0 W \quad (2.23)$$

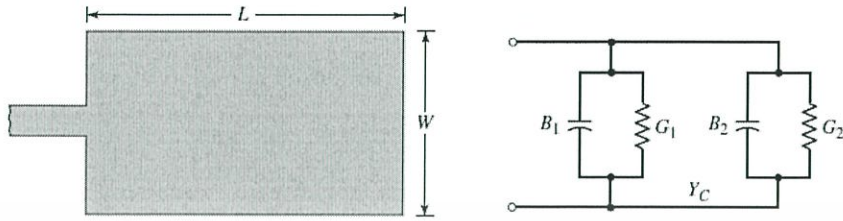


(ก) สี่เหลี่ยมผืนผ้า



(ข) วงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.15 แพทช์สี่เหลี่ยมและวงกลม [2]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (ข) วงจรสมมูลแบบจำลองสายนำสัญญาณ

รูปที่ 2.16 แพทช์ไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงจรสมมูล [2]

ค่าจากสมการที่ (2.20) และ (2.22) คือ

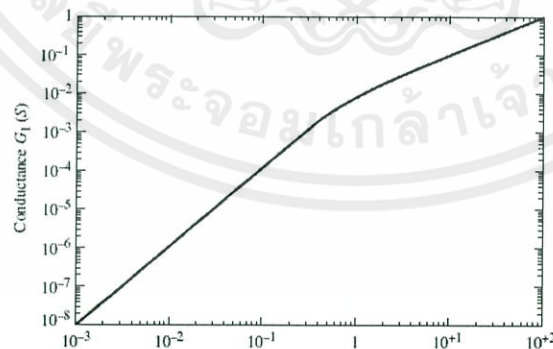
$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{90} \left( \frac{W}{\lambda_0} \right)^2 & W \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left( \frac{W}{\lambda_0} \right) & W \gg \lambda_0 \end{cases} \quad (2.24)$$

ค่าของสมการที่ (2.24) สำหรับ  $W \gg \lambda_0$  เหมือนกันกับสมการที่ (2.16) สำหรับ  $h \ll \lambda_0$  กราฟของ  $G$  เทียบกับฟังก์ชันของ  $W \gg \lambda_0$  แสดงดังรูปที่ 2.17

จ.ความต้านทานอินพุทเรโซแนนซ์

แอดมิตแตนซ์รวมที่ช่องที่ #1 (แอดมิตแตนซ์ด้านเข้า) ได้รับความ

ส่งผ่านของแอดมิตแตนซ์ช่องที่ #2 จากจุดต่อเอาต์พุตไปยังด้านเข้าโดยใช้สมการการส่งผ่านแอดมิตแตนซ์ของสายนำสัญญาณในทางอุดมคติของช่องสองช่องที่วางห่างกัน  $\lambda/2$  เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในไดอิเล็กทริก(ฐานรอง) อย่างไรก็ตาม เพราะมีสนามที่ขอบความยาวของแพทช์ทางไฟฟ้าจะยาวกว่าค่าความยาวจริง ดังนั้น



รูปที่ 2.17 ค่าความนำของช่องเทียบกับความกว้างของช่อง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกออกจากกันของช่องทั้งสองจึงมีค่าน้อยกว่า  $\lambda/2$  เล็กน้อย ถ้าความยาวที่ลดลง ถูกเลือกด้วยค่าที่เหมาะสมโดยใช้สมการที่ (2.8) (ปกติ  $0.48\lambda < L < 0.49\lambda$ ) แอดมิตแตนซ์ ส่งผ่านของช่องที่ #2 มาจาก

$$\overline{Y}_2 = \overline{G}_2 + j\overline{B}_2 = G_1 - jB_1 \quad (2.25)$$

หรือ

$$\overline{G}_2 = G_1 \quad (2.26)$$

$$\overline{B}_2 = -B_1 \quad (2.27)$$

ดังนั้น แอดมิตแตนซ์ด้านเข้าเรโซแนนซ์รวม (Total resonant input admittance) คือค่าจริงและ แสดงได้เป็น

$$Y_{in} = Y_1 + \overline{Y}_2 = 2G_1 \quad (2.28)$$

เนื่องจากแอดมิตแตนซ์ด้านเข้ารวมคือค่าจริง อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเรโซแนนซ์รวมจึงเป็นค่าจริงด้วย หรือ

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (2.29)$$

ความต้านทานด้านเข้าเรโซแนนซ์ แสดงดังสมการที่ (2.25) จะไม่รวมผลกระทบของความสัมพันธ์ (Mutual) ของช่อง สมการที่ (2.25) ถูกเปลี่ยนแปลงเป็น

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (2.30)$$

เมื่อเครื่องหมายบวก (+) ถูกใช้สำหรับการกระจายแรงดันเรโซแนนซ์โมดคู่ (ไม่สมมาตร) จะอยู่ ด้านล่างของแพทช์และระหว่างช่องขณะที่เครื่องหมายลบ (-) ถูกใช้สำหรับการกระจายแรงดันเรโซแนนซ์โมดคี่ (สมมาตร) ค่าความนำเหนี่ยวนำถูกนิยาม ในเทอมของสนามระยะไกล คือ

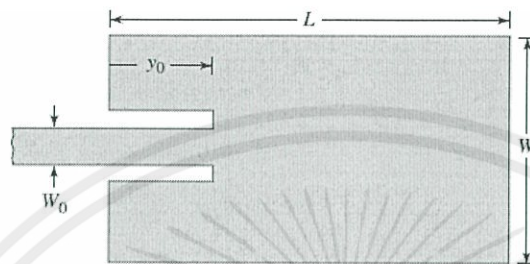
$$G_{12} = \frac{1}{|V_0|^2} \text{Re} \iint_S E_1 \times H_2^* \cdot dS \quad (2.31)$$

เมื่อ  $E_1$  คือการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าโดยช่องที่หนึ่ง #1  $H_2$  คือการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็ก โดยช่องที่สอง #2,  $V_0$  คือแรงดันตกคร่อมช่องและการอินทิเกรตถูกทำบนทรงกลมที่มีรัศมีขนาด ใหญ่ ดังนั้น  $G_{12}$  แสดงได้โดย

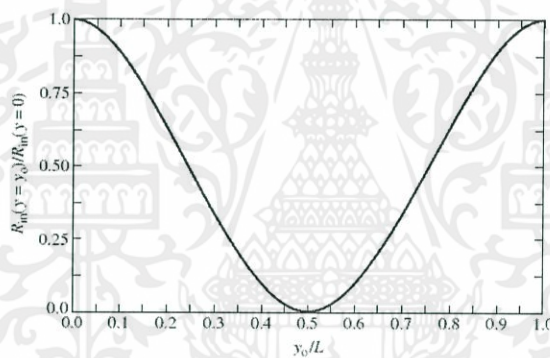
$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos^2} \right]^2 j_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $J_0$  คือฟังก์ชันเบสเซลของชนิดแรกของอันดับที่ศูนย์ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปทั่วไป ค่าเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (2.32) ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความนำด้วยตัวเอง  $G_1$  ของสมการที่ (2.15) หรือ (2.20)



(ก) การป้อนแบบอินเซต



(ข) ความต้านทานด้านเข้าออมพลไลซ์

รูปที่ 2.18 การป้อนแบบอินเซตและการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานด้านเข้าออมพลไลซ์ [2]

จากสมการที่ (2.14) หรือ (2.25) ซึ่งความต้านทานด้านเข้าไม่ขึ้นกับความสูงของฐานรอง  $h$  เท่าไรนัก  $k_0 h \ll 1$  ความต้านทานด้านเข้าไม่ขึ้นกับ  $h$  การวิเคราะห์แบบจำลองของการกระจายแสดงให้เห็นชัดว่าความต้านทานด้านเข้าไม่ขึ้นกับความสูงของฐานรอง  $h$  จากสมการที่ (2.14) และ (2.25) ความต้านทานด้านเข้าจะลดลงเมื่อเพิ่มความกว้างของแพทช์  $W$  เงื่อนไขนี้จะเป็นจริงเมื่ออัตราส่วน  $W/h$  เพิ่มขึ้นมากกว่าสอง ความต้านทานด้านเข้าเรโซแนนซ์คำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอ้างอิงที่ช่องที่ #1 อย่างไรก็ตาม ความต้านทานด้านเข้าเรโซแนนซ์อาจจะเปลี่ยนได้โดยการป้อนแบบอินเซต (Inset feed) ด้วยระยะ  $y_0$  จากช่อง #1 แสดงดังรูปที่ 2.18 (ก) เทคนิคนี้ถูกใช้เพื่อการแมตช์อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้การป้อนแบบสายไมโครสตริป อิมพีแดนซ์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{E_{\text{reff}}}} \ln \left[ \frac{8h + w_0}{w_0} + \frac{w_0}{4h} \right], & \frac{w_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{E_{\text{reff}} \left[ \frac{w_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w_0}{h} + 1.444 \right) \right]}}, & \frac{w_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $w_0$  คือ ความกว้างของสายไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ 2.18 การใช้การวิเคราะห์การกระจายความต้านทานด้านเข้าสำหรับการป้อนแบบอินเซตถูกประมาณโดย

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \left[ \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right) + \frac{G_1^2 + B_1^2}{Y_c^2} \sin^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right) \right] \quad (2.36)$$

เมื่อ  $Y_c = 1/Z_c$  เนื่องจากสำหรับไมโครสตริปโดยทั่วไป  $G_1/Y \ll 1$  และ  $B_1/Y_c \ll 1$  สมการที่ (2.36) ลดเหลือ

$$\begin{aligned} R_{in}(y = y_0) &= \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right) \\ &= R_{in}(y = 0) \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

กราฟของค่านอมอลไลซ์ของสมการที่ (2.36) แสดงดังรูปที่ 2.18 (ข)

ค่าที่ได้จากสมการที่ (2.36) ค่อนข้างสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง อย่างไรก็ตาม การป้อนแบบอินเซตคือการมีรอยกากบาททางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าเก็บประจุเพิ่มขึ้น รอยบากทางกายภาพและเกิดค่าความจุซึ่งทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงจากเดิมไม่เกิน 1% จากสมการที่ (2.37) และรูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งค่าสูงสุดจะเกิดที่ขอบของช่อง  $y_0 = 0$  จะเกิดแรงดันสูงสุดและกระแสต่ำสุด โดยปกติจะมีค่าความต้านทานประมาณ 150 – 300 โอห์ม ค่าต่ำสุด(ศูนย์) จะเกิดขึ้นที่ตรงกลางของแพทช์ ( $y_0 = L/2$ ) จะได้แรงดันเท่ากับศูนย์และกระแสจะเกิดสูงสุด จากจุดที่ป้อนอินเซตเคลื่อนที่จากขอบไปยังกึ่งกลางของแพทช์อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเรโซเนเตอร์จะค่อยๆ ลดลงและเป็นศูนย์ที่กึ่งกลางของแพทช์ เมื่อค่าจุดป้อนอินเซตเข้าใกล้จุดกึ่งกลางของแพทช์ ( $y_0 = L/2$ ) ค่าของ  $\cos^2(\pi/L y_0)$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความต้านทานด้านเข้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามค่าตำแหน่งของจุดป้อน

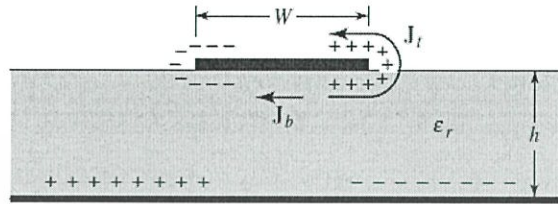
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งมีเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.1.4 แบบจำลองควาวิตี้

สายอากาศไมโครสตริปมีลักษณะคล้ายกับควาวิตี้โหลดไดอิเล็กตริก (Dielectric loaded cavity) และมีลักษณะเรโซแนนซ์ในอันดับที่สูง สนามมอดโลส์ภายในฐานรองไดอิเล็กตริก (ระหว่างแพทช์และระนาบกราวด์) สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำถ้าใช้กระบวนการของควาวิตี้โดยกำหนดขอบเขตของตัวนำ (อยู่บนและล่าง) และกำแพงแม่เหล็กตามแนวเส้นรอบวงของแพทช์

เพื่อที่จะทำความเข้าใจแบบจำลองแบบควาวิตี้อย่างลึกซึ้ง ในที่นี้พยายามจะอธิบายสนามให้เห็นเป็นรูปร่างภายในตัวนำควาวิตี้และการแผ่พลังงานผ่านด้านข้างของมัน เมื่อแพทช์ไมโครสตริปคือตัวจ่ายพลังงานการกระจายของประจุจะเกิดที่ผิวด้านบนและด้านล่างของแพทช์ (ระนาบกราวด์) แสดงดังรูปที่ 2.19 การกระจายของประจุถูกควบคุมด้วยกลไกสองอย่างคือ การดึงดูด (Attractive) และการผลัก (Repulsive) กลไกการดึงดูด คือเกิดจากประจุที่มีขั้วที่ต่างกันระหว่างบนด้านล่างของแพทช์และระนาบกราวด์ ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของประจุอยู่บนข้างล่างของแพทช์ ส่วนกลไกการขับไล่จะเกิดจากประจุเหมือนกันระหว่างผิวด้านล่างของแพทช์ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักกันของประจุจากด้านล่างของแพทช์รอบๆขอบของมันไปยังผิวด้านบน การเคลื่อนที่ของประจุเหล่านี้ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแส  $J_b$  และ  $J_t$  ที่ผิวด้านล่างและด้านบนของแพทช์ตามลำดับ แสดงดังรูป 2.19 เนื่องจากไมโครสตริปในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างจะมีค่าค่อนข้างเล็กกลไกการดูดจะมีค่าโดมิแนนซ์และกระแสยังคงอยู่ที่แพทช์และผลรวมส่วนน้อยของกระแสที่ไหลจะรอบๆขอบของแพทช์ถึงด้านบนของแพทช์ อย่างไรก็ตาม การไหลของกระแสจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความสูงต่อความกว้างลดลงในขอบเขตที่จำกัด การไหลของกระแสที่ด้านบนจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในทางอุดมคติจะไม่มีองค์ประกอบสนามแม่เหล็กแทนเจนต์ที่ขอบของแพทช์ ซึ่งจะพบว่ากำแพงทั้ง 4 ด้านจะมีรูปแบบเป็นผิวดำนำแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในทางอุดมคติจะไม่มีสนามแม่เหล็กรอบวงและการกระจายของสนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่ที่แพทช์เนื่องจากในทางปฏิบัติ ขนาดอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างมีค่าจำกัด ถึงแม้จะมีขนาดเล็กเราสามารถประมาณค่าของแบบจำลองควาวิตี้ให้ด้านต่างๆ เป็นตัวนำแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การกระจายของประจุและความเข้มของกระแสที่เกิดจากแพทช์ไมโครสตริป [2]

ถ้าสายอากาศไมโครสตริปถูกพิจารณาโดยใช้เพียงวิธีแบบควิตี้อาจจะไม่เพียงพอสำหรับการหาค่าขนาดสมบรูณ์ของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก ในความเป็นจริงในการพิจารณากำแพงของควิตีซึ่งใช้วัสดุที่ไม่มีการสูญเสีย ควิตีจะไม่มีกระแสพลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะเป็นเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์ นอกจากนี้ฟังก์ชันที่แสดงอิมพีแดนซ์จะมีเฉพาะโพลค่าจริง (Real poles) จะพบว่าแบบวงจรสมมูลของสายอากาศโดยทั่วไป จะประกอบด้วยความต้านทานสองตัวคือ ความต้านทาน การแผ่พลังงาน  $R_r$  และความต้านทานการสูญเสีย  $R_L$  ซึ่งค่าความต้านทานทั้งสองตัวทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเป็นค่าเชิงซ้อนและฟังก์ชันของมันจะมีโพลเชิงซ้อนด้วย โดยค่าโพลทางจินตภาพเนื่องจาก  $R_r$  และ  $R_L$  การพิจารณาสายอากาศไมโครสตริปที่มีการสูญเสียจากแบบจำลองควิตีสามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าแทนเจนต์การสูญเสียประสิทธิผล  $\tan \delta_{eff}$  (Effective loss tangent) ค่าแทนเจนต์การสูญเสียประสิทธิผลจะใช้แสดงค่าการสูญเสียของควิตีซึ่งจะใช้แสดงในสายอากาศและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกันของตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศ  $Q \delta_{eff} = 1/Q$

เพราะความหนาของไมโครสตริปปกติแล้วค่อนข้างบาง คลื่นที่เกิดขึ้นภายในฐานรอง (ระหว่างแพทช์กับระนาบกราวด์) เกิดการสะท้อนไปมากกว่าจะมาถึงที่ขอบของแพทช์ ดังนั้นจึงมีเพียงสัดส่วนน้อยของพลังงานที่เข้าเกิดการแผ่พลังงาน สายอากาศจึงทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ รูปแบบของสนามข้างล่างแพทช์จะแสดงด้วยฟังก์ชันโคไซน์ เนื่องจากความสูงของฐานรองค่อนข้างเล็ก ( $h \ll \lambda$ ) การเปลี่ยนแปลงของสนามตามแนวความสูงจะถูกพิจารณาให้มีค่าคงที่ นอกจากนี้เพราะความสูงของฐานรองค่อนข้างเล็ก ดังนั้นสนามรั่วไหลที่ขอบของแพทช์ก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วยขณะที่สนามไฟฟ้าจะตั้งฐานฉากกับผิว ดังนั้นจะมีเพียงสนามโหมด  $TM_x$  ถูกพิจารณาภายในควิตี ขณะที่ด้านบนและล่างของควิตีจะเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบรูณ์ กำแพงทั้งสี่ด้านจะถูกจำลองด้วยกำแพงแม่เหล็กสมบรูณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

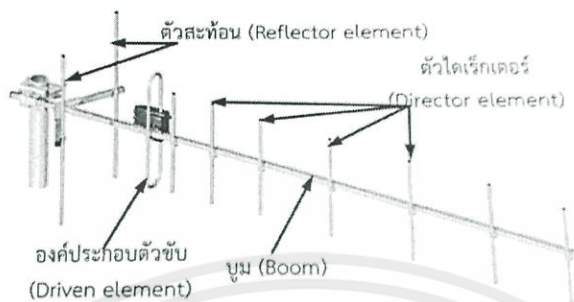
### 2.2.2 สายอากาศยาคีอุตะ (Yagi-Uda antenna)

หนทางหนึ่งที่จะทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศไดโพล คือ การใช้การจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ โดยทั่วไปองค์ประกอบของอาร์เรย์ทุกตัวจะมีลักษณะเหมือนกันและมีฟังก์ชันการทำงานเหมือนกัน โดยเชื่อมต่อกันด้วยระบบสายป้อน (Feeding network) และอาร์เรย์อีกแบบจะมีเพียงองค์ประกอบตัวเดียวเท่านั้นที่ใช้เป็นตัวส่งหรือตัวรับส่วนองค์ประกอบตัวอื่น ๆ จะเป็นแค่ตัวพาราสิติก (Parasitic) โดยจะเรียกอาร์เรย์ชนิดนี้ว่า พาราสิติกอาร์เรย์ (Parasitic array) โดยองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เรียกว่า องค์ประกอบพาราสิติก ที่ไม่ใช่ตัวขับ (Driven) จะได้รับการกระตุ้นจากการคับปลิงระยะใกล้จากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวขับ โดยพาราสิติกอาร์เรย์เชิงเส้นที่ขนานกับไดโพลจะเรียกว่า ยาคี-อุตะอาร์เรย์ (Yagi-Uda array) หรือ สายอากาศยาคี-อุตะ (Yagi-Uda antenna) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า ยาคี สายอากาศยาคี-อุตะได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะเป็นสายอากาศรับในระบบโทรทัศน์ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ต้นทุนต่ำและมีอัตราขยายที่ค่อนข้างสูง โดยในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบสายอากาศยาคี-อุตะซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบชี้ทิศทาง ส่วนประกอบหลักๆประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

- (1) องค์ประกอบตัวขับ (Driven element)
- (2) องค์ประกอบตัวสะท้อน (Reflector element)
- (3) องค์ประกอบตัวไดเรกเตอร์ (Director element)
- (4) และสุดท้ายคือส่วนของแกนที่ยึดองค์ประกอบให้อยู่ด้วยกัน เรียกว่า บวม (Boom)

ส่วนประกอบทั้ง 4 แสดงดังรูปที่ 2.20 โดยทั่วไปจะเรียกสายอากาศยาคีตามจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด เช่น รูปที่ 2.20 เป็นสายอากาศยาคี 9E (E มาจากคำว่า Element-ข้อ (1)+(2)+(3)) หมายถึง ตัวขับ 1 องค์ประกอบ ตัวสะท้อน 1 องค์ประกอบ (โดยทั่วไปจะมีตัวสะท้อน 1 องค์ประกอบแต่ในรูปที่ 2.20 มีตัวสะท้อน 2 ตัวแต่นิยมนับเพียง 1 เหมือนเดิม) และตัวไดเรกเตอร์ 7 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 โครงสร้างสายอากาศยาคิ-อูเดและองค์ประกอบต่างๆ [3]

สายอากาศยาคิที่สั้นที่สุดจะประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ มีเพียง ตัวขับ ตัวสะท้อน และไดเรกเตอร์อย่างละหนึ่งตัว (3E) เพื่อทำความเข้าใจหลักการทางงานเบื้องต้นของสายอากาศยาคิจะใช้สายอากาศยาคิที่สั้นที่สุดช่วยในการอธิบาย โดยเริ่มต้นจากตัวขับและเพิ่มตัวพาราสิติก (ตัวสะท้อนและตัวไดเรกเตอร์) โดยตัวขับจะใช้ไดโพลเรโซแนนซ์ความยาวครึ่งความยาวคลื่น (Resonant half-wavelength dipole) และถ้านำตัวพาราสิติกมาวางไว้ใกล้ ๆ ตัวขับ ดังนั้นสนามที่ส่งไปยังตัวพาราสิติกจะมีค่าเท่ากับออกจากตัวขับ

$$E_{incident} = E_{driven} \quad (2.38)$$

กระแสที่เกิดขึ้นจะไปกระตุ้นตัวพาราสิติกและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือ จะเกิดสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจะเรียกว่า  $E_{parasitic}$  ในทิศทางสัมผัส (Tangent) กับเส้นลวด โดยจะมีขนาดเท่ากับแต่มีเฟสตรงกันข้ามกับคลื่นที่ตกกระทบที่ส่งมาจากตัวขับที่วางไว้ใกล้ ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสนามไฟฟ้าที่ส่วนของตัวพาราสิติกจากตัวขับจะเกิดตามแนวสัมผัสและสนามไฟฟ้ารวมแนวสัมผัสของตัวนำสัมบูรณ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ  $E_{incident} + E_{parasitic} = 0$  และจากสมการที่ (2.38) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$E_{parasitic} = -E_{incident} = -E_{driven} \quad (2.39)$$

จากทฤษฎีอาร์เรย์สององค์ประกอบ เราทราบว่าองค์ประกอบสององค์ประกอบที่มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากันแต่มีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  วางไว้ใกล้กันผลลัพธ์ของแบบรูปจะอยู่ในรูปแบบของแอนติไฟร์ เมื่อ  $d = \lambda/8$  และ  $\theta = 180^\circ$  ตัวอย่างผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อองค์ประกอบวางห่างกัน  $0.04 \lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.21 โดยจากการสังเกตจะพบว่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าค่อนข้างต่ำเพราะว่าสนามที่เกิดจากองค์ประกอบทั้งสองเกิดการหักล้างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

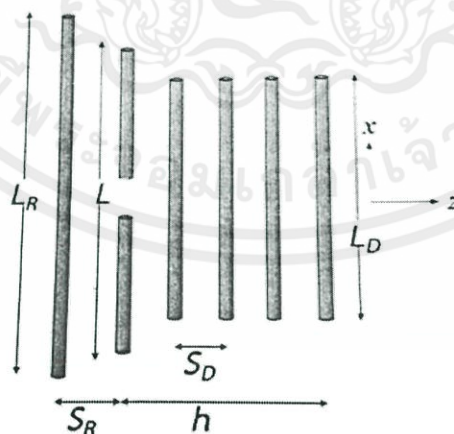


(ก) การจัดวาง

(ข) แบบรูปประนาบ  $E$  จากการคำนวณตามทฤษฎี

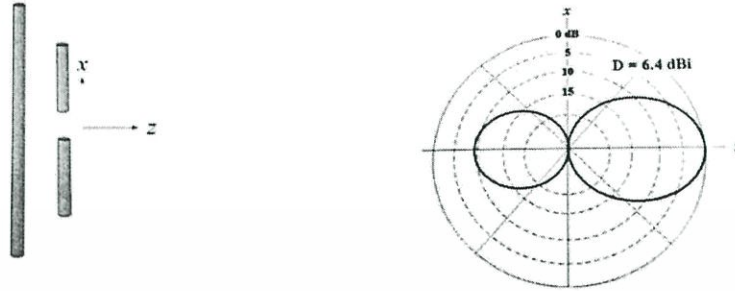
รูปที่ 2.21 อาร์เรย์สององค์ประกอบของไดโพลเรโซแนนซ์ยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ประกอบด้วยตัวขับและพาราสิติกอย่างละหนึ่งตัว [3]

คุณลักษณะของสายอากาศยาภิอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากความยาวของพาราสิติกมีความยาวที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบจึงมีหลากหลายวิธี โดยถ้าองค์ประกอบพาราสิติกมีความยาวมากกว่าความยาวขององค์ประกอบเรโซแนนซ์ ( $L_R$ ) พาราสิติกนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน หรือองค์ประกอบตัวสะท้อน ในขณะที่พาราสิติกที่มีความยาวที่สั้นกว่าองค์ประกอบเรโซแนนซ์ ( $L_D$ ) พาราสิติกนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวไดเรกเตอร์ (Director) เพราะมันจะชี้ไปตามแนวแกน  $Z$  แสดงรูปการจัดวางของสายอากาศยาภิโดยทั่วไปดังรูปที่ 2.22 ผลกระทบดังกล่าวสามารถทำการจำลองและแสดงผลดังรูปที่ 2.23 และ 2.24



รูปที่ 2.22 การจัดวางของสายอากาศยาภิ-อูเดะโดยทั่วไป [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การจัดวาง

(ข) แบบรูปประนาบ  $E$  จากการคำนวณตามทฤษฎี

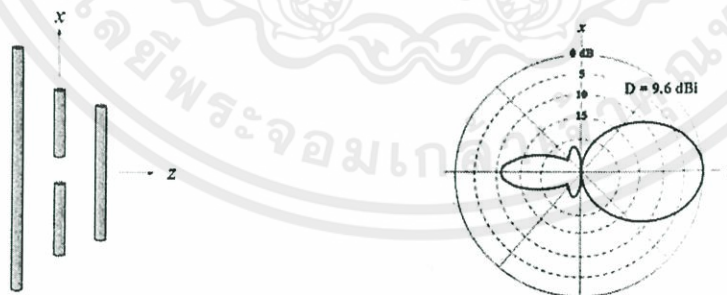
รูปที่ 2.23 อาร์เรย์สององค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว  $L = 0.4\lambda$  และตัวสะท้อนยาว  $0.482\lambda$  วางห่างกัน  $0.2\lambda$  โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบคือ  $0.00425\lambda$  [3]



(ก) การจัดวาง

(ข) แบบรูปประนาบ  $E$  จากการคำนวณตามทฤษฎี

รูปที่ 2.24 อาร์เรย์สององค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว  $L = 0.47\lambda$  และตัวไดเร็กเตอร์ยาว  $0.42\lambda$  วางห่างกัน  $0.2\lambda$  โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบคือ  $0.00425\lambda$  [3]



(ก) การจัดวาง

(ข) แบบรูปประนาบ  $E$  จากการคำนวณตามทฤษฎี

รูปที่ 2.25 อาร์เรย์สามองค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขั้วยาว  $L = 0.47\lambda$  ตัวสะท้อนยาว  $0.482\lambda$  และตัวไดเร็กเตอร์ยาว  $0.442\lambda$  วางห่างกัน  $0.2\lambda$  โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบ

คือ  $0.00425\lambda$  [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.24 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E สำหรับอาร์เรย์สององค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยเพียงตัวขับหนึ่งตัวและตัวสะท้อนหนึ่งตัวเมื่อระยะระหว่างองค์ประกอบคือ  $0.2\lambda$  ความยาวของตัวขับ ( $L$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.47\lambda$  และ  $L_R = 0.482\lambda$  แบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งแสดงผลกระทบของตัวสะท้อนของพาราติคที่ยาวกว่า ( $L_R > L$ ) ส่วนรูปที่ 2.24 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E สำหรับอาร์เรย์สององค์ประกอบซึ่งประกอบด้วยเพียงตัวขับหนึ่งตัวและไดเร็กเตอร์หนึ่งตัว เมื่อความยาว  $L = 0.47\lambda$  และความยาวของตัวขับ  $L_R = 0.482\lambda$  ซึ่งจะพบว่าผลกระทบการใส่ตัวไดเร็กเตอร์ที่มีความยาวที่สั้นกว่าตัวขับ ( $L_D < L$ ) จะมีผลกระทบคล้ายๆ กับการใส่ตัวสะท้อนแต่วางในตำแหน่งคนละด้าน โดยแบบรูปทั้งสองรูปจะพบว่ามีกรุปแบบรูปในทิศทางแกน  $+Z$  นั่นคือ ถ้ามีการใช้ทั้งตัวสะท้อนและตัวไดเร็กเตอร์แบบรูปในทิศทาง  $+Z$  อาจจะได้ดีกว่าการใช้เพียงตัวเดียว รูปที่ 2.26 แสดงแบบรูปของอาร์เรย์ยาก็ที่มีสามองค์ประกอบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากรูปที่ 2.24 และ 2.25 ยกเว้นความยาวของตัวไดเร็กเตอร์โดยใช้ความยาว  $0.442\lambda$  ใหม่เป็นความยาวที่ใกล้ความยาวที่ดีที่สุดสำหรับองค์ประกอบสามตัวแต่ความยาวไม่เหมาะสมสำหรับสององค์ประกอบ จากรูปที่ 2.26 จะพบว่าแบบรูปมีรูปแบบที่ดีกว่ากรณีเพียงสององค์ประกอบ

สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศยาก็สามองค์ประกอบมีค่าประมาณ 9 dB หรือ 7 dBd (dB เทียบกับสายอากาศไดโพลยาว ( $\lambda/2$ )) ระยะระหว่างตัวสะท้อนที่ดีที่สุด  $S_R$  (กรณีที่ต้องการสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด) อยู่ระหว่าง  $0.15\lambda$  ถึง  $0.25\lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.27 และเมื่อเปรียบเทียบอัตราขยายกับไดโพลทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 2.5 dBd แต่ถ้าใช้แผ่นโลหะแทนเส้นลวดที่ใช้ทำเป็นตัวสะท้อนจะได้อัตราขยายเพิ่มเป็น 3 dBd ดังนั้น จะพบว่าตัวสะท้อนที่ทำจากเส้นลวดมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากรณีใช้แผ่นสะท้อนแผ่นเรียบแต่จะมีขนาดเล็กกว่าและลดแรงต้านทานจากลมได้ดีกว่า

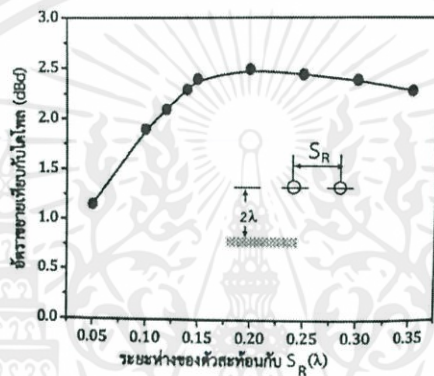
ระยะระหว่างตัวไดเร็กเตอร์แต่ละตัวโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.2\lambda$  ถึง  $0.35\lambda$  โดยระยะที่ห่างมากจะเหมาะสำหรับสายอากาศยาก็ที่ค่อนข้างยาว ส่วนระยะห่างที่น้อยจะเหมาะสำหรับสายอากาศที่มีความยาวสั้นลง โดยปกติ ความยาวตัวสะท้อนจะมีค่าประมาณ  $0.5\lambda$  และความยาวของตัวขับต้องทำให้เกิดการเรโซแนนซ์โดยปกติจะสั้นกว่า  $0.5\lambda$  ในขณะที่ความยาวไดเร็กเตอร์ทั่วไปจะสั้นกว่าความยาวตัวขับประมาณ 10% - 20% โดยความยาวจริง ๆ แล้วขึ้นอยู่กับจำนวนไดเร็กเตอร์ว่ามากน้อยเพียงใด รวมทั้งระยะห่างระหว่างไดเร็กเตอร์ของแต่ละตัว  $S_D$

อัตราขยายของสายอากาศยาก็จะสัมพันธ์กับความยาวรวมของสายอากาศ โดยความยาวนิยมใช้คำว่า ความยาวบูม (Boom length) โดยจากหลักการของแหล่งกำเนิดเชิงเส้นสม่ำเสมอ ซึ่งกรณีของสายอากาศยาก็จะพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนไดเร็กเตอร์เข้าไปแต่อัตราขยายของสายอากาศจะเพิ่มเพียงเล็กน้อย นั่นแสดงว่าสายอากาศยาก็ไม่ใช่สายอากาศที่การกระตุ้นอย่างสม่ำเสมอ เป็นจริงแล้วสำหรับสายอากาศยาก็จะพบว่าถ้ามีไดเร็กเตอร์จำนวนห้าหรือหกตัวจะมีการเพิ่มอัตราขยายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เพิ่มจำนวนไดเร็กเตอร์เพิ่มมากกว่านี้ขึ้นอัตราขยายจะเพิ่มขึ้นน้อยลงแสดงดังรูปที่ 2.28 จากกราฟเป็นการแสดงอัตราขยายเทียบกับจำนวนองค์ประกอบ  $N$  ของยาก็ (รวมตัวขับและตัวสะท้อนอย่างละหนึ่งตัว) โดยระยะระหว่างองค์ประกอบเท่ากับ

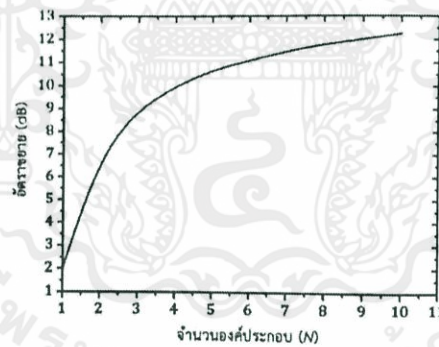
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้ทำเป็นประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S_R = S_D = 0.15\lambda$  จากกราฟจะพบว่าเมื่อจำนวนองค์ประกอบเพิ่มจาก 3 ไปยัง 4 ตัว อัตราขยายจะเพิ่มขึ้น 1 dB ในขณะที่เพิ่มจาก 9 เป็น 10 ตัว อัตราขยายเพิ่มเพียง 0.2 dB เท่านั้น

ในการเพิ่มจำนวนของตัวสะท้อนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และโดยทั่วไปจะใช้เพียงตัวเดียว โดยผลกระทบหลัก ๆ ของจำนวนตัวสะท้อนที่เพิ่มขึ้นคือส่วนของอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งสายป้อนและพูด้านหลังของแบบรูป โดยรูปร่างของแบบรูป อัตราขยายจะถูกควบคุมโดยตัวไดเร็กเตอร์เป็นหลักโดยจะขึ้นกับระยะห่างและความยาวของไดเร็กเตอร์ ซึ่งความยาวของไดเร็กเตอร์จะส่งผลกระทบมากกว่าซึ่งจะทำให้บูมมีความยาวมากขึ้นตาม



รูปที่ 2.26 อัตราขยายเทียบหน่วย dBd ของไดโพลกับตัวสะท้อนเมื่อระยะห่าง  $S_R$  ที่ต่างกัน [3]



รูปที่ 2.27 อัตราขยายสายอากาศยาภิ-อูตะทั่วไปเทียบกับจำนวนขององค์ประกอบ โดยระยะห่าง  $S_R = S_D = 0.15\lambda$  เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด เท่ากับ  $0.0025\lambda$  [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.1 การออกแบบสายอากาศยาคี

เนื่องจากสายอากาศยาคีเป็นสายอากาศอาร์เรย์ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับสายอากาศยาคีที่ต้องการคือ อัตราขยาย โดยตัวแปรที่ต้องพิจารณาสำหรับอัตราขยายของสายอากาศยาคี คือ

-จำนวนองค์ประกอบ: ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ คือ จำนวนองค์ประกอบในการออกแบบ โดยทั่วไปจำนวนองค์ประกอบมากกว่าจะมีอัตราขยายมากกว่าจำนวนองค์ประกอบที่น้อยกว่า ซึ่งปกติที่กล่าวในขั้นต้น โดยทั่วไปตัวขับและตัวสะท้อนจะมีอย่างละ 1 ตัว ดังนั้น การเพิ่มจำนวนองค์ประกอบคือ การเพิ่มจำนวนตัวไดเร็กเตอร์นั่นเอง

-ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ: นอกจากจำนวนองค์ประกอบที่ส่งผลต่ออัตราขยายแล้วระยะห่างระหว่างองค์ประกอบก็ส่งผลเช่นกันแต่ไม่มากเท่ากับจำนวนองค์ประกอบ โดยทั่วไประยะห่างองค์ประกอบที่มากกว่าจะมีอัตราขยายที่สูงกว่าระยะที่น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้น (ยาวขึ้น) โดยระยะห่างที่สำคัญที่ควรพิจารณาอย่างมากคือ ระยะห่างระหว่างตัวขับกับตัวสะท้อน และตัวขับกับไดเร็กเตอร์ตัวแรก

-ความยาวรวมของสายอากาศ: เมื่อทำการคำนวณระยะห่างและจำนวนขององค์ประกอบที่เหมาะสมแล้ว อัตราขยายจะแปรผันตรงกับความยาวของสายอากาศ เนื่องจากการออกแบบสายอากาศยาคีสามารถออกแบบได้หลากหลายวิธี โดยในที่นี้จะใช้ข้อมูลการออกแบบของ Viezbike ตามตารางที่ 2.1 โดยการสังเกตจะพบว่าความยาวบวมจะอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 4.2  $\lambda$  ขณะที่ความยาวส่วนอื่น ๆ ที่ใช้ในการออกแบบดูได้จากรูปที่ 2.29 โดยแสดงกราฟของอัตราส่วนของขนาดองค์ประกอบต่าง ๆ เทียบกับความยาวแต่ละองค์ประกอบ ในขณะที่รูปที่ 2.30 แสดงผลกระทบของขนาดบวมที่ทำจากโลหะโดยจะพบว่าการทำบวมจากโลหะสามารถที่จะทำได้และพบได้ทั่วไปเพราะการกระจายของแรงดันบนองค์ประกอบพาราสิติกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดกึ่งกลางขององค์ประกอบเหล่านั้น ในทางอุดมคติ บวมโลหะที่ผอมมาก ๆ (ขนาดเล็กมาก ๆ เทียบกับความยาวคลื่น) ที่จุดกึ่งกลางของอาร์เรย์การกระจายของแรงดันจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม บวมโลหะในทางปฏิบัติจะส่งผลกระทบต่อสายอากาศแต่สามารถชดเชยได้โดยการเพิ่มความยาวขององค์ประกอบพาราสิติกให้ยาวขึ้นหรือจะให้พาราสิติกแยกออกจากกันกับบวมซึ่งวิธีนี้อาจจะไม่ต้องมีการชดเชยความยาว

สายอากาศยาคีที่มีจำนวนไดเร็กเตอร์จำนวนมากอาจจะมองได้เหมือนกับสายอากาศคลื่นจร (Traveling wave antenna) ที่มีการแผ่พลังงานแบบเอนตีไฟร์ซึ่งจะรองรับคลื่นผิวหน้าแบบคลื่นช้า (Slow wave) กล่าวคือ  $c/v > 1$  เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสง นั่นคือ ตัวขับและตัวสะท้อนที่คู่กันจะทำการปล่อยคลื่นบนตัวไดเร็กเตอร์ซึ่งทำให้คลื่นเดินทางช้าลง  $v$  หรืออาจจะมองในเทอมของการเกิดการหน่วงของเฟส (Phase delay) โดยเฟสที่หน่วงต่อระยะทางตามแนวแกนของอาร์เรย์ในทิศทางไปข้างหน้าจะมีค่ามากกว่าเงื่อนไขของเอนตีไฟร์แบบดั้งเดิม หนึ่งในเทคนิคที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ในการเพิ่มเฟสหน่วงเพื่อที่จะทำให้อัตราขยายของอาร์เรย์เพิ่มมากขึ้นคือ เทคนิคของ Hansen-Woodyard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ขนาดความยาวของแต่ละองค์ประกอบ ความยาวมุม  
ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ และอัตราขยาย

$d/\lambda = 0.0085$ $S_R = 0.2 \lambda$	ความยาวมุมของอาร์เรย์ยา $\lambda$					
	0.4	0.8	1.2	2.2	3.2	4.2
ความยาวตัวสะท้อน $L_R/\lambda$	0.48	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
$D_1$	0.44	0.482	0.482	0.432	0.482	0.424
$D_2$		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
$D_3$		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
$D_4$			0.428	0.398	0.398	0.407
$D_5$				0.390	0.394	0.403
$D_6$				0.390	0.390	0.398
$D_7$				0.390	0.386	0.394
$D_8$				0.390	0.386	0.390
$D_9$				0.398	0.386	0.390
$D_{10}$				0.407	0.386	0.390
$D_{11}$					0.386	0.390
$D_{12}$					0.386	0.390
$D_{13}$					0.386	0.390
$D_{14}$					0.386	
$D_{15}$					0.386	
ระยะห่างระหว่างไดเรกเตอร์ ( $S_D/\lambda$ )	0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
อัตราขยายเทียบกับไดโพล dBd	7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2
รูปในออกแบบ รูปที่ 2.28	ก	ค	ค	ข	ค	ง
อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง dB	8	15	19	23	22	20

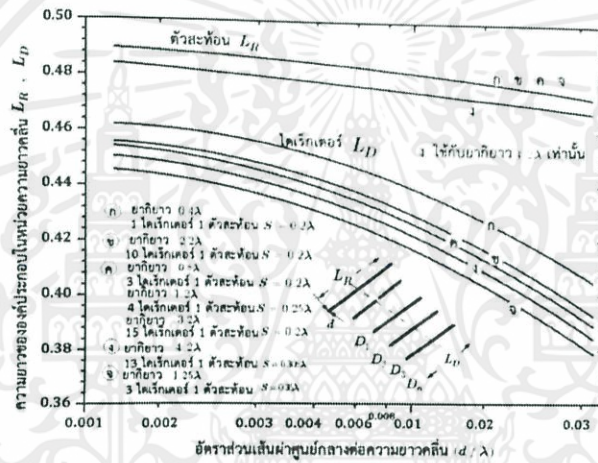
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไดเร็กเตอร์สำหรับการออกแบบยาสูบที่ดีควรมีลักษณะดังรูปที่ 2.31 โดยถ้าความยาวบางส่วนของบวม  $h$  ที่เป็นระยะที่วัดจากตัวขับไปยังตัวไดเร็กเตอร์ที่ไกลที่สุดซึ่งมีความยาวมาก ๆ ( $h \gg \lambda$ ) ซึ่งเงื่อนไขของ Hansen-Woodyard ต้องการผลต่างเฟสระหว่างคลื่นผิวกับคลื่นอวกาศว่างที่ไดเร็กเตอร์ที่ไกลที่สุดมีค่าประมาณ  $180^\circ$  ดังนั้น

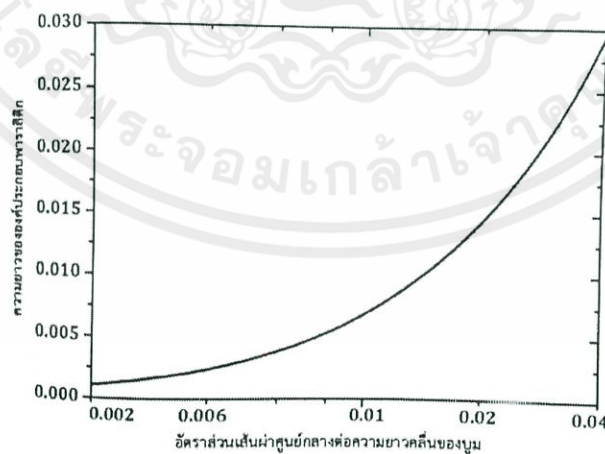
$$H\beta_g - h\beta = \pi \text{ หรือ } \beta_g - \beta = \pi / h \tag{2.40}$$

หรือ

$$\lambda / \lambda_g = c / v = 1 + / 2h \tag{2.41}$$

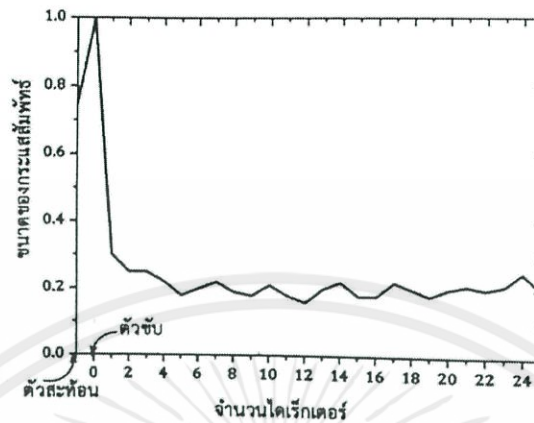


รูปที่ 2.28 ลายเส้นที่ใช้ในการออกแบบตามตารางที่ 2.1 [3]



รูปที่ 2.29 ผลกระทบของบวมโลหะต่อความยาวพาราสิติกของยาสูบ [3]

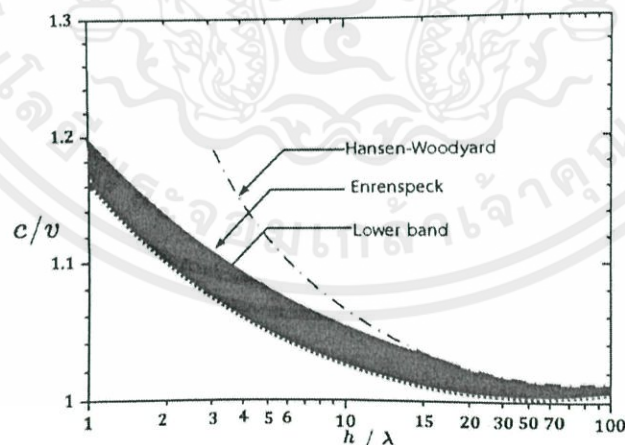
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่ว่ากรณินี้ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ขนาดของกระแสสัมพัทธ์สำหรับยาจิกจำนวน 27 องค์ประกอบ (27E) [3]

เมื่อ  $\beta_g$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายในท่อนำคลื่นหรือเลขคลื่น (Wave number) ตามแนวแกนด้านหน้า  $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นและ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง โดย  $\beta_g \approx -\beta \cos \theta - \beta(c/v)$  เมื่อ  $c/v > 1$  หมายความว่า  $|\cos \theta| > 1$  สมการที่ (2.40) แสดงดังรูปที่ 2.32

จากการศึกษาของ Ehrenspeck และ Poehler (EP) แสดงให้เห็นว่าผลต่างเฟสที่ดีที่สุดจะมีค่าประมาณ  $60^\circ$  สำหรับยาจิกสั้นเรื่อยไปจนถึง  $120^\circ$  สำหรับยาจิกที่มีความยาวในช่วง  $4\lambda < h < 8\lambda$  และถ้า  $h > 20\lambda$  จะมีค่าสู่เข้า  $180^\circ$



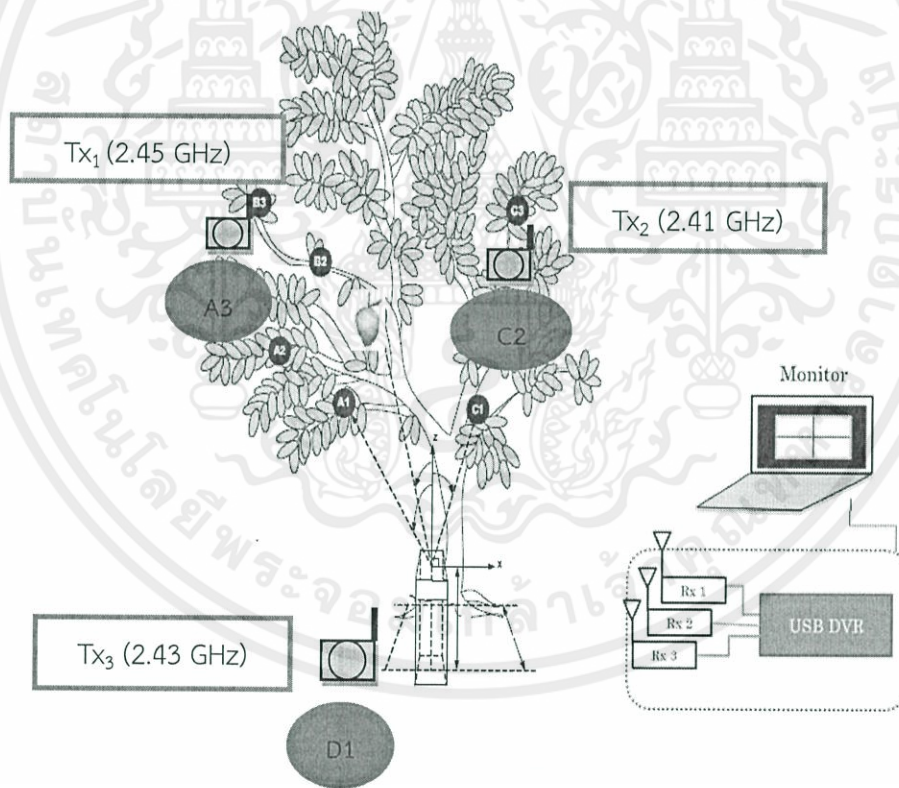
รูปที่ 2.31 ความเร็วเฟสสัมพัทธ์  $c/v = \lambda/\lambda_g$  สำหรับสายอากาศคลื่นผิวที่มีอัตราขยายสูงสุดเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ให้กับฟังก์ชันของความยาวสายอากาศ  $h/\lambda$  [3] อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

##### 3.1 การออกแบบระบบและการทดสอบอุปกรณ์ในระบบ

คณะผู้จัดทำได้ทำการออกแบบระบบดังรูปที่ 3.1 ที่ตำแหน่ง A3, C2 และ D1 ทำการติดตั้งกล่องในตำแหน่งที่เหมาะสมกับผลมะม่วง ซึ่งกล่องมีความถี่การทำงานที่ 2.45 GHz 2.41 GHz และ 2.43 GHz ตามลำดับ เพื่อติดตามพฤติกรรมของสัตว์ที่มีต่อผลมะม่วง โดยอุปกรณ์ USB DVR ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำการแสดงผลและบันทึกผลภาพวิดีโอที่รับจากเครื่องรับของกล่องทั้งสามตัว เพื่อใช้เก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ได้ทำการติดตั้งโปรแกรมดังกล่าวได้



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งระบบการติดตั้งกล่องบันทึกวิดีโอไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

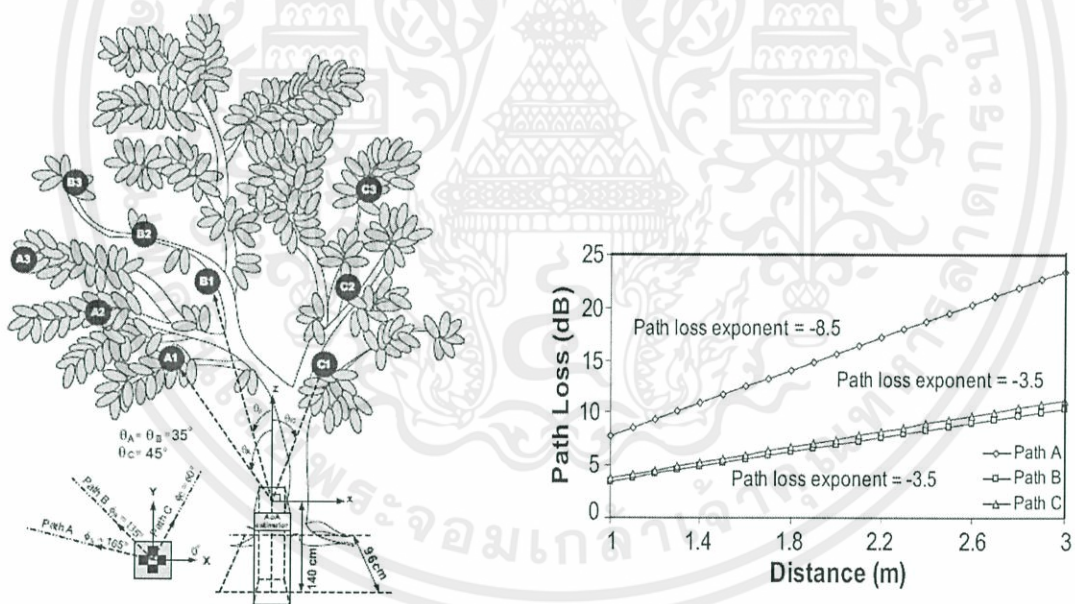
### 3.1.1 การทดสอบช่องสัญญาณ

ด้วยระยะทางเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลถึงคุณภาพของสัญญาณและด้วยช่องสัญญาณที่ไม่ใช่อากาศว่างเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้สัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้มีการเปลี่ยนแปลง ดังจะเห็นจากรูปที่ 3.2 จึงทำการทดลองช่องสัญญาณที่ไม่ใช่อากาศว่างและช่องสัญญาณที่เป็นอากาศว่างที่ได้คำนวณตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 เพื่อเปรียบเทียบกำลังสัญญาณที่ได้รับเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_T L L_R} \quad (2.1)$$

$$L = \frac{P_T}{P_R} = \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.2)$$

D เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง และ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น



รูปที่ 3.2 การสูญเสียจากระยะทางที่ตำแหน่งต่างๆ [4]

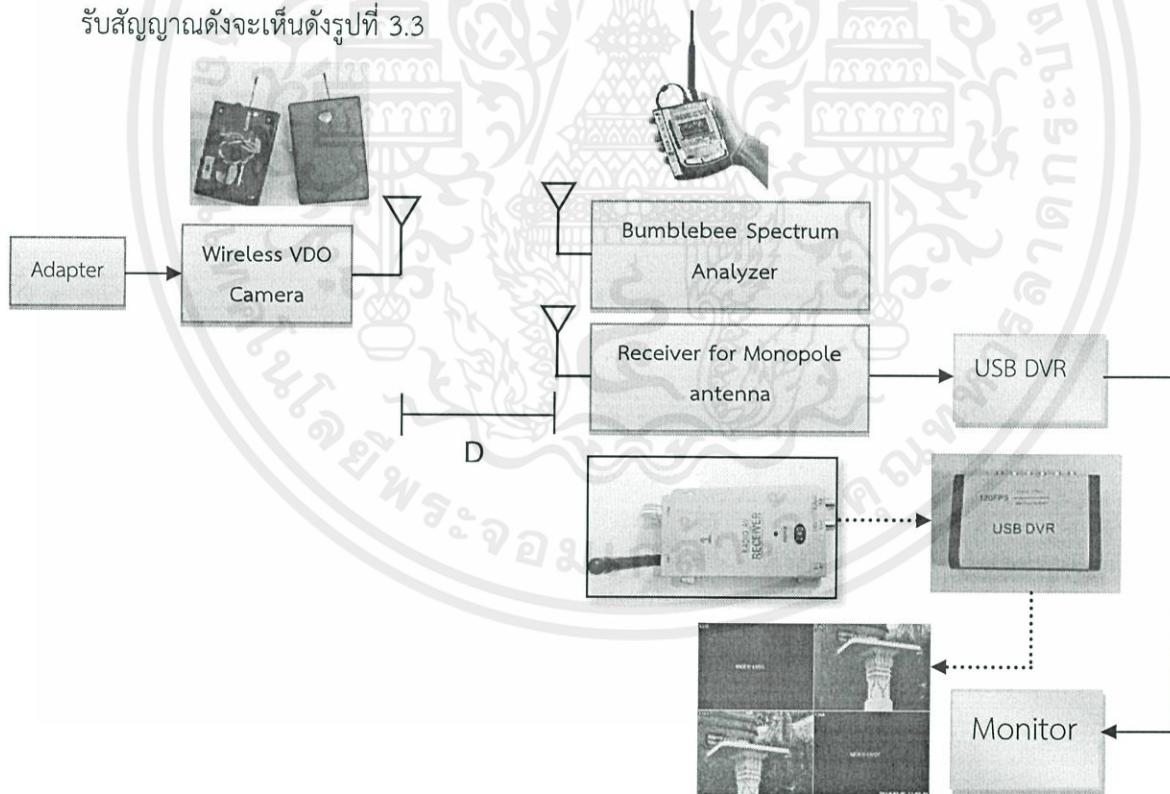
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Bumblebee spectrum analyzer
2. กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหวไร้สาย
3. เครื่องรับสัญญาณ
4. USB DVR

### 3.1.1.2 การติดตั้งและการจัดเก็บผลในการทดสอบ

ในการจัดเก็บผลการทดสอบการสูญเสียเนื่องจากระยะทางเพื่อเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับเมื่อช่องสัญญาณที่ไม่ใช่เวลาว่าง โดยใช้กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหวไร้สายเป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณและ Bumblebee spectrum analyzer เป็นอุปกรณ์ในการรับสัญญาณดังจะเห็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การติดตั้งการทดลองช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การทดสอบอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

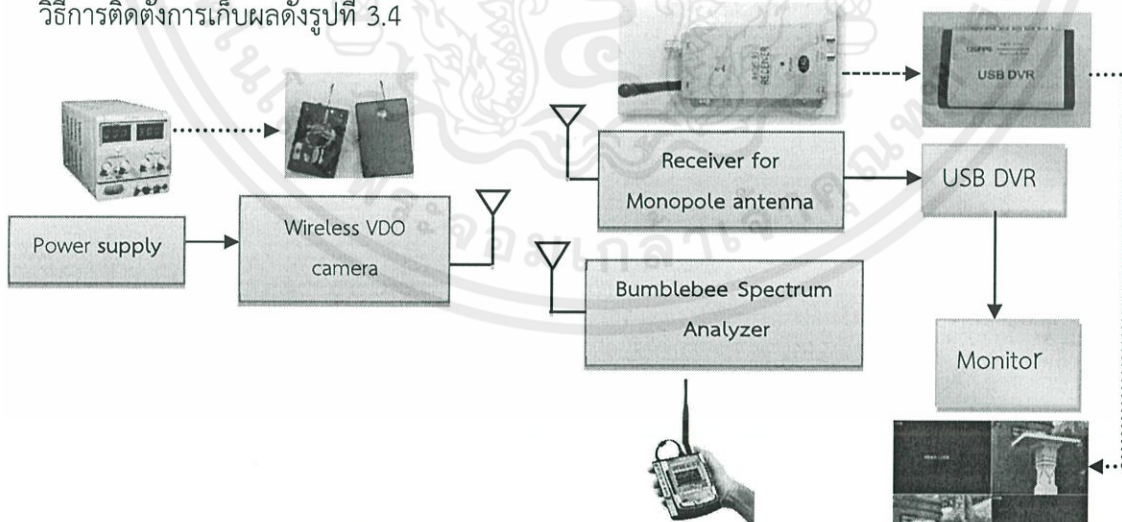
เพื่อหาค่ากำลังงานที่เพียงพอสำหรับการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 3.1 จึงลดแหล่งจ่ายแรงดันที่ป้อนให้กับอุปกรณ์เครื่องส่งสัญญาณลง เพื่อต้องการทราบถึงแนวโน้มกำลังของสัญญาณที่ส่งไปว่าเพียงพอที่เครื่องรับสามารถรับได้ โดยคุณภาพของภาพยังสามารถทำงานได้อยู่หรือไม่

#### 3.1.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Bumblebee spectrum analyzer
2. Power supply
3. กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหวไร้สาย
4. เครื่องรับสัญญาณ
5. USB DVR

#### 3.1.1.2 วิธีการจัดเก็บผลการทดลอง

เพื่อทำการเก็บค่ากำลังของสัญญาณส่งของเครื่องส่ง เมื่อทำการลดแหล่งจ่ายแรงดันลงโดยเครื่องจ่ายแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องส่งลง โดยใช้เครื่องรับสัญญาณเพื่อรับสัญญาณผ่าน USB DVR เพื่อแสดงผลไปยังหน้าจอ และสังเกตคุณภาพของภาพที่เปลี่ยนไปโดยวิธีการติดตั้งการเก็บผลดังรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า  
 รูปที่ 3.4 การติดตั้งการทดลองอุปกรณ์ส่งสัญญาณ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบและการจำลองผลของสายอากาศยาก็แพทช์

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการออกแบบสายอากาศที่สามารถเปลี่ยนลักษณะจำเพาะในเทอมของความถี่, โพลาริเซชัน, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายได้ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้ใช้สายอากาศยาก็แพทช์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและกะทัดรัด ราคาถูก และออกแบบจากพื้นฐานของ fundamental-mode couple path โดยที่องค์ประกอบพาราสิติกมีขนาดแตกต่างกัน องค์ประกอบตัวขับเล็กน้อย

#### 3.2.1 การวิเคราะห์การออกแบบสายอากาศ

##### 3.2.1.1 แพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular patch)

เป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะง่ายต่อวิเคราะห์ทั้งแบบสายนำสัญญาณและแบบควาวิตี้ ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำมากสำหรับฐานรองที่บางการวิเคราะห์จะเริ่มต้นจากแบบจำลองโดยใช้สายนำสัญญาณ (Transmission-line model) เพราะง่ายต่อการทำความเข้าใจ

สำหรับกรณีที่เราทราบค่าความถี่เรโซแนนท์และวัสดุฐานรองที่ใช้ เราจะสามารถคำนวณหาค่า ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมได้ดังสมการที่ 3.1

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

การออกแบบไมโครสตริปนั้นมิตัวอุปสรรคหลัก คือการกำหนดค่าความกว้างของไมโครสตริปและความหนาของวัสดุฐานรองเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ตามลักษณะที่ต้องการ ซึ่งในแผ่นตัวนำนั้น จะมีปรากฏการณ์ Fringing effect ที่สนามไฟฟ้า ณ ขอบของแผ่นตัวนำ จะมีสนามไฟฟ้าแผ่วนเกินแผ่นตัวนำ ทำให้พบว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุฐานรอง จึงต้องเพิ่มค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric;  $\epsilon_{reff}$ ) ในการคำนวณหาขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของระบบนั้น จะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองและอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ หรือมีดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้น  $\epsilon_{reff}$  ที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย ซึ่งค่า  $\epsilon_{reff}$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} = \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W / h > 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเพราะผลกระทบของสนามที่ขอบ ขนาดของแพทช์ทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปดูเหมือนว่าจะใหญ่กว่าขนาดทางกายภาพ สำหรับสนามที่ขอบของระนาบ  $E$  หลัก (ระนาบ  $x - y$ ) แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.14 เมื่อขนาดของแพทช์ตามแนวยาวถูกขยายออกไปในแต่ละด้านด้วยระยะ  $\Delta L$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล  $\epsilon_{\text{reff}}$  และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง  $W/h$  ค่าโดยประมาณสามารถหาได้โดย

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

เนื่องจากความยาวของแพทช์ในแต่ละด้าน ถูกขยายด้วย  $\Delta L$  ความยาวประสิทธิผลของแพทช์ในตอนนี้คือ ( $L = \lambda/2$  สำหรับโหมดหลัก  $\text{TM}_{010}$  และไม่มีการแผ่พลังงานที่ขอบ)

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L$$

### 3.2.1.2 สายอากาศยาก็

คุณลักษณะของสายอากาศยาก็อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากความยาวของพาราสิติกมีความยาวที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบจึงมีหลากหลายวิธี โดยถ้าองค์ประกอบพาราสิติกมีความยาวมากกว่าความยาวขององค์ประกอบเรโซแนนซ์ ( $L_R$ ) พาราสิติกนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน หรือองค์ประกอบตัวสะท้อน ในขณะที่พาราสิติกที่มีความยาวที่สั้นกว่าองค์ประกอบเรโซแนนซ์ ( $L_D$ ) พาราสิติกนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวไดเรกเตอร์ (Director) เพราะมันจะชี้ไปตามแนวแกน  $Z$  แสดงรูปการจัดวางของสายอากาศยาก็ที่ใช้ในการออกแบบดังรูปที่ 3.5



(ก) การจัดวาง

(ข) แบบรูประนาบ  $E$  จากการคำนวณตามทฤษฎี

รูปที่ 3.5 อาร์เรย์สององค์ประกอบที่ประกอบด้วยตัวขับยาว  $L = 0.47\lambda$  และตัวสะท้อนยาว  $0.482\lambda$  วางห่างกัน  $0.15\lambda - 0.25\lambda$  โดยรัศมีเส้นลวดทั้งสององค์ประกอบคือ  $0.00425\lambda$  [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศออกแบบโดยพื้นฐานของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม โดยแพทช์เป็นรูปสี่เหลี่ยมอยู่บนระนาบกราวด์ โดยที่ระนาบกราวด์มีความกว้าง  $g$  มีองค์ประกอบพาราสิติกเป็นตัวสะท้อน แพทช์มีความสูง  $h$  และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น  $\epsilon_r$  อยู่ในระนาบ  $x-y$  และถูกป้อนด้วยโพรบ ที่  $f_x$  และ  $f_y$  บนแกน  $x$  และ  $y$  สำหรับแพทช์เดี่ยวตรงกลาง ซึ่งคือแพทช์องค์ประกอบตัวขับ มีขนาดความกว้างและความยาว  $W_x, W_y$  ตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  ในแต่ละความยาวคลื่น dielectric substrate ( $\lambda_d$ ) จะให้สนามไฟฟ้าที่อินเตอร์เฟสบนช่องว่าง ซึ่งการแพร่ของสนามไฟฟ้าอยู่ในโหมด  $TM_{020}$  หรือ  $TM_{200}$  อย่างไม่อย่างหนึ่ง ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณ ส่วนองค์ประกอบพาราสิติก  $r_x$  และ  $r_y$  (โดย  $r_x$  มีความกว้างและความยาว  $b_x, c_x$  และ  $r_y$  มีความกว้างและความยาว  $b_y, c_y$  ตามลำดับ) ในกราวด์เดียวกันจะให้แบบรูปการแพร่กระจายแบบมีทิศทางเฉพาะทิศทาง (Directional pattern) โดยตำแหน่งห่างจากแพทช์เดี่ยวในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  เป็นระยะ  $a_x$  และ  $a_y$  ตามลำดับ

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เรานำไปคำนวณเพื่อออกแบบได้ โดยทำการออกแบบสายอากาศที่มีจุดป้อนที่ หนึ่งทำงานที่ความถี่ 2.41 GHz และจุดป้อนที่สองทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz เลือกใช้ฐานรอง FR4-substrate ที่มีความหนา 1.441 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  4.36 และ Loss tangent 0.00119 โดยผลที่ได้จากการคำนวณข้างต้นทำให้พารามิเตอร์เป็นดังนี้

$W_x$	มีค่าเท่ากับ 57.5 mm
$W_y$	มีค่าเท่ากับ 58.5 mm
$a_x = a_y$	มีค่าเท่ากับ 7.18 mm
$b_x = b_y$	มีค่าเท่ากับ 57.5 mm
$c_x = c_y$	มีค่าเท่ากับ 71.86 mm
$f_x = f_y$	มีค่าเท่ากับ 14.38 mm
$g$	มีค่าเท่ากับ 187.5 mm

ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นสำหรับปรับเปลี่ยนขนาด เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะที่ดีตามลักษณะจำเพาะเหมาะกับการใช้งาน

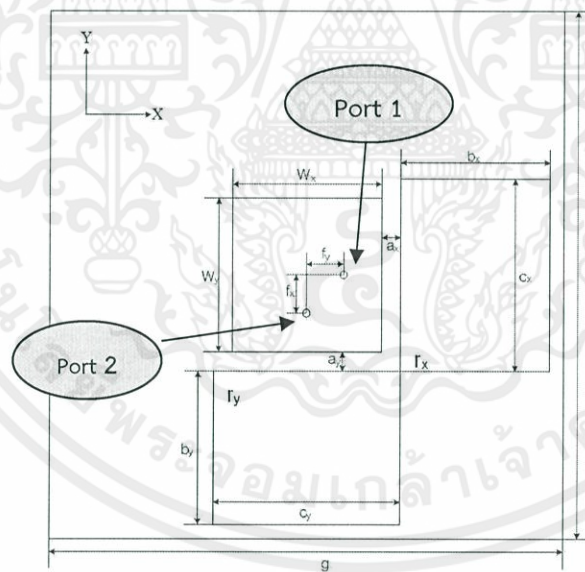
### 3.2.2 การจำลองผลการทำงานของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์สายอากาศนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณา เช่น  $|S_{11}|$   $|S_{22}|$   $|S_{21}|$   $|S_{12}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย โดยการจำลองนั้น จะใช้ค่าเอกสารพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้คำนวณมาจากข้างต้น โดยใช้โปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า จำลองการนำด้านการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของสายอากาศเริ่มต้นดังรูปที่ 3.6 เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบต่อไป

ตารางที่ 3.1 ตารางพารามิเตอร์ของสายอากาศยาก็แพทช์จากการวิเคราะห์ผล

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$W_x$	57.5
$W_y$	58.5
$a_x = a_y$	7.18
$b_x = b_y$	57.5
$c_x = c_y$	71.86
$f_x = f_y$	14.38
g	187.5



รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นที่ทำการจำลอง

เมื่อทำการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ผลจะให้ความสำคัญของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{22}|$  มาใช้ในเอกสารประกอบการพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ โดยในการพิจารณานั้นสายอากาศจะต้องมี  $|S_{11}|$  ในด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

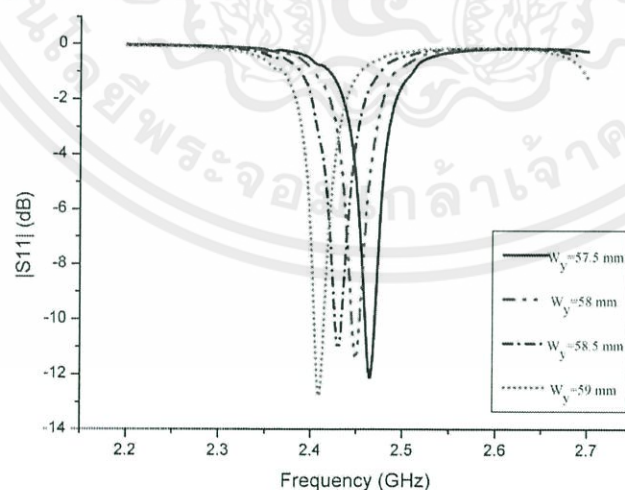
และ  $|S_{22}|$  น้อยกว่า  $-10$  dB ซึ่งที่จุดบ่อนที่หนึ่ง มีความถี่กลางที่  $2.41$  GHz มี  $|S_{11}|$  อยู่ที่  $-0.6$  dB และจุดบ่อนที่สอง มีความถี่กลางที่  $2.45$  GHz มี  $|S_{22}|$  อยู่ที่  $-5.3$  dB ยังไม่สามารถใช้งานได้ และค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมคือ น้อยกว่า  $-20$  dB ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) หรือการป้องกันปัญหาการรบกวนกันระหว่างสองจุดบ่อน ยังมีค่าที่ไม่เหมาะสมคือ มี  $|S_{21}|$  เท่ากับ  $-15.3$  dB และ  $|S_{12}|$  เท่ากับ  $-29.85$  dB จึงทำให้เกิดผลกระทบดังกล่าวอยู่ อีกทั้งการให้ความสำคัญของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยพิจารณาการลดลำคลื่นด้านหลังให้มีขนาดที่เล็กลงเพื่อทำให้มีความจำเพาะทิศทางมากขึ้น เราจึงจำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะของสายอากาศครอบคลุมที่ย่านความถี่ที่ใช้งาน และทิศทางการแพร่กระจายคลื่นมีทิศทางตรงตามที่ต้องการมากที่สุด

### 3.2.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

เป็นการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ตัวที่เราจะพิจารณา โดยที่ค่าความถี่ของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ยังคงค่าเดิม แล้วทำการเปรียบเทียบซึ่งทำให้เห็นแนวโน้มของพารามิเตอร์ตัวนั้นๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด

#### 3.2.3.1 การปรับเปลี่ยนค่าความยาว $W_y$

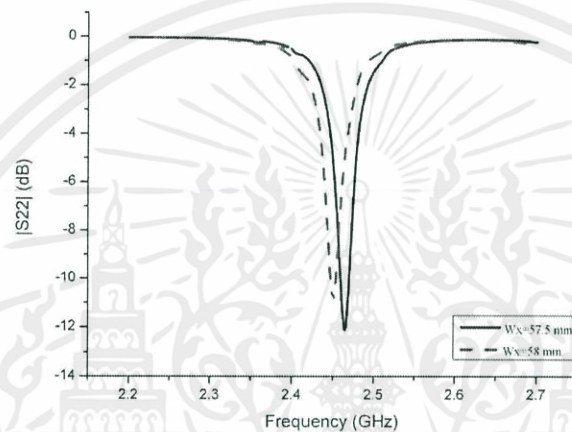
จากการคำนวณข้างต้นค่าความยาวของ  $W_y$  เท่ากับ  $58.5$  mm ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง เพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานได้โดยจุดบ่อนที่หนึ่งทำงานที่ความถี่  $2.41$  GHz ซึ่งจะเห็นว่าความกว้างเท่ากับ  $59$  mm จะมีแนวโน้มที่ค่า  $|S_{11}|$  ที่ดีที่สุดซึ่ง  $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ  $-12.69$  dB ดังนั้นจึงเลือกให้ความยาวนี้แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.7 การจำลองที่  $|S_{11}|$  สำหรับค่า  $W_y$  ต่างๆ ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.2 การปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง $W_x$

จากการคำนวณข้างต้นค่าความกว้างของ  $W_x$  เท่ากับ 57.5 mm ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง เพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานได้โดยจุดป้อนที่สองทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าความกว้างเท่ากับ 58 mm จะมีแนวโน้มที่ให้ค่า  $|S_{22}|$  ที่ดีที่สุดซึ่ง  $|S_{22}|$  มีค่าเท่ากับ -10.89 dB ดังนั้นจึงเลือกให้ความกว้างนี้แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.8

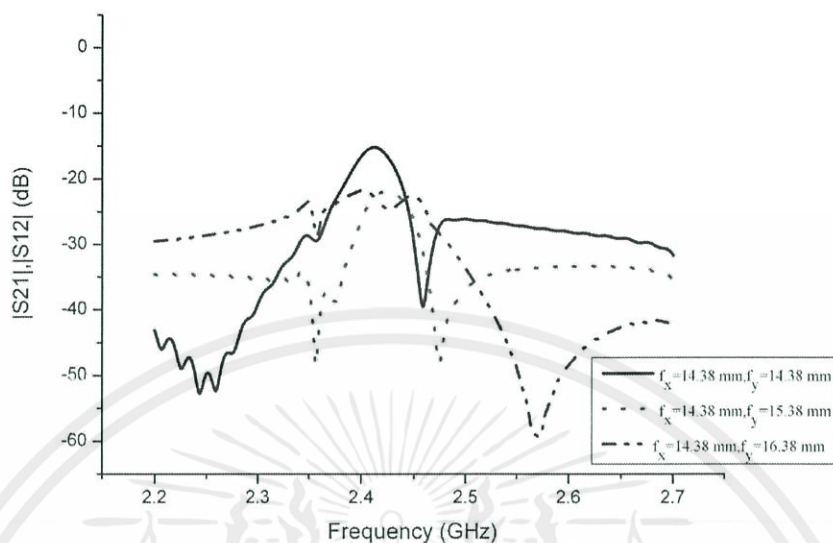


รูปที่ 3.8 การจำลองที่  $|S_{22}|$  สำหรับค่า  $W_x$  ต่างๆ

### 3.2.3.3 การปรับเปลี่ยนตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณ $f_x$ และ $f_y$

จากตำแหน่งจุดป้อนที่หนึ่งและสองข้างต้นซึ่งมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแพทช์องค์ประกอบตัวขับซึ่งมีระยะ 14.38 mm โดยระยะดังกล่าวส่งผลถึง การแยกโดดเดี่ยว (Isolation) หรือการป้องกันปัญหาการรบกวนกันระหว่างสองจุดป้อน และระยะดังกล่าวทำให้ มีค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ -15.3 dB และ  $|S_{12}|$  เท่ากับ -29.85 dB โดยค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  ที่เหมาะสมคือ น้อยกว่า -20 dB ในกรณีนี้จึงเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดป้อนเป็นระยะ  $f_x$  เท่ากับ 14.38 mm และ  $f_y$  เท่ากับ 15.38 mm ระยะดังกล่าวทำให้ มีค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ -23.19 dB และ  $|S_{12}|$  เท่ากับ -26.36 dB ซึ่งมีแนวโน้มที่ดีที่สุดดังรูปที่ 3.9

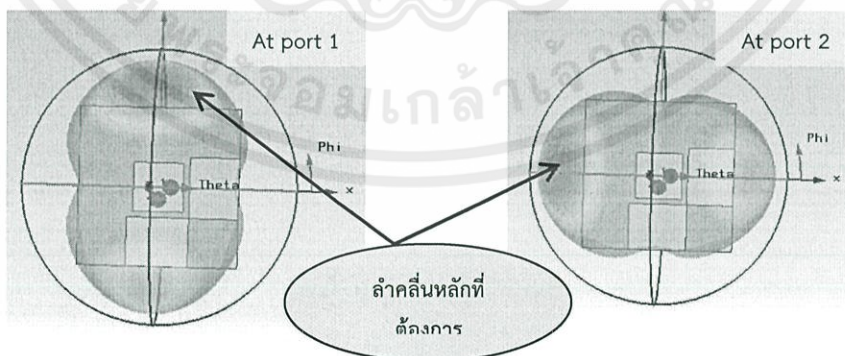
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



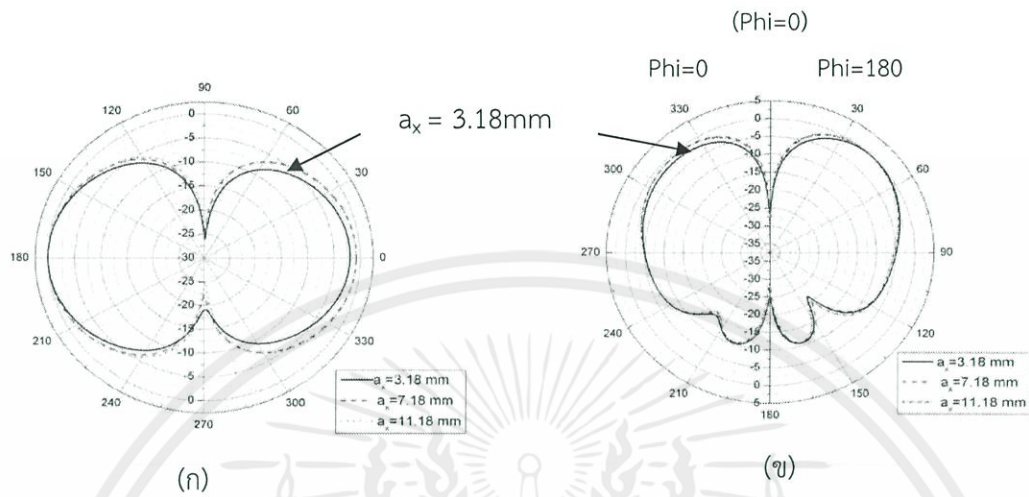
รูปที่ 3.9 การจำลองที่  $|S_{21}|, |S_{12}|$  สำหรับค่า  $f_x, f_y$  ต่างๆ

3.2.3.3 การปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแพทช์องค์ประกอบตัวขับและแพทช์องค์ประกอบตัวสะท้อน  $a_x$

เนื่องจากระยะห่างระหว่างแพทช์องค์ประกอบตัวขับ และแพทช์องค์ประกอบตัวสะท้อนเดิมมีระยะห่าง  $a_x$  เท่ากับ 7.18 mm เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในจุดป้อนที่สอง เพื่อเป็นการลดลำคลื่นด้านหลังซึ่งเป็นทิศทางที่ไม่ต้องการ โดยทิศทางที่ต้องการคือ ทิศทาง  $-X$  และมุมยกขึ้นสู่แกน  $+Z$  ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.10 พิจารณาจากระนาบ  $xy$  (Azimuth plane : varying  $\phi$ ) และระนาบ  $xz$  (Elevation plane : varying  $\theta$ ) และ โดยพบว่าระยะห่างที่เหมาะสมคือ  $a_x$  เท่ากับ 3.18 mm ซึ่งมีแนวโน้มที่ดีที่สุดดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.10 ตัวอย่างทิศทางลำคลื่นที่ต้องการ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นค่า  $a_x$  ต่างๆ

(ก) Azimuth plane (ข) Elevation plane

หลังจากปรับแต่ละพารามิเตอร์แล้ว ก็ปรับค่าโดยรวมทั้งหมดอีกครั้งเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ผลที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ ผลสรุปที่ได้จากการจำลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ นำมาสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลสรุปตำแหน่งต่างๆของสายอากาศที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$W_x$	59
$W_y$	58
$a_x$	3.18
$a_y$	7.18
$b_x = b_y$	57.5
$c_x = c_y$	71.86
$f_x$	14.38
$f_y$	16.38
	187.5

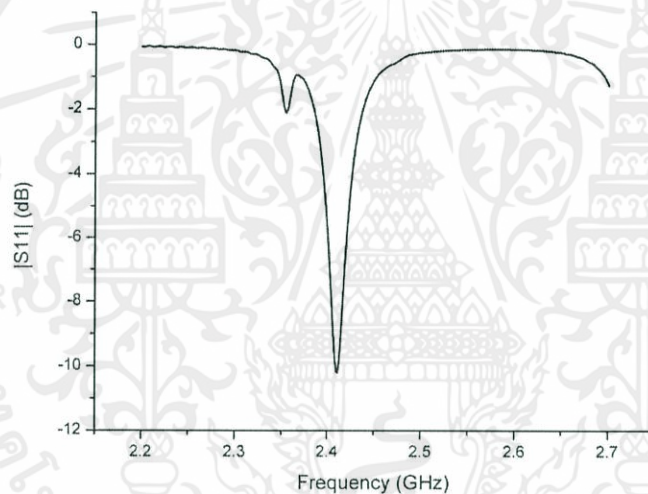
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สายอากาศยาก็แพชต์ต้นแบบ

การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น มีพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการนำมาพิจารณา เช่น  $|S_{11}|$   $|S_{22}|$   $|S_{21}|$   $|S_{12}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย

#### 3.3.1 พิจารณา $|S_{11}|$

$|S_{11}|$  จะต้องทำให้มีค่าน้อยกว่า -10 dB จึงจะทำให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นออกมาได้ โดยพิจารณาจุดบ่อนสัญญาณที่หนึ่งทำงานในย่านความถี่ 2.41 GHz แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.12 เมื่อพิจารณาแล้วในย่านความถี่ข้างต้นมีค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่า -10 dB คือ -10.17 dB ซึ่งสายอากาศมีแบนด์วิดธ์ 2.409 GHz ถึง 2.412 GHz

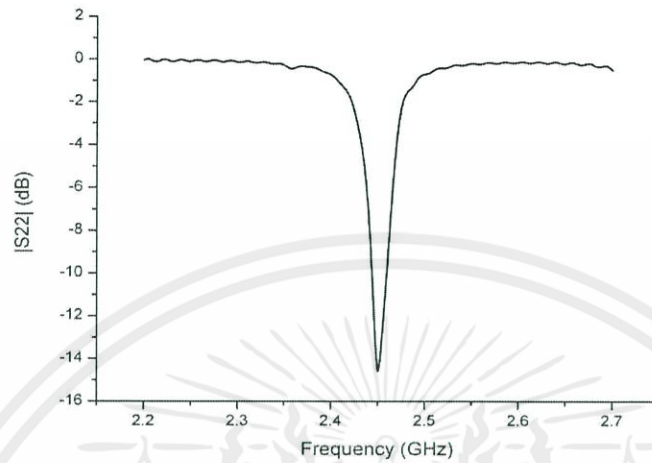


รูปที่ 3.12  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

#### 3.3.2 พิจารณา $|S_{22}|$

$|S_{22}|$  จะต้องทำให้มีค่าน้อยกว่า -10 dB จึงจะทำให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นออกมาได้ โดยพิจารณาจุดบ่อนสัญญาณที่สองทำงานในย่านความถี่ 2.45 GHz แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.13 เมื่อพิจารณาแล้วในย่านความถี่ข้างต้นมีค่า  $|S_{22}|$  น้อยกว่า -10 dB คือ -14.5 dB ซึ่งสายอากาศมีแบนด์วิดธ์ 2.444 GHz ถึง 2.4595 GHz

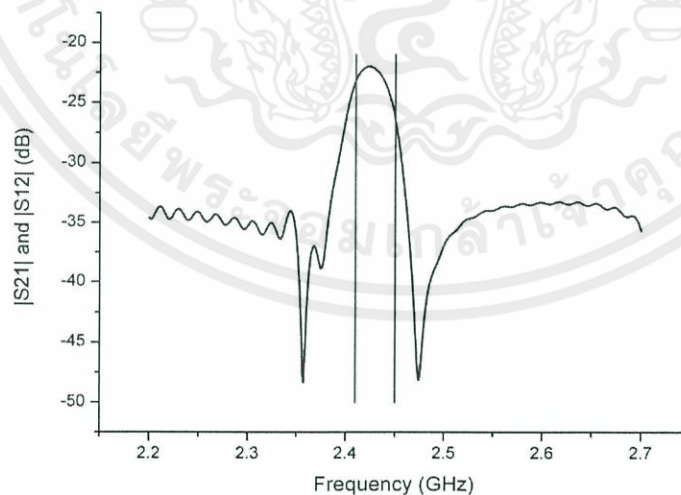
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13  $|S_{22}|$  ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

### 3.3.3 พิจารณา $|S_{21}|$ และ $|S_{12}|$

$|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  จะต้องทำให้มีค่าน้อยกว่า -20 dB โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.14 พบว่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  มีค่าน้อยกว่า -20 dB โดยค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ -23.15 dB และ  $|S_{12}|$  เท่ากับ -26.36 dB



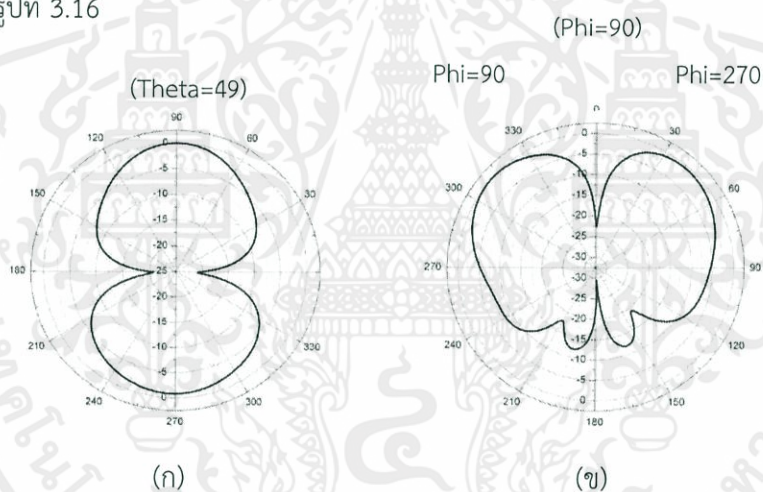
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.14  $|S_{22}|$  ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง ขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 พิจารณาอัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าที่จุดป้อนที่หนึ่ง ที่ความถี่ 2.41 GHz จะมีค่าอัตราขยาย 3.9 dBi จุดป้อนที่สอง ที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีค่าอัตราขยาย 5.8 dBi

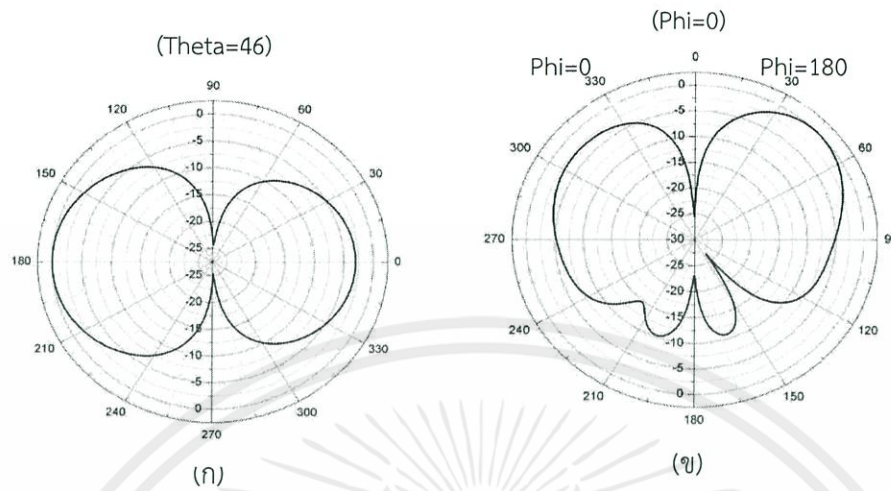
### 3.3.5 พิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยพิจารณาจากระนาบ xy (Azimuth plane : varying  $\phi$  ) และระนาบ xz (Elevation plane : varying  $\theta$  ) พบว่าที่จุดป้อนที่หนึ่ง ที่ความถี่ 2.41 GHz ลำคลื่นหลักมีอัตราขยาย 3.9 dBi ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลัง 61.5 deg. แสดงดังรูปที่ 3.15 และ จุดป้อนที่สอง ที่ความถี่ 2.45 GHz ลำคลื่นหลักมีอัตราขยาย 5.8 dBi ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลัง 75.8 deg. ดังแสดงรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของจุดป้อนที่ 1 ที่ความถี่ 2.41 GHz ที่ได้จากการจำลอง  
(ก) Azimuth plane (ข) Elevation plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของจุดป้อนที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้จากการจำลอง  
(ก) Azimuth plane (ข) Elevation plane

### 3.3.6 สรุปการออกแบบสายอากาศ

สายอากาศยาก็แพทช์ถูกออกแบบและนำมาจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะก่อนนำมาสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยการจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนนั้น จะช่วยลดความเสี่ยงของสายอากาศต้นแบบที่เมื่อสร้างแล้วอาจไม่แมตซ์ (ใช้งานไม่ได้) และสะดวกต่อการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยหลังจากจำลองคุณลักษณะจนได้ผลตามต้องการ จะได้สายอากาศที่มีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 และมีคุณลักษณะดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

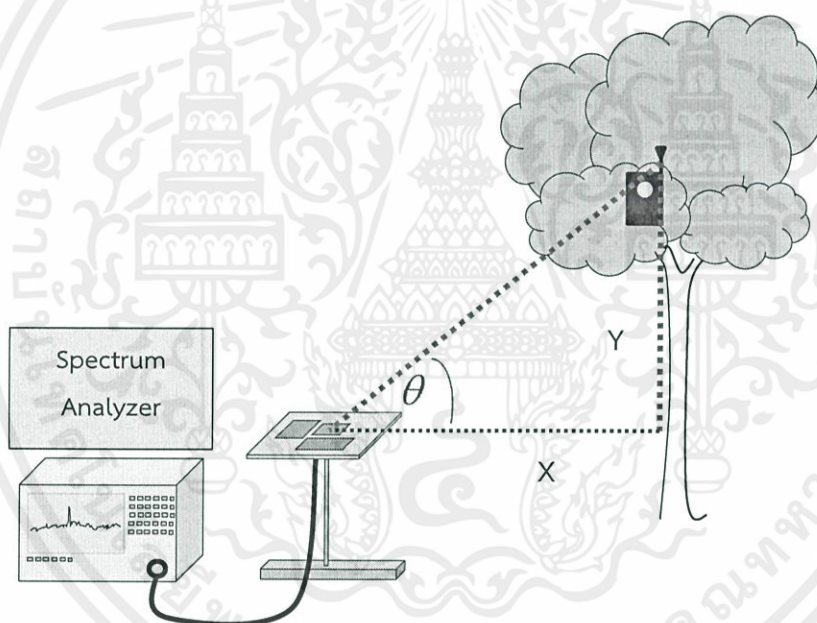
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของสายอากาศวิทยุแพทช์

จุดบ่อนที่ 1 ที่ความถี่ 2.41 GHz		จุดบ่อนที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz	
คุณลักษณะ	ค่าที่ได้ จากการจำลอง	คุณลักษณะ	ค่าที่ได้ จากการจำลอง
$ S_{11} $	-10.17 dB	$ S_{22} $	-14.5 dB
อัตราขยาย	3.9 dBi	อัตราขยาย	5.8 dBi
ช่วงกว้างความถี่	2.409 -2.412 GHz	ช่วงกว้างความถี่	2.444-2.4535 GHz
การโพลาไรซ์	Linear polarization	การโพลาไรซ์	Linear polarization
Azimuth plane		Azimuth plane	
Main lobe direction	89 deg.	Main lobe direction	180 deg.
Beam width (3 dB)	61.5 deg.	Beam width (3 dB)	75.8 deg.
Elevation plane		Elevation plane	
Main lobe direction	311 deg.	Main lobe direction	46 deg.
Beam width (3 dB)	304.6 deg.	Beam width (3 dB)	51.4 deg.
Side lobe level	-12.1 dB	Side lobe level	-2.9 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

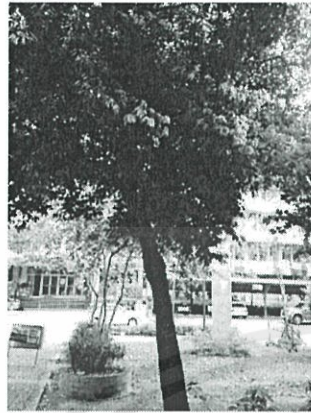
### 3.4 การทดลองสายอากาศเมื่อมีลักษณะช่องสัญญาณพุ่มไม้

เนื่องจากตำแหน่งในการติดตั้งระบบที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นพุ่มไม้ ซึ่งในระบบสื่อสารไร้สายนั้นช่องสัญญาณมีความสำคัญมากต่อคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ จึงได้ทำการศึกษาความแตกต่างของระดับกำลังของสัญญาณเมื่อช่องสัญญาณที่เป็นลักษณะพุ่มไม้ในแบบต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการติดตั้งระบบ โดยทำการวัดค่า 1000 ครั้งเพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณที่รับได้เพราะช่องสัญญาณไม่ใช่อวกาศว่างกำลังจึงมีค่าไม่คงที่ โดยมีองค์ประกอบลักษณะในการติดตั้งเพื่อทดลองดังรูปที่ 3.17 โดยตำแหน่งการติดตั้งกล้องเป็นไปตามค่า X และ Y เมื่อมีมุม  $\theta$  คือมุมที่สายอากาศมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ตามคุณลักษณะที่ได้ทำการออกแบบในกรณีนี้คือ 35-45 องศาจากระนาบสายอากาศที่ขนานกับพื้น



รูปที่ 3.17 องค์ประกอบลักษณะในการติดตั้งเพื่อทดลองช่องสัญญาณพุ่มไม้ในลักษณะต่างๆ โดยมีกรณีในการศึกษาลักษณะช่องสัญญาณพุ่มไม้แบบต่างๆดังรูปที่ 3.18 3.19 และ 3.20

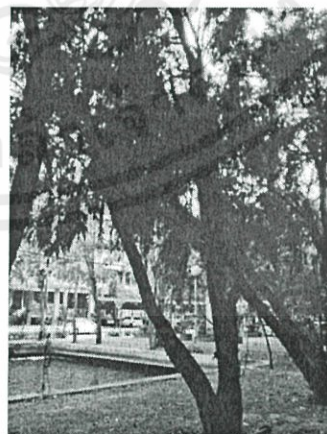
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ช่องสัญญาณพุ่มไม้กรณีที่ 1



รูปที่ 3.19 ช่องสัญญาณพุ่มไม้กรณีที่ 2



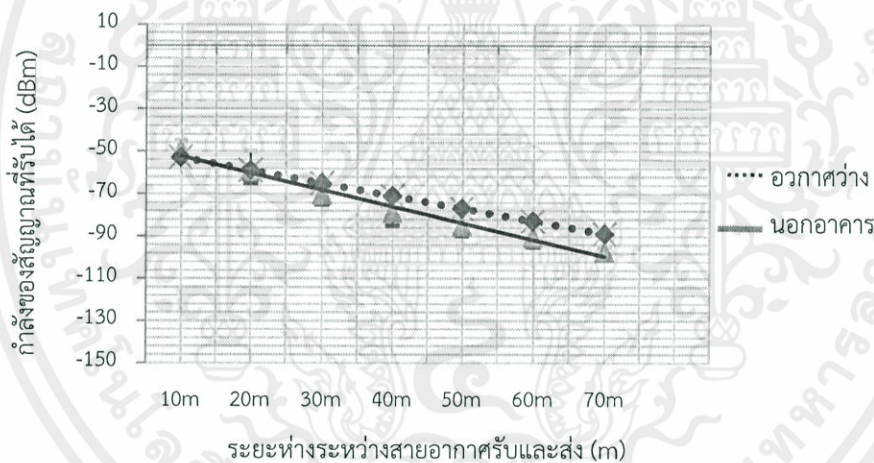
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.20 ช่องสัญญาณพุ่มไม้กรณีที่ 3 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

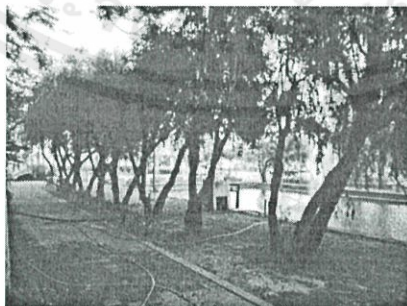
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองและบทวิเคราะห์การทดสอบช่องสัญญาณ

ด้วยระยะทางเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลถึงคุณภาพของสัญญาณและด้วยช่องสัญญาณที่ไม่ใช่อากาศว่างเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่เครื่องรับสัญญาณที่ได้รับ ระหว่างช่องสัญญาณที่เป็นอากาศว่างและช่องสัญญาณที่ประกอบไปด้วยต้นไม้ พบว่าสัญญาณที่ได้รับจากช่องสัญญาณที่ไม่ใช่อากาศว่างมีค่าต่ำกว่าช่องสัญญาณที่อากาศว่าง แสดงดังรูปที่ 4.1 เพราะเกิดการกระจายของสัญญาณ การสะท้อนหรือการเลี้ยวเบนต่างๆ ดังจะเห็นจากบริเวณที่ได้ทำการทดลองรูปที่ 4.2



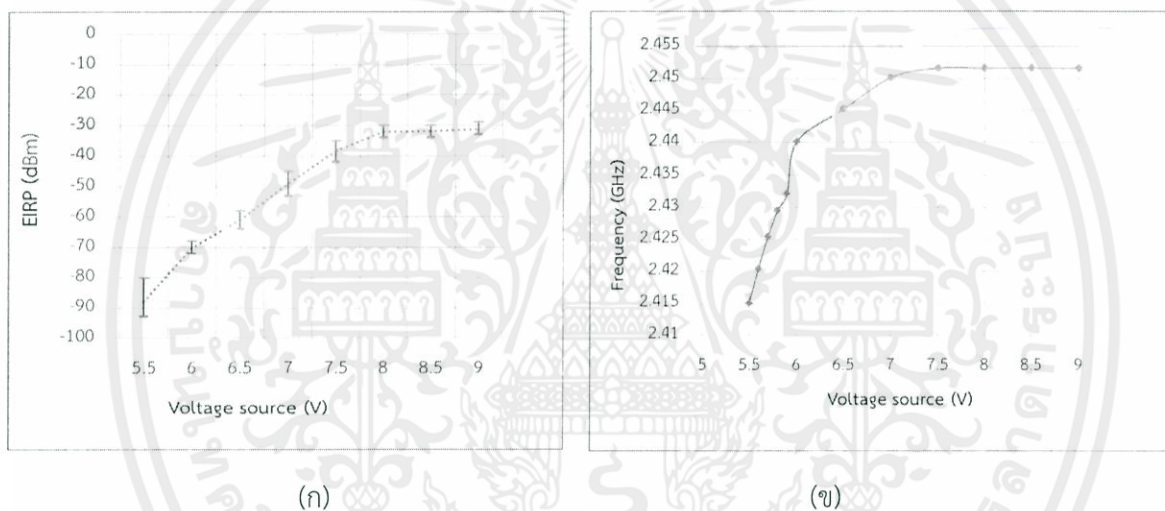
รูปที่ 4.1 กำลังงานของสัญญาณที่เครื่องรับรับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.2 บริเวณที่ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงระยะทาง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองและบทวิเคราะห์การทดสอบอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำต้องการหาพลังงานที่พอเพียงสำหรับการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 3.1 โดยมีค่าการสูญเสียเนื่องจากระยะทาง ดังรูปที่ 3.2 จึงได้ทำการทดลองดังกล่าว พบว่าเมื่อลดแหล่งจ่ายแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องส่งลงทำให้ กำลังงานรวมในส่วนภาคส่งมีค่าลดลง ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.3 (ก) ในขณะที่เดียวกันพร้อมกับทำให้ ความถี่เนื่องจากการใช้งานมีการเปลี่ยนแปลงโดยความถี่มีการลดต่ำลงดังจะแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) ซึ่งบริเวณที่อยู่ในวงรีคือบริเวณที่เครื่องรับสามารถรับภาพได้เพราะกำลังรวมในส่วนภาคส่งยังคงเพียงพอที่เครื่องรับสามารถรับได้ ภาพได้ เมื่อไฟเลี้ยงมีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 4.3 (ก) EIRP และ (ข) ความถี่การทำงานของเครื่องส่งเมื่อทำการลดแรงดันไฟเลี้ยงลง

## 4.3 ผลการทดลองและบทวิเคราะห์การออกแบบสายอากาศยาสูบ

หัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการทดสอบสายอากาศยาสูบโดย การเปรียบเทียบ  $|S_{11}|, |S_{22}|$  อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากที่ทำการจำลองและค่าที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและผลจากการจำลอง

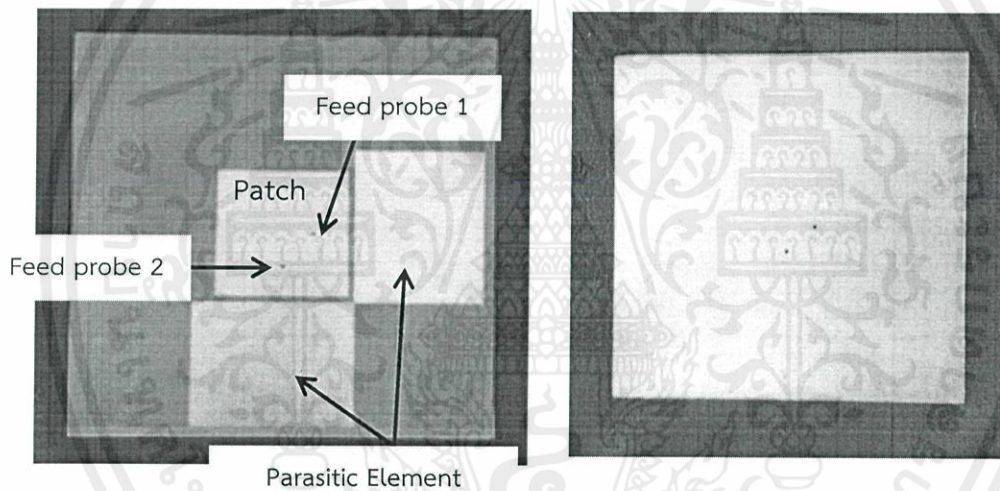
สายอากาศต้นแบบสร้างจากแผ่นพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองเป็น FR-substrate ดังรูปที่

### 4.4 มีพารามิเตอร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$W_x$	59
$W_y$	58
$a_x$	3.18
$a_y$	7.18
$b_x = b_y$	57.5
$c_x = c_y$	71.86
$f_x$	14.38
$f_y$	16.38
g	187.5



รูปที่ 4.4 สายอากาศยาก็อูเคแพทช์ต้นแบบ

#### 4.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

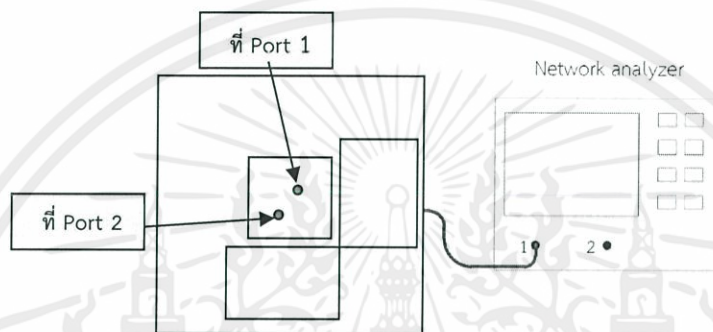
1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP 8720C 50MHz - 20GHz
2. ชุดคาร์เบรท 85022 B. 3.5 mm
3. SMA Connector
4. สายอากาศต้นแบบ

#### 4.3.2 การติดตั้งและทดสอบสายอากาศ

##### 4.3.2.1 การทดสอบหาค่า $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ $|S_{21}|$ และ $|S_{12}|$

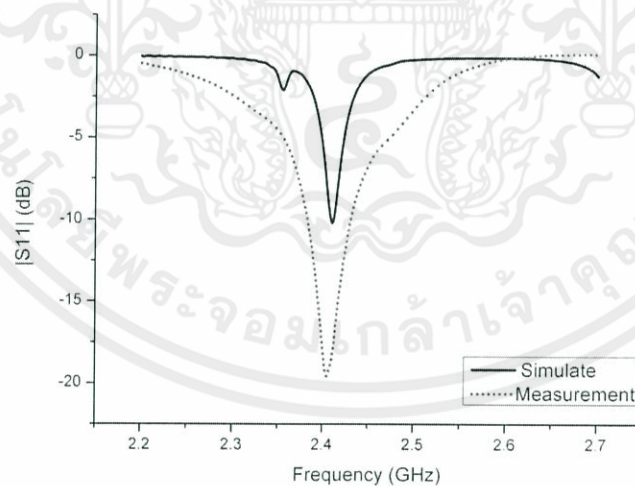
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบหาค่า  $|S_{11}|$   $|S_{22}|$   $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  จะต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งใช้รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.5 เมื่อทดสอบ  $|S_{11}|$  ดังรูปที่ 4.6 เมื่อต้องการวัด  $|S_{22}|$  ให้ต่อจุดป้อนที่สองของสายเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายพอร์ตสอง และเมื่อต้องการทดสอบค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  ให้ต่อพอร์ตหนึ่งจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจุดป้อนที่หนึ่งของสายอากาศและพอร์ตสองจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเข้ากับจุดป้อนที่สองของสายอากาศ



รูปที่ 4.5 การติดตั้งอุปกรณ์

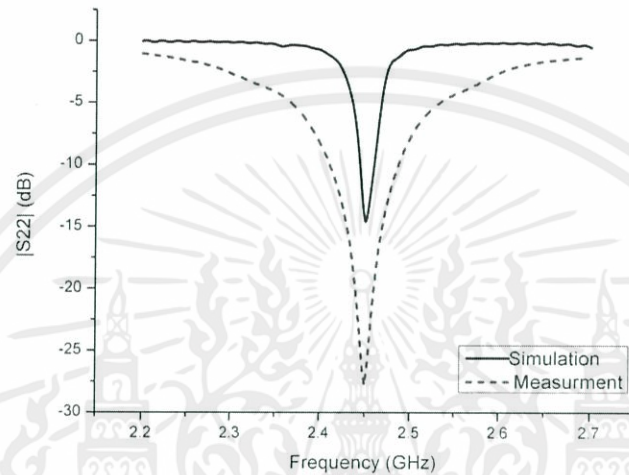
ในการทดสอบหาค่า  $|S_{11}|$  พบว่าจุดป้อนที่หนึ่งที่ความถี่ 2.41 GHz ผลที่ได้มาจากการทดสอบมีค่าเป็น -18.6018 dB ที่ ซึ่งเป็นไปตามค่าที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้งานได้เพราะมีค่า  $|S_{11}|$  จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่า -10 dB แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

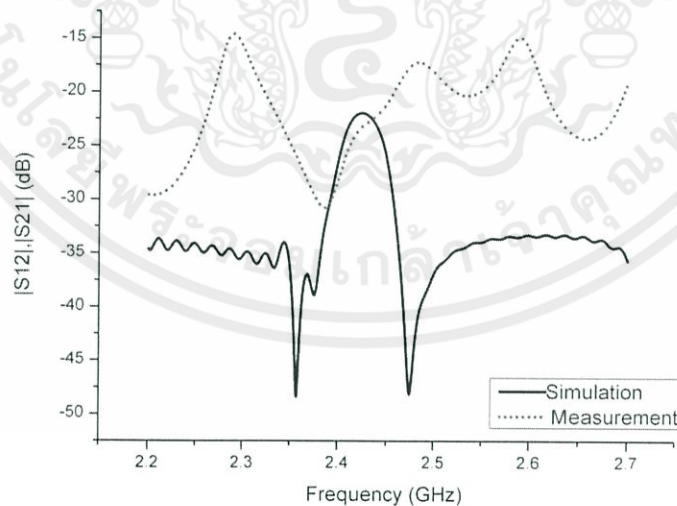
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบหาค่า  $|S_{22}|$  พบว่าจุดบ่อนที่สองที่ความถี่ 2.45 GHz ผลที่ได้มาจากการทดสอบมีค่าเป็น -27.82 dB ซึ่งเป็นไปตามค่าที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้งานได้เพราะมีค่า  $|S_{22}|$  จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่า -10 dB แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่า  $|S_{22}|$  ของสายอากาศ

ในการทดสอบหาค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  โดยค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  ที่ได้ทำการทดสอบเท่ากับ -25.24 dB และ -21.04 dB ซึ่งเป็นไปตามค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  ที่เหมาะสมคือ น้อยกว่า -20 dB แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่า  $|S_{21}|$  และ  $|S_{12}|$  ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ต้องทดสอบในสถานที่ที่มี ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำในห้องไร้การสะท้อนที่เป็นห้องสำหรับการ ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยจะทดสอบสายอากาศที่สนามระยะไกล ซึ่งเป็นระยะการ แพร่ของสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่ใช้วัดในมุมต่าง ๆ โดยเริ่มจากการคำนวณที่สนามระยะไกล ตามสมการที่ 4.1

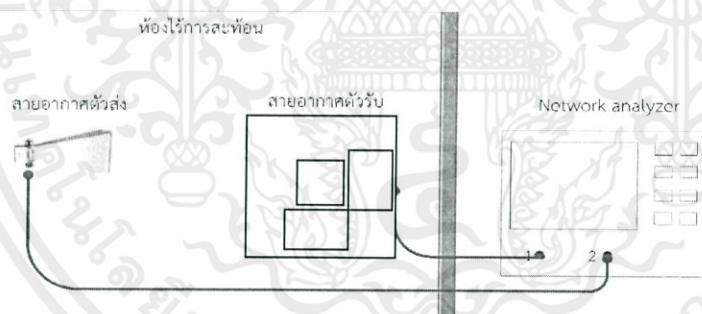
$$\text{Far-field Distance} \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (m)

D คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (m)

จากการคำนวณระยะที่ใช้ในการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและ สายอากาศรับที่ความถี่ 2.41 GHz

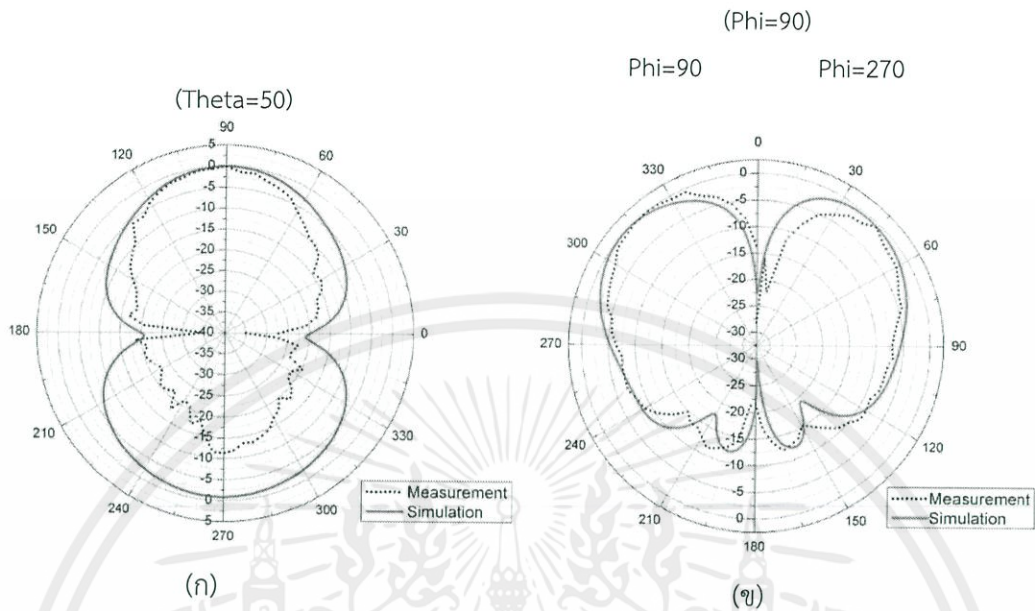
การทดสอบแบบรูป การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะต้องใช้เครื่อง Network Analyzer ในการวัดกำลังส่งและกำลังรับของสายอากาศที่ถูกติดตั้งอยู่ในห้องไร้การสะท้อน โดยสายอากาศตัวรับและตัวส่งจะวางห่างกันเป็นระยะ 1.5 m และตั้งสูงจากพื้น 1.67 m จะติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.9



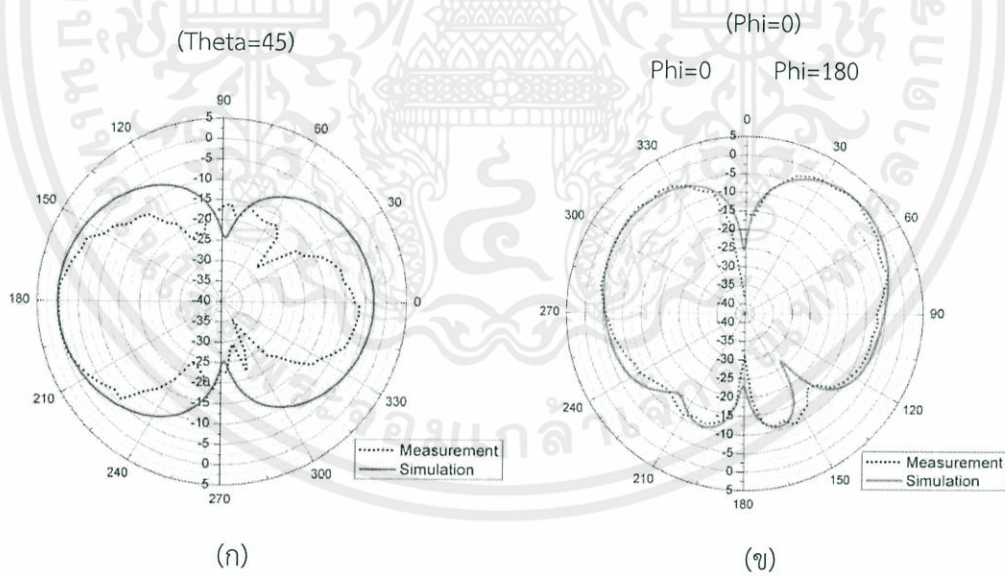
รูปที่ 4.9 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการส่งผ่านของสายอากาศ

ซึ่งในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการทดสอบสองระนาบด้วยกัน คือ Azimuth plane และ Elevation plane โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจุดบ่อนที่ 1 ที่ความถี่ 2.41 GHz  
 (ก) Azimuth plane (ข) Elevation plane



รูปที่ 4.11 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจุดบ่อนที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz  
 (ก) Azimuth plane (ข) Elevation plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.3 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ โดยนำมาวางที่ระยะที่ห่างกว่าระยะสนามระยะไกล โดยทราบค่าอัตราขยายของสายอากาศตัวใดตัวหนึ่ง จะสามารถหาค่าอัตราขยายของสายอากาศอีกตัวหนึ่งได้ โดยสามารถคำนวณได้จาก สูตร

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ  $(G_{0t})_{dB}$  คืออัตราขยายของสายอากาศส่ง (dB)

$(G_{0r})_{dB}$  คืออัตราขยายของสายอากาศรับ (dB)

$P_t$  คือ กำลังงานด้านส่ง (W)

$P_r$  คือ กำลังงานด้านรับ (W)

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง สายอากาศรับ ที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกล (m)

เมื่อพิจารณาจุดบ่อนที่หนึ่ง มีความถี่ในการใช้งานที่ 2.41 GHz โดยใช้สนามระยะไกลมีค่า 1.5 m และค่า  $10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right)$  เท่ากับ -29.07 จะสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่จุดบ่อนที่หนึ่งมีค่า 4.03 dBi

เมื่อพิจารณาจุดบ่อนที่สอง มีความถี่ในการใช้งานที่ 2.45 GHz โดยใช้สนามระยะไกลมีค่า 1.5 m และค่า  $10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right)$  เท่ากับ -27.37 จะสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่จุดบ่อนที่สองมีค่า 5.87 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.4 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการสร้าง

ในการทดสอบสายอากาศยาภิแพทซ์ จะเห็นว่าได้ว่าคุณลักษณะที่ทดสอบได้มีแนวโน้มเดียวกันกับคุณลักษณะที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่

4.2

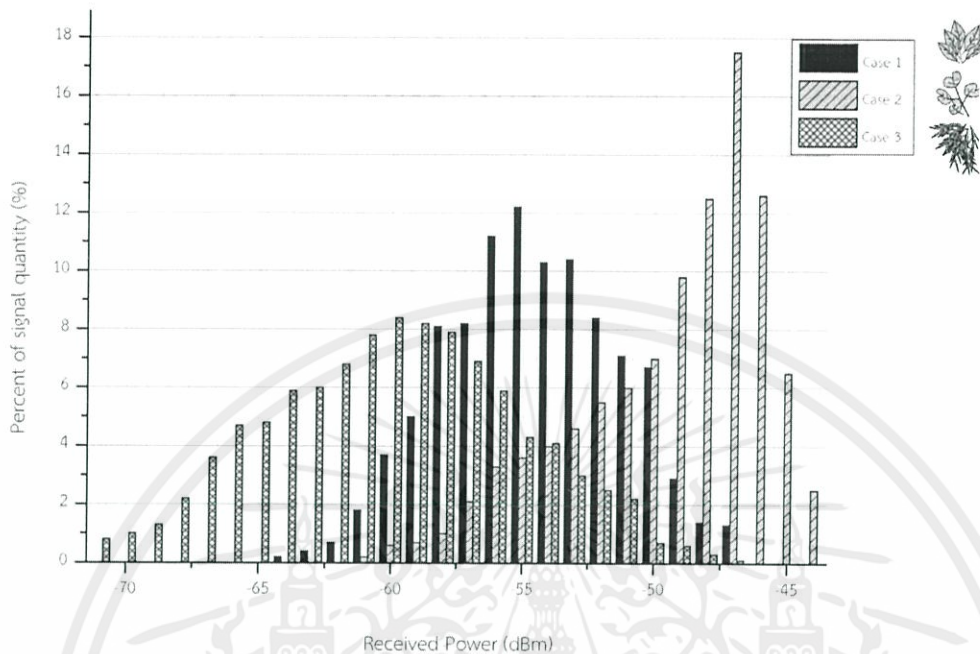
ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของสายอากาศยาภิอูตะแพทซ์ต้นแบบ

จุดบ่อนที่ 1 ที่ความถี่ 2.41 GHz		จุดบ่อนที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz	
คุณลักษณะ	ค่าที่ได้ จากการจำลอง	คุณลักษณะ	ค่าที่ได้ จากการจำลอง
$ S_{11} $	-18.60 dB	$ S_{22} $	-27.82 dB
อัตราขยาย	4.03 dBi	อัตราขยาย	5.87 dBi
การโพลาไล	Linear polarization	การโพลาไล	Linear polarization
Azimuth plane		Azimuth plane	
Main lobe direction	90 deg.	Main lobe direction	180 deg.
Elevation plane		Elevation plane	
Main lobe direction	320 deg.	Main lobe direction	45 deg.

#### 4.4 ผลการทดลองและบทวิเคราะห์สายอากาศเมื่อมีลักษณะช่องสัญญาณพุ่มไม้

เนื่องด้วยช่องสัญญาณพุ่มไม้แต่ละแบบมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพ ขนาดของใบไม้ การจัดเรียงของใบไม้แต่ละกิ่งมีความทึบโปร่งไม่เท่ากัน และตำแหน่งของกิ่งลำต้นของต้นไม้ ส่งผลถึงการสะท้อน การเลี้ยวเบน การกระเจิง ทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณ โดยจากการทดลองพบว่าในกรณีที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างกันดังกล่าวคือ กรณีที่ 1 ใบมีขนาดใหญ่ แต่ด้วยการจัดเรียงกันเป็นพุ่มมีความหนาที่บแต่ยังคงมีพื้นที่ระยะห่างระหว่างใบที่ไม่ทึบแน่น กรณีที่ 2 ใบมีลักษณะใหญ่ แต่ด้วยการจัดเรียงของใบมีระยะห่างมาก และไม่หนาที่บเท่ากรณีที่ 1 ทำให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ 1 และ 3 เพราะด้วยกรณีที่ 3 มีลักษณะเล็กแต่มีการจัดเรียงตัวของใบหนาที่บมาก จึงทำให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำกว่าในกรณีอื่นดังรูปที่ 4.12 โดยกำลังของสัญญาณในแต่ละค่าดังกล่าวที่เกิดขึ้น พบว่าระบบยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



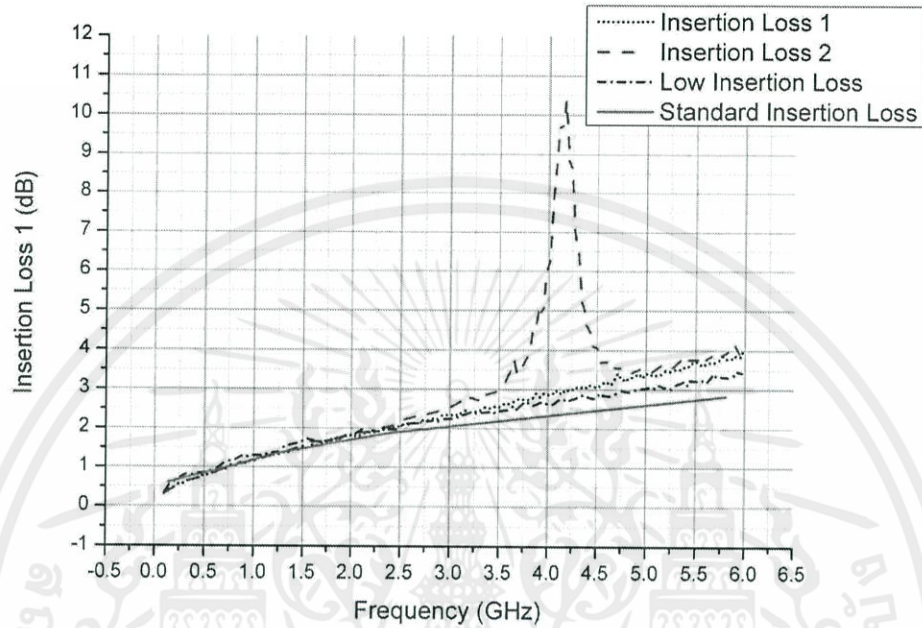
รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของกำลังสัญญาณที่ได้รับ

#### 4.5 ผลการทดลองการลดทอนของสายส่วนภาครับสัญญาณ

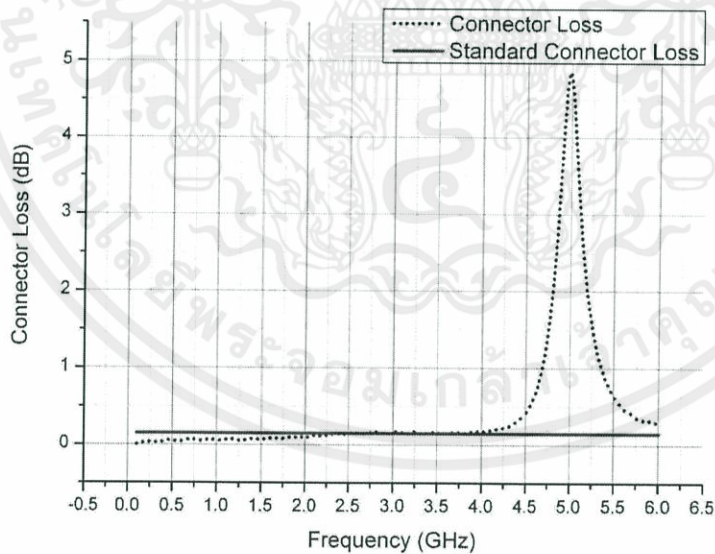
เนื่องจากระบบที่ได้ทำการออกแบบเป็นระบบที่ต้องคำนึงถึงกำลังของสัญญาณที่เพียงพอที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญ การลดทอนจึงมีความสำคัญต่อระบบนี้เป็นอย่างมาก จึงพิจารณาหาค่าการลดทอนที่เกิดจากสายเพื่อนำไปวิเคราะห์ระบบต่อไป ทำการทดลองโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อวิเคราะห์ค่า S21 ทำให้ทราบค่าการลดทอนของสายดังกล่าว รูปที่ 4.13 แสดงถึงการเปรียบเทียบการลดทอนของสายที่ได้ทำการสร้างทั้งสองเส้น สายที่มีการลดทอนต่ำและมาตรฐานของสาย โดยมีความยาว 1.5 เมตร เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะของสายที่ความถี่ต่างๆ พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นสายจะมีแนวโน้มการลดทอนที่มากขึ้นซึ่งแสดงถึงคุณภาพที่ต่ำลง โดยเมื่อมีการลดทอนเท่ากับ 3 dB แสดงถึงสัญญาณที่รับได้จะเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณที่ส่งมาทางภาคส่ง และด้วยความต้องการในการนำสายสัญญาณไปใช้งานร่วมกับสายอากาศที่ทำงานที่ความถี่ 2.41 GHz และ 2.45 GHz โดยมีสายจำนวนสองเส้น โดยเส้นที่ 1 สำหรับจุดป้อนสัญญาณทำงานที่ความถี่ 2.41 GHz มีค่าการลดทอน 1.999 dB และเส้นที่ 2 สำหรับจุดป้อนสัญญาณทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าการลดทอน 2.164 dB ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งสายทั้งสองเส้นที่ความถี่ดังกล่าวมีความแตกต่างของค่าการลดทอนกับสายที่มีการลดทอนต่ำที่ 0.05772 dB และ 0.14741 dB ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการลดทอนของสาย



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการลดทอนของหัวเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

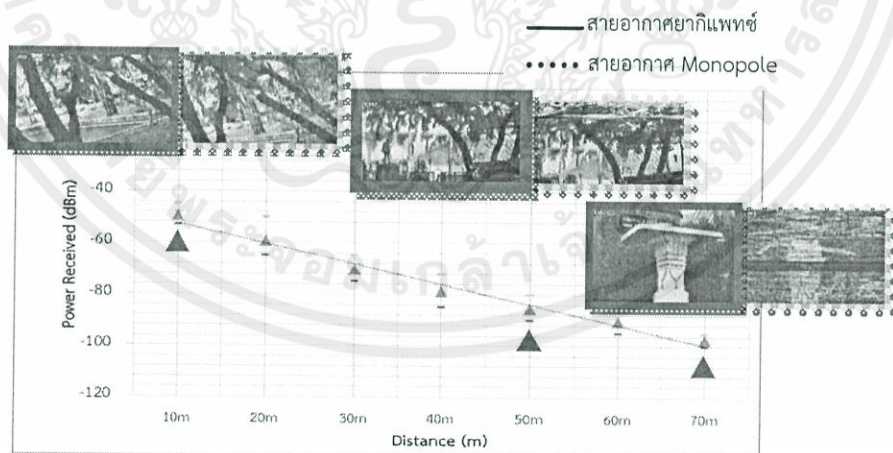
## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาระบบสื่อสารไร้สายในฟุ่มไม้ เราจึงได้นำมาปรับปรุงเพื่อใช้ในช่องสัญญาณที่เป็นต้นมะม่วง ซึ่งมีสิ่งกีดขวางหลักคือ ใบ และกิ่งของต้นมะม่วงที่ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณ รวมทั้งระยะห่างระหว่างเครื่องรับเครื่องส่ง

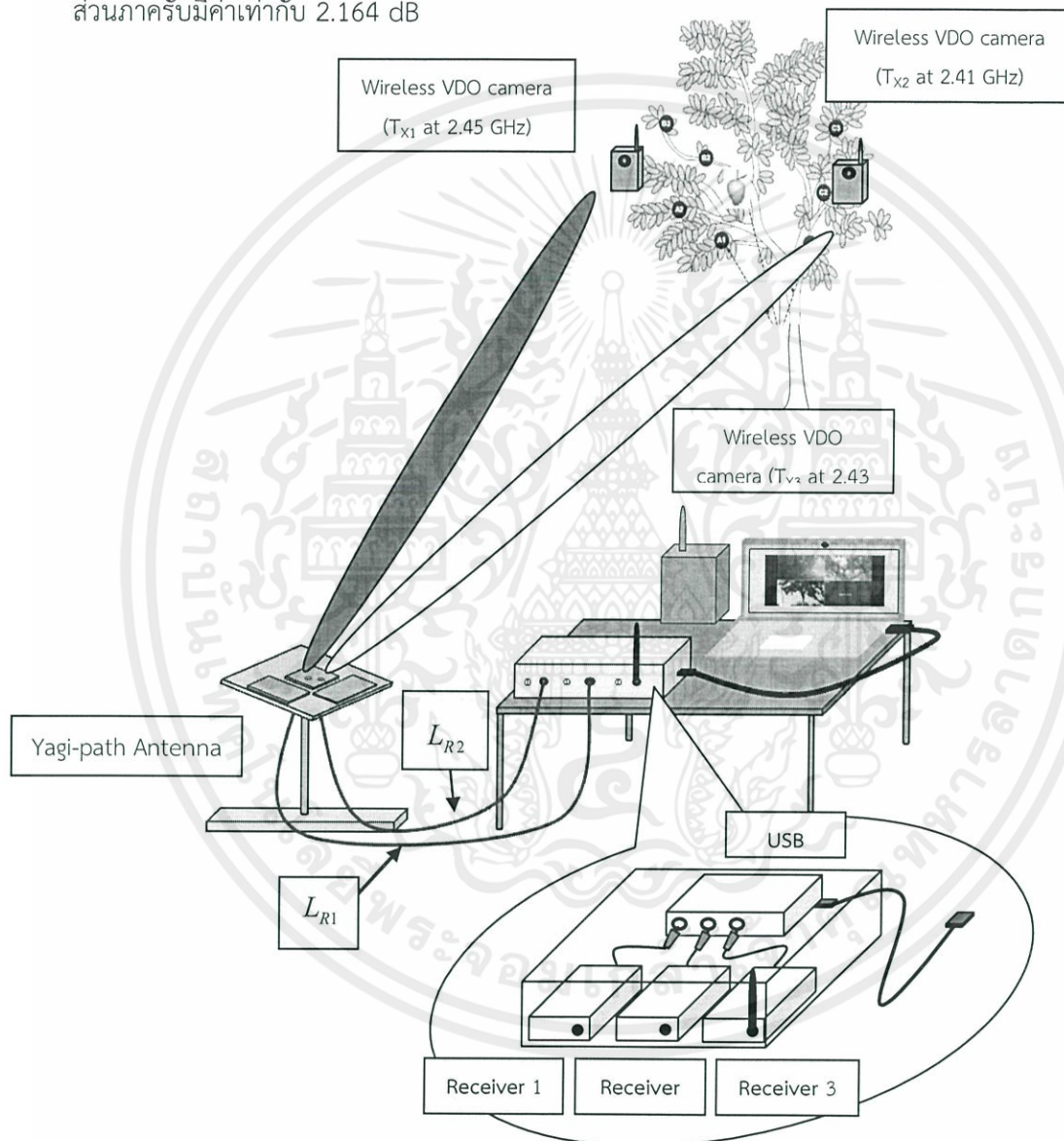
ในช่วงแรกของการทดสอบระบบเพื่อบันทึกภาพสัตรีที่มาทำลายผลมะม่วง เราได้พบปัญหาเรื่องระดับกำลังของสัญญาณจากด้านส่งมีค่าค่อนข้างต่ำ และไม่สามารถปรับค่าได้ ส่งผลให้ภาพที่รับได้ไม่ชัดเจนมีการขาดหายเป็นช่วงๆ และระยะทางที่สามารถส่งได้มีค่าน้อย เราจึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยออกแบบสายอากาศรับที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยให้ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นชี้ไปยังเครื่องส่ง เพื่อช่วยลดปัญหาเรื่องการแทรกสอดของสัญญาณเนื่องจากสายอากาศที่สร้างขึ้นมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศเดิม ผลที่ได้คือคุณภาพของภาพที่ฝั่งรับดีขึ้น สามารถลดปัญหาการขาดหายของสัญญาณ และส่งได้ระยะทางที่ไกลขึ้นด้วยกำลังส่งที่มีค่าเท่าเดิม เพื่อให้บทสรุปมีความชัดเจนขึ้นจึงทำการเปรียบเทียบคุณภาพการรับสัญญาณที่ใช้สายอากาศเดิมของเครื่องรับ และสายอากาศยาคิแพทซ์ที่ได้ทำการสร้าง ดังรูปที่ 5.1 โดยมีขั้นตอนดังหัวข้อ 3.1.1.2 พบว่าที่ระยะ 50 m สัญญาณที่ใช้สายอากาศเดิมรับสัญญาณเริ่มเกิดปัญหาภาพแรก แต่เครื่องรับที่รับจากสายอากาศยาคิแพทซ์ยังคงสามารถรับสัญญาณได้อยู่



ดังรูปที่ 5.1 เปรียบเทียบการรับสัญญาณระหว่างสายอากาศยาคิแพทซ์และสายอากาศโมนโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำที่ได้ทำการออกแบบทั้งหมดไปติดตั้งในสถานที่จริงดังรูปที่ 5.3 (ก) สามารถรับสัญญาณภาพได้ดีดังรูปที่ 5.3 (ข) โดยแสดงอุปกรณ์ในระบบที่ใช้ในการติดตั้งดังรูปที่ 5.2 เครื่องส่งมีกำลังงานรวมในส่วนภาคส่ง  $-25$  dBm โดยการลดทอนของสายภาครับคือ ที่ความถี่  $2.41$  GHz การลดทอนของสายส่วนภาครับมีค่าเท่ากับ  $1.999$  dB และ ความถี่  $2.45$  GHz การลดทอนของสายส่วนภาครับมีค่าเท่ากับ  $2.164$  dB

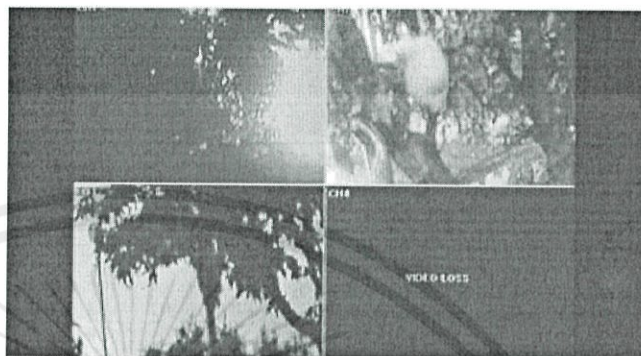


รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ในระบบที่ใช้ในการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

ดังรูปที่ 5.3 (ก) สถานที่จริงที่ได้ทำการติดตั้ง (ข) ภาพที่ได้จากการติดตั้งบันทึกผล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการบันทึกภาพถ้าใช้เวลานานมากจะส่งผลให้คุณภาพลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่ภายในเครื่องรับและเครื่องส่ง และด้วยสภาพอากาศอาจส่งผลถึงสัญญาณอีกประการหนึ่งด้วย โดยเฉพาะ ลม และฝน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Saunders , Simon R , Aragon-Zavala , Alejandro .*ANTENNAS AND PROPAGATION FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS*. 2<sup>nd</sup> Ed .England : John Wiley & Sons.Ltd , 2007.
- [2] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory, Analysis and Design*. 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley&Sons, 2007.
- [3] ดร.ศราวุธ ชัยมูล. *วิศวกรรมสายอากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556
- [4] Pobsook Sooksumrarn, Chainarong Kittiyapunya, Paiboon Yoiyod and Monai Krairiksh, "WIRELESS COMMUNICATION IN A TREE CANOPY." *Progress In Electromagnetics Research B*, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Bumble Bee™-RFID

## HANDHELD RUGGEDIZED SPECTRUM ANALYZER

### Frequency:

Standards: RFID  
Wi-Fi 802.11b/g  
ISM Band

### Span:

Resolution bandwidth: 50 kHz to 800 MHz  
50 kHz – 1 MHz (50, 100, 300, 500, 1 MHz)  
Automatic 802.11 preset bandwidths  
Video bandwidth (smoothing): 100 kHz – 1 MHz (50 kHz steps)  
Screen Averaging: 1 – 100 Averages  
Reference Stability: ± 2.5 PPM  
Sweep Time: 800 mSec (20 MHz span, 50 kHz resolution bandwidth)

### Amplitude:

Average Noise Floor (No input): < -100 dBm (reference level -70 dBm)  
Dynamic Range: > 40 dB  
Level Accuracy: ± 1.5 dB (25 deg. C)  
Max input (safe): + 0 dBm  
Max input (no saturation): - 20 dB  
Reference level: -20 to -70 dBm (10 dB steps)

### Display/Operating System/Memory:

Number of traces: 3 colors  
Trace settings: Peak hold, screen average  
Marker functions: Peak search, center frequency, left, right, delta  
Screen shots saved to .jpg file  
Display (iPAQ): see HP2795 specifications  
Operating system (iPAQ): Windows® Mobile 5.0

### Triggering:

Auto or Manual:  
Packet/Interference Trigger: Trigger analyzer when input power meets or exceeds threshold (20 MHz span)  
Trigger threshold: user settable in dBm.  
Trigger delay: user settable in mS.

### Input Connector:

SMA Female, 50Ω

### Power:

Internal battery: (Li-PO), AC or DC  
Run time (internal battery): > 3 hours  
Re-charge time: < 1 hour

### Physical Specifications:

Weight: 3 lbs.  
Dimensions: 6"H x 4"W x 6"L



Optional 2.4 GHz



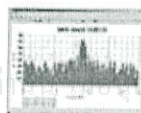
Optional 900 MHz



Optional 30 dB Attenuator



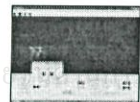
Optional 12V Power Inverter



Optional Logging Software

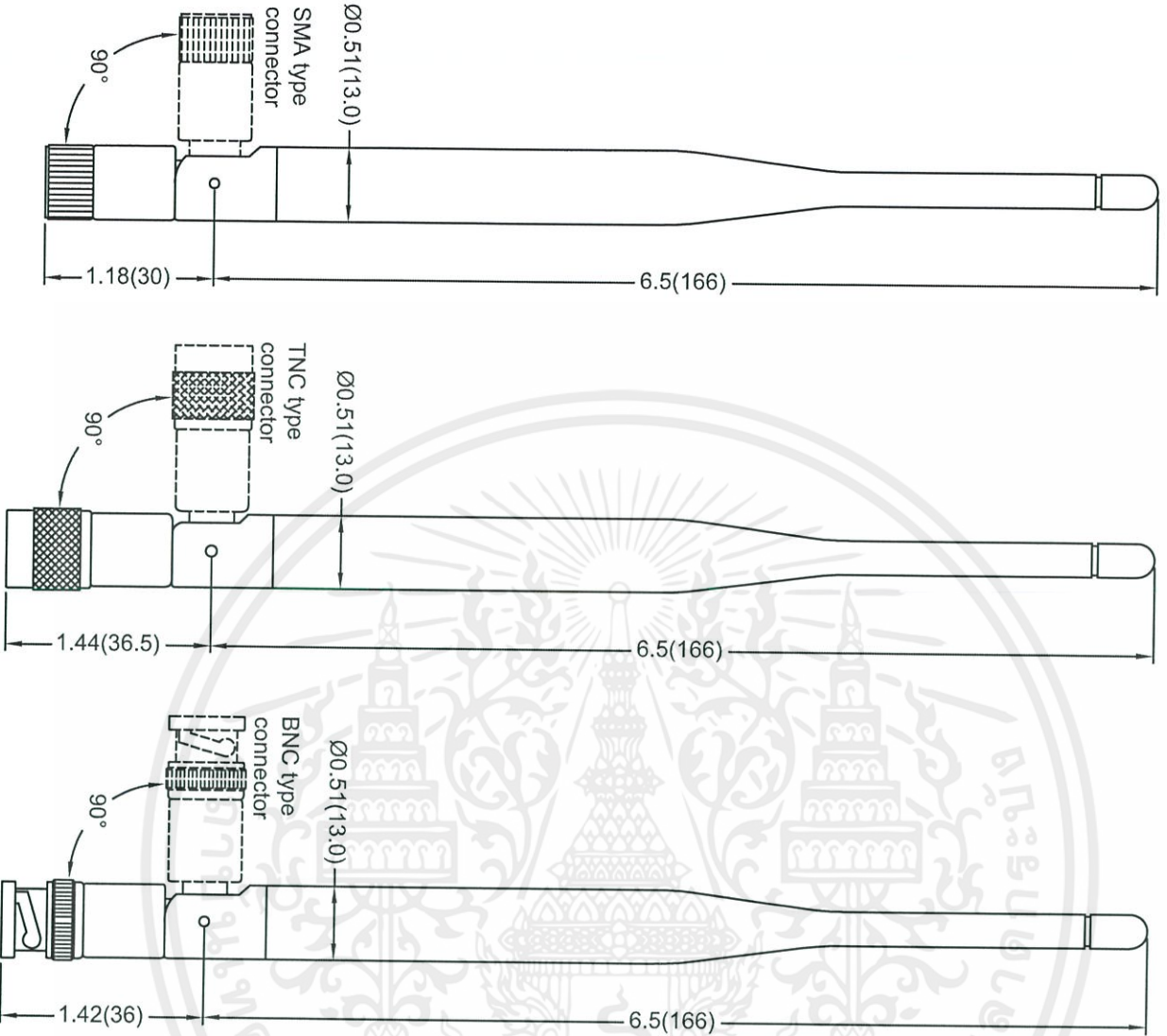


Mapping Software



RF Analysis Software

Berkeley Varitronics Systems, Liberty Corporate Park, 255 Liberty Street, Metuchen, NJ 08840  
Phone 1-888-737-4287 • Fax 732-548-3404 • www.bvsystems.com • E-mail: info@bvsystems.com



Electrical Properties:

Frequency Range: 2.4~2.5 GHz  
 Impedance: 50Ω nominal  
 V/SWR: <2.0:1  
 Gain: 5 dBi  
 Radiation: Omni  
 Polarization: Vertical

Mechanical Properties:

Material: Polyurethane(Black)  
 Whip: Polycarbonate(Black)  
 Swivel Mechanism: Brass with black chrome plating  
 Connector: -20°C to +65°C  
 Operation Temp.: -30°C to +75°C  
 Storage Temp.:

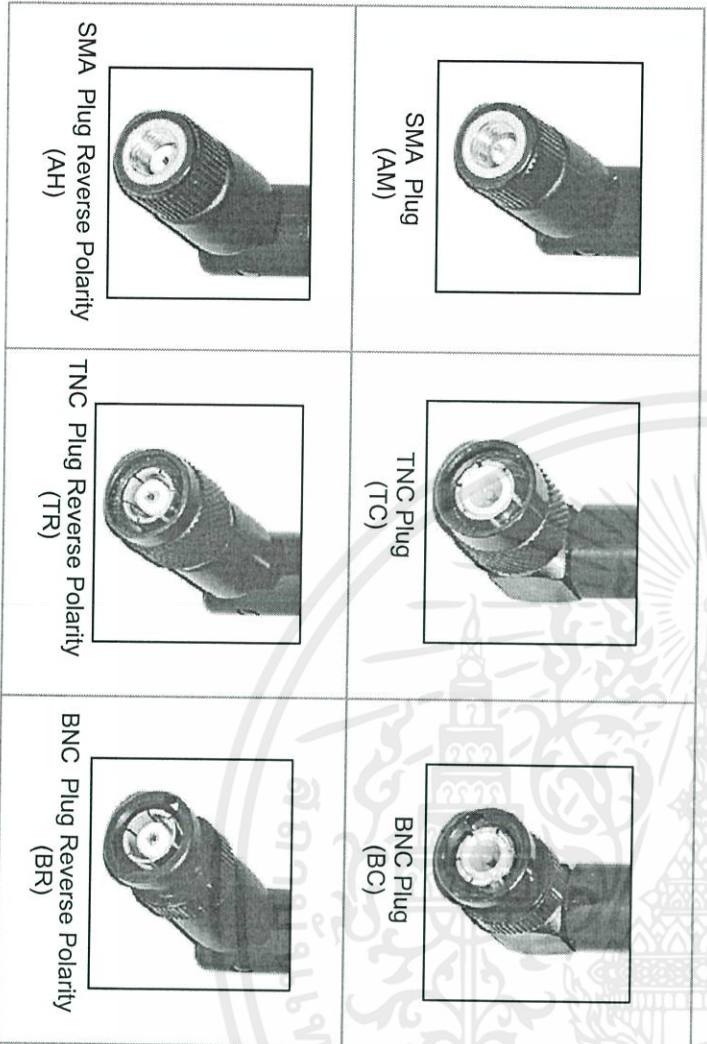
This is a RoHS compliant product.

TITLE	2.4GHz Swivel Antenna - 151 Model		Rev. Date	01/16/06	SHEET	1 of 2
UNIT	In.(mm)		DWG. NO.	S151XX - 2450S		
SCALE	none		<b>NEARSON</b>			
SCALE	none					

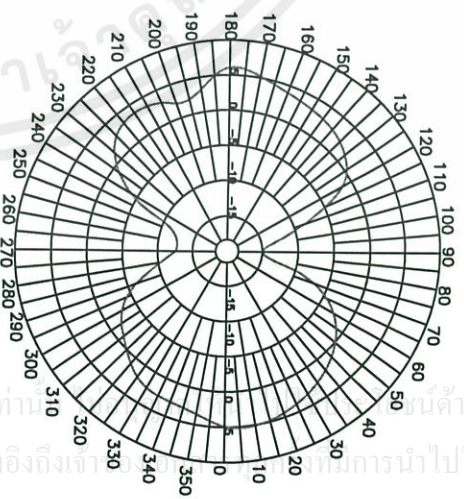
## Series Part Numbers

Connector Code -XX-	Description	P / N
AM	SMA Plug	S151AM-2450S
AH	SMA Plug Reverse Polarity	S151AH-2450S
TC	TNC Plug	S151TC-2450S
TR	TNC Plug Reverse Polarity	S151TR-2450S
BC	BNC Plug	S151BC-2450S
BR	BNC Plug Reverse Polarity	S151BR-2450S

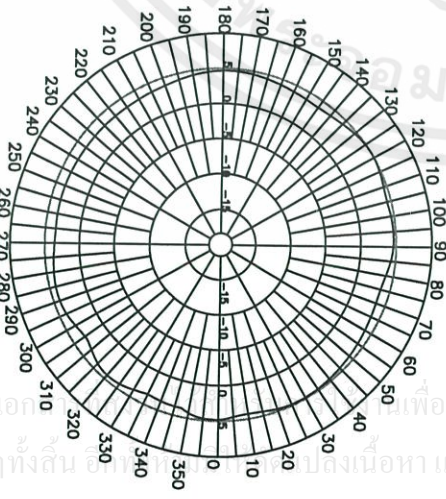
### Connector Interface



E-Plane Pattern @ 2.45GHz



H-Plane Pattern @ 2.45GHz



TITLE		2.4GHz Swivel Antenna - 151 Model		Rev. Date		SHEET	
UNIT		DWG. NO.		01/16/06		2 of 2	
In.(mm)		S151XX - 2450S					
SCALE							
none							
<b>NEARSON</b>							

All rights reserved NEARSON INC. Specification is subject to change without notice.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## RG58 RGFLEX™ Coax Braided Cable

## Product Description

## • RG series

Braided outer coaxial cable (50- and 75-ohm), for general radio station, RF jumper, cable TV, closed-circuit (CCTV) and head-end applications.

Application:



RG58 RGFLEX™ Coax Braided Cable

## Features/Benefits

## Technical Features

## Structure

Cable Type	PE-Dielectric, Braid Shield		
Size:	9/64"		
Inner conductor:	Stranded Tinned Wire 19x0.18mm (19x0.007in)	[mm (in)]	0.9 (0.035)
Dielectric:	Solid Polyethylene	[mm (in)]	2.9 (0.11)
Outer conductor:	Tinned copper braid with 96% of coverage	[mm (in)]	3.55 (0.14)
Jacket:	Polyvinyl Chloride, PVC	[mm (in)]	5.0 (0.197)
Jacket Color			

## Mechanical Properties

Weight, approximately	[kg/m (lb/ft)]	0.037 (0.024)
Minimum bending radius, single bending	[mm (in)]	25.4 (1)
Minimum bending radius, repeated bending	[mm (in)]	100 (3.94)

## Electrical Properties

Characteristic impedance	[Ω]	50 +/- 2
Relative propagation velocity	[%]	66
Capacitance	[pF/m (pF/ft)]	101 (30.8)
Inductance	[μH/m (μH/ft)]	0.253 (0.077)
Max. operating frequency	[GHz]	2.4
DC-resistance inner conductor	[Ω/km (Ω/1000ft)]	39 (11.89)
DC-resistance outer conductor	[Ω/km (Ω/1000ft)]	15 (4.6)

## Recommended Temperature Range

Storage temperature	[°C (°F)]	-50 to +85 (-58 to +185)
Installation temperature	[°C (°F)]	-20 to +60 (-4 to +140)
Operation temperature	[°C (°F)]	-40 to +85 (-40 to +185)

## Other Characteristics

Fire Performance: Flame Retardant

Other Options:

Frequency [ MHz ]	Attenuation		av. nom. Power
	[ dB/100m ]	[ dB/100ft ]	
0.5	1.30	0.396	
1.0	1.60	0.488	
5.0	3.40	1.04	
10	4.80	1.46	
20	6.80	2.07	
30	8.50	2.59	
50	10.9	3.32	
88	14.7	4.48	
100	15.6	4.75	
108	16.2	4.94	
150	19.2	5.85	
174	22.4	6.83	
200	24.0	7.32	
300	29.0	8.84	
400	34.0	10.4	
450	36.2	11.0	
500	40.0	12.2	
512	40.5	12.3	
600	42.8	13.0	
700	49.0	14.9	
800	50.0	15.2	
824	51.0	15.5	
894	56.8	17.3	
900	57.0	17.4	
925	58.6	17.9	
960	59.0	18.0	
1000	61.0	18.6	
1250	70.0	21.3	
1500	80.4	24.5	
1700	89.4	27.2	
1800	92.0	28.0	
2000	100	30.5	
2400	116	35.4	

Attenuation at 20°C (68°F) cable temperature  
Av. nom. Power at 40°C (104°F) cable temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SMA Male Crimp Connector - RG58/LMR195/Belden 9907

### SKU: SMAM-CRIMP-58

SMA Male Crimp Connector

- SMA plug
- Gold plated pin & body, nickel plated ferrule
- Supplied with heat shrink
- Suits 5mm diameter cables such as LMR195, RG58, and Belden 9907



### What is a Crimp Connector?

A crimp connector is used to terminate the end of a coaxial cable to allow connection to an RF device or antenna. Each series of connector differs by method of connection, size, and electrical properties, allowing a technician to select a connector to best match the intended purpose.

Most crimp connectors consist of three components - the connector body, pin/socket, and crimping ferrule. Terminating a coaxial cable with a crimp connector requires three tools - a wire stripper/cutter, soldering iron, and hex crimp.

### Electrical Specifications

Resistance: 50Ω  
Frequency Range: DC-18GHz  
Working Voltage: 335V RMS  
Withstand Voltage: 1000V RMS  
Contact Resistance:  
- (1) Centre Contact: <3mΩ  
- (2) Outer Contact: <2.5mΩ  
Insulation Resistance: >5000MΩ  
Insertion Loss: <0.15dB/6GHz  
VSWR: <1.1:1

### Mechanical/Environmental Specifications

Durability: >500 cycles  
Body Material: Brass  
Plating Material: Gold  
Pin/Socket Contact: Brass/Beryllium-Copper  
Pin/Socket Plating: Gold  
Crimp Ferrule Material: Copper-alloy  
Crimp Ferrule Plating: Nickel  
Insulator: PTFE  
Operating Temperature: -55° to 155° C  
CECC 22110  
MIL-C-39012  
IEC 60169-15  
RoHS Compliant (Pb Free)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้