

# สายอากาศแถวลำดับแบบร็องสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

นายพีรสิทธิ์ คำสาดี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**SLOT ARRAY ANTENNA FOR CELLULAR  
BASE STATION**



**PeerasanKumsalee**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2015**

## สายอากาศแถวลำดับแบบรื่องสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ.ดร.มนต์ทิพย์ภาอุฑฒารสกุล)

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.รังสรรค์วงศ์สรรค์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ.ดร.ปิยาภรณ์มีสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พิธีสัมพันธ์ คำสาถิ : สายอากาศแถวลำดับแบบร่องสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

(SLOT ARRAY ANTENNA FOR CELLULAR BASE STATION)

อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 101 หน้า

ปัจจุบันระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้ง (cellular mobile telephone) มีการใช้งานสูงขึ้น เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายจากพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ในรัศมีทำการของสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้งานได้รับความสะดวกมากขึ้นในการเชื่อมต่อเครือข่าย โดยมีสถานีฐาน (base station) เป็นอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าถึงเครือข่ายซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดกระจายสัญญาณและเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายเข้าด้วยกัน จุดเข้าถึงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการผลิตภายในประเทศ จึงไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีได้มากเท่าที่ควร ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสถานีฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเซลลูลาร์ให้มากขึ้น วิทยานิพนธ์ นี้จึงได้นำเสนอสายอากาศแบบร่องที่มีแบบรูปการแผ่เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบเซลลูลาร์สำหรับสถานีฐานที่ต้องการพื้นที่กว้างในการบริการ ซึ่งมีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ที่สามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน UMTS (universal mobile telecommunication system) และได้นำสายอากาศแบบร่องมาทำการจัดแถวลำดับ (array) จำนวน 4 อิลิเมนต์แนวตั้งเพื่อเพิ่มอัตราขยาย (gain) ให้มากขึ้น เพื่อให้สายอากาศมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional antenna) จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ลายมือชื่อนักศึกษา

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PEERASAN KUMSALEE: SLOT ARRAY ANTENNA FOR CELLULAR  
BASE STATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. RANGSAN  
WONGSAN, D.Eng., 101 PP.

## SLOT ANTENNA/BASE STATION

Nowadays, cellular mobile telephone is used increasingly because users can connect to the network system from any area within the signal coverage range, so the users can conveniently connect to the system via equipment of a base station, acting as a signal dispersion and connection point. Currently, equipments for the access points of base station cannot be manufactured domestically resulting in few technology developments. Therefore, an antenna is considered as another option that can be applied together with the base station to increase the cellular mobile telephone's efficiency. In this thesis, a design and creation of slot antenna has been proposed with a bandwidth covered frequency ranges from 1.92 GHz to 2.17 GHz for supporting the wireless communication system according to the UMTS (universal mobile telecommunication system). The array antenna of 1x4 elements of this proposed antenna was arranged to increase gain and obtain similarly characteristics as the omnidirectional antenna, therefore, it can be suitably used for the cellular mobile telephone for base station,

School of Telecommunication Engineering Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2015

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์มีสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภาอุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา คุณภูมิพงษ์ ดวงตั้ง คุณวราภรณ์ สาริชา คุณศรันย์คมกสิร์ภัทร คุณเกศภัทรา คำพิกุล คุณนุชนาฏ ฝาเพ็ยม และพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและด้านวิทยานิพนธ์อย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษา โดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้บิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

พิธีสัมพันธ์ คำสาถิ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น .....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....	4
<b>2 ทัศนั้วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	5
2.1 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1.1 สายอากาศโมโนโพล .....	5
2.1.2 สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศแบบร่องบนระนาบ .....	6
2.2 สรุป .....	10
<b>3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b> .....	11
3.1 แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว .....	11
3.2 สายอากาศไดโพล .....	12
3.3 สายอากาศโมโนโพล .....	13
3.4 สายอากาศแบบร่อง .....	13
3.5 สายอากาศไมโครสตริป .....	14

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.51	การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด .....	16
3.52	การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง .....	18
3.53	การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง .....	21
3.6	การออกแบบสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	22
3.7	สรุป .....	25
4	การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง .....	26
4.1	ศึกษาความเป็นไปได้ในการจำลองผลของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว .....	26
4.1.1	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบบน ( $W_P$ ) .....	31
4.1.2	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ ) .....	32
4.1.3	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความยาวของสตัด ( $L_S$ ) .....	33
4.1.4	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของสตัด ( $W_S$ ) .....	34
4.1.5	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ ) .....	35
4.1.6	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างสตัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T) .....	36
4.2	ศึกษาความเป็นไปได้จากการจำลองผลสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบด้านข้าง .....	40
4.2.1	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ ) .....	41
4.2.2	การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความยาวของสตัด ( $L_S$ ) .....	42



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	4.2.3 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง	
ขอบบน	( $W_F$ ).....	43
	4.2.4 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง	
	ของสตัด ( $W_S$ ).....	44
	4.2.5 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง	
	ขอบข้าง ( $L_F$ ).....	45
	4.2.6 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับระยะห่าง	
	ระหว่างสตัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T).....	46
	4.2.7 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างปีก (F)....	47
4.3	ศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องโดยการจำลองด้วย	
โปรแกรมสำเร็จรูป	.....	51
	4.3.1 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับระยะห่าง	
ระหว่างอิลิเมนต์	(D).....	52
4.4	สรุป.....	58
<b>5</b>	<b>การสร้างและการวัดทดสอบ</b> .....	<b>59</b>
5.1	วิธีการสร้างสายอากาศแบบร่อง ( Type A).....	59
5.1.1	ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน .....	62
5.1.2	ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ .....	63
5.1.3	ผลการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง .....	63
5.1.4	ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	67
5.2	วิธีการสร้างสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (Type B).....	69
5.2.1	ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน .....	71
5.2.2	ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ .....	71
5.2.3	ผลการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง .....	72
5.2.4	ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย .....	76

## สารบัญ (ต่อ)

## หน้า

5.3 วิธีการสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่มีปีกสแลบ (Type C).....	77
5.3.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน .....	77
5.3.2 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ .....	78
5.3.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง .....	79
5.3.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย .....	84
5.4 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลองผล .....	85
5.5 เปรียบเทียบสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ .....	88
5.6 สรุป .....	90
<b>6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>91</b>
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา .....	91
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	95
ประวัติผู้เขียน.....	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงช่วงเวลาของการพัฒนาสายอากาศแบบร่องบนระนาบ .....	7
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่อง .....	30
4.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่อง .....	37
4.3 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแบบร่องต้นแบบ .....	37
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลบ .....	48
4.5 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบ .....	48
4.6 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแฉวลำดับ .....	54
4.7 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องตัวเดี่ยว (type A), สายอากาศแบบร่องตัวเดี่ยวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแฉวลำดับ แบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C) .....	57
5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่อง (Type A) .....	61
5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type B) .....	70
5.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรม สำเร็จรูป CST .....	86
5.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ .....	88

## สารบัญรูป

### รูปที่      หน้า

2.1	สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก	6
3.1	แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว	11
3.2	สายอากาศไดโพล	12
3.3	สายอากาศโมนโพล	13
3.4	สายอากาศแบบช่องเปิดบนตัวผิวทรงกระบอก	14
3.5	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	15
3.6	กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำ	15
3.7	ลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด	16
3.8	โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW)	17
3.9	ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม	17
3.10	โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง	18
3.11	โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง	21
3.12	โครงสร้างสายอากาศแบบร่องและขนาดของพารามิเตอร์พื้นฐาน	22
3.13	สัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	25
4.1	โครงสร้างสายอากาศแบบร่องและพารามิเตอร์พื้นฐาน	26
4.2	การคำนวณขนาดของสายนำสัญญาณด้วยโปรแกรม CST	30
4.3	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบบน $W_F$	31
4.4	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบล่าง $W_L$	32
4.5	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสัด $L_S$	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสตัด $W_s$ ..... 34
4.7	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบข้าง $L_F$ ..... 35
4.8	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสตัดกับระนาบกรวดร่วม T..... 36
4.9	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ ของสายอากาศแบบร่อง..... 38
4.10	ผลจากการจำลองสายอากาศแบบร่อง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST..... 39
4.11	ผลจากการจำลองสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST..... 40
4.12	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบล่าง $W_L$ ..... 41
4.13	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสตัด $L_s$ ..... 42
4.14	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างขอบบน $W_F$ ..... 43
4.15	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสตัด $W_s$ ..... 44
4.16	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบข้าง $L_F$ ..... 45
4.17	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสตัดกับระนาบกรวดร่วม T..... 46
4.18	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของปีก F..... 47
4.19	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ ของสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบ..... 49

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	ผลจากการจำลองสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST..... 50
4.21	โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้สายอากาศแบบร่อง จำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C)..... 51
4.22	แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ D..... 52
4.23	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง..... 53
4.24	ผลจากการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบร่องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ..... 55
4.25	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจำลองของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว (type A) สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแถวลำดับ แบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C)..... 56
4.26	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจำลองของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว (type A) สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแถวลำดับ แบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C) ..... 57
5.1	โปรแกรม AutoCAD 2007 แปลงไฟล์..... 60
5.2	โปรแกรม CorelDRAW X5 กำหนดการตัดแผ่นวงจรพิมพ์..... 60
5.3	สายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type A)..... 61
5.4	กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัด ทดสอบของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type A)..... 62
5.5	ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type A)..... 63
5.6	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่อง ต้นแบบ (Type A)..... 64
5.7	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบร่อง ต้นแบบ (Type A)..... 65
5.8	แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type A)..... 66
5.9	แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type A)..... 68
5.10	โปรแกรม AutoCAD 2007 แปลงไฟล์..... 69

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 โปรแกรม CorelDRAW X5 กำหนดการตัดแผ่นวงจรพิมพ์	69
5.12 สายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	70
5.13 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	71
5.14 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	72
5.15 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	73
5.16 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	74
5.17 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	75
5.18 แบบจำลอง การวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type B)	76
5.19 สายอากาศดินแบบ Type C	77
5.20 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type C)	78
5.21 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องดินแบบ(Type C)	78
5.22 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าของ สายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type C)	80
5.23 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศแบบร่องดินแบบ (Type C)	81
5.24 แบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศแบบร่องดินแบบ(Type C)	82
5.25 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังที่ความถี่ต่ำสุด (1.92 GHz) ความถี่กลาง (2.045 GHz) และความถี่สูงสุด (2.17 GHz) ของสายอากาศแบบร่องดินแบบ(Type C)	83
5.26 แบบจำลอง การวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องดินแบบ(Type C)	85
5.27 แสดงการเปรียบเทียบผลวัดทดสอบของสายอากาศแบบร่องดินแบบ (type A), สายอากาศแบบร่องดินแบบ (type B), สายอากาศแบบร่องดินแบบ (type C)	87
5.28 สายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์	89

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายจากพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ในรัศมีทำการของสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้งานได้รับความสะดวกมากขึ้นในการเชื่อมต่อเครือข่าย จากข้อดีของระบบการสื่อสารแบบไร้สายดังกล่าวส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารแบบไร้สายอย่างกว้างขวาง และเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงในขณะนี้คือระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (cellular mobile phone) เป็นระบบที่สามารถใช้งานได้สองทางได้พร้อมกัน คือทั้งสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่สามารถส่งข้อมูลสวนทางกันได้ภายในการติดต่อเดียวกันที่อยู่ภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน (base station) โดยสถานีฐานจะเป็นจุดที่อำนวยความสะดวกในการเข้าถึงเครือข่ายซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดกระจายและเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายเข้าด้วยกัน หากจุดเข้าถึงที่เป็นจุดกระจายสัญญาณไม่อยู่ในรัศมีทำการของสัญญาณอาจทำให้เครือข่ายติดต่อกันด้วยความเร็วไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง จึงมีการผลิตอุปกรณ์ไร้สายที่ส่งสัญญาณได้ไกลกว่าปกติขึ้น หรืออาจมีการติดตั้งสายอากาศ อัตรายายสูง (high gain antenna) เข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มระยะทาง โดยระบบที่ใช้ในปัจจุบันนี้มีอุปกรณ์บางอย่างที่ไม่มีการผลิตภายในประเทศจึงไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีได้มากเท่าที่ควร ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้งานร่วมกับระบบ ดังกล่าว เพื่อใช้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบเซลล์เคลื่อนที่ให้มากขึ้น โดยสายอากาศจะทำหน้าที่ในการแผ่กระจายกำลังของ คลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกไป ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของสายอากาศตามแบบรูปการแผ่กระจาย กำลัง ได้ 2 แบบคือ สายอากาศแบบมีทิศทางหรือเจาะจงทิศทาง (directional antenna) จะมีลักษณะการแผ่กระจาย กำลัง ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ เพื่อใช้เชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด ( point-to-point) และสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional antenna) ซึ่งมีลักษณะการกระจาย กำลัง ของคลื่นรอบสายอากาศในระนาบอะซิมุท (azimuth plane) ออกไปทุกทิศทางอย่างเท่ากัน

สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยวที่นิยมนำมาใช้ร่วมกับสถานีฐานในปัจจุบัน ได้แก่ สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) เป็นสายอากาศที่มีน้ำหนักเบา



ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง แต่มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง นิยมอย่างมากเนื่องจากมีลักษณะที่ง่ายต่อการสร้างนอกจากนี้ยังมีข้อดีในแง่ของราคาถูก และน้ำหนักเบา ส่วนอีกประเภทหนึ่งก็คือ สายอากาศแบบร่อง ( slot antenna) เป็นสายอากาศที่สร้างบนพื้นฐานหลักการ คล้ายสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งให้ความกว้างแถบความถี่ใช้งานค่อนข้างกว้าง

สายอากาศแบบร่องในรูปแบบดังกล่าวนอกจากจะมีข้อดีในเรื่องของความกว้างลำคลื่น (beamwidth) กว้างแล้ว ยังมีระดับโหลบข้าง (sidelobe level) ที่ต่ำ มีแบบรูปการแผ่กระจาย กำลัง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ คล้ายสายอากาศไดโพล รวมทั้งสามารถออกแบบและสร้างได้ง่ายบนแผ่นพิมพ์วงจร ( print circuit board : PCB ) และมีความง่ายในการปรับ การแมตซ์ ของอิมพีแดนซ์ (impedance matching)การป้อนกำลังงาน สายอากาศด้วยเส้นไมโครสตริป ( microstrip line) ดังนั้น วิทยานิพนธ์ นี้จึงได้นำเสนอสายอากาศแบบร่องที่มีแบบรูปการแผ่กำลังเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบเซลลูลาร์สำหรับสถานีฐานที่ต้องการพื้นที่กว้างในการบริการ โดยไม่ต้องใช้สายอากาศแบบแยกส่วน (sector antenna) มาประกอบกัน ซึ่งมีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ที่สามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน UMTS (universal mobile telecommunication system) ได้จากนั้นได้นำสายอากาศแบบร่องมาทำการจัดแถวลำคลื่น (array) เพื่อเพิ่มอัตราขยาย(gain) ให้มากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษารูปแบบและออกแบบสายอากาศแบบร่อง สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและจำลองผลสายอากาศแบบร่องที่ เพิ่มเติม ปีกด้านข้างทั้งสองข้าง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและจำลองผลสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ใส่ปีก ด้านข้างทั้งสองด้านด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป
- 1.2.4 เพื่อสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบที่พัฒนาแล้ว เปรียบเทียบผลของการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 เมื่อทำการออกแบบด้วยสายอากาศแบบร่องจะส่งผลให้ได้ความกว้างแถบที่กว้างมากขึ้นและสามารถรองรับย่านความถี่ 3G ได้

1.3.2 เมื่อนำสายอากาศแบบร่องใส่ปีก ด้านข้างเพิ่มเติมจะ ทำให้มีอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น

1.3.3 เมื่อนำสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกทั้งสองข้างมาจัดแถวลำดับทำให้มีอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น

#### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการออกแบบและจำลองผลสายอากาศ แบบร่อง โดยเพิ่มปีกสองข้าง ที่ช่วงความถี่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz และสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

1.4.2 ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่เพิ่มปีกทั้งสองข้าง สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

#### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาสายอากาศสำหรับสถานีฐาน

1.5.2 ศึกษารูปแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะสายอากาศแบบร่องที่เหมาะสมและตรงกับความต้องการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

1.5.3 ศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบบร่อง ที่เพิ่มเติมเพิ่มปีกด้านข้าง ทั้งสองด้านของสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

1.5.4 ศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่เพิ่มเติมปีกด้านข้างทั้งสองด้านของสายอากาศ

1.5.5 ศึกษาวิธีการลดระดับโพลข้างของสายอากาศ ที่เกิดจากการจัดแถวลำดับ

1.5.6 ศึกษาวิธีการใช้สายเฟสที่สามารถรองรับช่วงความถี่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz

1.5.7 สร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่มีปีกทั้งสองข้างต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบร่องที่ต้องการความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ซึ่งสามารถใช้กับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ได้ โดยใช้สายอากาศเพียงตัวเดียว และนำสายอากาศแบบร่องมาทำการเพิ่ม เติมปีก

ทั้งสองข้างและจัดแถวลำดับเพื่อเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ เพื่อให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลต่าง ๆ สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง โดยมีเนื้อหาทั้งหมด 6 บทด้วยกัน

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์สำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย การเลือกสายอากาศที่มีความเหมาะสมกับระบบดังกล่าว โดยเฉพาะสายอากาศแบบร่องซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการด้านคุณสมบัติขั้นต้นที่ต้องการได้เป็นอย่างดีวัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมุติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแต่ละชนิดที่ใช้ในงานการสื่อสารแบบไร้สาย โดยเฉพาะงานวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศแบบร่อง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น มีแถบความถี่กว้าง มีน้ำหนักเบา สามารถออกแบบและสร้างได้ง่าย ซึ่งมีความเหมาะสมและตรงกับความต้องการ และ กล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริป และสายอากาศแบบร่อง

**บทที่ 3** กล่าวถึงแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว และสายอากาศต่างๆ ที่ให้แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวและการนำสายนำสัญญาณระนาบร่วมมาใช้กับสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งจะเรียกสายอากาศแบบนี้ว่าสายอากาศแบบร่อง และการออกแบบสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

**บทที่ 4** กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Computer Simulation Technology (CST) เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสร้างสายอากาศแถวลำดับต้นแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อยืนยันความถูกต้องด้วยผลการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ

**บทที่ 6** กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยทั้งหมด ปัญหาที่พบรวมทั้งวิธีการแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับต้นแบบต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สายอากาศมีหน้าที่สำคัญในระบบสื่อสารคือ การรับและส่งสัญญาณข้อมูล ดังนั้นการเลือกใช้สายอากาศที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้งานก็จะเป็นการใช้งานสายอากาศได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ สายอากาศที่ใช้สำหรับระบบเซลลูลาร์มีด้วยกันหลายแบบหลายชนิด โดยมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป และได้มีการพัฒนาและปรับปรุงมาโดยตลอด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อมากที่สุด โดยในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่ใช้สำหรับระบบเซลลูลาร์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ 1) สายอากาศโมโนโพล และ 2) สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

#### 2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับสายอากาศที่ใช้งานในระบบสื่อสารแบบไร้สายนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ เพื่อพิจารณาให้ลึกกลงมาในระดับที่สนใจและให้สอดคล้องกับ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สายอากาศที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามประเภทโครงสร้างของสายอากาศและคุณลักษณะที่สนใจได้ดังนี้

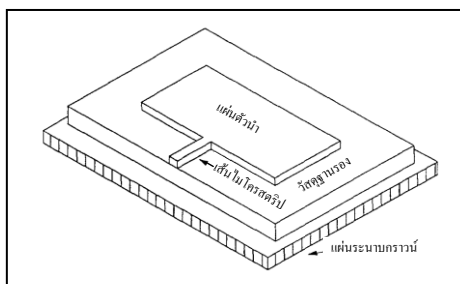
##### 2.1.1 สายอากาศโมโนโพล

ปัจจุบันสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในระบบสื่อสารแบบไร้สายมากที่สุดคือ สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีน้ำหนักเบาและมีโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง (Chen, Peng and Liang, 2005) โดยส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่ในแผ่กระจายคลื่นจะถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศนี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล (dipole antenna) ข้อเสียของสายอากาศโมโนโพลคือ สามารถใช้งานได้เพียงแถบความถี่เดียว

### 2.1.2 สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศแบบร่อง งบนระนาบ

สายอากาศไมโครสตริป (Jame and Hall, 1989) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น ) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) และมีความกว้างแถบที่แคบไม่เพียงพอต่อความต้องการในบางระบบ แสดงดังรูปที่ 2.1 ไมโครสตริปได้รับความนิยมนอย่างมากในการใช้งาน เป็นสายอากาศเนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ด้านลม และสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ และยังมีข้อดีในแง่ของราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง สายอากาศแบบร่องบนระนาบ เป็นสายอากาศที่สร้างบนพื้นฐานหลักการจากสายอากาศไมโครสตริปซึ่งให้ ความกว้างแถบ ความถี่ใช้งานค่อนข้างกว้าง (A. Dastranj and H. Abiri, 2010)

สายอากาศแบบร่องในรูปแบบดังกล่าวนอกจากจะมีข้อดีในเรื่องของความกว้างลำคลื่น (beamwidth) กว้างแล้ว ยังมีระดับโพลซ้าง (sidelobe level) ที่ต่ำ มีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ คล้ายโมโนโพล (Jen-Fen Huang, 2000) รวมทั้งสามารถออกแบบและสร้างได้ง่ายบนแผ่นพิมพ์วงจร และมีความง่ายในการปรับการแมตช์ของอิมพีแดนซ์ในการป้อนกำลังงานสายอากาศด้วยเส้นไมโครสตริป (Kai Fong Lee and Wei Chen, 1997) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอสายอากาศแบบร่อง ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่มีแบบรูปการแผ่กำลัง แบบรอบทิศทางในระนาบเดียว เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ สำหรับสถานีฐานที่ต้องการพื้นที่กว้างในการบริการ ซึ่งมีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ที่สามารถรองรับระบบสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน UMTS ซึ่งวรรณกรรมที่มีผู้วิจัยได้ดำเนินการมาในอดีตและเกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ได้ถูกนำมาเสนอเป็นรูปของตารางที่แสดงถึงช่วงเวลา (time line) ของการพัฒนาดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงเวลาของการพัฒนาสายอากาศแบบร่องบนระนาบ

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
Jen-Fen Huang	เสนอทฤษฎีการออกแบบสายนำสัญญาณแบบ ท่อนำคลื่น ระนาบร่วม ออกแบบที่ความถี่ 2.3 GHz พบว่าเมื่อความกว้าง ของร่องมีผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ	2000
Jyh-Ying Chiou และ คณะ	ออกแบบสายอากาศที่มีร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 2.5 GHz ใช้เทคนิคที่สามารถทำให้ความกว้างแถบเพิ่มขึ้น ได้อีก โดยการ เพิ่มแถบโลหะที่มุมทั้งสี่ของร่องรูปสี่เหลี่ยม และยังพบว่า ความสูงของเส้นสตริปมีผลต่ออัตราขยาย และให้แบบรูป การแผ่กำลังสนามแผ่ออกทางด้านข้างของสายอากาศ (broadside radiation pattern)	2003
Hornng-Dean Chen 2003	มีการเพิ่มสัดบรูปสี่เหลี่ยมเข้าไปทำให้ได้ความกว้างแถบที่ เพิ่มขึ้นมากกว่าตอนที่ยังไม่มีสัดบ ซึ่งระยะห่างระหว่างสัดบกับ ระนาบกราวด์มีผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ และความกว้าง ของสัดบนั้นมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ และให้แบบรูปการแผ่ กำลังสนามแผ่ออกทางด้านข้างของสายอากาศ	2003
SarawuthChaimoo 1 และ คณะ	นำเสนอสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมที่มีสัดบรูปสี่เหลี่ยมมาเพิ่ม ความกว้างแถบ โดยการเพิ่มแถบโลหะเข้าไปที่มุมด้านบน ของร่อง	2004
P. Li และ คณะ	ออกแบบร่องเป็นรูปวงรี และมีสัดบเป็นรูปคล้ายสี่เหลี่ยม ให้ความ กว้างแถบ ประมาณ 112 % ออกแบบที่ความถี่กลางที่ 6.5 GHz ให้แบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับแบบรอบทิศทาง ในระนาบเดียว	2005
Chien-jen Wang และ คณะ	ออกแบบโดยใช้สัดบเป็นรูปสี่เหลี่ยม สามารถให้ความกว้างแถบมาก ถึง 220 % (2-6.4 GHz) ให้อัตราขยายประมาณ 2.94 dB ที่ความถี่ 2.4 GHz	2006

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงเวลาของการพัฒนาสายอากาศแบบร่องบนระนาบ (ต่อ)

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
J.-Y. Jan และคณะ	ออกแบบสายอากาศแบบร่องโดยไม่ใส่สตัด แต่ให้ความสูงของระนาบกรวดทั้งสองข้างไม่เท่ากัน ผลคือได้ความกว้างแถบถึง 2136 MHz โดยมีความถี่กลางอยู่ที่ 2610 MHz สามารถรองรับการใช้งาน DCS (1800 MHz), PCS (1900 MHz), 3G (2000 MHz), และบลูทูธ (2450 MHz) โดยได้อัตรายายอย่างน้อย 1 dB	2006
I-TT seng Tang และ คณะ	ออกแบบสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมโดยเพิ่มเนื้อโลหะที่ด้านข้างของร่องได้ความกว้างแถบ 7.52 GHz จาก 3.08 GHz ถึง 10.6 GHz จุดเด่นของงานนี้คือสายอากาศมีขนาดเล็กมาก มีแบบรูปการแผ่กำลังคล้ายกับสายอากาศโมนโพล	2007
B. Purahong และ คณะ	ออกแบบสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมโดยการใส่สตัดรูปตัวยู เมื่อทำการปรับแต่งแล้วพบว่าสามารถให้ความกว้างแถบ 5.56 GHz จาก 1.66 GHz ถึง 7.22 GHz สามารถใช้งานใน GSM 1800, WLAN และ WiMAX ซึ่งให้แบบรูปการแผ่กำลังสองทิศทางในระนาบสนามไฟฟ้า	2008
J. William และ คณะ	ออกแบบสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมโดยการเพิ่มสตัดรูปสามเหลี่ยม ทำให้ได้แบนควิวิต์ 8 GHz จาก 4.1 GHz ถึง 12.1 GHz ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว ในระนาบสนามแม่เหล็กและแบบสองทิศทางในระนาบสนามไฟฟ้า สำหรับการประยุกต์ใช้กับการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้างยิ่งในอาคาร	2010
TananHongnara และ คณะ	ออกแบบโดยการนำสตัดรูปสี่เหลี่ยมมาทำการเจาะร่อง การเจาะร่องบนสตัดรูปสี่เหลี่ยมส่งผลให้ความกว้างแถบแคบลง แต่ได้อัตรายายเท่าเดิมและได้แบบรูปการแผ่กำลังแบบสองทิศทาง	2011
S. Kareemulla และ คณะ	ออกแบบสายอากาศด้วยสตัดรูปตัว T ครึ่งแล้วกระตุ้นด้วยสตัดรูปตัว Y อีกสามตัว ออกแบบที่ความถี่ 5.5 GHz ได้อัตรายายเท่ากับ 4.014 dB ให้แบบรูปการแผ่กำลัง ที่สามารถ ใช้กับ WiMAX (5.25 GHz – 5.85 GHz) และ WLAN (5 GHz)	2011

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงเวลาของการพัฒนาสายอากาศแบบร่องบนระนาบ (ต่อ)

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
Shin-Wei Chen และคณะ	ศึกษาการออกแบบสายอากาศแบบร่องรูปโคโพลสองแบนด์ ที่ความถี่ ( $f_0=1.5$ GHz, $f_{s1}=3.5$ GHz), สายอากาศแบบร่องรูปโคโพลสามแบนด์ ที่ความถี่ ( $f_0=1.5$ GHz, $f_{s1}=3.5$ GHz, $f_{s2}=5.5$ GHz) และสายอากาศแบบร่องรูปโคโพลบรอดแบนด์ ให้ความกว้างแถบ 98.7 % (1.5GHz - 4.4 GHz) ให้แบบรูปการแผ่กำลังที่ค่อนข้างคล้ายกับรอบทิศทางในระนาบเดียว	2013
Vivek Tiwari และ คณะ	สายอากาศแบบสัดรูปเกือบมาใช้เทคนิคการปรับระนาบกราวด์ เพื่อเพิ่มอัตรายายของสายอากาศ ซึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้น อัตรายายก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยให้ความกว้างแถบตั้งแต่ 2.5 GHz ถึง 6.33 GHz ให้แบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับสายอากาศโมนโพลจึง เหมาะสำหรับการใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย	2014
Pichet Moeikham และ คณะ	ออกแบบสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมคางหมูโดยที่สัดบครั้งวงกลม ปรับปรุงร่องสี่เหลี่ยมคางหมูในส่วนที่ลาดเอียง ให้เร็วขึ้นที่ละน้อยและมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลัง ค่อนข้างใกล้เคียงกับ แบบ รอบทิศทางในระนาบเดียวจึง สำหรับการใช้งานกับ WLAN WiMAX และ UWB	2014

วิทยานิพนธ์ นี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบร่อง ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่ต้องการความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ให้สามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายระบบเซลลูลาร์ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน UMTS ระบบสายอากาศประกอบไปด้วย สายอากาศแบบร่องที่ด้านข้างทั้งสองข้างของสายอากาศมีการใส่ปีกเพิ่มเติมเข้าไปและนำสายอากาศร่องมาทำการจัดแถวลำดับเพื่อเพิ่มอัตรายาย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะมีจุดเด่นของวิทยานิพนธ์ที่แตกต่างจากสายอากาศที่ใช้ในสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์คือได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกันกับสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวแต่ให้อัตรายายสูง จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานสำหรับสถานีฐานระบบ



เซลล์ลาร์นอกจากนี้วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศสามารถหาได้ง่ายภายในท้องถิ่นและมีราคาถูก

## 2.2 สรุป

ตามเนื้อหาที่ได้กล่าวมาในบทนี้จะเห็นว่า สายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมยังคงเป็นที่นิยมนำมาดัดแปลงรูปร่างและโครงสร้าง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น สายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมยังให้แบบรูปการแผ่กำลังค่อนข้างใกล้เคียงกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับสถานีฐานระบบเซลล์ลาร์



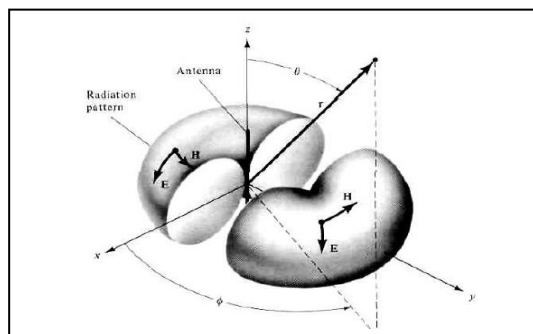
### บทที่ 3

## ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สถานีฐานระบบเซลลูลาร์นั้นมีความสำคัญในการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ให้บริการกับผู้ให้บริการ ซึ่งสถานีฐานในปัจจุบันนั้นได้ใช้สายอากาศที่ให้แบบรูปการแผ่กำลังอยู่ 2 แบบ คือ 1) สายอากาศแบบเซ็กเตอร์มีทิศทาง และ 2) สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการพัฒนาสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานแบบไมโครเซลที่รัศมี 400 เมตร ถึง 2 กิโลเมตร เหมาะสำหรับการใช้ในเมือง ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องมีอัตราขยายที่สูงมาก โดยนำมาใช้แทนสายอากาศแบบเซ็กเตอร์หลายองค์ประกอบให้เหลือสายอากาศแค่เพียงต้นเดียว และสามารถให้อัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศโมโนโพลที่ใช้กับสถานีฐานในปัจจุบัน ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสายอากาศที่ให้แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ได้ และการออกแบบสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่นำมาสร้างเป็นสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้

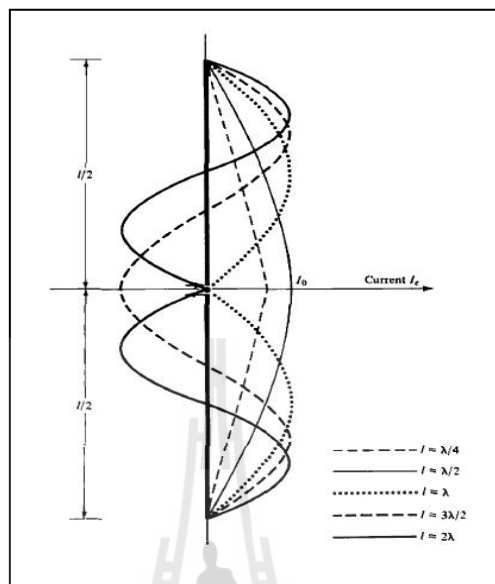
### 3.1 แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว มีการแผ่กำลังออกรอบตัวสายอากาศในระนาบอสมิทเพียงระนาบเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยข้อดีของแบบรูปการแผ่กำลังในลักษณะนี้ก็คือ สามารถตอบสนองการใช้งานได้รอบทิศทางที่ความแรงของสัญญาณสม่ำเสมอ และมีข้อเสียของแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวคือ มีอัตราขยายไม่สูงนัก



รูปที่ 3.1 แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

### 3.2 สายอากาศไดโพล

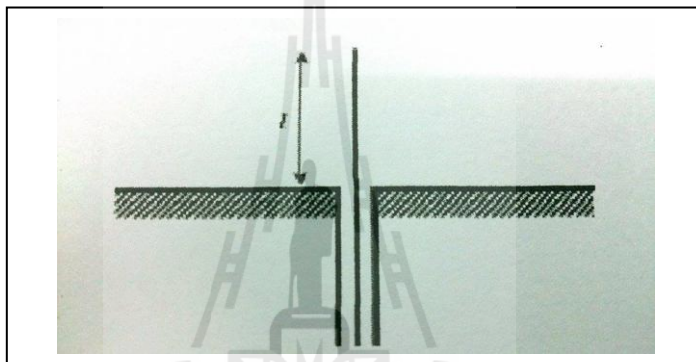


รูปที่ 3.2 สายอากาศไดโพล

สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดมีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว  $L$  วางเป็นแนวเส้นตรงโดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ เครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศกระแสสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล การแจกแจงรูปของกระแส (current distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนสายอากาศไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง

### 3.3 สายอากาศโมโนโพล

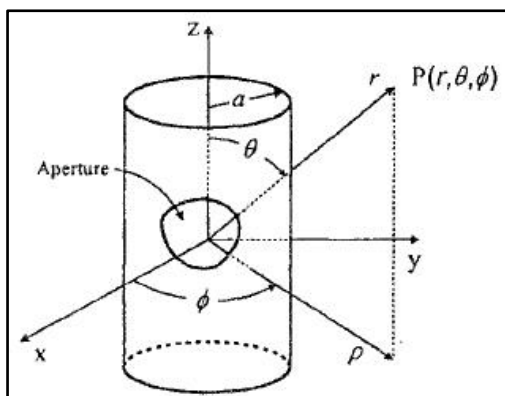
สายอากาศโมโนโพล เป็นการพัฒนารูปแบบและการทำงานจากสายอากาศไดโพล ที่ทำงานแบบสองขั้ว บนพื้นฐานการทำงานของสายอากาศไดโพล โดยสายอากาศโมโนโพล จะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียวและจะใช้ระนาบกราวด์แทนขั้วที่เหลือ ค่าอิมพีแดนซ์ ด้านเข้าของสายอากาศโมโนโพลจะเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลที่มีแผ่นระนาบกราวด์ ทำหน้าที่เหมือนสายอากาศไดโพล ดังนั้น แบบรูปการแผ่กำลังก็จะ คล้าย กับสายอากาศไดโพล



รูปที่ 3.3 สายอากาศโมโนโพล

### 3.4 สายอากาศแบบร่อง

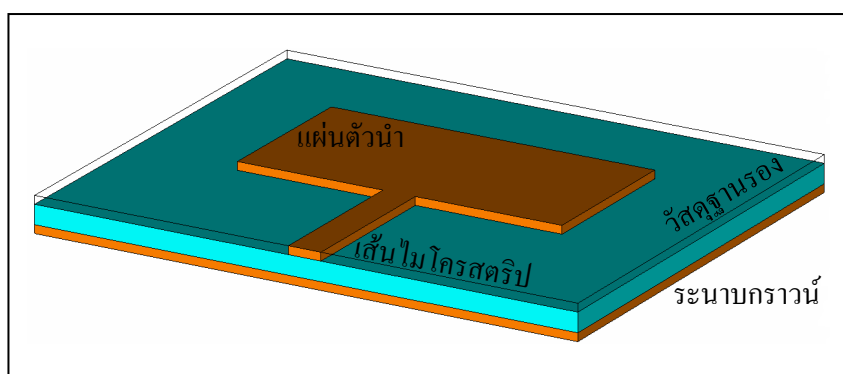
เนื่องจากข้อจำกัดของ สายอากาศ ไดโพลและโมโนโพลตามที่กล่าวไปแล้ว ไม่สะดวกที่จะนำไป ติดบนยอด เสาของ สถานีฐานได้ รวมทั้งมีอัตราขยายต่ำ ดังนั้นจึงได้ศึกษาสายอากาศแบบร่องที่มีลักษณะเป็นการตัดช่องบนผนังของช่องนำคลื่น ให้เป็น ร่องแคบๆ ซึ่งจะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่กระจายสู่บรรยากาศภายนอก โดยผ่านร่องดังกล่าวได้ แต่เนื่องจากการเจาะเพียง ร่อง เดียวนั้น จะทำให้คลื่นสามารถทะลุผ่านไปได้น้อย และทำให้อัตราขยายของสายอากาศมีค่าไม่สูงเพียงพอ ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงมักจะเจาะหลายๆร่องให้เป็นแถวลำดับสำหรับการใช้กับสถานีฐานได้นำสายอากาศแบบร่องมาทำเป็นจัดแถวลำดับบนผิวทรงกระบอก (NitikarnPasri ,ChuwongPhongcharoenpanich ,MonaiKrairiksh ,2002) ทำให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว แต่มีข้อเสีย คือมีความกว้างแถบแคบ



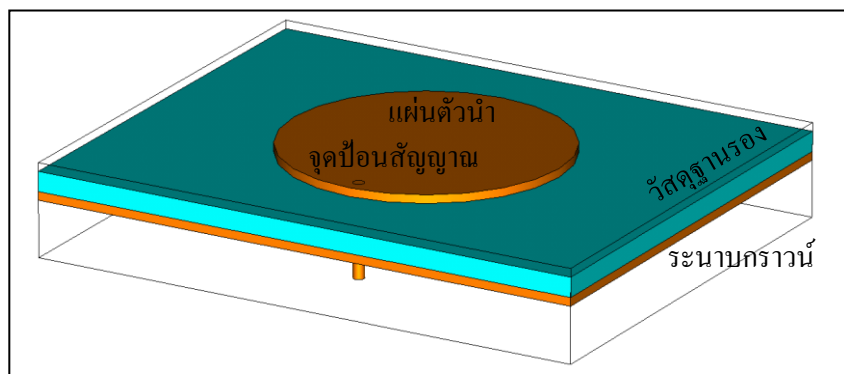
รูปที่ 3.4 สายอากาศแบบช่องเปิดบนตัวผิวทรงกระบอก

### 3.5 สายอากาศไมโครสตริป

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป จะประกอบด้วยองค์ประกอบ สาม ส่วน ได้แก่ ส่วนบนจะเป็นแผ่นตัวนำที่ใช้สำหรับการแผ่กระจาย กำลังของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนกลางเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่คั่นกลางระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นตัวนำ และส่วน ล่างสุด คือแผ่น ระบายกราวด์สำหรับแผ่นตัวนำ ส่วนบนหรือที่เรียกว่าแพตช์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก)เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยสัญญาณความถี่วิทยุจะถูกป้อนเข้าที่สายป้อนสัญญาณที่เป็น แถบ โลหะ (strip line) สำหรับรูปที่ 3.5(ข) แสดงแผ่นตัวนำรูปวงกลมที่ป้อนด้วยตัว ลวด นำผ่านช่องในระนาบกราวด์ ซึ่งการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้จะเรียกว่า การเชื่อมต่อแบบช่องเปิด (aperture coupling) ผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ ในระนาบกราวด์



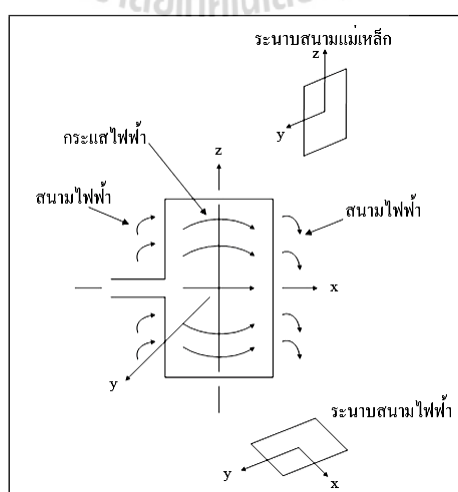
(ก) แผ่นตัวนำแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก



(ข) แผ่นตัวนำแบบวงกลม

รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

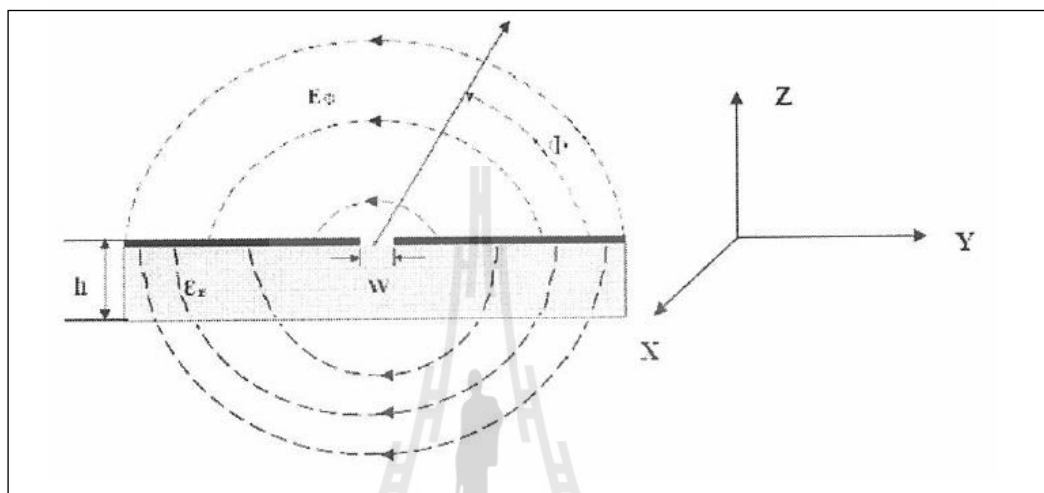
สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายกำลังของ คลื่น จากรูปที่ 3.6 แสดงกระแสไฟฟ้า และเส้นแรงของสนามไฟฟ้าทั้งภายในและบริเวณรอบ ๆ แผ่นตัวนำที่ใช้ในการแผ่คลื่น ซึ่งโดยปกติ สนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบนั้น จะมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายกำลังของคลื่น โดยคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศจากรูป ที่ 3.6 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (ระนาบ  $x-y$ : E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (ระนาบ  $y-z$ : H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง



รูปที่ 3.6 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำ

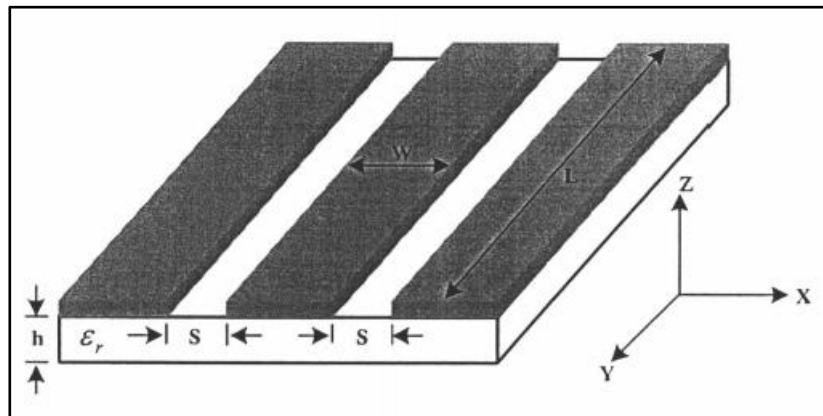
### 3.5.1 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด

สนามไฟฟ้าในช่องเปิดจะประกอบด้วยสามองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามในสนามระยะไกลจะเหลือองค์ประกอบเดียวในทิศทาง  $\phi$  โดยที่ลักษณะการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าของช่องเปิดด้านในของวัสดุฐานรองแถบโลหะ และในอากาศได้แสดงดังรูปที่ 3.7



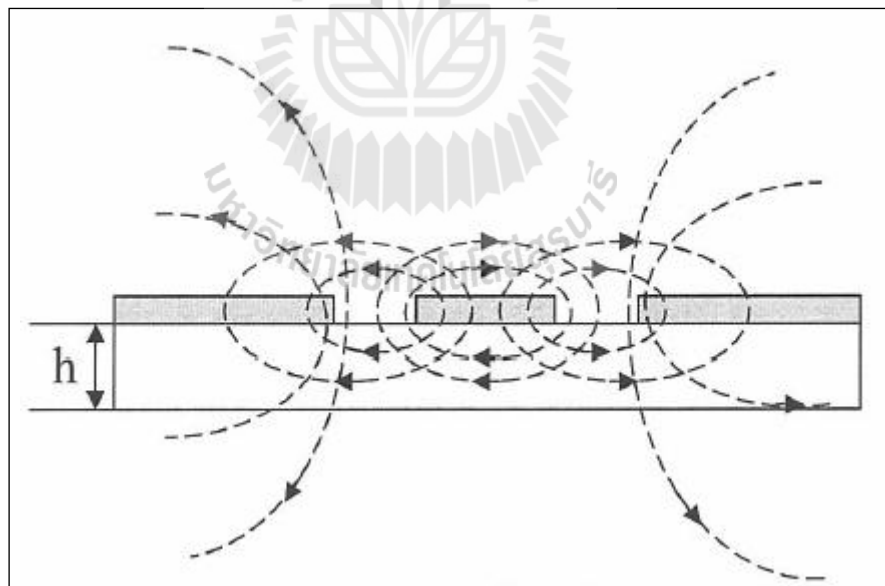
รูปที่ 3.7 ลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด

สายนำสัญญาณแบบสตริปกับสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็น โครงสร้างที่ง่ายในการออกแบบและการสร้าง สำหรับสายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบ CPW ที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้น จะมีรูปร่างเป็นแถบโลหะวางอยู่บนวัสดุฐานรอง ซึ่งวัสดุฐานรองเป็นสาร ไดอิเล็กทริกที่ถูกกั้นด้วยช่องเปิดสองช่อง นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาไปเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ (microwave integrated circuits) ได้เป็นอย่างดี จากผลการวิจัยและพัฒนาที่ผ่านมาสายอากาศที่มี โครงสร้างแบบไมโครสตริปจะมีข้อจำกัด เช่น เมื่อต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำเป็นจะต้องมีช่องผ่าน (via holes) เพื่อเชื่อมต่อตัวนำด้านบนกับ ระบายกราวด์ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณและการลดทอนของสัญญาณสูง จากข้อดีดังกล่าววิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำเสนอสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่มีกราวด์ ด้านบนดังแสดงในภาพที่ 3.8 จากผลการวิจัยและการพัฒนาที่ผ่านมา โครงสร้างระนาบร่วมที่มี กราวด์ด้านบนสามารถลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณและการลดทอนของสัญญาณให้ต่ำลงได้ โครงสร้างดังกล่าวมีความแข็งแรงสามารถตัดการป้อน โดยใช้ช่องผ่านออกไป และเป็นโครงสร้างที่ ง่ายต่อการออกแบบเพื่อใช้งาน



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW)

การแผ่กระจายของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม นั้นจะมีลักษณะที่ต่างจากกัน โดยสนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ระหว่างแถบโลหะที่ถูกคั่นด้วยช่องเปิด ส่วนสนามแม่เหล็กนั้นจะเคลื่อนที่โดยรอบแผ่นโลหะในทิศทางตามความหนาของวัสดุฐานรอง แสดงดังรูปที่ 3.9

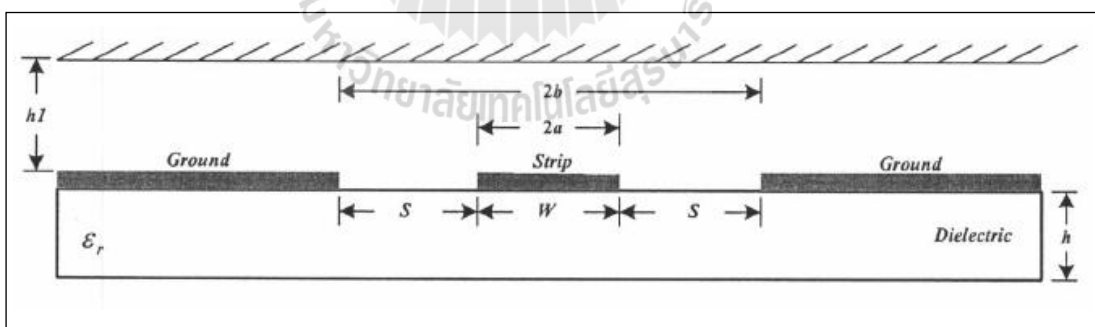


รูปที่ 3.9 ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม



สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่สามารถนำมาป้อนสำหรับสายอากาศแบบร่องได้มีอยู่ 2 ชนิดคือ สายนำสัญญาณแบบ ท่อนำคลื่น ระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 3.10 และชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (conductor-backed coplanar waveguide) แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยโครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบ ท่อนำคลื่น ระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง จะประกอบด้วยเส้นสตริปที่อยู่ตรงกลางด้านบนของฐานรองไดอิเล็กตริกมีความกว้างของ เส้นสตริปเท่ากับ (W) ส่วนด้านข้างทั้งสองข้างของ เส้นสตริปจะมีลักษณะเป็นร่องคั่นกลางระหว่างระนาบกราวด์กับ เส้นสตริป มีความกว้างของ เส้นสตริปถึงระนาบกราวด์เป็น (S) ความหนาของฐานรองไดอิเล็กตริกเป็น (H) ส่วนสายนำสัญญาณแบบ ท่อนำคลื่น ระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่างจะแตกต่างกับชนิดแรกตรงที่มีกราวด์ทางด้านล่างของฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นมา ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าบนสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะเป็นแบบควอซี ทีอีเอ็ม (quasi TEM) ข้อดีของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้นทำให้การผลิตเพียงของรูปสัญญาณ และค่าความสูญเสียต่ำกว่าการใช้ไมโครสตริปโดยทั่วไป

### 3.5.2 การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณ แบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



รูปที่ 3.10 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะใช้วิเคราะห์แบบสมมูลตลอดช่วง (quasi static) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงรูป (conformal mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณการวิเคราะห์แบบนี้สามารถหาค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

นำคลื่นระนาบร่วมได้โดย ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณสามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่งระนาบด้านบน ซึ่งอยู่ในอากาศกับระนาบครึ่งด้านล่าง ซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริก โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (effective dielectric constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ จะอยู่ในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก (complete elliptic integral of first kind) โดยใช้สมการ

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \quad (3.1)$$

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (3.2)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (3.3)$$

$$Z_0 = \frac{1}{Cv_p} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{re}}C^a} \quad (3.4)$$

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

$C^a$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันกับ  $C$  แต่จะแทนไดอิเล็กตริกด้วยอากาศ

เมื่อ

$\epsilon_{re}$  หมายถึง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของฐานรอง

$v_p$  หมายถึง ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

$\lambda_g$  หมายถึง ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

$c$  หมายถึง ความเร็วของสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง

$Z_0$  หมายถึง อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณจะใช้วิธีการส่งคงรูป ซึ่งในที่นี้จะไม่ขอก้าวถึงวิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ แต่จะพิจารณาเฉพาะการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณหาได้จากสมการ

$$Z_0 = \frac{30\pi K'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}}K(k_1)} \quad (3.5)$$

ขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\varepsilon_{re} = 1 + q(\varepsilon_r - 1) \quad (3.6)$$

โดยที่

$$q = \frac{1}{2} \left( \frac{K(k_2) K'(k_1)}{K'(k_2) K(k_1)} \right) \quad (3.7)$$

เมื่อ

$q$  หมายถึง ตัวประกอบการคูณ (filling factor)

และ

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (3.8)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} \quad (3.9)$$

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi a / 2h_1)}{\tanh(\pi b / 2h_1)} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$a = \frac{w}{2} \quad (3.11)$$

$$b = \frac{(2s + w)}{2} \quad (3.12)$$

โดยที่

$h$  หมายถึง ความสูงของฐานรอง ไดอิเล็กตริก

$w$  หมายถึง ความกว้างของสายนำสัญญาณ

$s$  หมายถึง ความกว้างของร่องสตริป

การอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้โดย

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (3.13)$$

เมื่อ

$\theta$  หมายถึง ตัวแปรเชิงซ้อน

โดย

$$K'(k_1) = K(k'_1) \quad (3.14)$$

$$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (3.15)$$

และอัตราส่วนของ  $K(k)/K'(k)$  สามารถหาได้โดยการประมาณคือ

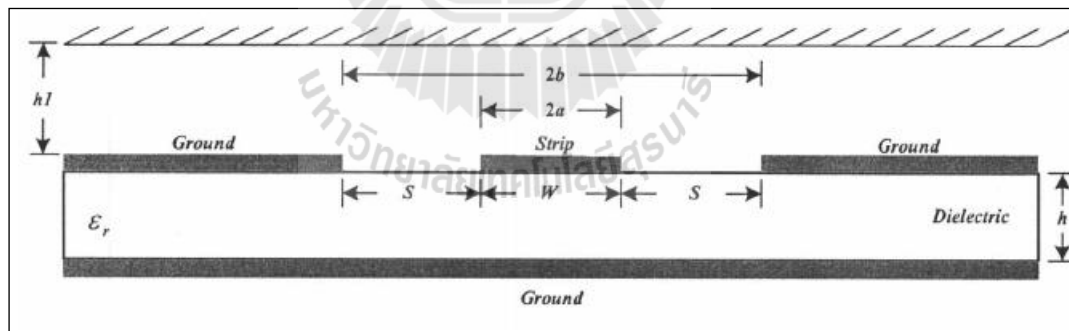
กรณี  $0 \leq k \leq 0.707$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k'})}{1 - \sqrt{k'}} \right]} \quad (3.16)$$

กรณี  $0.707 \leq k \leq 1$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k})}{1 - \sqrt{k'}} \right] \quad (3.17)$$

### 3.5.3 การหาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณ แบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง



รูปที่ 3.11 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่างสามารถคำนวณหาได้เช่นกันกับที่ใช้ในการนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง ดังสมการ

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{K(k_3)/K'(k_3) + K(k_4)/K'(k_4)} \quad (3.18)$$

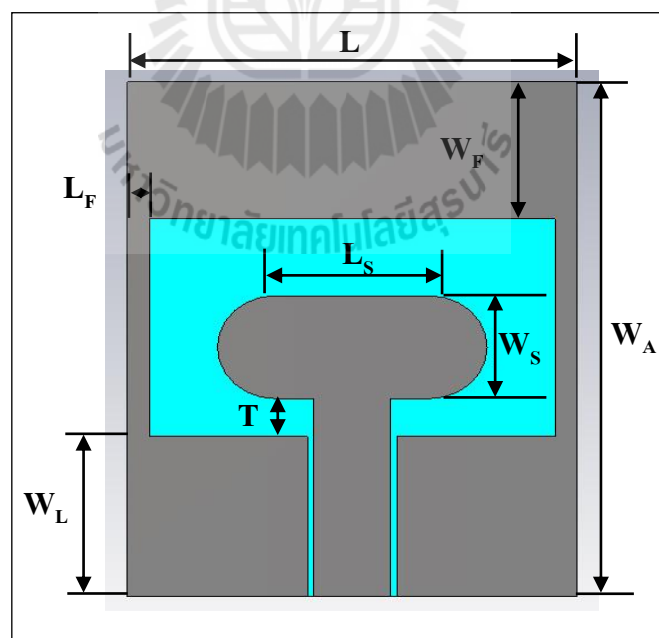
โดยที่

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (3.19)$$

$$q = \frac{K(k_4)/K'(k_4)}{K(k_3)/K'(k_3) + K(k_4)/K'(k_4)} \quad (3.20)$$

### 3.6 การออกแบบสายอากาศแบบร่อง รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

วิทยานิพนธ์นี้ทำการ สายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่น ระบายร่วมประกอบด้วยเทคนิคการใช้สลับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการปรับจูนและปรับรูปร่างด้วยการเพิ่มครึ่งวงกลมที่ด้านข้างของสลับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยขนาดรัศมีเท่ากับ  $W_S/2$  เพื่อเพิ่มการแผ่รังสีของสายอากาศให้ดีขึ้น ดังรูปที่ 3.12 เพื่อให้ครอบคลุมความถี่ปฏิบัติการที่ 1.92-2.17 GHz โดยการสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.5 ความหนาของฐานรองไดอิเล็กตริก(H) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.12 โครงสร้างสายอากาศแบบร่องและขนาดของพารามิเตอร์พื้นฐาน

ซึ่ง พารามิเตอร์ของสายอากาศดังกล่าวมีความหมายดังต่อไปนี้

L	คือ ความยาวของสายอากาศ
$W_A$	คือ ความกว้างของสายอากาศ
W	คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณ
S	คือ ความกว้างของสตริปถึงระนาบกราวด์
$W_F$	คือ ความกว้างขอบบน
$L_F$	คือ ความกว้างขอบข้าง
$W_L$	คือ ความกว้างขอบล่าง
$W_S$	คือ ความกว้างของสตัด
$L_S$	คือ ความยาวของสตัด
T	คือ ระยะห่างระหว่างสตัดกับระนาบกราวด์

ในการออกแบบสายอากาศจะเริ่มจากการคำนวณหา ความกว้าง และความยาว ของตัวสายอากาศได้จากสมการที่ 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ

โดยที่ความกว้างของสายอากาศ ( $w_A$ ) เท่ากับ

$$w_A = \frac{c}{2f} \left( \frac{2}{\epsilon_r + 1} \right)^{(1/2)} \quad (3.21)$$

โดยที่

- c คือ ความเร็วแสง (ประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s)
- f คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ
- $\epsilon_{reff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล
- $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
- $w_A$  คือ ขนาดความกว้างของตัวโครงสร้างสายอากาศ

และขนาดความยาว (L) เท่ากับ

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta l \quad (3.22)$$

ในขณะที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล ( $\epsilon_{\text{reff}}$ )

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12H}{w_A} \right)^{(-1/2)} \quad (3.23)$$

และค่าความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า ( $\Delta l$ )

$$\Delta l = H(0.412) \left[ \frac{\left( \epsilon_{\text{reff}} + 0.3 \right) \left( \frac{w_A}{H} + 0.264 \right)}{\left( \epsilon_{\text{reff}} - 0.258 \right) \left( \frac{w_A}{H} + 0.8 \right)} \right] \quad (3.24)$$

ท้ายที่สุดเป็นการคำนวณหา ขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วมไมโครสตริป ( $W$ ) ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นสองกรณี ดังต่อไปนี้

**กรณีที่ 1**  $\frac{W}{h} > 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (3.25)$$

เมื่อ

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

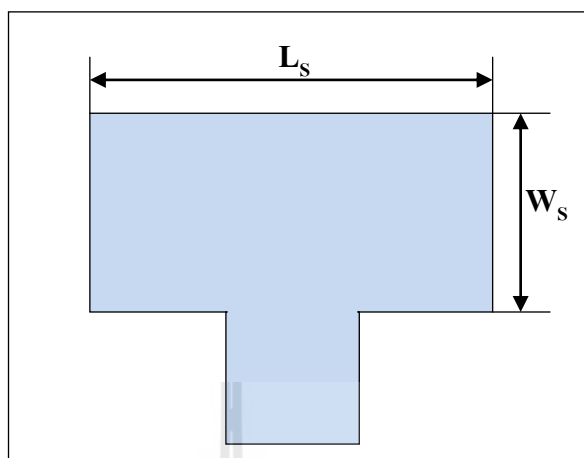
**กรณีที่ 2**  $\frac{W}{h} < 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (3.26)$$

เมื่อ

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

การคำนวณสัปดาห์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 3.13 สัปดาห์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความยาวของสัปดาห์ ( $L_s$ )

$$L_s = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.27)$$

ความกว้างของสัปดาห์ ( $W_s$ )

$$W_s = 0.49 \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (3.28)$$

### 3.7 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่น ระบายร่วมสำหรับประยุกต์ใช้กับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ โดยเริ่มแรกได้ศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศที่ให้แบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว ซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดมีข้อเสียที่ไม่สามารถนำมาใช้กับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ได้เนื่องจากต้องการติดตั้งสายอากาศที่บนยอดสุดของสถานีฐาน จากนั้นได้ศึกษาสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระบายร่วมชนิดที่ไม่มีกรวด์ด้านล่างและวิธีการออกแบบสายอากาศเพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานกับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์



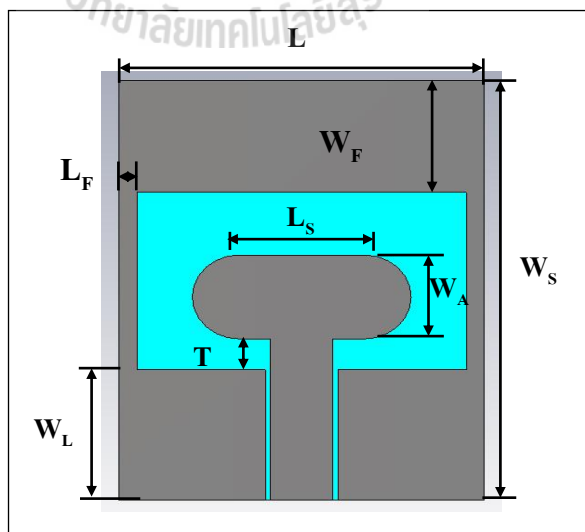
## บทที่ 4

### การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง

บทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง โดยออกแบบที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.92 GHz-2.17 GHz สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ 3G ในประเทศไทยซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางในระนาบเดียวโดยได้ทำการจำลองระบบสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบสายอากาศและสามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน UMTS (universal mobile telecommunication system) ก่อนที่จะได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา ซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

#### 4.1 การศึกษาความเป็นไปได้จากการจำลองผลสายอากาศแบบร่องตัวเดียว

งานวิจัยนี้ทำการ จำลองผลของสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW) ประกอบด้วยเทคนิคการใช้สัณฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการปรับแต่งและปรับรูปร่างด้วยการเพิ่มครึ่งวงกลมที่ด้านข้างของสัณฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงรูปที่ 4.1 เพื่อให้ความกว้างแถบครอบคลุมความถี่ปฏิบัติการที่ 1.92-2.17 GHz



รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศแบบร่องและพารามิเตอร์พื้นฐาน

การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดความถี่รีโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง (center frequency)  $f_0 = 2.045$  GHz และเลือกใช้วัสดุแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r = 4.5$  ความหนาวัสดุฐานรอง  $H = 0.8$  มม. จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยเริ่มต้นที่ การคำนวณหาความกว้างของตัวสายอากาศ ( $w_A$ ) โดยใช้สมการสมการที่ (3.21)

$$\begin{aligned} w_A &= \frac{c}{2f} \left( \frac{2}{\epsilon_r + 1} \right)^{(1/2)} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.045 \times 10^9} \left( \frac{2}{4.5 + 1} \right)^{(1/2)} \\ &= 44.23 \text{ มม.} \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล ( $\epsilon_{\text{reff}}$ ) โดยใช้สมการที่ (3.23) ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{reff}} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12H}{w_A} \right)^{(-1/2)} \\ &= \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left( 1 + \frac{12 \times 0.8}{44.23} \right)^{(-1/2)} \\ &= 4.336 \end{aligned}$$

โดยที่  $\epsilon_{\text{reff}} \leq \epsilon_r$

ต่อไปคำนวณหาค่าความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้าได้จากสมการที่ (3.24)

$$\begin{aligned} \Delta l &= H(0.412) \left[ \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{w_A}{H} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{w_A}{H} + 0.8 \right)} \right] \\ &= 0.8(0.412) \left[ \frac{(4.336 + 0.3) \left( \frac{44.23}{0.8} + 0.264 \right)}{(4.336 - 0.258) \left( \frac{44.23}{0.8} + 0.8 \right)} \right] \\ &= 0.371 \text{ มม.} \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าความยาวของสายอากาศจากสมการที่ (3.22)

$$\begin{aligned} L &= \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta l \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.045 \times 10^9 \sqrt{4.336}} - 2(0.317) \\ &= 34.48 \text{ มม.} \end{aligned}$$

ต่อไปเป็นการคำนวณหาค่าความกว้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วม (CPW) จากสมการที่ (3.26)

$$\begin{aligned} \frac{W}{h} &= \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \\ \text{เมื่อ} \\ A &= \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \\ A &= \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2}} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right) \\ &= 1.5436 \end{aligned}$$

เมื่อนำค่า A แทนค่าในสมการที่ (3.26) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{W}{0.8} &= \frac{8e^{1.5436}}{e^{2(1.5436)} - 2} \\ &= 1.504 \text{ มม.} \end{aligned}$$

เมื่อทำการเพิ่มขนาดขึ้น 4 เท่า ความกว้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วม จะได้

$$W = 6.016 \text{ มม.}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าความยาวของสตัด โดยใช้สมการที่ (3.27)

$$L_s = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2.045 \times 10^9 \sqrt{4.5}}$$

$$= 69.15 \text{ มม.}$$

ต่อไปเป็นการคำนวณหาความกว้างของสตัด จากสมการที่ (3.28) จะได้

$$W_s = 0.49 \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \right)$$

$$= 0.49 \left( \frac{3 \times 10^8}{2.045 \times 10^9 \sqrt{4.5}} \right)$$

$$= 33.88 \text{ มม.}$$

เมื่อทำการลดขนาดของความกว้างและความยาวของสตัดลง 4 เท่า จะได้

$$L_s = 17.28 \text{ มม.}$$

$$W_s = 8.47 \text{ มม.}$$

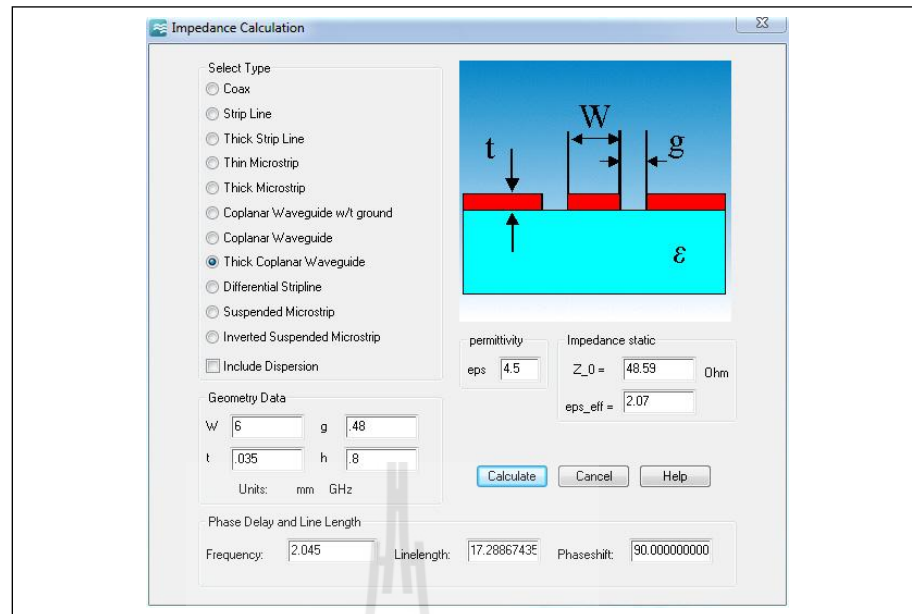
จากนั้น ทำการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของสายนำสัญญาณระนาบร่วมด้วยโปรแกรม  
โดยกำหนดคุณสมบัติต่างๆเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณดังนี้

CST

Frequency (GHz)	= 2.045
Relative Permittivity ( $\epsilon_r$ )	= 4.5
Substrate Height (H)	= 0.8 mm
Metal Thickness (t)	= 0.035 mm
Spacing (s)	= 0.48 mm

เมื่อโปรแกรมคำนวณจะได้ค่าดังนี้

Strip width	= 6 mm
Strip Length	= 17 mm



รูปที่ 4.2 การคำนวณขนาดของสายนำสัญญาณด้วยโปรแกรม CST

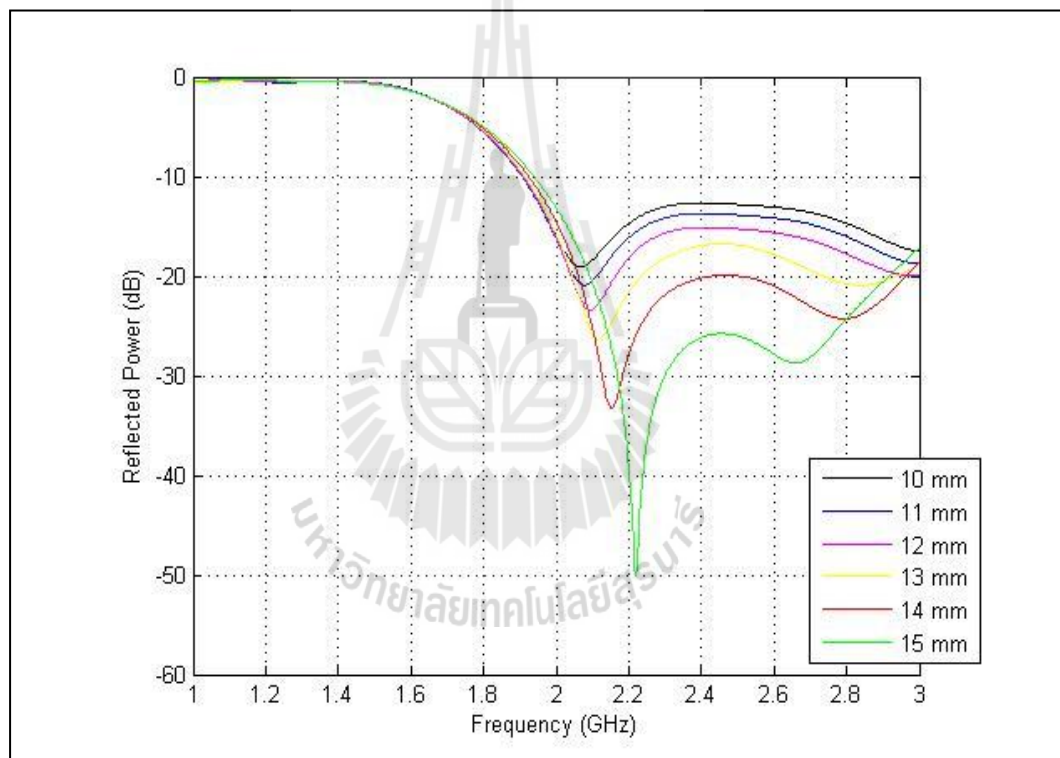
หลังจากการคำนวณ โครงสร้างของสายอากาศ ศโดยใช้สมการร่วมกับการหาขนาดของสายนำสัญญาณด้วยโปรแกรม CST ซึ่งปรากฏผลเฉลยดังแสดงใน รูปที่ 4.1 โดยกำหนดขนาดของสายอากาศที่มีความกว้าง ( $W_A$ ) เท่ากับ 45 มม. ความยาว ( $L$ ) เท่ากับ 35 มม. และให้มีระยะห่าง ( $S$ ) ของร่องระหว่างสายนำสัญญาณระนาบร่วมเท่ากับ 0.48 มม. จากนั้นทำการเจาะ ร่องเปิด (aperture slot) ภายในโครงสร้าง ซึ่งสามารถกำหนดขนาดพื้นที่ได้จากขนาดของความกว้าง ขอบบน ( $W_F$ ) และความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ ) ในเบื้องต้นได้กำหนดไว้เท่ากับ 2 มม. และจากการคำนวณขนาดของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม ซึ่งจะใช้เป็นจุดกระตุ้นสัญญาณด้วยโปรแกรม CST ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ดังปรากฏในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่อง

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
$W_A$	45	$L$	35
$W$	6	$L_F$	2
$W_F$	2	$L_S$	18
$W_S$	2	$T$	3
$W_L$	14	$S$	0.48
$H$	0.8		

#### 4.1.1 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบบน( $W_F$ )

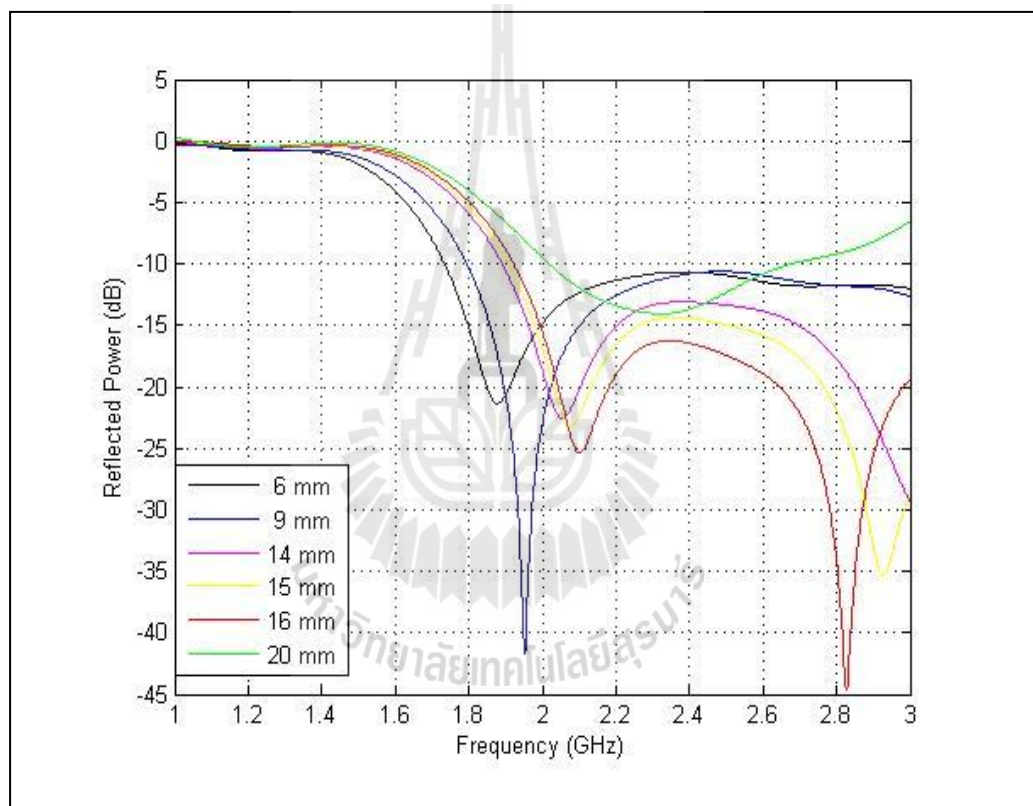
จากพารามิเตอร์ข้างต้น ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อวิเคราะห์ ให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยทำการปรับพารามิเตอร์ทีละตัวขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่นคงที่ จากนั้นทำการ ปรับขนาดความกว้างขอบบน ( $W_F$ )ทีละค่า โดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 10 มม., 11 มม., 12 มม., 13 มม., 14 มม. และ 15 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างขอบบน เปลี่ยนแปลง จะมีผลกระทบต่อ ความถี่เรโซแนนซ์ โดยที่ขนาดของ  $W_F$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จุดเรโซแนนซ์เลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้น สอดคล้องได้พิจารณา ความกว้างขอบบนที่เหมาะสม ที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 12 มม. ดังแสดงรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างขอบบน  $W_F$

#### 4.1.2 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ )

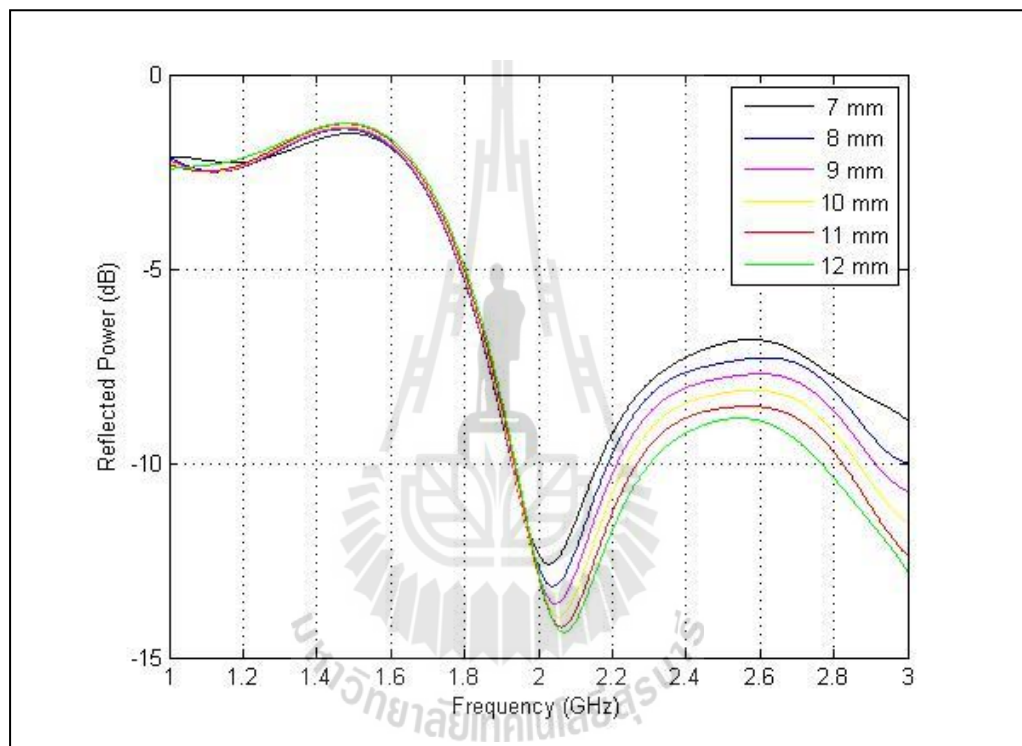
ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ ) โดย กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้  $W_L$  มีค่าเท่ากับ 6 มม., 9 มม., 14 มม., 15 มม., 16 มม. และ 20 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างของขอบล่าง เปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยที่ ขนาดของ  $W_L$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ตำแหน่งของความถี่ เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น สุดท้ายได้พิจารณาความกว้างของขอบล่างที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 14 มม. ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบล่าง  $W_L$

#### 4.1.3 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความยาวของสตัด (L<sub>s</sub>)

ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสตัด (L<sub>s</sub>) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้ L<sub>s</sub> มีค่าเท่ากับ 7 มม., 8 มม., 9 มม., 10 มม., 11 มม. และ 12 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความยาวของสตัดเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยที่ขนาดขนาดของ L<sub>s</sub> เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับลดต่ำลง สุดท้ายได้พิจารณา ความยาวของสตัดที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 12 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.5

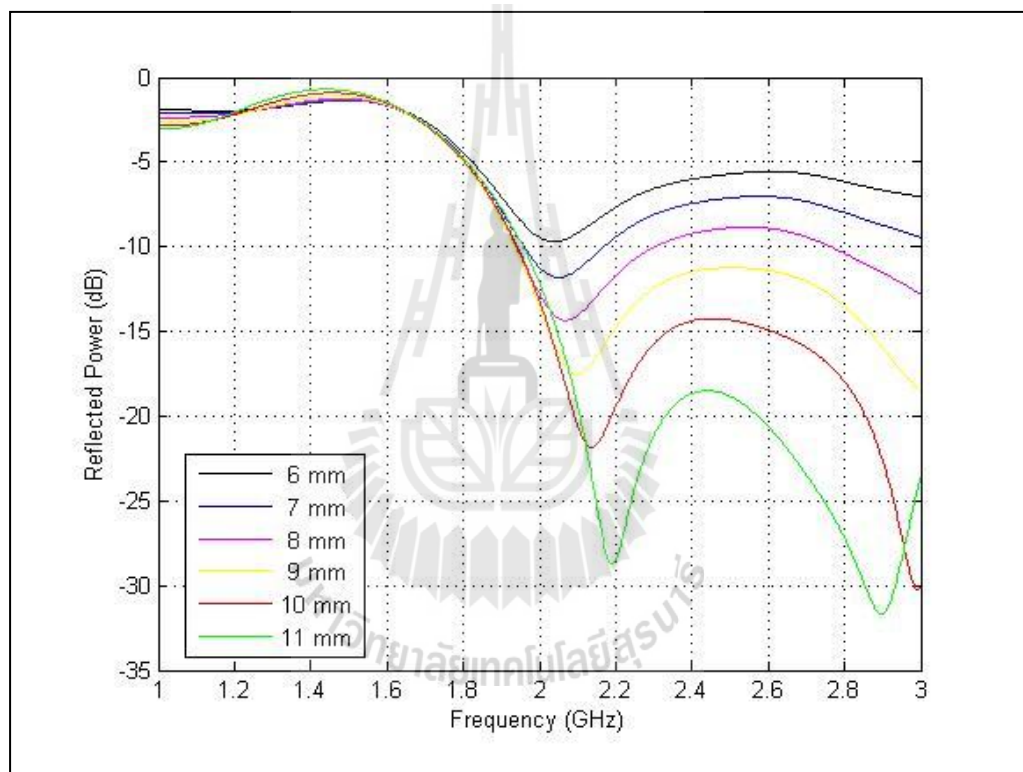


รูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสตัด L<sub>s</sub>



#### 4.1.4 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของสตัด (W<sub>s</sub>)

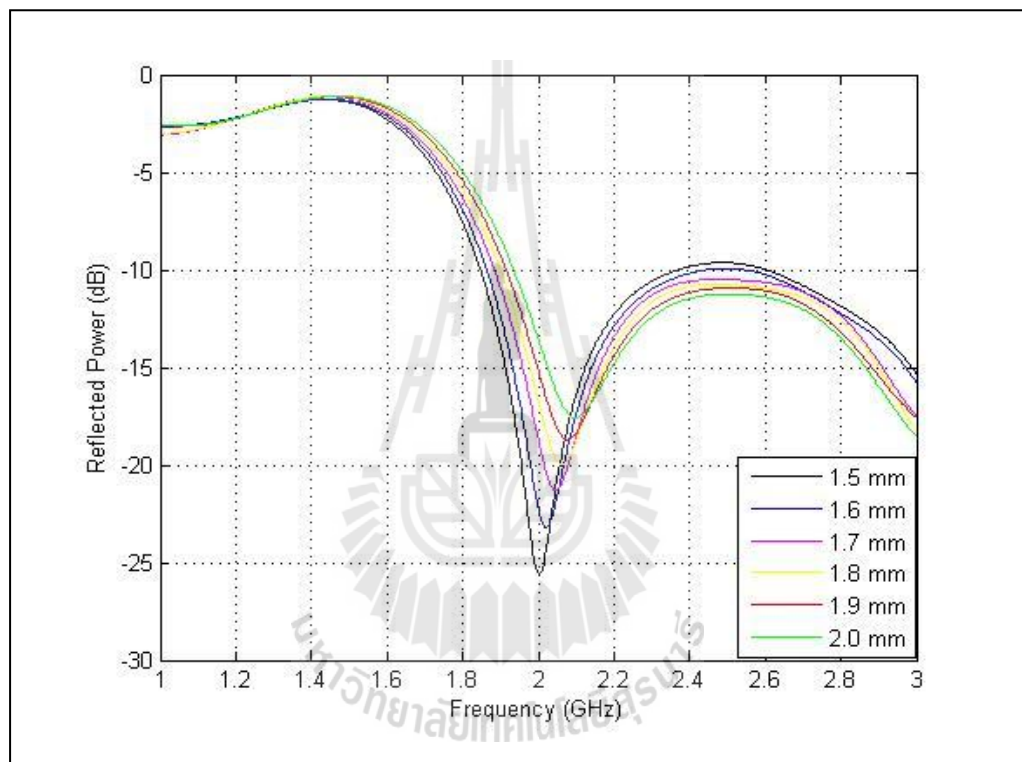
ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของ สตัด(W<sub>s</sub>) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้ W<sub>s</sub>มีค่าเท่ากับ 6 มม., 7 มม., 8 มม., 9 มม., 10 มม. และ 11 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างของสตัดเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อ ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยที่ ขนาดของ W<sub>s</sub>เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น และเกิดจุดเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งจุดที่ความถี่สูงขึ้นไป สุดท้ายได้พิจารณา ความกว้างของสตัดที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 9 มม. ดังแสดงรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสตัด W<sub>s</sub>

#### 4.1.5 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ )

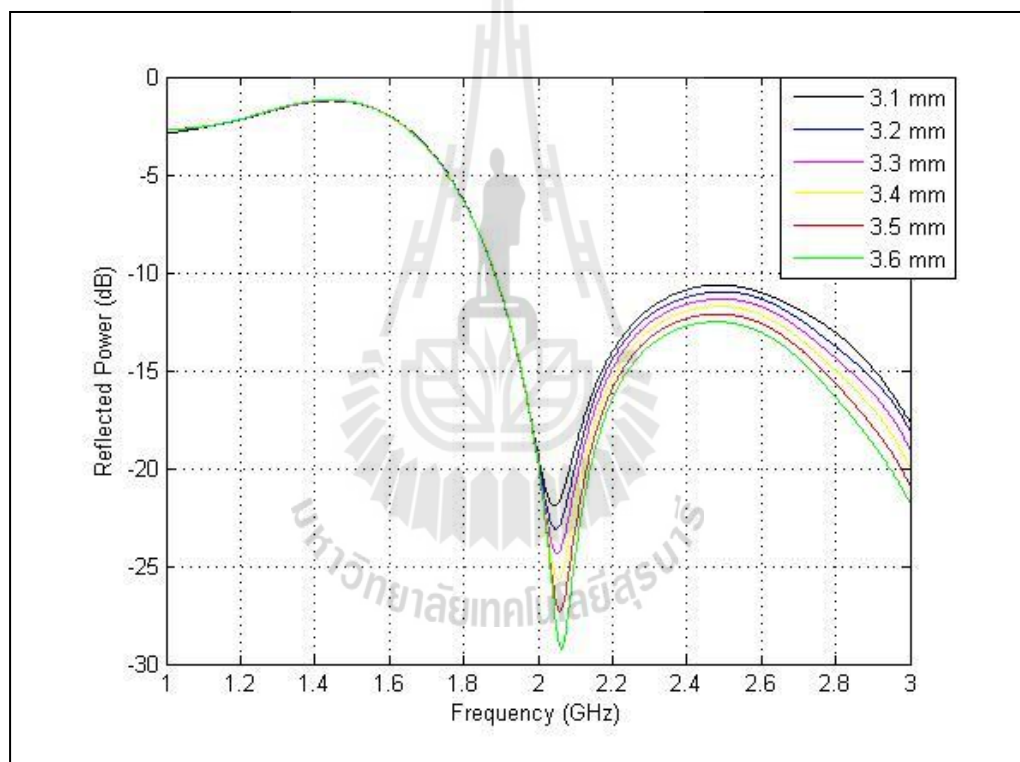
ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ ) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้  $L_F$  มีค่าเท่ากับ 1.5 มม., 1.6 มม., 1.7 มม., 1.8 มม., 1.9 มม. และ 2.0 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างขอบข้างเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ โดยที่ขนาดของ  $L_F$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น สุดท้ายได้พิจารณาความกว้างขอบข้างที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 1.7 มม. ดังแสดงรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบข้าง  $L_F$

#### 4.1.6 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T)

ทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้ T มีค่าเท่ากับ 3.1 มม., 3.2 มม., 3.3 มม., 3.4 มม., 3.5 มม. และ 3.6 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วมเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยที่ขนาดขนาดของ T เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับลดต่ำลง สอดคล้องกับที่ได้พิจารณาระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม ที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 3.3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม T

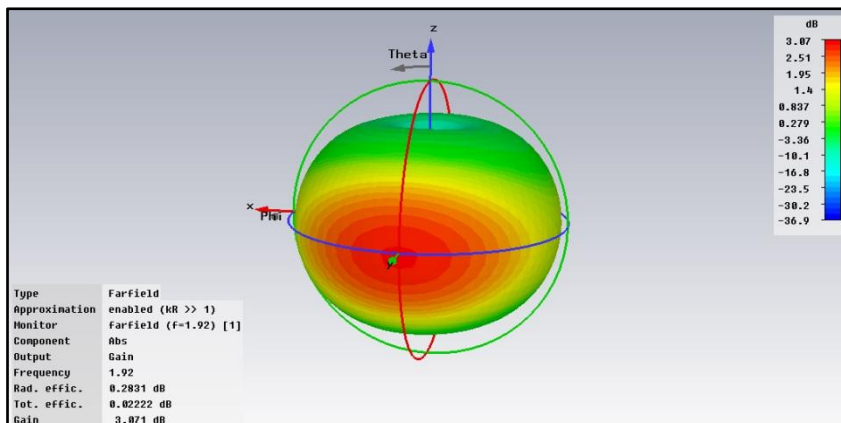
จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ปรับหาค่าพารามิเตอร์ ของสายอากาศต้นแบบจนกระทั่งเหมาะสม ทำให้ผลเฉลย สายอากาศแบบร่องต้นแบบที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ในรูปที่ 4.9 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ โดยค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบดัง กล่าวได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2 ส่วนใน รูปที่ 4.10 ได้แสดงลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่มีเฉพาะส่วนที่เป็นร่องพร้อมสตัด (type A) และกราฟแสดงผลเฉลยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz แสดงดังในรูปที่ 4.10(ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับแบบรูปการแผ่กำลัง ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 4.10(ค) และ (ง) ตามลำดับ ซึ่งแบบรูปการแผ่ กำลังจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแบบรูปชนิด รอบทิศทางในระนาบเดียว และมีผลเฉลยของค่าอัตราขยายในช่วงความถี่ที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่อง

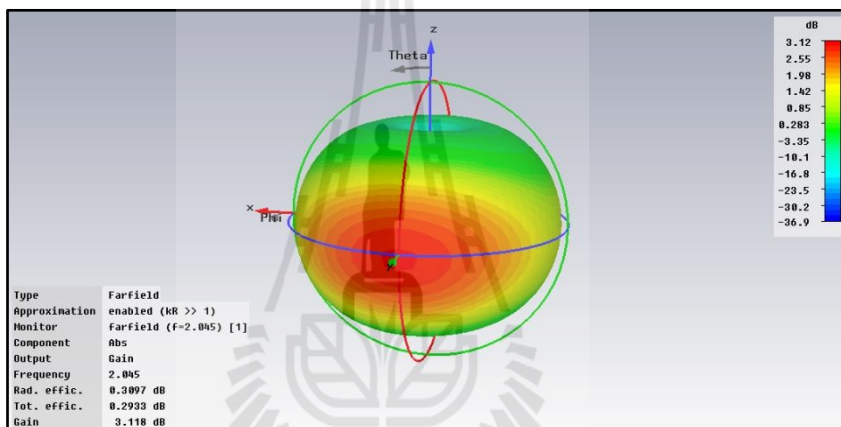
พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
$W_A$	45
$W$	6
$W_F$	12
$W_S$	9
$W_L$	14
$H$	0.8
$L$	35
$L_F$	1.7
$L_S$	12
$T$	3.3
$S$	0.48

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแบบร่องต้นแบบ

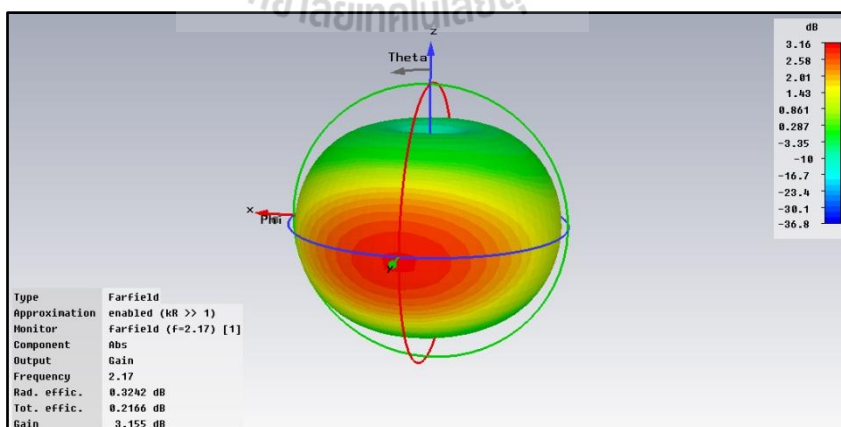
ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)
1.92	3.071
2.045	3.118
2.17	3.155



(ก) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 1.92 GHz

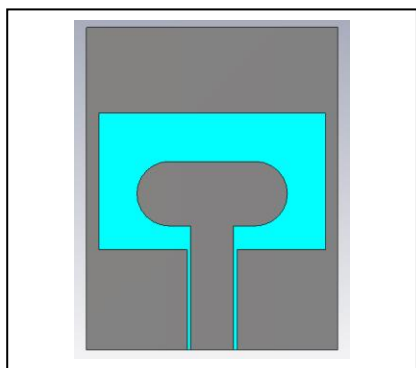


(ข) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2.045 GHz

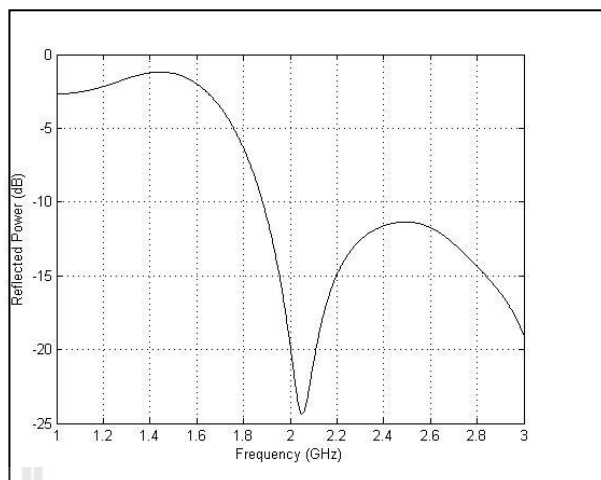
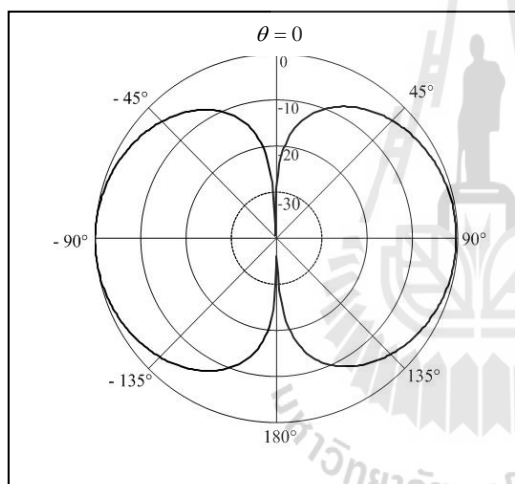


(ค) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2.17 GHz

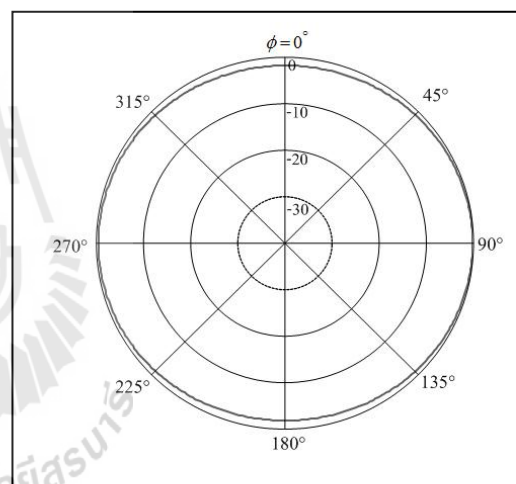
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแบบร่อง



(ก) แบบจำลองสายอากาศ (type A)

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ( $S_{11}$ )

(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (ง)

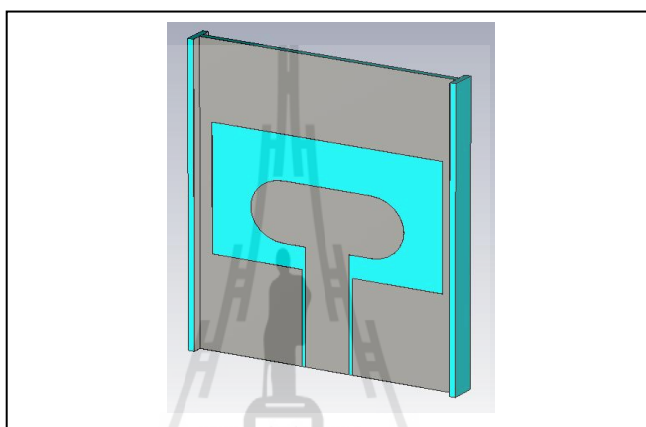


แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

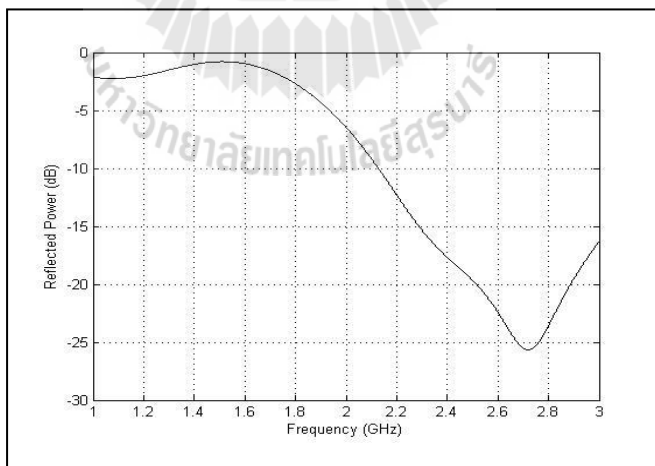
รูปที่ 4.10 ผลจากการจำลองสายอากาศแบบร่องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

## 4.2 การศึกษาความเป็นไปได้จากการจำลองผลสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบด้านข้าง

จากนั้นการออกแบบและจำลองผลสายอากาศ แบบร่องต้นแบบ ด้วยการเพิ่มปีกสแลบ (wing-slab) โดยใช้แผ่นวงจรมิพท์ที่มีความหนาวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.8 มม. ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับเท่ากับ 0.025  $\lambda$  ติดเข้าไปที่ด้านข้างของตัวสายอากาศทั้งด้านซ้ายและขวา แสดงดังรูปที่ 4.11 เพื่อเพิ่มอัตรายายของสายอากาศ



(ก) แบบจำลองสายอากาศต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลบ(type B)



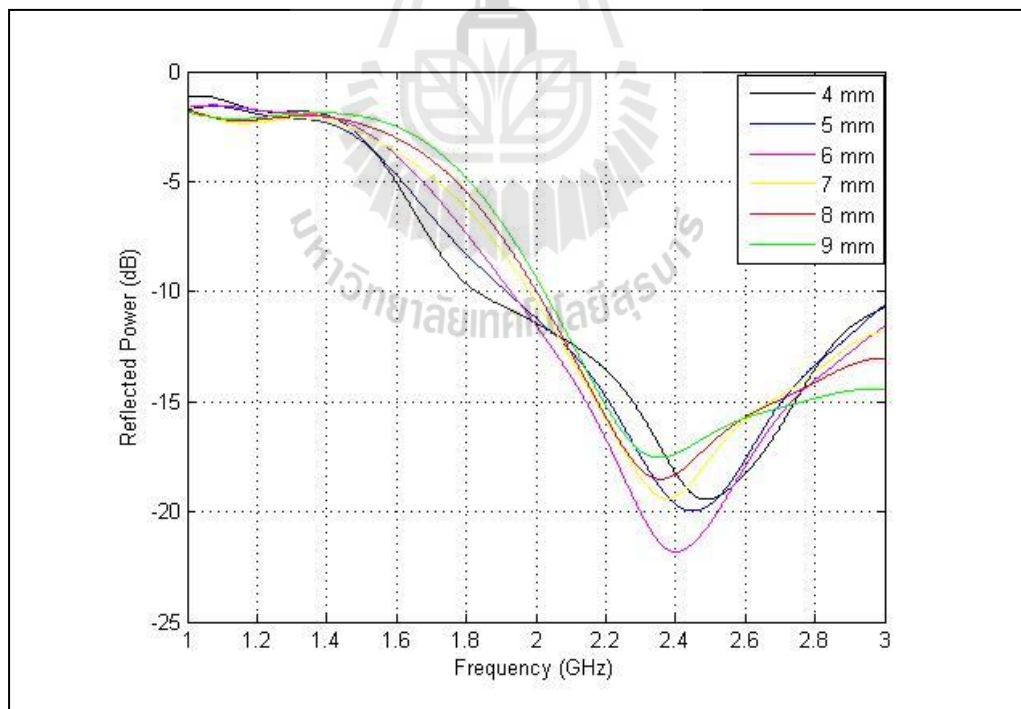
(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ )

รูปที่ 4.11.ผลจากการจำลองสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

จากการจำลองผลพบว่าได้อัตราขยายเท่ากับ 3.350 dBซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมแต่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ ดังรูปที่ 4.1 1 (ข) ดังนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่า พารามิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดโดยทำการปรับพารามิเตอร์ที่ละตัวขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่นถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ เพื่อให้ได้สายอากาศแบบร่อง ตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลปที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz

#### 4.2.1 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบล่าง ( $W_L$ )

ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ ) โดย กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ ตัวอื่นๆคงที่ โดย ให้  $W_L$  มีค่าเท่ากับ 4 มม., 5 มม., 6 มม., 7 มม., 8 มม. และ 9 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างของขอบล่าง เปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยที่ ขนาดของ  $W_L$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ตำแหน่งของความถี่ เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง สุดท้ายได้พิจารณาความกว้างของขอบล่างที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 5 มม. ดังรูปที่ 4.12

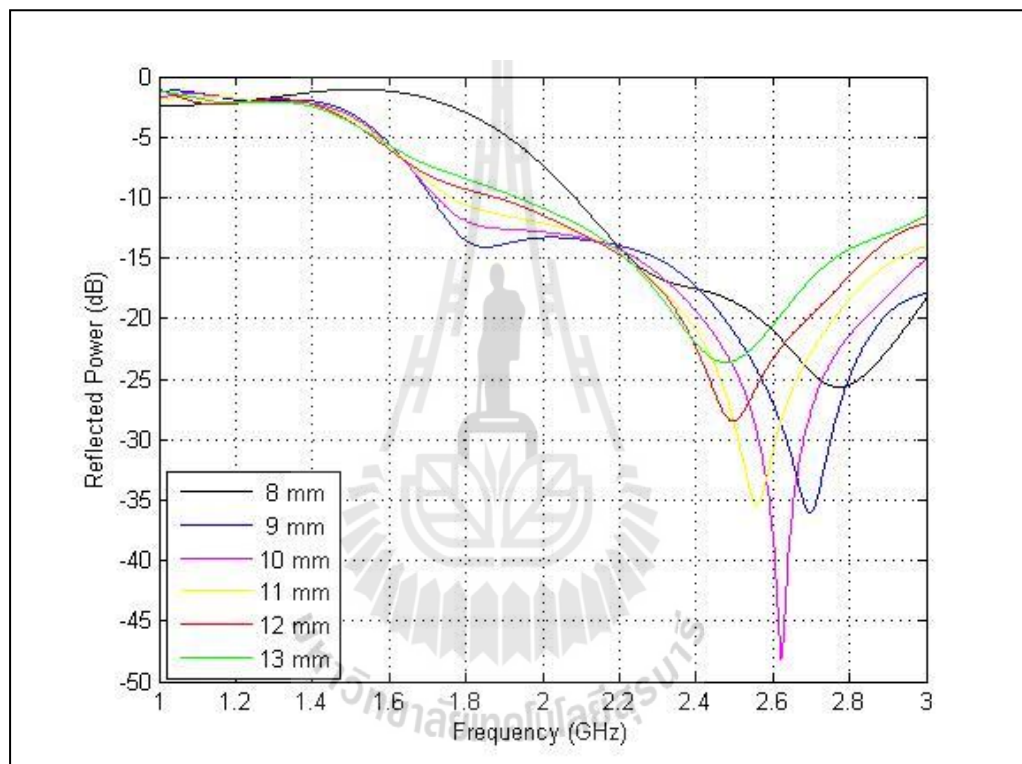


รูปที่ 4.12 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของขอบล่าง  $W_L$



#### 4.2.2 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความยาวของสตัด (L<sub>s</sub>)

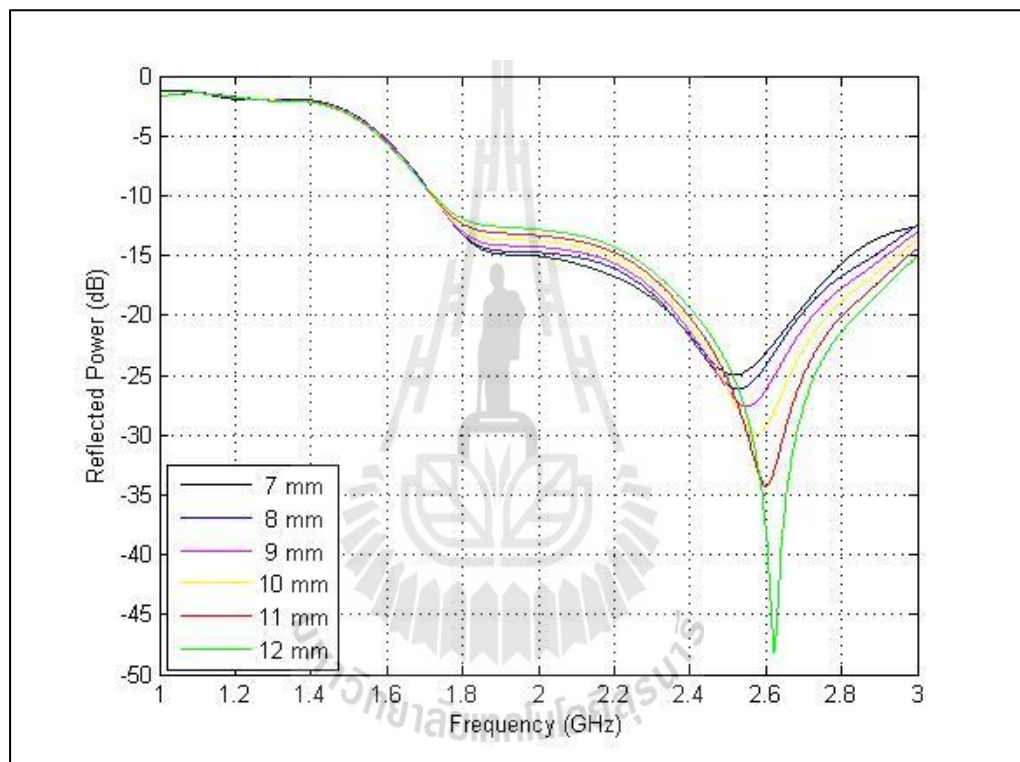
ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสตัด (L<sub>s</sub>) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้ L<sub>s</sub> มีค่าเท่ากับ 8 มม., 9 มม., 10 มม., 11 มม., 12 มม. และ 13 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความยาวของสตัดเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อ ความถี่เรโซแนนซ์ ของสายอากาศโดยที่ขนาดของ L<sub>s</sub> เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่ ต่ำลง สุดท้ายได้พิจารณาความยาวของสตัดที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสตัด L<sub>s</sub>

#### 4.2.3 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบบน ( $W_F$ )

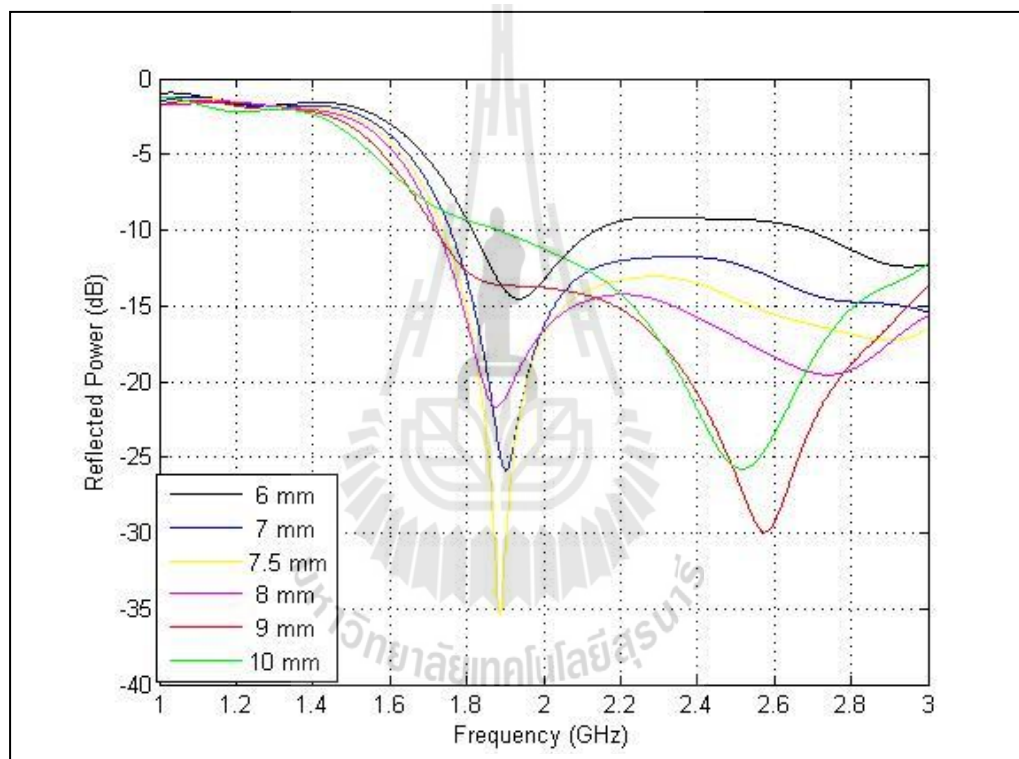
ทำการปรับขนาดความกว้างขอบบน ( $W_F$ ) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ คงที่ โดยให้  $W_F$  มีค่าเท่ากับ 7 มม., 8 มม., 9 มม., 10 มม., 11 มม. และ 12 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างขอบบนเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยที่ขนาดของ  $W_F$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับลดต่ำลงสุดท้ายได้พิจารณาความกว้างขอบบนที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 10 มม. ดังแสดงรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างขอบบน  $W_F$

#### 4.2.4 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของสตัป ( $W_s$ )

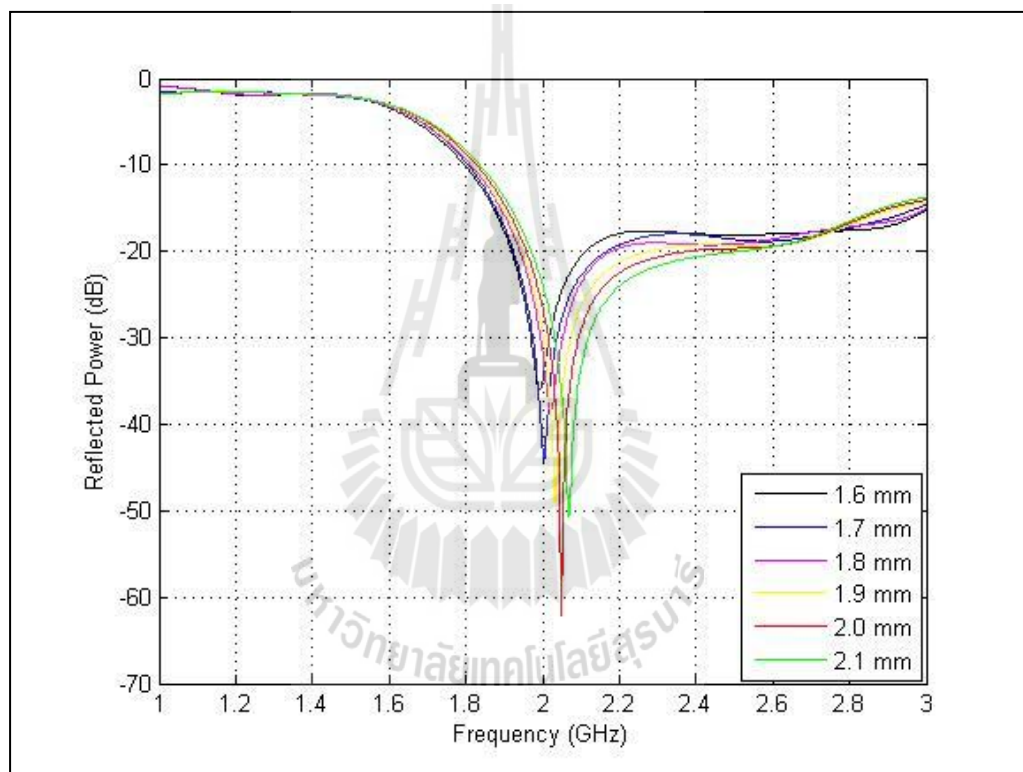
ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของ สตัป( $W_s$ ) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้  $W_s$  มีค่าเท่ากับ 6 มม., 7 มม., 7.5 มม., 8 มม., 9 มม. และ 10 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างของ สตัปเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อ ความถี่เรโซแนนซ์ ของสายอากาศโดยที่ขนาดของ  $W_s$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ตำแหน่งของความถี่ เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น และเกิดจุดเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งจุดที่ความถี่สูงขึ้นไป สุดท้ายได้พิจารณา ความกว้าง ของสตัปที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 7.5 มม. ดังแสดงรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสตัป  $W_s$

#### 4.2.5 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ )

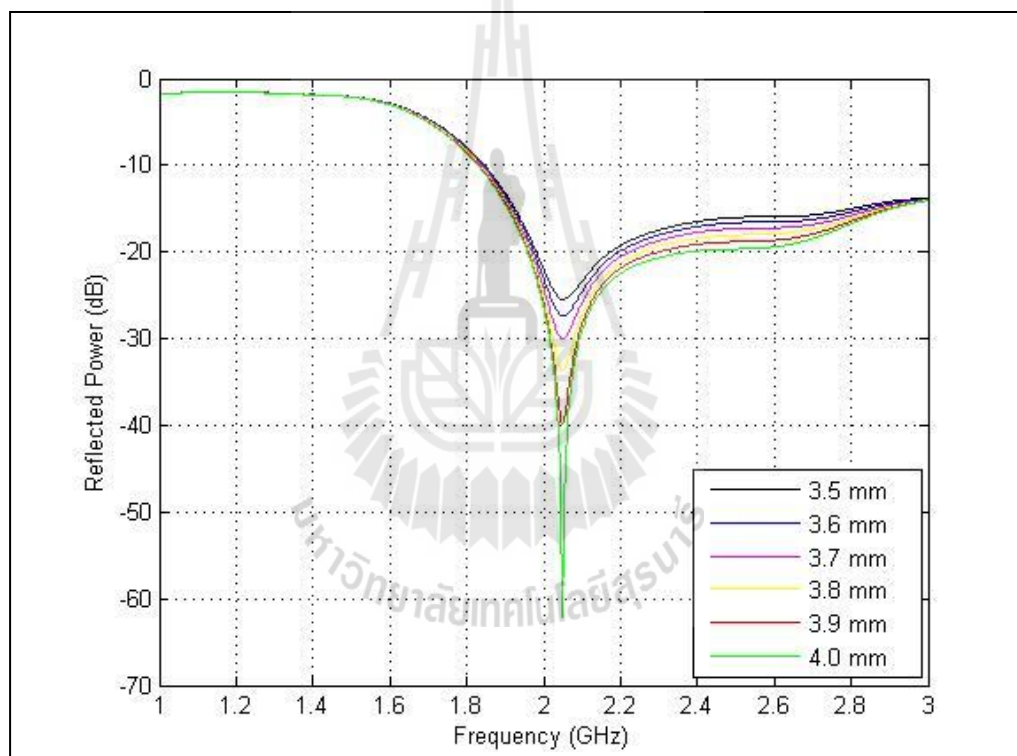
ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างขอบข้าง( $L_F$ ) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้  $L_F$  มีค่าเท่ากับ 1.6 มม., 1.7 มม., 1.8 มม., 1.9 มม., 2.0 มม. และ 2.1 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างขอบข้างเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ โดยที่ขนาดของ  $L_F$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ตำแหน่งของความถี่ เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น สุดท้ายได้พิจารณา ความกว้าง ขอบข้าง ที่เหมาะสม ที่สุด จะมีค่าเท่ากับ 2 มม. ดังแสดงรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างขอบข้าง  $L_F$

#### 4.2.6 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T)

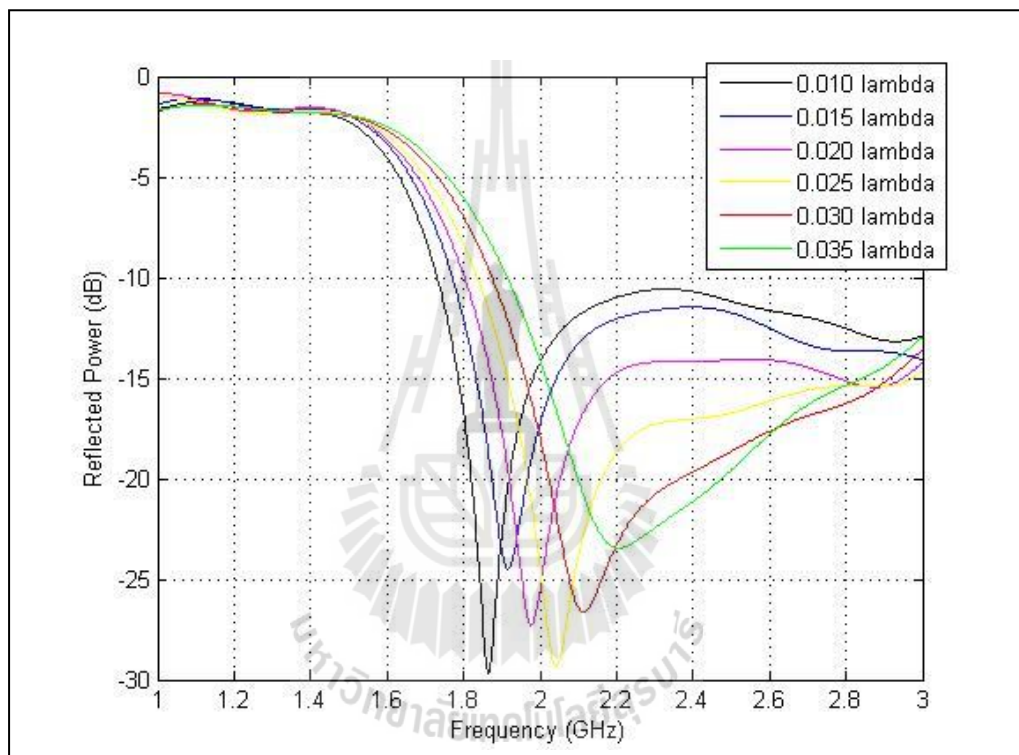
ทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T) โดยกำหนดให้ ค่าพารามิเตอร์ ตัวอื่นๆคงที่ โดย ให้ Tมีค่าเท่ากับ 3.5 มม., 3.6 มม., 3.7 มม., 3.8 มม., 3.9 มม. และ 4.0 มม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วมเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยที่ขนาด ขนาดของ T เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับลดต่ำลง สุดท้ายได้พิจารณา ระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วมที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 4 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสัดกับระนาบกราวด์ร่วม T

#### 4.2.7 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของปีก (F)

ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขอบข้าง (F) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้ F มีค่าเท่ากับ  $0.010 \lambda$ ,  $0.015 \lambda$ ,  $0.020 \lambda$ ,  $0.025 \lambda$ ,  $0.030 \lambda$  และ  $0.035 \lambda$  ตามลำดับ พบว่าเมื่อความกว้างของปีก เปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อ ความถี่เรโซแนนซ์ โดยที่ขนาดของ F เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จูลเรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น สุดท้ายได้พิจารณาความกว้างของปีกที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ  $0.025 \lambda$  ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของปีก F

จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลนจนกระทั่งเหมาะสมทำได้ผลผลิตสายอากาศแบบร่องต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลนที่มีขนาดความกว้างเท่ากับเท่ากับ  $0.025 \lambda$  และมีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ในรูปที่ 4.19 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติโดยค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลนดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ส่วนในรูปที่ 4.20 ได้แสดงลักษณะของสายอากาศแบบร่องต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลนที่มีเฉพาะส่วนที่เป็นร่อง

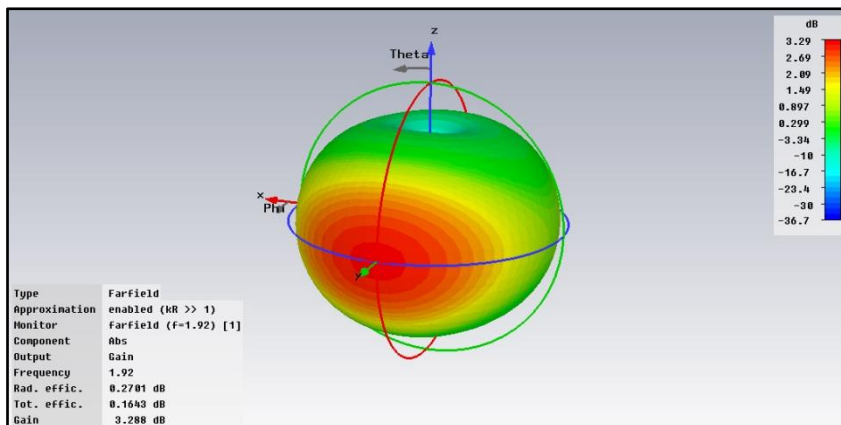
พร้อมสัดับที่มีการเพิ่มปีกสแลบ (type B) และกราฟแสดงผลเฉลยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า-10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20(ค) และ (ง) ตามลำดับ ซึ่งแบบรูปการแผ่กำลังจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแบบรูปชนิดรอบทิศทางในระนาบเดียว และมีผลเฉลยของค่าอัตราขยายในช่วงความถี่ที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลบ

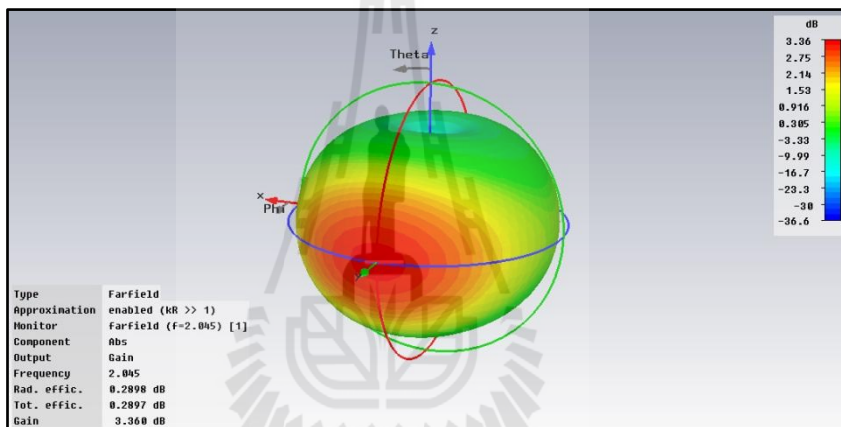
พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
$W_A$	45
$W$	6
$W_F$	10
$W_S$	7.5
$W_L$	5
$H$	0.8
$L$	35
$L_F$	2
$L_S$	10
$T$	4
$S$	0.48

ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบ

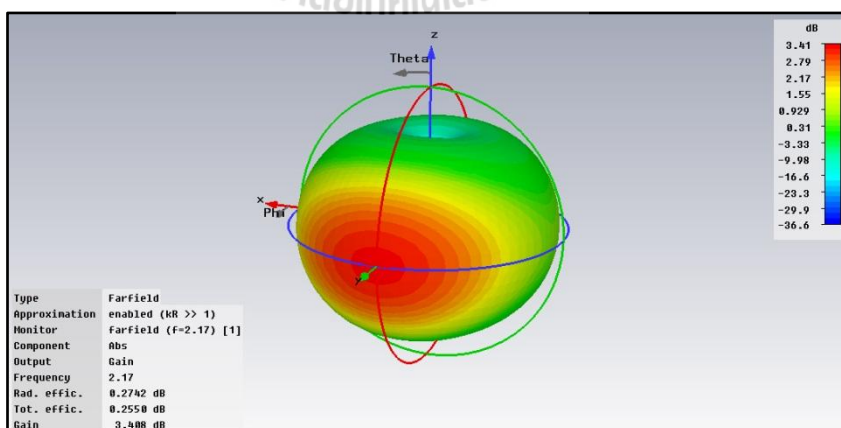
ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)
1.92	3.288
2.045	3.360
2.17	3.408



(ก) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 1.92 GHz



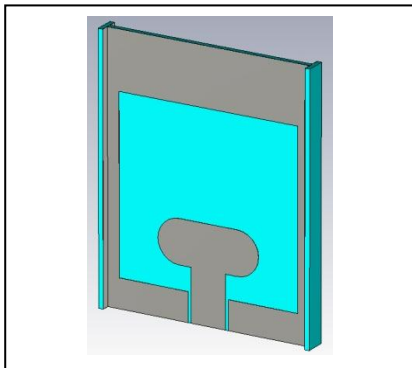
(ข) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2.045 GHz



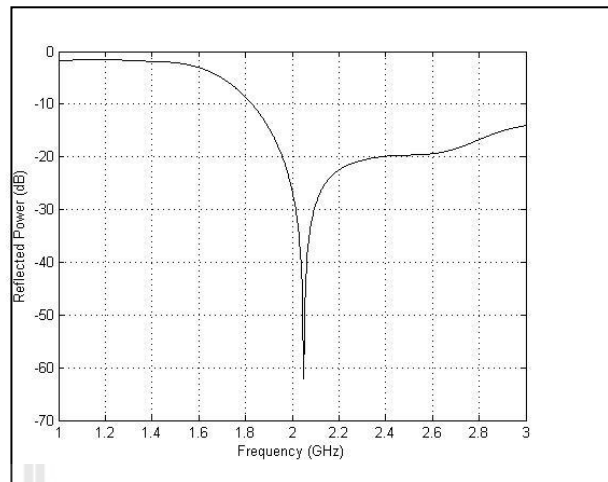
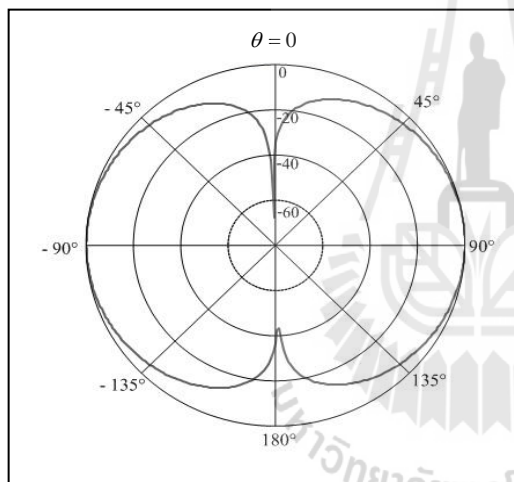
(ค) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2.17 GHz

รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสลับ

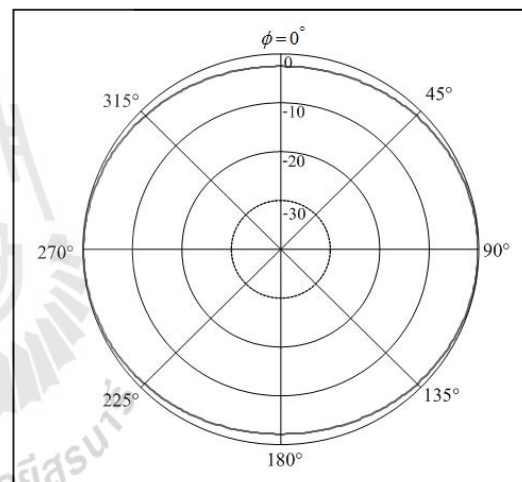




(ก) แบบจำลองสายอากาศ (type A)

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ( $S_{11}$ )

(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



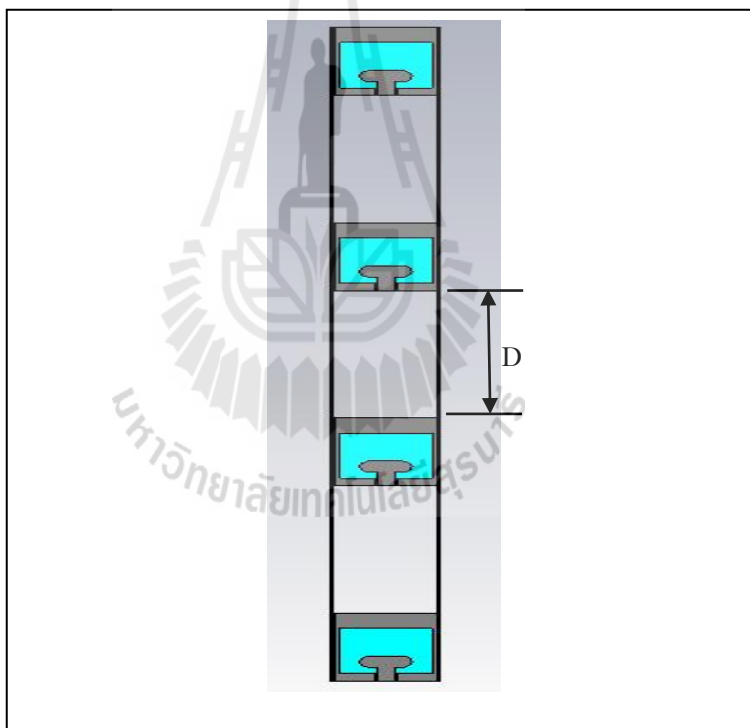
(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.20 ผลจากการจำลองสายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

### 4.3 การศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องโดยการจำลองด้วย

#### โปรแกรมสำเร็จรูป

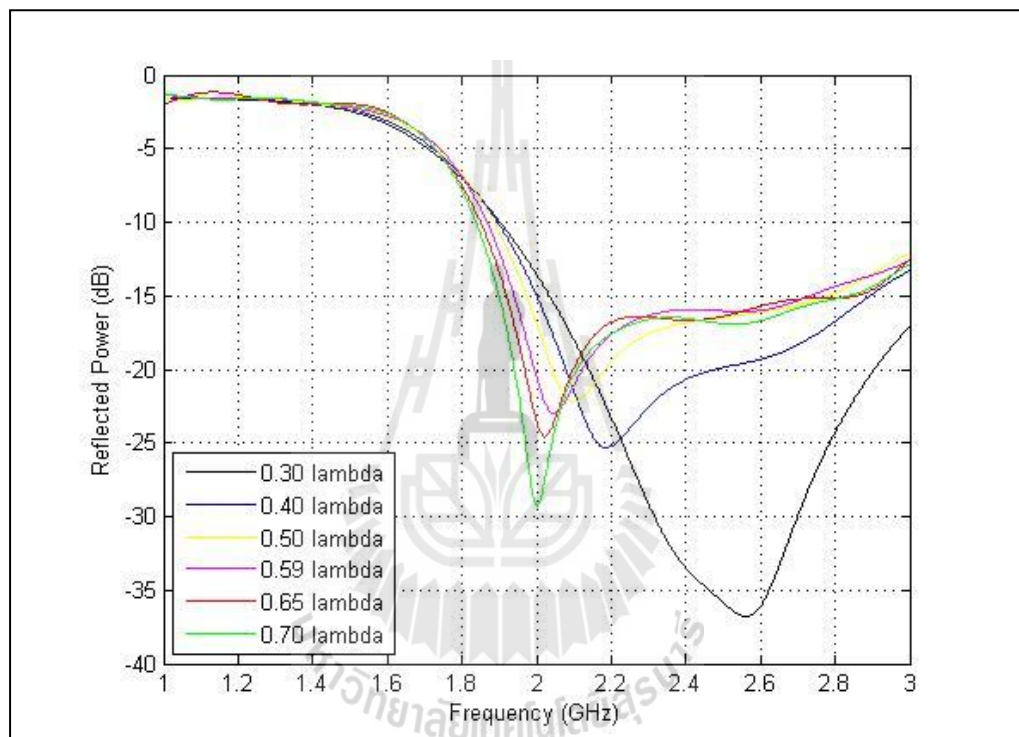
สายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีก (slab) ด้านข้างแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะได้ทำการการ ออกแบบให้เป็นสายอากาศแถวลำดับ โดยยังคงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ได้นำมาจัดวางให้เป็นแถวลำดับแบบเส้นตรงโดยใช้สายอากาศแบบร่องจำนวน 4 อลิเมนต์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.21 จากนั้นทำการปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ (distance :  $D$ ) ที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศแถวลำดับมีแบบรูปการแผ่กำลังยังคงใกล้เคียงแบบรอบตัวในระนาบอะซิมุทและให้อัตราขยายที่สูงขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเซลลูลาร์ 3Gซึ่งมีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz



รูปที่ 4.21 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้สายอากาศแบบร่องจำนวน 4 อลิเมนต์ (type C)

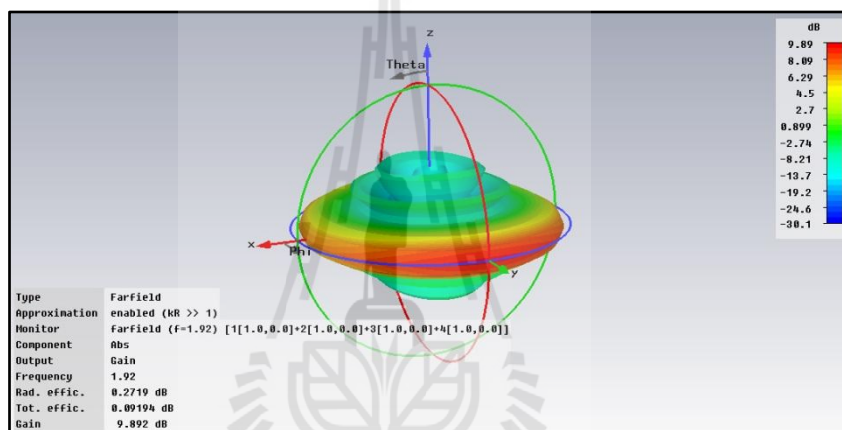
#### 4.3.1 การจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์(D)

ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์(D) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ โดยให้ D มีค่าเท่ากับ  $0.30 \lambda$ ,  $0.40 \lambda$ ,  $0.50 \lambda$ ,  $0.59 \lambda$ ,  $0.60 \lambda$  และ  $0.705 \lambda$  ตามลำดับ พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์เปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ โดยที่ขนาดของ D เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จุดเรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง สุดท้ายได้พิจารณาระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ  $0.59 \lambda$  ดังรูปที่ 4.22

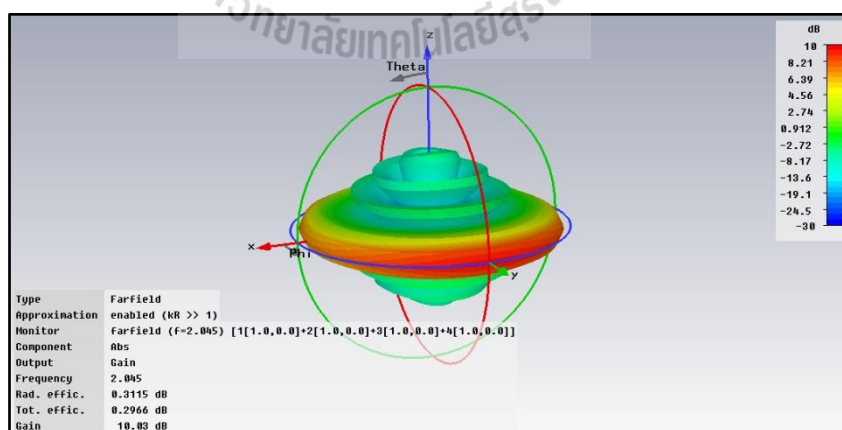


รูปที่ 4.22 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ D

จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ปรับหาค่าพารามิเตอร์ ของสายอากาศ แถวลำดับแบบร่อง ดันแบบที่จนกระทั่ง เหมาะสม ทำให้ผลเฉลยสายอากาศ แถวลำดับแบบร่อง ดันแบบที่มีความกว้าง แถบครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ในรูปที่ 4.23 ได้แสดงแบบ รูปการแผ่กำลัง 3 มิติกราฟแสดงผลเฉลยของ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.24(ก) สำหรับแบบ รูปการแผ่ กำลัง ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ได้แสดง ไว้ใน รูปที่ 4.24( ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งแบบรูปการแผ่กำลังจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแบบรูปชนิดรอบทิศทางใน ระนาบเดียว และมีผลเฉลยของค่าอัตราขยายในช่วงความถี่ที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 4.6

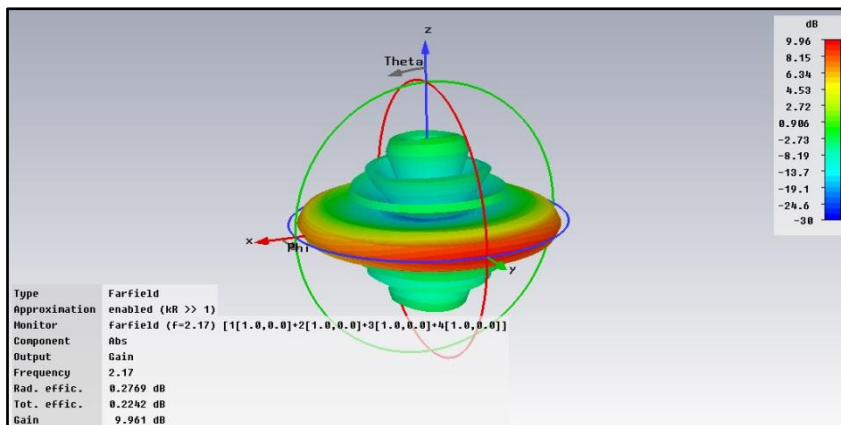


(ก) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 1.92 GHz



(ข) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2.045 GHz

รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศ แถวลำดับแบบร่อง

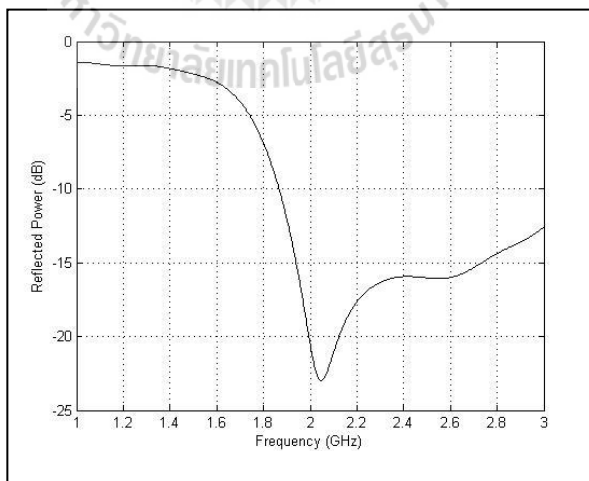


(ค) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2.17 GHz

รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง(ต่อ)

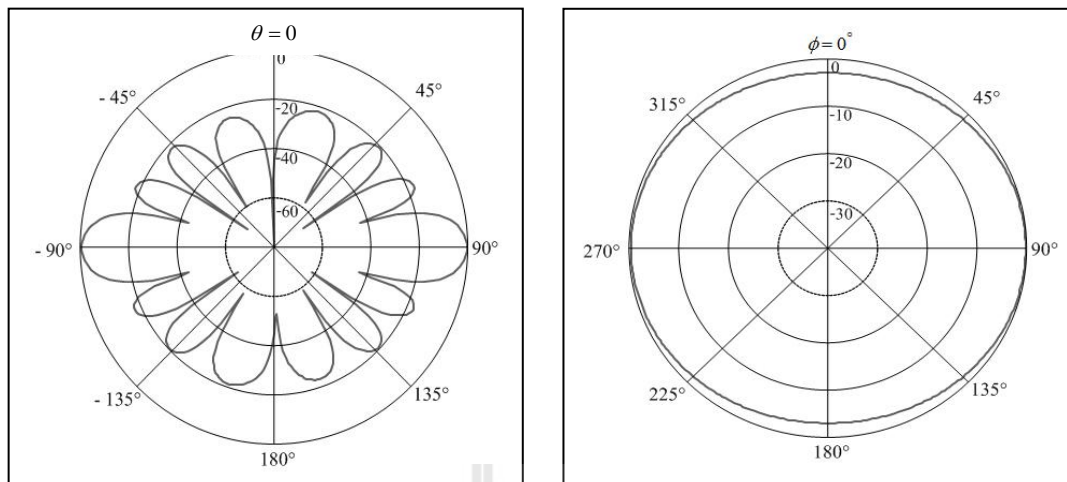
ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับ

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)
1.92	9.892
2.045	10.03
2.17	9.961



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ( $S_{11}$ )

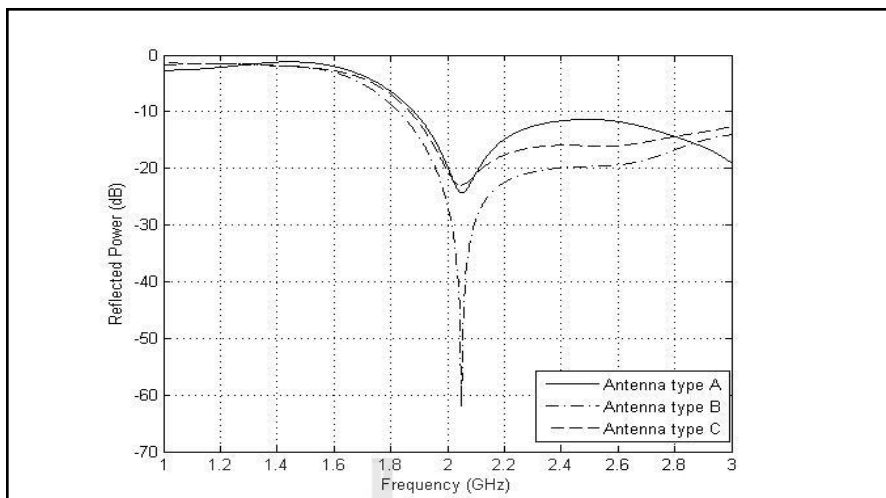
รูปที่ 4.24 ผลจากการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบร่องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST



(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า      (ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

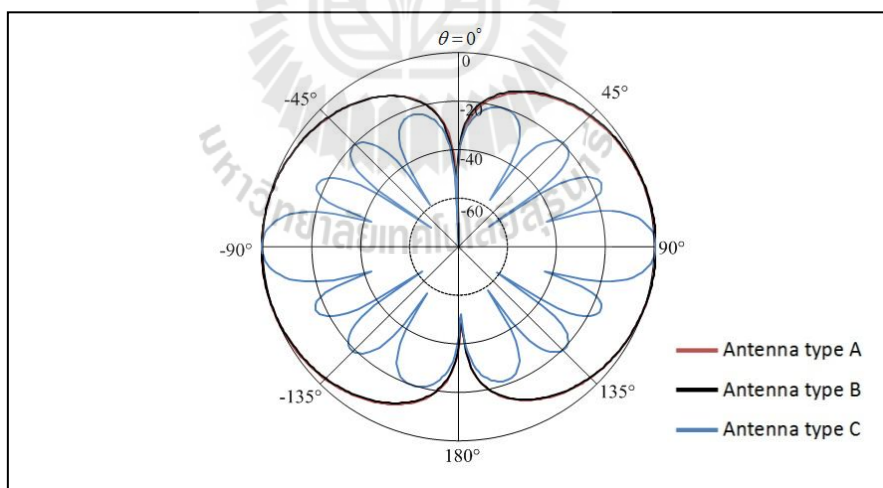
รูปที่ 4.24 ผลจากการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบร่องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)

จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( reflection coefficient หรือ  $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบร่องทั้ง 3 แบบ คือ (1) อากาศแบบร่อง (type A), (2) สายอากาศแบบร่องที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และ (3) สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง (type C) จะเห็นได้ว่าค่า  $S_{11}$  (-10 dB) ของสายอากาศแบบร่องทั้งสามแบบครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 1.92 – 2.17 GHz ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ได้ รูปที่ 4.26 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานหรือ نرمัลไรซ์ (normalized) แล้ว ที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.045 GHz จากการจำลองผลจะเห็นได้ว่าสายอากาศแถวลำดับแบบร่องแบบสามเหลี่ยมให้อัตราขยายสูงซึ่ง อัตราขยายแสดงดังตารางที่ 4.7



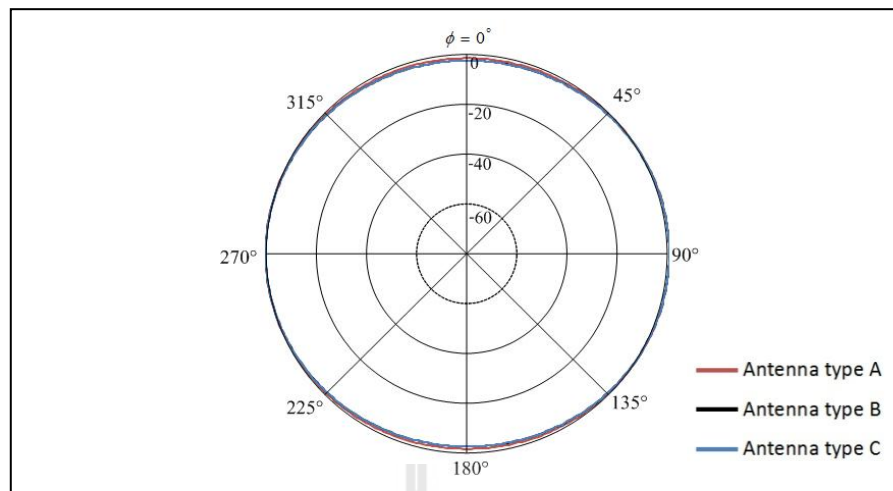
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ( $S_{11}$ )

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจำลองของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว (type A), สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแถวลำดับแบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C)



(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจำลองของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว (type A), สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแถวลำดับแบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C)



(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจำลองของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว (type A), สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแถวลำดับแบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C) (ต่อ)

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องตัวเดียว (type A), สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (type B) และสายอากาศแถวลำดับแบบร่องจำนวน 4 อิลิเมนต์ (type C)

ความถี่ (GHz)	Antenna type A	Antenna type B	Antenna type C
	อัตราขยาย (dB)	อัตราขยาย (dB)	อัตราขยาย (dB)
1.92	3.071	3.288	9.892
2.045	3.118	3.360	10.03
2.17	3.155	3.408	9.961



จากหัวข้อที่กล่าวข้างต้นทำให้ได้สายอากาศแถวลำดับแบบร่องเพิ่มปีกสแลบเป็นสายอากาศต้นแบบที่มีอัตราขยายสูงและมีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางในระนาบเดียว ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน UMTS จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนในการสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5

#### 4.5 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ และวิเคราะห์ สายอากาศแถวลำดับเส้นตรง โดยใช้สายอากาศแบบร่อง ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง จากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อให้ได้สายอากาศแบบร่องต้นแบบสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบเซลลูลาร์ ทำการเพิ่มอัตราขยายโดยการเพิ่มปีกสแลบที่มีความกว้างเท่ากับ  $0.025 \lambda$  ที่ด้านข้างทั้งสองข้างของสายอากาศและจัดแถวลำดับเพื่อให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงขึ้น ซึ่ง ได้ทำการจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ก่อน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแถวลำดับเส้นตรงสำหรับการนำไปสร้างสายอากาศแถวลำดับเส้นตรงต้นแบบต่อไป

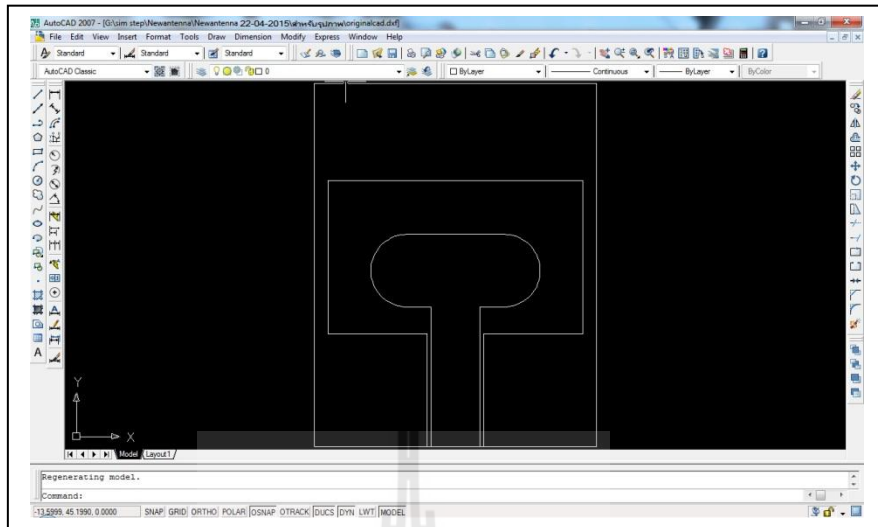
## บทที่ 5

### การสร้างและการวัดทดสอบ

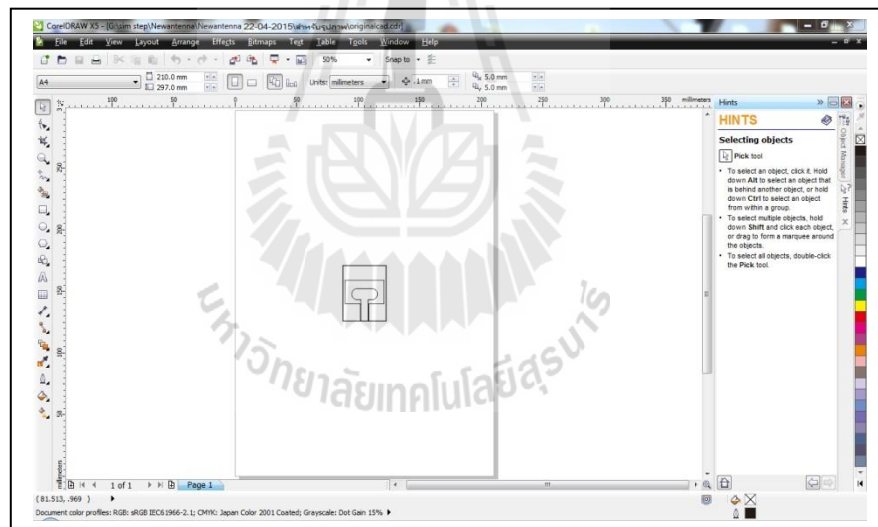
จากทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา ในบทนี้ ได้ทำการออกแบบสายอากาศต้นแบบตาม คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง และได้ทำการสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบขึ้น จากนั้นวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ ค่า  $S_{11}$  แบบรูปการแผ่กระจายกำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และอัตราขยาย โดยมีตัวแบ่งกำลังงาน (power divider) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่าน กำลังคลื่นความถี่วิทยุ จากเครื่องส่งไปยังสายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบซึ่งในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้น จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) PNA รุ่น N5224A จากนั้น ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์และจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พร้อมอภิปรายผล

#### 5.1 วิธีการสร้างสายอากาศแบบร่อง (Type A)

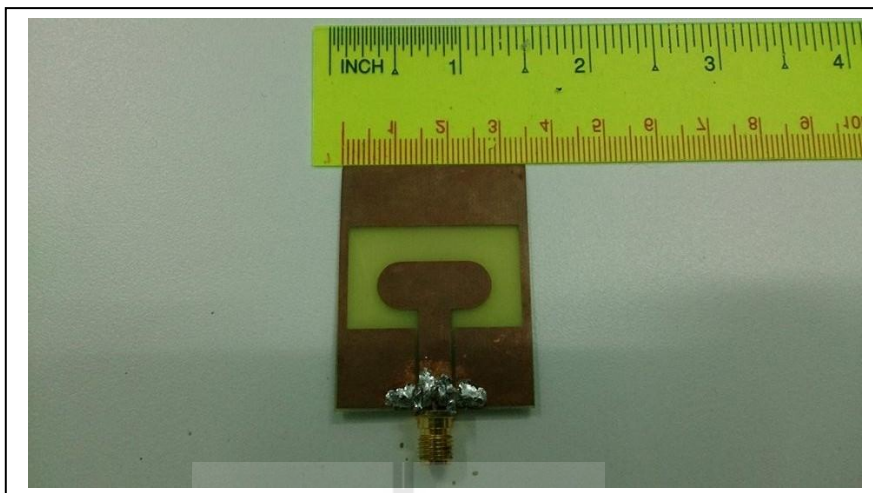
สายอากาศแบบร่องสร้างจากการนำโครงสร้างของสายอากาศแบบร่องจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จนได้ขนาดของสายอากาศตามที่ต้องการ มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 5.1 โดยผลการจำลองจะมีนามสกุลเพิ่มข้อมูลคือ MOD ซึ่งจะต้องนำไฟล์ออก (export file) จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลเพิ่มข้อมูลที่ได้ คือ ชื่อเพิ่มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้เพิ่มข้อมูลแล้ว ได้นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม Auto CAD 2007 แสดงดังรูปที่ 5.1 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม CorelDraw x5 แสดงดังรูปที่ 5.2 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่องต้นแบบโดยสร้างจากแผ่นไมโครสตริปชนิด FR4 ( $\epsilon_r = 4.5$ ) ให้มีขนาดตามพารามิเตอร์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 จากนั้นนำสายอากาศแบบร่องต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA 50 โอห์ม ดังแสดงในรูป ที่ 5.3 ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าสายอากาศต้นแบบ Type A



รูปที่ 5.1 โปรแกรม AutoCAD 2007 แปลงไฟล์



รูปที่ 5.2 โปรแกรม CoreIDRAW X5 กำหนดการตัดแผ่นวงจรพิมพ์



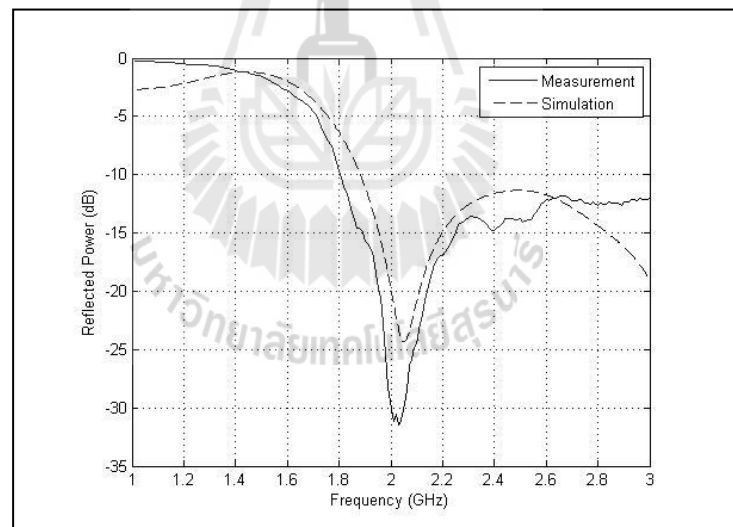
รูปที่ 5.3 สายอากาศแบบร่องต้นแบบ(Type A)

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่อง(Type A)

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างสายอากาศ( $W_A$ )	45
ความยาวสายอากาศ(L)	35
ระยะของร่องระหว่างสายนำสัญญาณ (S)	0.48
ความกว้างสายนำสัญญาณ (W)	6
ความกว้างขอบบน ( $W_F$ )	12
ความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ )	14
ความยาวของสตัด ( $L_S$ )	12
ความกว้างของสตัด ( $W_S$ )	9
ความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ )	1.7
ระยะห่างระหว่างสตัดกับระนาบกราวด์ร่วม (T)	3.3
ความหนาวัสดุฐานรอง (H)	0.8

### 5.1.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

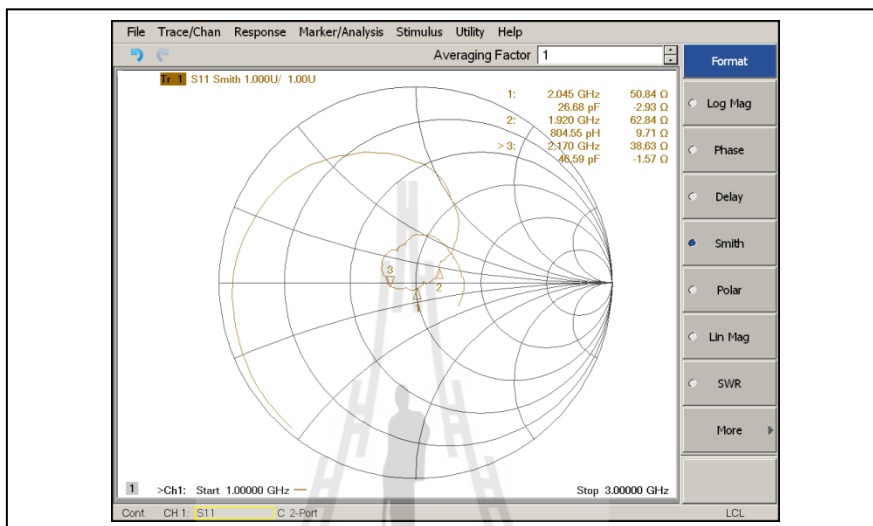
สำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมทช์อิมพีแดนซ์ด้านเข้าคือ ค่า  $S_{11}$  ซึ่งเป็นการพิจารณา การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้าน เข้าของสายอากาศซึ่งขนาดของ  $S_{11}$  อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่า ไม่แมทช์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าลบเป็นอนันต์ แสดงว่ามีการแมทช์ที่สมบูรณ์แบบที่สุด (รังสรรค์ และ ชวงค์, ม.ป.ป) ในการใช้งานด้านวิศวกรรมสายอากาศค่าของ  $S_{11}$  ที่ยอมรับได้ถ้ามีค่า ต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า จึงยอมรับได้ว่า สายอากาศนั้นมีการแมทช์ที่ดี จากรูปที่ 5.4แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวัดทดสอบและ ผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ Type A จาก รูปจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.045 GHz สายอากาศแบบร่องต้นแบบมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -30.862 dB และ -24.25dB ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ณ ความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 5.4กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัด ทดสอบของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ(Type A)

### 5.1.2 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

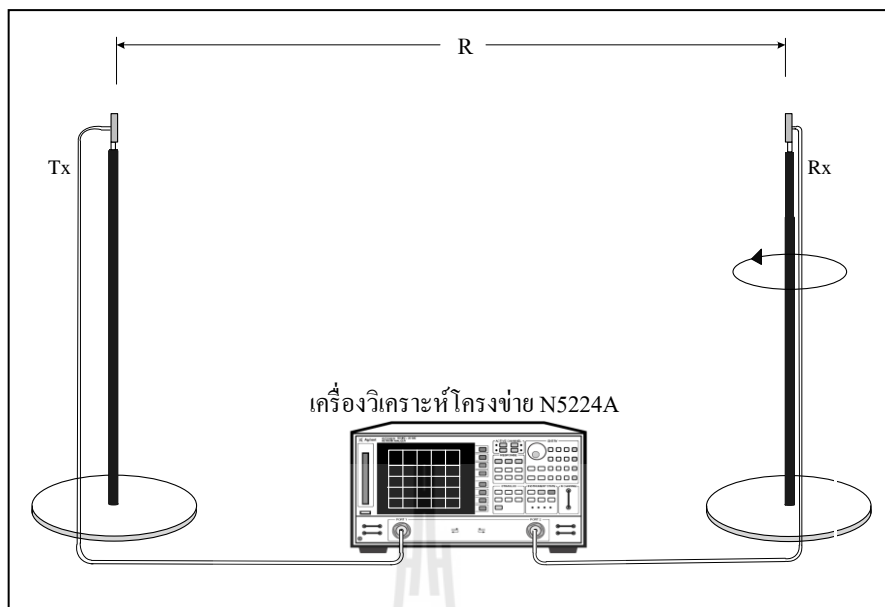
จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบร่องด้วยเครื่องวิเคราะห์  
โครงข่าย ที่ความถี่ 2.045 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50.84 Ω ซึ่งใกล้เคียงกับ  
ค่าที่ยอมรับได้ คือ 50 Ω



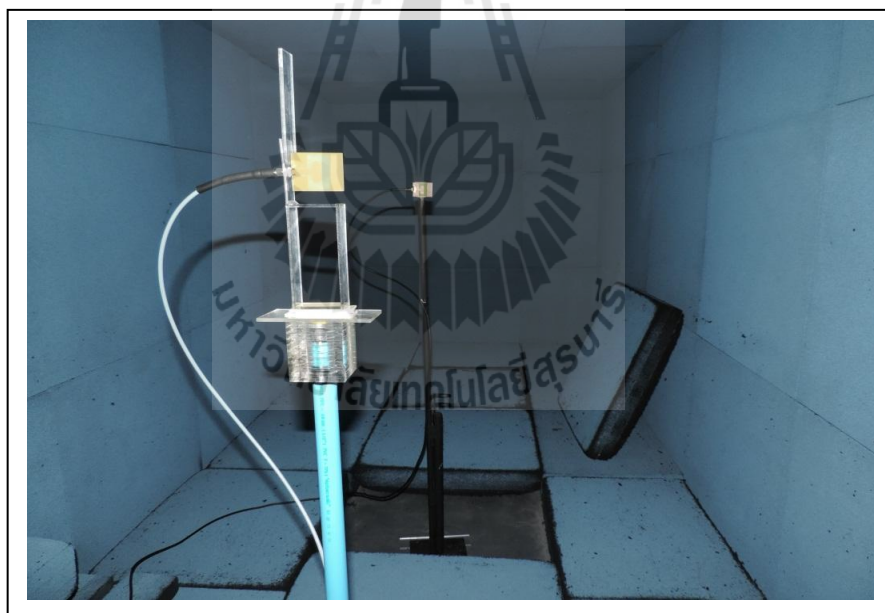
รูปที่ 5.5 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type A)

### 5.1.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง

จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศ  
แบบร่องต้นแบบทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ โดยทำการทดสอบในห้องไม่  
สะท้อน (anechoic chamber) และมีระยะ  $R$  ในการติดตั้งระหว่างสายอากาศวัดทดสอบและ  
สายอากาศอ้างอิงเท่ากับสนามระยะไกล คือ  $R \geq 2D^2 / \lambda$  โดยที่  $D$  คือ ขนาดของสายอากาศวัด  
ทดสอบ ดังนั้นจึงติดตั้งที่ระยะ  $R \geq 0.05$  เมตร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระยะ  $R = 1$  เมตร โดยใช้  
ใช้สายอากาศแบบร่องต้นแบบ ซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.045 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงโดยทำ  
หน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และภาครับซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับ  
คลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศา จนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของ  
สายอากาศทั้งหมดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 5.8 จากผลการวัด  
ทดสอบสายอากาศแบบร่องต้นแบบ มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม  
สำเร็จรูป CST ซึ่งมีลักษณะของแบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

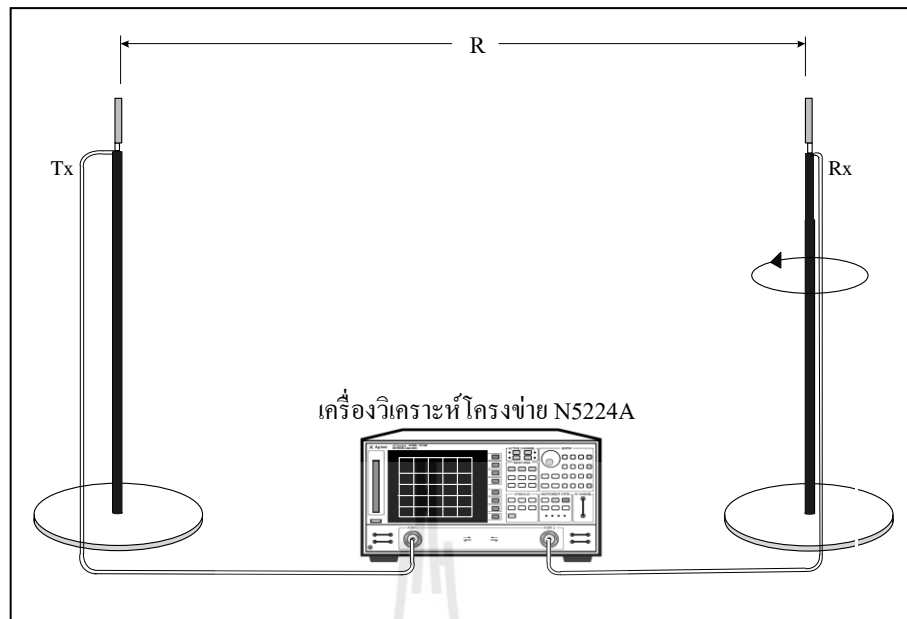


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.6 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่อง  
ตันแบบ (Type A)



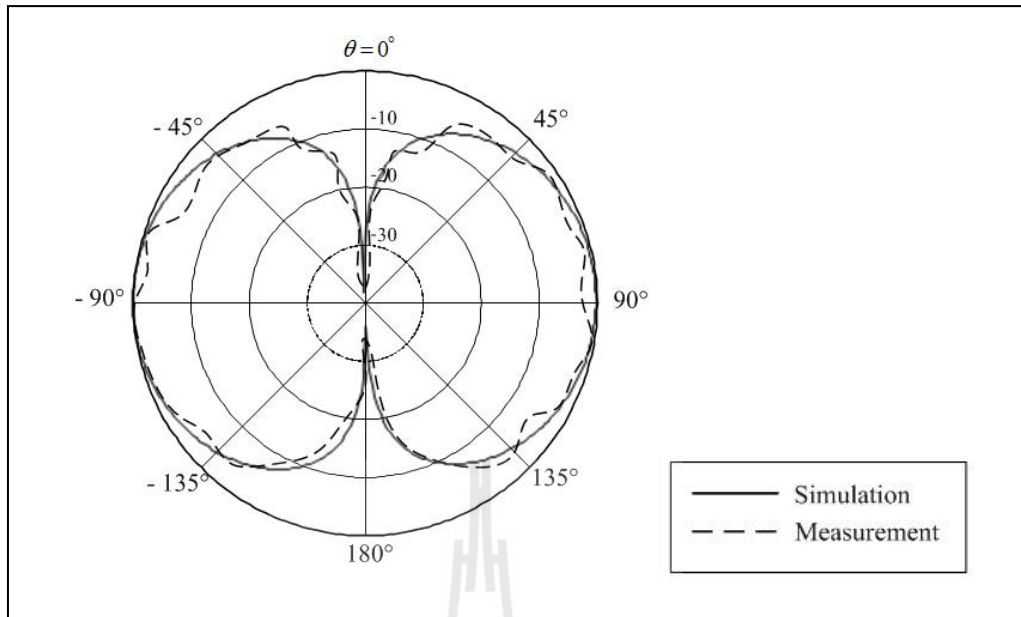
(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก



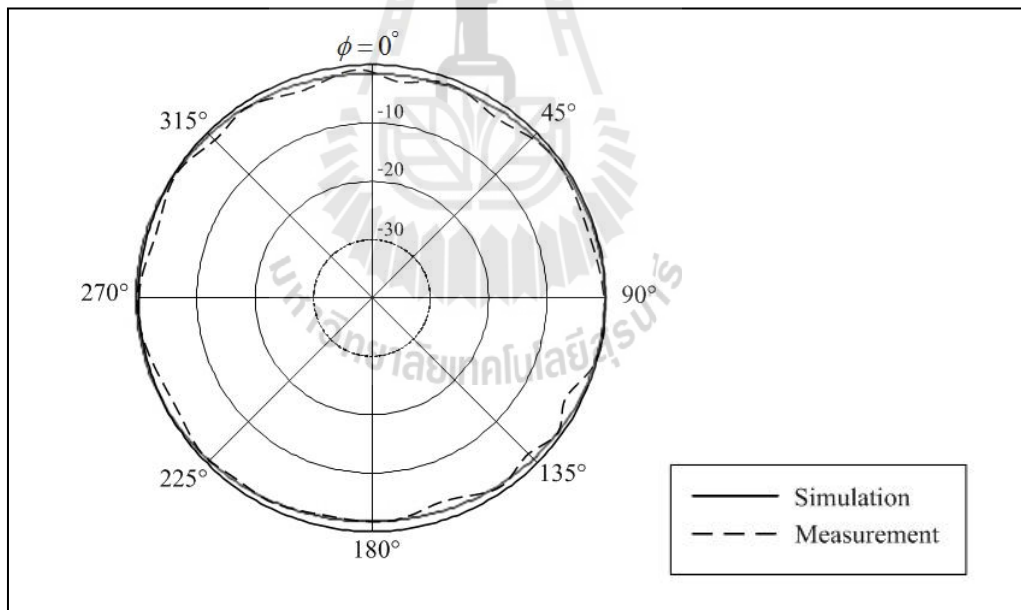
(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบร่อง  
ตันแบบ(Type A)





(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.8 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบ (Type A)

### 5.1.4 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

สำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบจะใช้ วิธีแบบสายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวหนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ โดยกำหนดให้สายอากาศแบบร่อนต้นแบบเป็นสายอากาศส่งและเป็นสายอากาศภาครับ แสดงดังรูปที่ 5.9

จากนั้นใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตรายายของสายอากาศแบบร่อนหนึ่งอิลิเมนต์ โดยสมการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้เท่ากับ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (5.1)$$

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left[ 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (5.2)$$

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} - G_{t_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.3)$$

โดยที่  $P_t$  คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง (วัตต์)  
 $P_r$  คือ กำลังที่รับได้ของสายอากาศภาครับ (วัตต์)  
 $G_{dB}$  คือ อัตรายายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเมื่อสายอากาศตัวทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน

$G_t$  คือ อัตรายายของสายอากาศภาคส่ง

$G_r$  คือ อัตรายายของสายอากาศภาครับ

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ(เมตร)

จากสมการ (5.2) สามารถคำนวณหาอัตรายายของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบที่ความถี่ 1.92 GHz, 2.045 GHz และ 2.17 GHz โดยกำหนดระยะ  $R=1$  เมตร กำลังภาคส่งที่ส่งออกหรือ  $P_t$  เท่ากับ -10 dB ดังนั้นสามารถคำนวณอัตรายายของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบได้ดังนี้

ที่ความถี่ 1.92 GHz

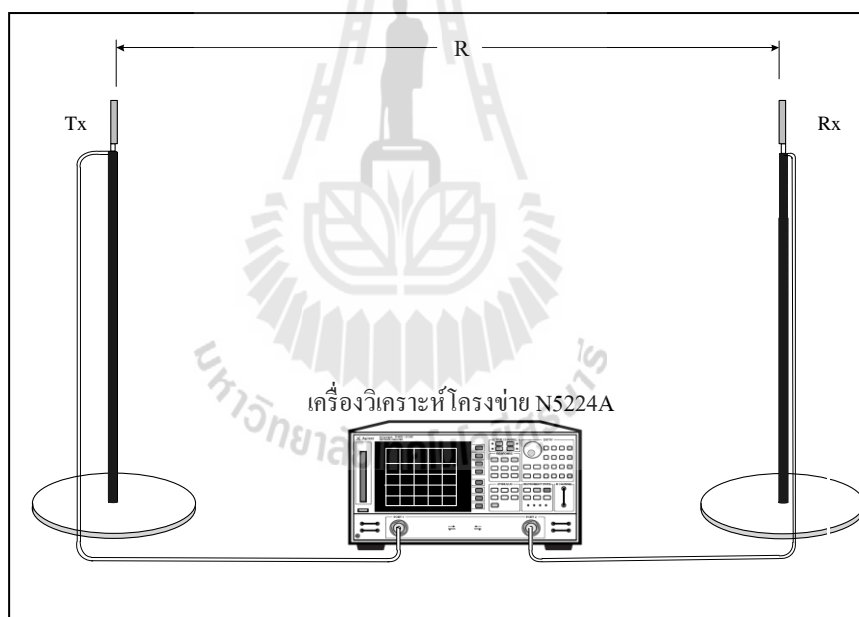
$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left( (-42.14 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (1)}{3 \times 10^8 / 1.92 \times 10^9} \right) \right) = 2.985 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.045 GHz

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left( (-42.46 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (1)}{3 \times 10^8 / 2.045 \times 10^9} \right) \right) = 3.095 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.17 GHz

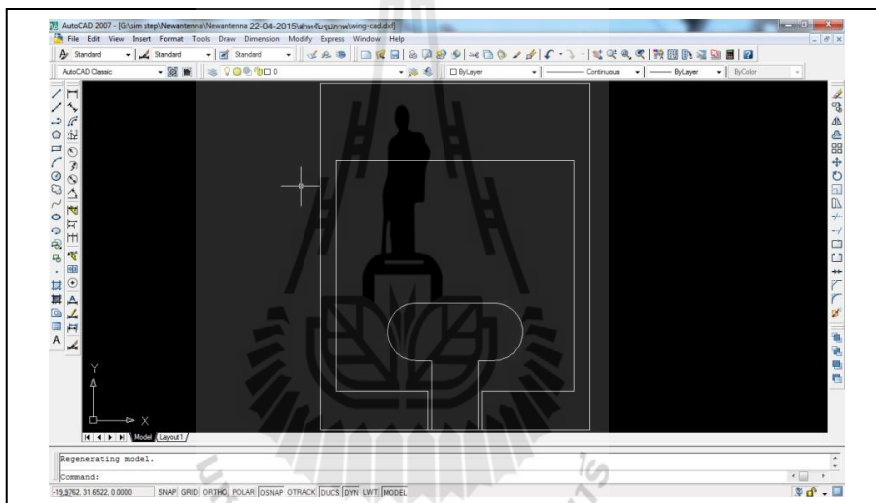
$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left( (-42.94 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (1)}{3 \times 10^8 / 2.17 \times 10^9} \right) \right) = 3.115 \text{ dB}$$



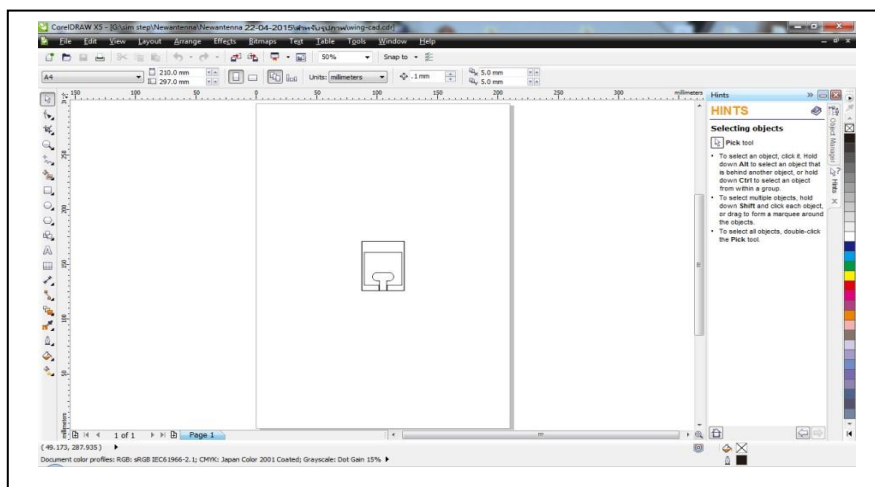
รูปที่ 5.9 แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบ (Type A)

## 5.2 วิธีการสร้างสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (Type B)

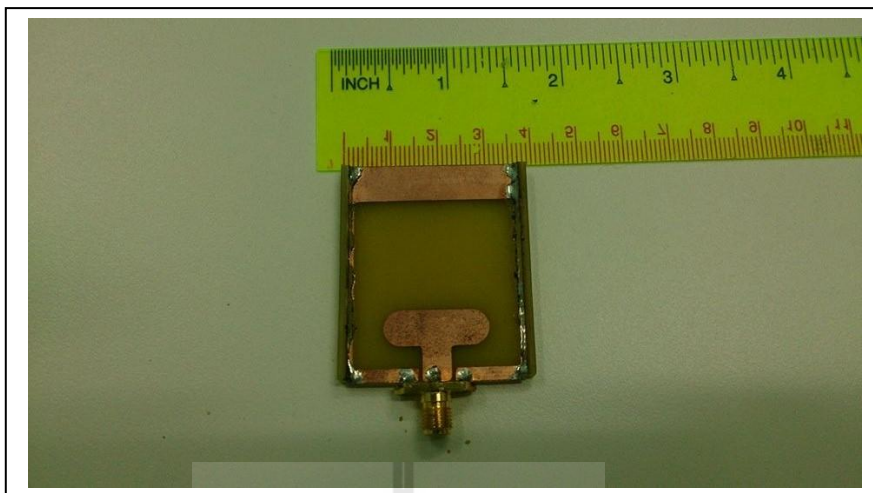
สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบสร้างจากการนำโครงสร้างจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จนได้ขนาดของสายอากาศตามที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 5.2 แล้วนำไฟล์ออกจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลเพิ่มข้อมูลที่ได้คือชื่อเพิ่มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้เพิ่มข้อมูลแล้ว ได้นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม AutoCAD 2007 แสดงดังรูปที่ 5.10 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม CorelDraw x5 ดังรูปที่ 5.11 โดยสร้างจากแผ่นไมโครสตริปชนิด FR4 ซึ่งมีขนาดตามพารามิเตอร์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 แล้วจึง นำสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบต่อเข้ากับขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าสายอากาศต้นแบบ Type B



รูปที่ 5.10 โปรแกรม AutoCAD 2007 แปลงไฟล์



รูปที่ 5.11 โปรแกรม CorelDRAW X5 กำหนดการตัดแผ่นวงจรพิมพ์



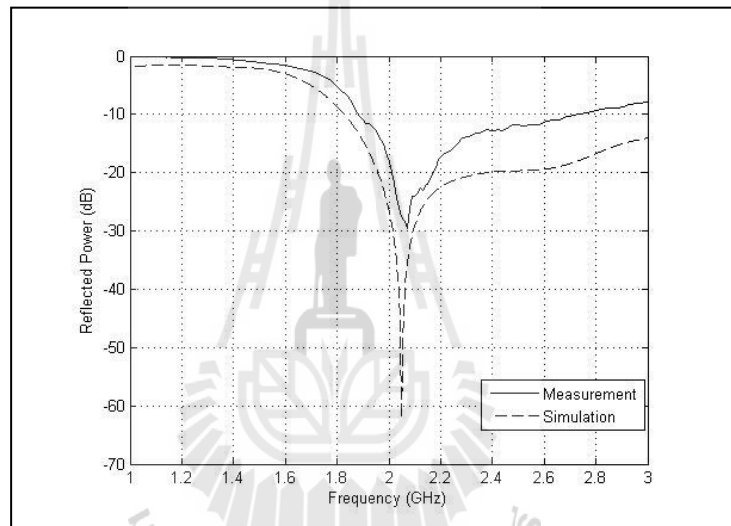
รูปที่ 5.12 สายอากาศแบบร่องคันแบบ (Type B)

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่องคันแบบ (Type B)

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างสายอากาศ( $W_A$ )	45
ความยาวสายอากาศ(L)	35
ระยะของร่องระหว่างสายนำสัญญาณ (S)	0.48
ความกว้างสายนำสัญญาณ (W)	6
ความกว้างขอบบน ( $W_F$ )	10
ความกว้างของขอบล่าง ( $W_L$ )	5
ความยาวของสตั๊ป ( $L_S$ )	10
ความกว้างของสตั๊ป ( $W_S$ )	7.5
ความกว้างขอบข้าง ( $L_F$ )	2
ระยะห่างระหว่างสตั๊ปกับระนาบกราวด์ร่วม (T)	4
ความหนาวัสดุฐานรอง (H)	0.8
ความกว้างปีก (F)	3.66

### 5.2.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

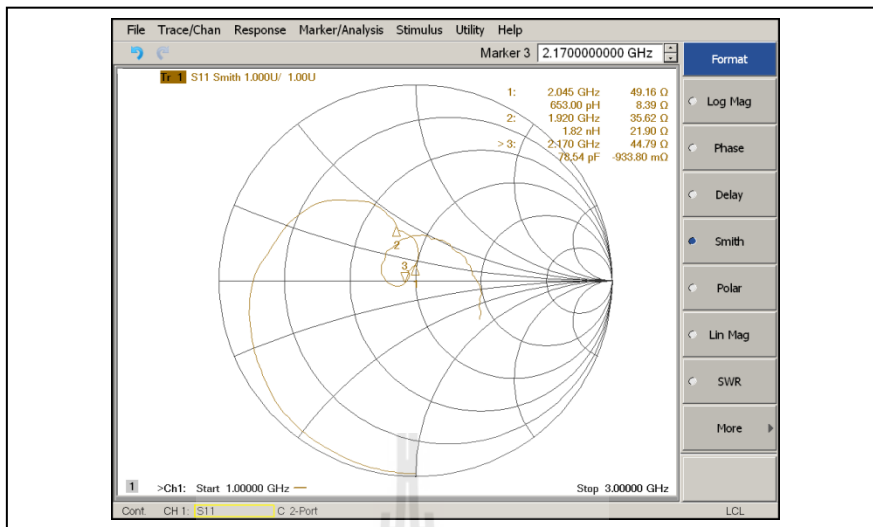
จากรูปที่ 5.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ในงานด้านวิศวกรรมสายอากาศค่าของ  $S_{11}$  ที่ยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า จึงยอมรับได้ว่าสายอากาศนั้นมีการแมทซ์ที่ดี จากรูปจะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.045 GHz สายอากาศแบบร่องต้นแบบมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -26.359 dB และ -44.72 dB ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสอง ยังคงมีการตอบสนองต่อความถี่ไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type B)

### 5.2.2 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

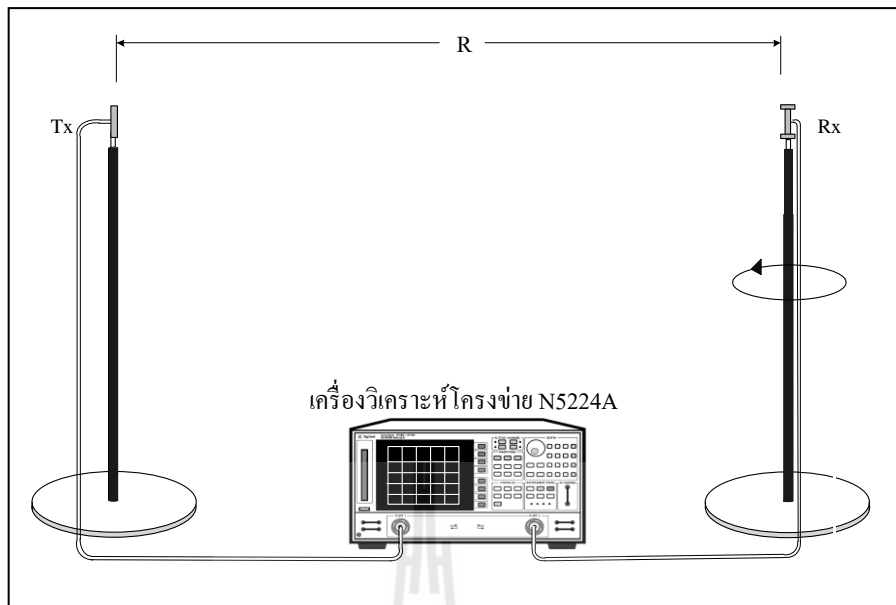
จากรูปที่ 5.14 แสดงการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ 2.045 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 49.16  $\Omega$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้ คือ 50  $\Omega$



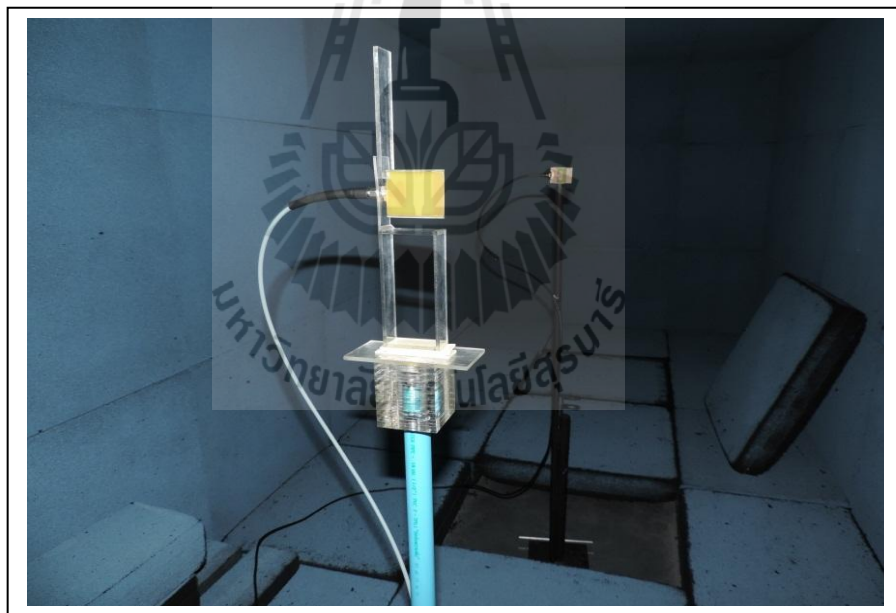
รูปที่ 5.14 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบ (Type B)

### 5.2.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง

จากรูปที่ 5.1 5 และ 5.16 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลบทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ โดยทำการทดสอบในห้องไม่สะท้อนและมีระยะ  $R \geq 0.05$  เมตร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระยะ  $R = 1$  เมตร โดยใช้สายอากาศแบบร่อนต้นแบบ โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.045 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงโดยทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแบบร่อนต้นแบบที่เพิ่มปีกสแลบเป็นภาครับ ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุน ทั้งสองระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศา จนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศทั้งหมดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 5. 17 จากผลการวัดทดสอบสายอากาศแบบร่อนต้นแบบ มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และยังคงรักษาแบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับรอบทิศทางในระนาบเดียว ตามที่กำหนดวัตถุประสงค์ไว้



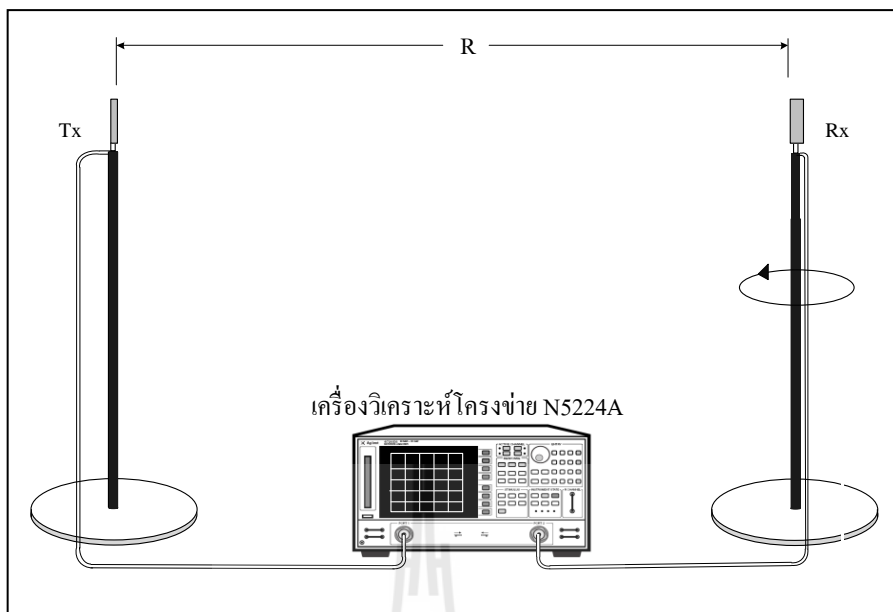
(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.15 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่อง  
ตันแบบ (Type B)



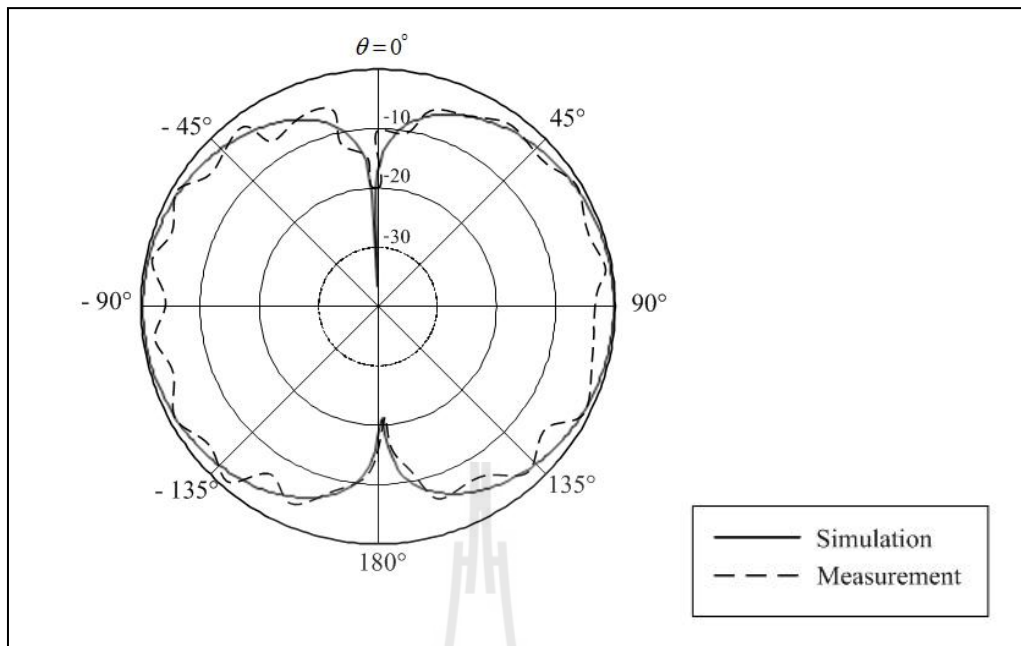


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

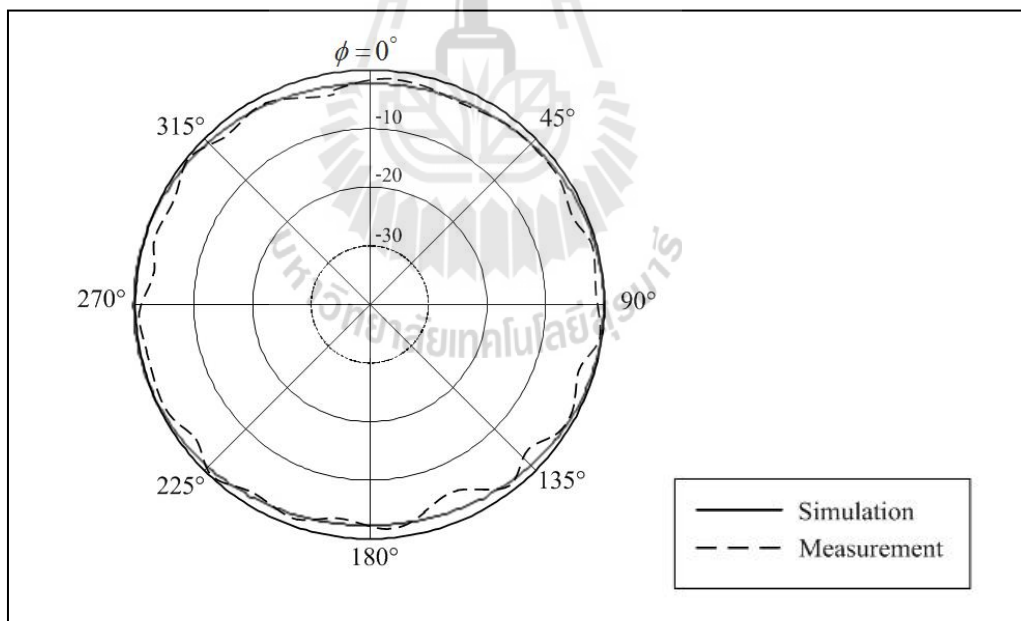


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.16 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบร่อง  
ต้นแบบ (Type B)



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.17 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่องตันแบบ (Type B)

### 5.2.4 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

สำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ จะกำหนดให้สายอากาศแบบร่องต้นแบบเป็นสายอากาศภาคส่งและกำหนดสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบเป็นสายอากาศภาครับ แสดงดังรูปที่ 5.18 จากสมการ (5.3) สามารถคำนวณหาอัตรายายของสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบได้ โดยกำหนดระยะ  $R = 1$  เมตร กำลังภาคส่งที่ส่งออกหรือ  $P_t = -10$  dB ดังนั้นสามารถคำนวณอัตรายายของสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบได้ดังนี้

ที่ความถี่ 1.92 GHz

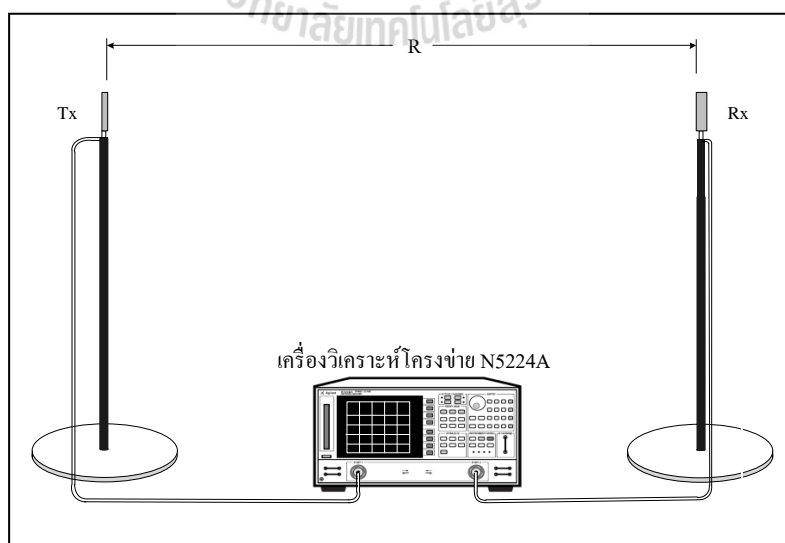
$$G_{r_{dB}} = (-41.92 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (2.985 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (1)}{3 \times 10^8 / 1.92 \times 10^9} \right) = 3.205 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.045 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-42.24 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (3.095 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (1)}{3 \times 10^8 / 2.045 \times 10^9} \right) = 3.315 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.17 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-42.67 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (3.115 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (1)}{3 \times 10^8 / 2.17 \times 10^9} \right) = 3.385 \text{ dB}$$



รูปที่ 5.18 แบบจำลองการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type B)

### 5.3 วิธีการสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่มีปีกสแลบ (Type C)

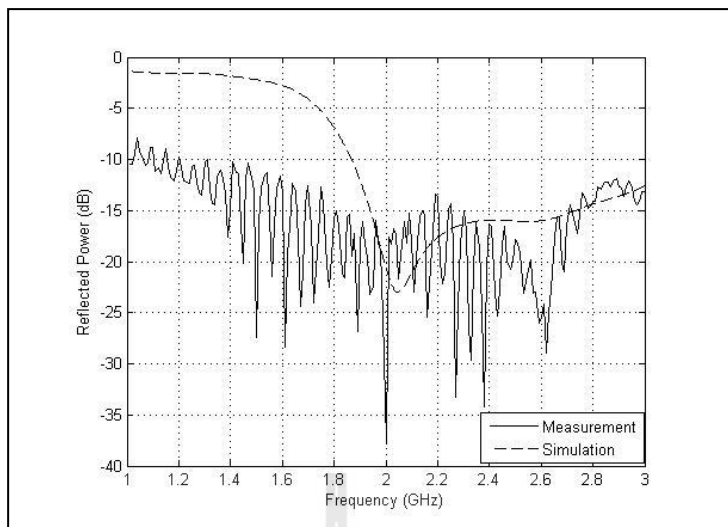
จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จนได้ขนาดและรูปแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นได้นำสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบมาทำการจัดแถวลำดับแบบเส้นตรงแนวตั้งจำนวน 4 อิลิเมนต์ โดยมีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์เท่ากับ  $0.59 \lambda$  หรือเท่ากับ 86.55 มิลลิเมตรซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าสายอากาศต้นแบบ Type C จากนั้นใช้ตัวแบ่งกำลังงานแบบ ขาเข้า 1 พอร์ต แล้ว ขาออก 4 พอร์ตทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศ ทั้งสี่อิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.19 โดยตัวแบ่งกำลังนี้ทำงานที่ช่วงความถี่ 280 MHz ถึง 2500 MHz มีค่าสูญเสียภายใน (insertion loss หรือ  $L_i$ ) เท่ากับ 3.4 dB และค่า VSWR เท่ากับ 1.3



รูปที่ 5.19 สายอากาศต้นแบบ Type C

#### 5.3.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

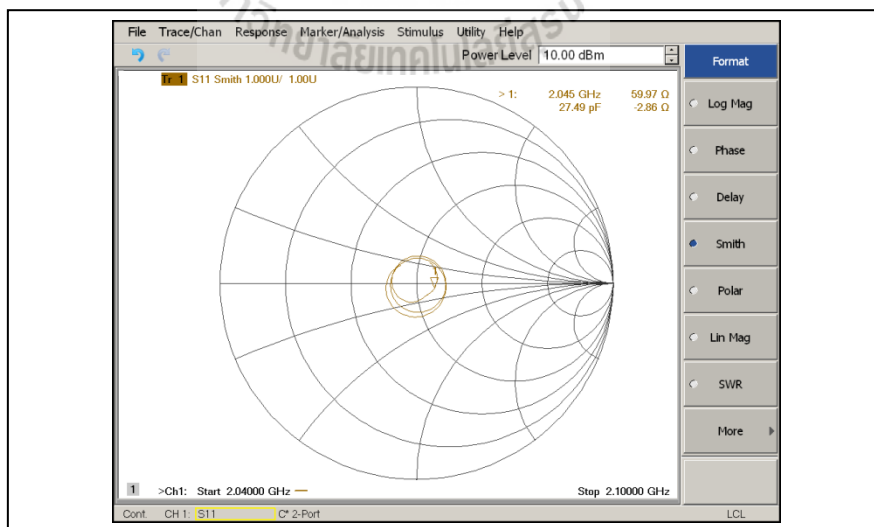
จากรูปที่ 5.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่มีปีกสแลบ จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.045 GHz สายอากาศแบบร่องต้นแบบมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -18.026 dB และ -22.98 dB ตามลำดับและผลการวัดทดสอบที่เกิดการแกว่งไปมานั้นอาจเป็นผลจากตัวแบ่งกำลังงานที่ทำให้เกิดการแกว่งของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อย่างไรก็ตามค่า  $S_{11}$  ตลอดช่วงความถี่ที่ออกแบบยังคงอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า -10 dB



รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type C)

### 5.3.2 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

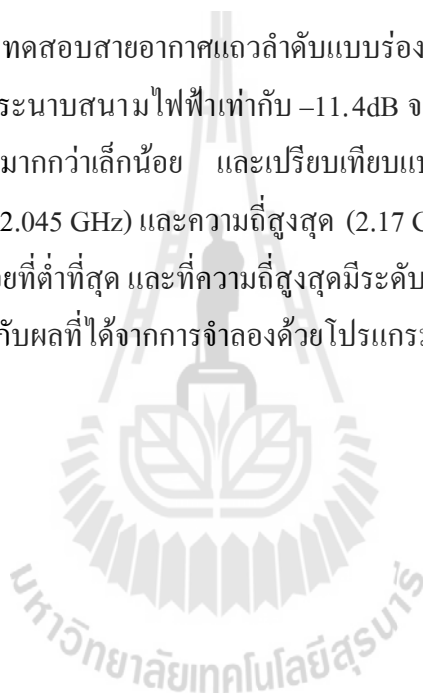
จากรูปที่ 5.21 แสดงผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่มีปีกสแลบที่มีความถี่ 2.045 GHz จากรูปจะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบร่องต้นแบบ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 59.97  $\Omega$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้ คือ 50  $\Omega$

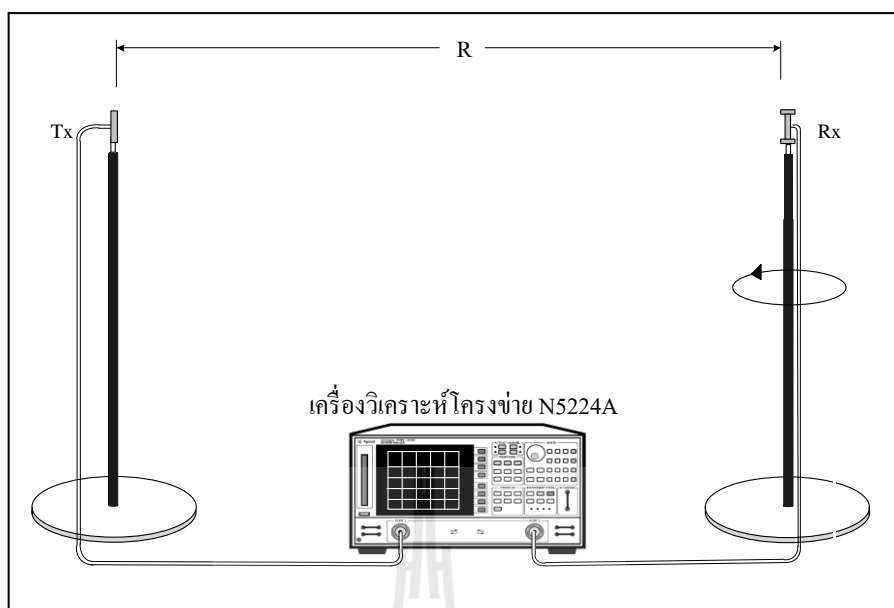


รูปที่ 5.21 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบร่องต้นแบบ (Type C)

### 5.3.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง

วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศ แถวลำดับแบบร่องที่มีปีกสแลบทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.22 และ 5.23 ตามลำดับ โดยทำการทดสอบในห้องไม่สะท้อน ซึ่งได้ระยะ  $R \geq 2.15$  เมตร ในการวัดทดสอบจึงกำหนดให้ระยะ  $R = 3$  เมตร โดยใช้สายอากาศแบบร่องต้นแบบเป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแถวลำดับแบบร่องมีปีกสแลบเป็นภาครับ ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนทั้ง 2 ระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศา จนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศทั้งหมดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 5.24 จากผลการวัดทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องมีปีกสแลบมีระดับโหลบข้าง (side lobe levels หรือ SLL) ในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ  $-11.4$  dB จะเห็นได้ว่าค่า ระดับโหลบข้างที่ได้จากผลการวัดทดสอบมีค่ามากกว่าเล็กน้อย และเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังที่ความถี่ต่ำสุด (1.92 GHz) ความถี่กลาง (2.045 GHz) และความถี่สูงสุด (2.17 GHz) จากผลการวัดทดสอบพบว่าที่ความถี่ต่ำมีระดับโหลบย่อยที่ต่ำที่สุด และที่ความถี่สูงสุดมีระดับโหลบย่อยที่สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 5.25 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST



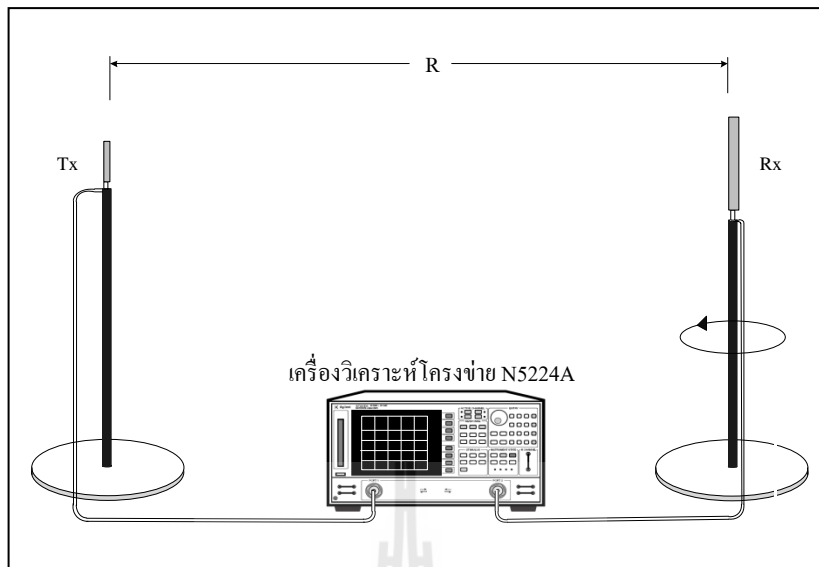


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.22 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่อง  
ตันแบบ(Type C)



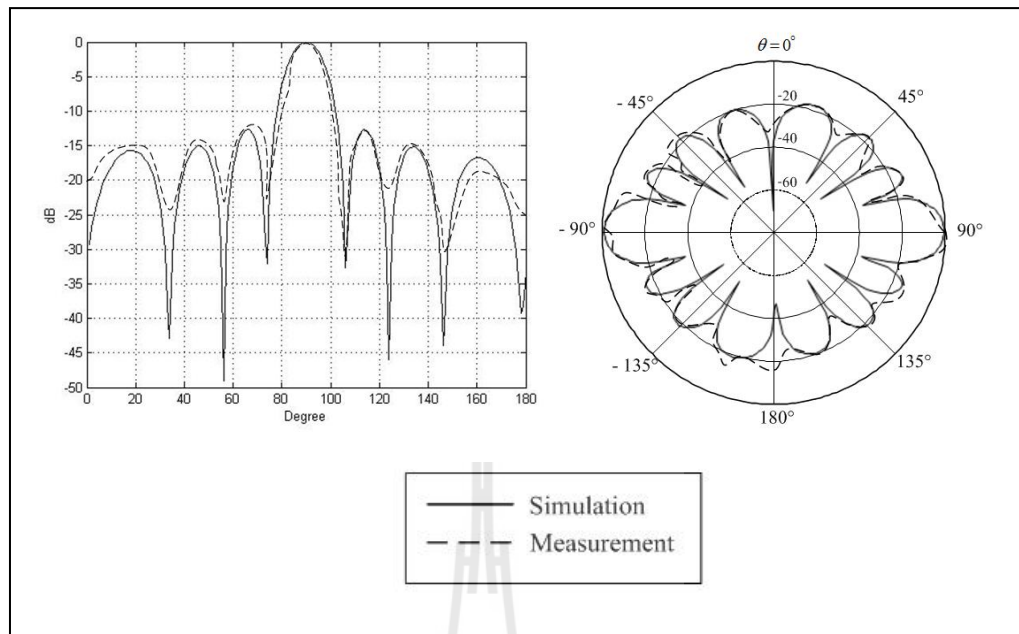
(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก



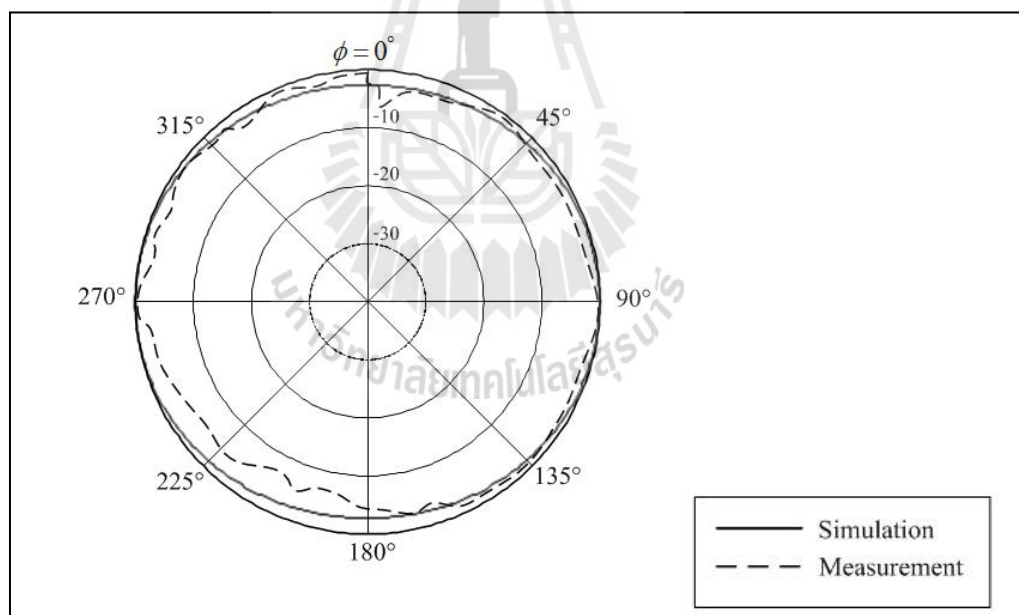
(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.23 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบร่อง  
ตันแบบ(Type C)



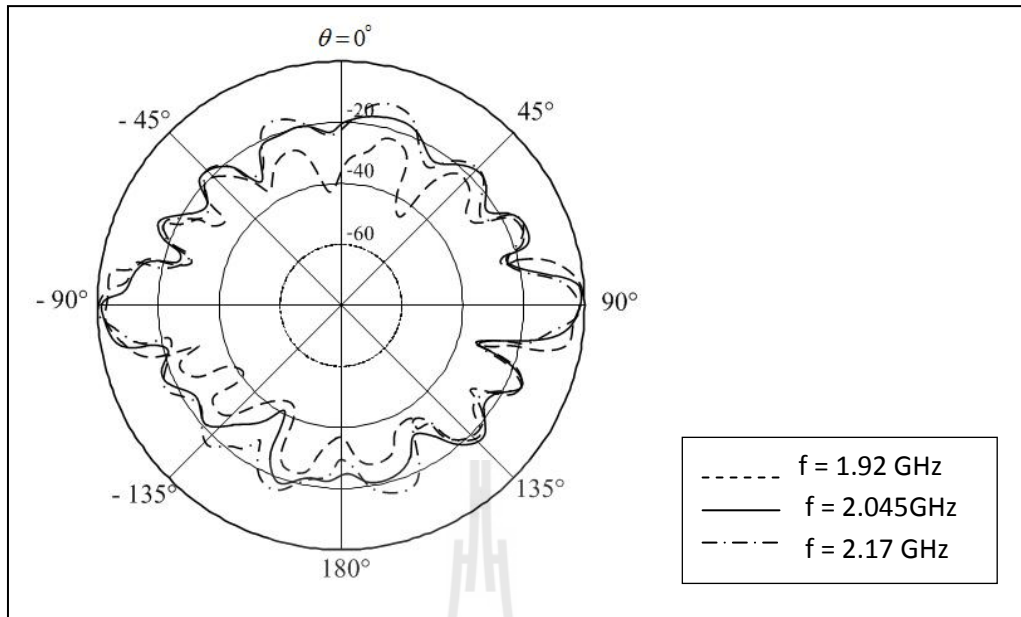


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

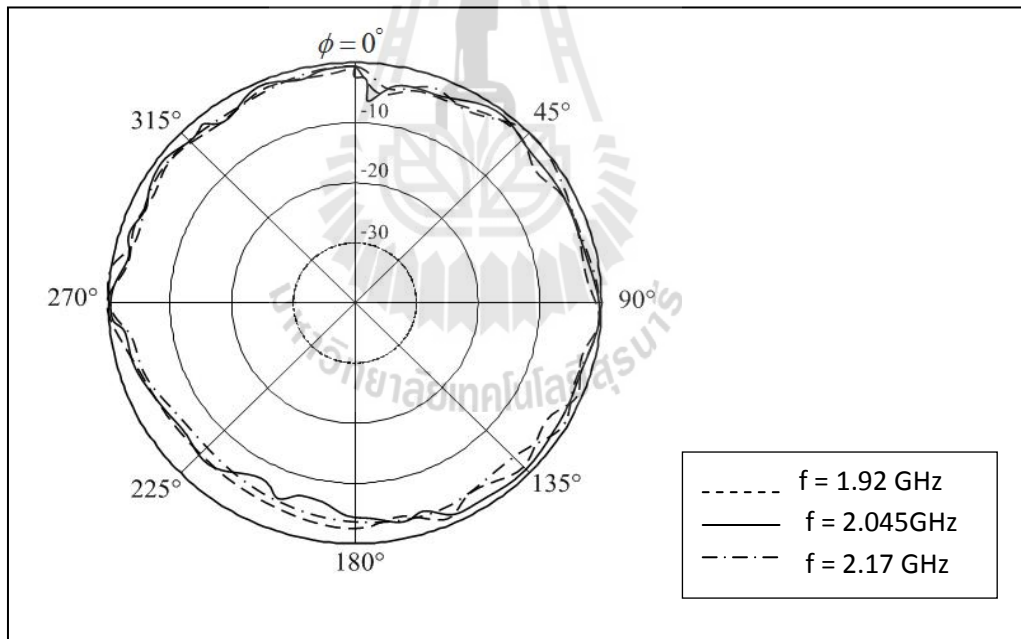


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.24แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่องตันแบบ(Type C)



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังที่ความถี่ต่ำสุด (1.92 GHz) ความถี่กลาง (2.045 GHz) และความถี่สูงสุด (2.17 GHz) ของสายอากาศแบบร่องตันแบบ (Type C)

### 5.3.4 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

สำหรับการวัดอัตรายายสายอากาศแบบร่องได้พิจารณาในส่วนของการสูญเสียที่เกิดจากสายส่ง (transmission line loss หรือ  $L_t$ ) มีค่าเท่ากับ 1.28 dB และการสูญเสียที่เกิดจากตัวแบ่งกำลังงาน (insertion loss of power divider หรือ  $L_i$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.4 dB ดังนั้นจากสมการ (5.3) จึงจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{i_{dB}} - G_{i_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) - L_{t_{dB}} - L_{i_{dB}} \quad (5.4)$$

โดยกำหนดให้สายอากาศแบบร่องต้นแบบเป็นสายอากาศภาคส่งและสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องเป็นสายอากาศภาครับ แสดงดังรูปที่ 5.2 6 จากสมการ (5.4) สามารถคำนวณอัตรายายของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องได้ โดยกำหนดระยะ  $R = 3$  เมตร กำลังของภาคส่งที่ส่งออกหรือ  $P_t = -10$  dB สามารถคำนวณอัตรายายของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องได้ดังนี้

ที่ความถี่ 1.92 GHz

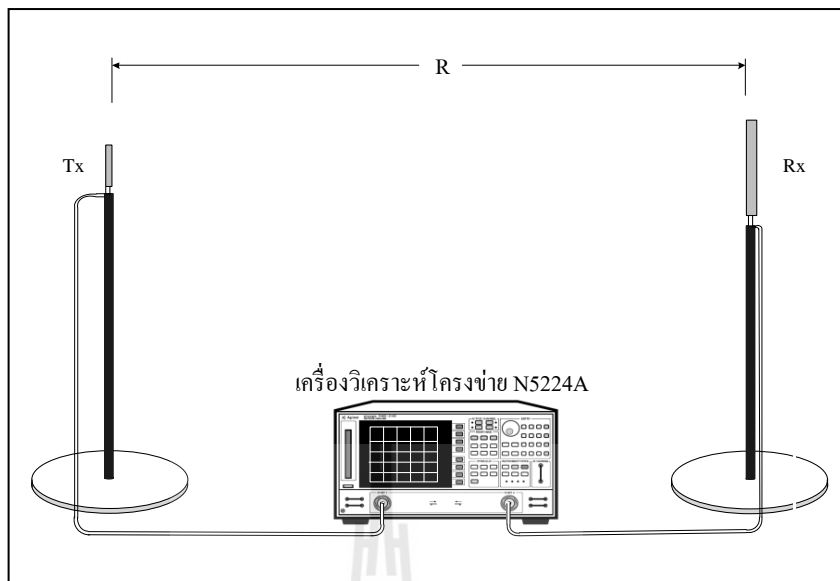
$$G_{r_{dB}} = (-40.23 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (2.985 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (3)}{3 \times 10^8 / 1.92 \times 10^9} \right) - 1.28 - 3.4 = 9.755 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.045 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-40.40 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (3.095 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (3)}{3 \times 10^8 / 2.045 \times 10^9} \right) - 1.28 - 3.4 = 10.015 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.17 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-41.10 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (3.115 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (3)}{3 \times 10^8 / 2.17 \times 10^9} \right) - 1.28 - 3.4 = 9.815 \text{ dB}$$



รูปที่ 5.26แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่อนต้นแบบ(Type C)

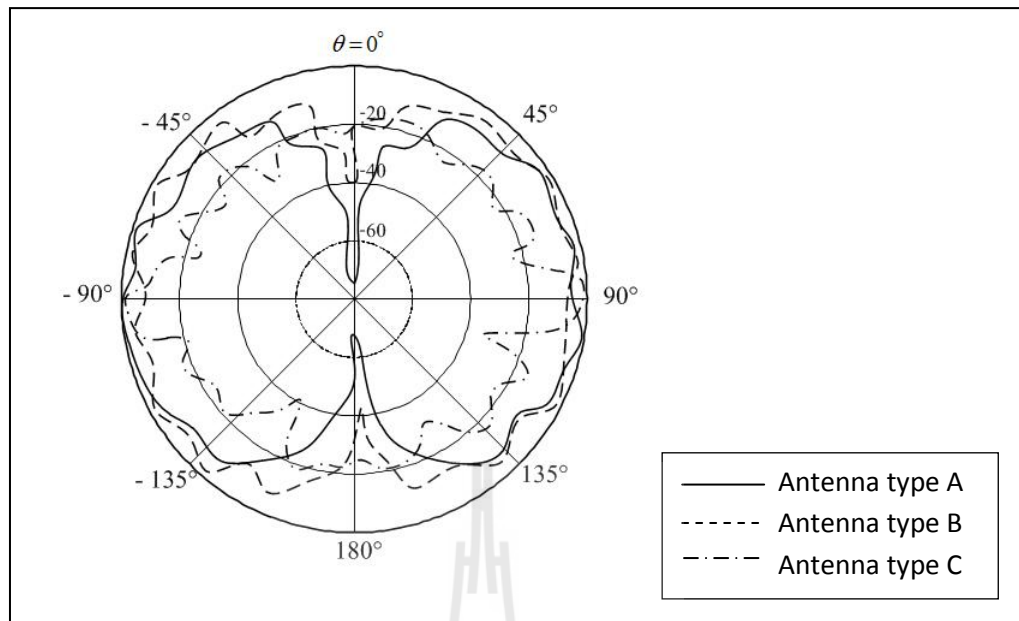
#### 5.4 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลองผล

ตารางที่ 5. 3 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกัน การเปรียบเทียบผลวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบร่อนตัวเดียว (Type A), สายอากาศแบบร่อนตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ (Type B) และสายอากาศแถวลำดับแบบร่อน (Type C) แสดงดังรูปที่ 5.27

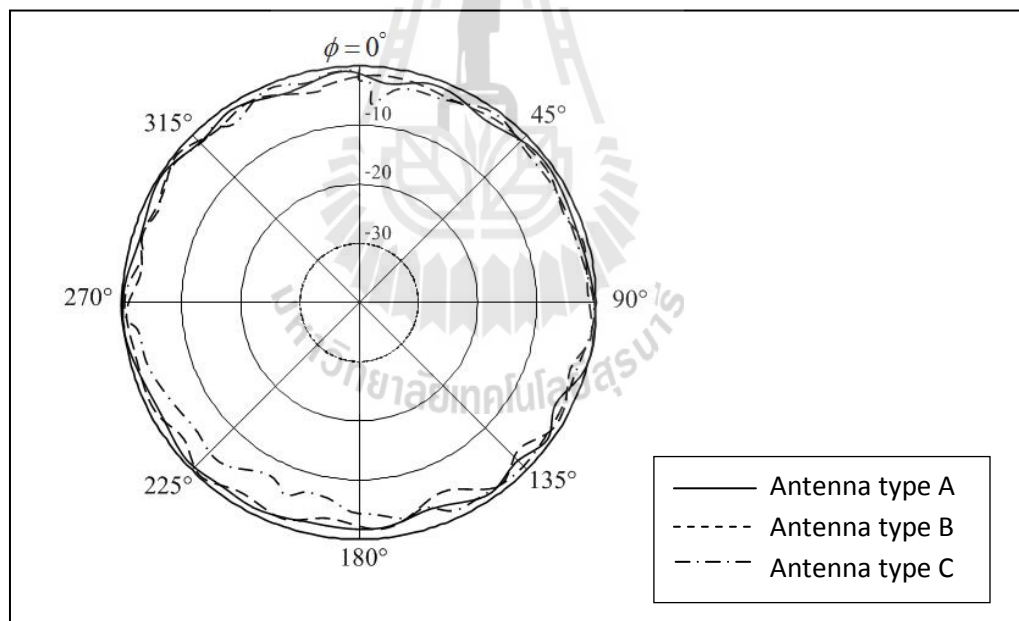
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

พารามิเตอร์	สายอากาศ Type A		สายอากาศ Type B		สายอากาศ Type C	
	ผลการจำลอง	ผลจากวัดทดสอบ	ผลการจำลอง	ผลจากวัดทดสอบ	ผลการจำลอง	ผลจากวัดทดสอบ
$S_{11}$ (dB)	-24.25	-30.862	-44.72	-26.359	-22.98	-18.026
อัตราขยาย (dB)						
$f = 1.92$ GHz	3.071	2.985	3.288	3.205	9.892	9.755
$f = 2.045$ GHz	3.118	3.095	3.360	3.315	10.03	10.015
$f = 2.17$ GHz	3.155	3.115	3.408	3.385	9.961	9.815
E-plane SLL	-	-	-	-	-12.6	-11.4
H-plane SLL	-	-	-	-	-	-

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายที่ได้จากการวัดทดสอบของสายอากาศทั้งสามแบบมีค่าน้อยกว่าผลการจำลองเพียงเล็กน้อย และจะเห็นว่าสายอากาศแบบ Type A และ Type B นั้นไม่มีโพลข้างเกิดขึ้นในระนาบสนามไฟฟ้าเลยแต่เมื่อนำมาจัดแถวลำดับเป็นสายอากาศแบบ Type C จะทำให้เกิดโพลข้างขึ้นมาซึ่งเป็นเรื่องปกติของสายอากาศแถวลำดับ จากผลการทดลองจะพบว่า มีระดับโพลข้างมากกว่าผลการจำลองเล็กน้อยซึ่งอาจมีผลมาจากความแม่นยำในการสร้างสายอากาศ และเนื่องจากสายอากาศทั้งสามแบบให้แบบรูปการแผ่กำลังค่อนข้างคล้ายกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวจึงทำให้ไม่มีโพลข้างในระนาบสนามแม่เหล็ก



(ก) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบผลวัดทดสอบของสายอากาศแบบร่อนดินแบบ(type A), สายอากาศแบบร่อนดินแบบ(type B), สายอากาศแบบร่อนดินแบบ(type C)

## 5.5 เปรียบเทียบสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นมากับสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ที่มีขายทั่วไปแสดงดังรูปที่ 5.2 8 และจากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบมีขนาดความสูงที่สั้นกว่าแต่สามารถให้อัตราขยาย และยังให้แบบรูปการแผ่กำลังค่อนข้างคล้ายกับรอบทิศทางในระนาบเดียวที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ได้

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์

พารามิเตอร์	สายอากาศแถวลำดับแบบร่องต้นแบบ	สายอากาศชนิดที่ 1*	สายอากาศชนิดที่ 2**
ช่วงความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	1.4–3.5	1.92 - 2.17	1.71 - 2.17
อัตราขยาย (dB)	10.015	8	10
ขนาด (มิลลิเมตร) ความสูง×เส้นผ่านศูนย์กลาง	465×39	800×36	1000×20
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	0.15	0.6	0.52

\*Guangdong Kenbotong Technology Co., Ltd.

\*\*Shenzhen Ameison Communication Equipment Co., Ltd.



(ก) สายอากาศชนิดที่ 1 (Guangdong Kenbotong Technology Co., Ltd.)



(ข) สายอากาศชนิดที่ 2 (Shenzhen Ameyson Communication Equipment Co., Ltd.)

รูปที่ 5.28 สายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์



## 5.6 สรุป

ในบทนี้แสดงการสร้างและการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศแบบร่อง  
ต้นแบบ สายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบ และสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง เพื่อ  
พิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบ และการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave  
Studio 2009 ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการวัด  
ทดสอบได้แก่  $S_{11}$  แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศในสนามระยะไกล ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า  
ระนาบสนามแม่เหล็กและอัตราขยาย พบว่าค่า  $S_{11}$  และแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศต้นแบบ  
ในสนามระยะไกลรวมถึงอัตราขยาย ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST และผลการ  
วัดทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับผลบางส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากความแม่นยำ  
ในการสร้างสายอากาศตลอดจนผลที่เกิดจากการวัดทดสอบในสภาพจริง



## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้าง สายอากาศ ต้นแบบของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้สายอากาศแบบร่องที่มีปีกสแลบ ที่มีแบบรูปการแผ่กำลังค่อนข้างใกล้เคียงกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว โดยใช้วิธีการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแบบแถวลำดับแบบร่องดังกล่าวเพื่อให้เหมาะ สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์ ช่วงความถี่ 3 G (1.92 - 2.17 GHz) ที่เป็นไปตามมาตรฐาน UMTS โดยเริ่มจากศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม เพียงตัวเดียวก่อน (Type A) ต่อมาได้นำสายอากาศแบบร่องตัวเดียวมาเพิ่มปีกสแลบ (Type B) พบว่ามีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 0.242 dB และยังคงให้แบบรูปการแผ่กำลังค่อนข้างคล้ายกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศแบบร่อง โดยการนำสายอากาศแบบร่องตัวเดียวที่เพิ่มปีกสแลบแล้วมาจัดแถวลำดับแบบเส้นตรงแนวตั้งจำนวน 4 อิลิเมนต์ (Type C) พบว่าสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง Type C มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 7 dB สุดท้ายได้สร้างสายอากาศทั้งสามแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบ ด้วยผลการทดลองวัดคุณลักษณะของสายอากาศโดยใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการซึ่งผลที่ได้จากการวัดทดสอบของสายอากาศมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป แต่ผลจากการวัดทดสอบอาจจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างการวัดทดสอบและการจำลองผลคือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ความแม่นยำในการกัดลายแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นต้น

#### 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปของวิทยานิพนธ์ นี้ พบว่าในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่มีปีกสแลบสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้ และยังคงให้แบบรูปการแผ่กำลังค่อนข้างคล้ายกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว สามารถปรับไปใช้งานตามความถี่ที่ต้องการได้ด้วยการปรับพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบร่องในการจัดแถวลำดับสามารถเพิ่มอัตราขยายได้ด้วยการเพิ่ม

จำนวนอิลิเมนต์ของสายอากาศ และลดระดับโวลทิจของสายอากาศ จากคุณสมบัติข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ที่มีความเหมาะสมได้ ซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกขึ้นอยู่กับความสนใจและการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่ สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องของการประยุกต์สายอากาศแบบร่อง ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับสถานีฐานระบบเซลลูลาร์



## รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สวรรค์ และ ชวงศ์ พงเจริญพานิชย์. (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของ สายอากาศ.**  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รังสรรค์ วงศ์สวรรค์, **วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3),** ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- I-Fong Chen, Chia-Mei Peng, Sheng-Chieh Liang, **“Single Layer Printed Monopole Antenna for Dual ISM-Band Operation,”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 53(2): 1270-1273, 2005.
- James, J.D., and Hall, P.S. **Handbook of Microstrip Antenna,** Vol.1. London, 1989.
- AliakbarDastranj and HabibollahAbiri, **“Bandwidth Enhancement of Printed E-Shaped Slot Antenna Fed by CPW and Microstrip Line,”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 58, No. 4, April 2010
- Jen-Fen Huang, **“A Simple Model of Designing CPW-Fed Slot Antenna,”** IEEE, 2000.
- Kai Fong Lee and Wei Chen, **“Advance in Microstrip and Printed Antennas,”** A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, INC., 1997.
- Jyh-Ying Chiou, Jia-Yi Sze, and Kin-Lu Wong, **“A Broad-Band CPW-Fed Strip-Loaded Square Slot Antenna,”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 4, April 2003
- Horng-Dean Chen, **“Broad-Band CPW-Fed Square Slot Antenna With a Widened Tuning Stub,”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 8, August 2003
- SarawuthChaimool, SithipornKerdsumang, PrayootAkkraekthalin and VechVivek, **“A Broadband CPW-fed Square Slot Antenna Using Loading Metallic Strips and a Widened Tuning Stub,”** IEEE, 2004.
- P.Li, J.Liang and X.Chen, **“CPW-Fed Printed Elliptical Slot Antenna with Fork-Like Tuning Stub,”** *Microwave Conference*, 2005.
- Chien-Jen Wang, and Jin-jei Lee, **“A Pattern-Frequency-Dependent Wide-Band Slot Antenna,”** IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 5, 2003

- J.-Y. Jan, and C.-Y. Hsiang, "**Wideband CPW-fed slot antenna for DCS, PCS, 3G and Bluetooth bands**," Electronics Letters, 2006
- I-Tseng Tang, Ding-Bing Lin, Geng-Hong Liou, Jui-Hong Horng and Chi-Min Li, "**A Compact Slot UWB Antenna with CPW-fed**," IEEE, 2007
- B. Purahong, P. Jearapradikul, T. Archevapanich, N. Anantrasirichai, and O. Sangaroon, "**CPW-Fed Slot Antenna with Inset U-Strip Tuning Stub for Wideband**," International Conference on Control, Automation and Systems, 2008
- J. William, and R. Nakkeeran, "**Development of CPW-fed UWB Printed Slot Antenna**," IEEE, 2010
- TananHongnara, ChatreeMahatthanajatuphat, PrayootAkkaraekthalin., "**Study of CPW-Fed Slot Antennas with Fractal Stubs**," ECTI, pp. 188-191, Conference 2011
- S. Kareemulla, N. Gunavathi, and Dr. S. Raghavan, "**Compact High Gain CPW-fed Slot Antenna for WLAN/WiMAX Applications**," IEEE, 2011
- Shin-Wei Chen, Deng-Yin Wang, and Wen-HuaTu, "**Dual-Band/Tri-Band/Broadband CPW-Fed Stepped-Impedance Slot Dipole Antenna**," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62, No. 1, January 2014
- VivekTiwari, KirtiVyas, and NehaGoyal, "**Gain Enhancement of a CPW-fed Horse Shoe Shaped Slot Antenna with Defected Ground Structures for WiMax/WLAN Applications**," IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineerin, India, 2014
- PichetMoeikham, NipontTangthong, and SomsakAkatimagool, "**CPW-fed Printed Slot Antenna for WLAN/WiMAX and UWB Application**," ISAP, 2014
- NitikarnPasri, ChuwongPhongcharoenparich, and MonaiKrairiksh, "**Analysis of a Circumferential Slot Antenna on a Sectoral Cylindrical Cavity Excited by a Probe using Method of Moments**," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- P. Kumsalee, P. Kamphikul, P. Krachodnok and R. Wongsan, **Omnidirectional High-Gain Wide Slot Antenna Array for Mobile Phone Base Station**, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) ,Nakhonratchasima, Thailand, May 14-17, 2014



# Omnidirectional High-Gain Wide Slot Antenna Array for Mobile Phone Base Station

Peerasan Kumsalee, Paowphattra Kamphikul, Piyaporn Krachodnok, and Rangsan Wongsan  
School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering,  
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand  
mpeerasan.k@gmail.com, D5240395@g.sut.ac.th, priam@sut.ac.th, and rangsan@sut.ac.th

**Abstract**—This paper proposes an omnidirectional high-gain slot array antenna for mobile phone base station. The advantages of this proposed antenna are low profile, light weight, and easy fabrication and installation. Moreover, it provides not only the moderately high gain but also the omnidirectional pattern, which more appropriate for mobile phone base station. The half-power beamwidths in E-plane is around 24 degrees, while its radiation pattern is similar to the circle or omnidirection. The paper also presents the design procedures of a 1x4 array antenna using slot antennas associated with two side-wings for increasing its gain. A Computer Simulation Technology (CST) software has been used to compute the reflection coefficient ( $S_{11}$ ), radiation patterns, and gain of this antenna. The bandwidth, at  $S_{11}$  (-10 dB), is which can be well utilized for 3G base station, with a gain around 9 dB.

**Keywords**—slot antenna; omnidirectional pattern; base station

## I. INTRODUCTION

In many areas of wireless communications are not only required sector antennas but also can be used omnidirectional antennas such as monopole antenna. The monopole antenna [1]-[2], its broadband characteristics and simple construction, is perhaps to most common antenna element for portable equipment such as cellular telephone, cordless telephones, and automobiles. However, if the monopole antenna is designed correctly, it will provide excellent performance. While its significant disadvantages such as: susceptibility to damage, additional manufacturing cost, and potential performance degradation due to the user's interaction with the exposed antenna still be concerned. In this paper the slot antenna has been selected to modify for yielding the omnidirectional pattern for wireless communications due to light weight, low profile with conformability and low cost [3]-[9]. From such advantages, this paper presents a broadside array of a 1x4 array antenna using slot antennas associated with providing omnidirectional radiation pattern and moderately high gain suitable for mobile base station. The simulated results of the reflection coefficient ( $S_{11}$ ), radiation patterns, and gain of the antenna are conducted with CST software.

Many applications, they are desirable to have the maximum radiation of an array directed normal to axis of

the array broadside;  $\theta_0 = 90^\circ$ . To optimize the design, the maximum of the single element and of the array factor should both be directed toward  $\theta_0 = 90^\circ$ . The requirements of the single element can be accomplished by the judicious choice of the radiator and those of the array factor by the proper separation and excitation of the individual radiators. Thus for a uniform array with  $\beta = 0$  and  $d = n\lambda$ , in addition to have the maxima of the array factor directed broadside ( $\theta_0 = 90^\circ$ ) to the axis of the array [10].

At first, the general approach will be presented which including the configurations of slot antennas as shown in section II. In section III, we apply this approach into the results and discussion. Finally, the conclusions are given in section IV.

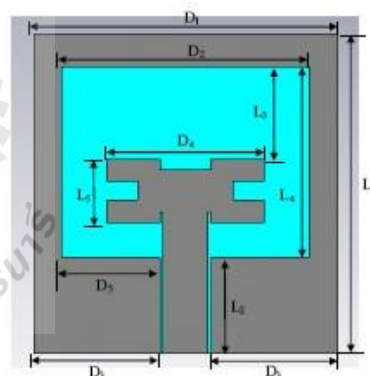


Fig. 1. The configuration of single slot antenna.

## II. SLOT ANTENNAS CONFIGURATIONS

In this paper, we used an antenna prototype in [11] as shown in Fig.1 for developing to be array. This prototype antenna was designed for working in the Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) band of 2.1 GHz frequency. Such antenna was printed on FR4 substrate ( $\epsilon_r = 4.5$ ,  $\tan\delta = 0.02$ ) with the size of 50 mm x 48 mm and



the thickness of 1.6 mm. The coplanar waveguide fed line was designed to provide 50 Ohm connected to SMA connector and the distance gap of 6 mm and 0.48 mm, respectively. The dimensions of this antenna are shown in Table I. The simulated results in [11] show the radiation patterns of single slot antenna at 2.1 GHz yielded the gain of 3.3 dB and provided the radiation pattern (at frequency band 1.92-2.17 GHz) in H-plane similar to omnidirection as shown in Fig.8, 9, and 10, although some directions have lower radiation. This is the main reason that we brought this antenna model to be the elements of our array.

TABLE I THE DIMENSIONS OF SLOT ANTENNA.

Parameters	Sizes	Parameters	Sizes
D <sub>1</sub>	48 mm	L <sub>1</sub>	50 mm
D <sub>2</sub>	43 mm	L <sub>2</sub>	12 mm
D <sub>3</sub>	7.42 mm	L <sub>3</sub>	7.72 mm
D <sub>4</sub>	15 mm	L <sub>4</sub>	30 mm
D <sub>5</sub>	15.84 mm	L <sub>5</sub>	10 mm
D <sub>TS</sub>	6 mm	h	1.6 mm
W	5 mm	L	50 mm
A	8 mm	B	4.5 mm
C <sub>1</sub>	3.5 mm	C <sub>2</sub>	3 mm
C <sub>3</sub>	1.7 mm		

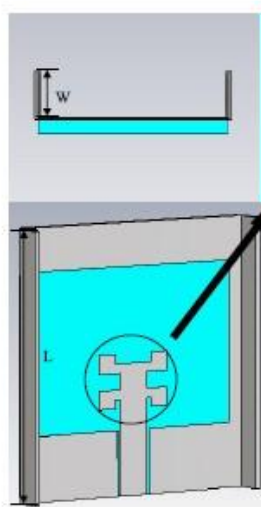


Fig.2. The single slot antenna with two side-wings.

### III. RESULTS AND DISCUSSION

To improve gain and radiation pattern characteristics, at first, a wide slot antenna will be added with two small wings made from metal, which are located on the left and right sides of antenna as shown in Fig.2. The proper dimension for each wing is optimized at  $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ . The design of main slot antenna is based on the conventional transmission line model at the operating frequency at 2.1 GHz [11]. The simulated results of a slot antenna with two side-wings show its gain is around 4 dB and still provide the radiation pattern in H-plane similar to the circle as shown in Figure as shown in Fig.8, 9, and 10.

Finally, to enhance the gain characteristic, four wide slot antennas with two side-wings have been arrayed with element spacing of  $0.52\lambda$  as shown in Fig.3. The simulated results of the array of  $1 \times 4$  slot antennas with two side-wings show the gain around 9 dB and still provide the radiation pattern in H-plane similar to the circle as well, as shown in Fig.8, 9, and 10. Furthermore, the values of  $S_{11}$  (-10 dB) of three types of antennas are compared each other in Fig.4. We found that the frequency bandwidth of the proposed antenna array still cover the required frequency from 1.92-2.17 GHz, which are enough for utilizing for 3G mobile phone base station.

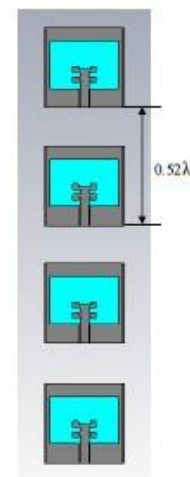


Fig.3. A  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

The fabricated prototype is shown in Fig.5. All the measurements have been performed in shielded anechoic chamber, using a Hewlett Packard Network Analyzer (HP8772D) vector network analyzer. The  $S_{11}$  (-10 dB) of a  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings are enough which can be well utilized for 3G base station as shown in Fig.6. It has been observed that the antenna resonates

at 2.1 GHz; at this frequency, the measured magnitude of the reflection parameter is -13.432 dB.

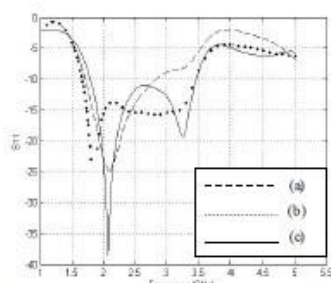


Fig.4. The  $S_{11}$  of (a) a single slot antenna, (b) a single slot antenna with two side-wings, and (c) a  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

Fig.7 shows the radiation patterns at 2.1 GHz of  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings. From this radiation patterns in the H-plane, we found that the radiation patterns are similar to the circle or omnidirection. The measured gains of a single slot antenna with two side-wings and a  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings are 3.9 dB and 8.39 dB, respectively.



Fig.5. The fabricated prototype of  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

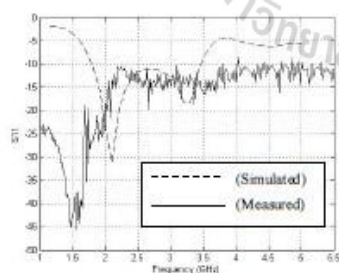


Fig.6. Measured and simulated  $S_{11}$  of  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

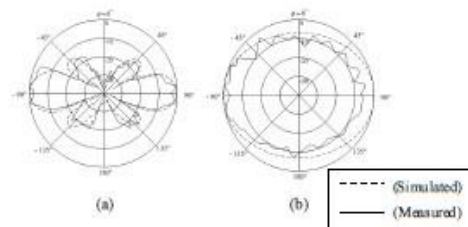


Fig.7. Measured and simulated radiation patterns at 2.1 GHz in (a) E-plane and (b) H-plane.

#### IV. CONCLUSION

This paper presented the omnidirectional high-gain slot array antenna for 3G mobile phone base station. The slot antenna invested with the initial gain 3.3 dB from single slot antenna and has been modified by adding two side-wings on the left and right sides of slot antenna. After that four slot antennas has been arrayed to be the broadside radiation of  $1 \times 4$  elements with such side-wings for increasing gain from 3.3 dB to be around 9 dB, approximately and provide the omnidirectional pattern which is appropriated for the mobile phone base station.

#### ACKNOWLEDGMENT

This research work was supported by the Research Department Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

#### REFERENCES

- [1] Kin-Lu Wong, Gwo-Yan Lee, Tzang-Wern Chiou, "A Low-Profile Planar Monopole Antenna for Multiband Operation of Mobile Handsets," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.51, No 1, pp. 121-125, January 2003.
- [2] Chen, I. F., Peng, C. M. and Liang, S. C., "Single Layer Printed Monopole Antenna for Dual ISM-Band Operation," IEEE Trans. Antennas Propagat. 53(2), pp. 1270-1273, 2005.
- [3] Marek Kitzireki, Tomasz Borodo, "Single Layer Printed Monopole Antenna for Dual ISM-Band Operation," Gdańsk University of Technology, Gdańsk, 2006.
- [4] Jen-Fen Huang, "A Simple Model of Designing CPW-Fed Slot Antenna," IEEE, pp. 577-580, 2000.
- [5] Chen, I. F., Peng, C. M. and Liang, S. C., "Broadband cross-shaped microstrip-fed slot antenna," Electron. Lett. Vol.36, No 25, pp. 2056-2057, 7 December 2000.
- [6] Jyh-Ying Chiou, Jia-Yi Sze, Kin-Lu Wong., "A Broad-Band CPW-Fed Strip-Loaded Square Slot Antenna," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.51, No 4, pp. 719-721, April 2003.
- [7] Horng-Dean Chen, "Broadband CPW-Fed Square Slot Antennas With a Widened Tuning Stub," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.51, No 8, pp. 1982-1986, 8 August 2003.
- [8] Chien-Jen Wang, Jin-Jei Lee, "A Pattern-Frequency-Dependent Wide-Band Slot Antenna," IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett., No 8, pp. 65-68, 2006.

- [9] Aliakbar Dastranj, Habibollah Abiri, "Bandwidth Enhancement of Printed E-Shaped Slot Antennas Fed by CPW and Microstrip Line," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.58, No 4, pp. 1402-1407, April 2010.
- [10] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, 3rd Edition.
- [11] Tanan Hongnara, Chatree Mahathanyajathat, Prayoot Akkarakethalin, "Study of CPW-Fed Slot Antennas with Fractal Stubs," ECTI, pp. 188-191, Conference 2011.

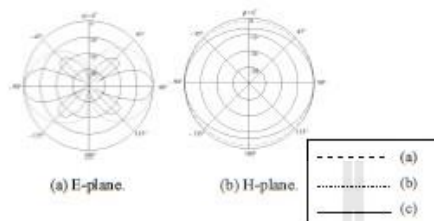


Fig.8. The radiation patterns at 1.92 GHz of (a) a single slot antenna, (b) a single slot antenna with two side-wings, and (c) a  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

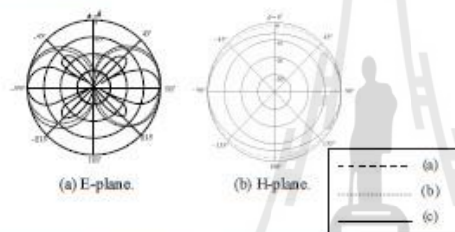


Fig.9. The radiation patterns at 2.1 GHz of (a) a single slot antenna, (b) a single slot antenna with two side-wings, and (c) a  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

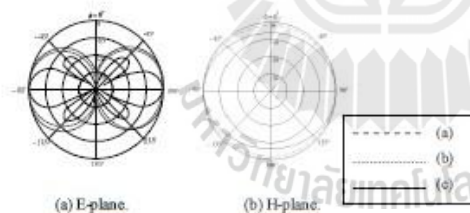


Fig.10. The radiation patterns at 2.17 GHz of (a) a single slot antenna, (b) a single slot antenna with two side-wings, and (c) a  $1 \times 4$  array of slot antennas with two side-wings.

## ประวัติผู้เขียน

นายพีรสิทธิ์ คำสาดี เกิดเมื่อวันที่ 11 เมษายน 2534 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษา  
ระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับ  
บัณฑิตศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2555 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
โดยขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับ  
นานาชาติจำนวน 1 ฉบับ ดังนี้

International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,  
Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) ในหัวข้อ “Omnidirectional  
high-gain wide slot antenna array for mobile phone base station”, NakhonRatchasima, Thailand,  
May 14-17, 2014, ISBN: 978-1-4799-2993-1

