



การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่าง  
ทางเรขาคณิตอย่างง่าย

โดย

นายอรรถสิทธิ์ โทธา

รหัสประจำตัว B4910237

นางสาวหุติพันธ์ วงศ์รักษ์

รหัสประจำตัว B4901563

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม

และวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม


หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545

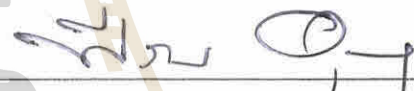
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


ประจำภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2552

การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน  
สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างเรขาคณิตอย่างง่าย

คณะกรรมการสอบโครงการ

  
\_\_\_\_\_  
(อาจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจอกคนอก)  
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

  
\_\_\_\_\_  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล)  
กรรมการ

  
\_\_\_\_\_  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร.อ. ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรม  
โทรคมนาคม และวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2552

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือในด้านวิชาการโดยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆจากอาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร.ปิยาภรณ์ กระจงคนอก รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามผลงาน ชี้แนะข้อบกพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้าม ตลอดจนช่วยตรวจทานและแก้ไขโครงการเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆดังนี้

- พี่นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์

- เพื่อนนักศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคน ได้รับความช่วยเหลือที่ดีทุกด้านตลอดจน

กำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

ท้ายนี้คุณความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และพี่ๆ ของข้าพเจ้า ผู้ที่คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

นายอรรถสิทธิ์ โปธา

นางสาวชุตินันท์ วงศ์รักษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการ	การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย
จัดทำโดย	นายอรรถสิทธิ์ โปธา นางสาวชุตินันท์ วงศ์รักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ดร. ปิยาภรณ์ กระจงคนนอก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	2/ 2552

---

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ( Reflectarray Antenna ) สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย โดยสายอากาศจะถูกติดตั้งบริเวณเพดานห้องขนาดใหญ่ สำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ที่ย่านความถี่ 5.8 GHz จึงทำให้มีการแผ่กระจายกำลังงานไปยังบริเวณที่มีผู้ใช้บริการเท่านั้น โดยแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ใช้ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริปจะมีรูปร่างเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมแนวตั้งและสี่เหลี่ยมแนวนอน



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ณ
สารบัญตาราง	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลคาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 บทนำ	4
2.2 พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง	4
- การสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง	4
- ระเบียบวิธีวิเคราะห์สำหรับการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงาน	7
- ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบสายอากาศงานสะท้อน	9
- ระบบพิกัดจุดสังเกต	14
- การคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศ	16
2.3 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	17
2.4 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโคร- สตริป	20
- การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน	20
- การปรับความยาวของสตัป	21
- การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 สนามตกกระแทบ และสนามสะท้อน	22
2.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแถวลำดับสะท้อนอนันต์	24
- สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการสะท้อนจากแผ่น ไดอิเล็กทริกกราวด์	25
- สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการกระแสะเหนี่ยวนำบนแผ่นสะท้อนไมโคร- สตริป	26
- สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวม	29
2.7สรุป	30
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการสังเคราะห์</b>	
3.1 บทนำ	31
3.2 การกำหนดพื้นที่ครอบคลุม	31
3.3 สายอากาศป้อนวิวอลติ	33
3.4 การหาค่าลิ่งโคไซน์ของวิวอลติ	37
3.5 สายอากาศสะท้อนเดี่ยวค้ำรูปอ้างอิง	39
3.6 การประวิงเฟส	41
3.7 คุณสมบัติของแผ่นสะท้อน	43
3.8 ขนาดของแพทช์	44
- ขนาดแพทช์สายอากาศงานสะท้อนแบบจัดรูปลำดับชั้นรูปวงกลม	45
- ขนาดแพทช์สายอากาศงานสะท้อนแบบจัดรูปลำดับชั้นรูปสี่เหลี่ยม	52
3.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโคร- สตริป	66
- แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับชั้น รูปวงกลม	66
- แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับชั้น รูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง	67

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
- แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน	68
สรุป	69
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	
4.1 บทนำ	70
4.2 การสร้างสายอากาศป้อนวิวอลติ	70
4.3 การสร้างสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้งต้นแบบ	71
- ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน	73
4.4 สรุป	76
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b>	
5.1 สรุป	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
ประวัติผู้เขียน	79
บรรณานุกรม	80

## สารบัญญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป	2
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนของกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิวงานสะท้อน	5
รูปที่ 2.2	เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีการทัศนศาสตร์กายภาพ	7
รูปที่ 2.3	ระบบสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวจัดรูปแบบไม่สมมาตร	12
รูปที่ 2.4	ระบบพิกัดของงานสะท้อนสัมพันธ์กับจุดสังเกต	14
รูปที่ 2.5	การกำหนดอัตราขยายของระบบสายอากาศตามระบบพิกัด (U,V)	15
รูปที่ 2.6	การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกและสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป	18
รูปที่ 2.7	การประวิงเฟสในสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป	19
รูปที่ 2.8	การประวิงเฟสเนื่องจากการเลื่อนตัวป้อนสัญญาณและหน้าคลื่น	20
รูปที่ 2.9	การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน	21
รูปที่ 2.10	การปรับความยาวสลับ	21
รูปที่ 2.11	การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน	22
รูปที่ 2.12	แผ่นสะท้อนไมโครสตริป	22
รูปที่ 2.13	Grating lobe diagram แบบ Broadside scan position	27
รูปที่ 2.14	Grating lobe diagram แบบ Scan position	28
รูปที่ 3.1	พื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลม	32
รูปที่ 3.2	พื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง	32
รูปที่ 3.3	พื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน	33
รูปที่ 3.4	สายอากาศป้อนวิวอลดิ	34
รูปที่ 3.5	สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น (S11) ของสายอากาศป้อนวิวอลดิ	35
รูปที่ 3.6	ค่า VSWR ของสายอากาศป้อนวิวอลดิ	35
รูปที่ 3.7	แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศป้อนวิวอลดิ	36

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.8	แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศป้อนวิวลติ	36
รูปที่ 3.9	แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศป้อนวิวลติ	37
รูปที่ 3.10	กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวิวลติในระนาบสนามไฟฟ้า	38
รูปที่ 3.11	กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวิวลติในระนาบสนามแม่เหล็ก	38
รูปที่ 3.12	สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมรูปวงกลม	40
รูปที่ 3.13	สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง	40
รูปที่ 3.14	สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน	41
รูปที่ 3.15	การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปวงกลม	42
รูปที่ 3.16	การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง	42
รูปที่ 3.17	การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน	43
รูปที่ 3.18	การกำหนดพารามิเตอร์	43
รูปที่ 3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสขอสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อน ณ ความถี่ 5.8 GHz	44
รูปที่ 3.20	แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันรวมของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัตุรูปลาคี่รูปวงกลม	66
รูปที่ 3.21	แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัตุรูปลาคี่รูปวงกลม	67
รูปที่ 3.22	แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันรวมของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัตุรูปลาคี่รูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง	67
รูปที่ 3.23	แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัตุรูปลาคี่รูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง	68



## สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.24	แบบรูปการแผ่นกำลังงานในแนวโพลาริเซชันรวมของสายอากาศแกลวลำดับ สะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน	68
รูปที่ 3.25	แบบรูปการแผ่นกำลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศแกลวลำดับ สะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน	69
รูปที่ 4.1	สายอากาศป้อนวิวอลติ	70
รูปที่ 4.2	รูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูป สี่เหลี่ยมแนวตั้ง	72
รูปที่ 4.3	สายอากาศแกลวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้งต้นแบบ	72
รูปที่ 4.4	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลำคลื่นดินสอด	73
รูปที่ 4.5	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นดินสอด ในระนาบสนามไฟฟ้า	74
รูปที่ 4.6	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นดินสอด ในระนาบสนามแม่เหล็ก	74
รูปที่ 4.7	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลำคลื่นวงรอบ	75
รูปที่ 4.8	อุปกรณ์สำหรับวัดตามพิกัด X-Y	75
รูปที่ 4.9	แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นวงรอบ	76



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศป้อนวิวลติ	34
ตารางที่ 3.2 ขนาดแพทช์ของสายอากาศงานสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลม	45
ตารางที่ 3.3 ขนาดแพทช์ของสายอากาศงานสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม แนวตั้ง	52
ตารางที่ 3.4 ขนาดแพทช์ของสายอากาศงานสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม แนวนอน	59
ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของสายอากาศป้อนวิวลติ	71



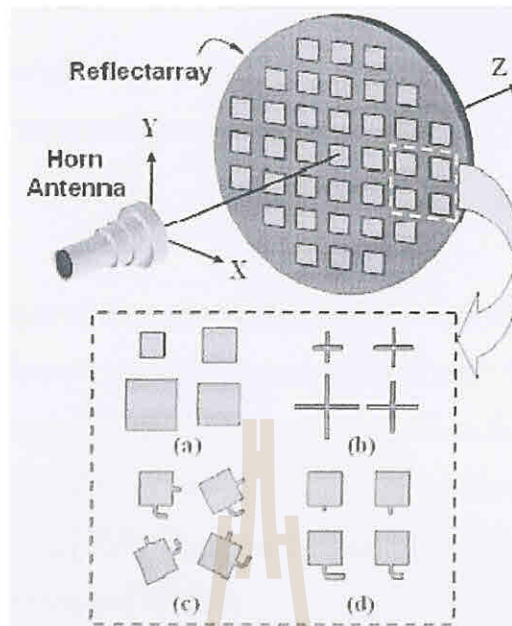
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารนั้นมีความสำคัญต่อชีวิตมนุษย์เป็นอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายรูปแบบต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม ระบบอินเทอร์เน็ต และระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ต่างๆ เป็นต้น ดังนั้น การพัฒนาและออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายจึงมีความจำเป็น โดยทำให้สัญญาณรับและส่งมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นการเลือกชนิดของสายอากาศที่ต้องการมาทำการสร้างนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation pattern) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ซึ่งสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานมากในการสื่อสารแบบไร้สายนี้

เหตุผลและความสำคัญของการทำโครงงานนี้เนื่องจากสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด สร้างได้ง่าย ราคาถูก น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย และเคลื่อนย้ายสะดวก สายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อทดแทนสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาโบลิก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบวงกลม เมื่อนำสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปนี้มาใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย โดยติดตั้งบริเวณเพดานห้อง จะสามารถกำหนดการแผ่กระจายพลังงานเป็นรูปวงกลมได้เช่นกัน แต่ในปัจจุบันได้มีการออกแบบห้องขนาดใหญ่ที่มีรูปร่างทันสมัยและสวยงาม จึงทำให้มีคลื่นบางส่วนไม่ครอบคลุมบริเวณที่ใช้งาน และคลื่นบางส่วนอาจจะเป็นบริเวณที่ใช้งานจริง ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย สามารถกำหนดการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นรูปแบบต่างๆตามลักษณะห้องได้ เช่น แบบวงกลม แบบสี่เหลี่ยม เป็นต้น จึงทำให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการใช้งานได้โดยไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์



รูปที่ 1.1 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป
- 1.2.2 ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมเรขาคณิตอย่างง่ายที่ความถี่ 5.8 GHz เพื่อลดการสูญเสียพลังงานการแผ่กระจายคลื่นที่ไม่ใช้ประโยชน์

## 1.3 ขอบเขตงาน

- 1.3.1 ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป
- 1.3.2 สร้างสายอากาศต้นแบบ
- 1.3.3 วัดและทดสอบสายอากาศ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับการออกแบบและการสร้างสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป
- 1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม CST และ โปรแกรม MATLAB
- 1.4.3 ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปในย่านความถี่ 5.8 GHz

1.4.4 สร้างสายอากาศต้นแบบตามที่ออกแบบ

1.4.5 วัดค่าของสายอากาศต้นแบบและสรุปผลทำรายงาน

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมเรขาคณิตอย่างง่าย เพื่อลดการสูญเสียพลังงานการแผ่กระจายคลื่นที่ไม่ใช้ประโยชน์

1.5.2 สามารถทราบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป

1.5.3 สามารถเข้าใจในทักษะการสร้างและการวัดทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของสายอากาศ

1.5.4 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาในภาคทฤษฎีของวิชาต่างๆที่ได้จากการศึกษามาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ได้จริง





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน (Reflectarray Antenna) สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย โดยสายอากาศจะถูกติดตั้งบริเวณเพดานห้องขนาดใหญ่ สำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ที่มีย่านความถี่ที่ 5.8 GHz จึงทำให้มีการแผ่กระจายกำลังงานไปยังบริเวณที่มีผู้ใช้บริการเท่านั้น โดยแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ใช้ออกแบบสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริปจะมีรูปร่างเป็นวงกลม สีเหลืองแนวตั้ง สีเหลืองแนวอน

ซึ่งขั้นตอนในการทำการออกแบบสายอากาศมีดังนี้

- การสังเคราะห์พื้นผิวสะท้อนอ้างอิงโดยใช้ทัศนศาสตร์กายภาพ (PO) และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ (PTD)
- ทำการคำนวณหาค่าการประวิงเฟส (phase delay)
- ทำการหาเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient Phase) โดยใช้โปรแกรม CST
- ทำการเปรียบเทียบค่าเฟสที่ได้จากการคำนวณและการใช้โปรแกรม CST แล้วนำมาขนาดแพทช์ เพื่อสร้างสายอากาศ
- สร้างชิ้นงาน
- วัดทดสอบสายอากาศเปรียบเทียบผลกับการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST

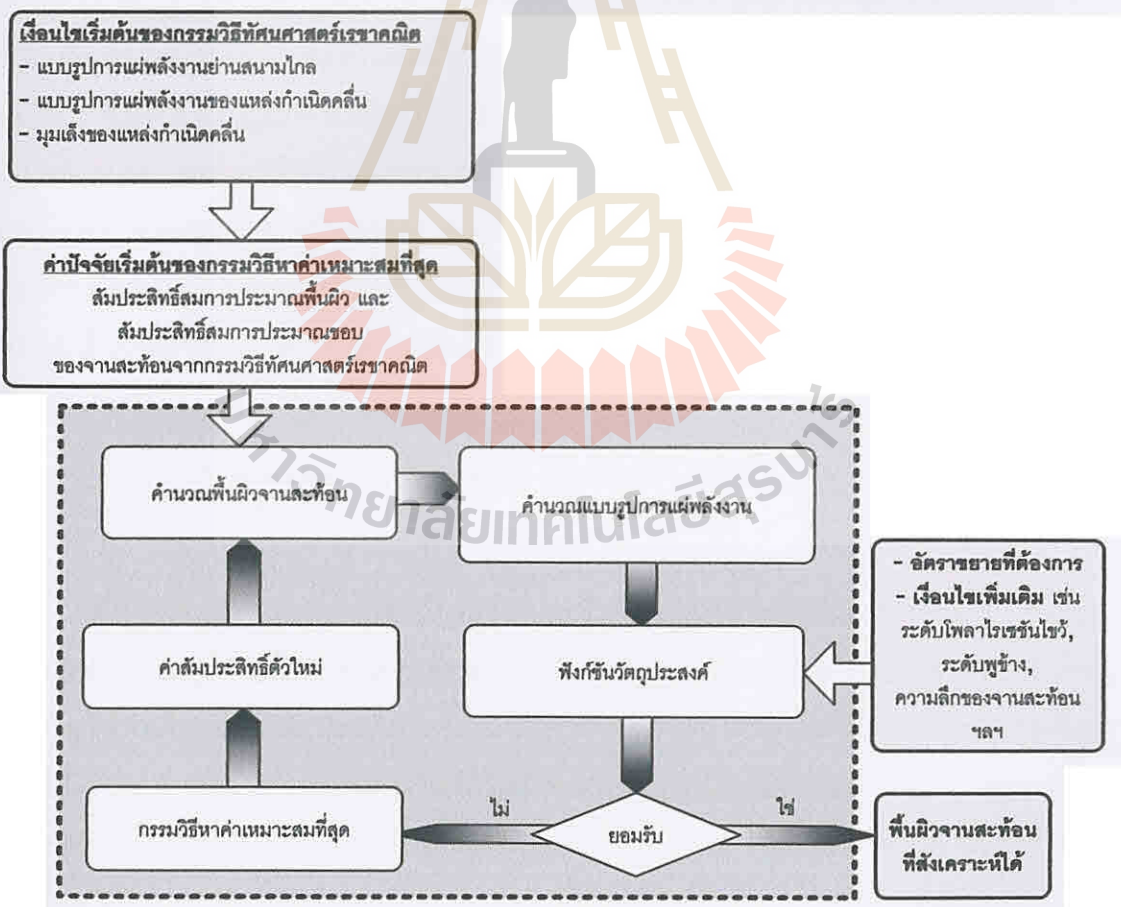
#### 2.2 พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง

##### 2.2.1 การสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง

พื้นผิวของงานสะท้อนที่ต้องการจะเป็นพื้นผิวที่เกิดจากการประมาณรูปร่างพื้นผิวด้วยสมการคณิตศาสตร์ในรูปผลรวมของฟังก์ชันเชิงตั้งฉาก คู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์โดยเลือกใช้สมการพื้นผิวงานสะท้อน PFS [1] ซึ่งอยู่ในรูปสมการพหุนามอันดับสามรวมกับฮาร์มอนิกฟูรีเยร์ดังนี้

$$z(x, y) = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4y + a_5y^2 + a_6y^3 + a_7xy + a_8xy^2 + a_9yx^2 + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_r(x) f_s(y) \quad (2.1)$$

โดยที่  $f_r(x) = 1, \cos(x), \sin(x), \cos(2x), \sin(2x), \dots, \cos(nx), \sin(nx)$  สำหรับ  $r=1, 2, 3, \dots, N_x$   $f_s(y) = 1, \cos(y), \sin(y), \cos(2y), \sin(2y), \cos(ny), \sin(ny)$  สำหรับ  $s=1, 2, 3, \dots, N_y$  ส่วน  $(x, y, z)$  คือตำแหน่งในระบบพิกัดฉากของงานสะท้อน รูปร่างของพื้นผิวงานสะท้อนจึงขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ (2.1) จำนวนพจน์ ( $N_x \times N_y$ ) ในสมการ (2.1) มีผลต่อความสามารถในการสร้าง ลาคัลของพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ Bergman and Hasselmann [2] พบว่าการใช้จำนวนพจน์ฮาร์มอนิกฟูรีเยร์มากเกินไปในสมการพื้นผิวงานสะท้อนจะทำให้เกิดการหวนไหวอย่างมากของพู่ข้างในแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งทำให้เกิดความเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานมากขึ้น และ Brown [3] พบว่าถ้าใช้จำนวนจุดสังเกต ( $N$ ) มากกว่าจำนวนพจน์ฮาร์มอนิกฟูรีเยร์ ( $N_x \times N_y$ ) จะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่สังเคราะห์ได้ถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิวงานสะท้อน



ค่าสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิวงานสะท้อน สามารถหาได้จากกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดดังรูปที่ 2.1 การคำนวณหาค่าตอบเริ่มจากกำหนดค่าปัจจัยของระบบสายอากาศงานสะท้อนได้แก่

1. ความถี่ปฏิบัติการ
2. ลักษณะพื้นที่ครอบคลุม
3. อัตราขยายของระบบสายอากาศ
4. ขนาดของงานสะท้อน
5. ระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อน
6. สายอากาศป้อน

ในการคำนวณหาค่าตอบของกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด นอกจากต้องทราบค่าปัจจัยของระบบสายอากาศงานสะท้อนที่กล่าวไว้แล้วนั้น จำเป็นต้องกำหนดคำตอบครั้งแรกของสมการพื้นผิวงานสะท้อน(2.1) ในที่นี้คือค่าสัมประสิทธิ์พื้นผิวงานสะท้อนเพื่อหาพื้นผิวโดยประมาณสำหรับการคำนวณหาแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศจะใช้ทัศนศาสตร์กายภาพ แล้วนำแบบรูปการแผ่พลังงานที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ต้องการ ซึ่งมีได้ สองรูปแบบได้แก่ แบบลำคลื่นวงรอบ (contoured beam) และลำคลื่นดินสอด (pencil beam) ผลต่างหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงในรูปแบบที่เรียกว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งเป็นค่าผลรวมของผลต่างของอัตราขยายที่คำนวณได้ กับอัตราขยายที่ต้องการที่ตำแหน่งต่างๆของจุดสังเกต ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จึงเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสัมประสิทธิ์สมการพื้นฐานผิวงานสะท้อนที่ตำแหน่งต่างๆที่ซึ่งเขียนได้เป็นนิพจน์ได้ในสมการ(2.2)

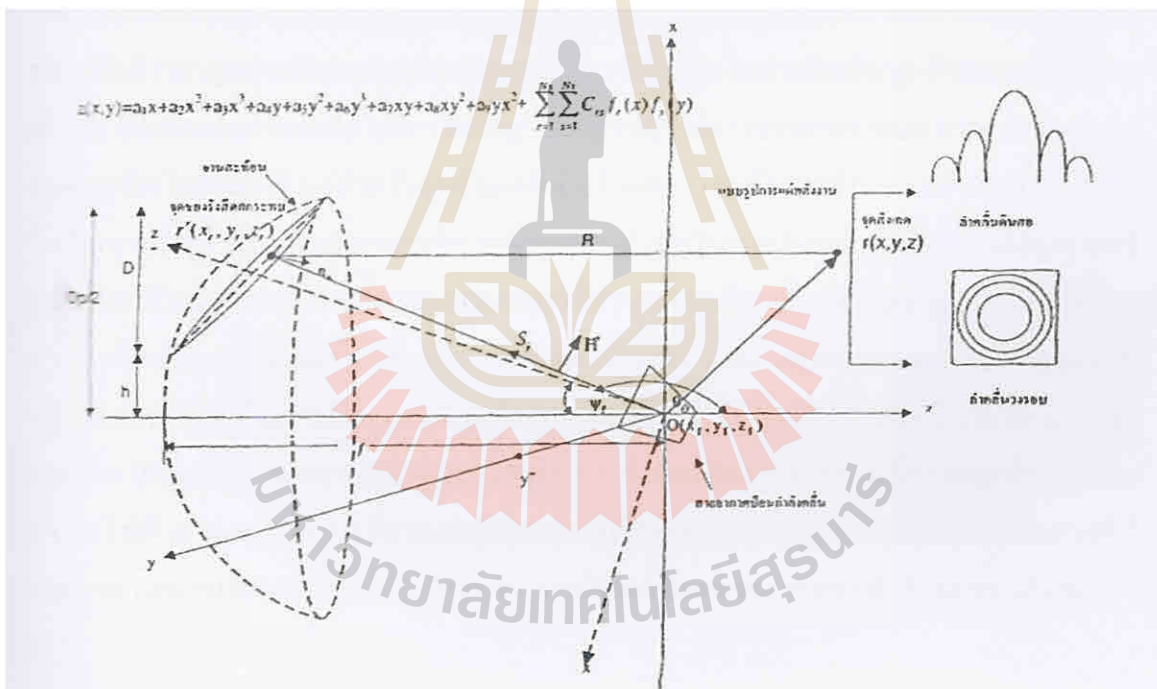
$$F(\text{position, coefficient}) = \sum_{\text{position}} | \text{Gain} - \text{Gain}_{\text{desired}} | \quad (2.2)$$

ถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่าที่ยอมรับได้ ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านั้นก็จะเป็นคำตอบในการประมาณรูปร่างพื้นผิวงานสะท้อน แต่ถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่าที่ยอมรับได้ จะต้องนำค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ไปหาค่าตอบใหม่โดยกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการมากที่สุด เมื่อทำซ้ำแบบนี้จนได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการแล้ว จึงจะนำมาใช้สังเคราะห์รูปร่างพื้นผิวงานสะท้อนได้ลักษณะการปรับตัวของพื้นผิวสะท้อนเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ

### 2.2.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์สำหรับการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงาน

การวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะสมบัติการแผ่พลังงานของสายอากาศงานสะท้อน ทำได้โดยอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์ย่านความถี่สูง ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ทัศนศาสตร์กายภาพ (Physical Optic:PO) สำหรับการสังเคราะห์และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ(Physical Theory of Diffraction:PTD) สำหรับการวิเคราะห์ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายอากาศป้อนกำลัง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาตกกระทบกับพื้นผิวงานสะท้อนซึ่งเป็นพื้นผิวดำนำสมบูรณ์ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสทัศนศาสตร์กายภาพบนพื้นผิวงานสะท้อนซึ่งเป็นพื้นผิวดำนำสมบูรณ์ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสทัศนศาสตร์กายภาพบนพื้นผิวงานสะท้อนที่ตำแหน่ง  $r'$  มีค่าเป็นดังสมการ (2.3)

$$\overline{J_s^{po}} = 2\hat{n} \times \overline{H^i} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.2 เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า โดยระเบียบวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ

เมื่อ  $\hat{n}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากและมีทิศพุ่งออกจากพื้นผิวงานสะท้อน และ  $\overline{H}^i$  คือสนามแม่เหล็กตกกระทบ ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำที่จุดสังเกต  $r$  แสดงดังสมการ (2.4)

$$\overline{E}(\vec{r}) = -j\omega\mu \left( \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right) \int_{S_a} [j_s^{po}(\vec{r}') - (\vec{r}' \cdot j_s^{po})\vec{r}] e^{-jkr' \cdot \vec{r}} ds' \quad (2.4)$$

โดยที่  $k$  คือเลขคลื่น  $S_a$  คือขนาดเงาของพื้นผิวงานสะท้อน  $r'$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของจุดสังเกต ค่าสนามตามสมการ (2.4) สามารถใช้ได้กับตำแหน่งของจุดสังเกตทั้งในย่านสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล

กระแสที่ทัศนศาสตร์กายภาพตามสมการ (2.3) สามารถใช้ในการประมาณกระแสเหนี่ยวนำได้ถูกต้องเพียงบางส่วนเท่านั้นยกเว้นกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของงานสะท้อน เป็นที่ทราบกันดีว่าสนามจากทัศนศาสตร์กายภาพจะให้ความถูกต้องในช่วงลำคลื่นพหุหลักและพหุข้างแรกๆ เท่านั้น ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงอัตราขยายของระบบสายอากาศและลดระดับพหุข้างใกล้ๆ ลงได้ แต่สำหรับจุดสังเกตที่ห่างไกลออกไปหรือการทำนายระดับโพลาไรโซชันไขว้ สนามไฟฟ้าจากการเลี้ยวเบนที่ขอบมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ เนื่องจากทัศนศาสตร์กายภาพได้รวมผลจากการเลี้ยวเบนจากขอบไว้บ้างแล้วระดับหนึ่งแต่ไม่สมบูรณ์ ยังไม่ได้รวมกระแสอีกส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสสมมูลที่ไหลไม่สม่ำเสมอ (nonuniform current) ที่บริเวณขอบ ดังนั้นในการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานจึงจำเป็นต้องนำทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ (Physical Theory of Diffraction, PTD) มาใช้ เพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น สนามไฟฟ้าตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพเป็นผลรวมจากสนามไฟฟ้าตามทัศนศาสตร์กายภาพ และสนามการเลี้ยวเบนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสที่บริเวณขอบดังสมการ (2.5)

$$\overline{E}_{PTD} = \overline{E}_{PO} + \overline{E}_{fringe} \quad (2.5)$$

โดย  $\overline{E}_{PTD}$  คือสนามตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ  
 $\overline{E}_{PO}$  คือสนามตามทัศนศาสตร์กายภาพ  
 $\overline{E}_{fringe}$  คือสนามการเลี้ยวเบนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสบริเวณขอบ



$$\bar{E}_{fringe}(r) = \frac{jkZ_0}{4\pi} \oint [\bar{R} \times \bar{R} \times I^f \hat{e} + Y_0 \bar{R} \times M^f \hat{e}] \frac{e^{-jkR}}{R} dL' \quad (2.5ก)$$

$I^f$  และ  $M^f$  คือกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่ไหลไม่สม่ำเสมอ บริเวณขอบ มีค่าเป็นคังสมการ(2.5ข)  $dL'$  คือความยาวส่วนย่อยตามแนวขอบของจานสะท้อน

$$\begin{aligned} I_f &= -\frac{(\bar{E}' \cdot \hat{e}) 2j \sqrt{2} \sin(\phi'/2)}{Zk \sin^2 \beta' \cos \phi' + \mu} [\sqrt{1-\mu} - \sqrt{2} \cos(\phi'/2)] \\ &\quad - (\bar{H}' \cdot \hat{e}) \frac{2j}{k \sin \beta' \cos \phi' + \mu} [\cot \beta' \cos \phi' + \cot \beta \cos \phi \\ &\quad + \sqrt{2} \sin(\phi'/2)(\mu \cot \beta' - \cot \beta \cot \phi)(1-\mu)^{-1/2}] \\ M_f &= -(\bar{H}' \cdot \hat{e}) \frac{2jZ \sin \phi}{k \sin \beta \sin \beta' \cos \phi + \mu} \left[ 1 - \frac{\sqrt{2} \cos(\phi'/2)}{\sqrt{1-\mu}} \right] \end{aligned} \quad (2.5ข)$$

และ 
$$\mu_1 = \frac{\sin \beta \cos \phi}{\sin \beta'} \quad (2.5ค)$$

$\hat{e}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับจุดเลี้ยวเบน  $(\beta', \phi')$  คือระบบพิกัดที่จุดขอบของรังสีตกกระทบ  $(\beta, \phi)$  คือระบบพิกัดที่จุดขอบรังสีเลี้ยวเบน

### 2.2.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบสายอากาศจานสะท้อน

เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยทัศนศาสตร์กายและโครงสร้างของระบบสายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวคักรูปแบบไม่สามารถดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพฉายจานสะท้อน ( $D$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานเดิมก่อนถูกตัดด้วยระนาบออฟเซต (offset plane, ระนาบ x-z,  $D_p$ ) ระยะโฟกัสของจานสะท้อนเดิมก่อนถูกตัดด้วยระนาบออฟเซต ( $f$ ) ระยะออฟเซต (offset distance,  $h$ ) มุมเง็งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น (feed angle,  $\psi_f$ ) และกำหนดให้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ที่จุด  $O(x_p, y_p, z_f)$  และสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต  $r(x, y, z)$

จากการศึกษาได้ใช้สมการพหุนามอันดับสามรวมฮาร์โมนิกฟูรีเยร์ดังแสดงในสมการ (2.1) เป็นสมการพื้นผิวงานสะท้อน สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลจากการเหนี่ยวนำของกระแสสมมูล บริเวณผิวงานสะท้อน โดยกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวงานสะท้อนคำนวณจากสมการ (2.3) ดังนี้

$$\vec{J} = 2\hat{n} \times \vec{H}^i$$

โดยที่  $\hat{n}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากและมีทิศที่พุ่งออกจากพื้นผิวงานสะท้อน ซึ่งแสดงในพิกัด  $(x, y, z)$  ได้เป็น

$$\hat{n} = \frac{\nabla[z-w(x,y)]}{|\nabla[z-w(x,y)]|} \quad \hat{n} = \frac{\nabla[z-w(x,y)]}{|\nabla[z-w(x,y)]|} \quad (2.6)$$

$$\nabla_x = \left( a + 2a_2x + 3a_3x^2 + a_7y + a_8y^2 + 2a_9xy + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_s(y) \frac{df_r(x)}{dx} \right) \quad (2.6ก)$$

$$\nabla_y = - \left( a_4 + 2a_5y + 3a_6y^2 + a_7x + a_9x^2 + 2a_8xy + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_s(x) \frac{df_r(y)}{dy} \right) \quad (2.6ข)$$

$$\nabla_z = 1 \quad (2.6ค)$$

ดังนั้น

$$\hat{n} = \frac{\nabla_x \bar{a}_x + \nabla_y \bar{a}_y + \nabla_z \bar{a}_z}{\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + 1}} \quad (2.7)$$

และ  $\vec{H}^i$  คือสนามแม่เหล็กจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่ตกกระทบบนพื้นผิวงานสะท้อน โดยคำนวณจาก

$$\vec{H}^i = \frac{-\vec{s}_i \times \vec{E}^f}{z_0} \quad (2.8)$$

$\vec{s}_i$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบ  $\vec{E}^f$  คือสนามไฟฟ้าจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น กำลังคลื่นกำหนดให้วางอยู่ที่จุดโฟกัสของงานสะท้อน  $(x_f = 0, y_f = 0, z_f = 0)$  ดังนั้นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบของระบบพิกัดฉากคือ

$$\vec{s}_i = \frac{x_r \bar{a}_x + y_r \bar{a}_y + z_r \bar{a}_z}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \quad (2.9)$$

และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของจุดสังเกตซึ่งมีทิศจากจุดบนระต้อนไปยังจุดสังเกตใดๆ คือ

$$\hat{s} = \frac{(x-x_r)\bar{a}_x + (y-y_r)\bar{a}_y + (z-z_r)\bar{a}_z}{\sqrt{(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2}} \quad (2.10)$$

จากสามารถการ (2.4) สนามไฟฟ้าจากทัศนศาสตร์กายภาพ คำนวณจากการอินทิเกรตแหล่งกระแสสมมูล โดยเทียบกับพื้นที่ผิวงานระต้อน การอินทิเกรตเทียบกับพื้นที่ผิวงานระต้อนสามารถทำให้สะดวกขึ้นโดยเปลี่ยนเป็นการอินทิเกรตเทียบกับพื้นที่ภาพฉายของงานระต้อน ซึ่งมีพจน์ของจาโคเบียน  $(\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + \nabla_z^2})$  เพิ่มขึ้นมาใช้เป็นตัวแปรการอินทิเกรตดังนี้

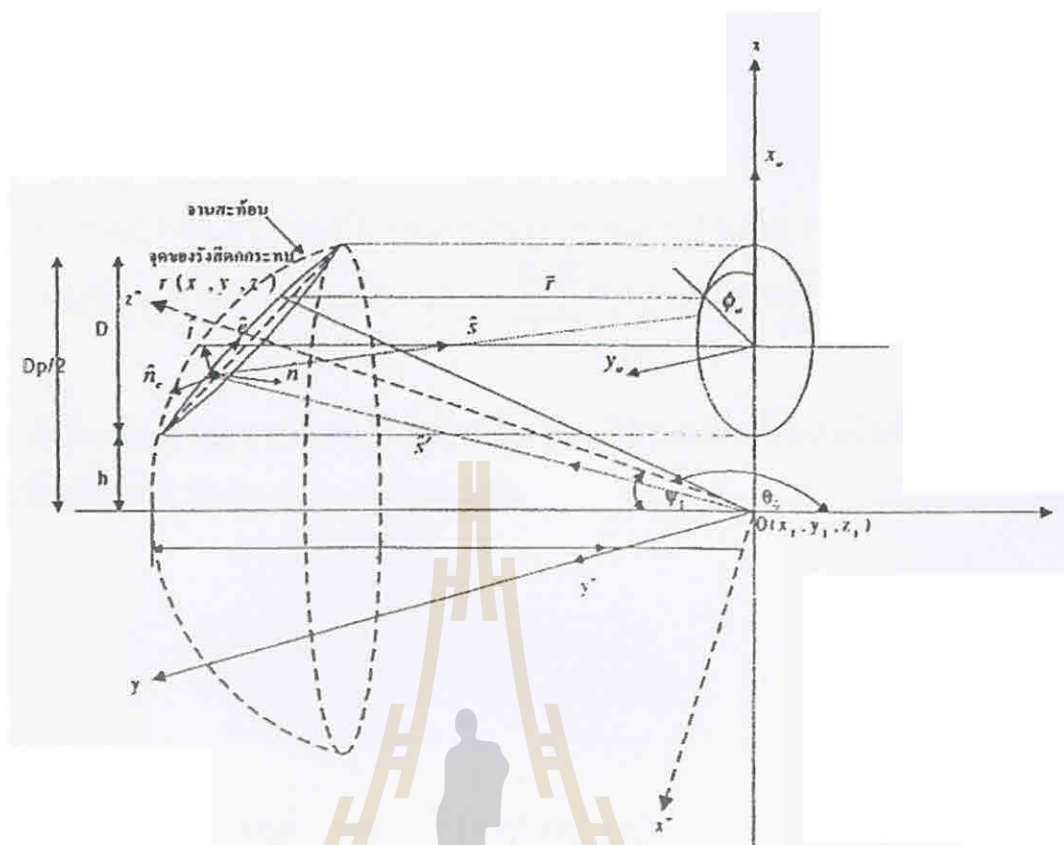
$$\vec{E}(\vec{r}) = -j\omega\mu \left( \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right) \int_{S_a} [J_s^{po}(\vec{r}') - (\hat{r} \cdot J_s^{po}(\vec{r}')) \hat{r}] e^{jkr' r} \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + \nabla_z^2} ds \quad (2.11)$$

โดยที่  $ds$  คือ ขนาดพื้นที่ผิวย่อยของระนาบเงาพื้นที่ผิวงานระต้อน ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าคุณลักษณะของสายอากาศเช่น แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวโพลาริเซชันร่วม อัตราขยายของระบบสายอากาศ ค่าคุณลักษณะเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการออกแบบรูปร่างลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่จับจ้องได้ในรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สนามการเลี้ยวเบนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสบริเวณขอบสายอากาศงานระต้อนจะคำนวณได้โดยสมมติว่าสายอากาศป้อนกำลังคลื่นวางอยู่ที่พิกัด  $(x_p, y_p, z_p)$  ในระบบของงานระต้อน และให้  $Q_D(x_d, y_d, z_d)$  เป็นจุดบนขอบของงานระต้อน และจากรูปที่ 2.2.1 ขอบของงานระต้อนสามารถกำหนดโดยอ้างอิงตัวแปรเสริมโดยสมมติให้ภาพฉายของงานระต้อนเป็นรูปวงกลมดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





รูป 2.3 ระบบสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปแบบไม่สมมาตร

$$x = \frac{D}{2} + h + \frac{D}{2} \cos \phi_a$$

$$y = \frac{D}{2} \sin \phi_a$$

$$z(x, y) = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4y + a_5y^2 + a_6y^3 + a_7xy + a_8xy^2 + a_9yx^2 + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_r(x) f_s(y) \quad (2.12)$$

เวกเตอร์บอกตำแหน่งบนเส้นโค้งของขอบที่จุดขอบเป็น

$$\vec{r} = x\vec{a}_x + y\vec{a}_y + z\vec{a}_z \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.12) พิกัดตำแหน่งบนขอบ  $(x, y, z)$  เป็นฟังก์ชันของมุม  $\phi_a$  ดังนั้นเมื่อหาอนุพันธ์ของแต่ละองค์ประกอบในสมการ (2.13) โดยเทียบกับมุม  $\phi_a$  จะได้

$$\begin{aligned}
 r'_x &= -\frac{D}{2} \sin \phi_a \\
 r'_y &= \frac{D}{2} \cos \phi_a \\
 r'_z &= a_1 r'_x + 2a_2 x r'_x + 3a_3 x^2 r'_x + a_4 y + 2a_5 y r'_y + 3a_6 y^2 r'_y + a_7 (x r'_y + y r'_x) \\
 &+ a_8 (2xy r'_y + y^2 r'_x) + a_9 (2xy r'_x + x^2 r'_y) + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} (f_s(y) f'_r(x) \frac{dx}{d\phi_a} + f_r(x) f'_s(y) \frac{dy}{d\phi_a})
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (2.14) ในสมการ (2.15) จะได้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดเลี้ยวเบน  $Q_d(x_d, y_d, z_d)$  ดังรูป 2.3 เป็น

$$\hat{e} = -\frac{\vec{r}}{|\vec{r}'|} \tag{2.15}$$

$$\hat{t} = \hat{e} \times \hat{n} \tag{2.16}$$

โดยที่  $\vec{r}' = r'_x \vec{a}_x + r'_y \vec{a}_y + r'_z \vec{a}_z$  และ  $|\vec{r}'| = r_x'^2 + r_y'^2 + r_z'^2$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดเลี้ยวเบน  $\hat{e}$  ดังสมการ (2.15) มีทิศทางดังรูป 2.3 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสพื้นผิวงานสะท้อนที่จุดเลี้ยวเบนและมีทิศพุ่งจากจุดเลี้ยวเบนเข้าหาพื้นผิว ( $\hat{t}$ ) สามารถหาได้ดังสมการ (2.16) โดยที่เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวที่จุดเลี้ยวเบน ( $\hat{n}$ ) เป็นดังสมการ (2.7) เพียงแต่แทนพิกัด  $(x, y, z)$  ด้วยพิกัดของขอบงานสะท้อนตามสมการ (2.12) ซึ่งมีทิศดังรูป 2.3 และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบ ( $\hat{s}$ ) และทิศทางของการเลี้ยวเบน ( $\hat{s}'$ ) มีทิศพุ่งออกจากจุดเลี้ยวเบนไปยังจุดสังเกตใดๆ หาได้ตามสมการ (2.9) และ (2.10) โดยการแทนสมการ (2.12) ซึ่งเป็นพิกัดของขอบงานสะท้อน

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับขอบ ( $\hat{b}$ ) คือ

$$\hat{b} = \frac{\vec{r}' \times \vec{r}}{|\vec{r}' \times \vec{r}|} \tag{2.17}$$

ทำให้ได้เวกเตอร์ตั้งฉากกับขอบที่จุดขอบและมีทิศพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางความโค้งเป็น

$$\hat{n}_c = \hat{b} \times \hat{e} \tag{2.18}$$

เมื่อนำสมการ (2.5) มาพิจารณากับระบบพิกัดขอบของงานสะท้อนซึ่งขึ้นกับมุมที่กวาดจากแกน  $x$  ของระบบสายอากาศ  $\phi$  และ  $S$  คือเวกเตอร์ในทิศทางของจุดสังเกต สนามไฟฟ้าเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสบริเวณขอบ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

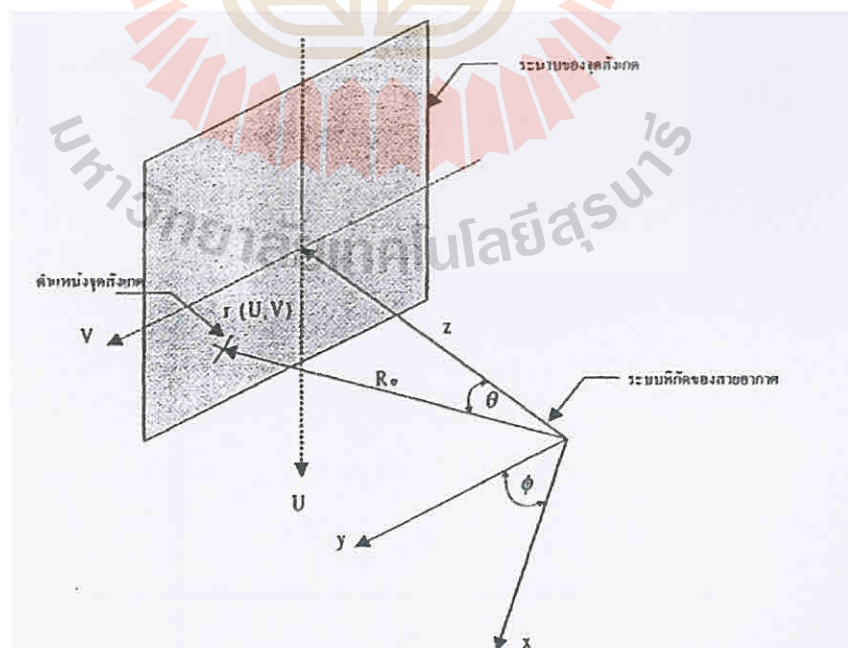
$$\vec{E}_{fringe}(r) = \frac{jkZ_0}{4\pi} \oint [\hat{s} \times \hat{s} \times I^f \hat{e} + Y_0 \hat{s} \times M^f \hat{e}] \frac{e^{-jks}}{S} |d(\vec{r}(\phi))| \quad (2.19)$$

โดยที่  $|d(\vec{r}(\phi))| = |\hat{r}(\phi)| d\phi$

จากสมการ (2.19) และ (2.11) นำไปแทนในสมการ (2.4) จะได้สนามไฟฟ้าตามทฤษฎีเลี้ยวเบนเชิงการขยายภาพ

#### 2.2.4 ระบบพิกัดของจุดสังเกต

ในการทำโครงการงานนี้ ได้กำหนดจุดสังเกตในรูปแบบลาคตินวงรอบ ได้แก่ ระบบพิกัด  $(U, V)$  ซึ่งเป็นระบบพิกัดที่สมมติขึ้น ระบบพิกัด  $(U, V)$  เป็นการมองพิกัดตำแหน่งของจุดสังเกตต่างๆ จากระบบสายอากาศงานสะท้อนโดยตรงซึ่งเป็นระบบพิกัดที่ใช้โดยทั่วไป โดยที่ตำแหน่งของจุดสังเกตไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าละติจูดและลองจิจูดซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้กับจุดสังเกตที่อ้างอิงกับตำแหน่งภูมิศาสตร์บนโลก ระบบพิกัด  $(U, V)$  แสดงดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบพิกัดของงานสะท้อนสัมพันธ์กับจุดสังเกต

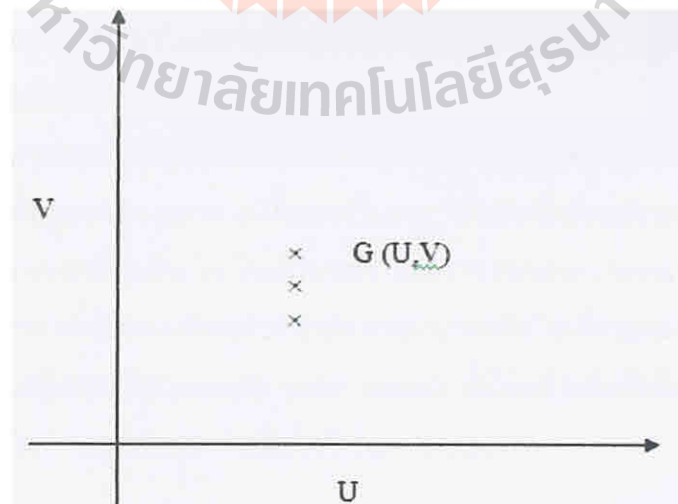
จากรูปที่ 2.4 กำหนดระบบพิกัดของสายอากาศงานสะท้อน  $(x, y, z)$  จุดสังเกต  $r$  อยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของระบบพิกัดสายอากาศงานสะท้อนเป็นระยะทาง  $R_0$  และทำมุม  $\theta$  กับแกน  $z$  ทำมุม  $\phi$  กับแกน  $x$  ดังนั้นระบบ  $(x, y, z)$  สัมพันธ์กับ  $(r, \theta, \phi)$  ดังนี้

$$\begin{aligned}x &= R_0 \sin \theta \cos \phi \\y &= R_0 \sin \theta \sin \phi \\z &= R_0 \cos \theta\end{aligned}\tag{2.20ก}$$

นำ  $R_0$  หาคลอดสมการ (2.6ก) และเนื่องจากแกน  $U$  มีทิศทางเดียวกับแกน  $x$  ของระบบสายอากาศและแกน  $V$  มีทิศทางเดียวกับแกน  $y$  ของระบบสายอากาศจะได้

$$\begin{aligned}U &= \frac{x}{R_0} = \sin \theta \cos \phi \\V &= \frac{y}{R_0} = \sin \theta \sin \phi\end{aligned}\tag{2.20ข}$$

ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการตามตำแหน่ง  $(U, V)$  ได้แก่  $G(U, V)$  คือ อัตราขยายของระบบสายอากาศที่ต้องการตามตำแหน่ง  $(U, V)$  แสดงดังรูปที่ 2.5 หลังจากกำหนดตำแหน่ง  $(U, V)$  แล้วสามารถหาค่ามุม  $(\theta, \phi)$  จากระบบสายอากาศงานสะท้อน โดยมีความสัมพันธ์กับระบบพิกัด  $(U, V)$  ดังนี้



รูปที่ 2.5 การกำหนดอัตราขยายของระบบสายอากาศตามระบบพิกัด  $(U, V)$



จากสมการ (2.20ข) จะได้

$$\tan \phi = \frac{V}{U} \quad (2.20ค)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V}{U} \quad (2.20ง)$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - (U^2 + V^2)} \quad (2.20จ)$$

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - (U^2 + V^2)} \quad (2.20ฉ)$$

### 2.2.5 การคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

จากนิยามของ Ludwig [4]

สายอากาศโดยทั่วไปนั้นจะมีลักษณะ การทำงานที่แตกต่างกันไป โดยจะกล่าวถึงการป้อนกำลังงานคลื่นระยะต่างๆของสายอากาศนั่นเอง สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลในแนวไรเซชันร่วมและสนามระยะไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้สามารถเขียนแทนด้วยสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\bar{E}_{co} = \bar{E}_\theta \sin(\phi) + \bar{E}_\phi \sin(\phi) \quad (2.21)$$

$$\bar{E}_{cx} = -\bar{E}_\theta \cos(\phi) + \bar{E}_\phi \sin(\phi) \quad (2.22)$$

$\bar{E}_\theta$  และ  $\bar{E}_\phi$  คือสนามไฟฟ้าในย่านสนามระยะไกลในแนวองค์ประกอบ  $\bar{a}_\theta$  และ  $\bar{a}_\phi$  ของพิกัดทรงกลมในระนาบ  $\phi$  ใดก็ตามลำดับ

จากสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ นำไปคำนวณหาอัตราขยายของระบบสายอากาศ ซึ่งเป็นค่าปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกความสามารถในการบิรวบรวมพลังงานที่แผ่กระจายมาจากสายอากาศให้พุ่งไปในทิศทางต่างๆมากขึ้นเพียงใด โดยคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในทิศทางที่ต้องการเทียบกับความหนาแน่นของกำลังคลื่นจากแหล่งกำเนิดแบบจุดที่แผ่พลังงานเท่าเทียมกันรอบทิศ(isotropic point source) ที่ป้อนด้วยกำลังป้อนเดียวกันกับระบบสายอากาศนั้น อัตราของระบบสายอากาศใดใดกำหนดโดยสมการ

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U_{rad}}{P_{in}} \quad (2.23)$$

โดยที่  $U_{rad}$  คือความหนาแน่นของกำลังคลื่นในแนวโพลาริเซชันร่วมที่แผ่พลังงานในทิศทางที่ต้องการ มีหน่วยเป็น W/Sr และ  $P_{in}$  คือกำลังงานที่ป้อนให้กับระบบสายอากาศมีหน่วยเป็น W สมมติให้ประสิทธิภาพของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นกำลังทั้งหมดที่แผ่ออกไปจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปในบริเวณที่งานสะท้อนวางอยู่ในบริเวณย่านสนามไกล ( $P_T$ ) มีค่าเท่ากับกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ ( $P_{in}$ ) ทำให้อัตราขยายของระบบสายอากาศงานสะท้อนเดียวในแนวโพลาริเซชันร่วม ( $G_{co}$ ) และในแนวโพลาริเซชันไขว้ ( $G_{cx}$ ) สามารถหาได้จาก  $G_{co}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{r^2 |\bar{E}_{co}(\theta, \phi)|^2}{2Z_o P_T}$  ความแตกต่างของอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วมกับอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันไขว้สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเกี่ยวกับการรบกวนกันของสายอากาศตัวอื่นที่มีการใช้งานที่ความถี่เดียวกันแต่ต่าง โพลาริเซชัน โดยถ้าผลต่างที่เกิดขึ้นมีค่ายิ่งมากขึ้นทำให้สายอากาศที่ใช้งานอยู่จะรบกวนสายอากาศตัวอื่น ได้น้อยลง และผลต่างนี้สามารถอ้างอิงกับมาตรฐานของ ITU ซึ่งกำหนดว่าผลต่างระหว่างอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วมและในแนวโพลาริเซชันร่วมและในแนวโพลาริเซชันไขว้ควรมีค่ามากกว่า 30 dB

$$G_{co}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{r^2 |\bar{E}_{co}(\theta, \phi)|^2}{2Z_o P_T} \quad (2.24)$$

$$G_{cx}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{r^2 |\bar{E}_{cx}(\theta, \phi)|^2}{2Z_o P_T} \quad (2.25)$$

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ นอกจากแสดงอยู่ในรูปอัตราขยายของระบบสายอากาศแล้ว ยังสามารถแสดงได้ในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ กำลังคลื่นแผ่พลังงานเทียบเท่าไอโซทรอปิก (EIRP)

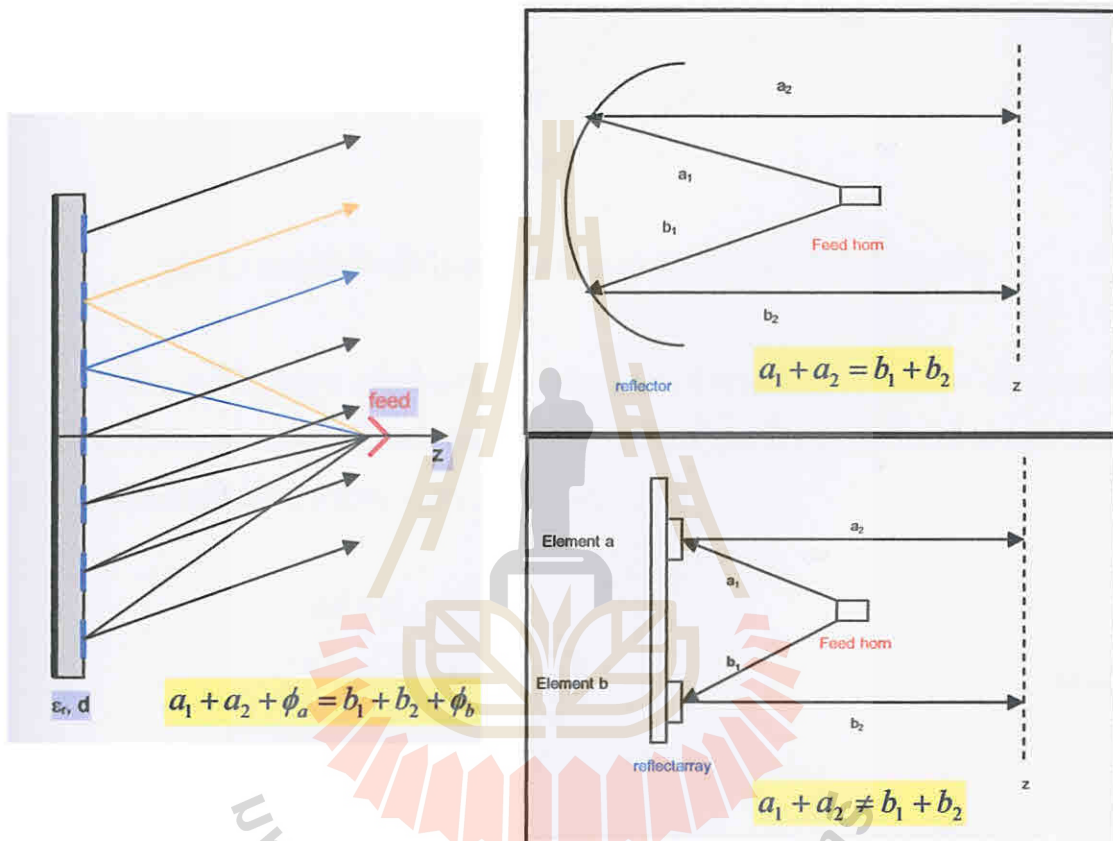
### 2.3 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแฉดลำดับสะท้อนไมโครสตริป

สายอากาศแฉดลำดับสะท้อนไมโครสตริปใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการจัดการประวิงเฟส (Phase Delay) ตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าตัวสะท้อน

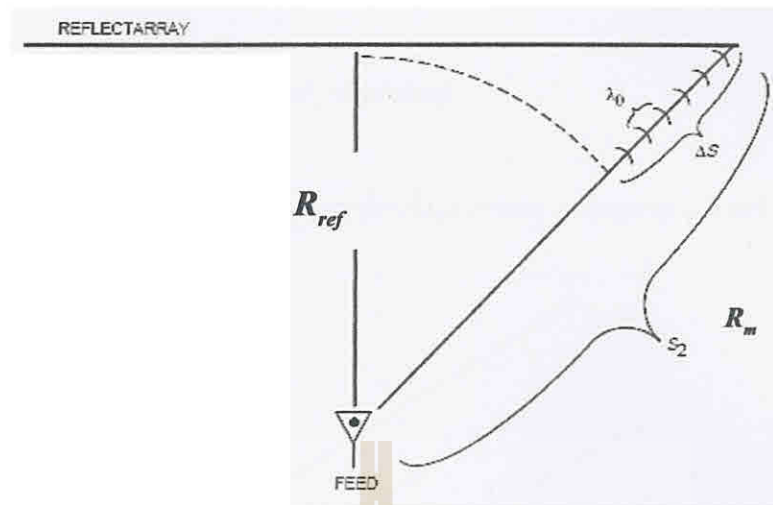


เราสามารถคำนวณหาเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางจากตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถว ลำดับสะท้อนแล้วสะท้อนไปยังสนามระยะไกลได้ดังนี้

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} R = k_0 R \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.6 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก และสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป



รูปที่ 2.7 การประวิงเฟสในสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป

เมื่อ  $R$  คือระยะทางที่คลื่นเดินทาง สำหรับการคำนวณการประวิงเฟสหาได้จากผลต่างระหว่างระยะการแผ่กระจายคลื่นของแผ่นสะท้อนใดๆ กับแผ่นสะท้อนอ้างอิง โดยที่  $m$  และ  $n$  คือตำแหน่งแผ่นสะท้อนในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_{mn} - \phi_{ref} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0} (R_{mn} - R_{ref}) \\ &= k_0 \Delta s\end{aligned}\quad (2.27)$$

ดังนั้นเฟสสะท้อนของแผ่นสะท้อนใดๆ  $\psi_{mn}$  คือ

$$\Delta\phi - \psi_{mn} = 2\pi N \quad (2.28)$$

เมื่อ  $N = 0, 1, 2, 3, \dots$

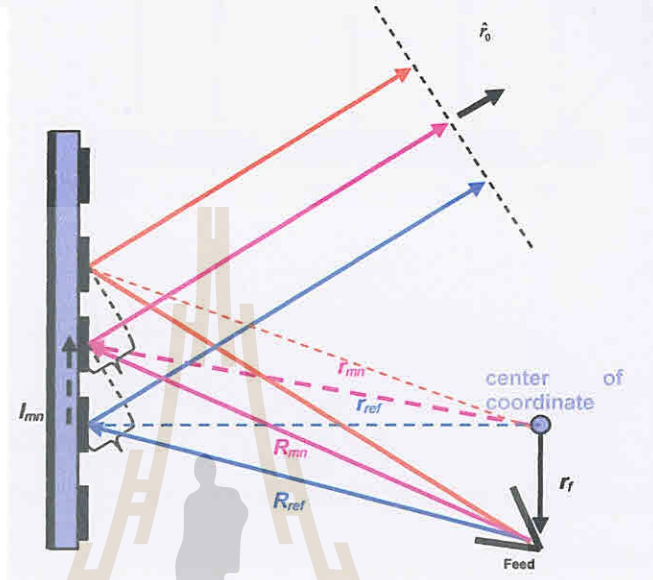
ถ้าหน้าคลื่น (Wavefront) และตัวป้อนสัญญาณปรับเลื่อนออกจากจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดของสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน เราสามารถหาเฟสสะท้อนได้จาก

$$\psi_{mn} - k_0 [R_{mn} + \bar{r}_{mn} \cdot \hat{r}_0] = 2\pi N \quad (2.29)$$

โดยที่

$$\vec{r}_{mn} \cdot \hat{r}_0 = md_x \sin \theta \cos \phi + nd_y \sin \theta \sin \phi \quad (2.30)$$

เมื่อ  $d_x$  และ  $d_y$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ



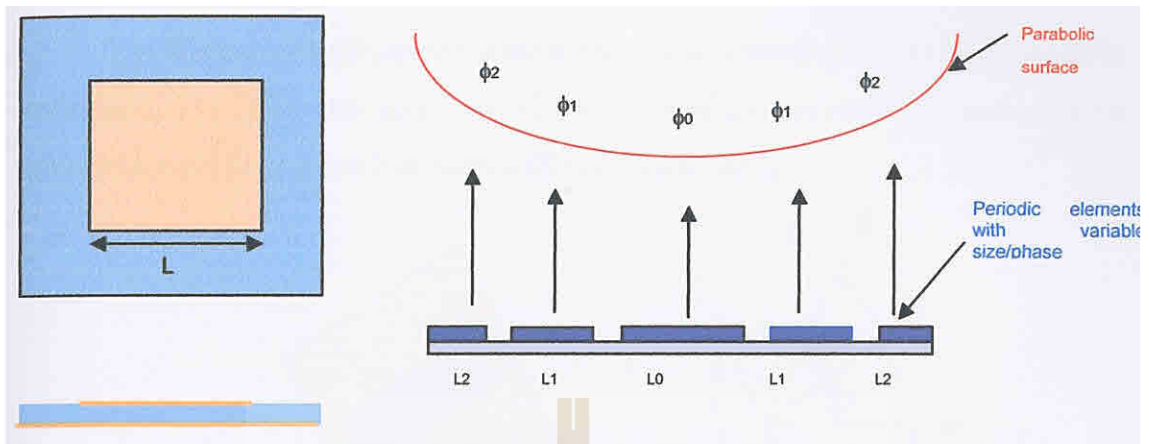
รูปที่ 2.8 การประวิงเฟสเนื่องจากการเลื่อนตัวป้อนสัญญาณและหน้าคลื่น

## 2.4 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

เทคนิคเฟสสะท้อน โดยออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปด้วยเทคนิคการจัดเฟส ซึ่งเทคนิคที่นิยมนำมาใช้มี 3 วิธีคือ การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน การปรับความยาวของสตัป และการปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

### 2.4.1. การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน ใช้หลักการปรับความยาวของแผ่นสะท้อน ในด้านที่มีผลกระทบกับความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อความถี่ใช้งานของแผ่นสะท้อนเปลี่ยนจะส่งผลให้เฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนในแผ่นสะท้อนเปลี่ยนแปลงด้วย จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเราสามารถปรับความยาวของแผ่นสะท้อนได้ไม่เกิน 4% จากความยาว  $\lambda$  ความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนไม่ครบ  $360^\circ$  ดังนั้นจึงควรออกแบบการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนร่วมกับเทคนิคอื่น รูปที่ 2.8 แสดงการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

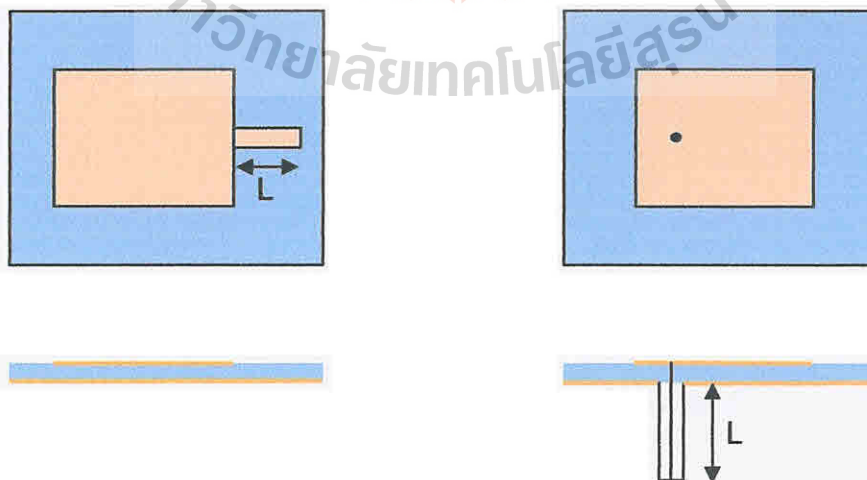


รูปที่ 2.9 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

#### 2.4.2. การปรับความยาวของสัดับ

การจัดเฟสด้วยการปรับความยาวของสัดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะให้ผลของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฟสเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่าย เมื่อความยาวของสัดับเปลี่ยน จะส่งผลให้การหาเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแผ่นสะท้อนเปลี่ยน แต่การจัดเฟสวิธีนี้จะมีการสูญเสียเนื่องจากตัวสัดับ โดยสัดับที่นำมาใช้มี 3 แบบคือ

1. สัดับไมโครสตริปที่ต่อกับด้านข้างของแผ่นสะท้อน (Edge of patch)
2. สัดับไมโครสตริปที่ต่อแบบการเชื่อมร่วมอะเพอร์เจอร์ (Aperture coupled patch)
3. สัดับโคแอกเซียล

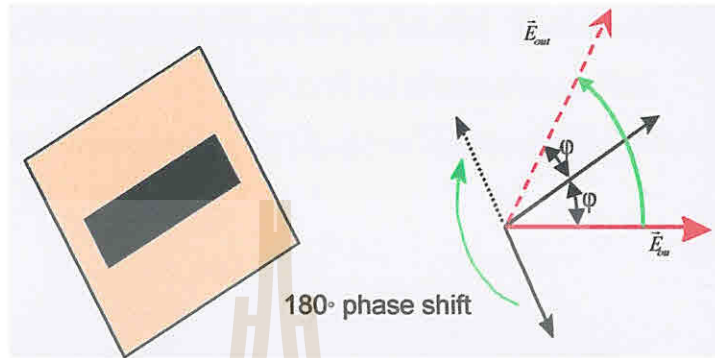


รูปที่ 2.10 การปรับความยาวของสัดับ ก. สัดับแบบไมโครสตริป ข. สัดับแบบโคแอกเซียล



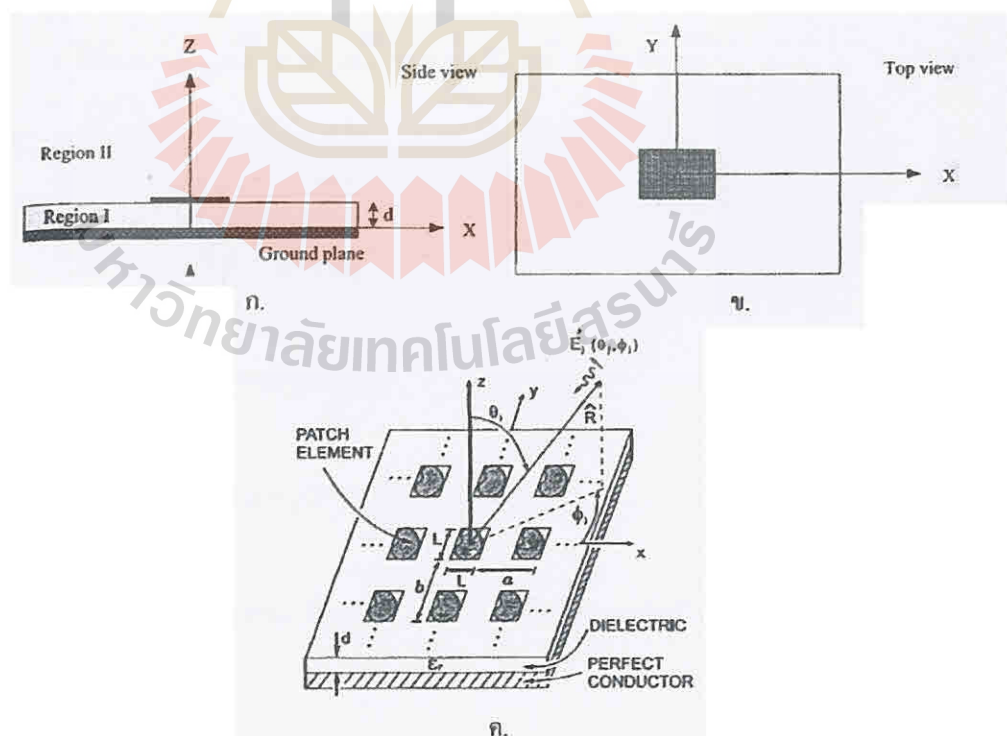
### 2.4.3. การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

การจัดเฟสด้วยการปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมุมของแผ่นสะท้อนสามารถปรับได้  $180^\circ$  และการประวิงเฟสจะมีค่าเป็นสองเท่าของมุมของแผ่นสะท้อน หลักการจัดเฟสวิธีนี้เหมาะสำหรับสายอากาศที่มีโพลาริเซชันเชิงวงกลม



รูปที่ 2.11 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

### 2.5 สนามตกกระทบ (Incident Field) และสนามสะท้อน (Reflected Field)



รูปที่ 2.12 แผ่นสะท้อนไมโครสตริป

จากรูปที่ 2.12 แสดงแผ่นสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งมีความหนา  $d$  ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity)  $\epsilon, \epsilon_0$  และค่าความซบซึมได้แม่เหล็ก (Permeability)  $\mu_0$  โดยค่าสภาพยอมจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในไดอิเล็กตริก และเราสามารถหาสมการเชิงอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation หรือ EFIE) สำหรับกระแสเชิงผิวบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป โดยใช้การแก้สมการของคลื่นระนาบตกกระทบบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจะใช้การนำแผ่นสะท้อนหลายแผ่นมาเรียงลำดับบนแผ่นวงจรพิมพ์

พิจารณาคลื่นระนาบที่มีมุมตกกระทบ  $(\theta_0, \phi_0)$  จะได้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบคือ

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_0 e^{-jk_0 \hat{k}^{inc} \cdot \vec{R}} \quad (2.31)$$

$$\vec{H}^{inc} = \vec{H}_0 e^{-jk_0 \hat{k}^{inc} \cdot \vec{R}} = \frac{1}{\eta_0} \hat{k}_i \times \vec{E}^{inc} \quad (2.32)$$

โดยที่  $\vec{E}_0$  เป็นขนาดและเฟสของสนามตกกระทบบ ซึ่งอยู่ในเทอมขององค์ประกอบในแนวแกนและองค์ประกอบในแนวตั้งฉากของระบบคลื่นตกกระทบบ

$$\vec{E}_0 = E_{0\theta} \hat{u}_\theta^{inc} + E_{0\phi} \hat{u}_\phi^{inc} \quad (2.33)$$

$$\vec{H}_0 = -H_{0\phi} \hat{u}_\theta^{inc} + H_{0\theta} \hat{u}_\phi^{inc} = -\frac{1}{\eta_0} E_{0\phi} \hat{u}_\theta^{inc} + \frac{1}{\eta_0} E_{0\theta} \hat{u}_\phi^{inc} \quad (2.34)$$

และ

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_0 e^{jk_0(u_0 x + v_0 y + \cos(\theta_0) z)} \quad (2.35)$$

$$\hat{u}_\phi^{inc} = \hat{x} \sin \phi_0 - \hat{y} \cos \phi_0 \quad (2.36)$$

$\vec{R}$  เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง ณ จุดสังเกต

$$\vec{R} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \quad (2.37)$$

$k_0$  เป็นเลขคลื่นในอากาศว่าง (Free Space) และ  $\hat{k}^{inc}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของการแผ่กระจายสนามตกกระทบบ

$$\hat{k}^{inc} = -(u_0 \hat{x} + v_0 \hat{y} + w_0 \hat{z}) \quad (2.38)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} u_0 &= \sin \theta_0 \cos \phi \\ v_0 &= \sin \theta_0 \sin \phi \\ w_0 &= \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสนามไฟฟ้าตกกระทบได้ใหม่เป็น

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_0 e^{jk_0(u_0x+v_0y+\cos(\theta_0)z)} \quad (2.40)$$

ถ้าแผ่นวงจรไม่มีแผ่นสะท้อน เราสามารถหาสนามไฟฟ้าทั้งหมดในบริเวณ  $z \geq 0$  ได้จากผลรวมระหว่างสนามตกกระทบ (Incident Field) กับสนามที่สะท้อนออกไป (Reflected Field) จากโคอีเล็กทริกกราวด์ของไมโครสตริป

$$\vec{E}^{tot} = \vec{E}^{inc} + \vec{E}^{ref} \quad (2.41)$$

แต่ถ้ามีแผ่นสะท้อนบนแผ่นวงจรพิมพ์ จะทำให้สนามรวมในสมการ (2.38) เหนียวนาให้เกิดกระแสวิก  $\vec{J}$  บนแผ่นสะท้อน และกระแสวิกนี้จะแผ่กำลังงานไปยังโคอีเล็กทริกกราวด์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระเจิง (Scattered Field)  $\vec{E}^{scat}$  ไปในโคอีเล็กทริกและอากาศ ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งหมดของแผ่นสะท้อนในบริเวณ  $z \geq 0$  คือ

$$\vec{E}^{tot} = \vec{E}^{inc} + \vec{E}^{ref} + \vec{E}^{scat} \quad (2.42)$$

## 2.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแฉวลำดับสะท้อนอนันต์

จากสมการ (2.42) สนามสะท้อนรวมประกอบด้วยสนามสะท้อนจากแผ่นโคอีเล็กทริกกราวด์และสนามกระเจิงเนื่องจากกระแสเหนียวนาบนอิลิเมนต์ไมโครสตริป ซึ่งสนามทั้งสองสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{E}^{ref} &= \vec{R} \cdot \vec{E}^{inc} \Big|_{z=0} e^{-jk_0z \cos \theta_0} \\ \vec{E}^{scat} &= \vec{S} \cdot \vec{E}^{inc} \Big|_{z=0} e^{-jk_0(z+d) \cos \theta_0} \end{aligned} \quad (2.43)$$

### 2.6.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการสะท้อนจากแผ่นไดอิเล็กทริกกรวด

สนามสะท้อนในหัวข้อ 2.5 จะพิจารณาสนามโพลาไรซ์รวมใน  $\theta$  และ  $\phi$  แต่ไม่ได้พิจารณาองค์ประกอบในแนวสัมผัส และสามารถหาสนามสะท้อนในองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากได้โดยใช้  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของสนามไฟฟ้าสะท้อนในแนวสัมผัสได้เป็น

$$E_z^{ref} = \frac{\sin \theta_0 \cos \phi_0 E_x^{ref} + \sin \theta_0 \sin \phi_0 E_y^{ref}}{\cos \phi_0} \quad (2.44)$$

แปลงสมการ (2.44) ให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้วได้เป็น

$$\begin{aligned} E_\theta^{ref} &= E_x^{ref} \cos \theta_r \cos \phi_r + E_y^{ref} \cos \theta_r \sin \phi_r - E_z^{ref} \sin \theta_r \\ E_\phi^{ref} &= -E_x^{ref} \sin \phi_r + E_y^{ref} \cos \phi_r \end{aligned} \quad (2.45)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \theta_r &= \theta_0 \\ \phi_r &= \phi_0 + \pi \end{aligned} \quad (2.46)$$

จากสมการ (2.42) และ (2.43) จะได้สัมประสิทธิ์สนามสะท้อน โดยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสนามสะท้อนกับสนามตกกระทบที่ระนาบ  $z = 0$

$$\begin{aligned} R_{\theta\theta} &= -\Gamma^{TM} e^{j2k_0 \cos \theta_0 d} \\ R_{\phi\phi} &= \Gamma^{TM} e^{j2k_0 \cos \theta_0 d} \end{aligned} \quad (2.47)$$

เราสามารถเขียนสนามสะท้อนในรูปแบบเมตริกซ์ เนื่องจากสนามตกกระทบที่มีโพลาไรซ์  $\hat{q}$  ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} E_\theta^{ref} \\ E_\phi^{ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & R_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_\theta \cdot \hat{q} \\ \hat{a}_\phi \cdot \hat{q} \end{pmatrix} e^{jk_0(u_0x + v_0y - z \cos \theta_0)} \quad (2.48)$$



### 2.6.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสน้ำวนำบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสน้ำวนำบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป พิจารณาจากสนามกระเจิง โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า  $[I]$  จะหาได้ด้วยวิธีเชิงเลขและสนามกระเจิงในอากาศหรือไดอิเล็กตริก หาได้จากสมการที่ (2.49)

$$\begin{aligned} \overline{E}^{scat}(x, y, z) &= \begin{pmatrix} E_x(x, y, d) \\ E_y(x, y, d) \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{T_{\eta_1} T_{\eta_2} \sin \alpha} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \overline{G}(k'_x, k'_y) \tilde{J}_0(k'_x, k'_y) e^{jk'_x x} e^{jk'_y y} \end{aligned} \quad (2.49)$$

โดยที่

$$\tilde{J}_0(k'_x, k'_y) = \sum_{j=1}^N I_j \tilde{J}_j(k'_x, k'_y) \quad (2.50)$$

สนามบนไดอิเล็กตริกสามารถเขียนในเทอมของสนามเชิงผิวของไดอิเล็กตริก ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_x(x, y, z > d) &= E_x(x, y, d) e^{-jk_z(z-d)} \\ E_y(x, y, z > d) &= E_y(x, y, d) e^{-jk_z(z-d)} \\ E_z(x, y, z > d) &= \frac{k'_x E_x(x, y, d) + k'_y E_y(x, y, d)}{k_z} e^{-jk_z(z-d)} \end{aligned} \quad (2.51)$$

โดยที่

$$k_z = k_0^2 - k_x'^2 - k_y'^2 \quad (2.52)$$

$$k'_x = \frac{2\pi m}{T_{\eta_1}} + k_0 u_0 \quad (2.53)$$

$$k'_y = \frac{2\pi n}{T_{\eta_2} \sin \alpha} - \frac{2\pi m}{T_{\eta_1} \tan \alpha} + k_0 v_0$$

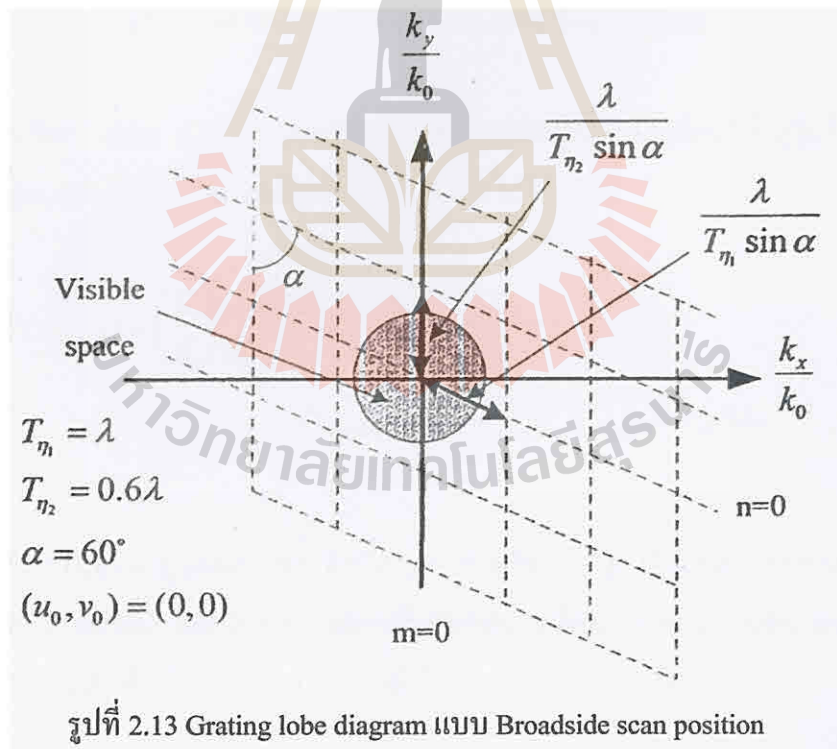
การพิจารณาค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant)  $k_z$  สำหรับโครงสร้างแบบรายคาบอนันต์ หาได้จากกรานอร์เมลไลซ์สมการ (2.52)

$$\frac{k_z}{k_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{k'_x}{k_0}\right)^2 - \left(\frac{k'_y}{k_0}\right)^2} \quad (2.54)$$

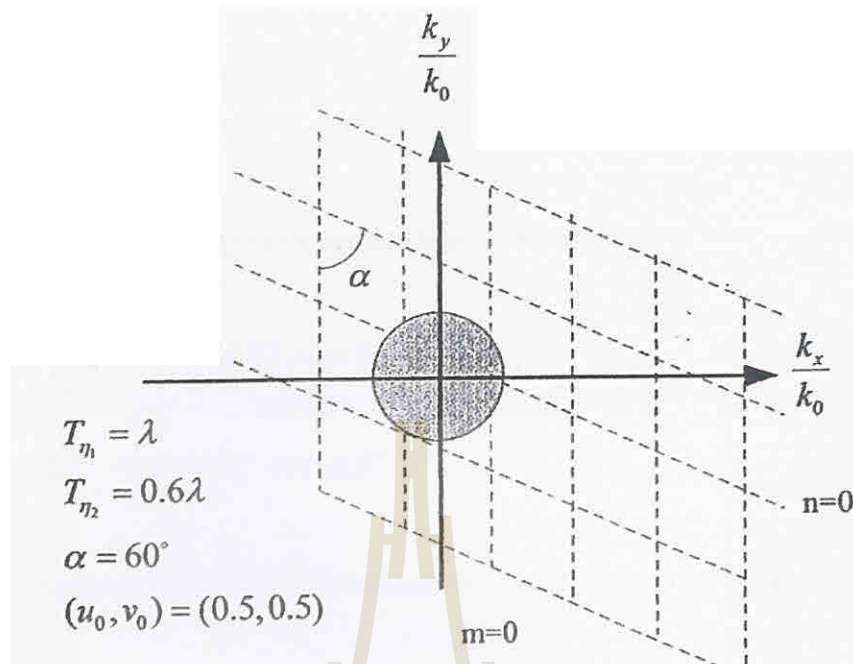
หรือ

$$\left(\frac{k'_x}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{k'_y}{k_0}\right)^2 < 1 \quad (2.55)$$

สมการ (2.55) ใช้สำหรับสนามสะท้อนเนื่องจากกระแสเชิงผิวบนแผ่นสะท้อนในโหมด  $m=0, n=0$  แต่อย่างไรก็ตาม สมการ (2.55) สามารถใช้สำหรับกรณีที่มีมุมตกกระทบ และคาบหรือระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนมีอันดับโหมดสูงขึ้นได้ เพื่อให้ง่ายในการออกแบบ เราจะใช้ Reciprocal Lattice หรือ Grating Lobe Diagram ซึ่งไอะแกรมนี้จะพล็อตค่าแอมพลิจูดของ  $k'_x, k'_y$  จากสมการ (2.43) ในระนาบ  $k_x/k_0$  และ  $k_y/k_0$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 Grating lobe diagram แบบ Broadside scan position



รูปที่ 2.14 Grating lobe diagram แบบ Scan Position

ถ้าเราเลือก Grid Lattice และมุมตกกระทบของกลุ่มแผ่นสะท้อนให้อยู่ในโหมดการแผ่กระจายคลื่น  $(m, n) = (0, 0)$  สามารถเขียนสมการ (2.46) ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \bar{E}^{scat}(x, y, d) &= \begin{pmatrix} E_x(x, y, d) \\ E_y(x, y, d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x^q \\ E_y^q \end{pmatrix} e^{jk_0 u_0 x} e^{jk_0 v_0 y} \\ &= \frac{1}{T_{n1} T_{n2} \sin \alpha} \bar{G}(k_0 u_0, k_0 v_0) \bar{J}_0^q(k_0 u_0, k_0 v_0) e^{jk_0 u_0 x} e^{jk_0 v_0 y} \end{aligned} \quad (2.56)$$

โดยที่  $q$  คือโพลาไรซ์ของมุมตกกระทบ ดังนั้น  $q = \theta$  หรือ  $q = \phi$  เมื่อมุมตกกระทบอยู่ในโหมด TM หรือ TE ตามลำดับ และในทำนองเดียวกันกับคลื่นสะท้อน เราสามารถเขียนเมตริกซ์สนามกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามกระเจิงกับสนามตกกระทบ ดังนี้

$$\begin{pmatrix} E_\theta^{scat} \\ E_\phi^{scat} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta^{inc} \\ E_\phi^{inc} \end{pmatrix} e^{jk_0(u_0 x + v_0 y - z \cos \theta_0)} \quad (2.57)$$

โดยที่

$$S_{pq} = \frac{E_p^{scat}(z=0)}{E_q^{scat}(z=0)} \quad (2.58)$$

แทนสมการ (2.56) ลงในสมการ (2.51) และแปลงให้อยู่ในพิกัดทรงกลม จะได้

$$\begin{aligned} E_{\theta}^{scat} &= - \left[ \frac{\cos \phi_0 E_x^q + \sin \phi_0 E_y^q}{\cos \theta_0} \right] e^{jk_0(u_0x+v_0y)} e^{-jk_z(z-d)} \\ E_{\phi}^{scat} &= \left[ \sin \phi_0 E_x^q - \cos \phi_0 E_y^q \right] e^{jk_0(u_0x+v_0y)} e^{-jk_z(z-d)} \end{aligned} \quad (2.59)$$

ภายใต้เงื่อนไขของสมการ (2.58) จะได้อีลิเมนต์เมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิง ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{\theta q} &= \left[ \frac{\cos \phi_0 E_x^q + \sin \phi_0 E_y^q}{\cos \theta_0} \right] e^{jk_z d} \\ S_{\phi q} &= \left[ \sin \phi_0 E_x^q - \cos \phi_0 E_y^q \right] e^{jk_z d} \end{aligned} \quad (2.60)$$

### 2.6.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวม

สัมประสิทธิ์รวมในทิศทางสะท้อนหาได้จากผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากแผ่นไดอิเล็กตริกกราวด์และสัมประสิทธิ์การกระเจิงที่ผิวแผ่นสะท้อน

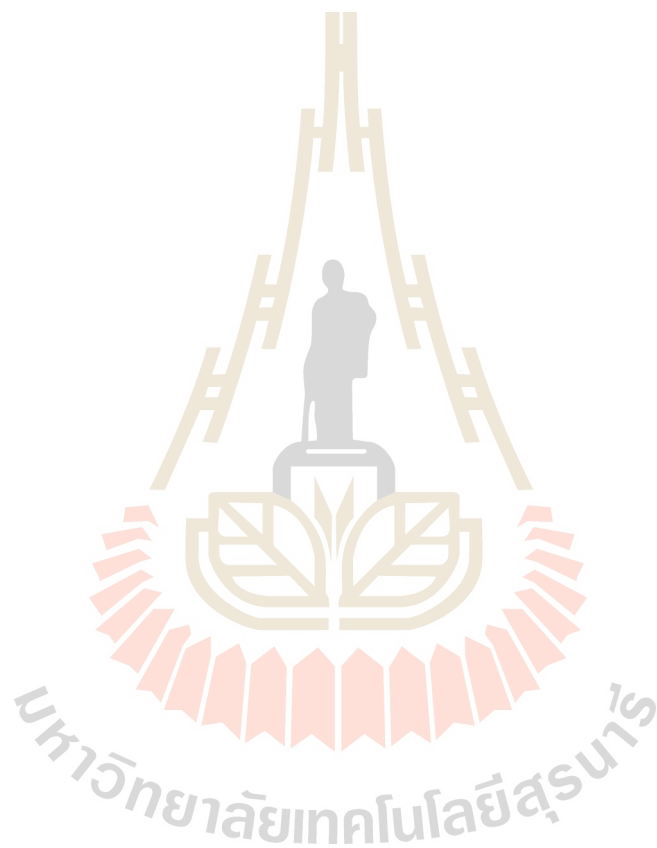
$$\bar{\bar{R}}^{tot} = \bar{\bar{R}} + \bar{\bar{S}} = \begin{bmatrix} R_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & R_{\phi\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

ถ้าไม่มีการสูญเสียภายในไดอิเล็กตริก จะได้  $|R|=1, |R+S|=1$  และ  $0 \leq |S| < 2$  โดยที่  $S$  มีขนาดเท่ากับ 2 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ และมีเฟสต่างจาก  $R$  เท่ากับ  $180^\circ$



## 2.7 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆ ในการออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน ได้แก่ การออกแบบพื้นผิวสะท้อนอ้างอิง หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน ซึ่งทำให้ทราบวิธี คำนวณหาการประวิงเฟส นอกจากนี้ยังศึกษาเทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนรูปแบบต่างๆ รวมถึงศึกษาพฤติกรรมของสนามที่ตกกระทบและสนามสะท้อนบนสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน จึงทำให้ทราบการจำลองแบบหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและในบทต่อไปจะนำเสนอ การจำลองแบบจากทฤษฎีที่กล่าวมา และออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนต่อไป



## บทที่ 3

### การออกแบบและการสังเคราะห์

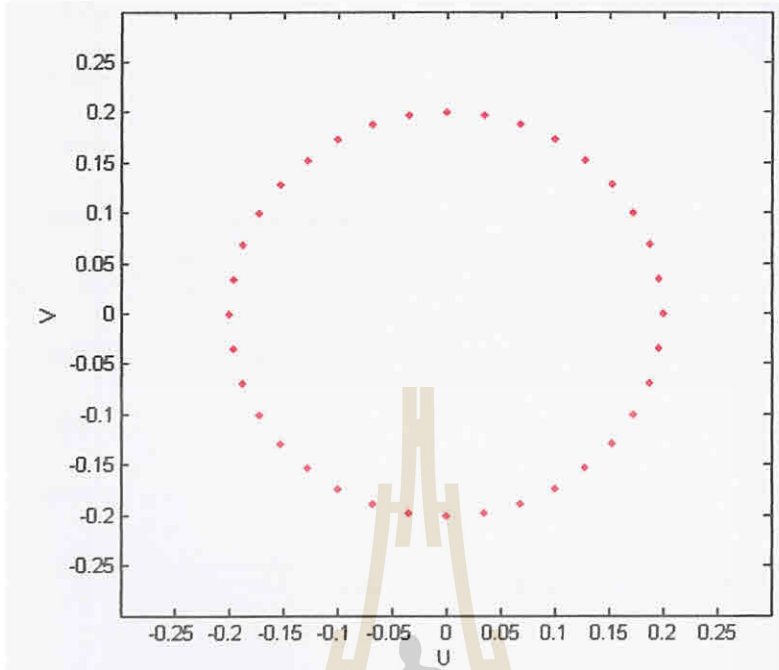
#### 3.1 บทนำ

ในการออกแบบและการสังเคราะห์ เริ่มต้นเราจะมีกำหนดพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปเรขาคณิตอย่างง่าย มีกำหนดสายอากาศสำหรับป้อน การหาโคไซน์ของสายอากาศป้อน เมื่อได้แล้วนำมาวิเคราะห์สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวด้วยวิธีอ้างอิง เพื่อนำมาพิจารณาการประวิงเฟสของจานสะท้อนเดี่ยวด้วยวิธีอ้างอิง เมื่อได้การประวิงเฟสแล้วก็ใช้คุณลักษณะของแผ่นสะท้อนที่ทำได้จากโปรแกรม CST มาเปรียบเทียบกับกัน เพื่อที่จะได้ขนาดของแพทช์ (Patch) ในการขึ้นรูปและได้แบบรูปการแผ่กำลังงานตามที่ได้กำหนดพื้นที่ครอบคลุมไว้ การกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้

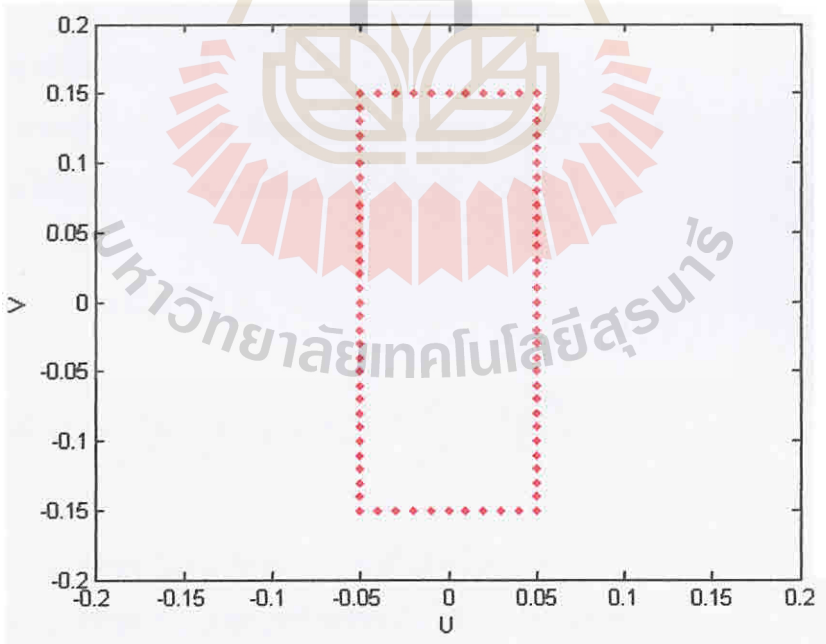
- ความถี่ปฏิบัติการ สำหรับการใช้งานในย่านความถี่ 5.8 GHz
- ลักษณะพื้นที่ครอบคลุมรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย เช่น วงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้ง และแนวนอน
- อัตราขยายของระบบสายอากาศ = 20 dB
- ขนาดของจานสะท้อน  $35 \times 35$  cm.
- ระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อน  $f = 12$  cm.
- สายอากาศป้อนวิวลติ

#### 3.2 การกำหนดพื้นที่ครอบคลุม

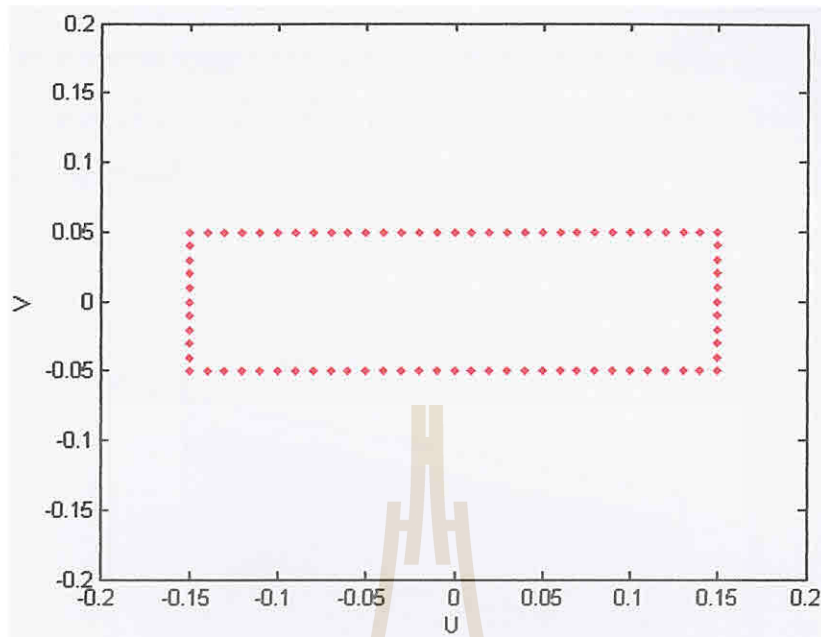
ในโครงการนี้จะมีการกำหนดพื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปเรขาคณิตอย่างง่าย ซึ่งได้แก่ วงกลม (รูปที่ 3.1) และสี่เหลี่ยม (รูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.1 พื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลม



รูปที่ 3.2 พื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง



รูปที่ 3.3 พื้นที่ครอบคลุมที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน

### 3.3 สายอากาศป้อนวิวดติ

สายอากาศป้อนวิวดติเป็นสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง โดยสูตรการหาสายอากาศร่องรีขแบบเส้นโค้งแบบเอกโปแนนเชียล ดังนี้

$$y = C_1 e^{Rz} + C_2 \quad (3.1)$$

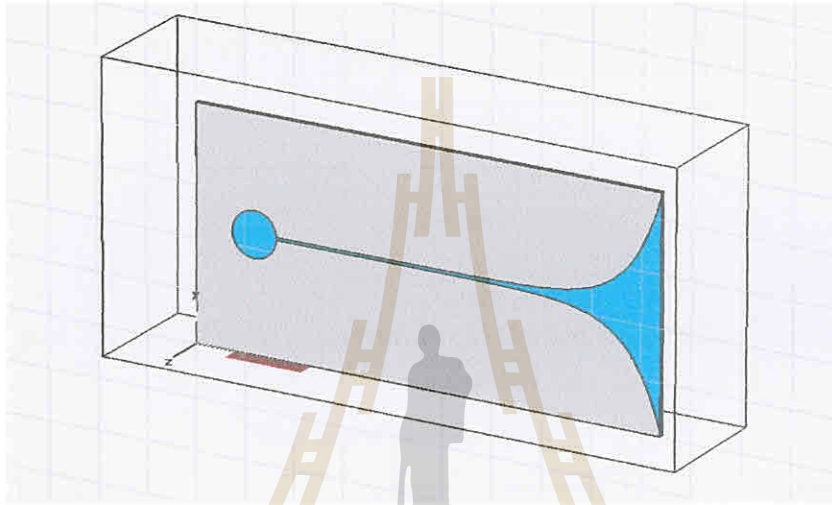
$$\text{โดยที่ } C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \text{ และ } C_2 = \frac{y_1 e^{Rz_2} - y_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}$$

$P_1(y_1, z_1)$  คือจุด  $(y_1, z_1)$  จุดแรกที่เริ่มโค้งเอกโปแนนเชียล

$P_2(y_2, z_2)$  คือจุด  $(y_2, z_2)$  จุดสุดท้ายของเส้นโค้งเอกโปแนนเชียล



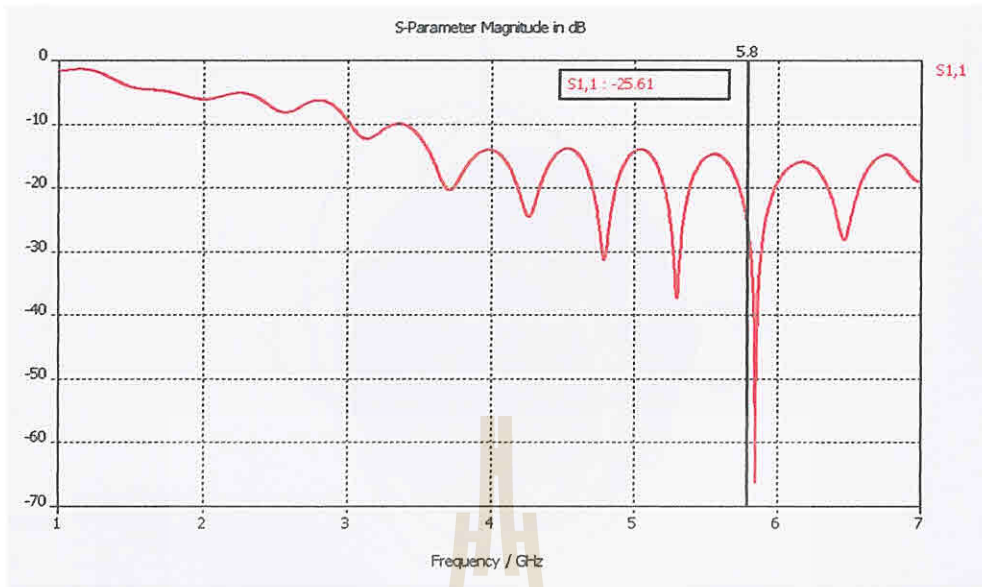
รูปที่ 3.4 - 3.9 แสดงผลการจำลองแบบสายอากาศวิวอลดี ซึ่งสามารถใช้งานในย่านความถี่ 2-8 GHz มีอัตราขยาย (Gain) ประมาณ 8-12 dB สำหรับสายอากาศป้อนวิวอลดีที่นำมาใช้งานมีขนาด  $18.75 \times 9$  เซนติเมตร เลือกใช้งานที่ความถี่ 5.8 GHz ซึ่งมีอัตราขยาย = 7.681dB สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น  $S_{11} = -25.61\text{dB}$  และค่า VSWR = 1.11



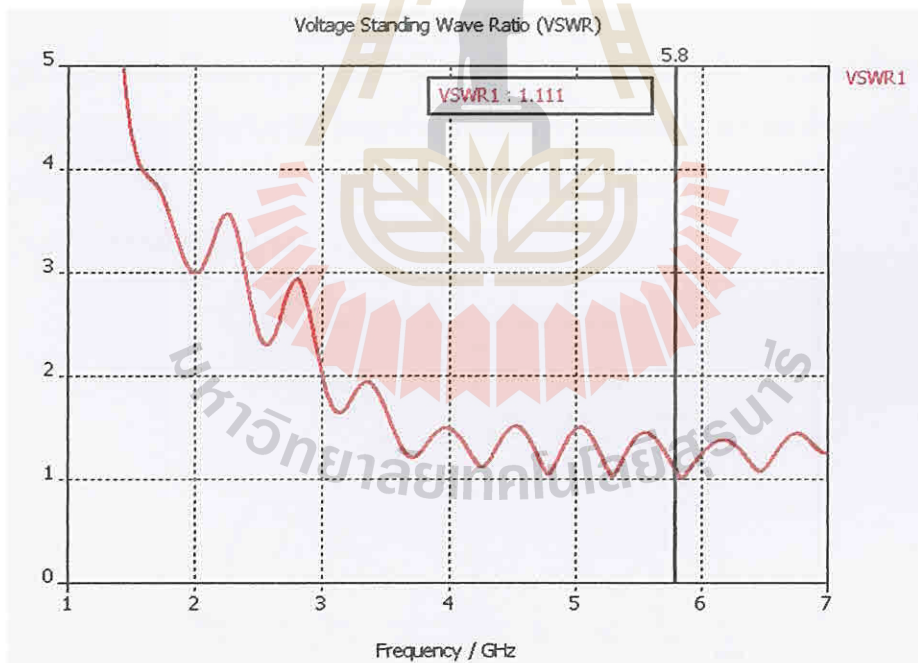
รูปที่ 3.4 สายอากาศป้อนวิวอลดี

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศป้อนวิวอลดี

ลักษณะสายอากาศวิวอลดี	ขนาด (mm)
ความยาวสายอากาศ	187.5
ความกว้างสายอากาศ	90
ความยาวของร่อง	154.7
ระยะห่างของร่อง	1
เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตัป	17.8
ความกว้างของสายป้อนไมโครสตริป	30.1
ความหนาของไดอิเล็กตริก	1.6

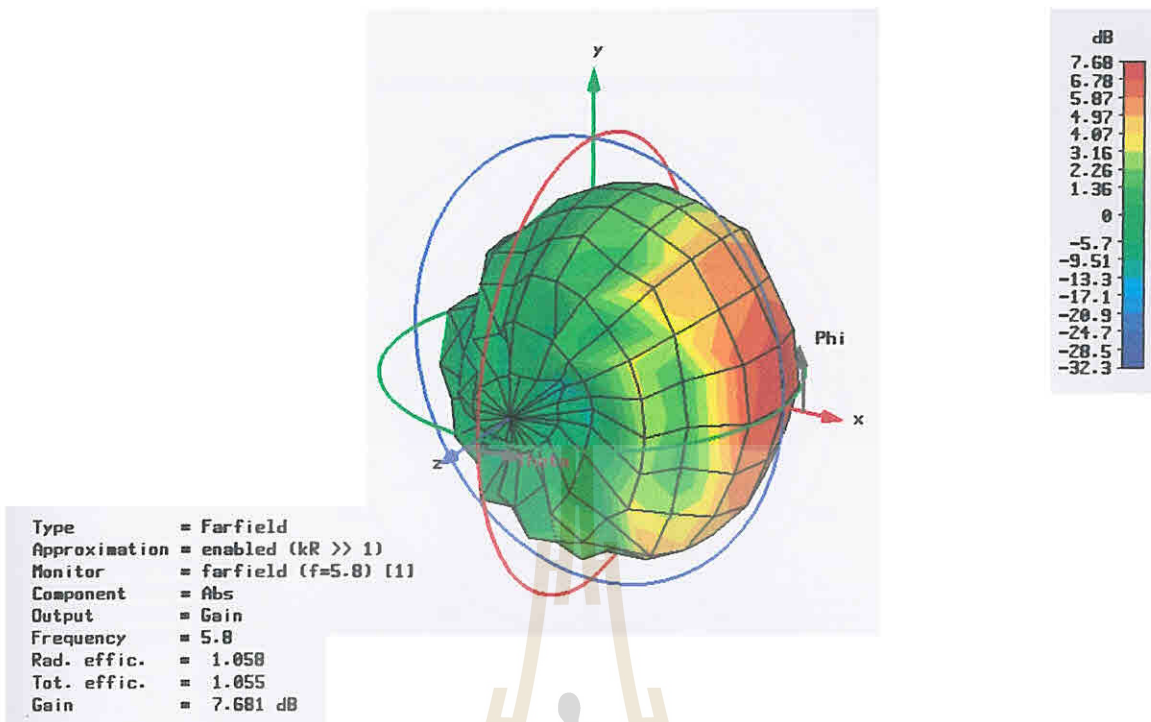


รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น (S11) ของสายอากาศป้อนวิวลติ



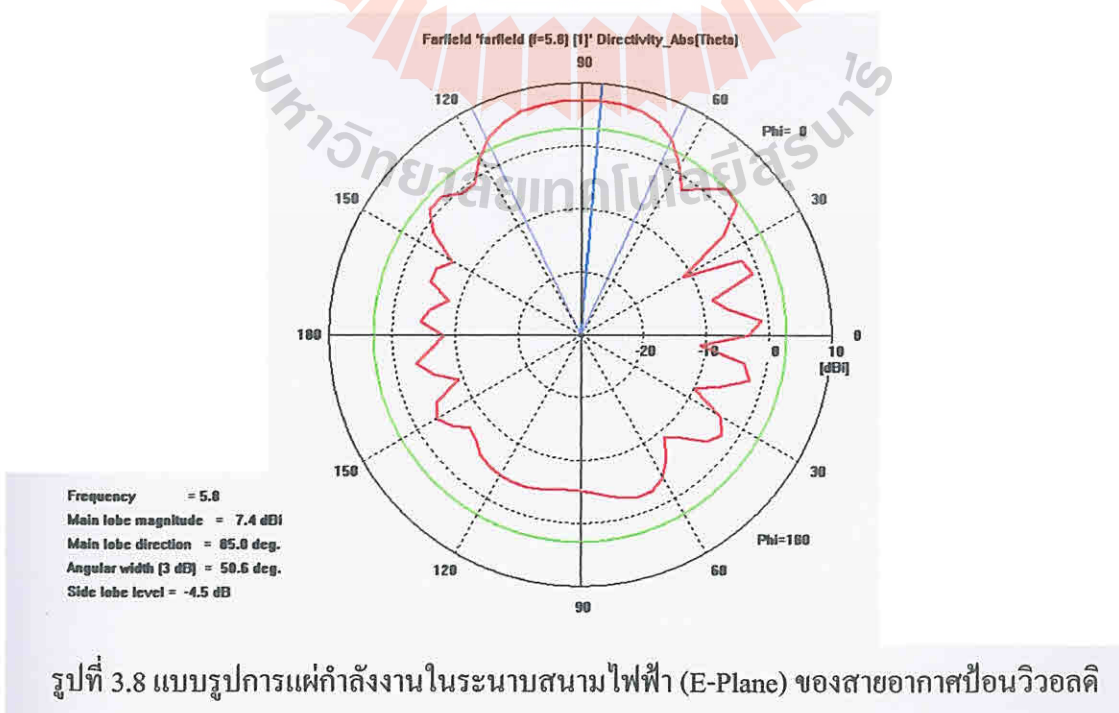
รูปที่ 3.6 ค่า VSWR ของสายป้อนวิวลติ

รูปที่ 3.7 แสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศป้อนวิวลติ จะเห็นได้ว่าคลื่นมีการเคลื่อนที่ไปทางด้านหน้าของสายป้อนวิวลติ จึงทำให้มีอัตราการขยายสูงสุดที่ 7.68 dB

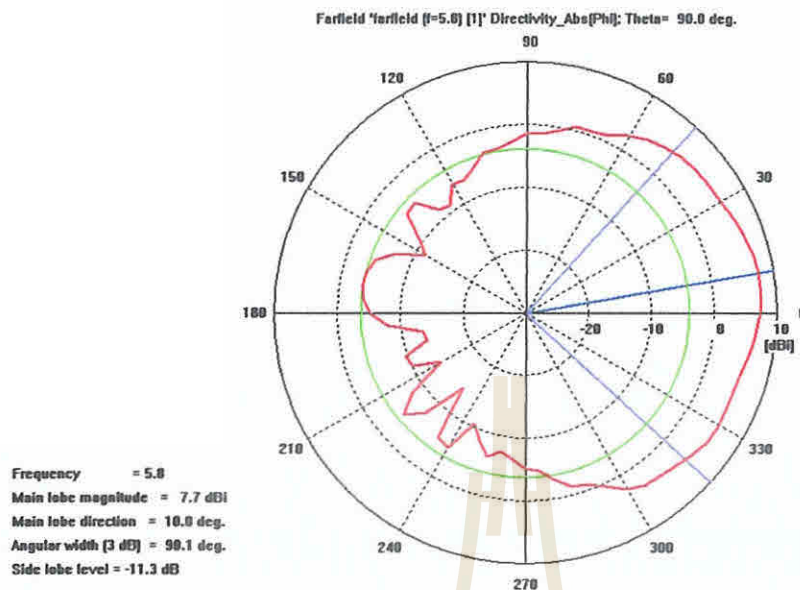


รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายป้อนวิวอลดิ

รูปที่ 3.8 แสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ซึ่งจะพบว่าค่าคลื่นหลักมีอัตราขยายเท่ากับ 7.4 dB โหลบด้านข้างมีอัตราขยายเท่ากับ -4.5 dB ส่วนรูปที่ 3.9 แสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ซึ่งจะพบว่าค่าคลื่นหลักมีอัตราขยายเท่ากับ 7.7 dB โหลบด้านข้างมีอัตราขยายเท่ากับ -11.3 dB



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศป้อนวิวอลดิ

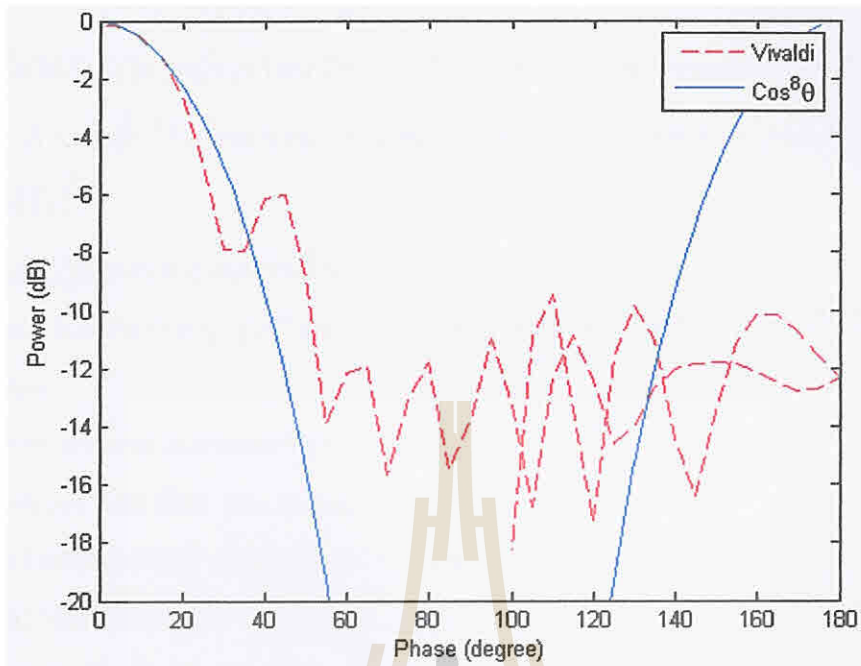


รูปที่ 3.9 แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศป้อนวิวลติ

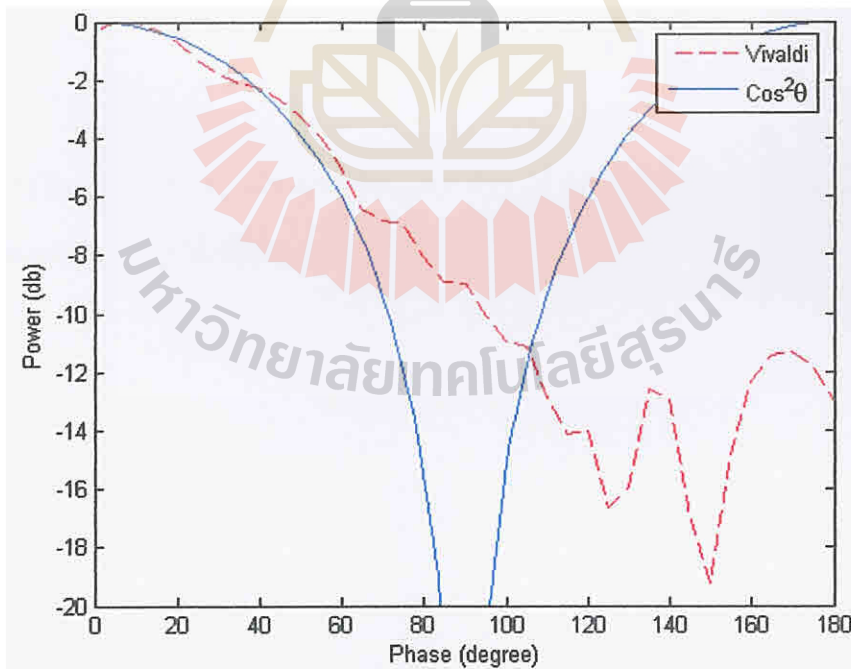
### 3.4 การหาค่ากำลังโคไซน์ของวิวลติ

การหาค่ากำลังโคไซน์ของวิวลติ หาได้จากการนำเอาผลของแบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบในระนาบสนามไฟฟ้า และในระนาบสนามแม่เหล็กมาแบบเปรียบเทียบกับกำลังของโคไซน์ในอันดับต่างๆ ผลที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้า สายอากาศป้อนวิวลติจะได้ค่ากำลังโคไซน์ที่ กำลัง  $8 (\cos^8 \theta)$  ดังรูปที่ 3.10 และในสนามแม่เหล็ก สายอากาศป้อนวิวลติจะได้ค่ากำลังโคไซน์ที่ กำลัง  $2 (\cos^2 \theta)$  รูปที่ 3.11





รูปที่ 3.10 กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวีวอลดีในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)



รูปที่ 3.11 กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวีวอลดีในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)

### 3.5 สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวครึ่ง

เมื่อได้กำลังโคไซน์ของวิวลติสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัวป้อนในหัวข้อ 3.4 แล้ว จากนั้นใช้หลักการของ PO และ PTD มาวิเคราะห์สายอากาศ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้

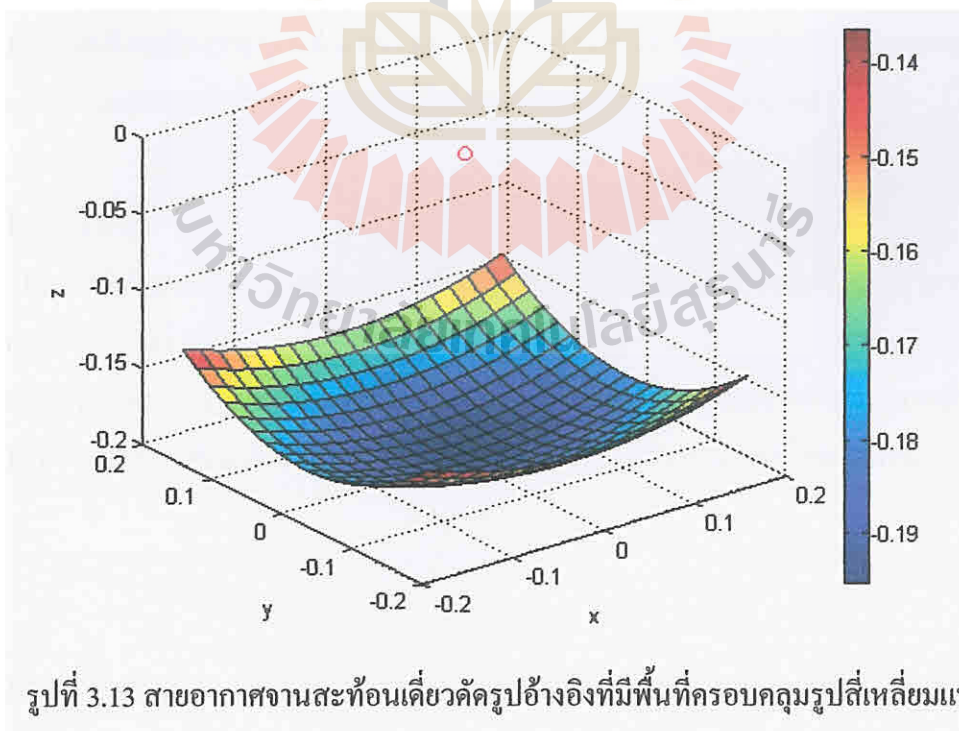
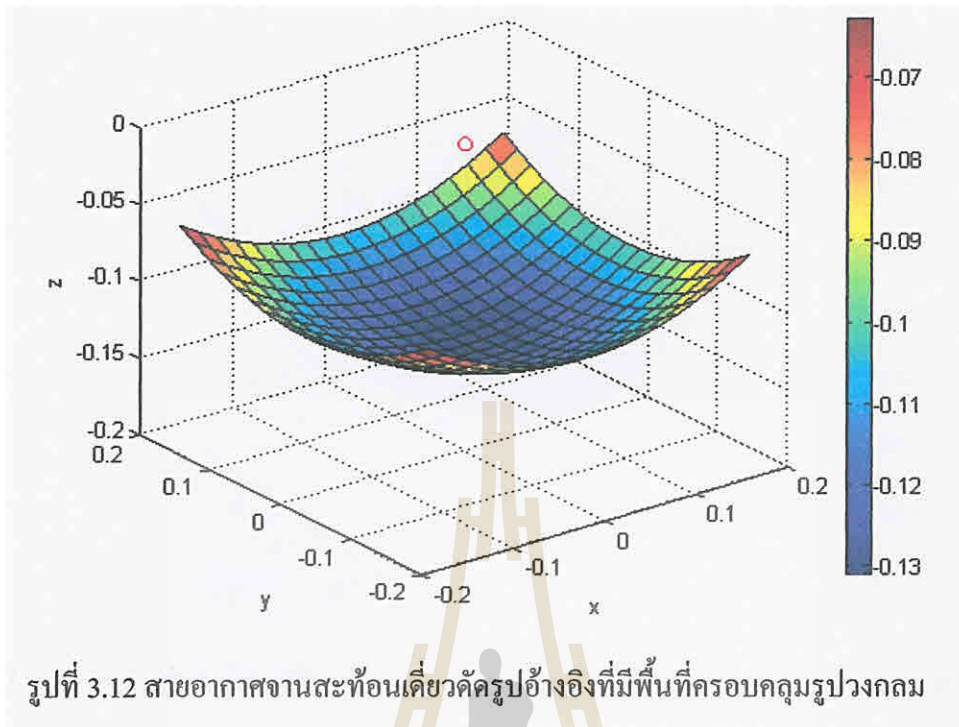
- ความถี่ปฏิบัติการในย่านความถี่ 5.8 GHz
- ลักษณะพื้นที่ครอบคลุมรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย เช่น วงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้งและแนวนอน
- อัตราขยายของระบบสายอากาศ = 20 dB
- ขนาดของงานสะท้อน  $35 \times 35$  cm.
- ระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อน  $f = 12$  cm.
- สายอากาศป้อนวิวลติ

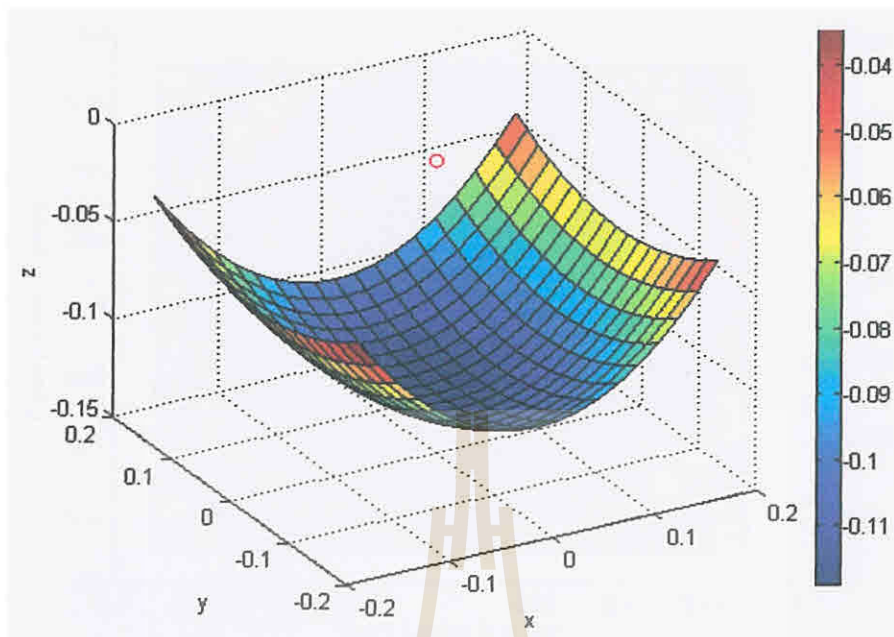
และใช้สมการ(3.2) เพื่อหา  $z_r$  ของงาน

$$z_r(x_r, y_r) = a_1 x_r + a_2 x_r^2 + a_3 x_r^3 + a_4 y_r + a_5 y_r^2 + a_6 y_r^3 + a_7 x_r y_r + a_8 x_r y_r^2 + a_9 y_r x_r^2 + \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} C_{mn} f_m(x) f_n(y) \quad (3.2)$$

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์แล้ว จะได้งานสะท้อนเดี่ยวตัวครึ่งที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปวงกลมรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง และรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน ดังรูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.14







รูปที่ 3.14 สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน

สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปอ้างอิงรูปต่างๆที่ปรากฏดังรูปที่ 3.12, 3.13 และ รูปที่ 3.14 โดยมีการกำหนดให้มุมถึงมีค่าเท่ากับ 0 องศา และเมื่อนำสายอากาศมาวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะมีการระบุถึงตำแหน่งจุดสะท้อนให้สัมพันธ์กับตำแหน่งการวางของแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน จะทำให้เราหาค่าการประวิงเฟสได้ต่อไป

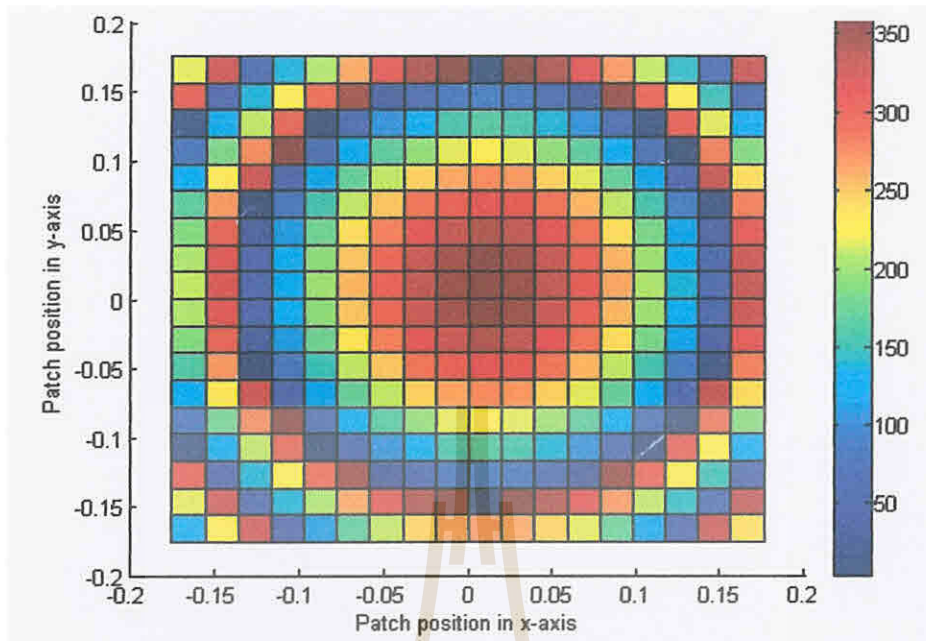
### 3.6 การประวิงเฟส

โดยทั่วไป สายอากาศแถวลำดับสะท้อนใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการประวิงเฟส (Phase Delay) เสมือนตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อน เราสามารถคำนวณหาการประวิงเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางจากตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแล้วสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกลได้ดังนี้

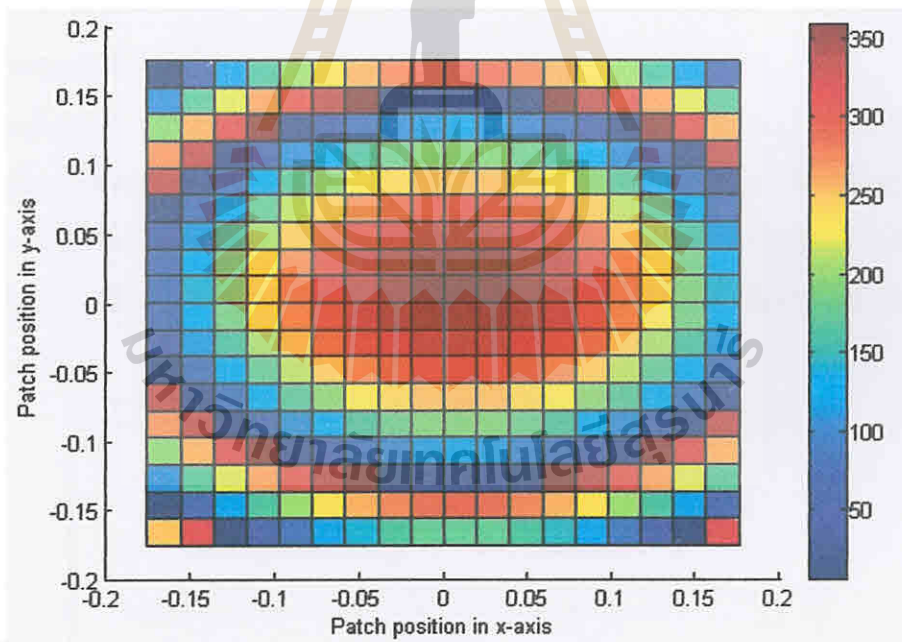
$$\phi = 2k_0 z_r \quad (3.3)$$

เมื่อ  $z_r$  คำนวณได้จากสมการที่ (3.2) ผลการคำนวณหาการประวิงเฟสแสดงดังรูปที่ 3.14 – 3.17

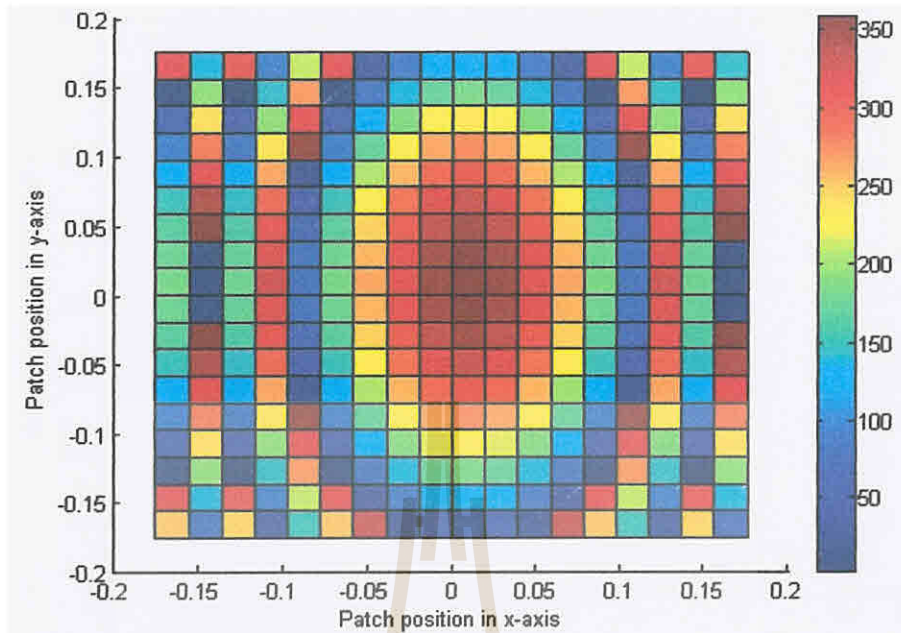




รูปที่ 3.15 การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปวงกลม



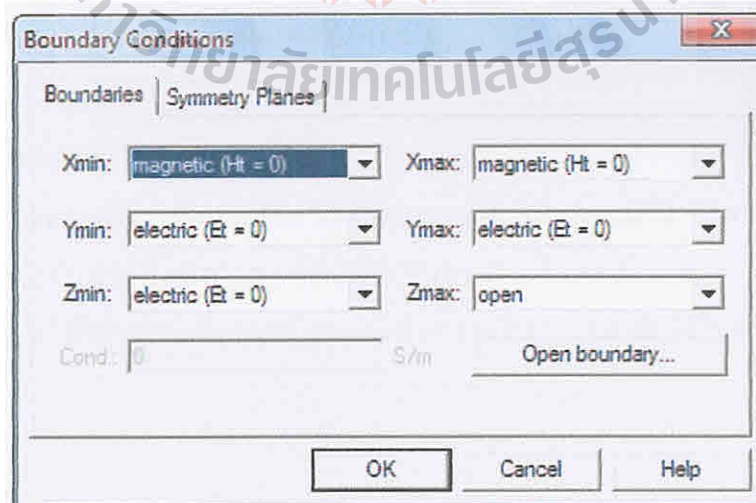
รูปที่ 3.16 การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นสี่เหลี่ยมแนวตั้ง



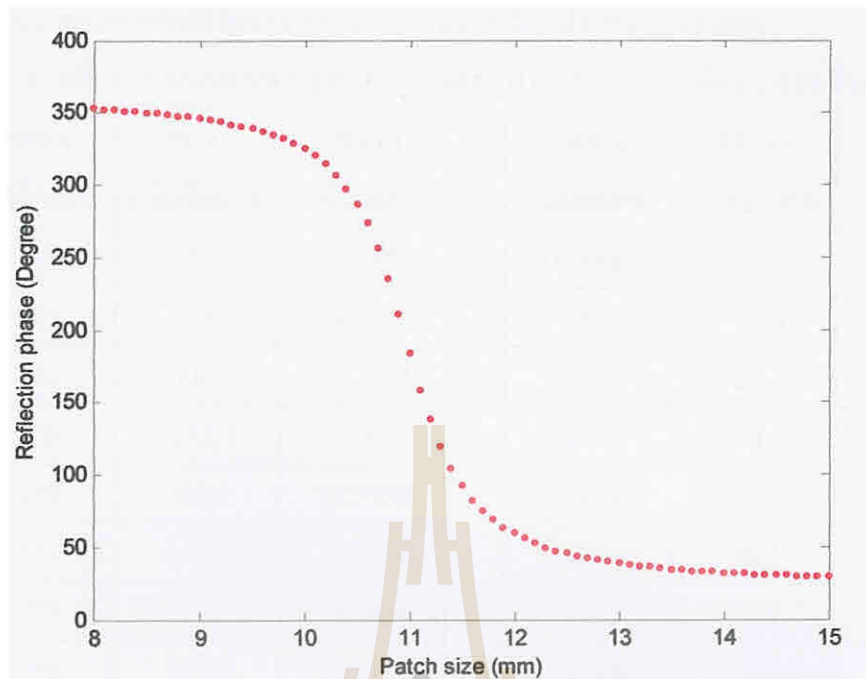
รูปที่ 3.17 การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นสี่เหลี่ยมแนวนอน

### 3.7 คุณลักษณะแผ่นสะท้อน

คุณลักษณะแผ่นสะท้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อนที่ความถี่ 5.8 GHz โดยมีการใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองผล มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.18 และกำหนดค่าความหนาของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นปรีนซ์ FR4 เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และสภาพยอม ( $\epsilon_r$ ) = 4.5



รูปที่ 3.18 การกำหนดพารามิเตอร์



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของลัมประสิทธิ์การสะท้อน  
รวมกับขนาดแผ่นสะท้อน ณ ความถี่ 5.8 GHz

จากรูปที่ 3.19 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนขนาดแพทช์ (Patch) กับ เฟสแผ่นสะท้อน (Reflection phase) พบว่า ที่ ขนาดแพทช์ในช่วง 8 - 10.5 มิลลิเมตร ขนาดเฟสของแผ่นสะท้อนจะมีลักษณะที่คงที่ประมาณ 325 - 350 องศา ในช่วง 10.5 - 11.5 มิลลิเมตร ขนาดของเฟสของแผ่นสะท้อนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ประมาณ 50 - 325 องศา และในช่วง 11.5-15 มิลลิเมตร ขนาดเฟสของแผ่นสะท้อนจะมีลักษณะคงที่ ประมาณ 35 - 50 องศา

### 3.8 ขนาดของแพทช์ (Patch )

เมื่อทำการประวิงเฟสจากหัวข้อ 3.6 โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้ กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของลัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อน ณ ความถี่ 5.8 GHz ดังรูปที่ 3.18 จะทำให้ได้ขนาดของแพทช์ (Patch) ดังตารางที่ 3.2 - 3.4 เพื่อใช้ในการออกแบบ

### 3.8.1 ขนาดแพทช์สายอากาศงานสะท้อนแบบจัตุรัสสี่เหลี่ยมรูปวงกลม

ตารางที่ 3.2 ขนาดแพทช์สายอากาศงานสะท้อนแบบจัตุรัสสี่เหลี่ยมรูปวงกลม

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-175	-175	11.2854	-155.6	-58.3	10.6274
-175	-155.6	10.87499	-155.6	-38.9	10.4110
-175	-136.1	10.3715	-155.6	-19.4	10.2226
-175	-116.7	0	-155.6	0	10.1322
-175	-97.2	11.7270	-155.6	19.4	10.2210
-175	-77.8	11.2768	-155.6	38.9	10.4082
-175	-58.3	11.0834	-155.6	58.3	10.6247
-175	-38.9	10.9752	-155.6	77.8	10.8198
-175	-19.4	10.9117	-155.6	97.2	11.0148
-175	0	10.8897	-155.6	116.7	11.3004
-175	19.4	10.9111	-155.6	136.1	12.4212
-175	38.9	10.9739	-155.6	155.6	10.0271
-175	58.3	11.0814	-155.6	175	10.8233
-175	77.8	11.2732	-136.1	-175	10.0778
-175	97.2	11.7135	-136.1	-155.6	12.0966
-175	116.7	0	-136.1	-136.1	11.1950
-175	136.1	10.3577	-136.1	-116.7	10.8945
-175	155.6	10.8694	-136.1	-97.2	10.6016
-175	175	11.2775	-136.1	-77.8	10.0420
-155.6	-175	10.8288	-136.1	-58.3	0
-155.6	-155.6	10.045	-136.1	-38.9	14.6616
-155.6	-136.1	12.4767	-136.1	-19.4	12.4413
-155.6	-116.7	11.3064	-136.1	0	12.2175
-155.6	-97.2	11.0177	-136.1	19.4	12.4343
-155.6	-77.8	10.8222	-136.1	38.9	14.5528



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-136.1	58.3	0
-136.1	77.8	10.0300
-136.1	97.2	10.5971
-136.1	116.7	10.8913
-136.1	136.1	11.1904
-136.1	155.6	12.0675
-136.1	175	10.0511
-116.7	-175	12.6856
-116.7	-155.6	11.2068
-116.7	-136.1	10.8588
-116.7	-116.7	10.24437
-116.7	-97.2	0
-116.7	-77.8	12.5845
-116.7	-58.3	11.5935
-116.7	-19.4	11.2561
-116.7	0	11.2269
-116.7	19.4	11.2555
-116.7	38.9	11.3531
-116.7	58.3	11.5900
-116.7	77.8	12.5563
-116.7	97.2	0
-116.7	116.7	10.4375
-116.7	136.1	10.8556
-116.7	155.6	11.2022
-116.7	175	12.6190
-97.2	-175	11.3519
-97.2	-155.6	10.9171

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-97.2	-136.1	10.4768
-97.2	-116.7	0.0000
-97.2	-97.2	11.9235
-97.2	-77.8	11.3421
-97.2	-58.3	11.1322
-97.2	-38.9	11.0171
-97.2	-19.4	10.9532
-97.2	0	10.9320
-97.2	19.4	10.9529
-97.2	38.9	11.0163
-97.2	58.3	11.1318
-97.2	77.8	11.3396
-97.2	97.2	11.9127
-97.2	116.7	0.0000
-97.2	136.1	10.4708
-97.2	155.6	10.9143
-97.2	175	11.3465
-77.8	-175	11.0637
-77.8	-155.6	10.6641
-77.8	-136.1	9.0311
-77.8	-116.7	12.0432
-77.8	-97.2	11.3008
-77.8	-77.8	11.0580
-77.8	-58.3	10.9087
-77.8	-38.9	10.7957
-77.8	-19.4	10.7164
-77.8	0	10.6875

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-77.8	19.4	10.7160	-58.3	175	10.8928
-77.8	38.9	10.7950	-38.9	-175	10.7608
-77.8	58.3	10.9079	-38.9	-155.6	9.5426
-77.8	77.8	11.0569	-38.9	-136.1	11.9607
-77.8	97.2	11.2987	-38.9	-116.7	11.2260
-77.8	116.7	12.0310	-38.9	-97.2	10.9598
-77.8	136.1	8.3834	-38.9	-77.8	10.7544
-77.8	155.6	10.6608	-38.9	-58.3	10.5238
-77.8	175	11.0611	-38.9	-38.9	10.2424
-58.3	-175	10.8948	-38.9	-19.4	9.9141
-58.3	-155.6	10.2997	-38.9	0	9.7228
-58.3	-136.1	14.7908	-38.9	19.4	9.9132
-58.3	-116.7	11.4181	-38.9	38.9	10.2416
-58.3	-97.2	11.0820	-38.9	58.3	10.5230
-58.3	-77.8	10.8891	-38.9	77.8	10.7537
-58.3	-58.3	10.7193	-38.9	97.2	10.9592
-58.3	-38.9	10.5512	-38.9	116.7	11.2250
-58.3	-19.4	10.4096	-38.9	136.1	11.9553
-58.3	0	10.4371	-38.9	155.6	9.5302
-58.3	19.4	10.4091	-38.9	175	10.7594
-58.3	38.9	10.5504	-19.4	-175	10.6627
-58.3	58.3	10.7185	-19.4	-155.6	0.0000
-58.3	77.8	10.8882	-19.4	-136.1	11.6294
-58.3	97.2	11.0809	-19.4	-116.7	11.1291
-58.3	116.7	11.4151	-19.4	-97.2	10.8863
-58.3	136.1	14.6058	-19.4	-77.8	10.6550
-58.3	155.6	10.2951	-19.4	-58.3	10.3404

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-19.4	-38.9	9.8399
-19.4	-19.4	8.8795
-19.4	0	8.0459
-19.4	19.4	8.8481
-19.4	38.9	9.8390
-19.4	58.3	10.3399
-19.4	77.8	10.6547
-19.4	97.2	10.8861
-19.4	116.7	11.1287
-19.4	136.1	11.6281
-19.4	155.6	0.0000
-19.4	175	10.6620
0	-175	10.6229
0	-155.6	0.0000
0	-136.1	11.5510
0	-116.7	11.0962
0	-97.2	10.8588
0	-77.8	10.6155
0	-38.9	9.5679
0	-19.4	0.0000
0	0	0.0000
0	19.4	0.0000
0	38.9	9.5685
0	58.3	11.2637
0	77.8	140.6157
0	97.2	10.8589
0	116.7	11.0963

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
0	136.1	11.5515
0	155.6	0.0000
0	175	10.6233
19.4	-175	10.6554
19.4	-155.6	0.0000
19.4	-136.1	11.6126
19.4	-116.7	11.1231
19.4	-97.2	10.8816
19.4	-77.8	40.6483
19.4	-58.3	10.3273
19.4	-38.9	9.8052
19.4	-19.4	8.7631
19.4	0	0.0000
19.4	19.4	8.7664
19.4	38.9	9.8068
19.4	58.3	10.3282
19.4	77.8	10.6490
19.4	97.2	10.8821
19.4	116.7	11.1240
19.4	155.6	0.0000
19.4	175	10.6569
38.9	-175	10.7490
38.9	-155.6	9.4139
38.9	-136.1	11.9047
38.9	-116.7	11.2137
38.9	-97.2	10.9510
38.9	-77.8	10.7435



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
38.9	-58.3	10.5071
38.9	-38.9	10.2177
38.9	-19.4	9.8482
38.9	0	9.6337
38.9	19.4	9.8497
38.9	38.9	10.2188
38.9	58.3	10.5181
38.9	77.8	10.7444
38.9	97.2	10.9519
38.9	116.7	11.2152
38.9	136.1	11.9125
38.9	155.6	9.4354
38.9	175	10.7511
58.3	-175	10.8797
58.3	-155.6	10.2590
58.3	-136.1	13.7342
58.3	-116.7	11.3909
58.3	-97.2	11.0683
58.3	-77.8	10.8751
58.3	-58.3	10.7032
58.3	-38.9	10.5266
58.3	-19.4	10.3741
58.3	0	10.3098
58.3	19.4	10.3749
58.3	38.9	10.5276
58.3	58.3	10.7042
58.3	77.8	10.5762

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
58.3	97.2	11.0696
58.3	116.7	11.3936
58.3	136.1	13.8300
58.3	155.6	10.2651
58.3	175	10.8822
77.8	-175	11.0443
77.8	-155.6	10.6356
77.8	-136.1	8.4718
77.8	-116.7	11.9259
77.8	-97.2	11.2764
77.8	-77.8	11.0401
77.8	-58.3	10.8910
77.8	-38.9	10.7747
77.8	-19.4	10.6947
77.8	0	10.6626
77.8	19.4	10.6953
77.8	38.9	10.7755
77.8	58.3	10.8921
77.8	77.8	11.0415
77.8	97.2	11.2787
77.8	116.7	11.9383
77.8	136.1	8.5649
77.8	155.6	10.6398
77.8	175	11.0474
97.2	-175	11.3111
97.2	-155.6	10.8936
97.2	-136.1	10.4211



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
97.2	-116.7	0.0000
97.2	-97.2	11.8074
97.2	-77.8	11.3043
97.2	-58.3	11.1050
97.2	-38.9	10.9956
97.2	-19.4	10.9326
97.2	0	10.9118
97.2	19.4	10.9330
97.2	38.9	10.9964
97.2	58.3	11.1067
97.2	77.8	11.3072
97.2	97.2	11.8179
97.2	116.7	0.0000
97.2	136.1	10.4282
97.2	155.6	10.8972
97.2	175	11.3177
116.7	-175	12.2865
116.7	-155.6	11.1700
116.7	-136.1	10.8295
116.7	-116.7	10.3724
116.7	-97.2	0.0000
116.7	-77.8	12.2557
116.7	-58.3	11.5228
116.7	-38.9	11.3109
116.7	-19.4	11.2221
116.7	0	11.1938
116.7	19.4	11.2228

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
116.7	38.9	11.3126
116.7	58.3	11.5269
116.7	77.8	12.2719
116.7	97.2	0.0000
116.7	116.7	10.3815
116.7	136.1	10.8332
116.7	155.6	11.1752
116.7	175	12.3340
136.1	-175	9.8525
136.1	-155.6	11.8857
136.1	-136.1	11.1530
136.1	-116.7	10.8609
136.1	-97.2	10.5420
136.1	-77.8	9.8232
136.1	-58.3	0.0000
136.1	-38.9	13.1209
136.1	-19.4	12.1544
136.1	0	11.9954
136.1	19.4	12.1593
136.1	38.9	13.1544
136.1	58.3	0.0000
136.1	77.8	9.8420
136.1	97.2	10.5476
136.1	116.7	10.8646
136.1	136.1	11.1583
136.1	155.6	11.9110
136.1	175	9.8953

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
155.6	-175	10.7868
155.6	-155.6	9.7821
155.6	-136.1	12.1121
155.6	-116.7	11.2560
155.6	-97.2	10.9820
155.6	-77.8	10.7826
155.6	-58.3	10.5683
155.6	-38.9	10.3112
155.6	-19.4	10.0697
155.6	0	9.9350
155.6	19.4	10.0769
155.6	38.9	10.3151
155.6	58.3	10.5721
155.6	77.8	10.7859
155.6	97.2	10.9852
155.6	116.7	11.2613
155.6	136.1	12.1510
155.6	155.6	9.8298
155.6	175	10.7942

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y ( มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
175	-175	11.2278
175	-155.6	10.8305
175	-136.1	10.2488
175	-116.7	0.0000
175	-97.2	11.5839
175	-77.8	11.2234
175	-58.3	11.0439
175	-38.9	10.9376
175	-19.4	10.8730
175	0	10.8508
175	19.4	10.8738
175	38.9	10.9391
175	58.3	11.0462
175	77.8	11.2274
175	97.2	11.5940
175	116.7	0.0000
175	136.1	10.2638
175	155.6	10.8368
175	175	11.2369

### 3.8.2 ขนาดของแพทช์สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

#### 3.8.2.1 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง

ตารางที่ 3.3 ขนาดของแพทช์สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

แนวตั้ง

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-175	-175	10.7238	-155.6	-97.2	9.9171
-175	-155.6	0.0000	-155.6	-77.8	0.0000
-175	-136.1	11.3814	-155.6	-58.3	11.6918
-175	-116.7	10.9600	-155.6	-38.9	11.3633
-175	-97.2	10.6262	-155.6	-19.4	11.2446
-175	-77.8	9.8729	-155.6	0	11.2093
-175	-58.3	0.0000	-155.6	19.4	11.2442
-175	-38.9	12.2739	-155.6	38.9	11.3624
-175	-19.4	11.7731	-155.6	58.3	11.6886
-175	0	11.6697	-155.6	77.8	0.0000
-175	19.4	11.7717	-155.6	97.2	9.9066
-175	38.9	12.2687	-155.6	116.7	10.7088
-175	58.3	0.0000	-155.6	136.1	11.0678
-175	77.8	9.8623	-155.6	155.6	11.8650
-175	97.2	10.6237	-155.6	175	10.2457
-175	116.7	10.9580	-136.1	-175	0.0000
-175	136.1	11.3773	-136.1	-155.6	11.3134
-175	155.6	0.0000	-136.1	-136.1	10.8677
-175	175	10.7198	-136.1	-116.7	10.3020
-155.6	-175	10.2542	-136.1	-97.2	0.0000
-155.6	-155.6	11.8777	-136.1	-77.8	11.6220
-155.6	-136.1	11.0700	-136.1	-58.3	11.2538
-155.6	-116.7	10.7111	-136.1	-38.9	11.0867



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-136.1	-19.4	11.0074
-136.1	0	10.9815
-136.1	19.4	11.0071
-136.1	38.9	11.0861
-136.1	58.3	11.2527
-136.1	77.8	11.6182
-136.1	97.2	0.0000
-136.1	116.7	10.2972
-136.1	136.1	10.8657
-136.1	155.6	11.3094
-136.1	175	0.0000
-116.7	-175	12.3785
-116.7	-155.6	11.0841
-116.7	-136.1	10.6560
-116.7	-116.7	8.3184
-116.7	-97.2	11.8676
-116.7	-77.8	11.2639
-116.7	-58.3	11.0415
-116.7	-38.9	10.9125
-116.7	-19.4	10.8311
-116.7	0	10.8036
-116.7	19.4	10.8309
-116.7	38.9	10.9120
-116.7	58.3	11.0408
-116.7	77.8	11.2626
-116.7	97.2	11.8617
-116.7	116.7	8.2526

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-116.7	136.1	10.6534
-116.7	155.6	11.0821
-116.7	175	12.3505
-97.2	-175	11.5611
-97.2	-155.6	10.9363
-97.2	-136.1	10.3492
-97.2	-116.7	14.7860
-97.2	-97.2	11.4022
-97.2	-77.8	11.0763
-97.2	-58.3	10.8948
-97.2	-38.9	10.7507
-97.2	-19.4	10.6441
-97.2	0	10.6046
-97.2	19.4	10.6438
-97.2	38.9	10.7502
-97.2	58.3	10.8942
-97.2	77.8	11.0775
-97.2	97.2	11.4000
-97.2	116.7	14.6230
-97.2	136.1	10.3446
-97.2	155.6	10.9346
-97.2	175	11.5555
-77.8	-175	11.3110
-77.8	-155.6	10.8116
-77.8	-136.1	9.7362
-77.8	-116.7	11.9655
-77.8	-97.2	11.2172



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-77.8	-77.8	10.9552	-58.3	77.8	10.8596
-77.8	-58.3	10.7620	-58.3	97.2	11.0950
-77.8	-38.9	10.5739	-58.3	116.7	11.5674
-77.8	-19.4	10.4054	-58.3	136.1	0.0000
-77.8	0	10.3282	-58.3	155.6	10.6953
-77.8	19.4	10.4050	-58.3	175	11.1805
-77.8	38.9	10.5733	-38.9	-175	11.0962
-77.8	58.3	10.7614	-38.9	-155.6	10.5941
-77.8	77.8	10.9545	-38.9	-136.1	0.0000
-77.8	97.2	11.2160	-38.9	-116.7	11.4104
-77.8	116.7	11.9591	-38.9	-97.2	11.0275
-77.8	136.1	9.7224	-38.9	-77.8	10.7876
-77.8	155.6	10.8100	-38.9	-58.3	10.5143
-77.8	175	11.3080	-38.9	-38.9	10.1363
-58.3	-175	11.1824	-38.9	-19.4	9.4940
-58.3	-155.6	10.6972	-38.9	0	9.0399
-58.3	-136.1	0.0000	-38.9	19.4	9.4926
-58.3	-116.7	11.5697	-38.9	38.9	10.1354
-58.3	-97.2	11.0957	-38.9	58.3	10.5138
-58.3	-77.8	10.8601	-38.9	77.8	10.7871
-58.3	-58.3	10.6339	-38.9	97.2	11.0270
-58.3	-38.9	10.3587	-38.9	116.7	11.4090
-58.3	-19.4	10.0797	-38.9	136.1	0.0000
-58.3	0	9.9121	-38.9	155.6	10.5922
-58.3	19.4	10.0789	-38.9	175	11.0950
-58.3	38.9	10.3579	-19.4	-175	11.0511
-58.3	58.3	10.6333	-19.4	-155.6	10.5168

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-19.4	-136.1	0.0000
-19.4	-116.7	11.3392
-19.4	-97.2	10.9870
-19.4	-77.8	10.7379
-19.4	-58.3	10.4211
-19.4	-38.9	9.8865
-19.4	-19.4	8.6422
-19.4	0	0.0000
-19.4	19.4	8.6403
-19.4	38.9	9.8855
-19.4	58.3	10.4207
-19.4	77.8	10.7376
-19.4	97.2	10.9866
-19.4	116.7	11.3385
-19.4	136.1	0.0000
-19.4	155.6	10.5155
-19.4	175	11.0543
0	-175	11.0413
0	-155.6	10.4885
0	-136.1	0.0000
0	-116.7	11.3160
0	-97.2	10.9737
0	-77.8	10.7212
0	-58.3	10.3858
0	-38.9	9.7695
0	-19.4	8.0488
0	0	0.0000

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
0	19.4	8.0475
0	38.9	9.7690
0	58.3	10.3855
0	77.8	10.7211
0	97.2	10.9735
0	116.7	11.3156
0	136.1	14.9758
0	155.6	10.4875
0	175	11.0408
19.4	-175	11.0548
19.4	-155.6	10.5161
19.4	-136.1	0.0000
19.4	-116.7	11.3387
19.4	-97.2	10.9867
19.4	-77.8	10.7376
19.4	-58.3	10.4207
19.4	-38.9	9.8853
19.4	-19.4	8.6387
19.4	0	0.0000
19.4	19.4	8.6391
19.4	38.9	9.8855
19.4	58.3	10.4207
19.4	77.8	10.7377
19.4	97.2	10.9867
19.4	116.7	11.3387
19.4	136.1	0.0000
19.4	155.6	10.5159

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
19.4	175	11.0546	58.3	-38.9	10.3573
38.9	-175	11.0954	58.3	-19.4	10.0777
38.9	-155.6	10.5928	58.3	0	9.9105
38.9	-136.1	0.0000	58.3	19.4	10.0782
38.9	-116.7	11.4092	58.3	38.9	10.3578
38.9	-97.2	11.0270	58.3	58.3	10.6334
38.9	-77.8	10.7870	58.3	77.8	10.8598
38.9	-58.3	10.5136	58.3	97.2	11.0953
38.9	-38.9	10.1349	58.3	116.7	11.5686
38.9	-19.4	9.4908	58.3	136.1	0.0000
38.9	0	9.0364	58.3	155.6	10.6963
38.9	19.4	9.4915	58.3	175	11.1816
38.9	38.9	10.1354	77.8	-175	11.3084
38.9	58.3	10.5139	77.8	-155.6	10.8101
38.9	77.8	10.7873	77.8	-136.1	9.7224
38.9	97.2	11.0272	77.8	-116.7	11.9585
38.9	116.7	11.4097	77.8	-97.2	11.2158
38.9	136.1	0.0000	77.8	-77.8	10.9543
38.9	155.6	10.5932	77.8	-58.3	10.7611
38.9	175	11.0956	77.8	-38.9	10.5728
58.3	-175	10.1809	77.8	-19.4	10.4042
58.3	-155.6	10.6956	77.8	0	10.3271
58.3	-136.1	0.0000	77.8	19.4	10.4045
58.3	-116.7	11.5674	77.8	38.9	10.5732
58.3	-97.2	11.0949	77.8	58.3	10.7615
58.3	-77.8	10.8595	77.8	77.8	10.9548
58.3	-58.3	10.6331	77.8	97.2	11.2166



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
77.8	116.7	11.9626
77.8	136.1	9.7306
77.8	155.6	10.8109
77.8	175	11.3099
97.2	-175	11.5558
97.2	-155.6	10.9345
97.2	-136.1	10.3442
97.2	-116.7	14.5966
97.2	-97.2	11.3995
97.2	-77.8	11.0752
97.2	-58.3	10.8938
97.2	-38.9	10.7497
97.2	-19.4	10.6432
97.2	0	10.6040
97.2	19.4	10.6434
97.2	38.9	10.7501
97.2	58.3	10.8943
97.2	77.8	11.0758
97.2	97.2	11.4011
97.2	116.7	14.7149
97.2	136.1	10.3474
97.2	155.6	10.9357
97.2	175	11.5592
116.7	-175	12.3502
116.7	-155.6	110.8190
116.7	-136.1	10.6529
116.7	-116.7	8.2365

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
116.7	-97.2	11.8595
116.7	-77.8	11.2620
116.7	-58.3	11.0403
116.7	-38.9	10.9115
116.7	-19.4	10.8303
116.7	0	10.8030
116.7	19.4	10.8305
116.7	38.9	10.9119
116.7	58.3	11.0409
116.7	77.8	11.2631
116.7	97.2	11.8644
116.7	116.7	8.2874
116.7	136.1	10.6550
116.7	155.6	11.0834
116.7	175	12.3694
136.1	-175	0.0000
136.1	-155.6	11.3088
136.1	-136.1	10.8652
136.1	-116.7	10.2956
136.1	-97.2	0.0000
136.1	-77.8	11.6158
136.1	-58.3	11.2518
136.1	-38.9	11.0854
136.1	-19.4	11.0064
136.1	0	10.9808
136.1	19.4	11.0007
136.1	38.9	11.0859



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
136.1	58.3	11.2528
136.1	77.8	11.6139
136.1	97.2	0.0000
136.1	116.7	10.2997
136.1	136.1	10.8669
136.1	155.6	11.3120
136.1	175	0.0000
155.6	-175	10.2444
155.6	-155.6	11.8621
155.6	-136.1	11.0671
155.6	-116.7	10.7078
155.6	-97.2	9.9007
155.6	-77.8	14.9640
155.6	-58.3	11.6853
155.6	-38.9	11.3607
155.6	-19.4	11.2429
155.6	0	11.2080
155.6	19.4	11.2433
155.6	38.9	11.3617
155.6	58.3	11.6885
155.6	77.8	0.0000
155.6	97.2	9.9108
155.6	116.7	10.7099

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
155.6	136.1	11.0691
155.6	155.6	11.8731
155.6	175	10.2514
175	-175	10.7189
175	-155.6	0.0000
175	-136.1	11.3756
175	-116.7	10.9570
175	-97.2	10.6220
175	-77.8	9.8530
175	-58.3	0.0000
175	-38.9	12.2591
175	-19.4	11.7668
175	0	11.6654
175	19.4	11.7682
175	38.9	12.2646
175	58.3	0.0000
175	77.8	9.8639
175	97.2	10.6245
175	116.7	10.9589
175	136.1	11.3795
175	155.6	0.0000
175	175	10.7224

### 3.8.2.2 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจตุรรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวนอน

ตารางที่ 3.4 ขนาดของแพทช์สายอากาศงานสะท้อนแบบจตุรรูปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

แนวนอน

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-175	-175	10.7243	-155.6	-77.8	10.2269
-175	-155.6	10.2349	-155.6	-58.3	9.5385
-175	-136.1	0.0000	-155.6	-38.9	0.0000
-175	-116.7	12.2064	-155.6	-19.4	0.0000
-175	-97.2	11.4997	-155.6	0	0.0000
-175	-77.8	11.2733	-155.6	19.4	0.0000
-175	-58.3	11.1449	-155.6	38.9	0.0000
-175	-38.9	11.0650	-155.6	58.3	9.5448
-175	-19.4	11.0230	-155.6	77.8	10.2286
-175	0	11.0090	-155.6	97.2	10.5478
-175	19.4	11.0320	-155.6	116.7	10.7724
-175	38.9	11.0654	-155.6	136.1	10.9613
-175	58.3	11.1457	-155.6	155.6	11.1901
-175	77.8	11.2743	-155.6	175	11.6419
-175	97.2	11.5017	-136.1	-175	10.7499
-175	116.7	11.2123	-136.1	-155.6	10.2949
-175	136.1	0.0000	-136.1	-136.1	0.0000
-175	155.6	10.2358	-136.1	-116.7	12.4092
-175	175	10.7242	-136.1	-97.2	11.5557
-155.6	-175	11.6433	-136.1	-77.8	11.3014
-155.6	-155.6	11.1901	-136.1	-58.3	11.1716
-155.6	-136.1	10.9610	-136.1	-38.9	11.0858
-155.6	-116.7	10.7717	-136.1	-19.4	11.0438
-155.6	-97.2	10.5466	-136.1	0	11.0298

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-136.1	19.4	11.0439	-116.7	175	14.6588
-136.1	38.9	11.0861	-97.2	-175	11.1347
-136.1	58.3	11.1721	-97.2	-155.6	10.8912
-136.1	77.8	11.3022	-97.2	-136.1	10.6394
-136.1	97.2	11.5690	-97.2	-116.7	10.2224
-136.1	116.7	12.4138	-97.2	-97.2	8.0624
-136.1	136.1	0.0000	-97.2	-77.8	0.0000
-136.1	155.6	10.2943	-97.2	-58.3	12.2835
-136.1	175	10.7491	-97.2	-38.9	11.8179
-116.7	-175	14.7841	-97.2	-19.4	11.6509
-116.7	-155.6	11.5139	-97.2	0	11.6012
-116.7	-136.1	11.1693	-97.2	19.4	11.6513
-116.7	-116.7	10.9724	-97.2	38.9	11.8188
-116.7	-97.2	10.8173	-97.2	58.3	12.2852
-116.7	-77.8	10.6592	-97.2	77.8	0.0000
-116.7	-58.3	10.4869	-97.2	97.2	8.0690
-116.7	-38.9	10.3005	-97.2	116.7	10.2223
-116.7	-19.4	10.1678	-97.2	136.1	10.6389
-116.7	0	10.1004	-97.2	155.6	10.8904
-116.7	19.4	10.1684	-97.2	175	11.1331
-116.7	38.9	10.3013	-77.8	-175	10.7232
-116.7	58.3	10.4876	-77.8	-155.6	10.2321
-116.7	77.8	10.6597	-77.8	-136.1	0.0000
-116.7	97.2	10.8176	-77.8	-116.7	12.1964
-116.7	116.7	10.9726	-77.8	-97.2	11.4968
-116.7	136.1	11.1692	-77.8	-77.8	11.2714
-116.7	155.6	11.5126	-77.8	-58.3	11.1429



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)	แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-77.8	-38.9	11.0633	-58.3	116.7	11.2410
-77.8	-19.4	11.0212	-58.3	136.1	11.5847
-77.8	0	11.0072	-58.3	155.6	14.5430
-77.8	19.4	11.0213	-58.3	175	9.8804
-77.8	38.9	11.0635	-38.9	-175	0.0000
-77.8	58.3	11.1431	-38.9	-155.6	11.5712
-77.8	77.8	11.2715	-38.9	-136.1	11.1966
-77.8	97.2	11.4968	-38.9	-116.7	10.9930
-77.8	116.7	12.1945	-38.9	-97.2	10.8392
-77.8	136.1	0.0000	-38.9	-77.8	10.6907
-77.8	155.6	10.2293	-38.9	-58.3	10.5291
-77.8	175	10.7213	-38.9	-38.9	10.3627
-58.3	-175	9.8951	-38.9	-19.4	10.2402
-58.3	-155.6	14.6710	-38.9	0	10.2004
-58.3	-136.1	11.5867	-38.9	19.4	10.2403
-58.3	-116.7	11.2416	-38.9	38.9	10.3627
-58.3	-97.2	11.0549	-38.9	58.3	10.5290
-58.3	-77.8	10.9307	-38.9	77.8	10.6804
-58.3	-58.3	10.8308	-38.9	97.2	10.8389
-58.3	-38.9	10.7508	-38.9	116.7	10.9924
-58.3	-19.4	10.6997	-38.9	136.1	11.1953
-58.3	0	10.6788	-38.9	155.6	11.5673
-58.3	19.4	10.6997	-38.9	175	0.0000
-58.3	38.9	10.7509	-19.4	-175	12.0602
-58.3	58.3	10.8309	-19.4	-155.6	11.3052
-58.3	77.8	10.9304	-19.4	-136.1	11.0456
-58.3	97.2	11.0547	-19.4	-116.7	10.8648



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-19.4	-97.2	10.6854
-19.4	-77.8	10.4616
-19.4	-58.3	10.1832
-19.4	-38.9	9.7063
-19.4	-19.4	9.1058
-19.4	0	8.7478
-19.4	19.4	9.1053
-19.4	38.9	9.7055
-19.4	58.3	10.1825
-19.4	77.8	10.4610
-19.4	97.2	10.6847
-19.4	116.7	10.8640
-19.4	136.1	11.0444
-19.4	155.6	11.3023
-19.4	175	12.0432
0	-175	11.8121
0	-155.6	11.2467
0	-136.1	11.0023
0	-116.7	10.8199
0	-97.2	10.6209
0	-77.8	10.3487
0	-58.3	9.9390
0	-38.9	9.0797
0	-19.4	0.0000
0	0	0.0000
0	19.4	0.0000
0	38.9	9.0766

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
0	58.3	9.9373
0	77.8	10.3475
0	97.2	10.6199
0	116.7	10.8189
0	136.1	11.0009
0	155.6	11.2441
0	175	11.7992
19.4	-175	12.0628
19.4	-155.6	11.6058
19.4	-136.1	11.0458
19.4	-116.7	10.8651
19.4	-97.2	10.6857
19.4	-77.8	10.4620
19.4	-58.3	10.1838
19.4	-38.9	9.7072
19.4	-19.4	9.1067
19.4	0	8.7483
19.4	19.4	9.1050
19.4	38.9	9.7051
19.4	58.3	10.1822
19.4	77.8	10.4607
19.4	97.2	10.6845
19.4	116.7	10.8639
19.4	136.1	11.0442
19.4	155.6	11.3021
19.4	175	12.0421
38.9	-175	0.0000

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
38.9	-155.6	11.5730
38.9	-136.1	11.1973
38.9	-116.7	10.9934
38.9	-97.2	10.8396
38.9	-77.8	10.6911
38.9	-58.3	10.5269
38.9	-38.9	10.3632
38.9	-19.4	10.2405
38.9	0	10.2005
38.9	19.4	10.2402
38.9	38.9	10.6324
38.9	58.3	10.5288
38.9	77.8	10.6802
38.9	97.2	10.8387
38.9	116.7	10.9922
38.9	136.1	11.1950
38.9	155.6	11.5665
38.9	175	0.0000
58.3	-175	9.9036
58.3	-155.6	14.7968
58.3	-136.1	11.5890
58.3	-116.7	11.2425
58.3	-97.2	11.0555
58.3	-77.8	10.9312
58.3	-58.3	10.8312
58.3	-38.9	10.7511
58.3	-19.4	10.6999

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
58.3	0	10.6788
58.3	19.4	10.6997
58.3	38.9	10.7508
58.3	58.3	10.8307
58.3	77.8	10.9304
58.3	97.2	11.0544
58.3	116.7	11.2405
58.3	136.1	11.5835
58.3	155.6	14.5041
58.3	175	9.8765
77.8	-175	10.7251
77.8	-155.6	10.2358
77.8	-136.1	0.0000
77.8	-116.7	12.2041
77.8	-97.2	11.4985
77.8	-77.8	11.2422
77.8	-58.3	11.1435
77.8	-38.9	11.0637
77.8	-19.4	11.0214
77.8	0	11.0073
77.8	19.4	11.0213
77.8	38.9	11.0633
77.8	58.3	11.1428
77.8	77.8	11.2710
77.8	97.2	11.4959
77.8	116.7	12.1905
77.8	136.1	0.0000

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
77.8	155.6	10.2276
77.8	175	10.7206
97.2	-175	11.1371
97.2	-155.6	10.8929
97.2	-136.1	10.6415
97.2	-116.7	10.2258
97.2	-97.2	8.1128
97.2	-77.8	0.0000
97.2	-58.3	12.2882
97.2	-38.9	11.8199
97.2	-19.4	11.6518
97.2	0	11.6015
97.2	19.4	11.6511
97.2	38.9	11.8178
97.2	58.3	12.2827
97.2	77.8	0.0000
97.2	97.2	8.0422
97.2	116.7	10.2205
97.2	136.1	10.6379
97.2	155.6	10.8896
97.2	175	11.1321
116.7	-175	0.0000
116.7	-155.6	11.5192
116.7	-136.1	11.1715
116.7	-116.7	10.9738
116.7	-97.2	10.8185
116.7	-77.8	10.6606

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
116.7	-58.3	10.4886
116.7	-38.9	10.3020
116.7	-19.4	10.1692
116.7	0	10.1009
116.7	19.4	10.1681
116.7	38.9	10.3006
116.7	58.3	10.4867
116.7	77.8	10.6590
116.7	97.2	10.8169
116.7	116.7	10.9719
116.7	136.1	11.1681
116.7	155.6	11.5102
116.7	175	14.5572
136.1	-175	10.7532
136.1	-155.6	10.3015
136.1	-136.1	0.0000
136.1	-116.7	12.4318
136.1	-97.2	11.5594
136.1	-77.8	11.3033
136.1	-58.3	11.1727
136.1	-38.9	11.0864
136.1	-19.4	11.0441
136.1	0	11.0300
136.1	19.4	11.0439
136.1	38.9	11.08590
136.1	58.3	11.1716
136.1	77.8	11.3013



แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
136.1	97.2	11.5550
136.1	116.7	12.4025
136.1	136.1	0.0000
136.1	155.6	10.2913
136.1	175	10.7478
155.6	-175	11.6542
155.6	-155.6	11.1935
155.6	-136.1	10.9632
155.6	-116.7	10.7741
155.6	-97.2	10.5496
155.6	-77.8	10.2305
155.6	-58.3	9.5503
155.6	-38.9	0.0000
155.6	-19.4	0.0000
155.6	0	0.0000
155.6	19.4	0.0000
155.6	38.9	0.0000
155.6	58.3	9.5390
155.6	77.8	10.2267
155.6	97.2	10.5462
155.6	116.7	10.7712
155.6	136.1	10.9603
155.6	155.6	11.1886

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
155.6	175	11.6374
175	-175	10.7285
175	-155.6	10.2434
175	-136.1	0.0000
175	-116.7	12.2238
175	-97.2	11.5044
175	-77.8	11.2752
175	-58.3	11.1463
175	-38.9	11.0658
175	-19.4	11.0235
175	0	11.0092
175	19.4	11.0231
175	38.9	110.6510
175	58.3	11.1450
175	77.8	11.2733
175	97.2	11.4994
175	116.7	12.2039
175	136.1	0.0000
175	155.6	10.2321
175	175	10.7225

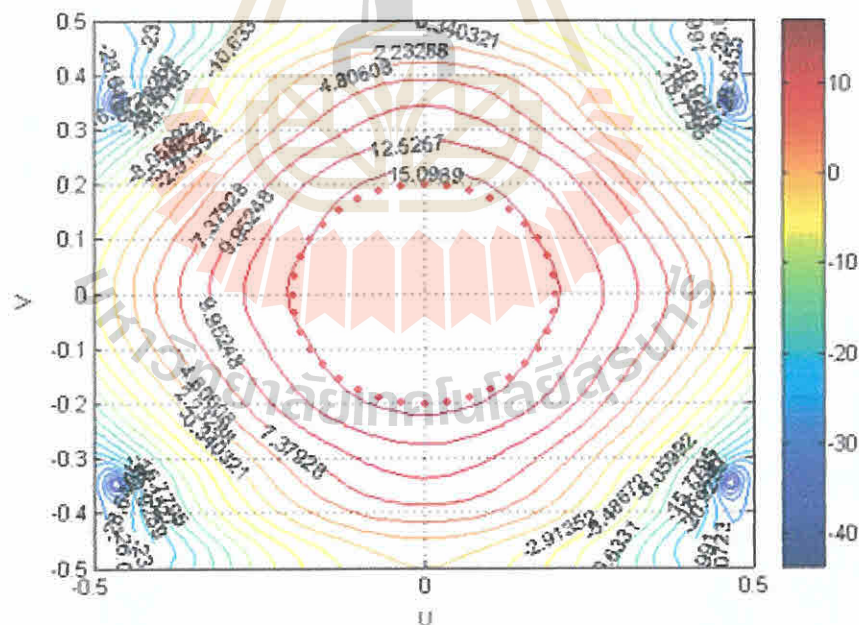


### 3.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Far field pattern) ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

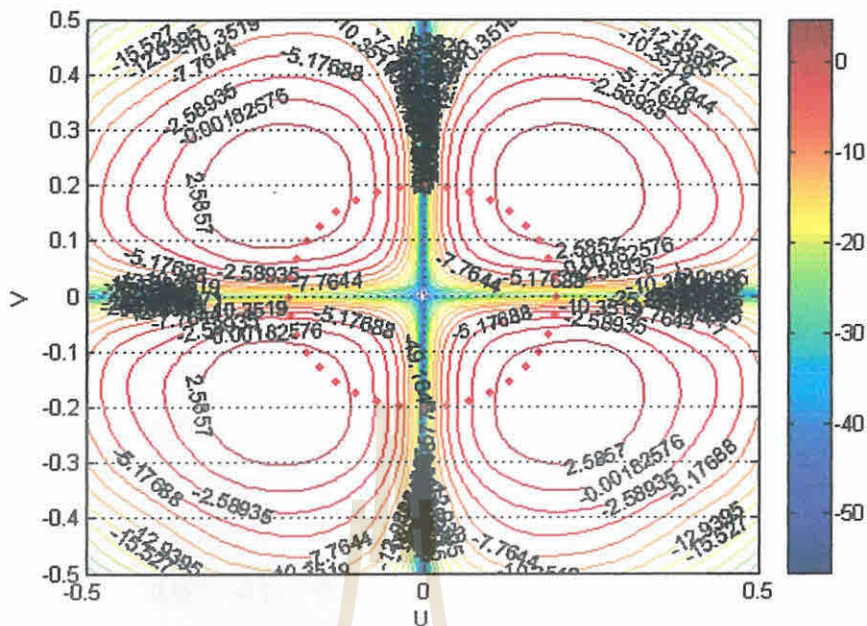
แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนหาได้จากผลรวมระหว่างสนามกระเจิงและสนามสะท้อนจากแถวลำดับแผ่นสะท้อน โดยสมมติให้สนามมีการกระจายอยู่บนแนวลำดับสะท้อนจำกัด ซึ่งคล้ายกับหลักการของ Huygens Sources โดยมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนสมมูลกับสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนรวมของลำดับอนันต์ จะได้สนามระยะไกลสำหรับสายอากาศแถวลำดับสะท้อนตามสมการ

$$\bar{E}_{RA}(\theta, \phi) = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \sum_{i=1}^N \bar{R}_i^{tot} E_i^{inc} e^{-jk_0 \bar{r}_i \cdot \bar{a}_i} \quad (3.4)$$

#### 3.9.1 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลม

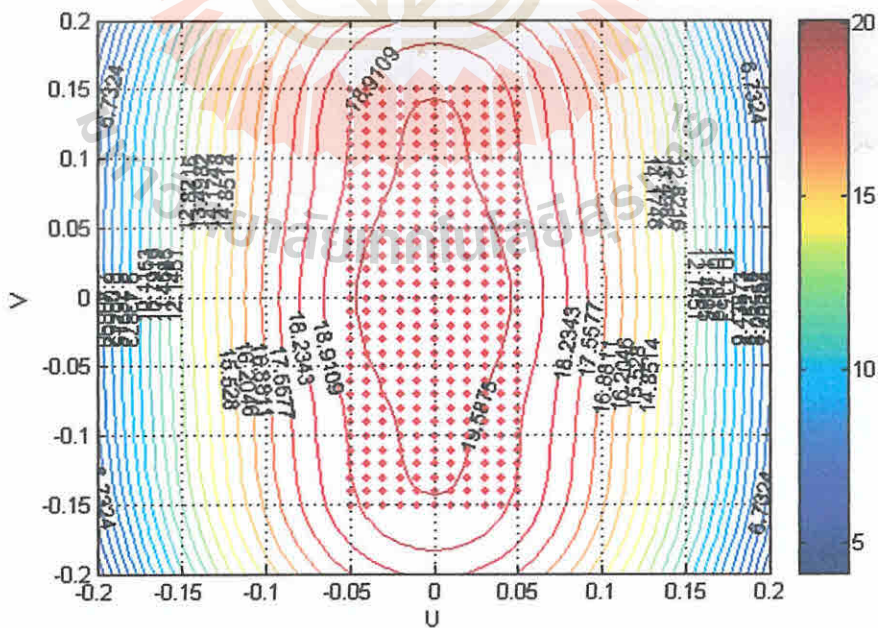


รูปที่ 3.20 แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลม



รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซนชันไขว้ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับสี่รูปวงกลม

3.9.2 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับสี่รูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซนชันร่วมของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับสี่รูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง









## บทที่ 4

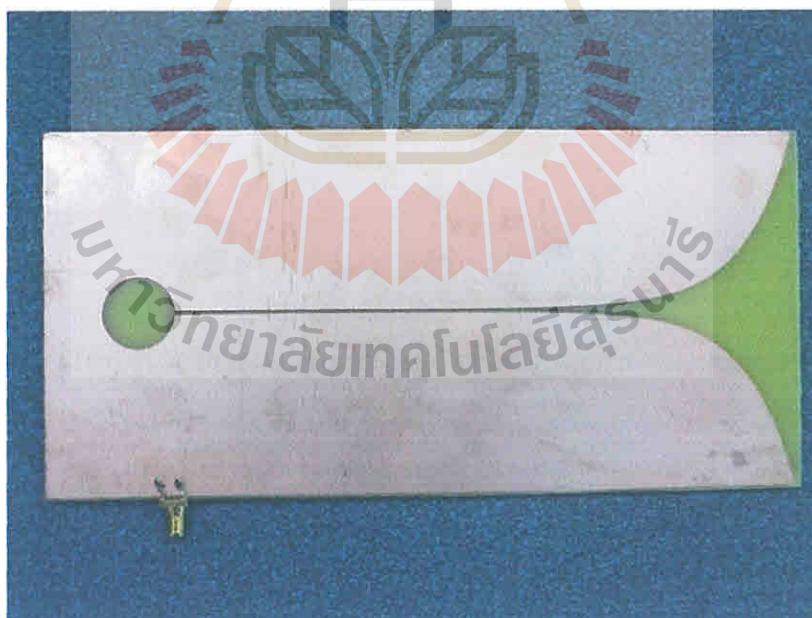
### ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปแบบจัดลำดับรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง โดยจะอธิบายถึงวิธีการสร้างสายอากาศต้นแบบ จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบมาวัดทดสอบคุณลักษณะ ได้แก่แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก พื้นที่ครอบคลุมอัตราขยายของสายอากาศ และนำคุณลักษณะไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการจำลองแบบ

#### 4.2 การสร้างสายอากาศป้อนวิวลติ

เมื่อได้ผลการจำลองแบบของสายอากาศป้อนวิวลติในบทที่ 3 จากนั้นจึงทำการสร้างสายอากาศตัวป้อนวิวลติต้นแบบ ดังรูปที่ 4.1 เมื่อทำการสร้างสายอากาศป้อนวิวลติ จากนั้นทำการทดสอบสายอากาศป้อนวิวลติ ได้คุณลักษณะของสายป้อนวิวลติ ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายอากาศป้อนวิวลติ

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของสายอากาศป้อนวิวลติ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการวัดทดสอบ	
	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (degree)	50.6	90.1
อัตราขยายสูงสุด (dBi)	7.4	7.7

#### 4.3 การสร้างสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจตุรปลำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้งต้นแบบ

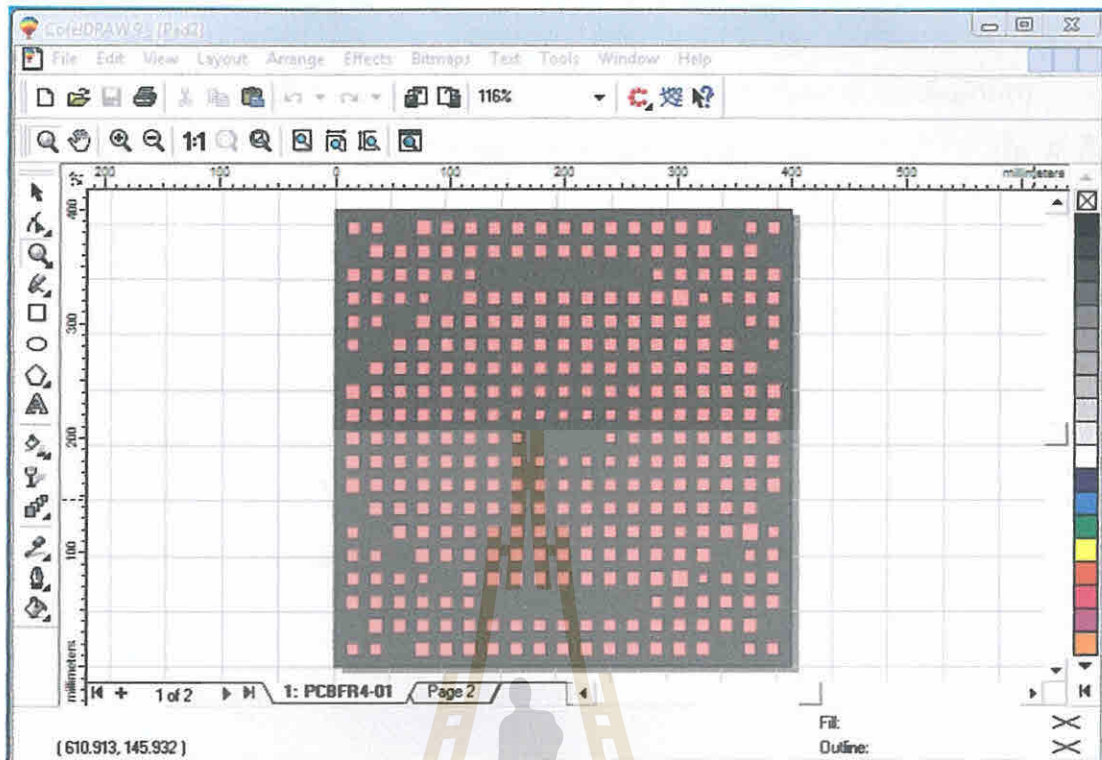
ในโครงการนี้ได้เลือกใช้แผ่นไมโครสตริป FR4 ซึ่งมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าสภาพยอม  $\epsilon_r = 4.5$  ในการสร้างสายอากาศ โดยสายอากาศแถวลำดับสะท้อนจะถูกออกแบบให้มีแผ่นสะท้อนไมโครสตริปขนาดแตกต่างกันจำนวน 361 แผ่น วางห่างกัน  $0.4\lambda_0$  และค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสายอากาศเป็นดังนี้

- 1) ความถี่ปฏิบัติการ 5.8 GHz
- 2) สายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นสายอากาศวิวลติ
- 3) สายอากาศแถวลำดับสะท้อนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร
- 4) ระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 12 เซนติเมตร

สำหรับขนาดแผ่นสะท้อนที่ความถี่เรโซแนนซ์พิจารณาได้จากสมการ (4.1) ดังนี้

$$L_0 = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.1)$$

แต่การสร้างสายอากาศแถวลำดับสะท้อนนั้นจะ ใช้การเปรียบเทียบการประวิงเฟสกับเฟสสะท้อน ดังนั้นจึงทำให้เราทราบขนาดที่แท้จริงเพื่อนำมาออกแบบสายอากาศดังกล่าว และเราสามารถออกแบบรูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CorelDRAW9 ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และจะได้สายอากาศต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 รูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้ง



รูปที่ 4.3 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำดับคลื่นรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้งต้นแบบ



### 4.3.1 ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน

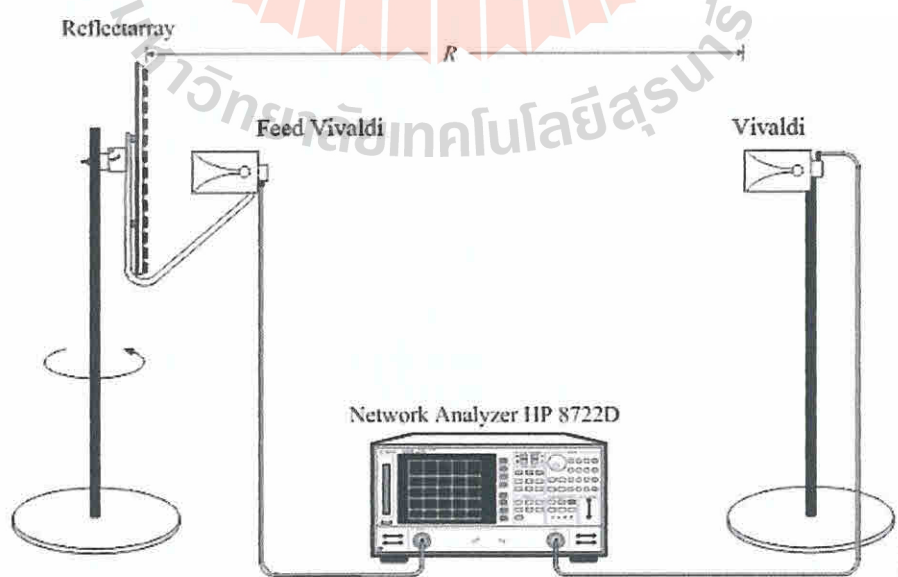
#### 4.3.1.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนแบบลำดับคลื่นดินสอด

แบบรูปการแผ่พลังงานนั้นได้ทดสอบในสนามระยะไกล คือ  $R \geq 2D^2 / \lambda$  เมื่อ  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบ และสายอากาศอ้างอิง ในการทดสอบนี้ระยะทางมีค่าคงที่ที่ความถี่ 5.8 GHz และ  $D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อนมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายป้อนวิวอลดีที่ความถี่ 5.8 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่นจาก 0 องศา ถึง 360 องศา ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.5 โดยแบบรูปการแผ่พลังงานนี้จะแสดงในรูปของอัตราขยาย ดังสมการพื้นฐาน (Friis Transmission Equation)

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.2)$$

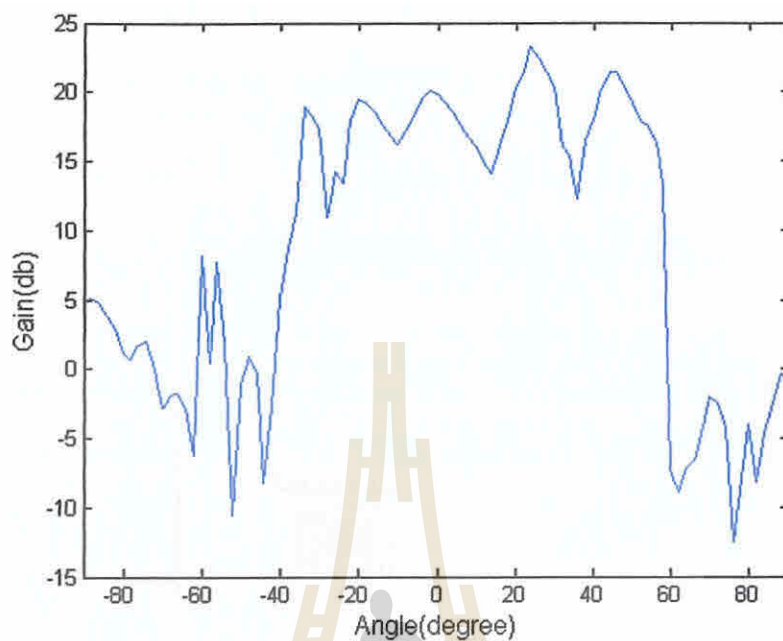
เมื่อ  $P_t$  คือ กำลังงานอินพุตที่ป้อนให้สายอากาศส่ง  $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง  $P_r$  คือ กำลังงานเอาต์พุตของสายอากาศรับ  $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ เมื่อนำไปหาอัตราขยายของสายอากาศรับในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$G_{r,dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) - G_{t,dB} \quad (4.3)$$

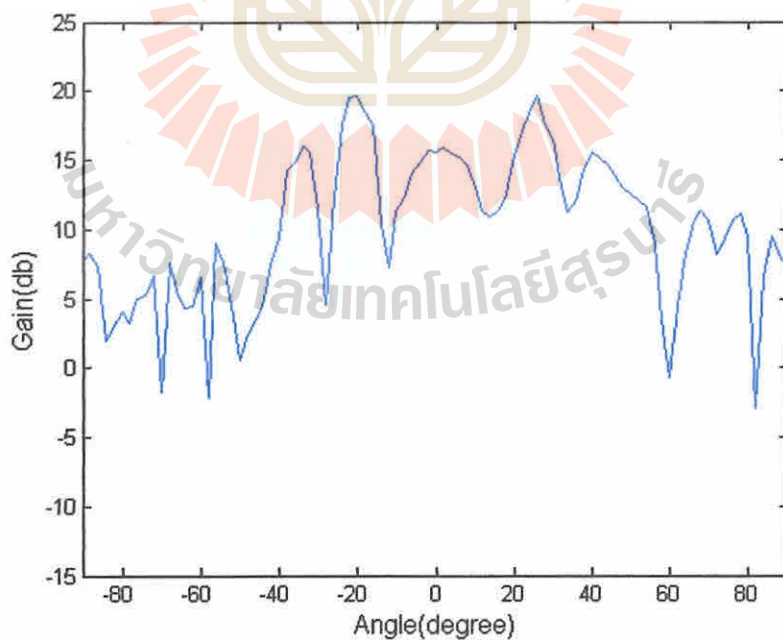


รูปที่ 4.4 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลำดับคลื่นดินสอด



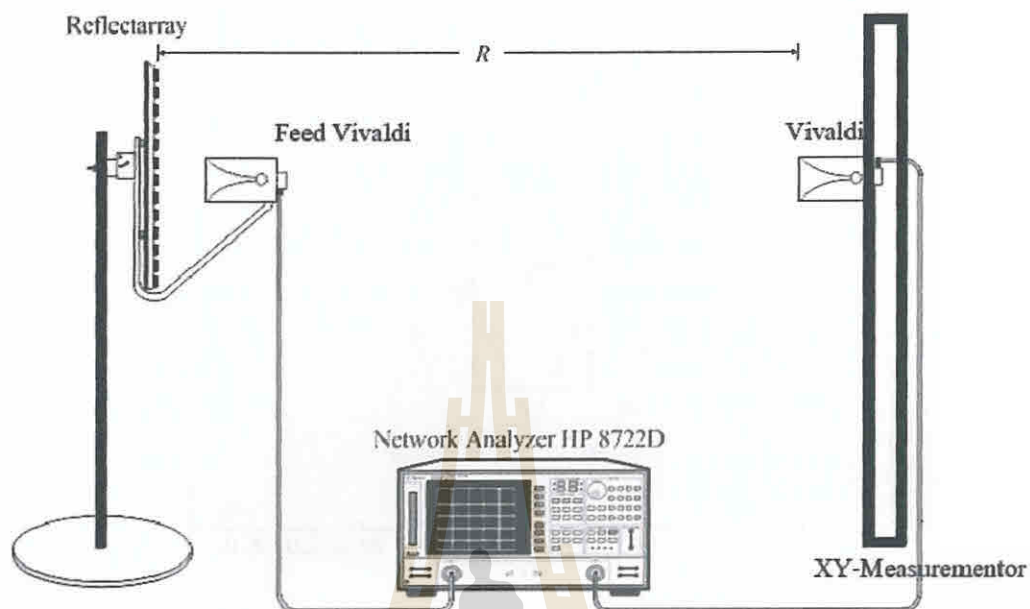


รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นคินสอ  
ในระนาบสนามไฟฟ้า

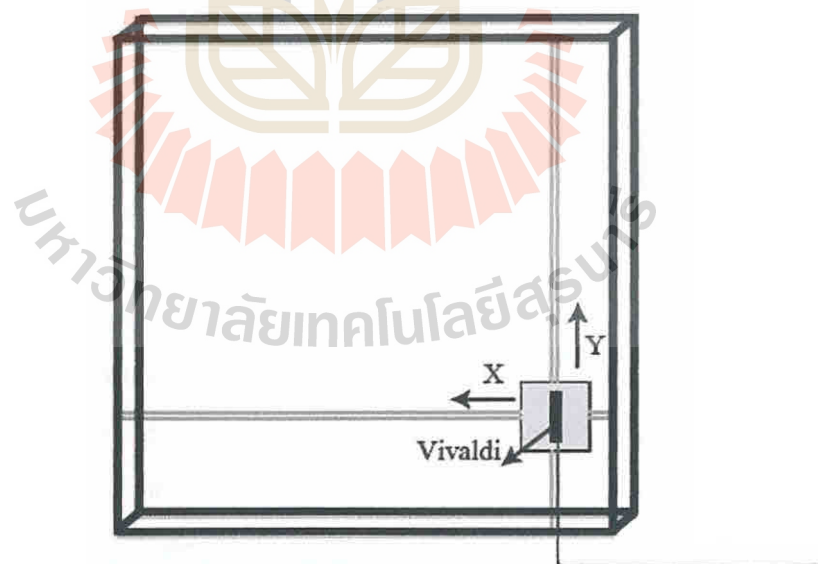


รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นคินสอ  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก

#### 4.3.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบวงรอบ



รูปที่ 4.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลำดับคลื่นวงรอบ



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์สำหรับการวัดตามพิกัด X-Y



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1. สรุป

โครงการนี้ได้ดำเนินการศึกษาการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน(Reflectarray Antenna) โดยนำทฤษฎีและกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมาใช้คำนวณและวิเคราะห์หาเฟสการสะท้อนจากสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ทำให้สามารถทราบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายสูงสุด พื้นที่ครอบคลุม ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นรูปทางเรขาคณิตอย่างง่าย นั่นก็คือ รูปวงกลม รูปสี่เหลี่ยมในลักษณะแนวตั้งและแนวนอน เพื่อที่จะสร้างสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารแบบไร้สาย คือการสื่อสารระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless LAN)

ในการคำนวณและวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน เริ่มต้นจากการกำหนดข้อมูลเริ่มต้นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน จากการ สืบค้นหาข้อมูลที่ทำให้ทราบว่าสายอากาศชนิดใดเหมาะสมกับโครงการของเรานั้นก็คือ สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งมีคุณสมบัติของสายอากาศคือ ขนาดเล็กกะทัดรัด สร้างได้ง่าย ราคาถูก น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย และเคลื่อนย้ายสะดวก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบวงกลม จึงทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย สามารถกำหนดการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นรูปแบบตามลักษณะที่ต้องการ ส่วนฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ที่กำหนดขึ้นคือ ชนิด ขนาด และตำแหน่งการวางของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป สายอากาศป้อนวิวลติ และความถี่ปฏิบัติการ (5.8 GHz) จากนั้นทำการศึกษาแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศป้อนและสนามตกกระทบบนแถวลำดับสะท้อน การศึกษาการประวิงเฟสของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสสะท้อนกับขนาดของแผ่นสะท้อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการศึกษาแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศป้อนวิวลติ ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นได้สร้างสายอากาศต้นแบบ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนต้นแบบ พบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานมีความสอดคล้องกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยผลของการวัดทดสอบและการจำลองผลสามารถสรุปได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมีลักษณะ เป็นรูปสี่เหลี่ยมตามที่กำหนดไว้ แต่มีอัตราขยายลดลงเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการลดลงเล็กน้อยระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผล คือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ



เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสะท้อนและสายอากาศป้อน จะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน และผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ขณะวัดทดสอบสายอากาศ เป็นต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป ที่ความถี่ 5.8 GHz ที่ได้ทำการทดสอบนี้ ผลของการวัดทดสอบและการจำลองผล มีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร สาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผล คือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสะท้อนและสายอากาศป้อนจะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศ และอุปสรรคในการทดสอบ สำหรับการพัฒนาให้ดีขึ้นในการทดสอบสายอากาศที่ดีนั้น ควรจะหาพื้นที่โล่งและกว้างพอสมควร หรือห้องที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเพื่อลดปัญหาการบังหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศและเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริงมากที่สุด

## ประวัติผู้เขียน

นายอรรถสิทธิ์ โปธา เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลแม่พริก อำเภอแม่พริก จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนแม่พริกวิทยา อำเภอแม่พริก จังหวัดลำปาง เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวชุตินันท์ วงศ์รักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลชากโดน อำเภอกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสุนทรภู่พิทยาศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บรรณานุกรม

- [1] J. R. Bergmann and F. J.V. Hasselmann. A Reflector Antenna Synthesis for Proposed Brasilsat B3 South American Coverage at C and Ku Bands. Microwave and Optoelectronics Conference SBMO/IEEE MTT-S International. 2 (1997): 577-581
- [2] Kazuyoshi Shogen, Hayato Nishida and Noboru Toyama. Single Shaped Reflector Antennas for Broadcasting satellites. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 40, 2 (February 1992): 178-187.
- [3] Brown, R.C. Fourier Analysis in Reflector Antenna Synthesis. (n.p., n.d').
- [4] Luwig, A.C. The definition of cross polarization. IEEE Transaction on Antennas and Propagation AP-21 January 1973: 116-119

