



การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริปแบบสองลำคลื่น



นายปวิรรษ ตุ่นตัน รหัสประจำตัว B4903635
นางสาวภาณุมาศ ปะกะตั้ง รหัสประจำตัว B4909675

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2552

โครงการ	การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปแบบสองลำดับ
จัดทำโดย	นายปวิรรษ ตุ่นตัน นางสาวภาณุมาศ ปะกะตั้ง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ปิยาภรณ์ กระจอดนอก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2552

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน (Reflectarray Antenna) สำหรับพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณด้วยกัน โดยสายอากาศจะถูกติดตั้งบริเวณเพดานห้อง สำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz จึงทำให้มีการแผ่กระจายกำลังงานไปยังบริเวณที่มีผู้ใช้บริการเท่านั้น โดยแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ใช้ ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริปจะมีรูปร่างเป็นวงกลมสองวงแยกกัน ซึ่งภายในพื้นที่วงกลมสองวงนี้จะเป็นบริเวณที่มีการแผ่กระจายกำลังงานไปมากที่สุด เพื่อให้ครอบคลุมผู้ใช้บริการสองกลุ่ม

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือในด้านวิชาการโดยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามผลงาน ซึ่งแนะข้อบกพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้าม ตลอดจนช่วยตรวจทานและแก้ไขโครงการเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆดังนี้

- พี่นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์
- เพื่อนนักศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคน สำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกด้านตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

ท้ายนี้คุณความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และพี่ๆ ของข้าพเจ้า ผู้ที่คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด



นายปวิรรษ ตุ่นตัน

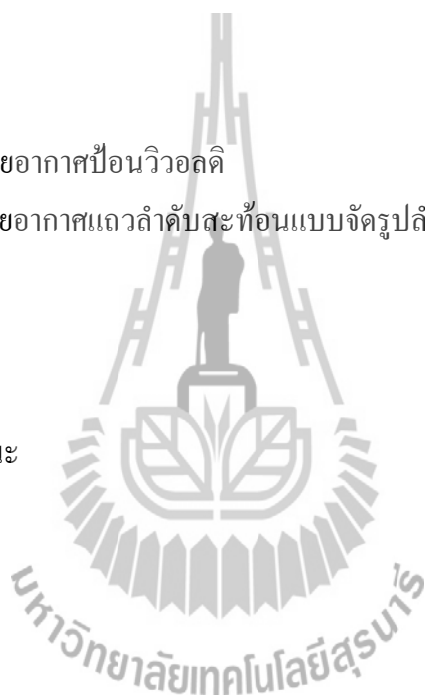
นางสาวภาณุมาศ ปะกะตั้ง

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ง
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลคาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	4
2.2 พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง	4
2.3 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับไมโครสตริป	17
2.4 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริป	19
2.5 สนามตกกระทบ และสนามสะท้อน	21
2.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแฉวลำดับสะท้อนอนันต์	23
2.7 สรุป	28
บทที่ 3 การออกแบบและการสังเคราะห์	
3.1 บทนำ	29
3.2 การกำหนดพื้นที่ครอบคลุม	29
3.3 สายอากาศป้อนวิวลติ	30
3.4 การหาลำโพงโคไซน์ของวิวลติ	34
3.5 สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัดรูปอ้างอิง	35
3.6 การประวิงเฟส	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 คุณลักษณะแผ่นสะท้อน	37
3.8 ขนาดของแพทช์	38
3.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ไมโครสตริป	41
3.10 สรุป	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 บทนำ	43
4.2 การสร้างสายอากาศป้อนวิวลติ	43
4.3 การสร้างสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมสองวง	44
4.4 สรุป	50
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุป	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
ประวัติผู้เขียน	53
บรรณานุกรม	54



สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป	2
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนของกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิว งานสะท้อน	5
รูปที่ 2.2	เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีการทัศนศาสตร์ กายภาพ	7
รูปที่ 2.3	ระบบสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวจัดรูปแบบไม่สมมาตร	11
รูปที่ 2.4	ระบบพิกัดของงานสะท้อนสัมพันธ์กับจุดสังเกต	14
รูปที่ 2.5	การกำหนดอัตราขยายของระบบสายอากาศตามระบบพิกัด (U,V)	15
รูปที่ 2.6	การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกและสายอากาศแถว ลำดับสะท้อนไมโครสตริป	17
รูปที่ 2.7	การประวิงเฟสในสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป	18
รูปที่ 2.8	การประวิงเฟสเนื่องจากการเลื่อนตัวป้อนสัญญาณและหน้าคลื่น	19
รูปที่ 2.9	การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน	20
รูปที่ 2.10	การปรับความยาวสลับ	20
รูปที่ 2.11	การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน	21
รูปที่ 2.12	แผ่นสะท้อนไมโครสตริป	21
รูปที่ 2.13	Grating lobe diagram แบบ Broadside scan position	26
รูปที่ 2.14	Grating lobe diagram แบบ Scan position	27
รูปที่ 3.1	พื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณที่มีลักษณะเป็นรูปร่างกลมสองวงแนวตั้ง	30
รูปที่ 3.2	สายอากาศป้อนวิวอลดี	31
รูปที่ 3.3	สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น (S11) ของสายอากาศป้อนวิวอลดี	32
รูปที่ 3.4	ค่า VSWR ของสายอากาศป้อนวิวอลดี	32
รูปที่ 3.5	แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศป้อนวิวอลดี	33
รูปที่ 3.6	แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศป้อนวิวอลดี	33
รูปที่ 3.7	กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวิวอลดีในระนาบสนามไฟฟ้า	34

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.8	กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวิวลติในระนาบสนามแม่เหล็ก	34
รูปที่ 3.9	สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวตัดรูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณ	35
รูปที่ 3.10	การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณ	36
รูปที่ 3.11	การกำหนดพารามิเตอร์	37
รูปที่ 3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อน ณ ความถี่ 2.45 GHz	37
รูปที่ 3.13	แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมสองวง	41
รูปที่ 3.14	แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมสองวง	42
รูปที่ 4.1	สายอากาศป้อนวิวลติ	43
รูปที่ 4.2	รูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมแนวตั้งสองวง	45
รูปที่ 4.3	สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมแนวตั้งสองวงต้นแบบ	45
รูปที่ 4.4	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลำคลื่นดินสอด	46
รูปที่ 4.5	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นดินสอดในระนาบสนามไฟฟ้า	47
รูปที่ 4.6	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นดินสอดในระนาบสนามแม่เหล็ก	47
รูปที่ 4.7	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลำคลื่นวงรอบ	48
รูปที่ 4.8	อุปกรณ์สำหรับวัดตามพิกัด X-Y	48
รูปที่ 4.9	อุปกรณ์สำหรับการวัดตามพิกัด X-Y ที่ใช้ในการวัดจริง	49
รูปที่ 4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นวงรอบเทียบกับผลการจำลอง	49

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 3.1	โครงสร้างสายอากาศป้อนวิวลติ	31
ตารางที่ 3.2	ขนาดแพทช์ของสายอากาศงานสะท้อนแบบจัตรูปสองลำคลื่นรูปวงกลม แนวตั้ง	38
ตารางที่ 4.1	คุณลักษณะของสายอากาศป้อนวิวลติ	44



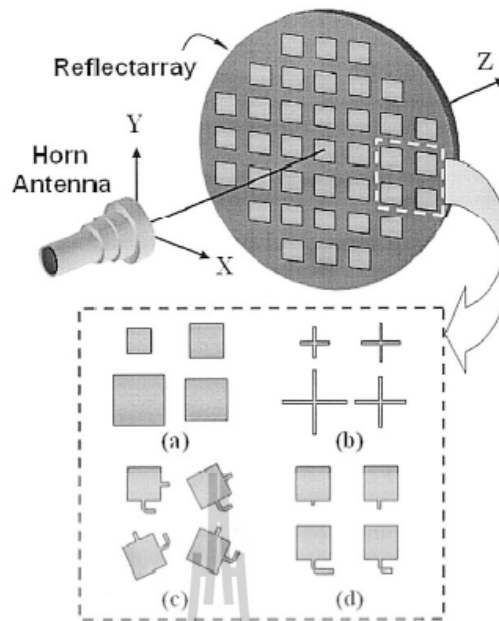
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

เหตุผลและความสำคัญของการทำโครงการนี้ เนื่องจากสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด สร้างได้ง่าย ราคาถูก น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย และเคลื่อนย้ายสะดวก สายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อทดแทนสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาโบลิก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบวงกลม เมื่อนำสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริปนี้มาใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย โดยติดตั้งบริเวณเพดานห้อง จะสามารถกำหนดการแผ่กระจายกำลังงานเป็นรูปวงกลมได้เช่นกัน แต่ในปัจจุบันได้มีการออกแบบห้องขนาดใหญ่ที่มีรูปร่างทันสมัยและสวยงาม จึงทำให้มีคลื่นบางส่วนไม่ครอบคลุมบริเวณที่ใช้งาน และคลื่นบางส่วนอาจจะเกินบริเวณที่ใช้งานจริง ดังนั้นโครงการนี้จึงทำการออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริป สำหรับพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณที่มีลักษณะเป็นวงกลมสองวงแนวตั้ง จึงทำให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ผู้ใช้บริการสองกลุ่มที่ต้องการใช้งานได้โดยไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์



รูปที่ 1.1 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป
2. ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปแบบสองลำคลื่น ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อลดการสูญเสียพลังงานการแผ่กระจายคลื่นที่ไม่ใช่ประโยชน์

1.3 ขอบเขตงาน

1. ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป
2. สร้างสายอากาศต้นแบบ
3. วัดและทดสอบสายอากาศ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับการออกแบบและการสร้างสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม CST และโปรแกรม MATLAB
3. ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปในย่านความถี่ 2.45 GHz
4. สร้างสายอากาศต้นแบบตามที้ออกแบบ
5. วัดค่าของสายอากาศต้นแบบและสรุปผลทำรายงาน

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณในลักษณะวงกลมสองวง เพื่อลดการสูญเสียพลังงานการแผ่กระจายคลื่นที่ไม่ใช่ประโยชน์
2. สามารถทราบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป
3. สามารถเข้าใจในทักษะการสร้างและการวัดทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของสายอากาศ
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาในภาคทฤษฎีของวิชาต่างๆที่ได้จากการศึกษามาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ได้จริง



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน (Reflectarray Antenna) ไมโครสตริปแบบสองลำคลื่น โดยสายอากาศจะถูกติดตั้งบริเวณเพดานห้องขนาดใหญ่ สำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ที่มีย่านความถี่ที่ 2.45 GHz จึงทำให้มีการแผ่กระจายกำลังงานไปยังบริเวณที่มีผู้ใช้บริการเท่านั้น โดยแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ใช้ ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณในลักษณะวงกลมสองวง ซึ่งขั้นตอนในการทำการออกแบบสายอากาศมีดังนี้

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

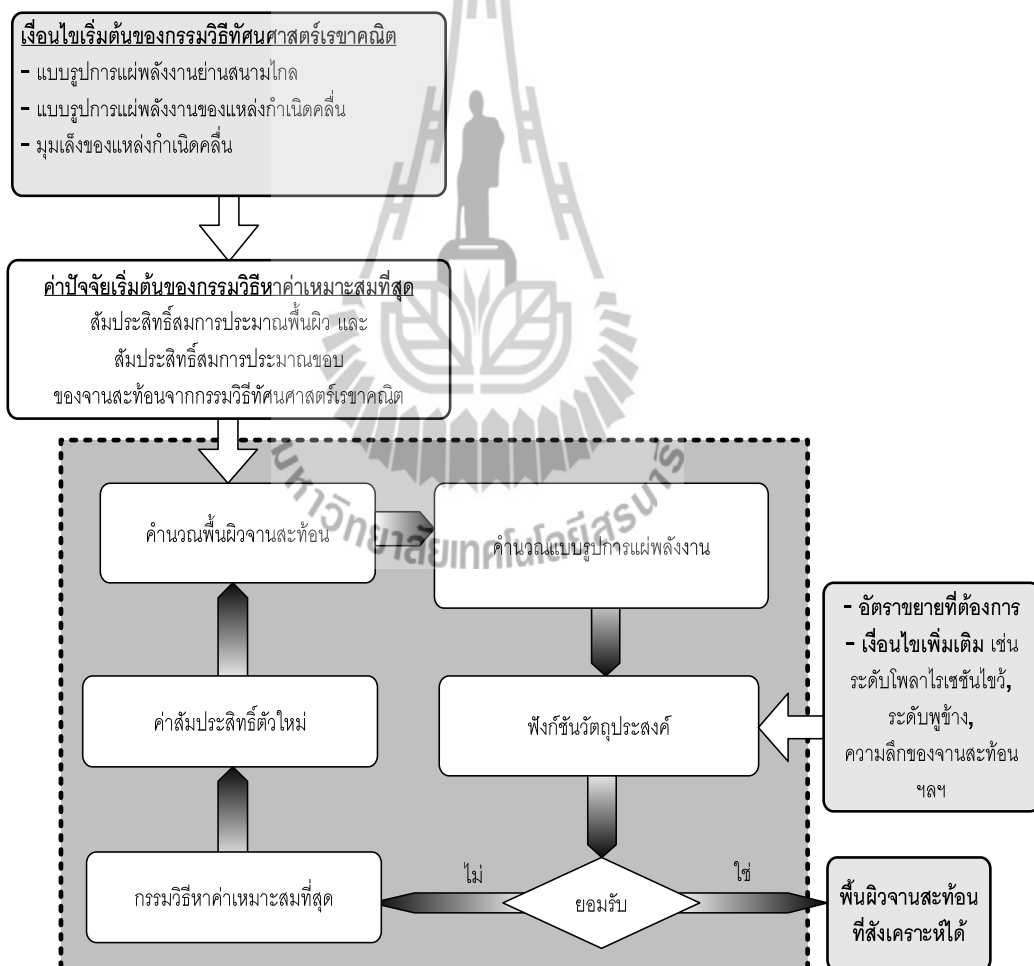
2.2 พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง

2.2.1 การสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อนอ้างอิง

พื้นผิวของงานสะท้อนที่ต้องการจะเป็นพื้นผิวที่เกิดจากการประมาณรูปร่างพื้นผิวด้วยสมการคณิตศาสตร์ในรูปผลรวมของฟังก์ชันเชิงตั้งฉาก ควบคู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์โดยเลือกใช้สมการพื้นผิวงานสะท้อน 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 $r=1, 2, 3, \dots, N_x$ $f_s(y) = 1, \cos(y), \sin(y), \cos(2y), \sin(2y), \dots, \cos(ny), \sin(ny)$ 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 ล้อคลื่นของพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ Bergman and Hasselmann [2] พบว่าการใช้จำนวนพจน์ฮาร์มอนิกฟูรีเย่มากเกินไปในสมการพื้นผิวงานสะท้อนจะทำให้เกิดการห้วนไหวอย่างมากของพูข้างในแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งทำให้เกิดความเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานมากขึ้น และ Brown [3] พบว่าถ้าใช้จำนวนจุดสังเกต (N) มากกว่าจำนวนพจน์ฮาร์มอนิกฟูรีเยร์ ($N_x \times N_y$) จะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่สังเคราะห์ได้ถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าสัมประสิทธิ์สัมกรมการพื้นผิวงานสะท้อน

ค่าสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิวงานสะท้อน สามารถหาได้จากกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 2.1 การคำนวณหาค่าตอบเริ่มจากกำหนดค่าปัจจัยของระบบสายอากาศงานสะท้อน ได้แก่

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

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

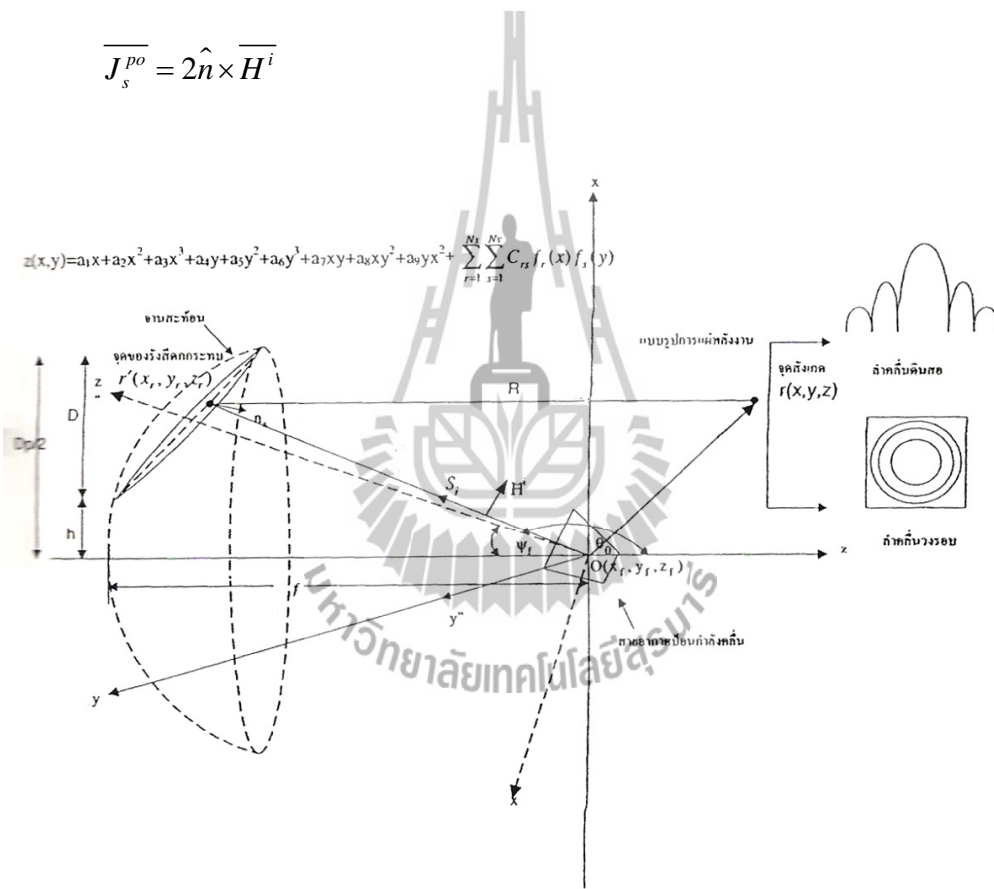
$$F(\text{position, coefficient}) = \sum_{\text{position}} |Gain - Gain_{\text{desired}}| \quad (2.2)$$

ถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่าที่ยอมรับได้ ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านั้นก็จะเป็นคำตอบในการประมาณรูปร่างพื้นผิวงานสะท้อน แต่ถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่าที่ยอมรับได้ จะต้องนำค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ไปหาคำตอบใหม่โดยกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการมากที่สุด เมื่อทำซ้ำแบบนี้จนได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการแล้ว จึงจะนำมาใช้สังเคราะห์รูปร่างพื้นผิวงานสะท้อนได้ลักษณะการปรับตัวของพื้นผิวสะท้อนเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ

2.2.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์สำหรับการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงาน

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

$$\overline{J}_s^{po} = 2\hat{n} \times \overline{H}^i \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.2 เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ

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

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

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

กระแสที่สนศาสตร์กายภาพตามสมการ (2.3) สามารถใช้ในการประมาณกระแสเหนี่ยวนำได้ถูกต้องเพียงบางส่วนเท่านั้นยกเว้นกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของงานสะท้อน เป็นที่ทราบกันดีว่าสนามจากทฤษฎีสันศาสตร์กายภาพจะให้ความถูกต้องในช่วงลำคลื่นพหุหลักและพหุข้างแรกๆ เท่านั้น ซึ่งเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงอัตราขยายของระบบสายอากาศและลดระดับพหุข้างใกล้เคียงได้ แต่สำหรับจุดสังเกตที่ห่างไกลออกไปหรือการทำนายระดับโพลาริเซชันไขว้ สนามไฟฟ้าจากการเลี้ยวเบนที่ขอบมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ เนื่องจากทฤษฎีสันศาสตร์กายภาพได้รวมผลจากการเลี้ยวเบนจากขอบไว้บ้างแล้วระดับหนึ่งแต่ไม่สมบูรณ์ ยังไม่ได้รวมกระแสอีกส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสสมมูลที่ไหลไม่สม่ำเสมอ (nonuniform current) ที่บริเวณขอบ ดังนั้นในการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานจึงจำเป็นต้องนำทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ (Physical Theory of Diffraction,PTD) มาใช้ เพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น สนามไฟฟ้าตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพเป็นผลรวมจากสนามไฟฟ้าตามทฤษฎีสันศาสตร์กายภาพ และสนามการเลี้ยวเบนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสที่บริเวณขอบดังสมการ (2.5)

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

โดย \vec{E}_{PTD} คือสนามตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ

\vec{E}_{PO} คือสนามตามทฤษฎีสันศาสตร์กายภาพ

\vec{E}_{fringe} คือสนามการเลี้ยวเบนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสบริเวณขอบ

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

I^f และ M^f คือกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่ไหลไม่สม่ำเสมอบริเวณขอบ มีค่าเป็นดังสมการ(2.5ข) dl' คือความยาวส่วนย่อยตามแนวขอบของงานสะท้อน

$$I_f = -\frac{-(\vec{E}^i \cdot \hat{e})2j\sqrt{2}\sin(\phi'/2)}{Zk\sin^2\beta'\cos\phi'+\mu}\left[\sqrt{1-\mu}-\sqrt{2}\cos(\phi'/2)\right] \quad (2.5\text{ข})$$

$$M_f = -(\vec{H}^i \cdot \hat{e})\frac{2j}{k\sin\beta'\cos\phi'+\mu}\left[\cot\beta'\cos\phi'+\cot\beta\cos\phi+\sqrt{2}\sin(\phi'/2)(\mu\cot\beta'-\cot\beta\cot\phi)(1-\mu)^{-1/2}\right]$$

$$M_f = -(\vec{H}^i \cdot \hat{e})\frac{2jZ\sin\phi}{k\sin\beta\sin\beta'\cos\phi'+\mu}\left[1-\frac{\sqrt{2}\cos(\phi'/2)}{\sqrt{1-\mu}}\right] \quad (2.5\text{ค})$$

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

\hat{e} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับจุดเลี้ยวเบน (β', ϕ') คือระบบพิกัดที่จุดขอบของรังสีตกกระทบ (β, ϕ) คือระบบพิกัดที่จุดขอบรังสีเลี้ยวเบน

2.2.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบสายอากาศงานสะท้อน

เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยทัศนศาสตร์กายและโครงสร้างของระบบสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวจัดรูปแบบไม่สามาถดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพฉายงานสะท้อน (D) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของงานสะท้อนเดิมก่อนถูกตัดด้วยระนาบออฟเซต (offset plane, ระนาบ x-z, D_p) ระยะโฟกัสของงานสะท้อนเดิมก่อนถูกตัดด้วยระนาบออฟเซต (f) ระยะออฟเซต (offset distance, h) มุมเงี้ยวของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น (feed angle, ψ_f) และกำหนดให้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ที่จุด $O(x_p, y_p, z_f)$ และสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต $r(x, y, z)$

จากการศึกษาได้ใช้สมการพหุนามอันดับสามรวมฮาร์โมนิกฟูรีเยร์ดังแสดงในสมการ (2.1) เป็นสมการพื้นผิวงานสะท้อน สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลจากการเหนี่ยวนำของกระแสสมมูลบริเวณผิวงานสะท้อน โดยกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวงานสะท้อนคำนวณจากสมการ (2.3) ดังนี้

$$\vec{J} = 2\hat{n} \times \vec{H}^i \quad (2.6)$$

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

$$\hat{n} = \frac{\nabla[z-w(x,y)]}{|\nabla[z-w(x,y)]|} \quad \hat{n} = \frac{\nabla[z-w(x,y)]}{|\nabla[z-w(x,y)]|} \quad (2.7\text{ก})$$

$$\nabla_x = \left(a + 2a_2x + 3a_3x^2 + a_7y + a_8y^2 + 2a_9xy + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_s(y) \frac{df_r(x)}{dx} \right) \quad (2.7\text{ข})$$

$$\nabla_y = - \left(a_4 + 2a_5y + 3a_6y^2 + a_7x + a_9x^2 + 2a_8xy + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_s(x) \frac{df_r(y)}{dy} \right) \quad (2.7\text{ค})$$

$$\nabla_z = 1 \quad (2.7\text{ง})$$

ดังนั้น

$$\hat{n} = \frac{\nabla_x \bar{a}_x + \nabla_y \bar{a}_y + \bar{a}_z}{\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + 1}} \quad (2.8)$$

และ \bar{H}^i คือสนามแม่เหล็กจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่ตกกระทบบนพื้นผิวงานสะท้อน โดยคำนวณจาก

$$\bar{H}^i = \frac{\bar{s}_i \times \bar{E}^f}{z_o} \quad (2.9)$$

\bar{s}_i คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบ \bar{E}^f คือสนามไฟฟ้าจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นกำลังคลื่นกำหนดให้วางอยู่ที่จุดโฟกัสของงานสะท้อน ($x_f = 0, y_f = 0, z_f = 0$) ดังนั้นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบของระบบพิกัดฉากคือ

$$\bar{s}_i = \frac{x_r \bar{a}_x + y_r \bar{a}_y + z_r \bar{a}_z}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \quad (2.10)$$

และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของจุดสังเกตซึ่งมีทิศจากจุดบนสะท้อนไปยังจุดสังเกตใดๆ คือ

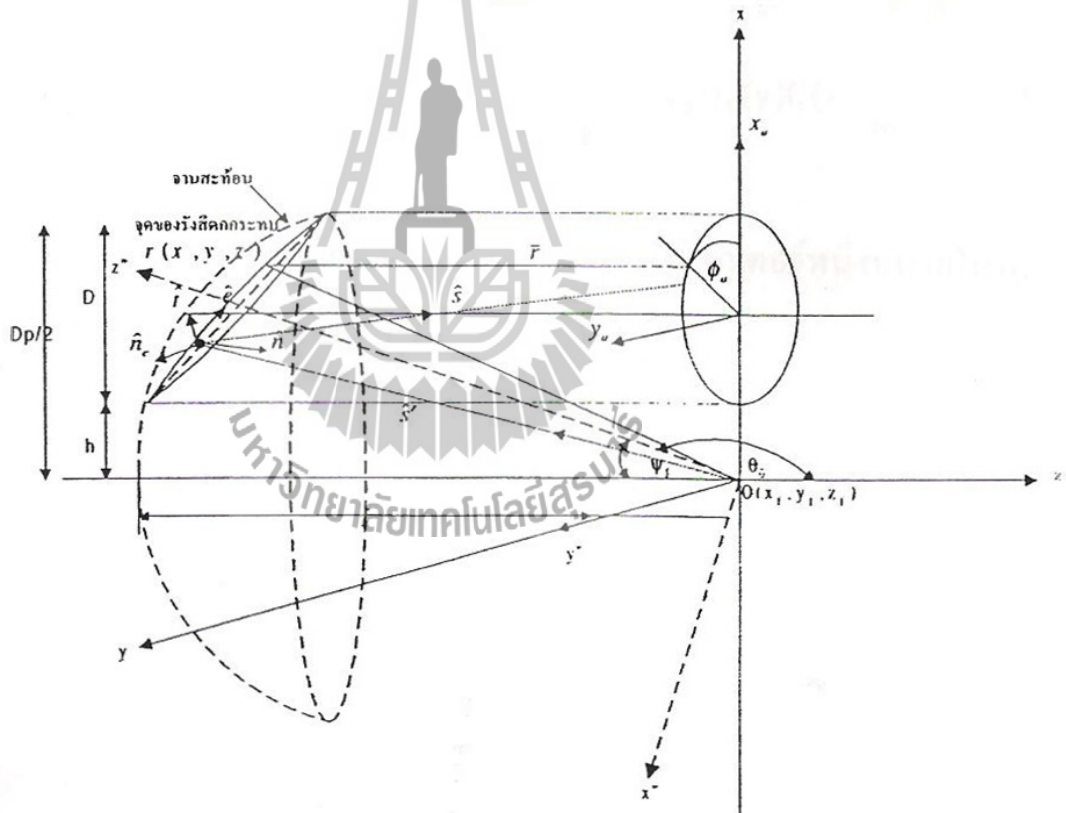
$$\hat{s} = \frac{(x-x_r)\bar{a}_x + (y-y_r)\bar{a}_y + (z-z_r)\bar{a}_z}{\sqrt{(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2}} \quad (2.11)$$

จากสามารถการ (2.4) สนามไฟฟ้าจากทัศนศาสตร์กายภาพ คำนวณจากการอินทิเกรตแหล่งกระแสสมมูลโดยเทียบกับพื้นที่ผิวงานสะท้อน การอินทิเกรตเทียบกับพื้นที่ผิวงานสะท้อนสามารถทำให้สะดวกขึ้นโดยเปลี่ยนเป็นการอินทิเกรตเทียบกับพื้นที่ภาพฉายของงานสะท้อน ซึ่งมีพจน์ของจาโคเบียน $(\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + \nabla_z^2})$ เพิ่มขึ้นมาใช้เป็นตัวแปรการอินทิเกรตดังนี้

$$\vec{E}(\vec{r}) = -j\omega\mu \left(\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right) \int_{S_d} \left[J_s^{po}(r') - (\hat{r} \cdot J_s^{po}(r')) \hat{r} \right] e^{jkr'r} \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + \nabla_z^2} ds \quad (2.12)$$

โดยที่ ds คือ ขนาดพื้นที่ผิวย่อยของระนาบเงาพื้นผิวงานสะท้อน ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าคุณลักษณะของสายอากาศเช่น แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวโพลาริเซชันร่วม อัตราขยายของระบบสายอากาศ ค่าคุณลักษณะเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการออกแบบรูปร่างลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่ซับซ้อนได้ในรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สนามการเลี้ยวเบนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสบริเวณขอบสายอากาศงานสะท้อนจะคำนวณได้โดยสมมติว่าสายอากาศป้อนกำลังคลื่นวางอยู่ที่พิกัด (x_p, y_p, z_p) ในระบบของงานสะท้อน และให้ $Q_D(x_d, y_d, z_d)$ เป็นจุดบนขอบของงานสะท้อน และจากรูปที่ 2.2.1 ขอบของงานสะท้อนสามารถกำหนดโดยอ้างอิงตัวแปรเสริมโดยสมมติให้ภาพฉายของงานสะท้อนเป็นรูปวงกลมดังนี้



รูป 2.3 ระบบสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูปแบบไม่สมมาตร

$$\begin{aligned}
x &= \frac{D}{2} + h + \frac{D}{2} \cos \phi_a \\
y &= \frac{D}{2} \sin \phi_a \\
z(x, y) &= a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 y + a_5 y^2 + a_6 y^3 + a_7 xy \\
&\quad + a_8 xy^2 + a_9 yx^2 + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} f_r(x) f_s(y)
\end{aligned} \tag{2.13}$$

เวกเตอร์บอกตำแหน่งบนเส้นโค้งของขอบที่จุดขอบเป็น

$$\bar{r} = x\bar{a}_x + y\bar{a}_y + z\bar{a}_z \tag{2.14}$$

จากสมการ (2.13) พิกัดตำแหน่งบนขอบ (x, y, z) เป็นฟังก์ชันของมุม ϕ_a ดังนั้นเมื่อหาอนุพันธ์ของแต่ละองค์ประกอบในสมการ (2.14) โดยเทียบกับมุม ϕ_a จะได้

$$\begin{aligned}
r'_x &= -\frac{D}{2} \sin \phi_a \\
r'_y &= \frac{D}{2} \cos \phi_a \\
r'_z &= a_1 r'_x + 2a_2 x r'_x + 3a_3 x^2 r'_x + a_4 y + 2a_5 y r'_y + 3a_6 y^2 r'_y + a_7 (x r'_y + y r'_x) \\
&\quad + a_8 (2xy r'_y + y^2 r'_x) + a_9 (2xy r'_x + x^2 r'_y) + \sum_{r=1}^{N_x} \sum_{s=1}^{N_y} C_{rs} (f_s(y) f'_r(x) \frac{dx}{d\phi_a} + f_r(x) f'_s(y) \frac{dy}{d\phi_a})
\end{aligned} \tag{2.15}$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (2.15) ในสมการ (2.16) จะได้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดเลี้ยวเบน $Q_d(x_d, y_d, z_d)$ ดังรูป 2.3 เป็น

$$\hat{e} = \frac{\bar{r}'}{|\bar{r}'|} \tag{2.16}$$

$$\hat{t} = \hat{e} \times \hat{n} \tag{2.17}$$

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

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดเลี้ยวเบน \hat{e} ดังสมการ (2.15) มีทิศทางดังรูป 2.3 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสพื้นผิวงานสะท้อนที่จุดเลี้ยวเบนและมีทิศพุ่งจากจุด

เส้นเวกเตอร์เข้าหาพื้นผิว (\hat{t}) สามารถหาได้ดังสมการ (2.17) โดยที่เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวที่จุดเส้นเวกเตอร์ (\hat{n}) เป็นดังสมการ (2.8) เพียงแต่แทนพิกัด (x, y, z) ด้วยพิกัดของขอบจานสะท้อนตามสมการ (2.13) ซึ่งมีทิศตั้งรูป 2.3 และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบ (\hat{s}) และทิศทางของการเส้นเวกเตอร์ (\hat{s}) มีทิศพุ่งออกจากจุดเส้นเวกเตอร์ไปยังจุดสังเกตใดๆ หาได้ตามสมการ (2.10) และ (2.11) โดยการแทนสมการ (2.13) ซึ่งเป็นพิกัดของขอบจานสะท้อน เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับขอบ (\hat{b}) คือ

$$\hat{b} = \frac{\vec{r}' \times \vec{r}''}{|\vec{r}' \times \vec{r}''|} \quad (2.18)$$

ทำให้ได้เวกเตอร์ตั้งฉากกับขอบที่จุดขอบและมีทิศพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางความโค้งเป็น

$$\hat{n}_e = \hat{b} \times \hat{e} \quad (2.19)$$

เมื่อนำสมการ (2.5) มาพิจารณากับระบบพิกัดขอบของจานสะท้อนซึ่งขึ้นกับมุมที่กวาดจากแกน x ของระบบสายอากาศ ϕ และ S คือเวกเตอร์ในทิศทางของจุดสังเกต สนามไฟฟ้าเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสบริเวณขอบ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

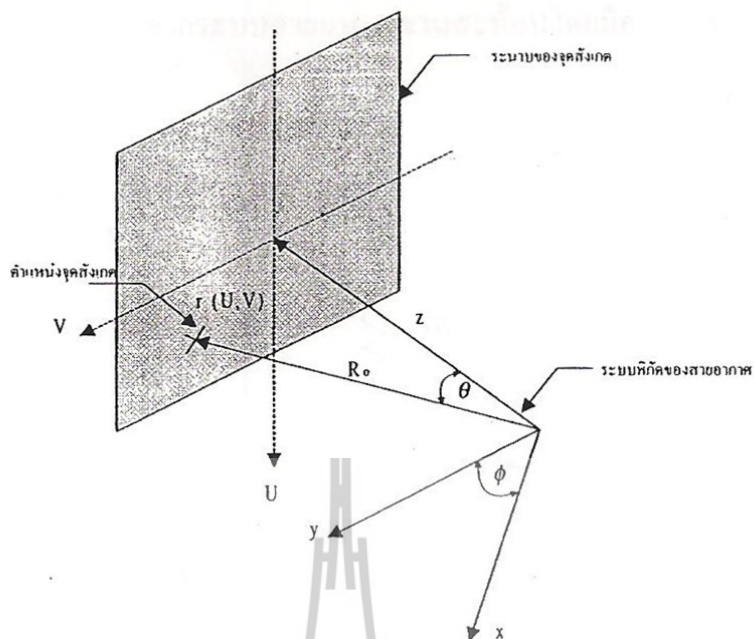
$$\vec{E}_{fringe}(r) = \frac{jkZ_0}{4\pi} \left[\int \left[\hat{s} \times \hat{s} \times I^f \hat{e} + Y_0 \hat{s} \times M^f \hat{e} \right] \frac{e^{-jks}}{S} |d(\vec{r}(\phi))| \right] \quad (2.20)$$

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

จากสมการ (2.20) และ (2.12) นำไปแทนในสมการ (2.4) จะได้สนามไฟฟ้าตามทฤษฎีเส้นเวกเตอร์เชิงการขยาย

2.2.4 ระบบพิกัดของจุดสังเกต

ในการทำโครงการนี้ ได้กำหนดจุดสังเกตในรูปแบบลำคลื่นวงรอบ ได้แก่ ระบบพิกัด (U, V) ซึ่งเป็นระบบพิกัดที่สมมติขึ้น ระบบพิกัด (U, V) เป็นการมองพิกัดตำแหน่งของจุดสังเกตต่างๆ จากระบบสายอากาศจานสะท้อนโดยตรงซึ่งเป็นระบบพิกัดที่ใช้โดยทั่วไป โดยที่ตำแหน่งของจุดสังเกตไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าละติจูดและลองจิจูดซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้กับจุดสังเกตที่อ้างอิงกับตำแหน่งภูมิศาสตร์บนโลก ระบบพิกัด (U, V) แสดงดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบพิกัดของงานสะท้อนสัมพันธ์กับจุดสังเกต

จากรูปที่ 2.4 กำหนดระบบพิกัดของสายอากาศงานสะท้อน (x, y, z) จุดสังเกต r อยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของระบบพิกัดสายอากาศงานสะท้อนเป็นระยะทาง R_0 และทำมุม θ กับแกน z ทำมุม ϕ กับแกน x ดังนั้นระบบ (x, y, z) สัมพันธ์กับ (r, θ, ϕ) ดังนี้

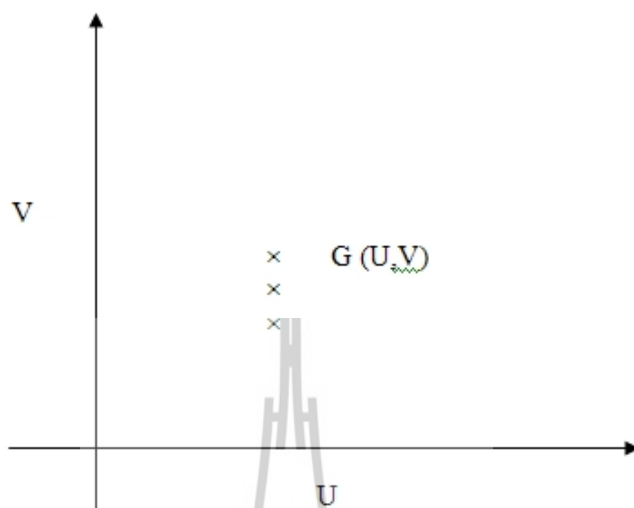
$$\begin{aligned} x &= R_0 \sin \theta \cos \phi \\ y &= R_0 \sin \theta \sin \phi \\ z &= R_0 \cos \theta \end{aligned} \quad (2.21ก)$$

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

$$\begin{aligned} U &= \frac{x}{R_0} = \sin \theta \cos \phi \\ V &= \frac{y}{R_0} = \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (2.21ข)$$

ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการตามตำแหน่ง (U, V) ได้แก่ $G(U, V)$ คือ อัตราขยายของระบบสายอากาศที่ต้องการตามตำแหน่ง (U, V) แสดงดังรูปที่ 2.5 หลังจากกำหนด

ตำแหน่ง (U, V) แล้วสามารถหาค่าแห่งมุม (θ, ϕ) จากระบบสายอากาศงานสะท้อนโดยมีความสัมพันธ์กับระบบพิกัด (U, V) ดังนี้



รูปที่ 2.5 การกำหนดอัตราขยายของระบบสายอากาศตามระบบพิกัด (U, V)

จากสมการ (2.21ข) จะได้

$$\tan \phi = \frac{V}{U} \quad (2.21ค)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V}{U} \quad (2.21ง)$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - (U^2 + V^2)} \quad (2.21จ)$$

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - (U^2 + V^2)} \quad (2.21ฉ)$$

2.2.5 การคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

จากนิยามของ Ludwig [4]

สายอากาศโดยทั่วไปนั้นจะมีลักษณะ การทำงานที่แตกต่างกันไป โดยจะกล่าวถึงการป้อนกำลังงานคลื่นระยะต่างๆของสายอากาศนั่นเอง สนามไฟฟ้าสนามกลไกในแนวไรเซชันร่วมและสนามระยะไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้สามารถเขียนแทนด้วยสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

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

$$\bar{E}_{cx} = -\bar{E}_\theta \cos(\phi) + \bar{E}_\phi \sin(\phi) \quad (2.23)$$

\bar{E}_θ และ \bar{E}_ϕ คือสนามไฟฟ้าในย่านสนามระยะไกลในแนวองค์ประกอบ \bar{a}_θ และ \bar{a}_ϕ ของพิกัดทรงกลมในระนาบ ϕ ใดใดตามลำดับ

จากสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ นำไปคำนวณหาอัตราขยายของระบบสายอากาศ ซึ่งเป็นค่าปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกความสามารถในการบีบรวมพลังงานที่แผ่กระจายมาจากสายอากาศให้พุ่งไปในทิศทางต่างๆ มากน้อยเพียงใด โดยคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในทิศทางที่ต้องการเทียบกับความหนาแน่นของกำลังคลื่นจากแหล่งกำเนิดแบบจุดที่แผ่พลังงานเท่าเทียมกันรอบทิศ (isotropic point source) ที่ป้อนด้วยกำลังป้อนเดียวกันกับระบบสายอากาศนั้น อัตราของระบบสายอากาศใดใดกำหนดโดยสมการ

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U_{rad}}{P_{in}} \quad (2.24)$$

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}) สามารถหาได้

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

อัตราขยายในแนวโพลาริเซชันไขว้สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเกี่ยวกับการรบกวนกันของสายอากาศตัวอื่นที่มีการใช้งานที่ความถี่เดียวกันแต่ต่างโพลาริเซชัน โดยถ้าผลต่างที่เกิดขึ้นมีค่ายิ่งมากขึ้นทำให้สายอากาศที่ใช้งานอยู่จะรบกวนสายอากาศตัวอื่นได้น้อยลง และผลต่างนี้สามารถอ้างอิงกับมาตรฐานของ ITU ซึ่งกำหนดว่าผลต่างระหว่างอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วมและในแนวโพลาริเซชันร่วมและในแนวโพลาริเซชันไขว้ควรมีค่ามากกว่า 30 dB

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

$$G_{cx}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{r^2 |\bar{E}_{cx}(\theta, \phi)|^2}{2Z_o P_T} \tag{2.26}$$

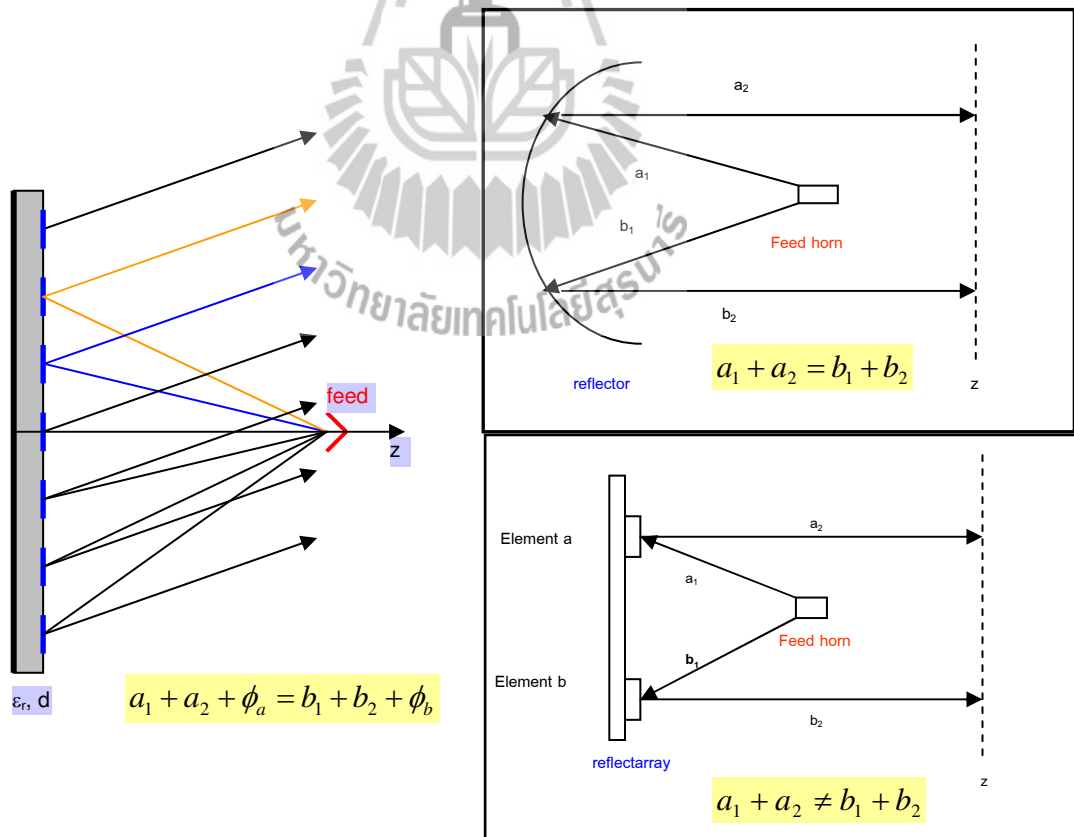
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ นอกจากแสดงอยู่ในรูปอัตราขยายของระบบสายอากาศแล้ว ยังสามารถแสดงได้ในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ กำลังคลื่นแผ่พลังงานเทียบเท่าไอโซทรอปิก (EIRP)

2.3 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการจัดการประวิงเฟส (Phase Delay) ตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าตัวสะท้อน

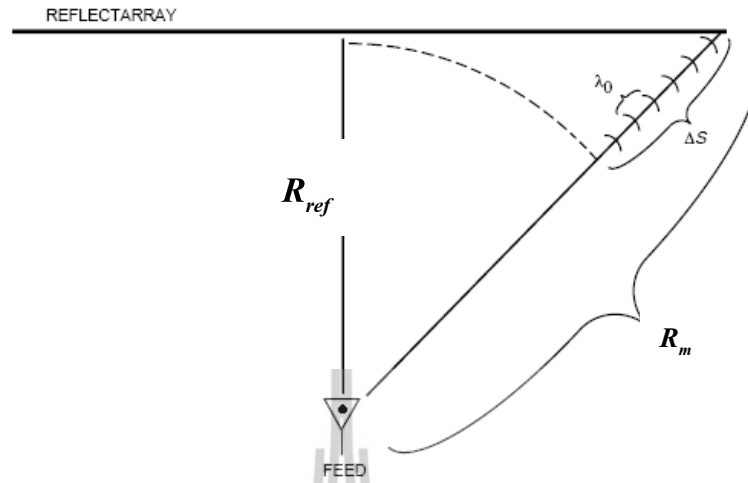
เราสามารถคำนวณหาเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางจากตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแล้วสะท้อนไปยังสนามระยะไกลได้ดังนี้

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} R = k_0 R \tag{2.27}$$



รูปที่ 2.6 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา

และสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป



รูปที่ 2.7 การประวิงเฟสในสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป

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

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_{mn} - \phi_{ref} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0} (R_{mn} - R_{ref}) \\ &= k_0 \Delta s\end{aligned}\quad (2.28)$$

ดังนั้นเฟสสะท้อนของแผ่นสะท้อนใดๆ ψ_{mn} คือ

$$\Delta\phi - \psi_{mn} = 2\pi N \quad (2.29)$$

เมื่อ $N = 0, 1, 2, 3, \dots$

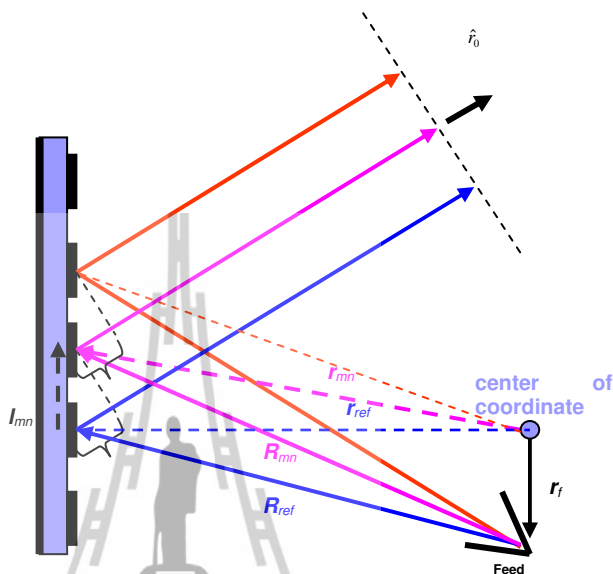
ถ้าหน้าคลื่น (Wavefront) และตัวป้อนสัญญาณปรับเลื่อนออกจากจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน เราสามารถหาเฟสสะท้อนได้จาก

$$\psi_{mn} - k_0 [R_{mn} + \bar{r}_{mn} \cdot \hat{r}_0] = 2\pi N \quad (2.30)$$

โดยที่

$$\bar{r}_{mn} \cdot \hat{r}_0 = md_x \sin \theta \cos \phi + nd_y \sin \theta \sin \phi \tag{2.31}$$

เมื่อ d_x และ d_y คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ



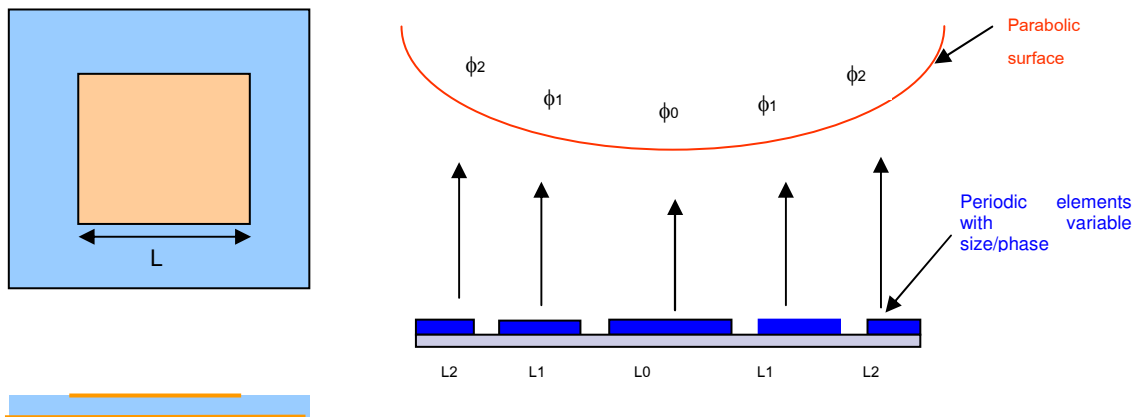
รูปที่ 2.8 การประวิงเฟสเนื่องจากการเคลื่อนตัวของป้อนสัญญาณและหน้าคลื่น

2.4 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริบ

เทคนิคเฟสสะท้อนโดยออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริบด้วยเทคนิคการจัดเฟส ซึ่งเทคนิคที่นิยมนำมาใช้มี 3 วิธีคือ การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน การปรับความยาวของสตัป และการปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

2.4.1. การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

การปรับขนาดของแผ่นสะท้อนใช้หลักการปรับความยาวของแผ่นสะท้อนในด้านที่มีผลกระทบกับความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อความถี่ใช้งานของแผ่นสะท้อนเปลี่ยนจะส่งผลให้เฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนในแผ่นสะท้อนเปลี่ยนแปลงด้วย จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเราสามารถปรับความยาวของแผ่นสะท้อนได้ไม่เกิน 4% จากความยาว ณ ความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนไม่ครบ 360° ดังนั้นจึงควรออกแบบการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนร่วมกับเทคนิคอื่น รูปที่ 2.8 แสดงการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

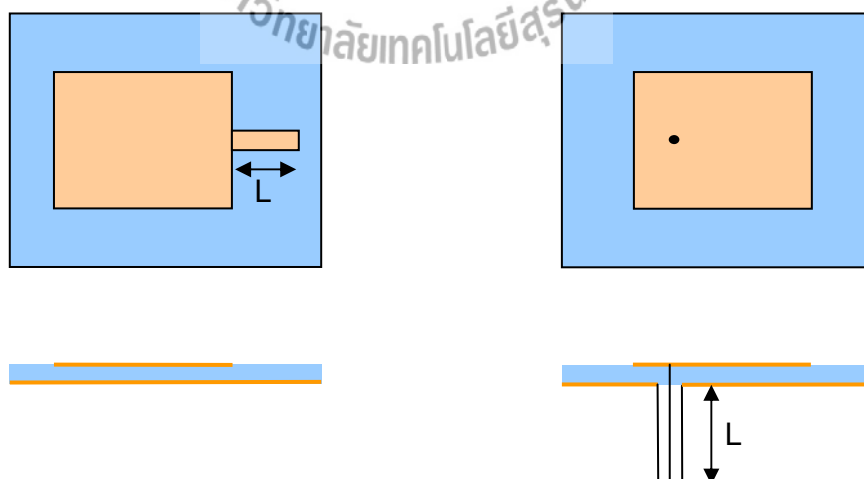


รูปที่ 2.9 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

2.4.2. การปรับความยาวของสัดับ

การจัดเฟสด้วยการปรับความยาวของสัดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะให้ผลของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฟสเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่าย เมื่อความยาวของสัดับเปลี่ยน จะส่งผลให้การหาเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแผ่นสะท้อนเปลี่ยน แต่การจัดเฟสวิธีนี้จะมีการสูญเสียเนื่องจากตัวสัดับ โดยสัดับที่นำมาใช้มี 3 แบบคือ

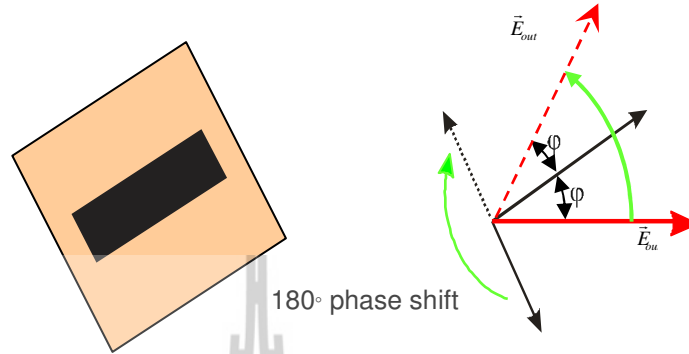
1. สัดับไมโครสตริปที่ต่อกับด้านข้างของแผ่นสะท้อน (Edge of patch)
2. สัดับไมโครสตริปที่ต่อแบบการเชื่อมร่วมอะเพอร์เจอร์ (Aperture coupled patch)
3. สัดับโคแอกเซียล



รูปที่ 2.10 การปรับความยาวของสัดับ ก. สัดับแบบไมโครสตริป ข. สัดับแบบโคแอกเซียล

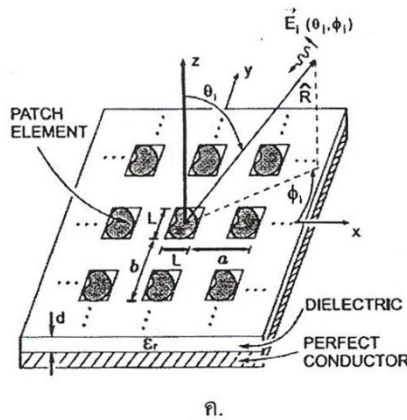
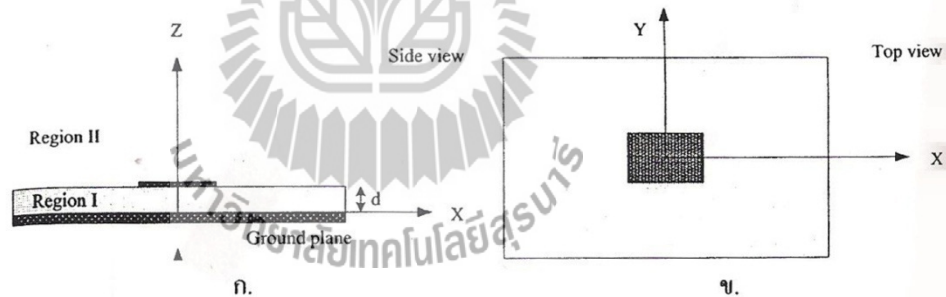
2.4.3. การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

การจัดเฟสด้วยการปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมุมของแผ่นสะท้อนสามารถปรับได้ 180° 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) ϵ_r, ϵ_0 และค่าความซาบซึมได้แม่เหล็ก (Permeability) μ_0 โดยค่าสภาพยอมจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในไดอิเล็กตริก และเราสามารถหาสมการเชิงอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation หรือ EFIE) สำหรับกระแสเชิงผิวบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป โดยใช้การแก้สมการของคลื่นระนาบตกกระทบบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจะใช้การนำแผ่นสะท้อนหลายแผ่นมาเรียงลำดับบนแผ่นวงจรพิมพ์

พิจารณาคลื่นระนาบที่มีมุมตกกระทบบน (θ_0, ϕ_0) จะได้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนคือ

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_0 e^{-jk_0 \hat{k}^{inc} \cdot \vec{R}} \quad (2.32)$$

$$\vec{H}^{inc} = \vec{H}_0 e^{-jk_0 \hat{k}^{inc} \cdot \vec{R}} = \frac{1}{\eta_0} \hat{k}_i \times \vec{E}^{inc} \quad (2.33)$$

โดยที่ \vec{E}_0 เป็นขนาดและเฟสของสนามตกกระทบบน ซึ่งอยู่ในเทอมขององค์ประกอบในแนวขนานและองค์ประกอบในแนวตั้งฉากของระบบคลื่นตกกระทบบน

$$\vec{E}_0 = E_{0\theta} \hat{u}_\theta^{inc} + E_{0\phi} \hat{u}_\phi^{inc} \quad (2.34)$$

$$\vec{H}_0 = -H_{0\theta} \hat{u}_\theta^{inc} + H_{0\phi} \hat{u}_\phi^{inc} = -\frac{1}{\eta_0} E_{0\phi} \hat{u}_\theta^{inc} + \frac{1}{\eta_0} E_{0\theta} \hat{u}_\phi^{inc} \quad (2.35)$$

และ

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_0 e^{jk_0(u_0 x + v_0 y + \cos(\theta_0) z)} \quad (2.36)$$

$$\hat{u}_\phi^{inc} = \hat{x} \sin \phi_0 - \hat{y} \cos \phi_0 \quad (2.37)$$

\vec{R} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง ณ จุดสังเกต

$$\vec{R} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \quad (2.38)$$

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

$$\hat{k}^{inc} = -(u_0 \hat{x} + v_0 \hat{y} + w_0 \hat{z}) \quad (2.39)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} u_0 &= \sin \theta_0 \cos \phi \\ v_0 &= \sin \theta_0 \sin \phi \\ w_0 &= \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสนามไฟฟ้าตกกระทบได้ใหม่เป็น

$$\overline{E}^{inc} = \overline{E}_0 e^{jk_0(u_0x+v_0y+\cos\theta_0)z} \quad (2.41)$$

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

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

แต่ถ้ามีแผ่นสะท้อนบนแผ่นวงจรพิมพ์ จะทำให้สนามรวมในสมการ (2.39) เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสผิว \overline{J}^s บนแผ่นสะท้อน และกระแสผิวนี้จะแผ่กำลังงานไปยังไดอิเล็กตริกกราวด์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระเจิง (Scattered Field) \overline{E}^{scat} ไปในไดอิเล็กตริกและอากาศ ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งหมดของแผ่นสะท้อนในบริเวณ $z \geq 0$ คือ

$$\overline{E}^{tot} = \overline{E}^{inc} + \overline{E}^{ref} + \overline{E}^{scat} \quad (2.43)$$

2.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแถวลำดับสะท้อนอนันต์

จากสมการ (2.43) สนามสะท้อนรวมประกอบด้วยสนามสะท้อนจากแผ่นไดอิเล็กตริกกราวด์และสนามกระเจิงเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำบนอิลิเมนต์ไมโครสตริป ซึ่งสนามทั้งสองสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \overline{E}^{ref} &= \overline{R} \cdot \overline{E}^{inc} \Big|_{z=0} e^{-jk_0z \cos \theta_0} \\ \overline{E}^{scat} &= \overline{S} \cdot \overline{E}^{inc} \Big|_{z=0} e^{-jk_0(z+d) \cos \theta_0} \end{aligned} \quad (2.44)$$

2.6.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการสะท้อนจากแผ่นไดอิเล็กทริกกรวด

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

$$E_z^{ref} = \frac{\sin \theta_0 \cos \phi_0 E_x^{ref} + \sin \theta_0 \sin \phi_0 E_y^{ref}}{\cos \phi_0} \quad (2.45)$$

แปลงสมการ (2.45) ให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้วได้เป็น

$$\begin{aligned} E_\theta^{ref} &= E_x^{ref} \cos \theta_r \cos \phi_r + E_y^{ref} \cos \theta_r \sin \phi_r - E_z^{ref} \sin \theta_r \\ E_\phi^{ref} &= -E_x^{ref} \sin \phi_r + E_y^{ref} \cos \phi_r \end{aligned} \quad (2.46)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \theta_r &= \theta_0 \\ \phi_r &= \phi_0 + \pi \end{aligned} \quad (2.47)$$

จากสมการ (2.43) และ (2.44) จะได้สัมประสิทธิ์สนามสะท้อน โดยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสนามสะท้อนกับสนามตกกระทบที่ระนาบ $z = 0$

$$\begin{aligned} R_{\theta\theta} &= -\Gamma^{TM} e^{j2k_0 \cos \theta_0 d} \\ R_{\phi\phi} &= \Gamma^{TM} e^{j2k_0 \cos \theta_0 d} \end{aligned} \quad (2.48)$$

เราสามารถเขียนสนามสะท้อนในรูปแบบเมตริกซ์ เนื่องจากสนามตกกระทบที่มีโพลาไรซ์ \hat{q} ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} E_\theta^{ref} \\ E_\phi^{ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & R_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_\theta \cdot \hat{q} \\ \hat{a}_\phi \cdot \hat{q} \end{pmatrix} e^{jk_0(u_0 x + v_0 y - z \cos \theta_0)} \quad (2.49)$$

2.6.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสน้ำย่นบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสน้ำย่นบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป พิจารณาจากสนามกระเจิง โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า $[I]$ จะหาได้ด้วยวิธีเชิงเลขและสนามกระเจิงในอากาศหรือไดอิเล็กตริก หาได้จากสมการที่ (2.50)

$$\begin{aligned} \bar{E}^{scat}(x, y, z) &= \begin{pmatrix} E_x(x, y, d) \\ E_y(x, y, d) \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{T_{\eta_1} T_{\eta_2} \sin \alpha} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{G}(k'_x, k'_y) \bar{J}_0(k'_x, k'_y) e^{jk'_x x} e^{jk'_y y} \end{aligned} \quad (2.50)$$

โดยที่

$$\bar{J}_0(k'_x, k'_y) = \sum_{j=1}^N I_j \bar{J}_j(k'_x, k'_y) \quad (2.51)$$

สนามบนไดอิเล็กตริกสามารถเขียนในเทอมของสนามเชิงผิวของไดอิเล็กตริก ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_x(x, y, z > d) &= E_x(x, y, d) e^{-jk_z(z-d)} \\ E_y(x, y, z > d) &= E_y(x, y, d) e^{-jk_z(z-d)} \\ E_z(x, y, z > d) &= \frac{k'_x E_x(x, y, d) + k'_y E_y(x, y, d)}{k_z} e^{-jk_z(z-d)} \end{aligned} \quad (2.52)$$

โดยที่

$$k_z = k_0^2 - k_x'^2 - k_y'^2 \quad (2.53)$$

$$k_x' = \frac{2\pi m}{T_{\eta_1}} + k_0 u_0 \quad (2.54)$$

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

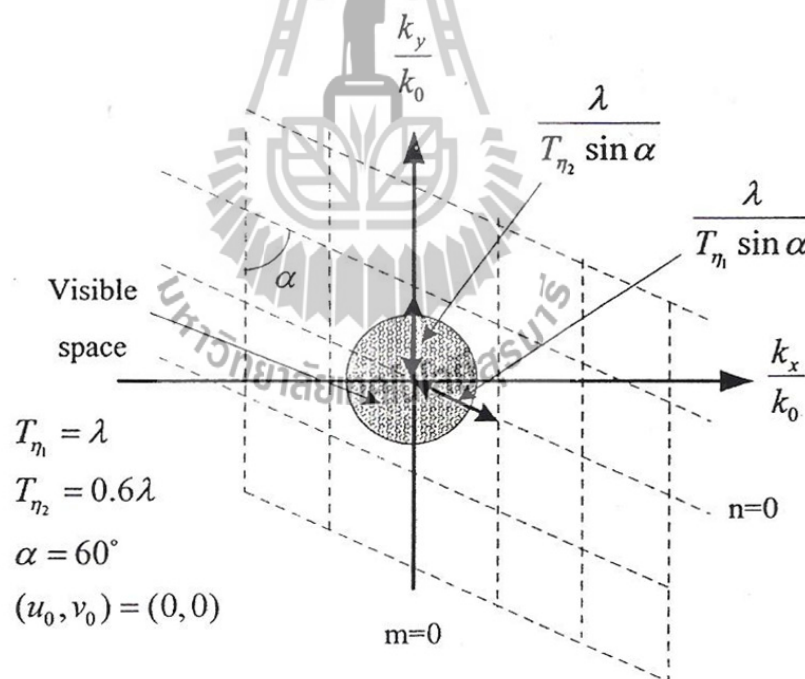
การพิจารณาค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant) k_z สำหรับโครงสร้างแบบรายคาบอนันต์ หาได้จากการนอร์มัลไลซ์สมการ (2.53)

$$\frac{k_z}{k_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{k'_x}{k_0}\right)^2 - \left(\frac{k'_y}{k_0}\right)^2} \quad (2.55)$$

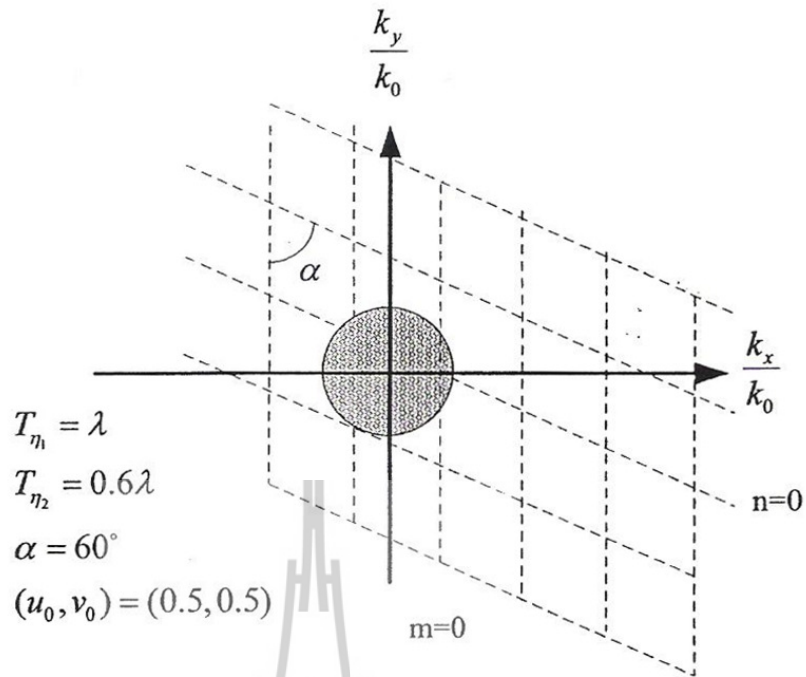
หรือ

$$\left(\frac{k'_x}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{k'_y}{k_0}\right)^2 < 1 \quad (2.56)$$

สมการ(2.56)ใช้สำหรับสนามสะท้อนเนื่องจากกระแสเชิงผิวบนแผ่นสะท้อนในโหมด $m=0, n=0$ แต่อย่างไรก็ตาม สมการ(2.56) สามารถใช้สำหรับกรณีที่มีมุมตกกระทบ และคาบหรือระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนมีอันดับโหมดสูงขึ้นได้ เพื่อให้ง่ายในการออกแบบ เราจะใช้ Reciprocal Lattice หรือ Grating Lobe Diagram ซึ่งไออะแกรมนี้จะพล็อตค่าแอมพลิจูดของ 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 และมีมุมตกกระทบของกลุ่มแผ่นสะท้อนให้อยู่ในโหมดการแผ่กระจายคลื่น $(m, n) = (0, 0)$ สามารถเขียนสมการ (2.47) ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \bar{E}^{scat}(x, y, d) &= \begin{pmatrix} E_x(x, y, d) \\ E_y(x, y, d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x^q \\ E_y^q \end{pmatrix} e^{jk_0 u_0 x} e^{jk_0 v_0 y} \\ &= \frac{1}{T_{n_1} T_{n_2} \sin \alpha} \bar{G}(k_0 u_0, k_0 v_0) \bar{J}_0^q(k_0 u_0, k_0 v_0) e^{jk_0 u_0 x} e^{jk_0 v_0 y} \end{aligned} \quad (2.57)$$

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

$$\begin{pmatrix} E_\theta^{scat} \\ E_\phi^{scat} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta^{inc} \\ E_\phi^{inc} \end{pmatrix} e^{jk_0(u_0 x + v_0 y - z \cos \theta_0)} \quad (2.58)$$

โดยที่

$$S_{pq} = \frac{E_p^{scat}(z=0)}{E_q^{scat}(z=0)} \quad (2.59)$$

แทนสมการ (2.57) ลงในสมการ (2.52) และแปลงให้อยู่ในพิกัดทรงกลม จะได้

$$E_{\theta}^{scat} = - \left[\frac{\cos \phi_0 E_x^q + \sin \phi_0 E_y^q}{\cos \theta_0} \right] e^{jk_0(u_0x+v_0y)} e^{-jk_z(z-d)} \quad (2.60)$$

$$E_{\phi}^{scat} = \left[\sin \phi_0 E_x^q - \cos \phi_0 E_y^q \right] e^{jk_0(u_0x+v_0y)} e^{-jk_z(z-d)}$$

ภายใต้เงื่อนไขของสมการ (2.59) จะได้อิทธิพันธ์เมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิง ดังนี้

$$S_{\theta q} = \left[\frac{\cos \phi_0 E_x^q + \sin \phi_0 E_y^q}{\cos \theta_0} \right] e^{jk_z d} \quad (2.61)$$

$$S_{\phi q} = \left[\sin \phi_0 E_x^q - \cos \phi_0 E_y^q \right] e^{jk_z d}$$

2.6.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวม

สัมประสิทธิ์รวมในทิศการสะท้อนหาได้จากผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อน เนื่องจากแผ่นไดอิเล็กตริกกราวด์และสัมประสิทธิ์การกระเจิงที่ผิวแผ่นสะท้อน

$$\bar{R}^{tot} = \bar{R} + \bar{S} = \begin{bmatrix} R_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & R_{\phi\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

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

2.7 สรุป

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

บทที่ 3

การออกแบบและการสังเคราะห์

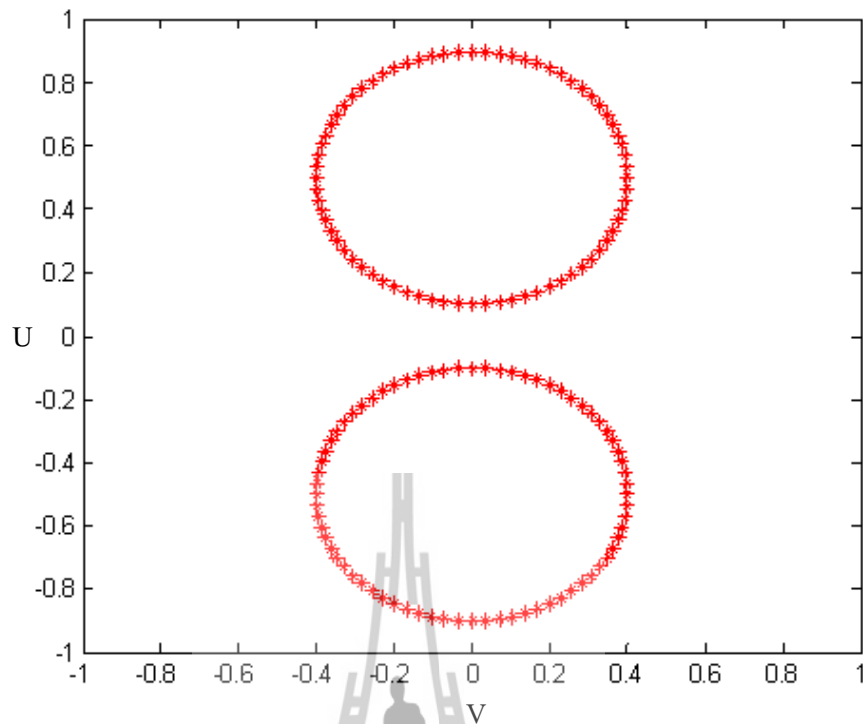
3.1 บทนำ

ในการออกแบบและการสังเคราะห์ เริ่มต้นเราจะมีข้อกำหนดพื้นที่ครอบคลุมเป็นรูปวงกลมสองวงซึ่งวางตัวในตำแหน่งที่ต่างกัน มีการกำหนดสายอากาศสำหรับป้อน การหาโคไซน์ของสายอากาศป้อน เมื่อได้แล้วนำมาวิเคราะห์สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวด้วยวิธีอ้างอิง เพื่อนำมาพิจารณาการประวิงเฟสของงานสะท้อนเดี่ยวด้วยวิธีอ้างอิง เมื่อได้การประวิงเฟสแล้วก็ใช้คุณลักษณะของแผ่นสะท้อนที่หาได้จากโปรแกรม CST มาเปรียบเทียบกับ เพื่อที่จะได้ขนาดของแพทช์ (Patch) ในการขึ้นรูปและได้แบบรูปการแผ่กำลังงานตามที่ได้กำหนดพื้นที่ครอบคลุมไว้ การกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้

- ความถี่ปฏิบัติการ สำหรับการใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz
- ลักษณะพื้นที่ครอบคลุมรูปวงกลมสองบริเวณ
- อัตราขยายของระบบสายอากาศ = 20 dB
- ขนาดของงานสะท้อน 40×40 cm.
- ระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อน $f = 12$ cm.
- สายอากาศป้อนวิวอลดี

3.2 การกำหนดพื้นที่ครอบคลุม

ในโครงการนี้จะมีการกำหนดพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมสองวงแนวตั้ง

3.3 สายอากาศป้อนวิวลติ

สายอากาศป้อนวิวลติเป็นสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง โดยสูตรการหาสายอากาศร่องรีขเวแบบเส้นโค้งแบบเอกโปแนนเชียล ดังนี้

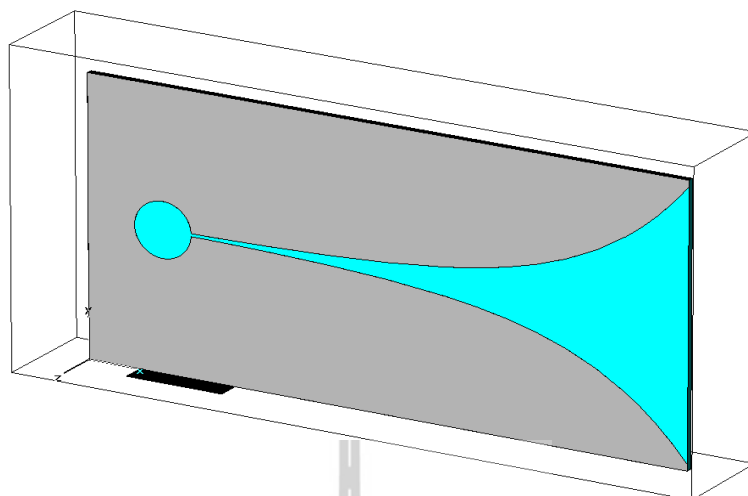
$$y = C_1 e^{Rz} + C_2 \quad (3.1)$$

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

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

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

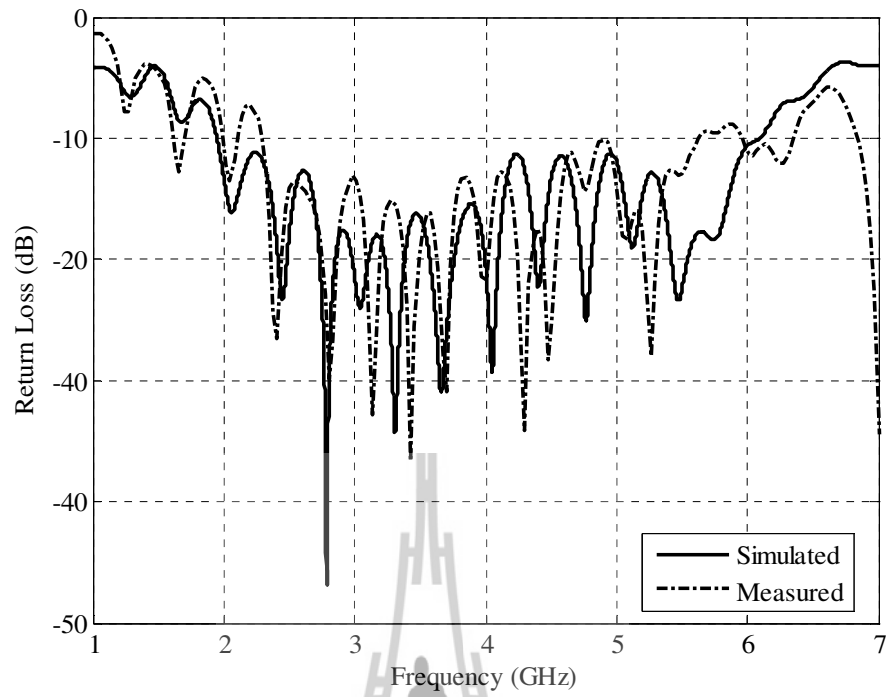
รูปที่ 3.2 - 3.6 แสดงผลการจำลองแบบสายอากาศวิวลติ ซึ่งสามารถใช้งานในย่านความถี่ 2-6 GHz มีอัตราขยาย (Gain) ประมาณ 9-11 dB สำหรับสายอากาศป้อนวิวลติที่นำมาใช้งานมีขนาด 31.88×15.3 เซนติเมตร เลือกใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 11 dB สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น S11 เท่ากับ -46 dB และค่า VSWR เท่ากับ 1.2



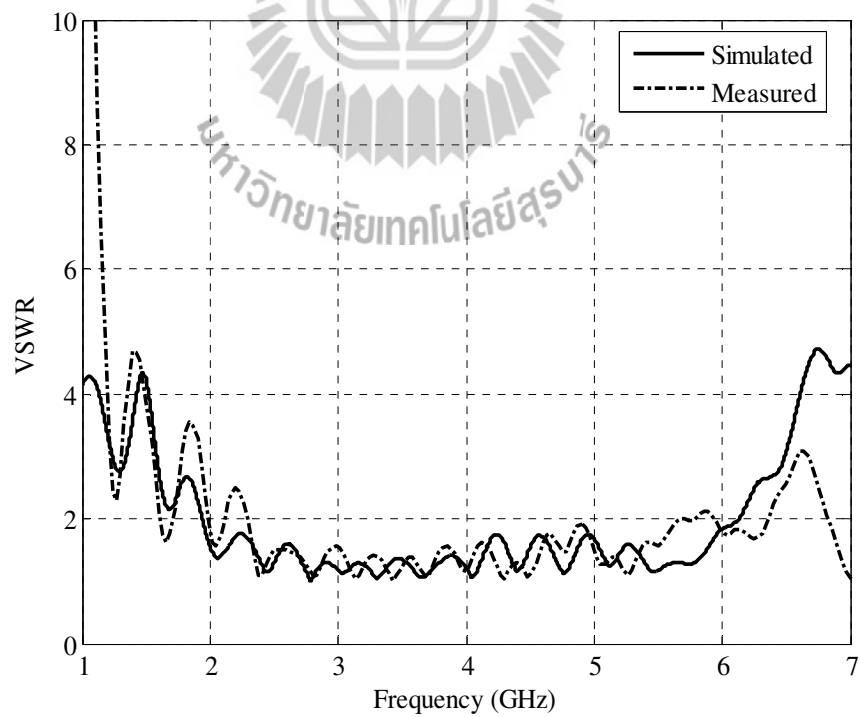
รูปที่ 3.2 สายอากาศป้อนวิวลติ

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศป้อนวิวลติ

ลักษณะสายอากาศวิวลติ	ขนาด (mm)
ความยาวสายอากาศ	318.8
ความกว้างสายอากาศ	153
ความยาวของร่อง	271.7
ระยะห่างของร่อง	75
เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตัป	30.4
ความกว้างของสายป้อนไมโครสตริป	5.13
ความหนาของไดอิเล็กตริก	1.6

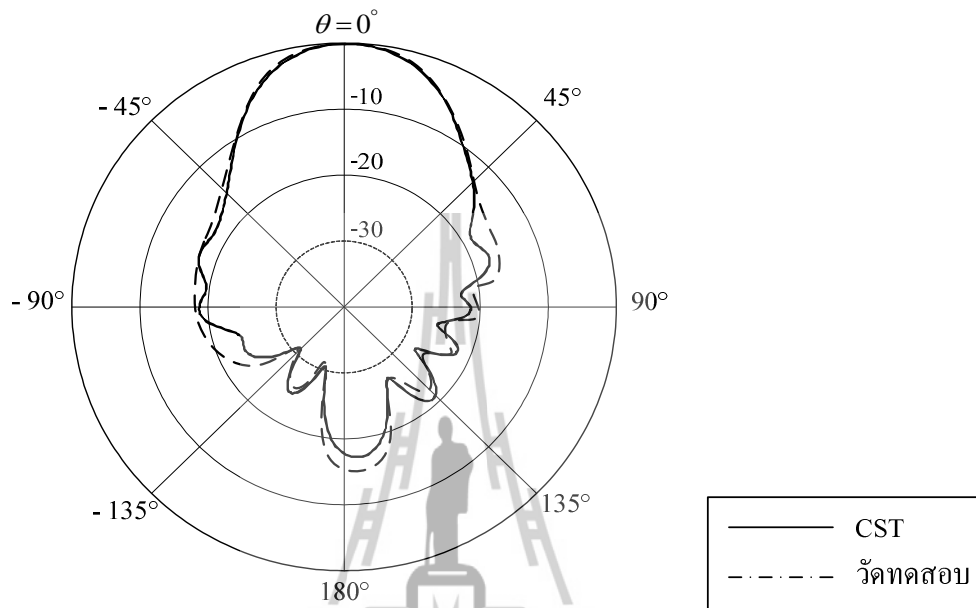


รูปที่ 3.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น (S11) ของสายอากาศป้อนวิวอลดี

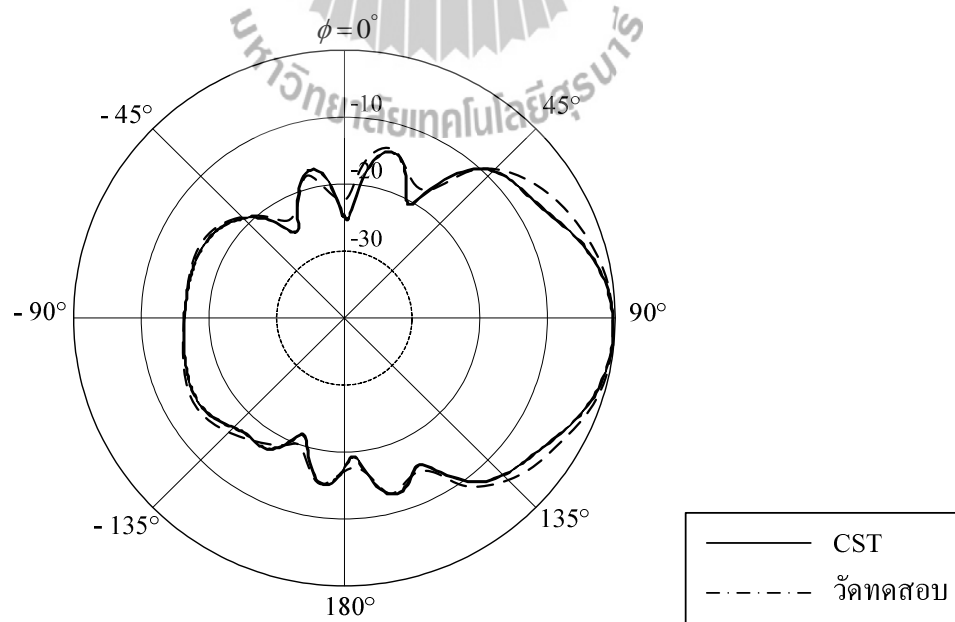


รูปที่ 3.4 ค่า VSWR ของสายป้อนวิวอลดี

รูปที่ 3.5 แสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ซึ่งจะพบว่าลำคลื่นหลักมีอัตราขยายเท่ากับ 10.56 dB โหลบด้านข้างมีอัตราขยายเท่ากับ -17 dB ส่วนรูปที่ 3.6 แสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ซึ่งจะพบว่าลำคลื่นหลักมีอัตราขยายเท่ากับ 10.56 dB โหลบด้านข้างมีอัตราขยายเท่ากับ -15 dB



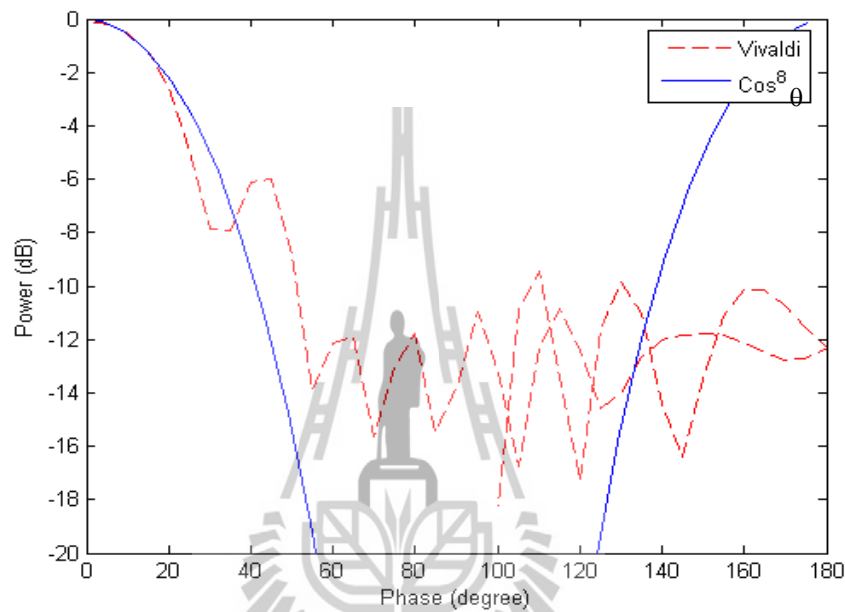
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศป้อนวีวอลดี



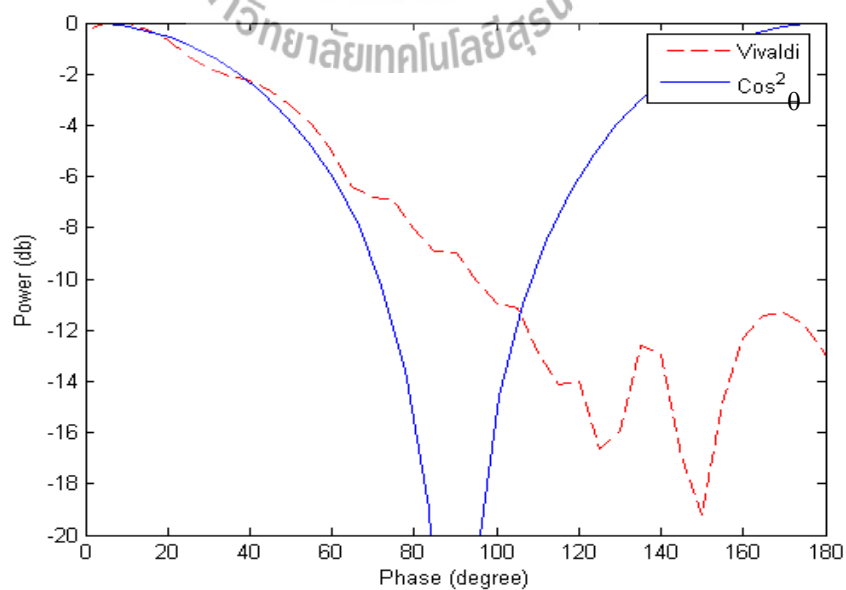
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศป้อนวีวอลดี

3.4 การหาค่ากำลังโคไซน์ของวีวอลดี

การหาค่ากำลังโคไซน์ของวีวอลดี หาได้จากการนำเอาผลของแบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบในระนาบสนามไฟฟ้า และในระนาบสนามแม่เหล็กมาเปรียบเทียบกับกำลังของโคไซน์ในอันดับต่างๆ ผลที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้า สายอากาศป้อนวีวอลดีจะได้ค่ากำลังโคไซน์ที่ กำลัง $8 (\text{Cos}^8 \theta)$ ดังรูปที่ 3.7 และในสนามแม่เหล็ก สายอากาศป้อนวีวอลดีจะได้ค่ากำลังโคไซน์ที่ กำลัง $2 (\text{Cos}^2 \theta)$ รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวีวอลดีในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)



รูปที่ 3.8 กำลังโคไซน์ของสายอากาศป้อนวีวอลดีในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)

3.5 สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปอ้างอิง

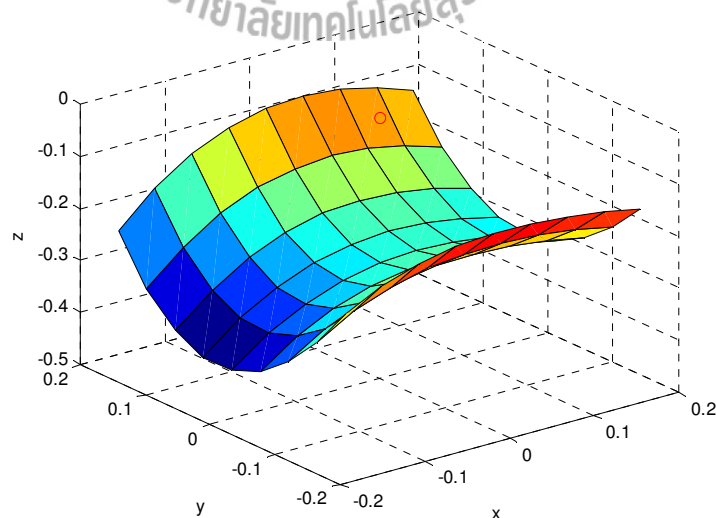
เมื่อได้กำลังโคไซน์ของวิวอลติสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัวป้อนในหัวข้อ 3.4 แล้ว จากนั้นใช้หลักการของ PO และ PTD มาวิเคราะห์สายอากาศ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้

- ความถี่ปฏิบัติการในย่านความถี่ 2.45 GHz
- ลักษณะพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณที่เป็นวงกลม
- อัตราขยายของระบบสายอากาศ = 20 dB
- ขนาดของงานสะท้อน 40×40 cm.
- ระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อน $f = 12$ cm.
- สายอากาศป้อนวิวอลติ

และใช้สมการ(3.2) เพื่อหา z_r ของงานสะท้อนอ้างอิง

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

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์แล้ว จะได้งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณเป็นรูปวงกลม ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปอ้างอิงที่มีพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณที่เป็นรูปวงกลม

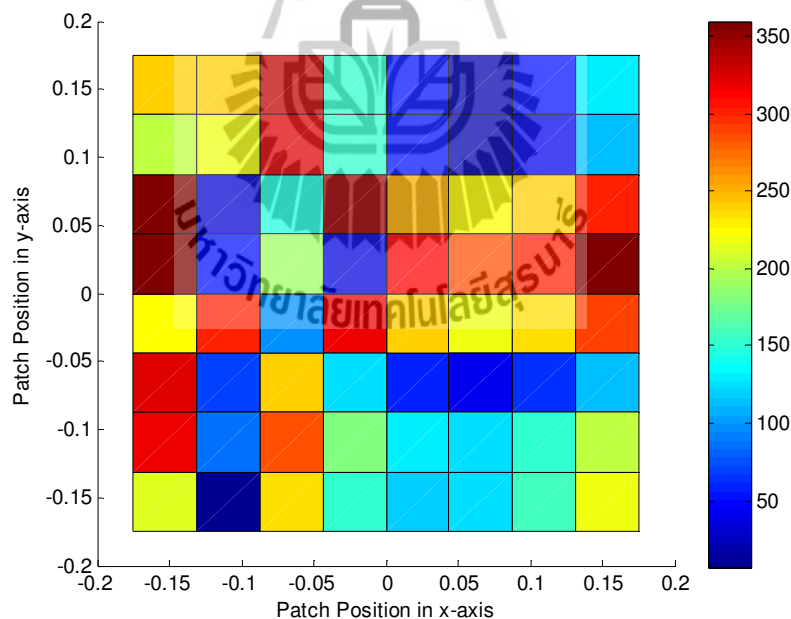
สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวดักรูปอ้างอิงดังที่ปรากฏดังรูปที่ 3.9 มีการกำหนดให้มุมเล็งมีค่าเท่ากับ 0 องศา และเมื่อนำสายอากาศมาวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะมีการระบุถึงตำแหน่งจุดสะท้อนให้สัมพันธ์กับตำแหน่งการวางของแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน จะทำให้เรหาค่าการประวิงเฟสได้ต่อไป

3.6 การประวิงเฟส

โดยทั่วไป สายอากาศแถวลำดับสะท้อนใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการประวิงเฟส (Phase Delay) เสมือนตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อน เราสามารถคำนวณหาการประวิงเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางจากตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแล้วสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกลได้ดังนี้

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

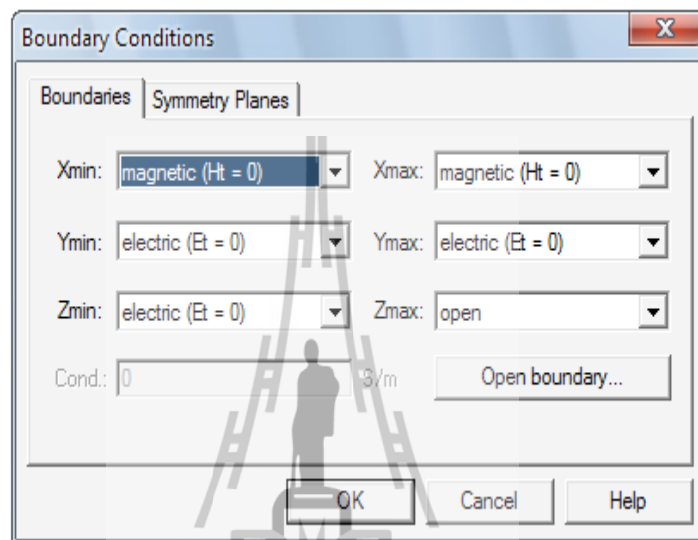
เมื่อ z_r จำนวนได้จากสมการที่ (3.2) ผลการคำนวณหาการประวิงเฟสแสดงดังรูปที่ 3.12



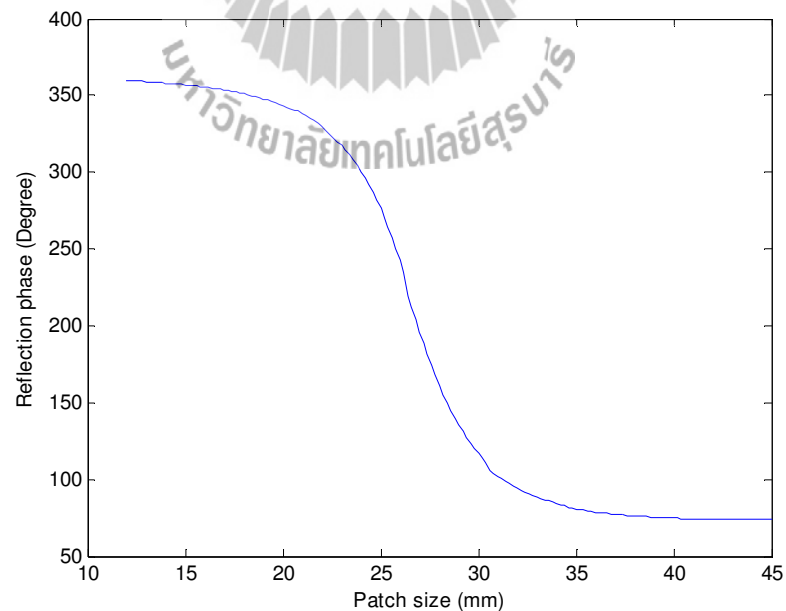
รูปที่ 3.10 การประวิงเฟสสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมสองบริเวณ

3.7 คุณลักษณะแผ่นสะท้อน

คุณลักษณะแผ่นสะท้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz โดยมีการใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองผล มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.11 และกำหนดค่าความหนาของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นปรินซ์ FR4 เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และสภาพยอม (ϵ_r) = 4.5



รูปที่ 3.11 การกำหนดพารามิเตอร์



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อน ณ ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 3.12 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแพทช์(Patch) กับ เฟสแผ่นสะท้อน (Reflection phase) พบว่า ที่ ขนาดแพทช์ในช่วง 10-21 มิลลิเมตร ขนาดเฟสของแผ่นสะท้อนจะมีลักษณะที่คงที่ประมาณ 325-350 องศา ในช่วง 21-33 มิลลิเมตร ขนาดของเฟสของแผ่นสะท้อนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ประมาณ 75-325 องศา และในช่วง 33-45 มิลลิเมตร ขนาดเฟสของแผ่นสะท้อนจะมีลักษณะคงที่ ประมาณ 75 องศา

3.8 ขนาดของแพทช์ (Patch)

เมื่อทำการประวิงเฟสจากหัวข้อ 3.6 โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้ กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมกับขนาดแผ่นสะท้อน ณ ความถี่ 2.45 GHz ดังรูปที่ 3.12 จะทำให้ได้ขนาดของแพทช์ (Patch) ดังตารางที่ 3.2 เพื่อใช้ในการออกแบบ

3.8.1 ขนาดแพทช์สายอากาศจานสะท้อนแบบสองลำคลื่น

ตารางที่ 3.2 ขนาดแพทช์ของสายอากาศจานสะท้อนแบบจตุรัสสองลำคลื่นรูปวงกลมแนวตั้ง

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-175	-175	26.5544
-175	-131.2	22.9673
-175	-87.5	22.2512
-175	-43.8	26.3318
-175	0	0
-175	43.8	14.6722
-175	87.5	26.8429
-175	131.2	26.0407
-175	175	31.3087
-131.2	-175	0
-131.2	-131.2	33.507
-131.2	-43.2	23.947
-131.2	0	0
-131.2	43.8	0
-131.2	87.5	26.4639
-131.2	131.2	26.0778

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
-131.2	175	34.0991
-87.5	-175	26.2041
-87.5	-131.2	24.7053
-87.5	-87.5	25.9965
-87.5	-43.8	31.7493
-87.5	0	27.1710
-87.5	43.8	28.3695
-87.5	87.5	22.5249
-87.5	131.2	21.5591
-87.5	175	27.7719
-43.8	-175	28.2315
-43.8	-131.2	27.3621
-43.8	-87.5	29.6378
-43.8	-43.8	22.8054
-43.8	0	0
-43.8	43.8	18.8803
-43.8	87.5	28.3313
-43.8	131.2	28.1980
-43.8	175	19.6999
0	-175	29.7630
0	-131.2	29.0952
0	-87.5	0
0	-43.8	25.9748
0	43.8	25.6706
0	87.5	0
0	131.2	0
0	175	25.9766
43.8	-175	29.4637
43.8	-131.2	29.4596

แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
43.8	-87.5	0
43.8	-43.8	26.4145
43.8	0	24.7243
43.8	43.8	26.3664
43.8	87.5	0
43.8	131.2	0
43.8	175	26.4938
87.5	-175	28.0033
87.5	-131.2	28.2755
87.5	-87.5	0
87.5	-43.8	26.1460
87.5	0	23.9623
87.5	43.8	26.0461
87.5	87.5	0
87.5	131.2	0
87.5	175	25.7141
131.2	-175	26.4729
131.2	-131.2	26.7691
131.2	-87.5	30.1804
131.2	-43.8	24.5073
131.2	0	14.9526
131.2	43.8	23.8895
131.2	131.2	29.1514
131.2	175	19.1573
175	-175	24.6755
175	-131.2	25.0771
175	-87.5	27.2740
175	-43.8	0
175	0	34.4943

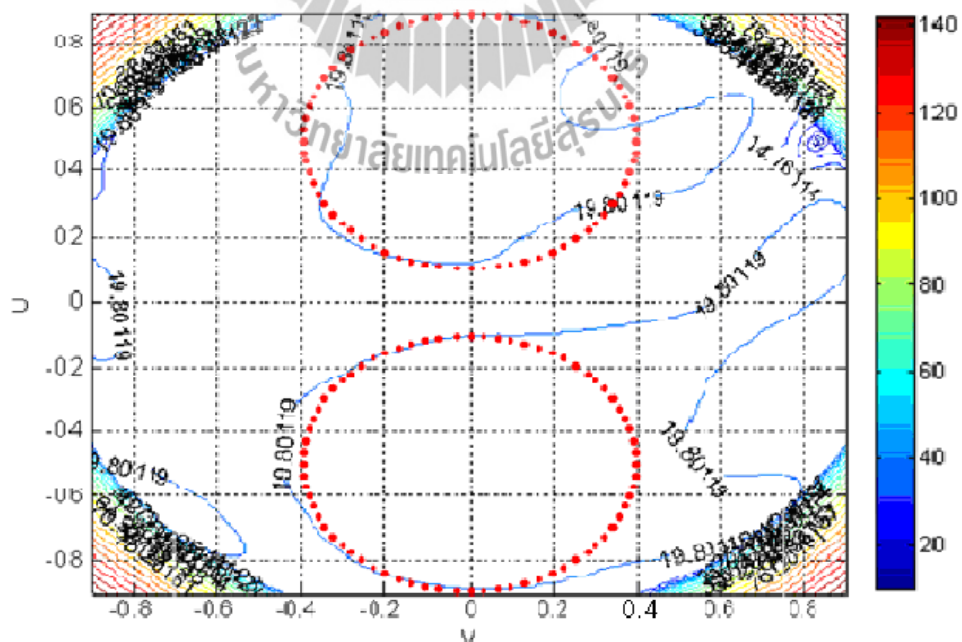
แกน x (มิลลิเมตร)	แกน y (มิลลิเมตร)	ขนาด (มิลลิเมตร)
175	43.8	0
175	87.5	26.3832
175	131.2	25.6527
175	175	29.3179

3.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Far field pattern) ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

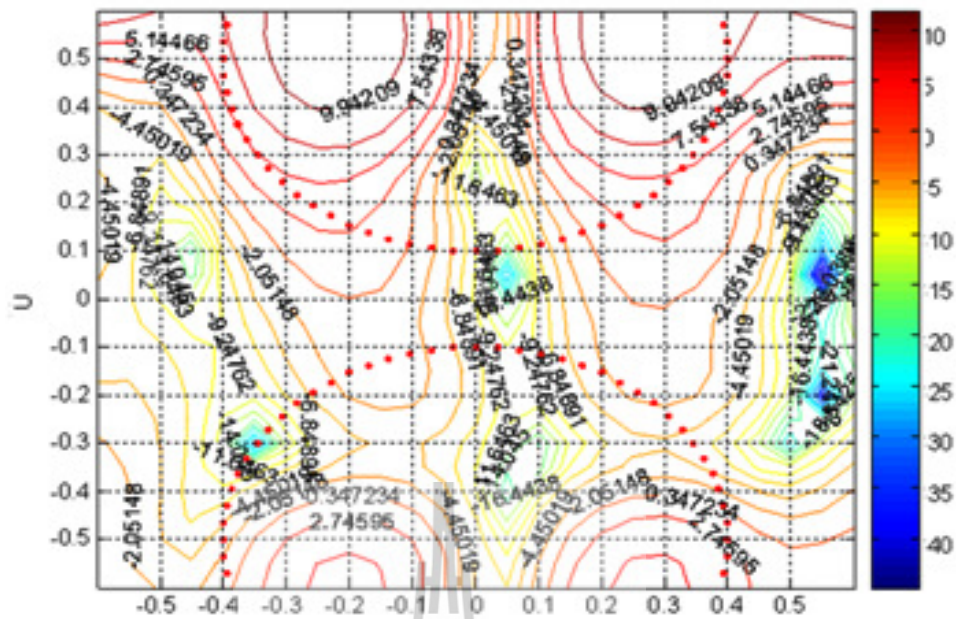
แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนหาได้จากผลรวมระหว่างสนามกระเจิงและสนามสะท้อนจากแถวลำดับแผ่นสะท้อน โดยสมมติให้สนามมีการกระจายอยู่บนแนวลำดับสะท้อนจำกัด ซึ่งคล้ายกับหลักการของ Huygens Sources โดยมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนสมมูลกับสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนรวมของลำดับบอดี้ จะได้สนามระยะไกลสำหรับสายอากาศแถวลำดับสะท้อนตามสมการ

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

3.9.1 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปสองลำคลื่น



รูปที่ 3.13 แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบสองลำคลื่น



รูปที่ 3.14 แบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบแบบสองลำคลื่น

รูปที่ 3.13 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ซึ่งสังเกตได้ว่าแบบรูปการแผ่กำลังงานครอบคลุมพื้นที่สองบริเวณด้วยกัน และมีอัตราขยายอยู่ในช่วง 15-20 dB โดยที่ $U = \sin \theta \cos \phi$ และ $V = \sin \theta \sin \phi$

3.10 สรุป

ในบทนี้นำเสนอตัวอย่างการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับสำหรับเครื่องข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz มีการกำหนดขนาดพื้นที่ครอบคลุมที่สมมติขึ้นอยู่สองบริเวณด้วยกัน และมีอัตราขยายเท่ากับ 20 dB ซึ่งการออกแบบแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปด้วยเทคนิคการจัดเฟสของสัญญาณให้เกิดคุณลักษณะเสมือนผิวโค้งของสายอากาศจานท่อนเดี่ยวตัดรูป จะใช้การวิเคราะห์หาการประวิงเฟสเนื่องจากลักษณะที่แตกต่างกันทางเรขาคณิตของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนกับสายอากาศจานท่อนเดี่ยวตัดรูป แล้วเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและขนาดของแผ่นสะท้อนไมโครสตริปที่ได้จากการหาคุณลักษณะแผ่นสะท้อน และจะสามารถหาขนาดของแพทช์ (Patch) เพื่อใช้ในการขึ้นรูปสายอากาศต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริบแบบจัดลำดับคลื่นรูปวงกลมสองวง โดยจะอธิบายถึงวิธีการสร้างสายอากาศต้นแบบ จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบมาวัดทดสอบคุณลักษณะ ได้แก่แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก พื้นที่ครอบคลุม อัตราขยายของสายอากาศ และนำคุณลักษณะไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการจำลองแบบ

4.2 การสร้างสายอากาศป้อนวิวอลติ

เมื่อได้ผลการจำลองแบบของสายอากาศป้อนวิวอลติในบทที่ 3 จากนั้นจึงทำการสร้างสายอากาศตัวป้อนวิวอลติต้นแบบ ดังรูปที่ 4.1 เมื่อทำการสร้างสายอากาศป้อนวิวอลติ จากนั้นทำการทดสอบสายอากาศป้อนวิวอลติ ได้คุณลักษณะของสายป้อนวิวอลติ ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายอากาศป้อนวิวอลติ

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของสายอากาศป้อนวิวอลติ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการวัดทดสอบ	
	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (degree)	50.6	90.1
อัตราขยายสูงสุด (dBi)	10.56	11

4.3 การสร้างสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมสองวง

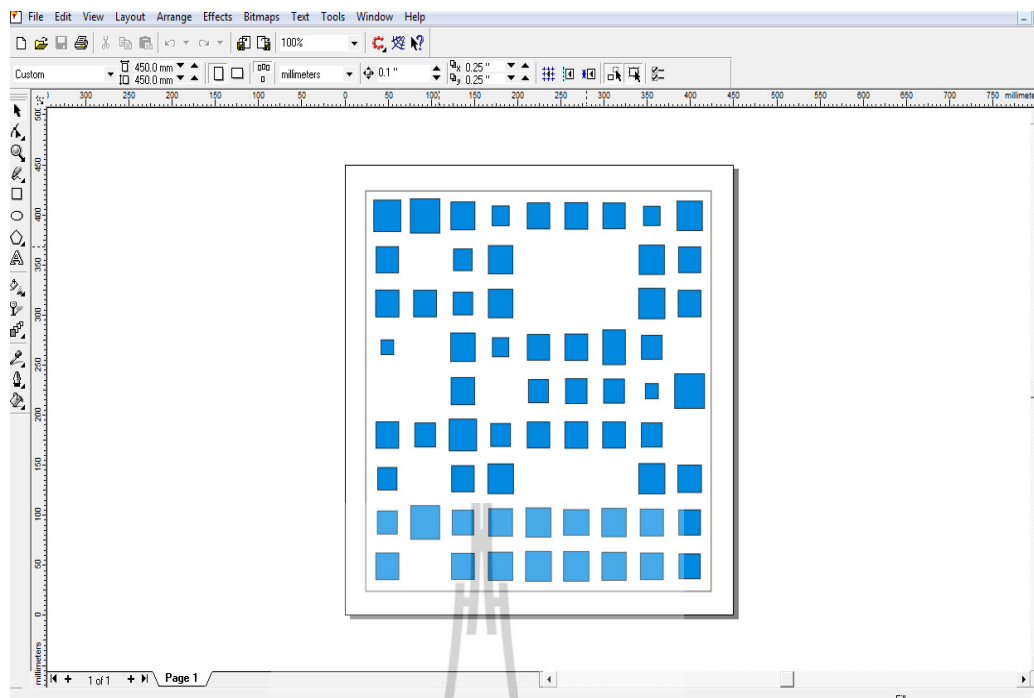
ในโครงการนี้ได้เลือกใช้แผ่นไมโครสตริป FR4 ซึ่งมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าสภาพยอม $\epsilon_r = 4.5$ ในการสร้างสายอากาศ โดยสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนจะถูกออกแบบให้มีแผ่นสะท้อนไมโครสตริปขนาดแตกต่างกันจำนวน 63 แผ่น วางห่างกัน $0.4\lambda_0$ และค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสายอากาศเป็นดังนี้

- 1) ความถี่ปฏิบัติการ 2.45 GHz
- 2) สายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นสายอากาศวิวอลติ
- 3) สายอากาศแฉวลำดับสะท้อนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร
- 4) ระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 12 เซนติเมตร

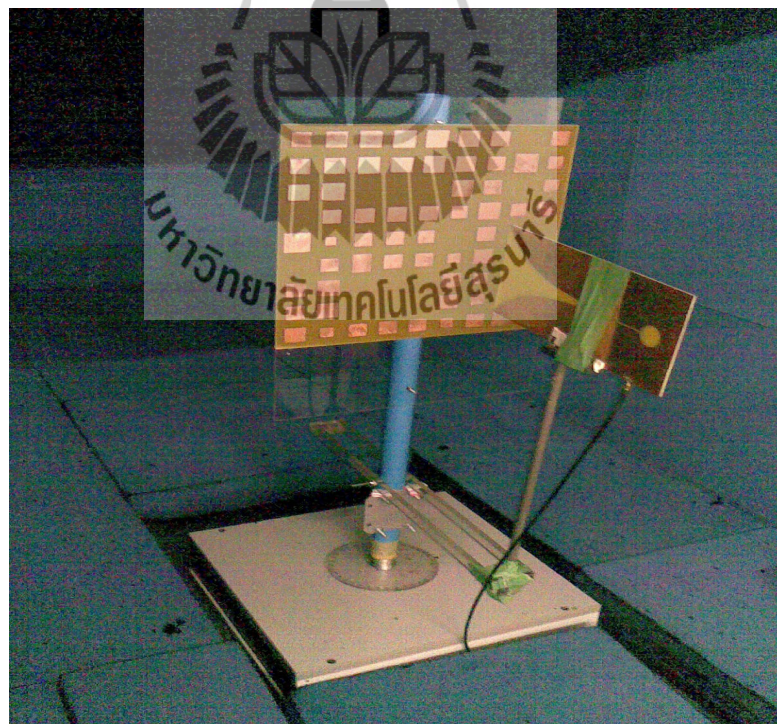
สำหรับขนาดแผ่นสะท้อนที่ความถี่เรโซแนนซ์พิจารณาได้จากสมการ (4.1) ดังนี้

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

แต่การสร้างสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนนั้นจะทำการเปรียบเทียบการประวิงเฟสกับเฟสสะท้อน ดังนั้นจึงทำให้เราทราบขนาดที่แท้จริงเพื่อนำมาออกแบบสายอากาศดังกล่าว และเราสามารถออกแบบรูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CoreIDRAW9 ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และจะได้สายอากาศต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 รูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นวงกลมแนวตั้งสองวง



รูปที่ 4.3 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปลำคลื่นรูปวงกลมแนวตั้งสองวงต้นแบบ

4.3.1 ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน

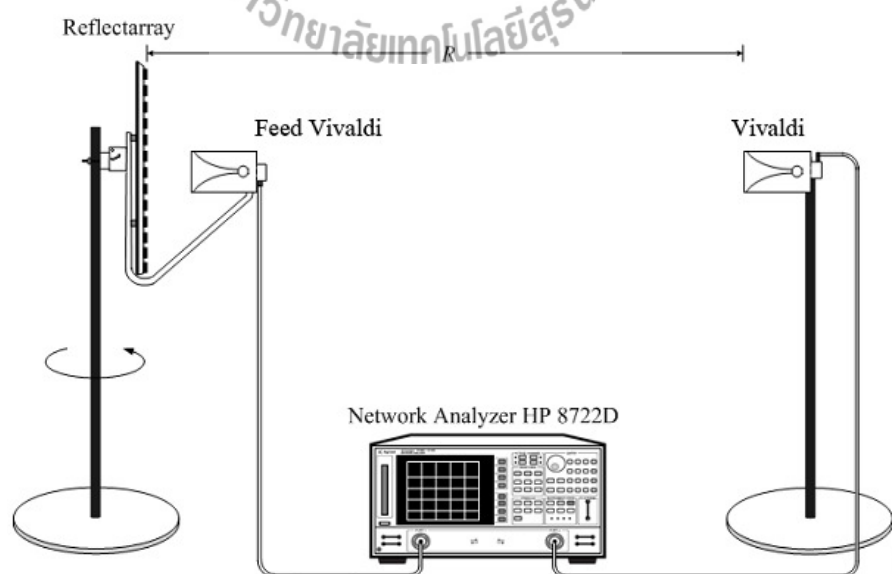
4.3.1.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลาค์นินดิสนอ

แบบรูปการแผ่พลังงานนั้นได้ทดสอบในสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2 / \lambda$ เมื่อ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบ และสายอากาศอ้างอิง ในการทดสอบนี้ระยะทางมีค่าคงที่ที่ ความถี่ 2.45 GHz และ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อนมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ ได้ใช้สายป้อนวีวอลดีที่ความถี่ 2.45GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่นจาก 0 องศา ถึง 360 องศา ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.5 โดยแบบรูปการแผ่พลังงานนี้จะแสดงในรูปของอัตราขยาย ดังสมการพื้นฐาน (Friis Transmission Equation)

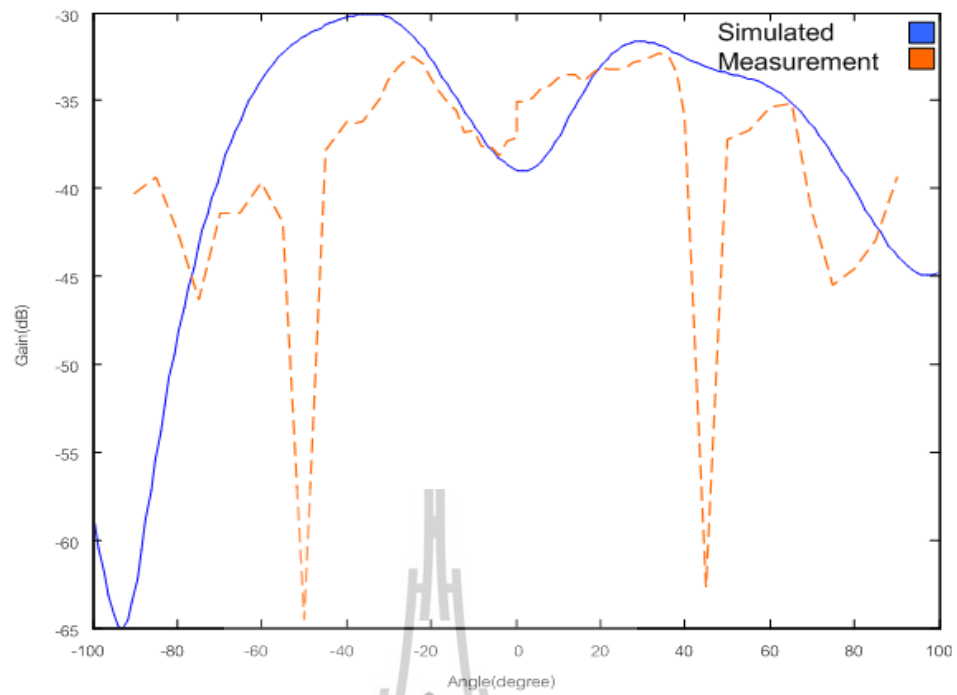
$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.2)$$

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

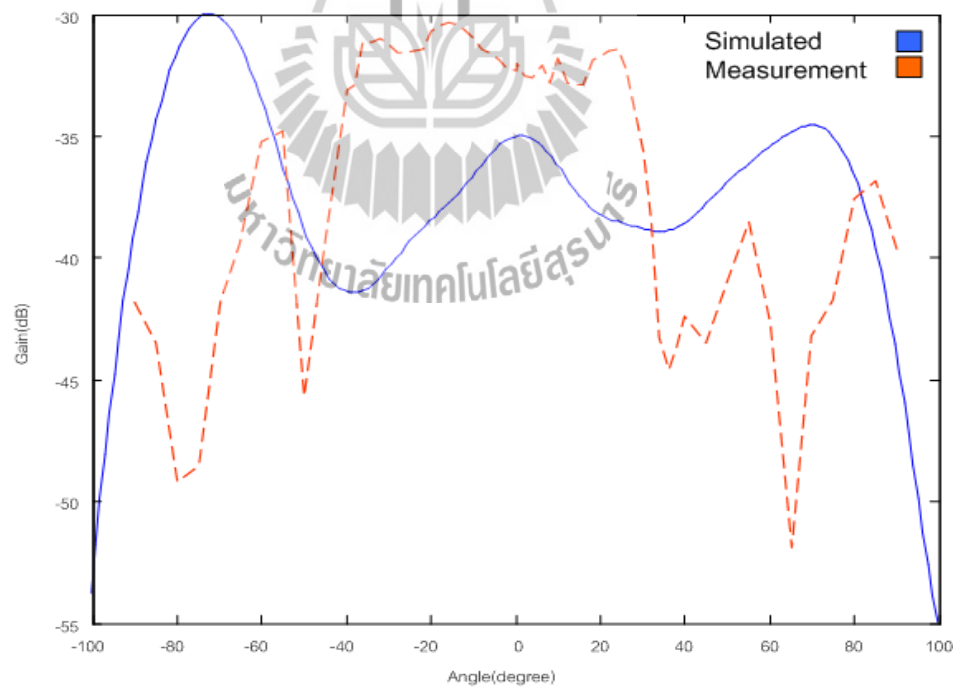
$$G_{r,dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) - G_{t,dB} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.4 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลาค์นินดิสนอ

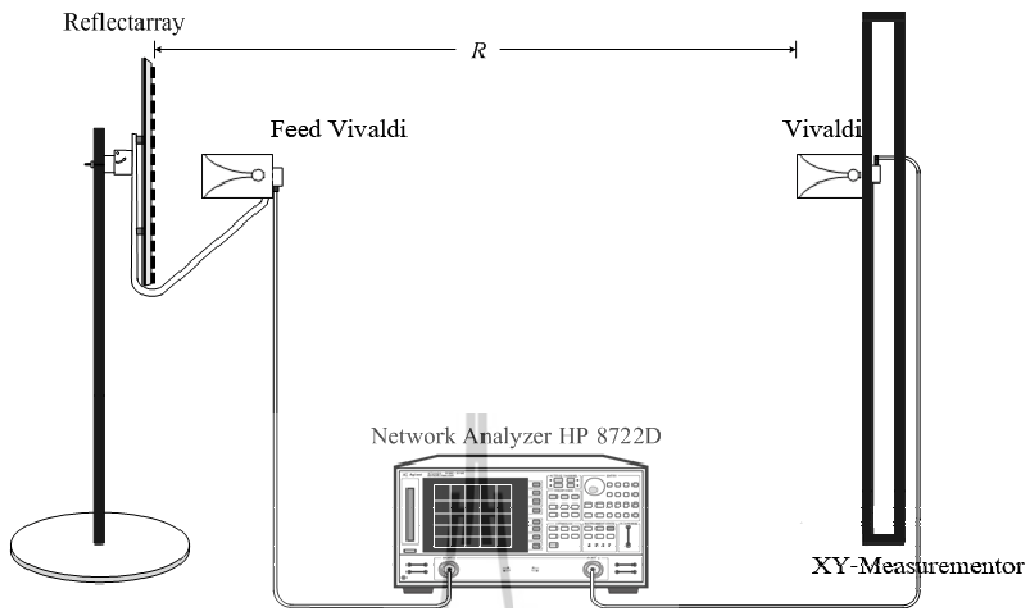


รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นดินสอด
ในระนาบสนามไฟฟ้า

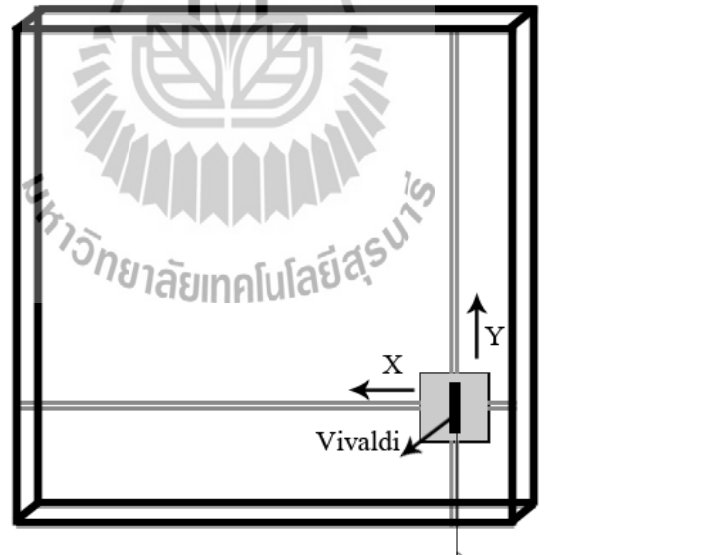


รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นดินสอด
ในระนาบสนามแม่เหล็ก

4.3.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแวลาคับสะท้อนแบบวงรอบ



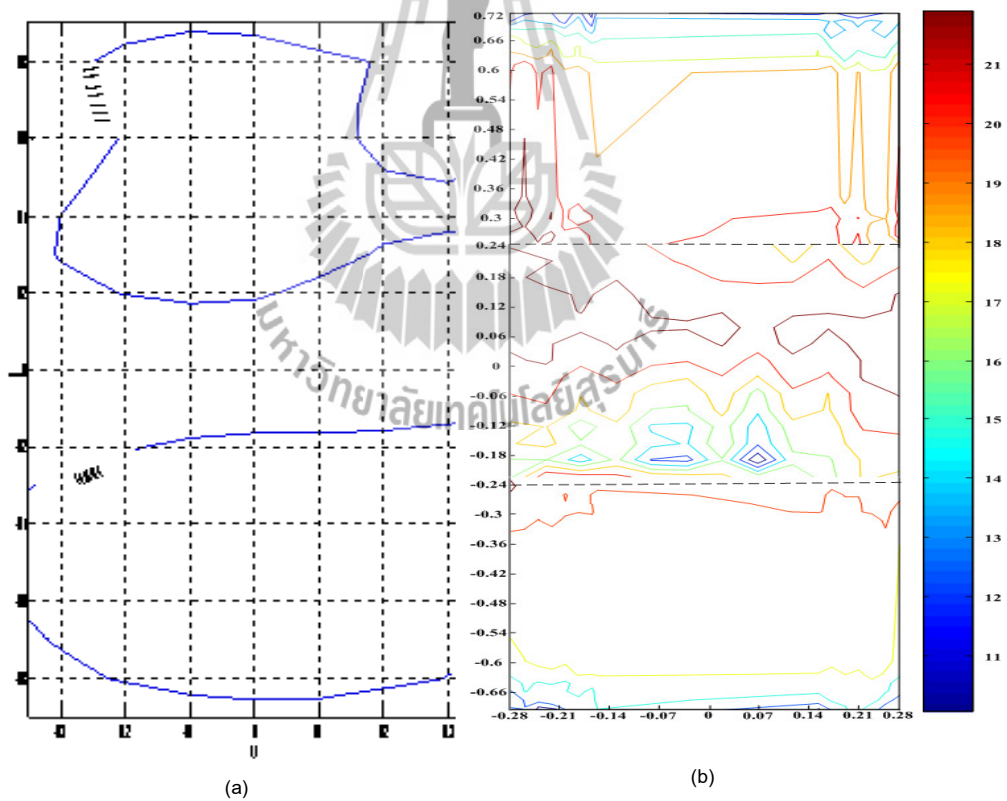
รูปที่ 4.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแบบลาคับวงรอบ



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์สำหรับการวัดตามพิกัด X-Y



รูปที่ 4.9 อุปกรณ์สำหรับการวัดตามพิกัด X-Y ที่ใช้ในการวัดจริง

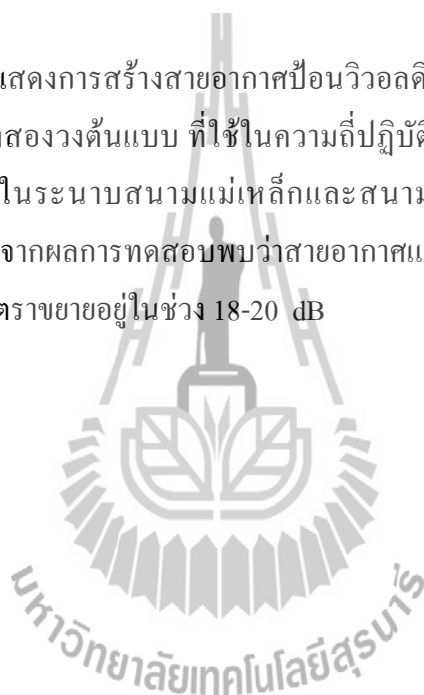


รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบลำคลื่นวงรอบ(b)
เปรียบเทียบกับผลการจำลอง(a)

จากผลการทดสอบแบบรูปพลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบลำคลื่นคินสอ และวงรอบ จะเห็นได้ว่ารูปแบบการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน มีความเชื่อมโยงกัน เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างรูปที่ 4.7 หรือ รูปที่ 4.8 กับรูปที่ 4.9 โดยที่ $U = \sin\theta \cos\phi$ และ $V = \sin\theta \sin\phi$ โดยรูปที่ 4.10 เป็นการนำผลการวัดวงรอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองข้างต้นในช่วงที่สามารถวัดได้ เนื่องด้วยความจำกัดของพื้นที่ห้องวัด จึงได้มีการแบ่งการวัดผลเป็นสามพื้นที่ด้วยกัน เพื่อให้ได้ผลครบถ้วน และนำผลวัดที่ได้ทั้งสามพื้นที่มารวมกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กัน

4.4 สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงการสร้างสายอากาศป้อนวิวอลติ และสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปวงกลมแนวตั้งสองวงต้นแบบ ที่ใช้ในความถี่ปฏิบัติการ 2.45 GHz โดยมีการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า การพิจารณารูปแบบการครอบคลุมพื้นที่ที่กำหนด จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศแถวลำดับสะท้อนแบบจัดรูปวงกลมแนวตั้งสองวงต้นแบบมีอัตราขยายอยู่ในช่วง 18-20 dB



บทที่ 5

บทสรุป

5.1. สรุป

โครงการนี้ได้ดำเนินการศึกษาการออกแบบสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน(Reflectarray Antenna) โดยนำทฤษฎีและกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมาใช้คำนวณและวิเคราะห์หาเฟสการสะท้อนจากสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน ทำให้สามารถทราบคุณลักษณะของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายสูงสุด พื้นที่ครอบคลุม ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นรูปวงกลมสองวงในลักษณะแนวตั้ง เพื่อที่จะสร้างสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารแบบไร้สาย คือการสื่อสารระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless LAN)

ในการคำนวณและวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน เริ่มต้นจากการกำหนดข้อมูลเริ่มต้นของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน จากการสืบค้นหาข้อมูลที่ทำให้ทราบว่าสายอากาศชนิดใดเหมาะกับโครงการของเรานั้นก็คือ สายอากาศแกลวลำดับสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งมีคุณสมบัติของสายอากาศคือ ขนาดเล็กกะทัดรัด สร้างได้ง่าย ราคาถูก น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย และเคลื่อนย้ายสะดวก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบวงกลม จึงทำการออกแบบสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนไมโครสตริป สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปวงกลมแนวตั้งสองวง สามารถกำหนดการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นรูปแบบตามลักษณะที่ต้องการ ส่วนฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ที่กำหนดขึ้นคือ ชนิด ขนาด และตำแหน่งการวางของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนไมโครสตริป สายอากาศป้อนวิวลติ และความถี่ปฏิบัติการ (2.45 GHz) จากนั้นทำการศึกษาแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศป้อนและสนามตกกระทบบนแกลวลำดับสะท้อน การศึกษาการประวิงเฟสของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อน และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสสะท้อนกับขนาดของแผ่นสะท้อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการศึกษาแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศป้อนวิวลติ ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นได้สร้างสายอากาศต้นแบบ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนต้นแบบ พบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานมีความสอดคล้องกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยผลของการวัดทดสอบและการจำลองผลสามารถสรุปได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมีลักษณะ คล้ายรูปวงกลมแนวตั้งสองวงตามที่กำหนดไว้ แต่มีอัตราขยายคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผล คือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสะท้อนและ

สายอากาศป้อนจะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน และผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับสายอากาศแกลวลำดับสะท้อนไมโครสตริป ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้ทำการทดสอบนี้ ผลของการวัดทดสอบและการจำลองผล มีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร สาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผล คือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสะท้อนและสายอากาศป้อนจะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศ และอุปกรณ์ในการทดสอบ สำหรับการพัฒนาให้ดีขึ้นในการทดสอบสายอากาศที่คืนั้น ควรจะหาพื้นที่โล่งและกว้างพอสมควร หรือห้องที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเพื่อลดปัญหาการบังหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศและเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริงมากที่สุด



ประวัติผู้เขียน

นายปวิรรษ ตุ่นตัน เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลพรหมโลก อำเภอพรหมคีรี จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเมืองนครศรีธรรมราช อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวภาณุมาศ ปะกะตั้ง เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลโลกถ้ำ อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนธารทองพิทยาคม อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ 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



