

สายอากาศแถวลำดับสะท้อน (Reflectarray Antenna)

โดย

| | | | |
|-----------|--------------|--------------|----------|
| นายคุณพล | คำดี | รหัสนักศึกษา | B4701200 |
| นายอภิรัฐ | ศุภนุกูลสมัย | รหัสนักศึกษา | B4713487 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

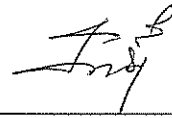
รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
และวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2552

สายอากาศแถวลำดับสะท้อน

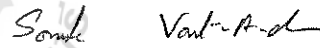
คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยานนท์ กระฉอดนอก)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ



(อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงการวิศวกรรม
โทรคมนาคม และวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2552

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน ส่งผลให้คณะผู้จัดทำได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆ มากมาย โครงงานชิ้นนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่านที่คอย ช่วยเหลือและคอยให้คำปรึกษารวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงาน ทางคณะผู้จัดทำ ใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งบุคคลเหล่านั้นประกอบด้วย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจกนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และแนะนำในทุกๆ ด้าน รวมถึงการให้แนวคิด การดูแลเอา ใจใส่ติดตามงานและแนะแนวทางในการเขียนรายงาน ให้แก่คณะผู้จัดทำมา โดยตลอด รวมถึงการสอนการใช้งานโปรแกรม CST Microwave Studio เบื้องต้น และให้ข้อมูลเกี่ยวกับเรื่องการออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

เพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกๆ ด้าน ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

สุดท้ายผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสทางการศึกษาและคอยสนับสนุน รวมทั้งกำลังใจที่คอยมอบให้ตลอดมาอย่างหาที่เปรียบมิได้

ผู้จัดทำ

นายคนุพล

คำดี

นายอภิรัฐ

ศุภณูกุลสมัย

| | | |
|------------------|---|---------------|
| โครงการ | สายอากาศแถวลำดับสะท้อน (Reflectarray Antenna) | |
| จัดทำโดย | นายคุณพล | คำดี |
| | นายอภิรัฐ | ศุภานุกุลสมัย |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์กระหนวดนอก | |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโทรคมนาคม | |
| ภาคการศึกษา | 3/2552 | |

บทคัดย่อ

สายอากาศเป็นส่วนสำคัญของระบบสื่อสาร มีหน้าที่แผ่กระจายพลังงานไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งสายอากาศชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (Parabolic Reflector) เนื่องจากให้อัตราขยายก่อนข้างสูง มีความกว้างลำคลื่นแคบ โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา มีลักษณะที่เป็นผิวโค้ง จึงทำให้สูญเสียพื้นที่ไปจำนวนหนึ่งในการประกอบและติดตั้ง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โครงการนี้จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป (Microstrip Reflectarray) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นราบเรียบ สามารถให้คุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวสะท้อนพาราโบลา ซึ่งประกอบด้วยแผ่นสะท้อนไมโครสตริป (Microstrip Patch) นำมาเรียงเป็นแถวลำดับบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board หรือ PCB) โดยใช้เทคนิคการจัดเฟส ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีข้อดี คือ ขนาดเล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบาและติดตั้งง่าย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทคัดย่อ | ข |
| สารบัญ | ค |
| สารบัญภาพ | ฉ |
| สารบัญตาราง | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการทำงาน | 1 |
| 1.4 ขั้นตอนการทำงาน | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 บทนำ | 3 |
| 2.2 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก | 5 |
| 2.3 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริบ | 6 |
| 2.4 สนามตกกระทบ (Incident Field) และสนามสะท้อน (Reflected Field) | 8 |
| 2.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแถวลำดับสะท้อนอนันต์ | 10 |
| 2.5.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการสะท้อนจากแผ่น ไดอิเล็กตริกกราวด์ | 10 |
| 2.5.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำบนแผ่น สะท้อนไมโครสตริบ | 11 |
| 2.5.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวม | 14 |
| 2.6 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริบ | 14 |
| 2.6.1 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน | 15 |
| 2.6.2 การปรับความยาวของสตัด | 15 |
| 2.6.3 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน | 16 |
| 2.7 สรุป | 17 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน | 18 |
| 3.1 บทนำ | 18 |
| 3.2 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนโดยคำนวณจากการประวิงเฟส | 18 |
| 3.3 การหาคุณลักษณะของแผ่นสะท้อน | 32 |
| 3.3.1 การออกแบบแผ่นสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CST | 33 |
| 3.3.2 การกำหนดหน่วย (Units) | 34 |
| 3.3.3 การกำหนดความถี่ (Frequency) | 34 |
| 3.3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter) | 35 |
| 3.3.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter) | 35 |
| 3.3.6 ขั้นตอนการออกแบบ | 36 |
| 3.4 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจากผลการ Simulate | 44 |
| 3.5 สรุป | 50 |
| บทที่ 4 การทดลอง | 51 |
| 4.1 บทนำ | 51 |
| 4.2 การสร้างแผ่นสะท้อนไมโครสตริป | 51 |
| 4.3 การวัดทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย | 53 |
| 4.4 ผลการวัดแผ่นสะท้อนไมโครสตริป | 54 |
| 4.4.1 วัด E-plane | 56 |
| 4.4.2 วัด H-plane | 60 |
| 4.5 การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ออกแบบ | 64 |
| 4.5.1 สนามระยะไกล (Far field) | 64 |
| 4.5.2 อัตราขยาย (Grain) | 64 |
| 4.6 สรุป | 65 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---------------------|------|
| บทที่ 5 บทสรุป | 66 |
| 5.1 สรุปผล | 66 |
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรค | 66 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 66 |
| ภาคผนวก | 67 |
| บรรณานุกรม | 73 |
| ประวัติผู้เขียน | 74 |



สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก | 3 |
| รูปที่ 2.2 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณเข้าทางด้านหน้า ของตัวสะท้อน | 4 |
| รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับสะท้อน ไมโครสตริป | 4 |
| รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก | 5 |
| รูปที่ 2.5 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศแถวสะท้อนไมโครสตริป | 7 |
| รูปที่ 2.6 การประวิงเฟสในสายอากาศแถวสะท้อนไมโครสตริป | 7 |
| รูปที่ 2.7 แผ่นสะท้อนไมโครสตริป | 8 |
| รูปที่ 2.8 Grating lobe diagram | 12 |
| รูปที่ 2.9 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศแถวลำดับสะท้อน | 14 |
| รูปที่ 2.10 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน | 15 |
| รูปที่ 2.11 การปรับความยาวของสัดับ | 16 |
| รูปที่ 2.12 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน | 16 |
| รูปที่ 3.1 การประวิงเฟสในสายอากาศแถวสะท้อนไมโครสตริป | 19 |
| รูปที่ 3.2 การออกแบบแผ่นสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CST | 32 |
| รูปที่ 3.3 หน้าต่างของ Create a New Project | 33 |
| รูปที่ 3.4 หน้าต่างของ Specify Units | 34 |
| รูปที่ 3.5 หน้าต่างของ Frequency Range Settings | 34 |
| รูปที่ 3.6 หน้าต่างของ Parameter List | 35 |
| รูปที่ 3.7 หน้าต่างของ Boundary Conditions | 36 |
| รูปที่ 3.8 หน้าต่างของ Substate | 36 |
| รูปที่ 3.9 Parameter ของ Substrate | 37 |
| รูปที่ 3.10 หน้าต่างของ Ground | 37 |
| รูปที่ 3.11 Parameter ของ Ground | 38 |
| รูปที่ 3.12 หน้าต่างของ Patch | 38 |
| รูปที่ 3.13 Parameter ของ Patch | 39 |
| รูปที่ 3.14 หน้าต่างของชิ้นงาน | 39 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.15 หน้าต่างของ Port 2 | 40 |
| รูปที่ 3.16 หน้าต่างก่อนการ Simulate | 40 |
| รูปที่ 3.17 หน้าต่างก่อนการ Simulate คำสั่ง Sweep | 41 |
| รูปที่ 3.18 หน้าต่างก่อนการ Simulate คำสั่ง Sweep | 42 |
| รูปที่ 3.19 กำหนด Parameter ที่ใช้ในการ Sweep | 42 |
| รูปที่ 3.20 ทำการ Simulate | 43 |
| รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม กับ patch | 49 |
| รูปที่ 4.1 โปรแกรม Corel Draw | 51 |
| รูปที่ 4.2 การออกแบบแผ่นไมโครสตริปโดยใช้โปรแกรม Corel Draw | 52 |
| รูปที่ 4.3 แผ่นสะท้อนไมโครสตริป | 53 |
| รูปที่ 4.4 เครื่อง Network Analyzer HP 8722D | 53 |
| รูปที่ 4.5 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่ใช้เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศป้อน | 54 |
| รูปที่ 4.6 การติดตั้งสายอากาศที่ใช้วัดทดสอบ | 55 |
| รูปที่ 4.7 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย | 55 |
| รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับอัตราขยายในการวัดแบบ E-plane | 59 |
| รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับอัตราขยายในการวัดแบบ H-plane | 63 |
| ภาคผนวก | |
| รูปที่ 1 การออกแบบแผ่นติดตั้งสายอากาศ | 68 |
| รูปที่ 2 การออกแบบแกนติดตั้ง | 69 |
| รูปที่ 3 การออกแบบแกนเลื่อนตำแหน่ง | 69 |
| รูปที่ 4 ออกแบบน็อตยึดแผ่นติดตั้งสายอากาศและแกนเลื่อนตำแหน่งเข้ากับแกนยึด | 70 |
| รูปที่ 5 อุปกรณ์ติดตั้งสายอากาศ (ด้านหน้า) | 71 |
| รูปที่ 6 อุปกรณ์ติดตั้งสายอากาศ (ด้านหลัง) | 71 |
| รูปที่ 7 อุปกรณ์ทำขึ้นจากการออกแบบ | 72 |
| รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์ | 72 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณเฟสชดเชยของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป | 20 |
| ตารางที่ 3.2 ผลการ Simulate ช่วง 7 ถึง 15 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 10 GHz | 44 |
| ตารางที่ 4.1 วัดแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ E-plane | 56 |
| ตารางที่ 4.2 วัดแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ H-plane | 60 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

สายอากาศเป็นส่วนสำคัญของระบบสื่อสาร มีหน้าที่แผ่กระจายพลังงานไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งสายอากาศชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (Parabolic Reflector) เนื่องจากให้อัตราขยายค่อนข้างสูง ความกว้างลำคลื่นแคบ โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา มีลักษณะที่เป็นผิวโค้ง จึงทำให้สูญเสียพื้นที่ไปจำนวนหนึ่งในการประกอบและติดตั้ง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โครงการนี้จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป (Microstrip Reflector Array) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นราบเรียบ สามารถให้คุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวสะท้อนพาราโบลา ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแผ่นสะท้อนไมโครสตริป (Microstrip Patch) นำมาเรียงเป็นแถวลำดับบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board หรือ PCB) โดยใช้เทคนิคการจัดเฟส ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีข้อดี คือ ขนาดเล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบาและติดตั้งง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวิธีการพัฒนาและออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป
2. เพื่อศึกษาวิธีการจำลองการสะท้อนของแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio
3. เพื่อศึกษาวิธีจัดเฟสที่ใช้สำหรับสายอากาศแถวลำดับสะท้อน

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. จำลองแบบการสะท้อนของแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio
2. ออกแบบแผ่นไมโครสตริป
3. สร้างสายอากาศต้นแบบ

1.4 ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูล
2. เขียนโครงการและเสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา
3. หาชื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้
4. สร้างแบบจำลองการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และบันทึกข้อมูล
5. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบการสะท้อนแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio มาออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริป
6. นำแผ่นสะท้อนไมโครสตริปที่ได้จากการออกแบบไปวัดผลที่ห้องปฏิบัติการโทรคมนาคม และบันทึกข้อมูล
7. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้
8. สรุปผลการทดลอง
9. เขียนรายงาน
10. นำเสนอโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

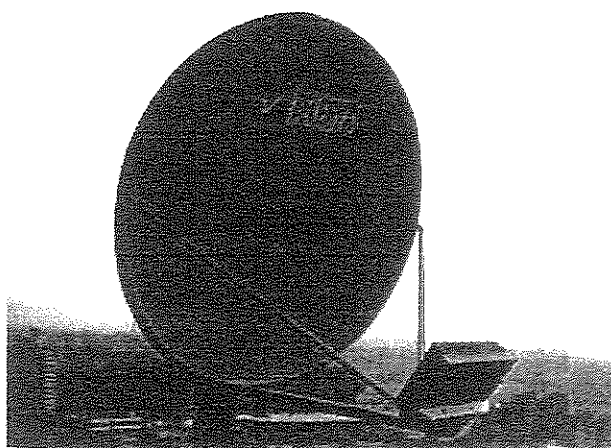
1. สามารถผลิตสายอากาศไมโครสตริป เพื่อพัฒนาไปใช้งานได้จริง
2. สามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการประกอบวิชาชีพ
3. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ
4. สามารถทำงานเป็นทีมได้

บทที่ 2

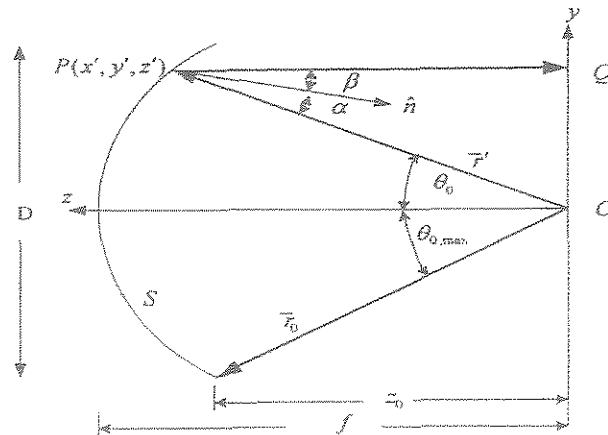
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

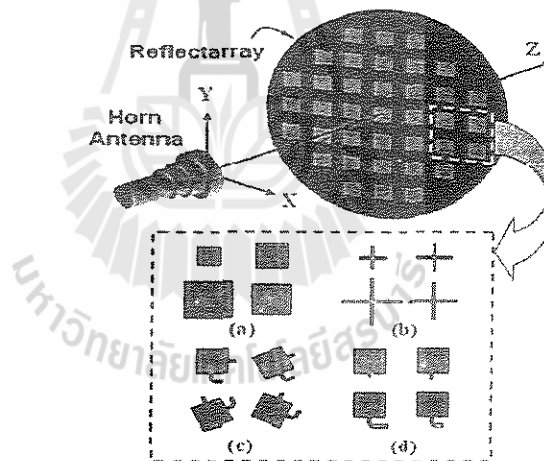
สายอากาศสำหรับใช้งานในระบบการสื่อสารควรมีคุณสมบัติดังนี้ คือ ให้อัตราขยายสูง มีการสูญเสียต่ำ ขนาดเล็กกะทัดรัด สร้างได้ง่ายและราคาต่ำ โดยสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนแบบไมโครสตริป ถือเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสม แต่สายอากาศดังกล่าวมีระบบป้อนสัญญาณที่ซับซ้อน เกิดการสูญเสียภายในตัวป้อนและยังมีความกว้างแถบแคบ (Bandwidth) สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกก็เป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ตัวสะท้อน (Reflector) และตัวป้อนสัญญาณซึ่งมักใช้เป็นแบบสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกโดยทั่วไปจะมีการป้อนสัญญาณดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 แต่เนื่องจากสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกมีขนาดใหญ่และมีผิวโค้ง ดังนั้นจึงมีการออกแบบสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริปที่มีลักษณะราบเรียบ แต่สามารถให้คุณสมบัติเช่นเดียวกับสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก นอกจากนั้นสายอากาศแฉวลำดับสะท้อนไมโครสตริปยังมีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่ายและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ดังรูปที่ 2.3 ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแฉวลำดับสะท้อน



รูปที่ 2.1 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก



รูปที่ 2.2 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณเข้าทางด้านหน้าของตัวสะท้อน



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

2.2 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก

จากรูปที่ 2.2 แสดงการแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อน โดยคลื่นเดินทางจากจุดป้อนสัญญาณไปยังตัวสะท้อนพาราโบลิกและสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกล เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$OP + PQ = 2f = \text{ค่าคงที่} \quad (2.1)$$

และหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\theta_{0,max}$ กับ f/D ได้

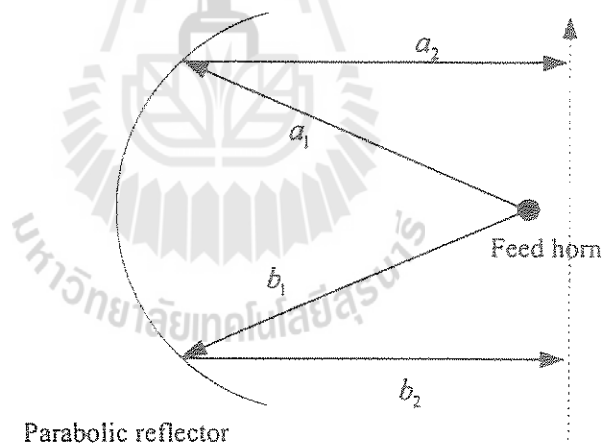
$$\begin{aligned} \theta_{0,max} &= \tan^{-1}\left(\frac{D/2}{2f}\right) \\ &= 2\tan^{-1}\left(\frac{D}{4f}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ

f คือระยะโฟกัส

$\theta_{0,max}$ คือ มุมสูงสุดที่คลื่นเดินทางออกจากจุดป้อนสัญญาณไปยังตัวสะท้อน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสะท้อนพาราโบลิก



รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก

พิจารณาจากรูปที่ 2.4 สรุปได้ว่า $a_1 + a_2 = b_1 + b_2$ เสมอ

2.3 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

จากรูปที่ 2.4 สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกจะมีระยะการเดินทางของคลื่นจากตัวป้อนไปยังตัวสะท้อน ไปยังสนามระยะไกลคงที่เสมอ หรือสรุปได้ว่า $a_1 + a_2 = b_1 + b_2$ เสมอ ถ้าแทนที่สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกด้วยแผ่นสะท้อนที่มีลักษณะราบเรียบพบว่าสมการจะได้ $a_1 + a_2 \neq b_1 + b_2$ ดังแสดงในรูป 2.5

ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจึงใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการประวิงเฟส (Phase Delay) เหมือนตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณตัวสะท้อนเข้าที่ทางด้านหน้าตัวสะท้อน เราสามารถคำนวณหาการประวิงเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางเข้าตัวป้อนสัญญาณ ไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อน แล้วสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกลได้ดังนี้

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} r = k_0 r \quad (2.2)$$

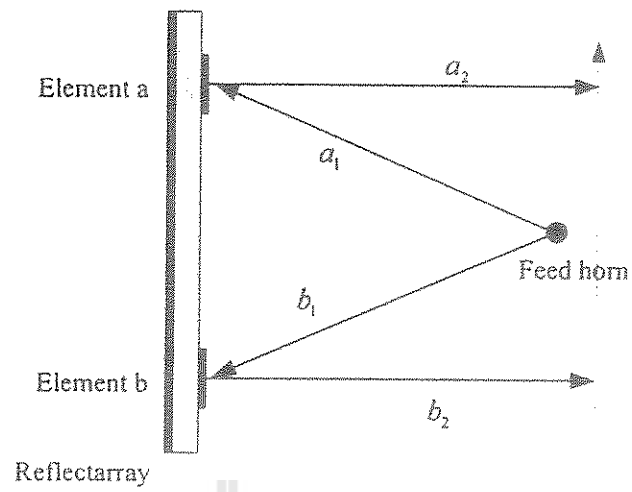
เมื่อ r คือระยะที่คลื่นเดินทาง และ λ_0 เป็นความยาวคลื่นในอากาศมีค่าเท่ากับ c/f (เมื่อ c คือความเร็วแสง และ f คือความถี่เรโซแนนซ์) สำหรับการประวิงเฟสสามารถคำนวณหาได้จากผลต่างระหว่างระยะการแผ่กระจายคลื่นของแผ่นสะท้อนใดๆ กับแผ่นสะท้อนอ้างอิง โดยที่ m และ n คือแผ่นสะท้อนใดๆ ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ดังแสดงในสมการ

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_{mm} - \phi_f \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_{mm} - r_f) \\ &= k_0 \Delta s \end{aligned} \quad (2.3)$$

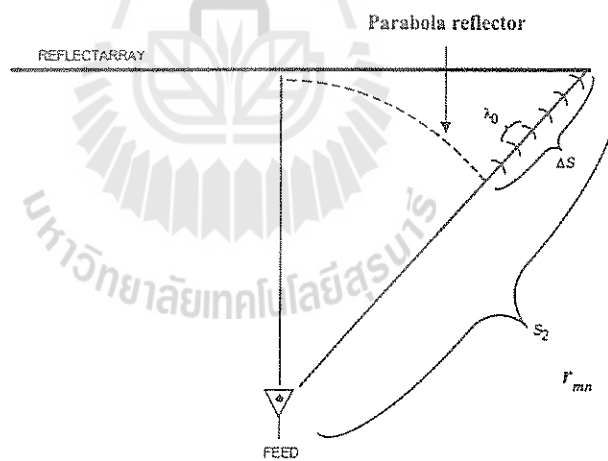
เพื่อให้สายอากาศแถวลำดับสะท้อนมีคุณลักษณะเหมือนสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก ดังนั้นเฟสสะท้อนของแผ่นสะท้อนใดๆ ψ_{mm} หาได้จาก

$$\psi_{mm} = \Delta\phi \pm 2\pi N \quad (2.4)$$

เมื่อ $N = 0, 1, 2, 3, \dots$



รูปที่ 2.5 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศแถวสะท้อนไมโครสตริป
พิจารณาจากรูปที่ 2.5 สรุปได้ว่า $a_1 + a_2 \neq b_1 + b_2$



รูปที่ 2.6 การประวิงเฟสในสายอากาศแถวสะท้อนไมโครสตริป

2.4 สนามตกกระทบ (Incident Field) และสนามสะท้อน (Reflected Field)

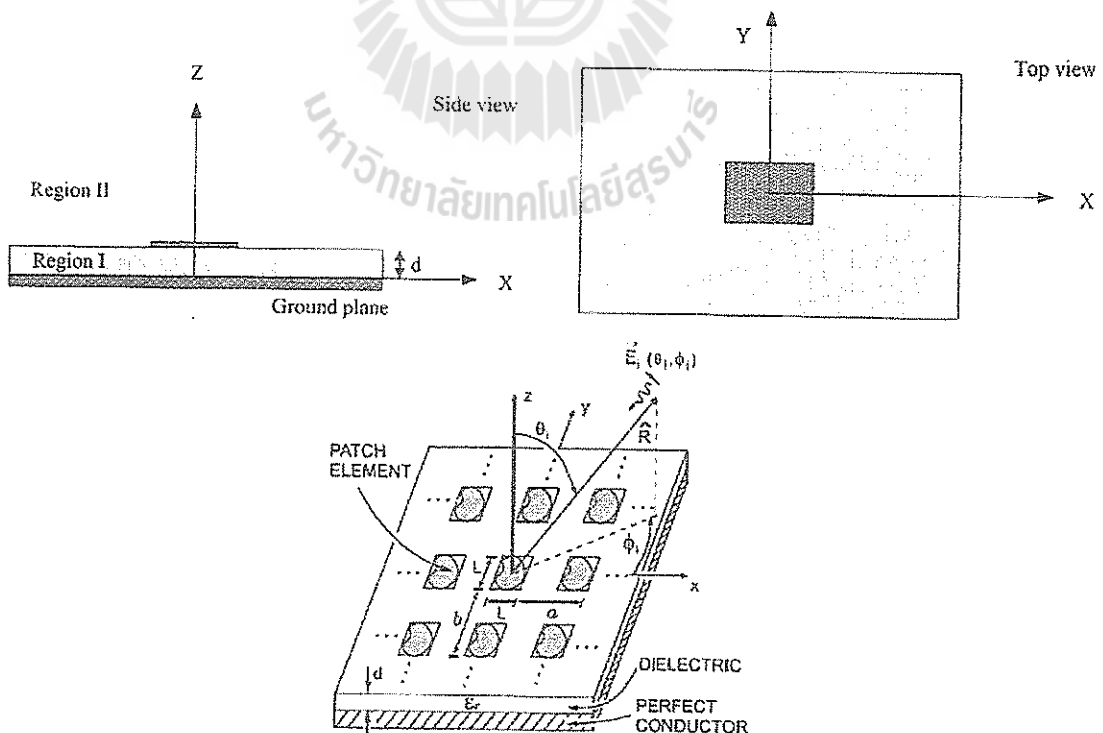
รูปที่ 2.7 แสดงแผ่นสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งมีความหนา d ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity) ϵ_r, ϵ_0 และค่าความซบซึ่มได้แม่เหล็ก (Permeability) μ_0 โดยค่าสภาพยอมจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในไดอิเล็กตริก และสามารถหาสมการเชิงอินทิกรัลสนามไฟฟ้า สำหรับกระแสเชิงผิวบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป โดยใช้การแก้สมการของคลื่นระนาบตกกระทบบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป ซึ่งสายอากาศแถวระดับสะท้อนไมโครสตริปจะใช้นำแผ่นสะท้อนหลายแผ่นมาเรียงแถวลำดับบนแผ่นวงจรพิมพ์

พิจารณาคลื่นระนาบที่มุมตกกระทบ θ_0, ϕ_0 จะได้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบ คือ

$$\vec{E}^{inc} = \vec{E}_0 e^{-jk_0 \hat{k}^{inc} \cdot \vec{R}} \quad (2.5)$$

$$\vec{H}^{inc} = \vec{H}_0 e^{-jk_0 \hat{k}^{inc} \cdot \vec{R}} = \frac{1}{\eta_0} \hat{k}_i \times \vec{E}^{inc} \quad (2.6)$$

โดยที่ \vec{E}_0 เป็นขนาดและเฟสของสนามตกกระทบ ซึ่งอยู่ในเทอมขององค์ประกอบในแนวนอนและองค์ประกอบในแนวตั้งฉากของระนาบคลื่นตกกระทบ



รูปที่ 2.7 แผ่นสะท้อนไมโครสตริป

$$\bar{E}_o = \bar{E}_{oo}\hat{u}_\theta^{inc} + E_{o\phi}\hat{u}_\phi^{inc} \quad (2.7)$$

$$\bar{H}_o = -H_{o\phi}\hat{u}_\theta^{inc} + H_{oo}\hat{u}_\phi^{inc} = -\frac{1}{\eta_o} E_{o\phi}\hat{u}_\theta^{inc} + \frac{1}{\eta_o} \bar{E}_{oo}\hat{u}_\phi^{inc} \quad (2.8)$$

และ

$$\hat{u}_\theta^{inc} = \hat{x} \cos \theta_o \cos \phi_o + \hat{y} \cos \theta_o \sin \phi_o - \hat{z} \sin \theta_o \quad (2.9)$$

$$\hat{u}_\phi^{inc} = \hat{x} \sin \phi_o - \hat{y} \cos \phi_o$$

\bar{R} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง ณ จุดสังเกต

$$\bar{R} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \quad (2.10)$$

k_o เป็นเลขคลื่นในอากาศว่าง (Free Space) และ \hat{k}^{inc} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของการแผ่กระจายสนามตกกระทบ

$$\hat{k}^{inc} = -(u_o\hat{x} + v_o\hat{y} + w_o\hat{z}) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} u_o &= \sin \theta_o \cos \phi_o \\ v_o &= \sin \theta_o \sin \phi_o \\ w_o &= \cos \theta_o \end{aligned} \quad (2.12)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสนามไฟฟ้าตกกระทบได้ใหม่เป็น

$$\bar{E}^{inc} = \bar{E}_o e^{jk_o(u_o x + v_o y + \cos(\theta_o)z)} \quad (2.13)$$

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

$$\bar{E}^{tot} = \bar{E}^{inc} + \bar{E}^{ref} \quad (2.14)$$

แต่ถ้าในกรณีมีแผ่นสะท้อนบนแผ่นวงจรมิพม์ ดังรูป 2.7 จะทำให้สนามรวมในสมการ (2.14) เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสเชิงผิว \bar{J}^s บนแผ่นสะท้อน และกระแสเชิงผิวนี้จะแผ่กำลังงานไปยังไดอิเล็กตริกกราวด์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระเจิง (Scattered Field) \bar{E}^{scat} ไปในไดอิเล็กตริกและอากาศ ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งหมดของแผ่นสะท้อนในบริเวณ $z \geq 0$ คือ

$$\bar{E}^{tot} = \bar{E}^{inc} + \bar{E}^{ref} + \bar{E}^{scat} \quad (2.15)$$

2.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแวลวลำดับสะท้อนอนันต์

จากสมการ (2.15) สนามสะท้อนรวมประกอบด้วยสนามสะท้อนจากแผ่น ไดอิเล็กตริกกราวด์และสนามกระเจิงเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำบนอิมิตเมนต์ไมโครสตริบ ซึ่งสนามทั้งสองสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{E}^{ref} &= \bar{R} \cdot \bar{E}^{inc} \Big|_{z=0} e^{-jk_0 \cos \theta_0} \\ \bar{E}^{scat} &= \bar{S} \cdot \bar{E}^{inc} \Big|_{z=0} e^{-jk_0(z+d) \cos \theta_0} \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.5.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการสะท้อนจากแผ่นไดอิเล็กตริกกราวด์

สนามสะท้อนในหัวข้อ 2.4 จะพิจารณาสนามโพลาไรซ์ใน θ และ ϕ แต่ไม่ได้พิจารณาองค์ประกอบในแนวสัมผัส ดังนั้นเราจะพิจารณาสนามสะท้อนในองค์ประกอบ z หรือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากได้โดยใช้ $\nabla \cdot \bar{E} = 0$ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของสนามไฟฟ้าสะท้อนในแนวสัมผัสได้เป็น

$$E_z^{ref} = \frac{\sin \theta_0 \cos \phi_0 E_x^{ref} + \sin \theta_0 \sin \phi_0 E_y^{ref}}{\cos \theta_0} \quad (2.17)$$

แปลงสมการ (2.17) ให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้ว ได้เป็น

$$\begin{aligned} E_\theta^{ref} &= E_x^{ref} \cos \theta_r \cos \phi_r + E_y^{ref} \cos \theta_r \sin \phi_r - E_z^{ref} \sin \theta_r \\ E_\phi^{ref} &= -E_x^{ref} \sin \phi_r + E_y^{ref} \cos \phi_r \end{aligned} \quad (2.18)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\theta_r &= \theta_0 \\ \phi_r &= \phi_0 + \pi\end{aligned}\quad (2.19)$$

ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์สนามสะท้อน โดยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสนามสะท้อนกับสนามตกกระทบที่ระนาบ $z=0$

$$\begin{aligned}R_{\theta\theta} &= -\Gamma^{TM} e^{j2k_0 \cos \theta_0} \\ R_{\phi\phi} &= \Gamma^{TE} e^{j2k_0 \cos \theta_0 d}\end{aligned}\quad (2.20)$$

2.5.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริปพิจารณาจากสนามกระเจิง โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ซึ่งเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า $[I]$ จะหาได้ด้วยสมการ (2.21) และสนามกระเจิงในอากาศหรือไดอิเล็กตริก หาได้จาก

$$[I] = [Z]^{-1}[V] \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}\bar{E}^{scat}(x, y, d) &= \begin{pmatrix} E_x(x, y, d) \\ E_y(x, y, d) \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{T_{\eta_1} T_{\eta_2} \sin \alpha} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{G}(k'_x, k'_y) \tilde{J}_0(k'_x, k'_y) e^{jk'_x x} e^{jk'_y y}\end{aligned}\quad (2.22)$$

โดยที่

$$\tilde{J}_0(k'_x, k'_y) = \sum_{j=1}^N I_j \tilde{J}_j(k'_x, k'_y) \quad (2.23)$$

สนามบนไดอิเล็กตริกสามารถเขียนในเทอมของสนามเชิงผิวของไดอิเล็กตริก ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}E_x(x, y, z > d) &= E_x(x, y, d) e^{-jk_z(z-d)} \\ E_y(x, y, z > d) &= E_y(x, y, d) e^{-jk_z(z-d)} \\ E_z(x, y, z > d) &= \frac{k'_x E_x(x, y, d) + k'_y E_y(x, y, d)}{k_z} e^{-jk_z(z-d)}\end{aligned}\quad (2.24)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 k_z &= \sqrt{k_0^2 - k_x'^2 - k_y'^2} \\
 E_y &= \frac{2\pi m}{T_{n_z}} + k_0 u_0 \\
 k_y' &= \frac{2\pi n}{T_{n_z} \sin \alpha} - \frac{2\pi m}{T_{n_z} \tan \alpha} + k_0 v_0
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

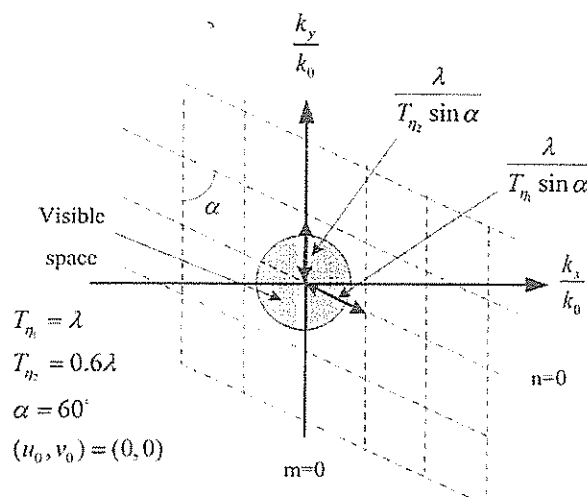
การพิจารณาค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant) k_z สำหรับโครงสร้างแบบรายคาบอนันต์ หาได้จากการนอร์มอลไรซ์สมการ (2.25) จะได้

$$\frac{k_z}{k_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{k_x'}{k_0}\right)^2 - \left(\frac{k_y'}{k_0}\right)^2} \tag{2.26}$$

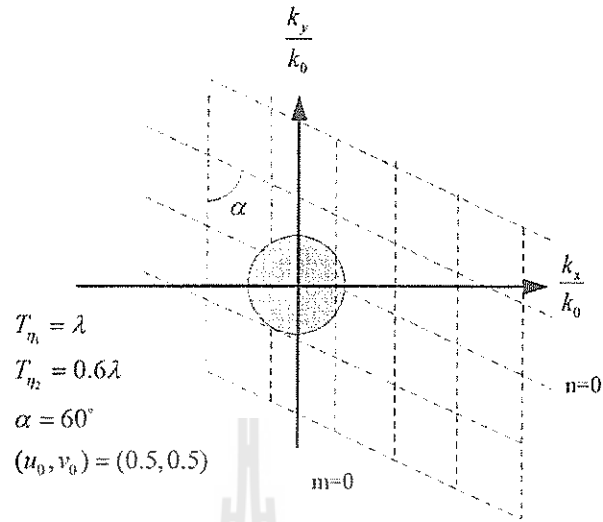
หรือ

$$\left(\frac{k_x'}{k_0}\right)^2 + \left(\frac{k_y'}{k_0}\right)^2 < 1 \tag{2.27}$$

สมการ (2.27) ใช้สำหรับสนามสะท้อนเนื่องจากกระแสเชิงผิวบนแผ่นสะท้อนในโหมด $m=0, n=0$ แต่อย่างไรก็ตาม สมการ (2.27) สามารถใช้สำหรับกรณีที่มีมุมตกกระทบ และคาบหรือระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนมีอันดับโหมดสูงขึ้นได้ เพื่อให้ง่ายในการออกแบบ เราจะใช้ Reciprocal Lattice หรือ Grating Lobe Diagram ซึ่งไดอะแกรมนี้จะพล็อตค่านอร์มอลไรซ์ของ k_x', k_y' จากสมการ (2.16) ในระนาบ k_x/k_0 และ k_y/k_0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 2.8



ก. Broadside Scan Position



จ. Scan Position

รูปที่ 2.8 Grating lobe diagram

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

$$\begin{aligned} \bar{E}^{scat}(x, y, d) &= \begin{pmatrix} E_x(x, y, d) \\ E_y(x, y, d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x^q \\ E_y^q \end{pmatrix} e^{jk_0 u_0 x} e^{jk_0 v_0 y} \\ &= \frac{I}{T_{n_1} T_{n_2} \sin \alpha} \bar{G}(k_0 u_0, k_0 v_0) \bar{J}_0^q(k_0 u_0, k_0 v_0) e^{jk_0 u_0 x} e^{jk_0 v_0 y} \end{aligned} \quad (2.28)$$

โดยที่ q คือโพลาไรซ์ของมุมตกกระทบ ดังนั้น $q = \theta$ หรือ $q = \phi$ เมื่อมุมตกกระทบอยู่ในโหมด TM หรือ TE ตามลำดับและในทำนองเดียวกันกับคลื่นสะท้อน เราสามารถเขียนเมตริกซ์สนามกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามกระเจิงกับสนามตกกระทบดังนี้

$$\begin{pmatrix} E_\theta^{scat} \\ E_\phi^{scat} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta^{inc} \\ E_\phi^{inc} \end{pmatrix} e^{jk_0(u_0 x + v_0 y - z \cos \theta)} \quad (2.29)$$

โดยที่

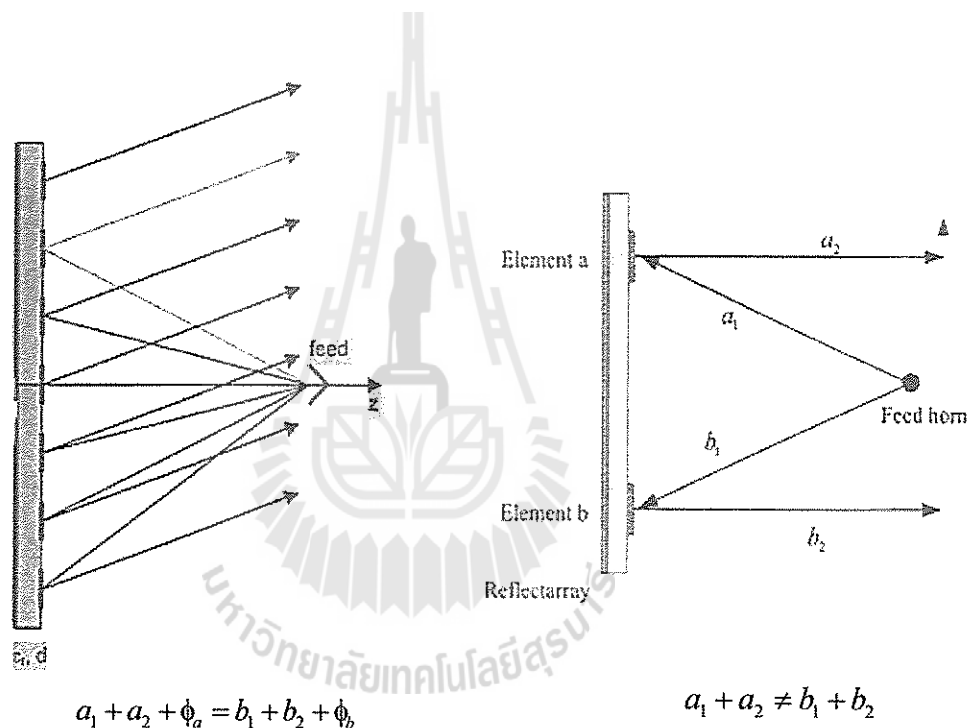
$$S_{pq} = \frac{E_p^{scat}(z=0)}{E_q^{inc}(z=0)} \quad (2.30)$$

2.5.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวม

สัมประสิทธิ์รวมในทิศทางสะท้อนหาได้จากผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากแผ่นไดอิเล็กทริกกราวด์และสัมประสิทธิ์การกระเจิงที่ผิวแผ่นสะท้อน

$$\bar{R}^{tot} = \bar{R} + \bar{S} \quad (2.31)$$

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



รูปที่ 2.9 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศแถวลำดับสะท้อน

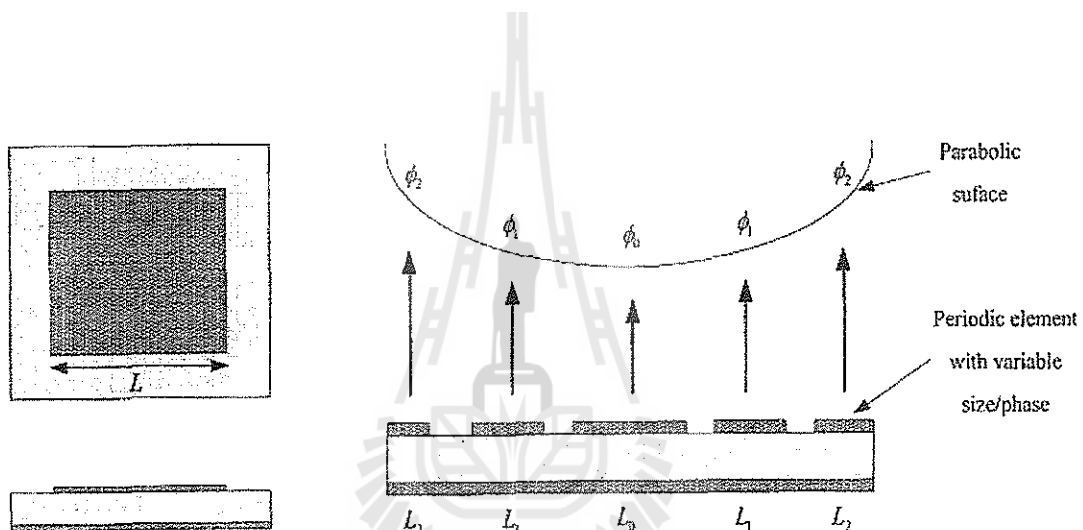
2.6 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

เทคนิคการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปด้วยเทคนิคการจัดเฟสที่นิยมนำมาใช้มี 3 วิธีคือ

- การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน
- การปรับความยาวของสตัป
- การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

2.6.1 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

การปรับขนาดของแผ่นสะท้อนใช้หลักการปรับความยาวของแผ่นสะท้อนในด้านที่มีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อความถี่ปฏิบัติการของแผ่นสะท้อนเปลี่ยนจะส่งผลให้การประวิงเฟสในแผ่นสะท้อนเปลี่ยนแปลงด้วย จากที่ผ่านมามีพบว่า เฟสสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเราสามารถปรับความยาวของแผ่นสะท้อนได้ไม่เกิน $\pm 5\%$ จากความยาว ณ ความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ทำให้เฟสสะท้อนไม่ครบ 360° ดังนั้นจึงควรออกแบบการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อนร่วมกับเทคนิคอื่นด้วย



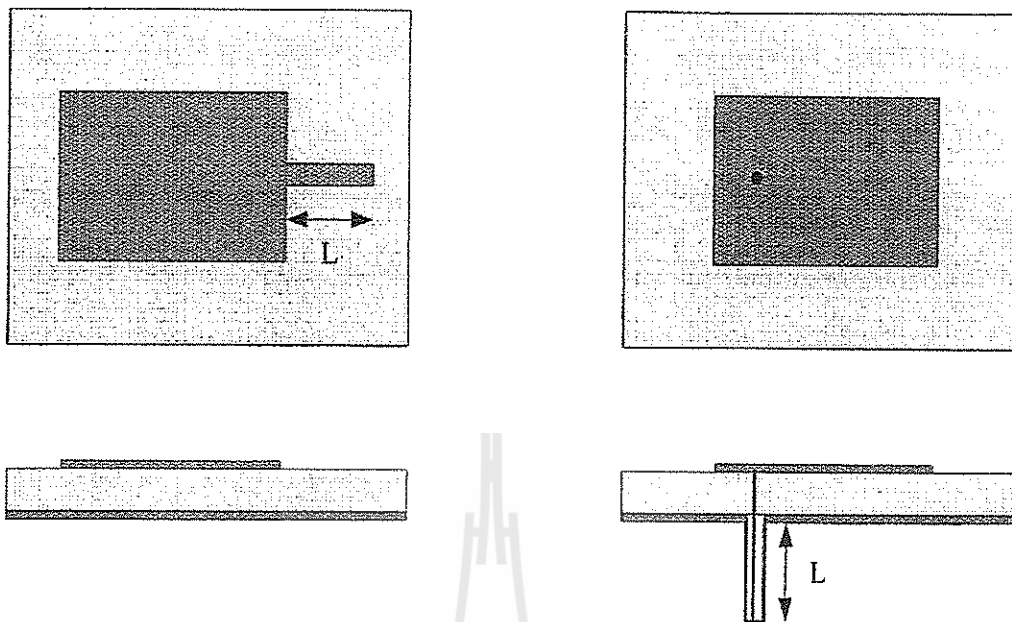
รูปที่ 2.10 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

2.6.2 การปรับความยาวของสตัด

การจัดเฟสด้วยการปรับความยาวของสตัดแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยการปรับความยาวของสตัดจะให้ผลการประวิงเฟสเป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.4) เมื่อความยาวของสตัดเปลี่ยน จะส่งผลให้การประวิงเฟสของแผ่นสะท้อนเปลี่ยน โดยสตัดที่นำมาใช้มี 3 แบบคือ

1. สตัดไมโครสตริปที่ต่อกับด้านข้างของแผ่นสะท้อน (Edge Of Patch)
2. สตัดไมโครสตริปที่ต่อแบบการเชื่อมร่วมอะเพอร์เจอร์ (Aperture Coupled Patch)
3. สตัดโคแอกเซียล

$$\psi_{mn} = 2 \times \text{Electrical length} \quad (2.32)$$



ก. สดับแบบไม่โครสตริป

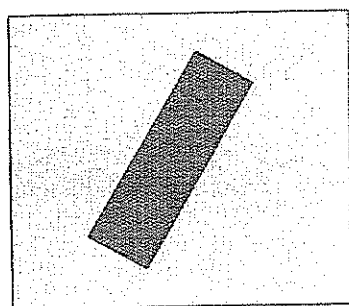
ข. สดับแบบโคแอกเซียล

รูปที่ 2.11 การปรับความยาวของสดับ

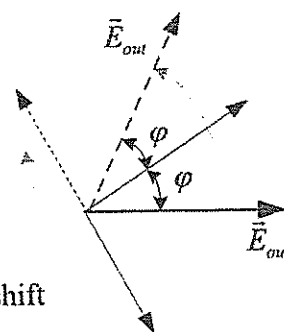
2.6.3 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

การจัดเฟสด้วยการปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมุมของแผ่นสะท้อนสามารถปรับได้ 180° และการประวิงเฟสจะมีค่าเป็นสองเท่าของมุมของแผ่นสะท้อน ดังสมการ (2.5) หลักการจัดเฟสวิธีนี้เหมาะสำหรับสายอากาศแถวลำดับที่มีโพลาริซเซชันวงกลม

$$\psi_{mn} = 2 \times \text{Rotation patch} \quad (2.33)$$



180° phase shift



รูปที่ 2.12 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

นอกจากการจัดเฟสแผ่นสะท้อนทั้ง 3 วิธีนี้ ยังมีการจัดเฟสแบบอื่น เช่น การปรับร่องแผ่นสะท้อน และการใช้วาร์เรเตอร์ไดโอด เป็นต้น

2.7 สรุป

จากที่เราทราบว่าสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อนทำให้คลื่นเดินทางไปยังบริเวณสนามระยะไกลที่มีเฟสเท่ากัน ไม่ว่าจะคลื่นจะตกกระทบที่ตำแหน่งใดของตัวสะท้อนก็ตาม แต่ถ้าแทนที่สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกด้วยสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป จะทำให้คลื่นเกิดการประวิงเฟส (Phase Delay) ในสนามระยะไกล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการจัดเฟสแผ่นสะท้อนในสายอากาศแถวลำดับสะท้อนเพื่อชดเชยเฟสดังกล่าว ทำให้สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวสะท้อนพาราโบลิก ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อใช้ออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนต่อไป



บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ซึ่งในการออกแบบและการจำลองสายอากาศแถวลำดับสะท้อนนี้จะใช้ความถี่ที่ทำการทดสอบคือ 10GHz ระยะห่างระหว่างตัวป้อนกับสายอากาศแถวลำดับสะท้อนคือ 25 เซนติเมตรและpatch ขนาด 17×17 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนโดยคำนวณจากการประวิงเฟส ในข้อนี้จะกล่าวถึงการนำสมการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาคำนวณหาการประวิงเฟสเพื่อนำไปชดเชยเฟสของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบริก

3.1.2 การหาคุณลักษณะของแผ่นสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการโปรแกรม CST ในการจำลองหาคุณลักษณะของแผ่นสะท้อน

3.2 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนโดยคำนวณจากการประวิงเฟส

จากบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.3 จะเห็นว่าสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบริกมีลักษณะผิวโค้ง โครงงานจึงได้จัดทำสายอากาศที่ลักษณะเหมือนสายอากาศพาราโบริกขึ้นมาเรียกว่าสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปซึ่งมีลักษณะเป็นราบเรียบ โดยสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจะใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการประวิงเฟส (Phase Delay) เหมือนตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบริกที่มีการป้อนสัญญาณตัวสะท้อนเข้าที่ทางด้านหน้าตัวสะท้อน เราสามารถคำนวณหาการประวิงเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางเข้าตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อน แล้วสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกลได้ ดังสมการที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3

เราสามารถคำนวณหาการประวิงเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางเข้าตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อน แล้วสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกลได้ดังนี้

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} r = k_0 r \quad (2.2)$$

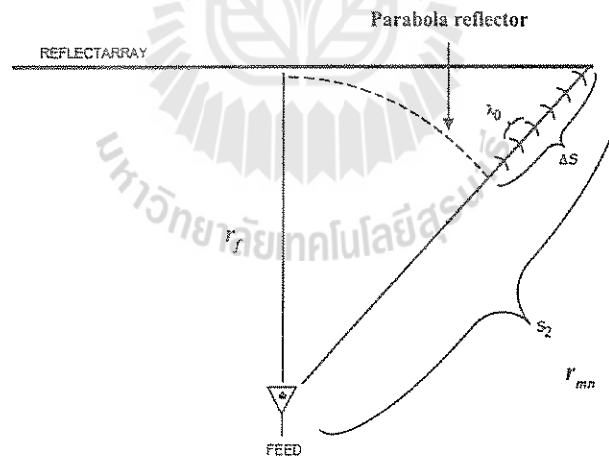
เมื่อ r คือระยะที่คลื่นเดินทาง และ λ_0 เป็นความยาวคลื่นในอากาศมีค่าเท่ากับ c/f (เมื่อ c คือความเร็วแสง และ f คือความถี่เรโซแนนซ์) สำหรับการประวิงเฟสสามารถคำนวณหาได้จากผลต่างระหว่างระยะการแผ่กระจายคลื่นของแผ่นสะท้อนใดๆ กับแผ่นสะท้อนอ้างอิง โดยที่ m และ n คือแผ่นสะท้อนใดๆ ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ดังแสดงในสมการ

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_{mm} - \phi_f \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0}(r_{mm} - r_f) \\ &= k_0\Delta s\end{aligned}\tag{2.3}$$

เพื่อให้สายอากาศแถวลำดับสะท้อนมีคุณลักษณะเหมือนสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก ดังนั้นเฟสสะท้อนของแผ่นสะท้อนใดๆ ψ_m หาได้จาก

$$\psi_m = \Delta\phi \pm 2\pi N\tag{2.4}$$

เมื่อ $N = 0, 1, 2, 3, \dots$



รูปที่ 3.1 การประวิงเฟสในสายอากาศแถวสะท้อนไมโครสตริบ

จากรูปที่ 3.1 เราสามารถหาระยะห่างของ patch แต่ละตัวโดยอ้างอิงจากจุดศูนย์กลางจากสมการ

$$r_i = \sqrt{x^2 + y^2}$$

เมื่อ x และ y เป็นพิกัดตามแกน x และแกน y
 และเราสามารถหาระยะจากตัวป้อนถึงสายอากาศแถวลำดับสะท้อน (r_{mn}) จากสมการ

$$r_{mn} = \sqrt{25^2 + ri^2}$$

เมื่อ 25 คือระยะห่างจากตัวป้อนถึงสายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่ใช้ในการทดสอบ และ r_i คือ ระยะห่างของ patch แต่ละตัว โดยอ้างอิงจากจุดศูนย์กลาง

จากสมการผลที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่กล่าวมาดังตารางที่ 3.1 แสดงค่าระยะห่างของ patch แต่ละตัว โดยอ้างอิงจากจุดศูนย์กลาง ระยะจากตัวป้อนถึงสายอากาศแถวลำดับสะท้อน เฟสที่ได้จากการคำนวณ และเฟสที่ได้รับการชดเชย โดยค่าเฟสชดเชยที่ได้เราจะนำไปคำนวณหาขนาดของ patch แต่ละตัว แต่ในการที่เราจะหาขนาดของ patch แต่ละตัวได้นั้น ต้องคุณลักษณะของแผ่นสะท้อนซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณเฟสชดเชยของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนพาราโบลิก

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | -8x,8x | 20.36 | 25.29 | 155.12 | -204.88 |
| 2 | -7x,8x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 3 | -6x,8x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 4 | -5x,8x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 5 | -4x,8x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 6 | -3x,8x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 7 | -2x,8x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 8 | -x,8x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 9 | 0,8x | 14.4 | 20.79 | 335.19 | -24.81 |
| 10 | x,8x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 11 | 2x,8x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 12 | 3x,8x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 13 | 4x,8x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 14 | 5x,8x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 15 | 6x,8x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 16 | 7x,8x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 17 | 8x,8x | 20.36 | 25.29 | 155.12 | -204.88 |
| 18 | -8x,7x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 19 | -7x,7x | 17.82 | 23.29 | 275.05 | -84.95 |
| 20 | -6x,7x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 21 | -5x,7x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 22 | -4x,7x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 23 | -3x,7x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 24 | -2x,7x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 25 | -x,7x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 26 | 0,7x | 12.6 | 19.59 | 190.78 | -169.22 |
| 27 | x,7x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 28 | 2x,7x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 29 | 3x,7x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 30 | 4x,7x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 31 | 5x,7x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 32 | 6x,7x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 33 | 7x,7x | 17.82 | 23.29 | 275.05 | -84.95 |
| 34 | 8x,7x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 35 | -8x,6x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 36 | -7x,6x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 37 | -6x,6x | 15.27 | 21.41 | 48.9 | -311.10 |
| 38 | -5x,6x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 39 | -4x,6x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 40 | -3x,6x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 41 | -2x,6x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 42 | -x,6x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 43 | 0,6x | 10.8 | 18.48 | 58.02 | -301.98 |
| 44 | x,6x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 45 | 2x,6x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 46 | 3x,6x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 47 | 4x,6x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 48 | 5x,6x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 49 | 6x,6x | 15.27 | 21.41 | 48.9 | -311.10 |
| 50 | 7x,6x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 51 | 8x,6x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 52 | -8x,5x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 53 | -7x,5x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 54 | -6x,5x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 55 | -5x,5x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 56 | -4x,5x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 57 | -3x,5x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 58 | -2x,5x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |
| 59 | -x,5x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 60 | 0,5x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 61 | x,5x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 62 | 2x,5x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |
| 63 | 3x,5x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 64 | 4x,5x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 65 | 5x,5x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 66 | 6x,5x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 67 | 7x,5x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 68 | 8x,5x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 69 | -8x,4x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 70 | -7x,4x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 71 | -6x,4x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 72 | -5x,4x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 73 | -4x,4x | 10.18 | 18.13 | 15.54 | -344.46 |
| 74 | -3x,4x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 75 | -2x,4x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 76 | -x,4x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 77 | 0,4x | 7.2 | 16.64 | 196.62 | -163.38 |
| 78 | x,4x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 79 | 2x,4x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 80 | 3x,4x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 81 | 4x,4x | 10.18 | 18.13 | 15.54 | -344.46 |
| 82 | 5x,4x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 83 | 6x,4x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 84 | 7x,4x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 85 | 8x,4x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 86 | -8x,3x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 87 | -7x,3x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 88 | -6x,3x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 89 | -5x,3x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 90 | -4x,3x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 91 | -3x,3x | 7.64 | 16.83 | 219.85 | -140.15 |
| 92 | -2x,3x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 93 | -x,3x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชนิดเซช (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| 94 | 0,3x | 5.4 | 15.94 | 113.09 | -246.91 |
| 95 | x,3x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 96 | 2x,3x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 97 | 3x,3x | 7.64 | 16.83 | 219.85 | -140.15 |
| 98 | 4x,3x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 99 | 5x,3x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 100 | 6x,3x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 101 | 7x,3x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 102 | 8x,3x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 103 | -8x,2x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 104 | -7x,2x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 105 | -6x,2x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 106 | -5x,2x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |
| 107 | -4x,2x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 108 | -3x,2x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 109 | -2x,2x | 5.09 | 15.84 | 100.85 | -259.15 |
| 110 | -x,2x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 111 | 0,2x | 3.6 | 15.43 | 51.11 | -308.89 |
| 112 | x,2x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 113 | 2x,2x | 5.09 | 15.84 | 100.85 | -259.15 |
| 114 | 3x,2x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 115 | 4x,2x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 116 | 5x,2x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |
| 117 | 6x,2x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 118 | 7x,2x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 119 | 8x,2x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 120 | -8x,x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชนิดเซย์ (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|---------------------------|
| 121 | -7x,x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 122 | -6x,x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 123 | -5x,x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 124 | -4x,x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 125 | -3x,x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 126 | -2x,x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 127 | -x,x | 2.55 | 15.21 | 25.74 | -334.26 |
| 128 | 0,x | 1.8 | 15.11 | 12.91 | -347.09 |
| 129 | x,x | 2.55 | 15.21 | 25.74 | -334.26 |
| 130 | 2x,x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 131 | 3x,x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 132 | 4x,x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 133 | 5x,x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 134 | 6x,x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 135 | 7x,x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 136 | 8x,x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 137 | -8x,0 | 14.4 | 20.79 | 335.19 | -24.81 |
| 138 | -7x,0 | 12.6 | 19.59 | 190.78 | -169.22 |
| 139 | -6x,0 | 10.8 | 18.48 | 58.02 | -301.98 |
| 140 | -5x,0 | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 141 | -4x,0 | 7.2 | 16.64 | 196.62 | -163.38 |
| 142 | -3x,0 | 5.4 | 15.94 | 113.09 | -246.91 |
| 143 | -2x,0 | 3.6 | 15.43 | 51.11 | -308.89 |
| 144 | -x,0 | 1.8 | 15.11 | 12.91 | -347.09 |
| 145 | 0,0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 146 | x,0 | 1.8 | 15.11 | 12.91 | -347.09 |
| 147 | 2x,0 | 3.6 | 15.43 | 51.11 | -308.89 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_m (cm) | Phase (degree) | Phaseซดเซย (degree) |
|----------|------------------|---------------|---------------|-------------------|------------------------|
| 148 | 3x,0 | 5.4 | 15.94 | 113.09 | -246.91 |
| 149 | 4x,0 | 7.2 | 16.64 | 196.62 | -163.38 |
| 150 | 5x,0 | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 151 | 6x,0 | 10.8 | 18.48 | 58.02 | -301.98 |
| 152 | 7x,0 | 12.6 | 19.59 | 190.78 | -169.22 |
| 153 | 8x,0 | 14.4 | 20.79 | 335.19 | -24.81 |
| 154 | -8x,-x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 155 | -7x,-x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 156 | -6x,-x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 157 | -5x,-x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 158 | -4x,-x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 159 | -3x,-x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 160 | -2x,-x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 161 | -x,-x | 2.55 | 15.21 | 25.74 | -334.26 |
| 162 | 0,-x | 1.8 | 15.11 | 12.91 | -347.09 |
| 163 | x,-x | 2.55 | 15.21 | 25.74 | -334.26 |
| 164 | 2x,-x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 165 | 3x,-x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 166 | 4x,-x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 167 | 5x,-x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 168 | 6x,-x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 169 | 7x,-x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 170 | 8x,-x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 171 | -8x,-2x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 172 | -7x,-2x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 173 | -6x,-2x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 174 | -5x,-2x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชนิดเซย์ (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|---------------------------|
| 175 | -4x,-2x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 176 | -3x,-2x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 177 | -2x,-2x | 5.09 | 15.84 | 100.85 | -259.15 |
| 178 | -x,-2x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 179 | 0,-2x | 3.6 | 15.43 | 51.11 | -308.89 |
| 180 | x,-2x | 4.02 | 15.53 | 63.67 | -296.33 |
| 181 | 2x,-2x | 5.09 | 15.84 | 100.85 | -259.15 |
| 182 | 3x,-2x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 183 | 4x,-2x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 184 | 5x,-2x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |
| 185 | 6x,-2x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 186 | 7x,-2x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 187 | 8x,-2x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 188 | -8x,-3x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 189 | -7x,-3x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 190 | -6x,-3x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 191 | -5x,-3x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 192 | -4x,-3x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 193 | -3x,-3x | 7.64 | 16.83 | 219.85 | -140.15 |
| 194 | -2x,-3x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 195 | -x,-3x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 196 | 0,-3x | 5.4 | 15.94 | 113.09 | -246.91 |
| 197 | x,-3x | 5.69 | 16.04 | 125.24 | -234.76 |
| 198 | 2x,-3x | 6.49 | 16.34 | 161.26 | -198.74 |
| 199 | 3x,-3x | 7.64 | 16.83 | 219.85 | -140.15 |
| 200 | 4x,-3x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 201 | 5x,-3x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 202 | 6x,-3x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 203 | 7x,-3x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 204 | 8x,-3x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 205 | -8x,-4x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 206 | -7x,-4x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 207 | -6x,-4x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 208 | -5x,-4x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 209 | -4x,-4x | 10.18 | 18.13 | 15.54 | -344.46 |
| 210 | -3x,-4x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 211 | -2x,-4x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 212 | -x,-4x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 213 | 0,-4x | 7.2 | 16.64 | 196.62 | -163.38 |
| 214 | x,-4x | 7.42 | 16.74 | 208.27 | -151.73 |
| 215 | 2x,-4x | 8.05 | 17.02 | 242.82 | -117.18 |
| 216 | 3x,-4x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 217 | 4x,-4x | 10.18 | 18.13 | 15.54 | -344.46 |
| 218 | 5x,-4x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 219 | 6x,-4x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 220 | 7x,-4x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 221 | 8x,-4x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 222 | -8x,-5x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 223 | -7x,-5x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 224 | -6x,-5x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 225 | -5x,-5x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 226 | -4x,-5x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 227 | -3x,-5x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 228 | -2x,-5x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseซดเซช (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 229 | -x,-5x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 230 | 0,-5x | 9 | 17.49 | 299.14 | -60.86 |
| 231 | x,-5x | 9.18 | 17.59 | 310.23 | -49.77 |
| 232 | 2x,-5x | 9.69 | 17.86 | 343.13 | -16.87 |
| 233 | 3x,-5x | 10.50 | 18.31 | 36.89 | -323.11 |
| 234 | 4x,-5x | 11.53 | 18.92 | 110 | -250 |
| 235 | 5x,-5x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 236 | 6x,-5x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 237 | 7x,-5x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 238 | 8x,-5x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 239 | -8x,-6x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 240 | -7x,-6x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 241 | -6x,-6x | 15.27 | 21.41 | 48.9 | -311.10 |
| 242 | -5x,-6x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 243 | -4x,-6x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 244 | -3x,-6x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 245 | -2x,-6x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 246 | -x,-6x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 247 | 0,-6x | 10.8 | 18.48 | 58.02 | -301.98 |
| 248 | x,-6x | 10.95 | 18.57 | 68.51 | -291.49 |
| 249 | 2x,-6x | 11.38 | 18.83 | 99.7 | -260.30 |
| 250 | 3x,-6x | 12.07 | 19.26 | 150.74 | -209.26 |
| 251 | 4x,-6x | 12.98 | 19.84 | 220.36 | -139.64 |
| 252 | 5x,-6x | 14.06 | 20.56 | 306.99 | -53.01 |
| 253 | 6x,-6x | 15.27 | 21.41 | 48.9 | -311.10 |
| 254 | 7x,-6x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 255 | 8x,-6x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_{mn} (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------------|
| 256 | -8x,-7x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 257 | -7x,-7x | 17.82 | 23.29 | 275.05 | -84.95 |
| 258 | -6x,-7x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 259 | -5x,-7x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 260 | -4x,-7x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 261 | -3x,-7x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 262 | -2x,-7x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 263 | -x,-7x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 264 | 0,-7x | 12.6 | 19.59 | 190.78 | -169.22 |
| 265 | x,-7x | 12.73 | 19.67 | 200.68 | -159.32 |
| 266 | 2x,-7x | 13.10 | 19.92 | 230.14 | -129.86 |
| 267 | 3x,-7x | 13.71 | 20.32 | 278.45 | -81.55 |
| 268 | 4x,-7x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 269 | 5x,-7x | 15.48 | 21.56 | 67 | -293 |
| 270 | 6x,-7x | 16.60 | 22.37 | 164.35 | -195.65 |
| 271 | 7x,-7x | 17.82 | 23.29 | 275.05 | -84.95 |
| 272 | 8x,-7x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 273 | -8x,-8x | 20.36 | 25.29 | 155.12 | -204.88 |
| 274 | -7x,-8x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 275 | -6x,-8x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 276 | -5x,-8x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 277 | -4x,-8x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 278 | -3x,-8x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 279 | -2x,-8x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 280 | -x,-8x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |
| 281 | 0,-8x | 14.4 | 20.79 | 335.19 | -24.81 |
| 282 | x,-8x | 14.51 | 20.87 | 344.52 | -15.48 |

| ลำดับที่ | ตำแหน่ง (x,y) | r_i (cm) | r_m (cm) | Phase (degree) | Phaseชดเชย (degree) |
|----------|------------------|---------------|---------------|-------------------|------------------------|
| 283 | 2x,-8x | 14.84 | 21.10 | 12.31 | -347.69 |
| 284 | 3x,-8x | 15.38 | 21.48 | 57.96 | -302.04 |
| 285 | 4x,-8x | 16.10 | 22 | 120.55 | -239.45 |
| 286 | 5x,-8x | 16.98 | 22.66 | 198.89 | -161.11 |
| 287 | 6x,-8x | 18 | 23.43 | 291.69 | -68.31 |
| 288 | 7x,-8x | 19.13 | 24.31 | 37.56 | -322.44 |
| 289 | 8x,-8x | 20.36 | 25.29 | 155.12 | -204.88 |

จากตารางเราสามารถทราบตำแหน่งของแต่ละ patch ได้ ต้องทราบค่าตัวแปร x ก่อน โดยหาค่า x ได้จาก

$$x = 0.6 \lambda_0$$

λ_0 เป็นความยาวคลื่นในอากาศมีค่าเท่ากับ c/f (เมื่อ c คือความเร็วแสง และ f คือความถี่เรโซแนนซ์) โดยความถี่เรโซแนนซ์ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป คือ 10 GHz ดังนั้น λ_0 ที่คำนวณได้ก็คือ 3 เซนติเมตร แทนค่า λ_0 เพื่อหาค่า x

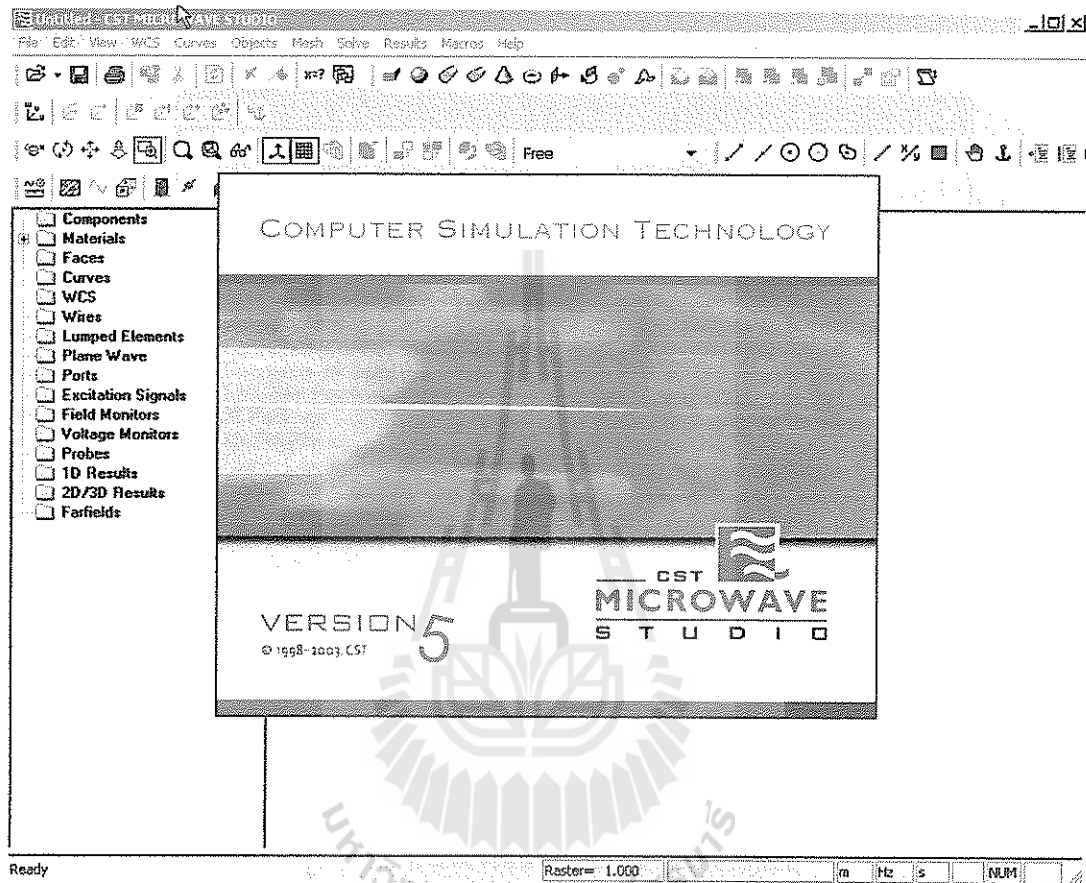
$$x = (0.6)(3 \text{ cm})$$

$$= 1.8 \text{ cm}$$

เมื่อแทนค่า x ลงในตารางก็จะได้ตำแหน่งต่างๆของ patch ของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

3.3 การหาคุณสมบัติของแผ่นสะท้อน

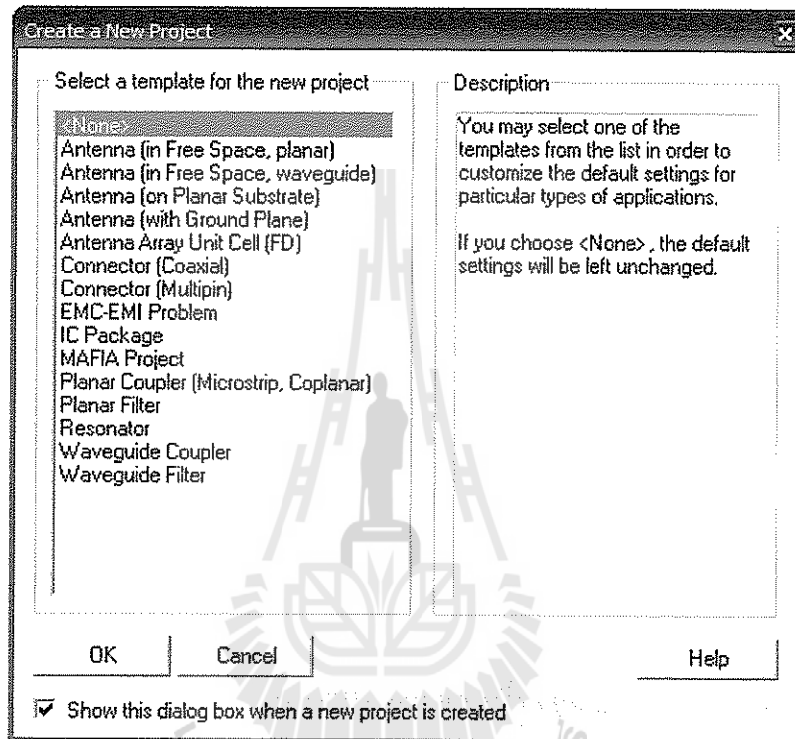
ในการหาคุณสมบัติของแผ่นสะท้อนนั้นจะใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริป



รูปที่ 3.2 การออกแบบแผ่นสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CST

3.3.1 การออกแบบแผ่นสะท้อนโดยใช้โปรแกรม CST

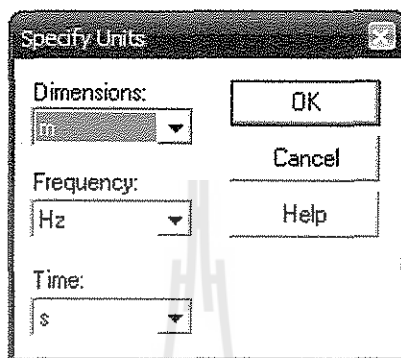
1. เมื่อเปิดโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO แล้วให้เลือกที่เมนู File → New
2. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการสร้าง templates ให้กับชิ้นงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะมีแบบให้เลือกแล้วแต่ความต้องการ หากไม่ต้องการกำหนดให้เลือกคำสั่ง None แล้วเลือก OK



รูปที่ 3.3 หน้าต่างของ Create a New Project

3.3.2 การกำหนดหน่วย (Units)

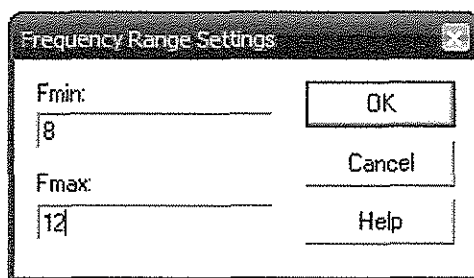
1. เลือกเมนู Solve → Units
2. เลือก Dimensions (mm) ความถี่ (GHz) และ เวลา ที่ต้องการ
3. เลือก OK



รูปที่ 3.4 หน้าต่างของ Specify Units

3.3.3 การกำหนดความถี่ (Frequency)

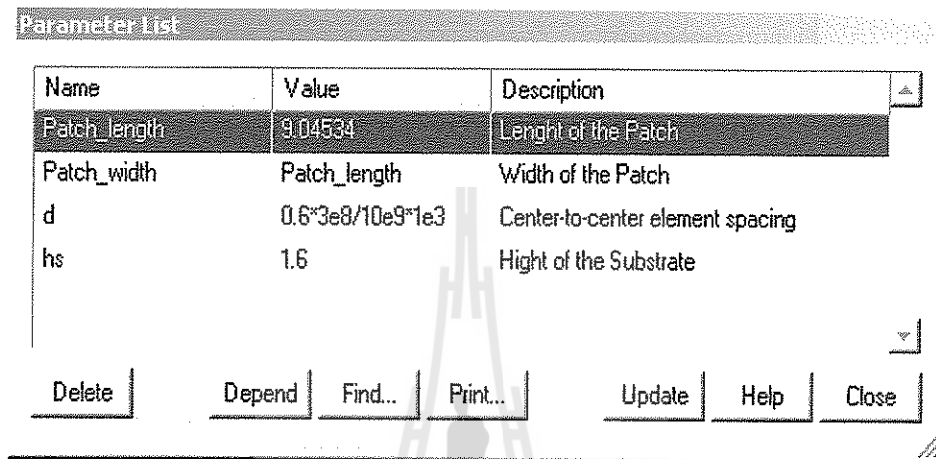
1. เลือก Solve → frequency
2. กำหนด ความถี่เริ่มต้น f_{min} ที่ 8 GHz และ ความถี่สูงสุด f_{max} ที่ 12 GHz ค่าของความถี่ที่ตั้งไว้จะตั้งค่า signal monitors โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.5 หน้าต่างของ Frequency Range Settings

3.3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

1. เลือก Edit → Parameter
2. กำหนด Parameter ต่างๆ ดังรูป 3.5
3. เลือก Update



รูปที่ 3.6 หน้าต่างของ Parameter List

3.3.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

1. เลือก Specify Boundary Conditions
2. กำหนดค่าต่างๆ ดังรูป 3.6 โดยกำหนดขอบเขต ดังนี้

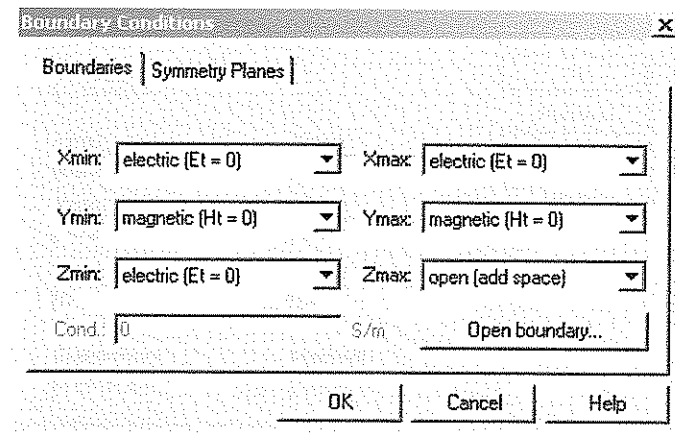
X_{\min}, X_{\max} โดยให้ $E_t = 0$

Y_{\min}, Y_{\max} โดยให้ $H_t = 0$

Z_{\min} โดยให้ $E_t = 0$

Z_{\max} โดยให้เป็น Open add space

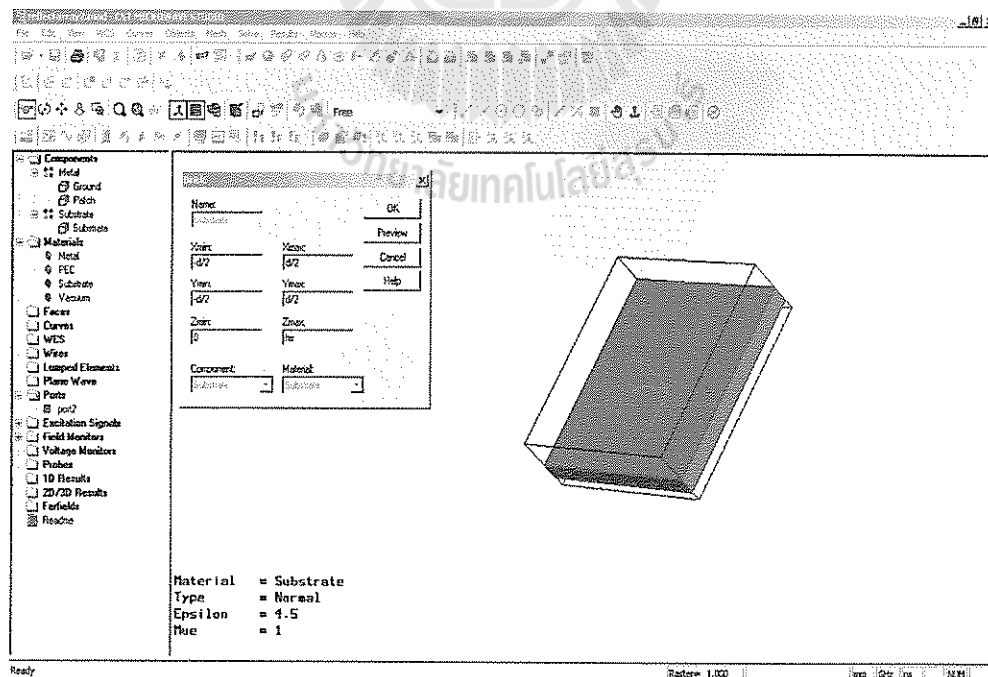
3. เลือก OK



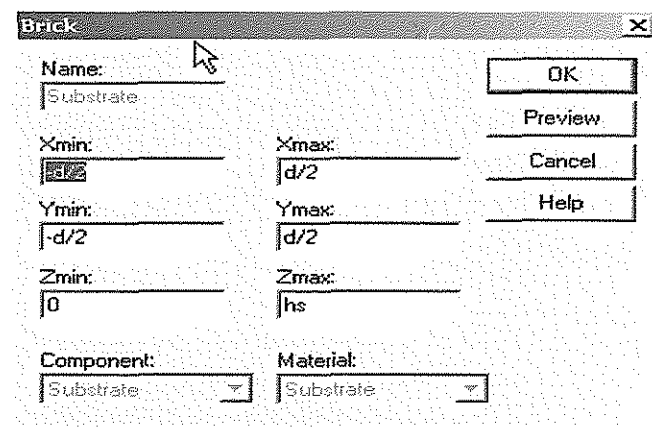
รูปที่ 3.7 หน้าต่างของ Boundary Conditions

3.3.6 ขั้นตอนการออกแบบ

1. วาดรูปสี่เหลี่ยม
2. กำหนด Material เป็นแบบ PEC ค่า Epsilon เป็น 4.5
3. กำหนด Substate และค่าต่างๆดังรูป 3.7
4. จากนั้นเลือกกด OK



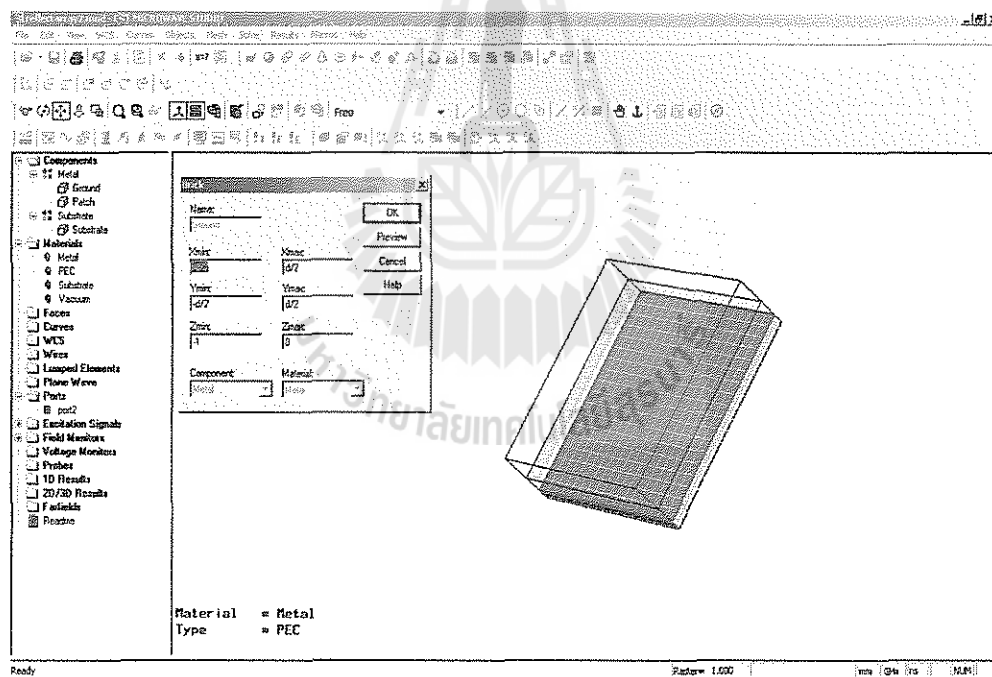
รูปที่ 3.8 หน้าต่างของ Substate



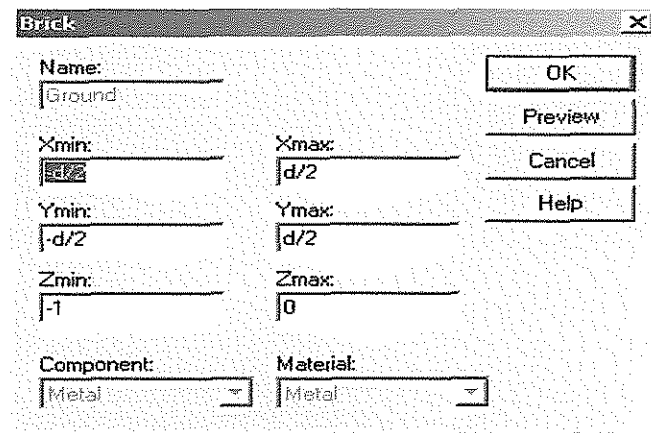
รูปที่ 3.9 Parameter ของ Substrate

5. กำหนด Ground และค่าต่างๆดังรูป 3.9

6. จากนั้นเลือกกด OK



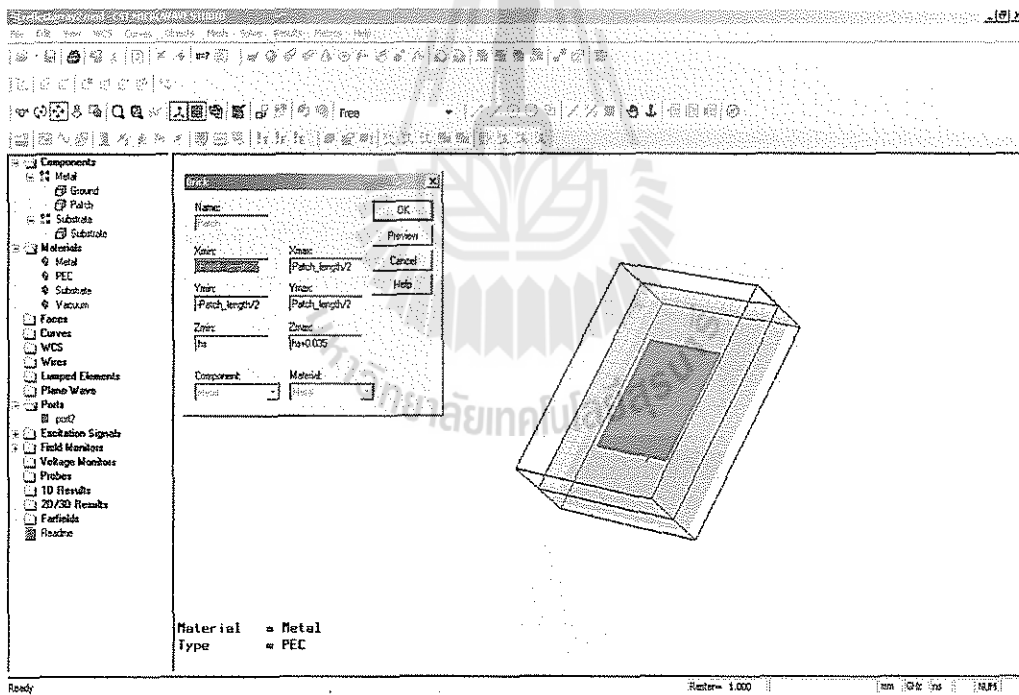
รูปที่ 3.10 หน้าต่างของ Ground



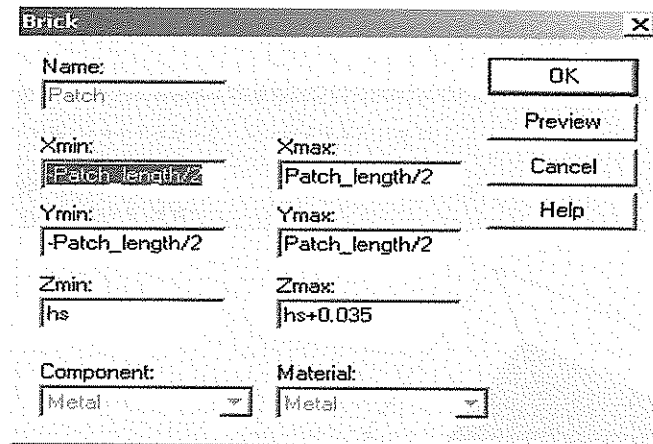
รูปที่ 3.11 Parameter ของ Ground

7. กำหนด Patch และค่าต่างๆดังรูป 3.12

8. จากนั้นเลือก OK



รูปที่ 3.12 หน้าต่างของ Patch



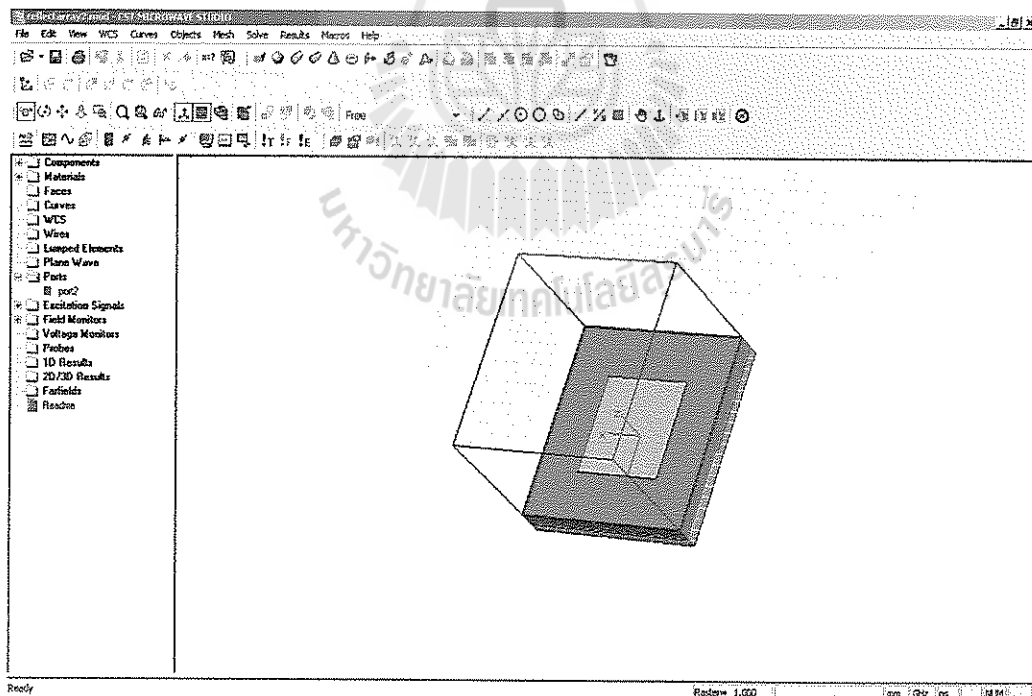
รูปที่ 3.13 Parameter ของ Patch

9. จากนั้นก็จะได้ชิ้นงานออกมาจากการสร้างส่วนต่างๆ

Substrate ความหนา = 1.6 mm

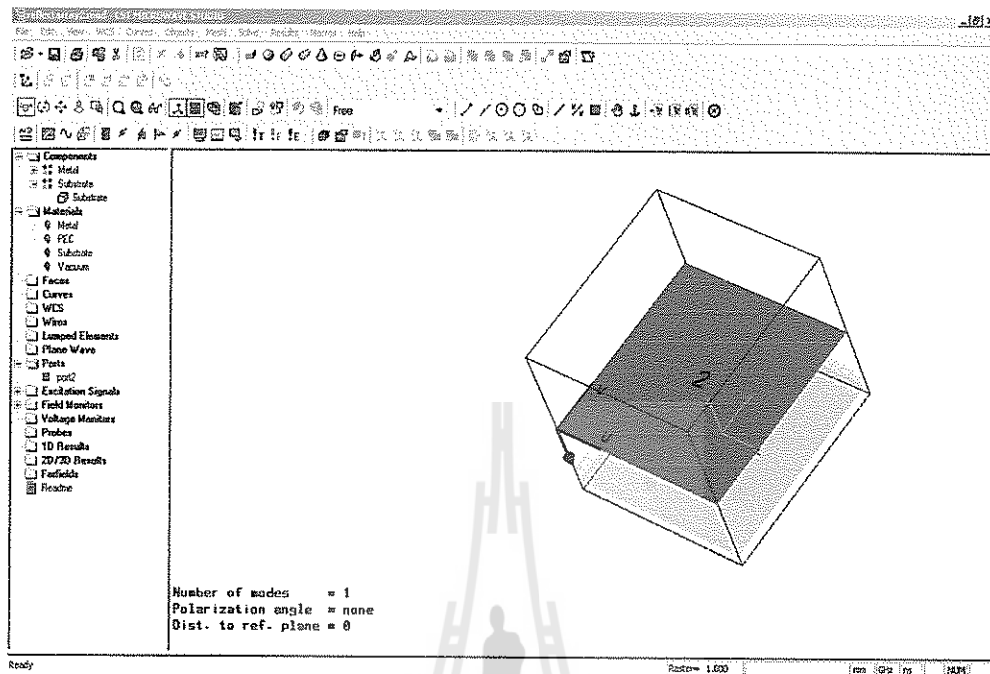
ground ความหนา = 1.0 mm

Patch ความหนา = 0.035 mm



รูปที่ 3.14 หน้าต่างของชิ้นงาน

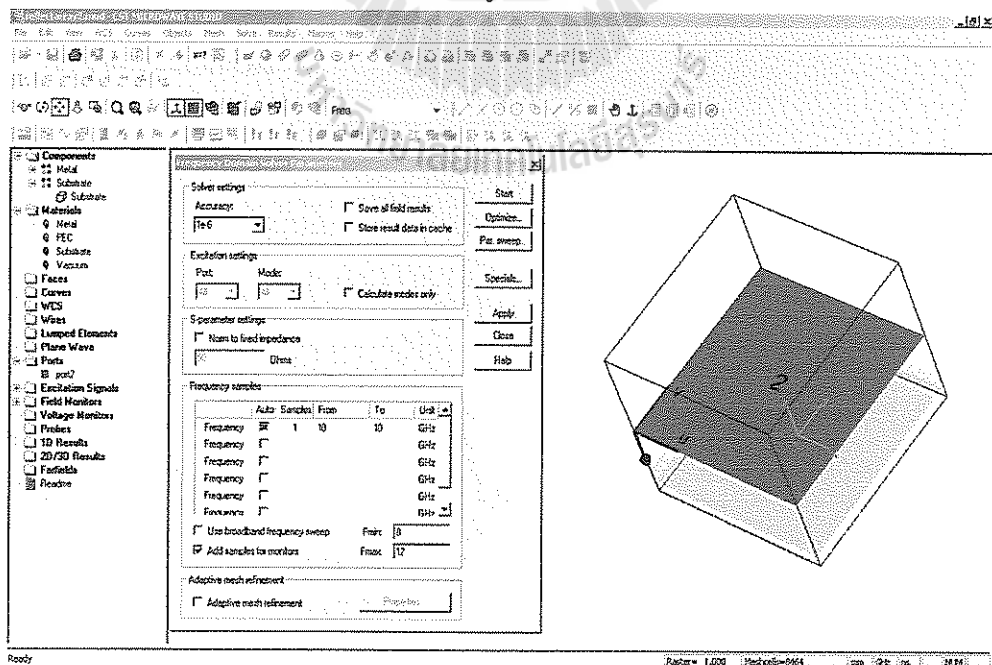
10. สร้าง Port ที่จะใช้ในการ Simulate (ในการทดลองใช้ Port 2)



รูปที่ 3.15 หน้าต่างของ Port 2

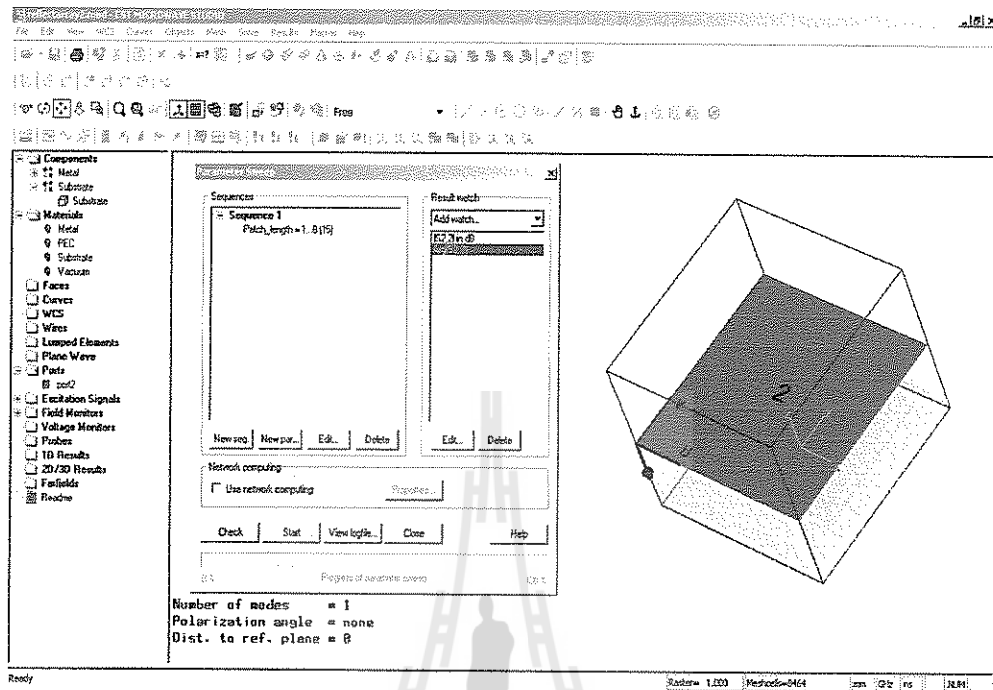
11. ทำการ Simulate

12. เลือก Frequency Domain solver ดังรูป 3.16



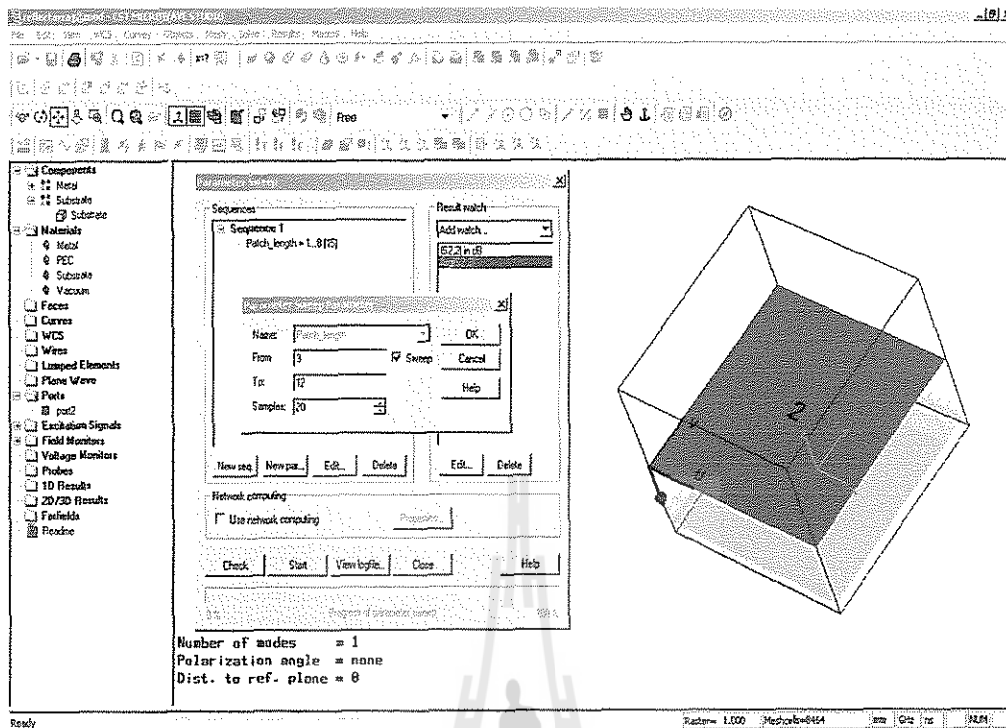
รูปที่ 3.16 หน้าต่างก่อนการ Simulate

13. เลือก Par sweep → Sequence 1

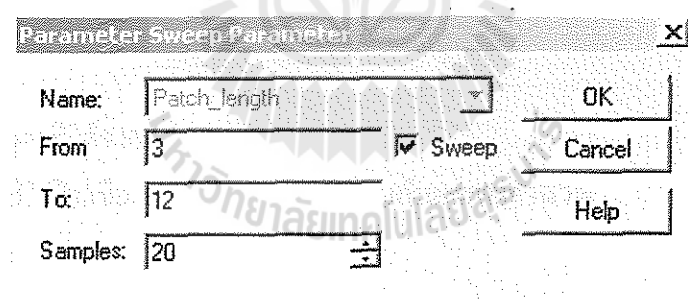


รูปที่ 3.17 หน้าต่างก่อนการ Simulate กำหนด Sweep

14. เลือก Edit
15. กำหนดช่วง Parameter ที่ต้องการ Simulate
16. จากนั้นเลือก OK

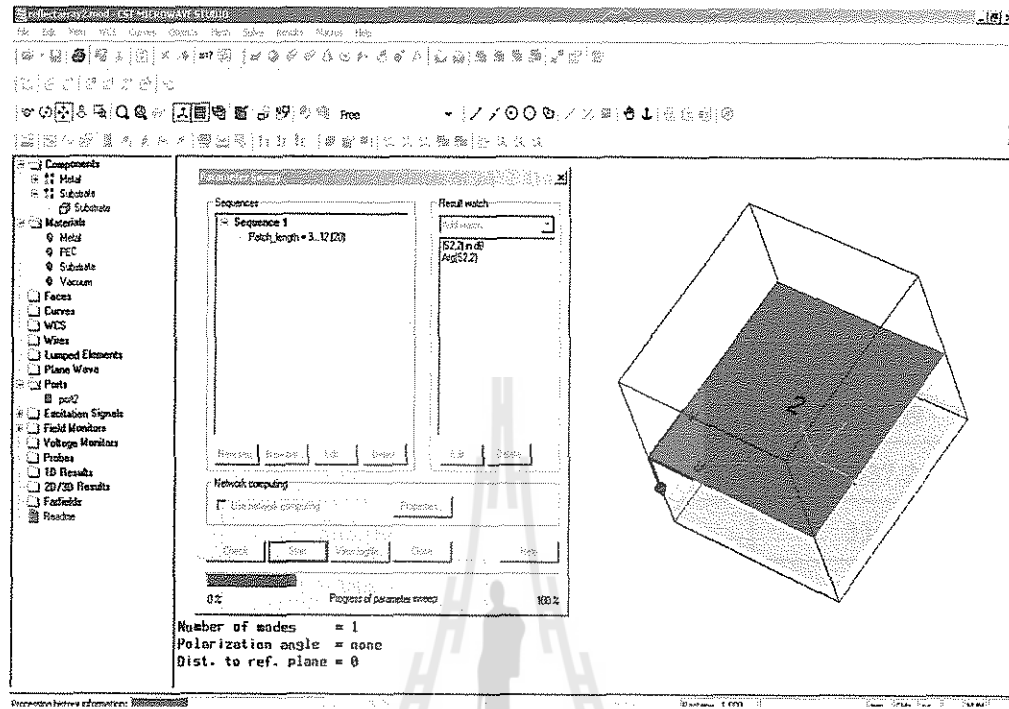


รูปที่ 3.18 หน้าต่างก่อนการ Simulate คำสั่ง Sweep



รูปที่ 3.19 กำหนด Parameter ที่ใช้ในการ Sweep

17. เลือก Start เพื่อทำการ Simulate ดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 ทำการ Simulate

18. บันทึกผลที่ได้จากการ Simulate

19. นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟและเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

3.4 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจากผลการ Simulate

หลังจากที่เราได้ทำการ Simulate และบันทึกผล เราสามารถนำผลที่ได้ไปเขียนเป็นกราฟ เพื่อหาขนาดของแผ่นสะท้อน

ตารางที่ 3.2 ผลการ Simulate ช่วง 7 ถึง 15 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 10 GHz

| Patch | Angle | Patch | Angle |
|-------|--------|-------|--------|
| 7.183 | 358.01 | 8.313 | 339.27 |
| 7.283 | 357.51 | 8.323 | 338.18 |
| 7.383 | 356.82 | 8.333 | 337.69 |
| 7.483 | 356.02 | 8.343 | 337.2 |
| 7.583 | 355.09 | 8.353 | 336.68 |
| 7.683 | 354 | 8.363 | 336.16 |
| 7.783 | 352.71 | 8.373 | 335.61 |
| 7.883 | 351.17 | 8.383 | 335.05 |
| 7.983 | 349.31 | 8.393 | 335.69 |
| 8.083 | 347.02 | 8.403 | 335.14 |
| 8.183 | 344.17 | 8.413 | 334.57 |
| 8.193 | 343.85 | 8.423 | 333.98 |
| 8.203 | 343.52 | 8.433 | 333.38 |
| 8.213 | 343.18 | 8.443 | 332.76 |
| 8.223 | 342.83 | 8.453 | 332.11 |
| 8.233 | 342.48 | 8.463 | 331.45 |
| 8.243 | 342.11 | 8.473 | 330.76 |
| 8.253 | 341.73 | 8.483 | 330.05 |
| 8.263 | 341.35 | 8.493 | 329.32 |
| 8.273 | 340.96 | 8.503 | 328.56 |
| 8.283 | 340.55 | 8.513 | 327.78 |
| 8.293 | 340.14 | 8.523 | 326.97 |
| 8.303 | 339.71 | 8.533 | 326.12 |

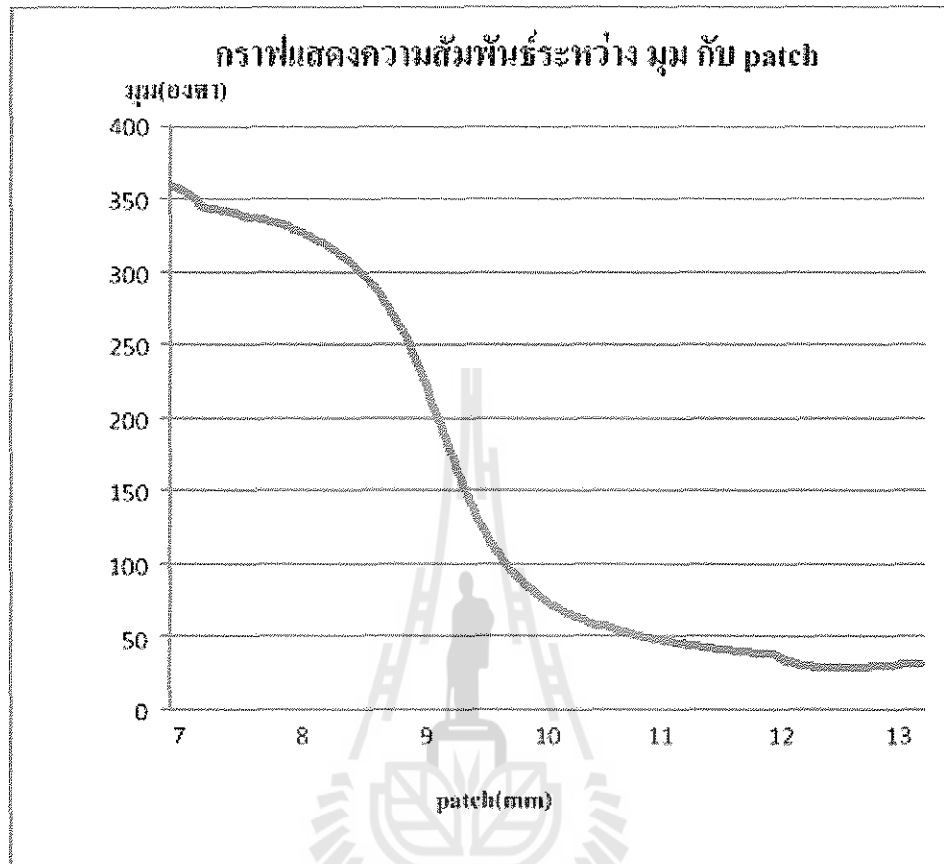
| Patch | Angle | Patch | Angle |
|-------|--------|-------|--------|
| 8.543 | 325.25 | 8.823 | 278.39 |
| 8.553 | 324.35 | 8.833 | 275.35 |
| 8.563 | 323.41 | 8.843 | 272.16 |
| 8.573 | 322.44 | 8.853 | 268.82 |
| 8.583 | 321.43 | 8.863 | 265.32 |
| 8.593 | 320.38 | 8.873 | 261.66 |
| 8.603 | 319.29 | 8.883 | 257.83 |
| 8.613 | 318.16 | 8.893 | 253.84 |
| 8.623 | 316.98 | 8.903 | 249.67 |
| 8.633 | 315.75 | 8.913 | 245.34 |
| 8.643 | 314.47 | 8.923 | 240.84 |
| 8.653 | 313.14 | 8.933 | 236.18 |
| 8.663 | 311.74 | 8.943 | 231.37 |
| 8.673 | 310.29 | 8.953 | 226.42 |
| 8.683 | 308.78 | 8.963 | 221.35 |
| 8.693 | 307.19 | 8.973 | 216.15 |
| 8.703 | 305.54 | 8.983 | 210.87 |
| 8.713 | 303.81 | 8.993 | 205.51 |
| 8.723 | 302 | 9.003 | 200.11 |
| 8.733 | 300.11 | 9.013 | 194.7 |
| 8.743 | 298.13 | 9.023 | 189.2 |
| 8.753 | 296.05 | 9.033 | 183.8 |
| 8.763 | 293.87 | 9.043 | 178.4 |
| 8.773 | 291.59 | 9.053 | 173.1 |
| 8.783 | 289.2 | 9.063 | 167.9 |
| 8.793 | 286.69 | 9.073 | 162.8 |
| 8.803 | 284.05 | 9.083 | 157.8 |
| 8.813 | 281.29 | 9.093 | 153 |

| Patch | Angle | Patch | Angle |
|-------|-------|-------|-------|
| 9.103 | 148.3 | 9.383 | 74.1 |
| 9.113 | 143.8 | 9.393 | 72.8 |
| 9.123 | 139.4 | 9.403 | 71.5 |
| 9.133 | 135.2 | 9.413 | 70.4 |
| 9.143 | 131.2 | 9.423 | 69.2 |
| 9.153 | 127.3 | 9.433 | 68.1 |
| 9.163 | 123.6 | 9.443 | 67.1 |
| 9.173 | 120.1 | 9.453 | 66 |
| 9.183 | 116.7 | 9.463 | 65.1 |
| 9.193 | 113.5 | 9.473 | 64.1 |
| 9.203 | 110.5 | 9.483 | 63.2 |
| 9.213 | 107.5 | 9.493 | 62.3 |
| 9.223 | 104.7 | 9.503 | 61.5 |
| 9.233 | 102.1 | 9.513 | 60.7 |
| 9.243 | 99.5 | 9.523 | 59.9 |
| 9.253 | 97.1 | 9.533 | 59.1 |
| 9.263 | 94.8 | 9.543 | 58.4 |
| 9.273 | 92.6 | 9.553 | 57.7 |
| 9.283 | 90.5 | 9.563 | 57 |
| 9.293 | 88.5 | 9.573 | 57.9 |
| 9.303 | 86.6 | 9.583 | 57.3 |
| 9.313 | 84.8 | 9.593 | 56.6 |
| 9.323 | 83.1 | 9.603 | 55.9 |
| 9.333 | 81.4 | 9.613 | 55.3 |
| 9.343 | 79.8 | 9.623 | 54.7 |
| 9.353 | 78.3 | 9.633 | 54.1 |
| 9.363 | 76.8 | 9.643 | 53.6 |
| 9.373 | 75.4 | 9.653 | 53 |

| Patch | Angle | Patch | Angle |
|-------|-------|--------|-------|
| 9.663 | 52.5 | 9.943 | 42.1 |
| 9.673 | 52 | 9.953 | 41.9 |
| 9.683 | 51.5 | 9.963 | 41.6 |
| 9.693 | 51 | 9.973 | 41.4 |
| 9.703 | 50.5 | 9.983 | 41.1 |
| 9.713 | 50 | 9.993 | 40.9 |
| 9.723 | 49.6 | 10.003 | 40.7 |
| 9.733 | 49.1 | 10.013 | 40.4 |
| 9.743 | 48.7 | 10.023 | 40.2 |
| 9.753 | 48.3 | 10.033 | 40 |
| 9.763 | 47.9 | 10.043 | 39.8 |
| 9.773 | 47.5 | 10.053 | 39.6 |
| 9.783 | 47.1 | 10.063 | 39.4 |
| 9.793 | 46.7 | 10.073 | 39.2 |
| 9.803 | 46.4 | 10.083 | 39 |
| 9.813 | 46 | 10.093 | 38.82 |
| 9.823 | 45.7 | 10.103 | 38.63 |
| 9.833 | 45.3 | 10.113 | 38.45 |
| 9.843 | 45 | 10.123 | 38.27 |
| 9.853 | 44.7 | 10.133 | 38.09 |
| 9.863 | 44.4 | 10.143 | 37.91 |
| 9.873 | 44.1 | 10.153 | 37.75 |
| 9.883 | 43.8 | 10.163 | 37.58 |
| 9.893 | 43.5 | 10.173 | 37.42 |
| 9.903 | 43.2 | 10.183 | 37.23 |
| 9.913 | 42.9 | 10.283 | 35.81 |
| 9.923 | 42.6 | 10.383 | 34.62 |
| 9.933 | 42.4 | 10.483 | 33.61 |

| Patch | Angle | Patch | Angle |
|--------|-------|--------|-------|
| 10.583 | 32.77 | 12.983 | 28.82 |
| 10.683 | 32.04 | 13.083 | 28.89 |
| 10.783 | 31.48 | 13.183 | 29.02 |
| 10.883 | 30.96 | 13.283 | 29.12 |
| 10.983 | 30.52 | 13.383 | 29.22 |
| 11.083 | 30.14 | 13.483 | 29.33 |
| 11.183 | 29.81 | 13.583 | 29.44 |
| 11.283 | 29.53 | 13.683 | 29.56 |
| 11.383 | 29.29 | 13.783 | 29.68 |
| 11.483 | 29.1 | 13.883 | 29.82 |
| 11.583 | 28.93 | 13.983 | 29.95 |
| 11.683 | 28.8 | 14.083 | 30.08 |
| 11.783 | 28.69 | 14.183 | 30.22 |
| 11.883 | 28.61 | 14.283 | 30.37 |
| 11.983 | 28.6 | 14.383 | 30.54 |
| 12.083 | 28.56 | 14.483 | 30.68 |
| 12.183 | 28.54 | 14.583 | 30.83 |
| 12.283 | 28.53 | 14.683 | 30.98 |
| 12.383 | 28.53 | 14.783 | 31.12 |
| 12.483 | 28.55 | 14.883 | 31.28 |
| 12.583 | 28.58 | 14.983 | 31.43 |
| 12.683 | 28.63 | 15.083 | 31.59 |
| 12.783 | 28.68 | 15.183 | 31.74 |
| 12.883 | 28.75 | | |

นำผลที่ได้จากตารางมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับขนาดของ patch



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม กับ patch

เมื่อเราได้กราฟมาแล้ว เราสามารถหาขนาดของ patch ได้จากกราฟ โดยนำผลจากการคำนวณในหัวข้อ 3.1 มาหาขนาดของ patch เพื่อใช้สร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ผลที่ได้จากการออกแบบและการจำลองแบบด้วยโปรแกรม เราสามารถนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อใช้งานจริง ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป



บทที่ 4

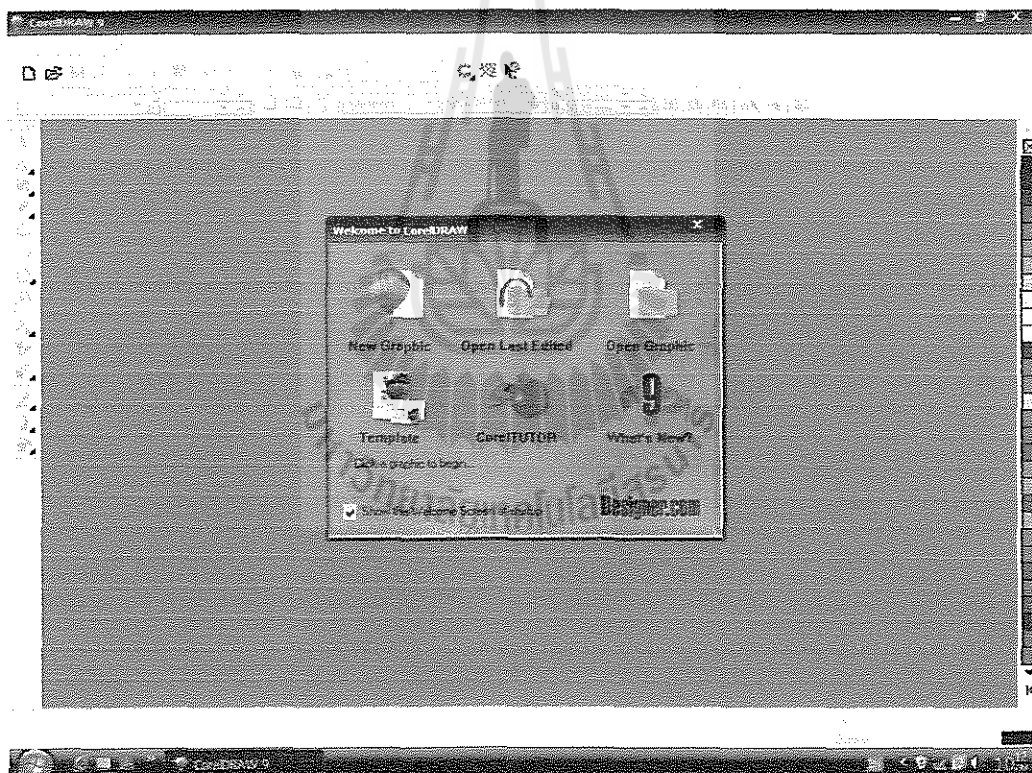
การทดลอง

4.1 บทนำ

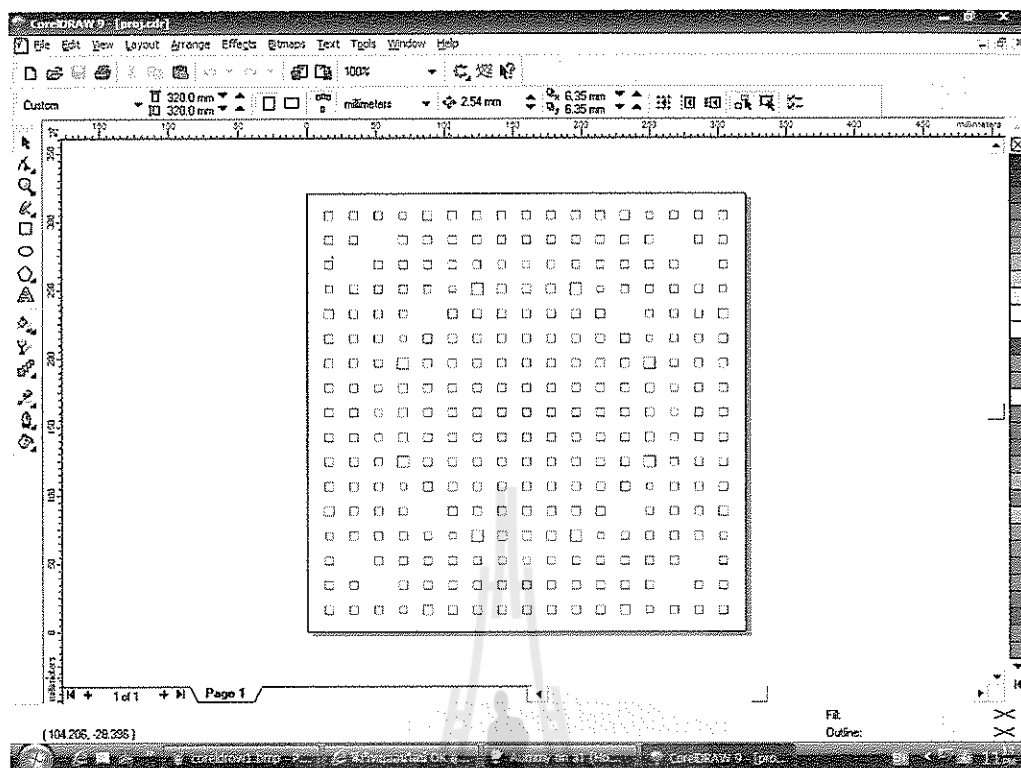
หลังจากที่เราได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เสร็จสิ้นแล้ว เราจึงนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบแผ่น ไมโครสตริปมาสร้างสายอากาศขึ้นจริง

4.2 การสร้างแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

4.2.1 ใช้โปรแกรม Corel Draw Graphics Suite X4 ในการออกแบบแผ่นไมโครสตริปขนาด 320×320 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 โปรแกรม Corel Draw

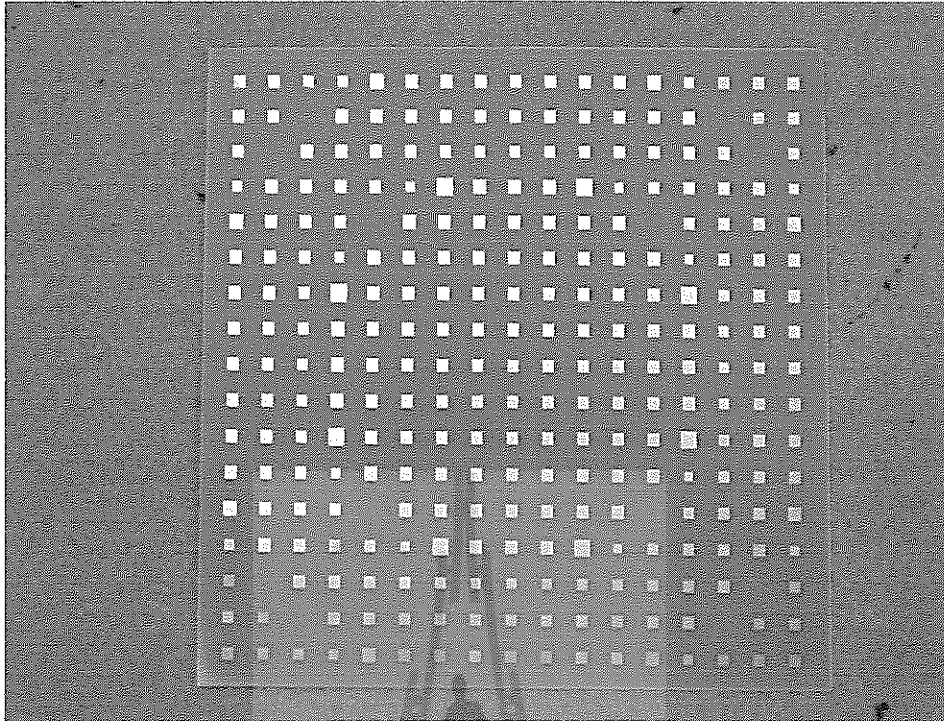


รูปที่ 4.2 การออกแบบแผ่นไมโครสตริปโดยใช้โปรแกรม Corel Draw

4.2.2 นำแผ่นไมโครสตริป ขนาด 320×320 มิลลิเมตรที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Corel Draw Graphics Suite X4 ไปตัดสติ๊กเกอร์

4.2.3 นำแผ่นสติ๊กเกอร์ที่ได้มาติดบนแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

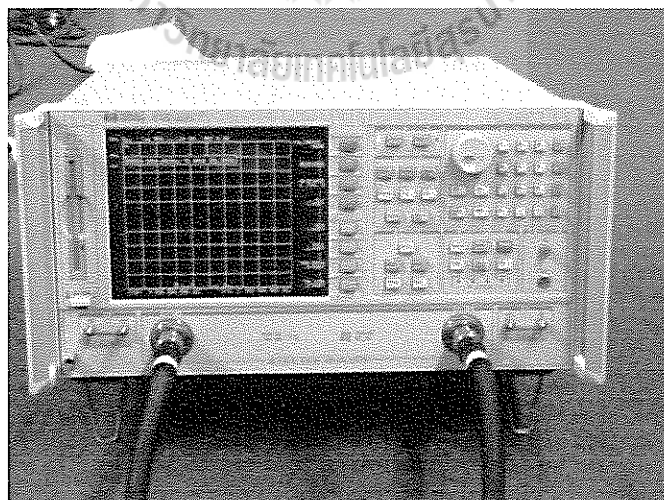
4.2.4 จากนั้นนำแผ่นสะท้อนไมโครสตริปที่ติดสติ๊กเกอร์แล้วไปแช่ในกรรกักเหลือองประมาณ 30 นาที เพื่อกักส่วนที่ไม่ต้องการออกไป เสร็จแล้วจะได้แผ่นสะท้อนไมโครสตริปที่สมบูรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.3 แผ่นสะท้อนไมโครสตริป

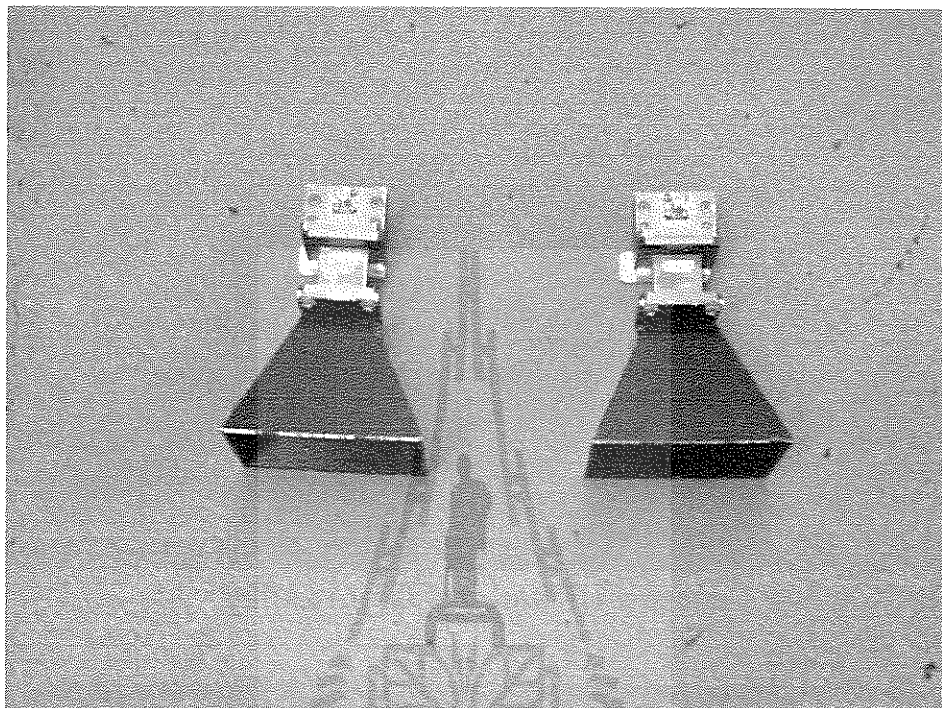
4.3 การวัดทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

หลังจากที่ได้แผ่นสะท้อนไมโครสตริปที่ออกแบบไว้แล้ว จากนั้นเราก็จะนำแผ่นสะท้อนดังกล่าวมาทำการวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



รูปที่ 4.4 เครื่อง Network Analyzer HP 8722D

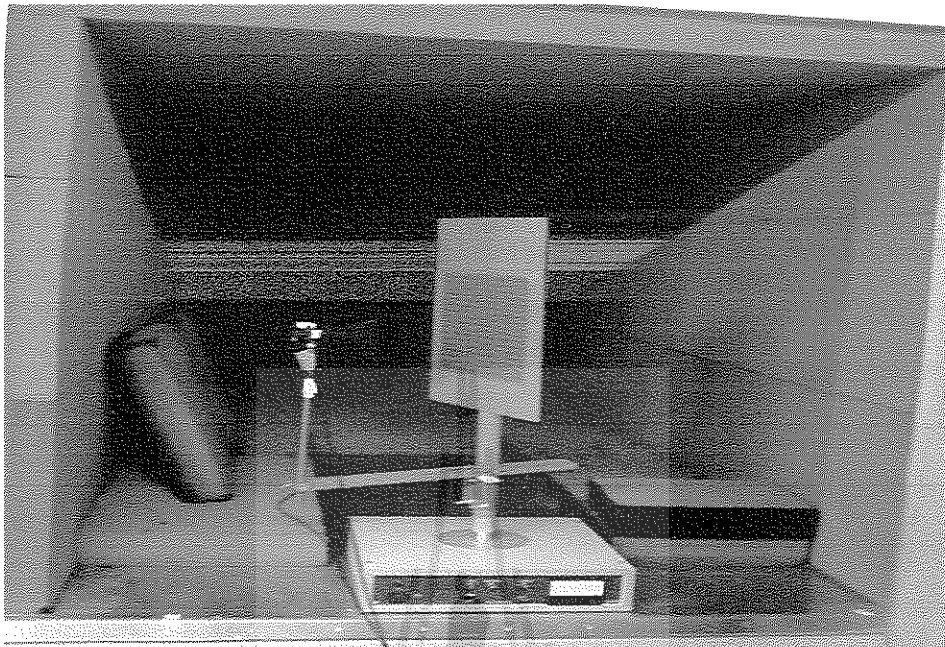
ในการวัดทดสอบนี้ระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อน กับสายอากาศที่ทำหน้าที่ส่งและรับคลื่น จะมีระยะคงที่ตลอดการวัดทดสอบ โดยมีระยะห่างเท่ากับ 2.89 เมตร ใช้ความถี่ในการวัดทดสอบที่ความถี่ 10 GHz และใช้สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่ความถี่ 10 GHz เป็นสายอากาศส่งและรับ



รูปที่ 4.5 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่ใช้เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศป้อน

4.4 ผลการวัดแผ่นสะท้อนไมโครสตริป

การวัดแผ่นสะท้อนไมโครสตริปจะเริ่มจาก -100 องศา จนถึง 100 องศา โดยการหมุนมุม จะหมุนทีละ 5 องศา จนถึง -20 องศาจะเริ่มหมุนมุมทีละ 2 องศาไปเรื่อยๆจนถึง 20 องศา ก็จะ กลับมาหมุนมุมทีละ 5 องศาตามเดิม



รูปที่ 4.6 การติดตั้งสายอากาศที่ใช้วัดทดสอบ



รูปที่ 4.7 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

4.4.1 วัด E-plane

ผลการวัดแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังตารางที่ 4.1

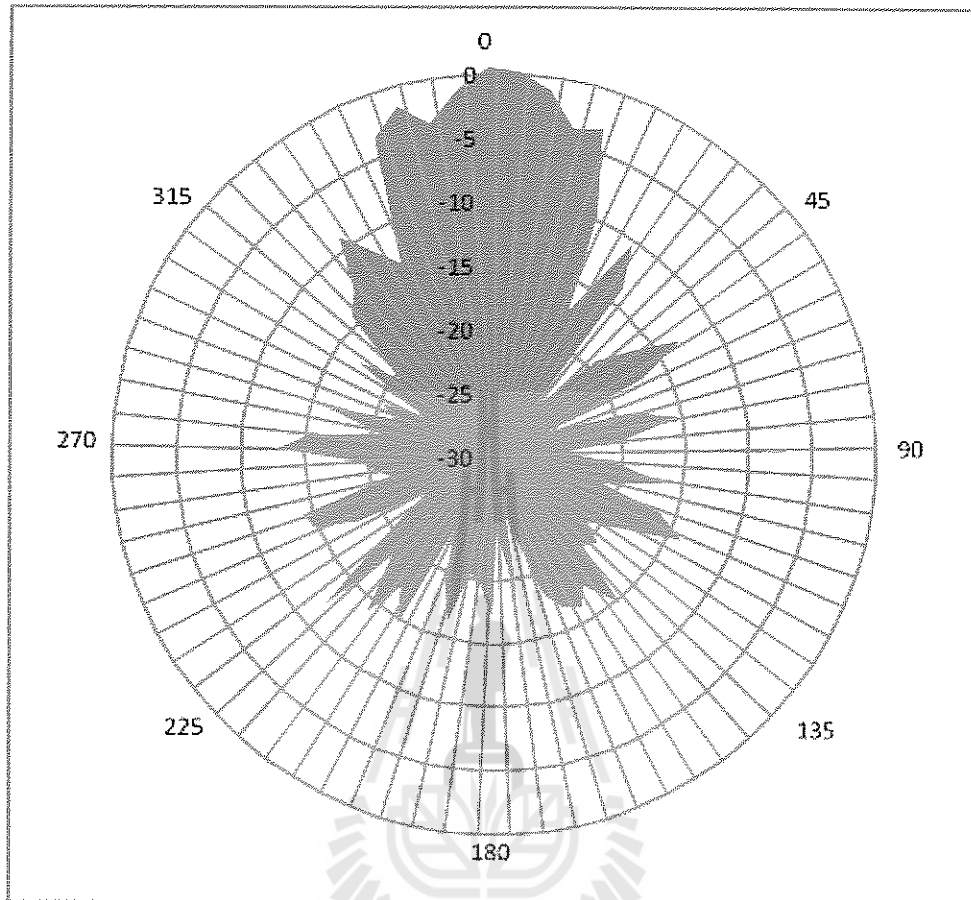
ตารางที่ 4.1 วัดแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ E-plane

| มุมจากการหมุน(องศา) | พลังงานที่วัดได้(dB) |
|---------------------|----------------------|
| 0 | -37.8 |
| 5 | -38.9 |
| 10 | -41.4 |
| 15 | -40.8 |
| 20 | -47.3 |
| 25 | -54.8 |
| 30 | -47.7 |
| 35 | -51.1 |
| 40 | -62.8 |
| 45 | -56.5 |
| 50 | -53.7 |
| 55 | -50.2 |
| 60 | -54.3 |
| 65 | -62.9 |
| 70 | -55.9 |
| 75 | -52.4 |
| 80 | -56.9 |
| 85 | -61.7 |
| 90 | -57.5 |
| 95 | -53.6 |
| 100 | -58.4 |
| 105 | -53.4 |
| 110 | -51 |
| 115 | -55.3 |

| มุมจากการหมุน(องศา) | พลังงานที่วัดได้(dB) |
|---------------------|----------------------|
| 120 | -58.3 |
| 125 | -56.7 |
| 130 | -57.6 |
| 135 | -52.1 |
| 140 | -55 |
| 145 | -53.6 |
| 150 | -54.3 |
| 155 | -56 |
| 160 | -62.7 |
| 165 | -56.4 |
| 170 | -61.6 |
| 175 | -54.9 |
| 180 | -57.8 |
| 185 | -58.4 |
| 190 | -54.3 |
| 195 | -57.1 |
| 200 | -61.4 |
| 205 | -52.7 |
| 210 | -55.4 |
| 215 | -52.3 |
| 220 | -56.9 |
| 225 | -50.3 |
| 230 | -58.2 |
| 235 | -62.3 |
| 240 | -56.5 |
| 245 | -53.1 |
| 250 | -52.7 |
| 255 | -60.2 |

| มุมจากการหมุน(องศา) | พลังงานที่วัดได้(dB) |
|---------------------|----------------------|
| 260 | -59.1 |
| 265 | -57.8 |
| 270 | -51.4 |
| 275 | -53.8 |
| 280 | -59.3 |
| 285 | -54.6 |
| 290 | -60.1 |
| 295 | -58.6 |
| 300 | -62.2 |
| 305 | -55.4 |
| 310 | -58.9 |
| 315 | -52.7 |
| 320 | -51.3 |
| 325 | -47.2 |
| 330 | -49.4 |
| 335 | -51.4 |
| 340 | -41.5 |
| 345 | -39.7 |
| 350 | -41.5 |
| 355 | -39.2 |
| 360 | -37.4 |

นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 ไปพล็อตกราฟจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับอัตราขยาย



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับอัตราขยายในการวัดแบบ E-plane

4.4.2 วัด H-plane

ผลการวัดแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังตารางที่ 4.2

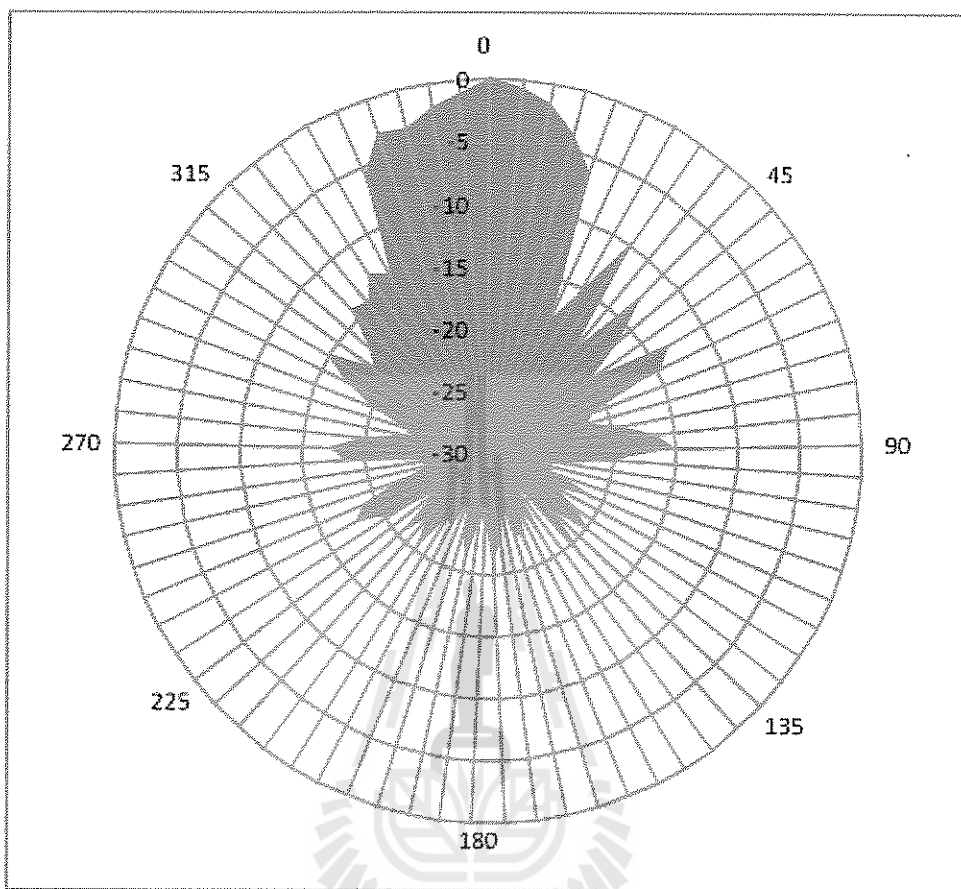
ตารางที่ 4.2 วัดแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ H-plane

| มุมจากการหมุน(องศา) | พลังงานที่วัดได้(dB) |
|---------------------|----------------------|
| 0 | -37.7 |
| 5 | -38.4 |
| 10 | -39.5 |
| 15 | -41.5 |
| 20 | -44.1 |
| 25 | -55.9 |
| 30 | -52.7 |
| 35 | -47 |
| 40 | -57.2 |
| 45 | -50.1 |
| 50 | -53.9 |
| 55 | -57.5 |
| 60 | -50.9 |
| 65 | -52.3 |
| 70 | -58.7 |
| 75 | -59.5 |
| 80 | -57.1 |
| 85 | -54.2 |
| 90 | -52.7 |
| 95 | -57.4 |
| 100 | -61.1 |
| 105 | -63.8 |
| 110 | -61.7 |
| 115 | -58.4 |

| มุมจากการหมุน(องศา) | พลังงานที่วัดได้(dB) |
|---------------------|----------------------|
| 120 | -61.7 |
| 125 | -59.5 |
| 130 | -57.4 |
| 135 | -60.6 |
| 140 | -56.2 |
| 145 | -64.5 |
| 150 | -59.6 |
| 155 | -62.3 |
| 160 | -60.2 |
| 165 | -60.5 |
| 170 | -63.1 |
| 175 | -60.4 |
| 180 | -58.7 |
| 185 | -61.7 |
| 190 | -62.4 |
| 195 | -58.6 |
| 200 | -60.7 |
| 205 | -63.1 |
| 210 | -60.8 |
| 215 | -61.2 |
| 220 | -57.9 |
| 225 | -60.3 |
| 230 | -57.8 |
| 235 | -62.4 |
| 240 | -58.5 |
| 245 | -55.4 |
| 250 | -56.7 |
| 255 | -59.7 |

| มุมจากการหมุน(องศา) | พลังงานที่วัดได้(dB) |
|---------------------|----------------------|
| 260 | -62.5 |
| 265 | -61.9 |
| 270 | -55.9 |
| 275 | -54.8 |
| 280 | -57.7 |
| 285 | -61.3 |
| 290 | -60.2 |
| 295 | -57.3 |
| 300 | -54.6 |
| 305 | -52.3 |
| 310 | -56.1 |
| 315 | -54.7 |
| 320 | -51.7 |
| 325 | -52.2 |
| 330 | -50.4 |
| 335 | -51.3 |
| 340 | -43.4 |
| 345 | -40.7 |
| 350 | -40.9 |
| 355 | -39.8 |
| 360 | -38.7 |

นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.2 ไปพล็อตกราฟจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับอัตราขยาย



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับอัตราขยายในการวัดแบบ H-plane

4.5 การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ออกแบบ

4.5.1 สนามระยะไกล (Far field)

การหาสนามระยะไกลที่ใช้ในการวัดทดสอบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Far field} = \frac{2d^2}{\lambda}$$

d คือ ความกว้างของสายอากาศปากแตร

λ คือ ความยาวคลื่น

$$\begin{aligned} \text{Far field} &= (2 \times 0.32)/0.03 \\ &= 6.83 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

4.5.2 อัตราขยาย (Grain)

การหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Gr} = \text{Pr} - \text{Pt} - \text{Gt} + \text{loss}$$

เมื่อ

Gr คือ อัตราขยายภาครับ

Gt คือ อัตราขยายภาคส่ง

Pr คือ กำลังขยายภาครับ

Pt คือ กำลังขยายภาคส่ง

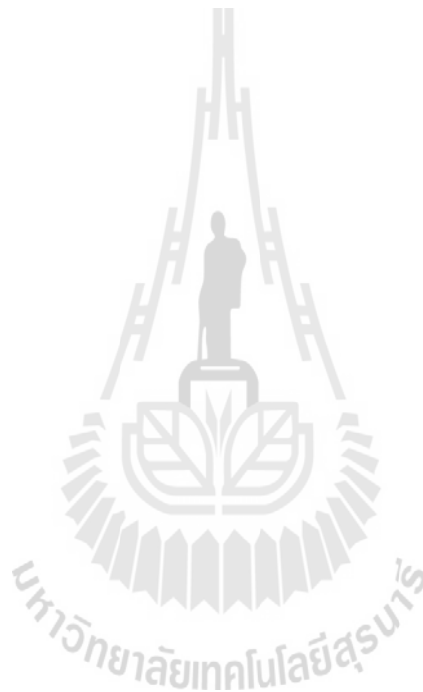
Loss คือ อัตราการสูญเสีย

แทนค่าผลการทดสอบในสมการ

$$\begin{aligned} \text{Gr} &= (-37.8 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - 16 \text{ dB} + 58.66 \text{ dB} \\ &= 14.86 \text{ dB} \end{aligned}$$

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบ สายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นมา โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 10 GHz จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่วัดแบบ E-plane และ H-plane ค่าถึงงานสูงสุดที่วัดได้ก็คือ -37.8 dB และเมื่อนำไปคำนวณอัตราขยายได้เท่ากับ 14.86 dB ซึ่งในการทำการทดสอบสนามระยะไกลที่ใช้ทำการทดสอบควรมากกว่าหรือเท่ากับ 6.83 เมตร ผลการวัดค่าที่ออกมาอาจเกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ทั้งนี้เนื่องจากห้องที่ใช้ทำการทดสอบมีความยาวไม่เพียงพอ และสภาพแวดล้อมรอบข้างขณะทำการทดสอบ แต่ผลการทดสอบที่ออกมานั้นค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ



บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการทดลอง การออกแบบแผ่นไมโครสตริป และข้อเสนอแนะในการประยุกต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

5.1 สรุปผล

ในบทนี้เป็นการสรุปผล เพื่อพิจารณาสายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นมา โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 10 GHz จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่วัดแบบ E-plane และ H-plane กำลังขยายที่วัดได้ที่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ -37.8 dB และเมื่อนำไปคำนวณอัตราขยายได้เท่ากับ 14.86 dB ซึ่งในการทำการทดสอบนั้นสนามระยะไกลที่ใช้ทำการทดสอบควรมากกว่าหรือเท่ากับ 6.83 เมตร ผลการวัดค่าที่ออกมาอาจเกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ทั้งนี้เนื่องจากห้องที่ใช้ทำการทดสอบมีความยาวไม่เพียงพอ และสภาพแวดล้อมรอบข้างขณะทำการทดสอบ แต่ผลการทดสอบที่ออกมานั้นค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. ไม่มีความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO มาก่อน จึงทำให้เสียเวลาในการศึกษาการใช้งานโปรแกรมมากพอสมควร
2. วัสดุที่ใช้ออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ยากในพื้นที่จำเป็นต้องสั่งซื้อจากที่อื่นทำให้เสียเวลาพอสมควร
3. การวัดทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) อาจมีค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมต่างๆ ขณะทำการวัด

5.3 ข้อเสนอแนะ

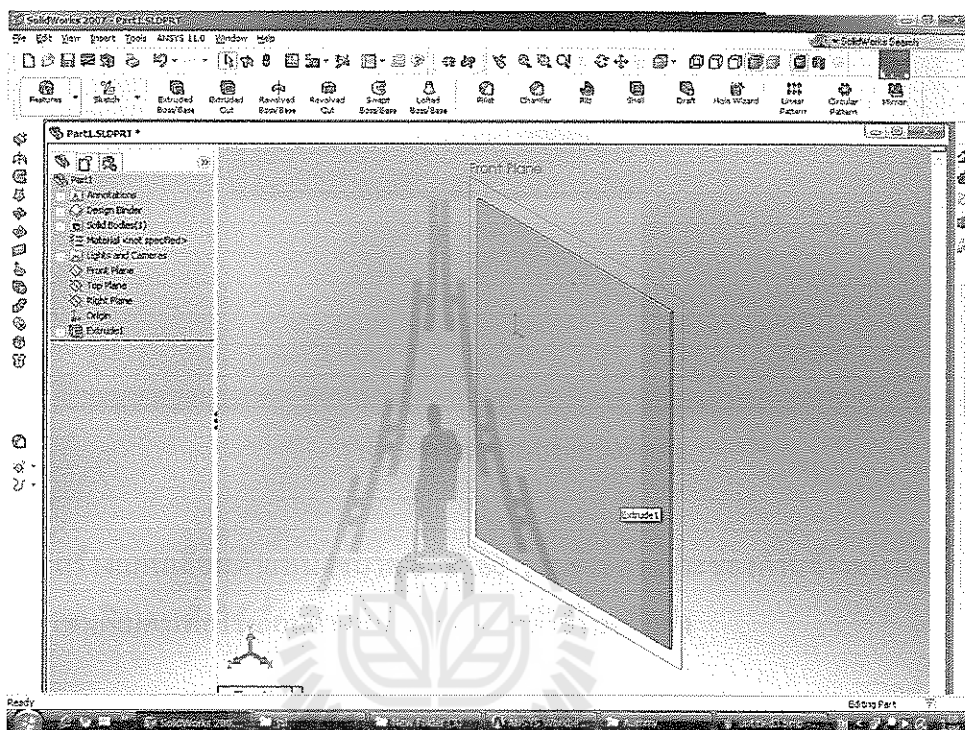
จากบทสรุปที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า เราสามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับตัวสะท้อนไมโครสตริป ที่มีลักษณะราบเรียบ น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก ติดตั้งง่าย อีกทั้งยังมีคุณลักษณะคล้ายสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา ซึ่งเหมาะสำหรับเป็นสายอากาศเพื่อใช้ในสถานีภาคพื้นดินสำหรับติดต่อกับดาวเทียม หรือการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น

ภาคผนวก



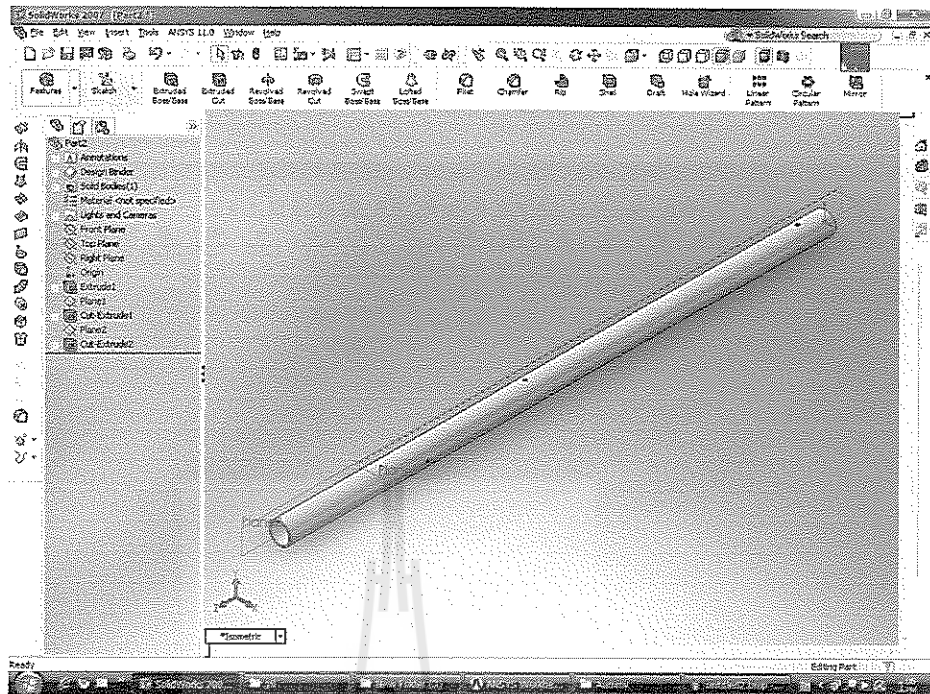
การออกแบบอุปกรณ์ติดตั้งสายอากาศโดยใช้โปรแกรม Solid work 2007

1. สร้างแผ่นตัดสายอากาศขนาด 40 x 60 เซนติเมตร เจาะรูขนาด 0.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งส่วนบนและส่วนล่างของแผ่นตัด โดยให้ห่างจากขอบบนและขอบล่าง 5 เซนติเมตร



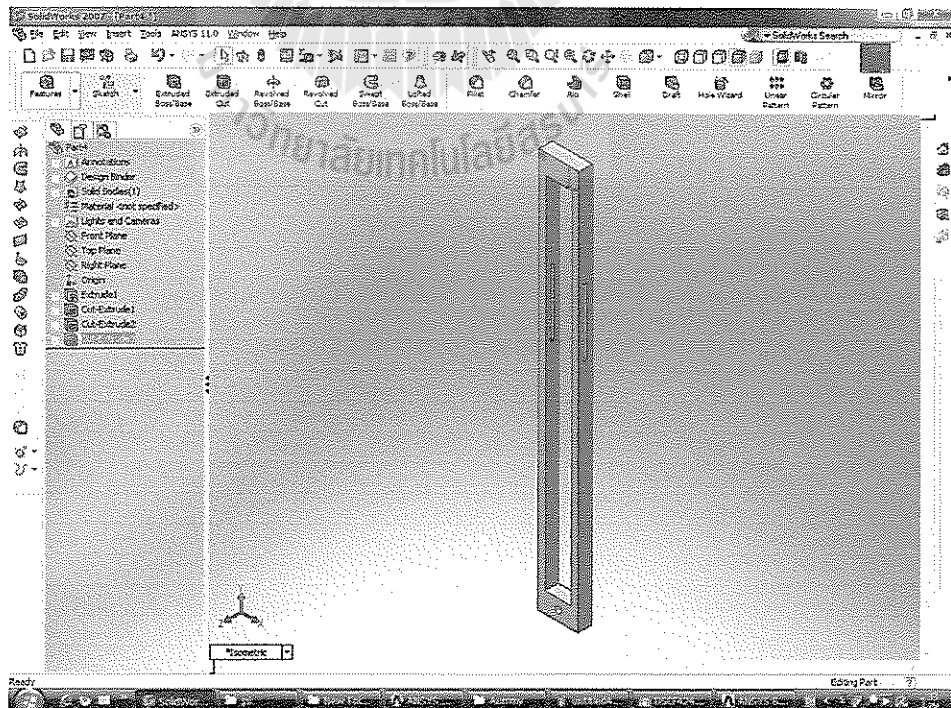
รูปที่ 1 การออกแบบแผ่นตัดตั้งสายอากาศ

2. สร้างแกนติดตั้งระหว่างแผ่นตัดสายอากาศกับฐานยึด ทรงกระบอกขนาดยาว 100 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอก 4 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขอบใน 3.5 เซนติเมตร เจาะรูขนาด 0.5 เซนติเมตรบริเวณด้านบนโดยห่างจากขอบบน 5 เซนติเมตร และเจาะรูเพิ่มอีกหนึ่งรู โดยห่างจากจุดเดิมลงมาข้างล่าง 50 เซนติเมตรเพื่อใช้ยึดติดกับแผ่นตัดตั้งสายอากาศ เจาะรูเพิ่ม โดยเลื่อนตำแหน่งลงมาห่างจากจุดที่สอง 25 เซนติเมตร เพื่อใช้ติดตั้งแกนเลื่อนตำแหน่ง



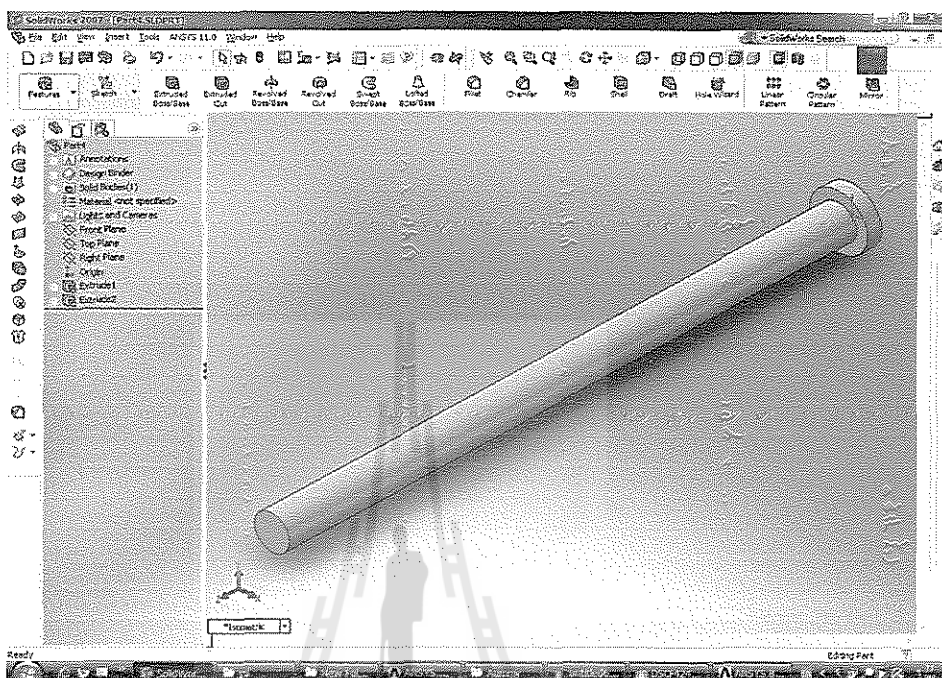
รูปที่ 2 การออกแบบแกนติดตั้ง

- สร้างแกนเลื่อนตำแหน่งขนาด 6 x 60 เซนติเมตร เจาะช่องด้านข้างขนาดยาว 10 เซนติเมตรเพื่อใช้เลื่อนตำแหน่งสายอากาศที่ไว้รับหรือส่ง



รูปที่ 3 การออกแบบแกนเลื่อนตำแหน่ง

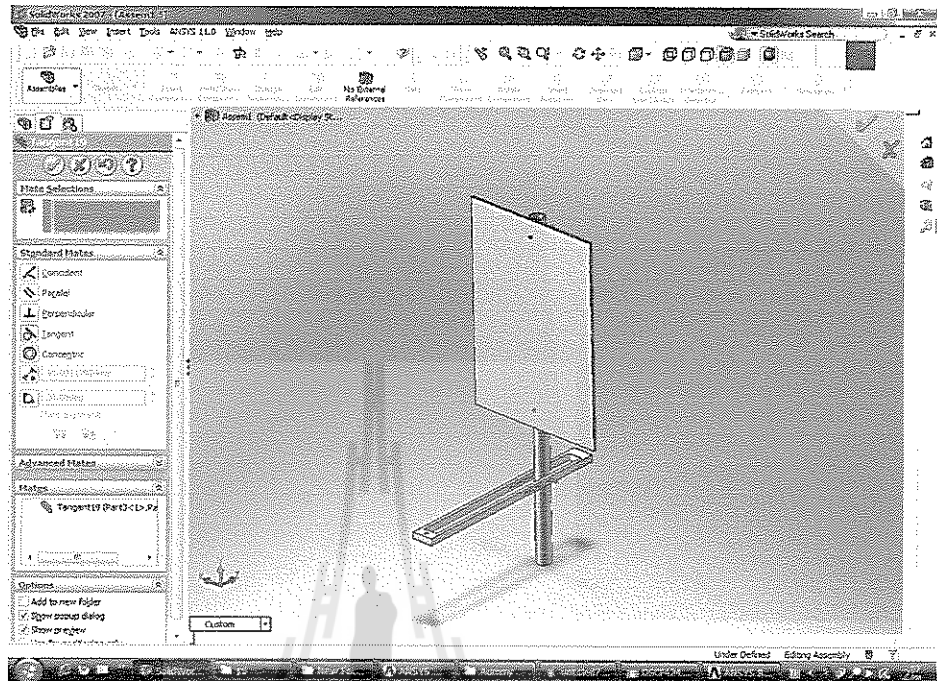
4. สร้างน็อตเพื่อใช้ยึดแผ่นติดสายอากาศ และแกนเลื่อนตำแหน่งเข้ากับแกนยึด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร



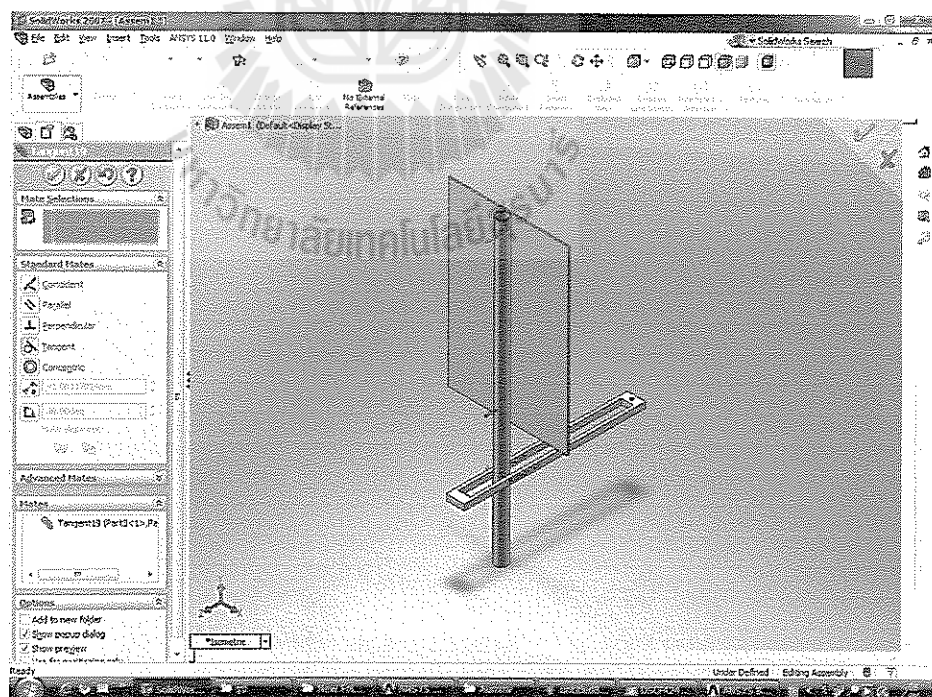
รูปที่ 4 ออกแบบน็อตยึดแผ่นติดสายอากาศและแกนเลื่อนตำแหน่งเข้ากับแกนยึด



5. นำอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบแต่ละชิ้นมาประกอบกันเพื่อนำมาทำการติดตั้งสายอากาศ

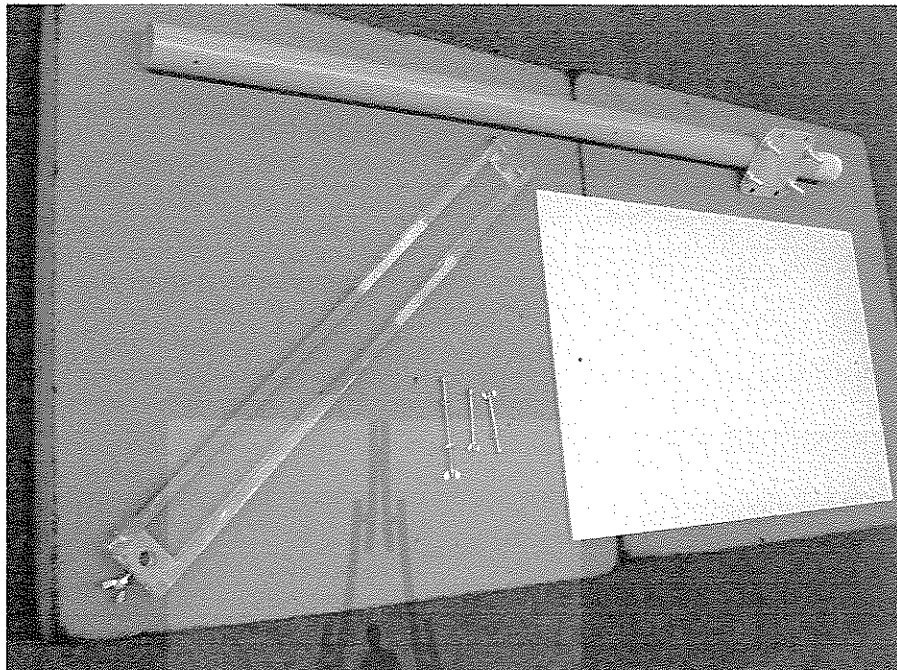


รูปที่ 5 อุปกรณ์ติดตั้งสายอากาศ (ด้านหน้า)



รูปที่ 6 อุปกรณ์ติดตั้งสายอากาศ (ด้านหลัง)

6. อุปกรณ์ที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 7 อุปกรณ์ทำขึ้นจากการออกแบบ

7. การติดตั้งอุปกรณ์ที่ได้จากการออกแบบเข้ากับฐานยึด



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์

บรรณานุกรม

- [1] ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก “สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปโดยใช้เทคนิค การกระจัดกระจายด้านหลัง” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 2550
- [2] โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO
- [3] โปรแกรม Corel Draw Graphics Suite X4
- [4] โปรแกรม SolidWorks 2007



ประวัติผู้เขียน

นายคุณุพล คำดี เกิดเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2528 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลเวียงเหนือ อำเภอเมืองลำปาง จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนแม่ใจวิทยาคม อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา เมื่อปี พ.ศ. 2547 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 6 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นายอภิรัฐ สุภานุกุลสมัย เกิดเมื่อวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2529 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2547 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 6 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

