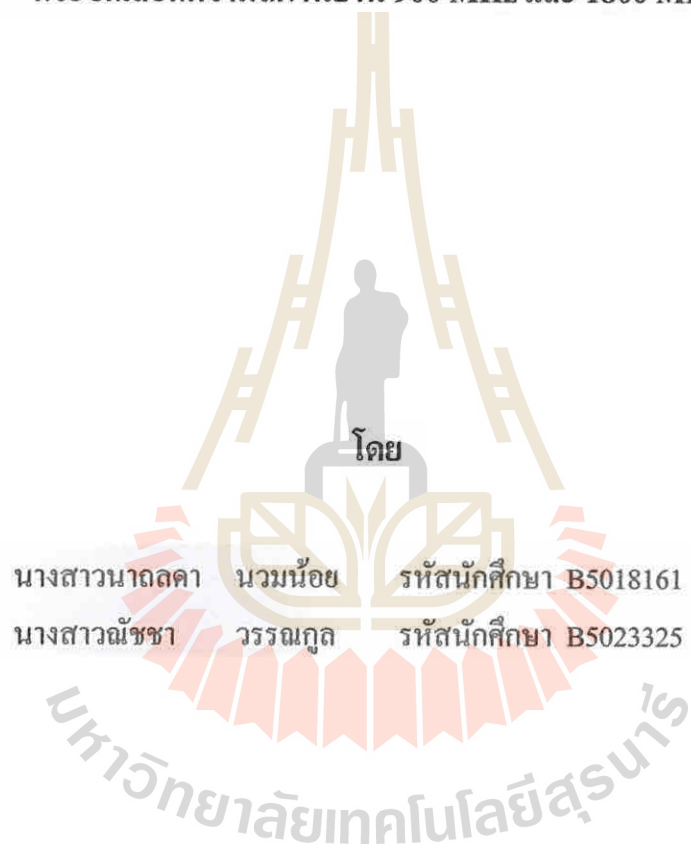




กระจกเลือกความถี่ผ่านย่าน 900 MHz และ 1800 MHz



นางสาวนาถดา นวมน้อย รหัสนักศึกษา B5018161
นางสาวณัชชา วรรณกุล รหัสนักศึกษา B5023325

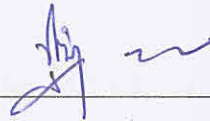
รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2553

กระจกเลือกคลื่นความถี่ผ่านย่าน 900 MHz และ 1800 MHz

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ กระจอกคนอก)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก)
กรรมการ



(อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2553

โครงการ	กระจกเลือกคลื่นความถี่ผ่านย่าน 900 MHz และ 1800 MHz
โดย	1. นางสาวนาถดา นวมน้อย รหัส B5018161 2. นางสาวณัชชา วรรณกุล รหัส B5023325
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ กระจงนอก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	3/2553

บทคัดย่อ

ความถี่ย่าน 900 MHz และ 1800 MHz เป็นความถี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งการสื่อสารนี้ใช้ในสถานที่ต่างๆ มากมาย เช่น ห้างสรรพสินค้า อาคารบริษัท บ้านเรือน และสถานที่ท่องเที่ยวต่างๆ เป็นต้น ซึ่งตามสถานที่เหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็ก เป็นต้น ในปัจจุบันตึกอาคาร บ้านเรือนได้มีการนำกระจกมาเป็นส่วนประกอบหลักมากขึ้น เพื่อลดการใช้ไฟฟ้าภายในตัวอาคาร ลดอุณหภูมิจากแสงแดด ซึ่งกระจกส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ จะเป็นกระจกติดฟิล์ม หรือกระจกกรองแสง ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีผลกระทบต่อการเดินทางของคลื่น และราคาสูง จึงได้มีการออกแบบกระจกเลือกความถี่ผ่าน สำหรับปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ซึ่งเลือกความถี่ผ่าน 900 MHz – 1800 MHz ให้ผ่านเข้าไปได้ ซึ่งงานนี้จะช่วยให้การสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ติดต่อกันได้อย่างสะดวกมากขึ้น และวัสดุที่ใช้สามารถหาได้ง่าย และราคาถูก โครงการนี้นำเสนอการออกแบบกระจกเลือกความถี่ เพื่อปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ในย่านความถี่ 900 MHz – 1800 MHz

กิตติกรรมประกาศ

จากการจัดทำโครงการเรื่องกระจกเลือกคลื่นผ่าน ความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz ส่งผลให้คณะผู้จัดทำได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆมากมาย โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ และบุคคลหลายท่านที่คอยช่วยเหลือและคอยให้คำปรึกษารวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ กระจงคนอก (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ) อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และแนะนำในทุกๆ ด้าน รวมถึงการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงานและแนะแนวทางในการเขียนรายงาน ให้แก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด

ที่นักศึกษาบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ รวมถึงการสอนการใช้งานโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้น และการวัดผลการทดลองของชิ้นงาน

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

นางสาวนาถลดา นวมน้อย
นางสาวณัษชา วรรณกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาร

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการทำงาน	2
1.5 เนื้อหาเสนอในโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 โทรศัพท์เคลื่อนที่	3
2.3 คลื่นระนาบ	8
2.4 การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก	15
2.5 บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.6 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน	22
2.7 สรุป	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบกระจกเลือกความถี่ผ่าน โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	
3.1 กล่าวนำ	29
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบกระจกเลือกความถี่ผ่าน	29
3.3 วิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ	29
3.4 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	33
3.5 ผลการจำลองแบบ	35
3.6 การออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างจริง	42
3.7 กล่าวสรุป	43
บทที่ 4 การทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผล	
4.1 กล่าวนำ	44
4.2 กระจกเลือกความถี่ผ่านต้นแบบ	44
4.3 ผลการวัดทดสอบ	53
4.4 การเปรียบเทียบผลวัดจากสายอากาศที่สร้างจริง และผลวัดจากการจำลองผล	65
4.5 สรุป	66
บทที่ 5 บทสรุปของโครงการ	
5.1 บทสรุป	67
5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข	67
5.3 ข้อเสนอแนะ	69
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	69
ประวัติผู้เขียน	70
บรรณานุกรม	71

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องหมายการค้าบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)	5
รูปที่ 2.2 เครื่องหมายการค้าบริษัท ทูมูฟ จำกัด	5
รูปที่ 2.3 เครื่องหมายการค้าบริษัท โทเทิล แอ็คเซ็ส คอมมูนิเคชั่น จำกัด (มหาชน)	6
รูปที่ 2.4 เครื่องหมายการค้าบริษัท ฮัทซันด์ ซีเอที ไวร์เลส จำกัด	6
รูปที่ 2.5 เครื่องหมายการค้ากิจการร่วมค้าไทยโมบาย	7
รูปที่ 2.6 คลื่นที่เดินทางในทิศทาง +z ตามสมการ (6)	9
รูปที่ 2.7 คลื่นระนาบตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก	15
รูปที่ 2.8 คลื่นนิ่งของ $E=a_x E_1$ และ $H_1=a_y H_1$	18
รูปที่ 2.9 คลื่นระนาบตกกระทบไดอิเล็กทริกแบบตั้งฉาก	19
รูปที่ 2.10 แสดงชนิดของการตอบสนองความถี่แบบต่างๆและผลของการตอบสนองแต่ละชนิดโดยพื้นสีเทาหมายถึงพื้นผิวของโลหะ	24
รูปที่ 2.11 ลักษณะและรูปร่างของ elements	25
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS	26
รูปที่ 2.13 ประเภทของ FSS	27
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ FSS	27
รูปที่ 3.1 การตั้งค่า Boundary Condition	33

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 การตั้งค่า port 1	34
รูปที่ 3.3 การตั้งค่า port 2	34
รูปที่ 3.4 วิธีการจำลองผลแบบ T Solver	35
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ออกแบบโดยค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ	35
รูปที่ 3.6 พารามิเตอร์ของชิ้นงานต้นแบบ	36
รูปที่ 3.7 ค่า r_{21} จากการวัดจำลองผลชิ้นงาน	36
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 44 \text{ mm}$	37
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 50 \text{ mm}$	37
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 55 \text{ mm}$	38
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 59 \text{ mm}$	38
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ l_2	39
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 85 \text{ mm}$	40
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_1 = 3 \text{ mm}$	40
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_1 = 2.5 \text{ mm}$	41
รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบการปรับค่า w_1	41

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.17 การจำลองชิ้นงานแบบ 5 x 5	42
รูปที่ 3.18 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5 x 5	42
รูปที่ 4.1 scale ของกระจกเลือกความถี่ผ่านต้นแบบ	45
รูปที่ 4.2 ชิ้นงานต้นแบบ	46
รูปที่ 4.3 สายอากาศไดโพล	46
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่รังสีของความถี่ 900 MHz บนระนาบสนามไฟฟ้า	47
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่รังสีของความถี่ 1800 MHz บนระนาบสนามไฟฟ้า	48
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่รังสีของความถี่ 900 MHz บนระนาบสนามแม่เหล็ก	49
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่รังสีของความถี่ 1800 MHz บนระนาบสนามแม่เหล็ก	50
รูปที่ 4.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	51
รูปที่ 4.9 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล	53
รูปที่ 4.10 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ของสายอากาศไดโพล 2 ตัว	54
รูปที่ 4.11 การติดตั้งการวัดผลผ่านอากาศว่าง	55
รูปที่ 4.12 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านอากาศว่าง	55
รูปที่ 4.13 การติดตั้งการวัดผลผ่านกระจกใส	56
รูปที่ 4.14 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านกระจกใส	56

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 การติดตั้งการวัดผลผ่านกระจกกรองแสง	57
รูปที่ 4.16 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านกระจกกรองแสง	57
รูปที่ 4.17 การติดตั้งการวัดผลกระจกเลือกความถี่ผ่าน	58
รูปที่ 4.18 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ของกระจกเลือกความถี่ผ่าน	58
รูปที่ 4.19 การติดตั้งการวัดผลผ่านแผ่น โลหะ	59
รูปที่ 4.20 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านแผ่น โลหะ	59
รูปที่ 4.21 ผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านอากาศว่าง	60
รูปที่ 4.22 ผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านกระจกใส	61
รูปที่ 4.23 ผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านกระจกกรองแสง	62
รูปที่ 4.24 ผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านกระจกเลือกความถี่ผ่าน	63
รูปที่ 4.25 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านแผ่น โลหะ	64

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงคลาสต่างๆ ของ โทรศัพท์เคลื่อนที่

4

ตารางที่ 4.1 แสดงscale ของกระเลือกความถี่ผ่านต้นไม้แบบ

44

ตารางที่ 4.2 ผลการบันทึกการส่งผ่านคลื่นผ่านวัสดุต่างๆ

65

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

68



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

โทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันมีการใช้ในสถานที่ต่างๆ มากมาย เช่น ห้างสรรพสินค้า อาคาร บริษัท บ้านเรือน และสถานที่ท่องเที่ยวต่างๆ เป็นต้น ในแต่ละสถานที่นั้นจะพบปัญหาที่เหมือนกันคือ สัญญาณมีการขัดข้อง โดยเฉพาะภายในสถานที่ที่เป็นตึก อาคาร บ้านเรือน นั้นจะพบปัญหานี้มากเนื่องจากโครงสร้างทำมาจากผนังคอนกรีตที่มีความหนา และบางสถานที่ยังติดกระจกกรองแสง ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้มีผลทำให้สัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการลดทอนลงจนทำให้สัญญาณขาดหายไป

จากปัญหาที่พบดังกล่าว โครงการนี้จึงออกแบบกระจกเลือกคลื่นผ่านสำหรับปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ซึ่งเลือกความถี่ย่าน 900 MHz และ 1800 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ให้ผ่านเข้าไปในอาคารได้ ทำให้สัญญาณของโทรศัพท์ใช้ได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะ สัมประสิทธิ์การส่งคลื่นผ่านวัสดุต่างๆ เช่น กระจก แผ่น โลหะ
2. เพื่อพัฒนากระจกเลือกความถี่ผ่าน สำหรับปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาและพัฒนากระจกเลือกความถี่ผ่าน สำหรับปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ที่ความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz
2. ออกแบบกระจกเลือกความถี่ผ่านย่าน 900 MHz และ 1800 MHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwaves Studio 2009
3. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบ
4. วัดทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการการส่งผ่านคลื่น
2. เสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
3. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม CST Microwaves Studio 2009
4. นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า มาพัฒนาออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ
5. นำผลที่ได้จากการออกแบบมาลงมือปฏิบัติเป็นชิ้นงาน และวัดทดสอบ
6. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน และนำเสนอโครงการ

1.5 เนื้อหาที่เสนอในโครงการ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบวงจรเลือกความถี่ผ่าน เพื่อปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ที่ย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz สำหรับการออกแบบจะใช้โปรแกรม CST Microwaves Studio 2009 ในการจำลองผล แล้วสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ และวัดทดสอบผลต่อไป ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับโครงการ บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรเลือกความถี่ผ่านความถี่ย่าน 900 MHz และ 1800 MHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwaves Studio 2009 บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบชิ้นงานวงจรเลือกความถี่ผ่าน และบทที่ 5 เป็นการสรุปผลทั้งหมดที่ได้โครงการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

โครงการกระจกเลือกคลื่นผ่านย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระนาบคลื่น (plane wave) หลักการเบื้องต้นของการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลาง และการออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ หรือ FSS (Frequency Selective Structure) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วน ได้แก่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ คลื่นระนาบ การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน

2.2 โทรศัพท์เคลื่อนที่

โทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile phone) เป็นอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะเดียวกับโทรศัพท์บ้านแต่ไม่ต้องการสายโทรศัพท์ จึงทำให้สามารถพกพาไปในที่ต่างๆ ได้ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ใช้คลื่นวิทยุในการติดต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยผ่านสถานีฐาน โดยเครือข่ายของโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละผู้ให้บริการจะเชื่อมต่อกับเครือข่ายของโทรศัพท์บ้านและเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ให้บริการอื่น ๆ โทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันนอกจากจะมีคุณสมบัติในการสื่อสารทางเสียงแล้ว ยังมีความสามารถอื่นอีก เช่น สนับสนุนการสื่อสารด้วยข้อความ เช่น SMS การเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต การสื่อสารแบบมัลติมีเดีย เช่น MMS นาฬิกา นาฬิกาปลุก นาฬิกาจับเวลา ปฏิทิน ตารางนัดหมาย สปรดชีต โปรแกรมประมวลผล รวมไปถึงความสามารถในการรองรับแอปพลิเคชันของจาวาได้

2.2.1 หลักการทำงานของโทรศัพท์เคลื่อนที่

เนื่องจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเกือบทั้งหมดเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ทดแทนระบบอนาล็อกแบบเดิม โดยโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิทัลใช้เทคนิค TDMA (Time Division Multiple Access) ที่คลื่นพาหะแต่ละความถี่ถูกแบ่งเป็นช่อง (timeslot) แต่ละช่องจะใช้ช่องสัญญาณในการส่งสัญญาณ และข้อมูลในการติดต่อที่แบ่งเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า burst แต่ละ burst บนช่องจะส่งสัญญาณคนละช่วงเวลา โดยมีการเปลี่ยนสัญญาณเสียงจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และการเข้ารหัส จะแปลงสัญญาณที่เรียกว่า PCM (Pulse Code Modulation) แล้วทำการแซมปลิงสัญญาณ และแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นระบบเลขฐานสอง 8 บิต รวมถึงมีกระบวนการในการตรวจสอบรหัสที่ส่งและรับสัญญาณ และลดอัตราการส่งข้อมูลโดยหลักการเข้ารหัสเสียงพูดไปยังผู้ติดต่อในระบบ

การแบ่งคลาสการทำงาน

ความสามารถในการส่งข้อมูลของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ได้ทำการแบ่งเป็นคลาส ซึ่งมีทั้งหมด 3 คลาส ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคลาสต่างๆ ของโทรศัพท์เคลื่อนที่

คลาส	กำลังงานสูงสุด		
	GSM 900	GSM 1800	GSM 1900
1	20 วัตต์ (ขกเล็ก)	1 วัตต์	1 วัตต์
2	8 วัตต์	0.25 วัตต์	0.25 วัตต์
3	5 วัตต์	4 วัตต์	2 วัตต์
4	2 วัตต์	-	-
5	0.8 วัตต์	-	-

จากตารางที่ 2.1 เป็นการแสดงคลาสต่างๆของโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยโครงการนี้ได้ใช้แบบจำลองของโทรศัพท์เคลื่อนที่คลาสที่ 3 ระบบ GSM 1800 กำลังงานสูงสุด 4 วัตต์

2.2.2 ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศไทย

ระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่มีรูปแบบการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นชนิดอนาล็อกมาสู่ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นชนิดดิจิทัล ซึ่งในปัจจุบันผู้ให้บริการในประเทศไทยมีการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งสองระบบ โดยจำนวนผู้ใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิทัลนั้นมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่สัดส่วนผู้ใช้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดอนาล็อกมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง

ภาพรวมของตลาดโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศนับถึงปัจจุบัน ซึ่งประเทศไทยถือได้ว่าเป็นประเทศที่มีความหลากหลายในแง่ของเทคโนโลยีเครือข่ายให้ผู้บริโภคได้เลือกใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ผู้ประกอบการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศไทยเองก็มีอยู่หลายราย แต่ละรายมีความแข็งแกร่งและส่วนแบ่งทางการตลาด (market share) ที่แตกต่างกัน หากจะกล่าวสรุปอย่างรวบรัดถึงรายละเอียดของบริษัทผู้ให้บริการเครือข่ายที่มีอยู่ทั้งหมดรวมถึงเทคโนโลยีเครือข่าย และเครื่องหมายการค้าก็สามารถสรุปได้ดังนี้

1. บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 2.1 เครื่องหมายการค้าบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)

บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) หรือ AIS ซึ่งมีเครื่องหมายการค้าดังรูปที่ 2.1 มีบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ระบบความถี่ 900 MHz ซึ่งแบ่งออกเป็นแบบชำระค่าบริการต่อเดือน (postpaid) ภายใต้เครื่องหมายการค้า GSM Advance กับแบบโทรศัพท์พร้อมใช้ (prepaid) ภายใต้เครื่องหมายการค้า One-2-Call และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีแต่แบบชำระค่าบริการต่อเดือนภายใต้เครื่องหมายการค้า GSM1800 นอกจากนี้ AIS ยังเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูล โดยมีการเปิดให้บริการ GPRS ในกรุงเทพมหานครและเมืองใหญ่ๆ, บริการ MMS (Multimedia Messaging Service) และบริการ TV on mobile เป็นการต่อยอดขึ้นความเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ AIS ยังมีการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบอนาล็อกระบบ NMT ความถี่ 900 MHz ภายใต้เครื่องหมายการค้า cellular 900 แต่ปัจจุบัน บริษัทฯ มีนโยบายลดจำนวนผู้ใช้บริการในกลุ่มนี้ลง โดยส่งเสริมให้มีการโอนเลขหมายไปเป็นลูกค้าโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM ของตนเองแทน

2. บริษัท ทรูมูฟ จำกัด



รูปที่ 2.2 เครื่องหมายการค้าบริษัท ทรูมูฟ จำกัด

บริษัท ทรูมูฟ จำกัด หรือ Truemove ซึ่งมีเครื่องหมายการค้าดังรูปที่ 2.2 ถือเป็นบริษัทน้องใหม่ไฟแรง ที่สร้างฐานผู้ใช้บริการได้อย่างรวดเร็ว ทรูมูฟ ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ GSM ความถี่ 1800 MHz เช่นเดียวกับ DTAC เพียงแต่ใช้ย่านความถี่ต่างช่วงกัน มีบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งแบบชำระค่าบริการต่อเดือนและแบบโทรศัพท์เคลื่อนที่พร้อมใช้ ภายใต้ชื่อเครื่องหมายการค้า “just talk” ปัจจุบัน ทรูมูฟยังไม่มีพื้นที่ให้บริการครอบคลุมทั่วประเทศไทย แต่

กำลังอยู่ระหว่างการเร่งขยายเครือข่ายเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานเทียบเท่ากับ AIS และ DTAC ในระหว่างนี้ผู้ใช้บริการของค่าย ทรูมูฟจึงอาจไม่สามารถใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ในบางพื้นที่ที่ยังไม่มีการติดตั้งเครือข่ายสถานีฐาน

3. บริษัท โทเทิล แอ็คเซ็ส คอมมูนิเคชั่น จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 2.3 เครื่องหมายการค้าบริษัท โทเทิล แอ็คเซ็ส คอมมูนิเคชั่น จำกัด (มหาชน)

บริษัท โทเทิล แอ็คเซ็ส คอมมูนิเคชั่น จำกัด (มหาชน) หรือ DTAC ซึ่งมีเครื่องหมายการค้ารูปที่ 2.3 เปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM ความถี่ 1800 MHz ซึ่งแบ่งเป็นแบบชำระค่า บริการต่อเดือนภายใต้เครื่องหมายการค้า DTAC ร่วมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบพร้อมใช้ภายใต้เครื่องหมายการค้า Dprompt สำหรับ DTAC นั้น ได้ชื่อว่าเป็นผู้นำทางการตลาดเป็นอันดับที่สองรองจาก AIS มาโดยตลอด ปัจจุบัน DTAC ก็มีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ ไม่ว่าจะเป็น GPRS หรือ MMS มาเปิดให้บริการ ทัดเทียมกับค่าย AIS แต่อาจมีการประชาสัมพันธ์ที่แผ่วเบากว่าคู่แข่งชั้นของตนมาก

DTAC มีบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบอนาล็อกเช่นเดียวกัน เป็นระบบ AMPS (Advanced Mobile Phone Service) ความถี่ 800 MHz ซึ่งนโยบายในการเปลี่ยนถ่ายผู้ใช้บริการให้ไปใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ของ DTAC ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกรณีระบบ NMT 900 ของค่าย AIS

4. บริษัท ฮัทชิสัน ซีเอที ไวร์เลส จำกัด



รูปที่ 2.4 เครื่องหมายการค้าบริษัท ฮัทชิสัน ซีเอที ไวร์เลส จำกัด

บริษัท ฮัทชิสัน ซีเอที ไวร์เลส จำกัด หรือ HUTCH ซึ่งมีเครื่องหมายการค้ารูปที่ 2.4 เป็นน้องใหม่ล่าสุดที่เพิ่งเปิดให้บริการเมื่อปลายเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2546 ที่ผ่านมา ภายใต้ชื่อ

เครื่องหมายการค้า HUTCH โดยใช้เทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ความถี่ 800 MHz จุดมุ่งหมายหลักในการเปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ของ HUTCH ก็คือ การให้บริการสื่อสารข้อมูลผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งมีคุณภาพและประสิทธิภาพในการใช้งาน เหนือกว่าการสื่อสารข้อมูลผ่านเทคโนโลยี GPRS ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในตระกูล GSM สำหรับการให้บริการสนทนาเสียงนั้นก็มีคุณภาพที่ไม่แตกต่างไปจากระบบ GSM แต่อย่างใด ข้อจำกัดในการให้บริการของ HUTCH ก็คือการได้รับสัมปทานในการเปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ในพื้นที่เพียง 23 จังหวัดเท่านั้น (รวมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล) ทำให้เกิดข้อจำกัดหลาย ๆ ประการในการแข่งขัน เมื่อเทียบกับคู่แข่งรายอื่นที่ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่สัมปทานให้บริการแต่ประการใด

5. กิจการร่วมค้าไทยโมบาย หรือ THAIMOBILE



รูปที่ 2.5 เครื่องหมายการค้ากิจการร่วมค้าไทยโมบาย

กิจการร่วมค้าไทยโมบาย หรือ THAIMOBILE ซึ่งมีเครื่องหมายการค้าดังรูปที่ 2.5 เกิดขึ้นภายใต้กรอบความร่วมมือระหว่าง บริษัท ทศท คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) กับ การสื่อสารแห่งประเทศไทย ไทยโมบายเพิ่งเปิดให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ความถี่ 1900 MHz เมื่อช่วงปลายปี พ.ศ. 2545 ที่ผ่านมา ไทยโมบายมีเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เฉพาะในเขตกรุงเทพมหานคร โดยสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระยะเริ่มต้นได้ 300,000 เลขหมาย สำหรับการนำเครื่องลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งต้องเป็นแบบ triple band หรือรองรับการใช้งานทั้งคลื่นความถี่ 900, 1800 และ 1900 MHz ไปใช้งานยังต่างจังหวัดนั้น สามารถกระทำได้ โดยไทยโมบายมีการทำสัญญาใช้งานข้ามเครือข่าย หรือ domestic doaming กับค่าย AIS

2.3 คลื่นระนาบ (plane wave)

2.3.1 คลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

จากสมการของเฮล์มโฮลทซ์ในตัวกลางเอกพันธ์ดังนี้

$$\nabla^2 E + k_0^2 E = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ k_0 คือ เลขคลื่นในอากาศว่าง (free-space wavenumber) ที่มีค่าเท่ากับ

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c} \quad (2.2)$$

ในระบบพิกัดฉากสมการ (2.1) คือสมการของเฮล์มโฮลทซ์ที่มีองค์ประกอบของ E_x , E_y และ E_z เพื่อความง่ายในการพิจารณาในข้างต้น สมมติให้เหลือเพียงองค์ประกอบในแนวแกน x เท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.1) เขียนได้ว่า

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) E_x = 0 \quad (2.3)$$

ถ้าพิจารณา E_x ที่มีการเดินทางไปในแนวแกน z แล้ว

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = 0$$

ดังนั้นสมการ (2.3) จะลดรูปเหลือแค่เพียง

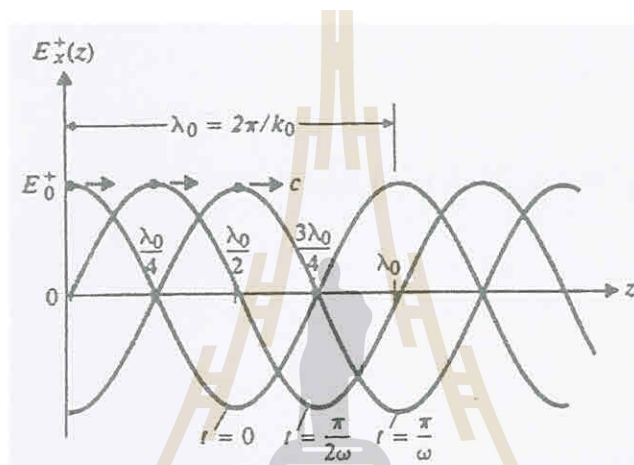
$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + k_0^2 E_x = 0 \quad (2.4)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) เนื่องจาก E_x ขึ้นเป็นตัวแปร z เพียงอย่างเดียว และทำให้คำตอบของสมการคลื่นใน (2.4) มีค่าดังนี้

$$E_x(z) = E_x^+(z) + E_x^-(z) = E_0^+ e^{-jk_0 z} + E_0^- e^{jk_0 z} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_0^+ และ E_0^- คือค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะอธิบายละเอียดในภายหลัง ในขั้นแรกเราจะพิจารณาเฉพาะเฟสเซอร์เทอมแรกของคำตอบในสมการ (2.5) ในรูปแบบของเวลาจริง (real time) โดยใช้ $\cos \omega t$ เป็นตัวอ้างอิง เมื่อกำหนดให้ E_0^+ เป็นค่าคงที่ที่มีค่าเป็นค่าจริง ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$E_x^+(z, t) = \text{Re}[E_x^+(z)e^{j\omega t}] = \text{Re}[E_0^+ e^{j(\omega t - k_0 z)}] = E_0^+ \cos(\omega t + k_0 z) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.6 คลื่นที่เดินทางในทิศทาง $+z$ ตามสมการ (2.6)

สมการ (2.6) สามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 1 เทียบกับเวลา t จากรูปจะเห็นได้ว่าที่เวลา $t = 0$, $E_x^+(z, 0) = E_0^+ \cos k_0 z$ คือ โค้งของโคไซน์ที่มีขนาดเท่ากับ E_0^+ และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ คลื่นก็เดินทางไปในทิศทาง $+z$ ซึ่งเราเรียกคลื่นในลักษณะนี้ว่า คลื่นจร (traveling wave) ถ้าเรา กำหนดจุดสนใจไว้ที่ใดที่หนึ่งบนคลื่นลูกนี้และเคลื่อนที่ไปพร้อมกับคลื่น เราจะสามารถหา ความเร็วของคลื่นนี้ ดังนี้

$$\omega t - k_0 z = \text{constant phase}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad u_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k_0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \quad (2.7)$$

สมการ (2.7) แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นที่ตำแหน่งเฟสใดๆ (phase velocity) ในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับความเร็วแสงที่มีค่าประมาณ 3×10^8 (m/s)

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\pi}{\lambda_0} \quad (\text{rad/m}) \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0} \quad (\text{m}) \quad (2.9)$$

เมื่อกลับไปพิจารณาสมการ (2.5) ในเฟสเทอมที่สองที่ว่า $E_0^+ e^{jk_0 z}$ โดยไม่ต้องพล็อตกราฟก็พอจะทราบได้ว่าเทอมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง $-z$ ด้วยความเร็ว c ซึ่งถ้าสนใจแต่คลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง $+z$ เท่านั้น $E_0^- = 0$ อย่างไรก็ตามถ้าเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในตัวกลาง (หรือเกิดการสะท้อน) คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับ เมื่อนั้นคลื่นที่เดินทางไปสวนทาง (ในทิศทาง $-z$) จะต้องถูกพิจารณา ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

การหา \bar{H} ทำได้ดังนี้

$$\nabla \times \bar{E} = \begin{vmatrix} \bar{a}_x & \bar{a}_y & \bar{a}_z \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x^+(z) & 0 & 0 \end{vmatrix} = -j\omega\mu_0 (\bar{a}_x H_x^+ + \bar{a}_y H_y^+ + \bar{a}_z H_z^+)$$

ซึ่งทำให้

$$H_x^+ = 0 \quad (2.10ก)$$

$$H_y^+ = \frac{1}{-j\omega\mu_0} \frac{\partial E_x^+(z)}{\partial z} \quad (2.10ข)$$

$$H_z^+ = 0 \quad (2.10ค)$$

ดังนั้น H_y^+ เป็นองค์ประกอบเดียวที่เหลืออยู่และเนื่องจาก

$$\frac{\partial E_x^+(z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (E_0^+ e^{-jk_0 z}) = -jk_0 E_x^+(z)$$

และจาก (2.10) จะได้ว่า

$$H_x^+(z) = \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_x^+(z) = \frac{1}{\eta_0} E_x^+(z) \quad (\text{A/m}) \quad (2.11)$$

เมื่อ η_0 นิยามจาก
$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 120\pi \cong 377 \quad (\Omega) \quad (2.12)$$

ซึ่งมีชื่อว่า อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ของอวกาศว่าง เนื่องจาก η_0 เป็นค่าจริง ดังนั้น H_y^+ จะมีเฟสเท่ากับ (in phase) กับ E_x^+ ดังนั้นเราสามารถเขียน \bar{H} ในรูปแบบ ณ ขณะหนึ่ง (instantaneous form) ได้ดังนี้

$$\bar{H}(z,t) = \bar{a}_y H_y^+(z,t) = \bar{a}_y \operatorname{Re}[H_y^+(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_y \frac{E_0^+}{\eta_0} \cos(\omega t - k_0 z) \quad (2.13)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ \bar{E} และ \bar{H} คือ อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง และยังทราบอีกว่า \bar{H} ตั้งฉากกับ \bar{E} และทั้งคู่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางด้วยเช่นกัน

2.3.2 คลื่นระนาบในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เราสามารถเขียนสมการของเฮล์มโฮลทซ์ได้ดังนี้

$$\nabla^2 E = k_c^2 E = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อ $k_c = \omega\sqrt{\mu\epsilon_c}$ เป็นค่าเชิงซ้อน (complex number) จะนิยามค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (propagation constant, γ) ดังนี้

$$\gamma = jk_c = j\omega\sqrt{\mu\epsilon_c} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2.15)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า γ เป็นค่าเชิงซ้อน จาก $\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$ เมื่อแทนลงไปในสมการ (2.15) จะได้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^{1/2} \quad (2.16)$$

หรือเขียนอีกอย่างหนึ่งได้ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^{1/2} \quad (2.17)$$

เมื่อ α และ β เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ γ ถ้าในกรณีของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\sigma = 0 (\epsilon'' = 0, \epsilon = \epsilon')$ ซึ่งทำให้ $\alpha = 0$ และ $\beta = k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ ดังนั้นสมการของเฮล์มโฮลทซ์สมการ (2.14) จะเปลี่ยนเป็น

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (2.18)$$

คำตอบของ (2.18) ก็คือ คลื่นระนาบที่เดินทางไปในทิศทาง $+z$ ซึ่งได้แก่

$$E = \bar{a}_x E_x = \bar{a}_x E_0 e^{-\gamma z} \quad (2.19)$$

เมื่อสมมติให้คลื่นระนาบนี้มีขั้วเป็นแบบเชิงเส้นในทิศทาง x ซึ่งพารามิเตอร์ของการแพร่กระจายคลื่น (propagation factor $e^{-\gamma z}$) ประกอบด้วยสองพารามิเตอร์ดังนี้

$$\bar{E}_x = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (2.20)$$

จะเห็นได้ว่าทั้งค่า α และ β เป็นค่าจริงที่มีค่าบวก ซึ่งพารามิเตอร์แรก ($e^{-\alpha z}$) จะมีค่าลดลงเมื่อ z เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกชื่อว่า ค่าคงที่การลดทอน (attenuation constant : α) มีหน่วยเป็น (Np/m) ส่วนพารามิเตอร์ที่สองในสมการ (2.20) คือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับเฟสของคลื่นที่เรียกว่า ค่าคงที่เฟส (phase constant) มีหน่วยเป็น (rad/m) ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเฟสของคลื่นเมื่อเดินทางในระยะทาง 1 เมตร ต่อไปคือคุณสมบัติของตัวกลางชนิดต่างๆ มีดังนี้

1) ไดอิเล็กทริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ

ตัวกลางที่เป็น ไดอิเล็กทริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ (low-loss dielectric) มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (insulator) ที่ดีแต่ไม่สมบูรณ์ 100% เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) ไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในตัวกลางชนิดนี้จะมีค่า $\epsilon'' \ll \epsilon'$ หรือ $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ ในสภาวะดังกล่าวค่า γ จะถูกประมาณได้ด้วยการกระจายไบนอมิเอล (binomial expansion) ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) ค่าคงที่การลดทอนมีค่าเท่ากับ

$$\alpha \cong \frac{\omega \varepsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \quad (\text{Np/m}) \quad (2.22)$$

และมีค่าคงที่เฟสมีค่าเท่ากับ

$$\beta \cong \omega \sqrt{\mu \varepsilon'} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right] \quad (\text{rad/m}) \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.22) จะเห็นได้ว่าค่าคงที่การลดทอนของตัวกลางที่เป็น ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำมีค่าเป็นบวกและแปรผันตรงกับความถี่ ส่วนค่าคงที่เฟสในสมการ (2.23) มีค่าที่ต่างออกไปจาก $\omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า $\omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ เป็นค่าในกรณีของตัวกลางที่เป็น ไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ หรือที่เรียกว่า perfect (lossless) dielectric ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่เป็น ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำเป็นค่าเชิงซ้อนดังนี้

$$\eta_c \cong \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \left(1 + j \frac{\varepsilon''}{2\varepsilon'} \right)^{-1/2} \quad (\Omega) \quad (2.24)$$

เนื่องจากอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์คืออัตราส่วนของ \vec{E}_x และ \vec{E}_y สำหรับคลื่นระนาบ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่เกิดการสูญเสียนี้จึงไม่มีเฟสที่เหมือนกันดังเช่นในตัวกลางที่ไม่มี การสูญเสีย (lossless medium) ความเร็วเฟส (phase velocity : u_p) ได้จาก $\frac{\omega}{\beta}$ ดังนี้

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \cong \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right] \quad (2.25)$$

2) ตัวนำที่ดี

ตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี (good conductor) คือตัวกลางที่มีค่า $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$ ในสถานะเช่นนี้เราสามารถใส่สมการ (2.16) และสามารถตัด 1 ทิ้งไปเนื่องจากมีค่าน้อยมากเทียบกับ $\sigma/j\omega\epsilon$ ดังนั้น

$$\gamma \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}} = \sqrt{j}\sqrt{\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}$$

หรือ

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong (1+j)\sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (2.26)$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\sqrt{j} = (e^{j\pi/2})^{1/2} = e^{j\pi/4} = (1+j)/\sqrt{2}$$

และ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้นสมการ (2.26) แสดงให้เห็นว่า α และ β สำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดีจะประมาณได้เท่ากัน และค่าทั้งสองก็ขึ้นกับ \sqrt{f} และ $\sqrt{\sigma}$ ดังนี้

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (2.27)$$

ส่วนค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางชนิดนี้มีค่าเท่ากับ

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} \cong \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j)\sqrt{\frac{\pi f\mu}{\sigma}} = (1+j)\frac{\alpha}{\sigma} \quad (\Omega) \quad (2.28)$$

ซึ่งมีเฟสเท่ากับ 45° ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กจะตามหลังความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ 45° และค่าความเร็วเฟสในตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \cong \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (\text{m/s}) \quad (2.29)$$

ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับ \sqrt{f} และ $\frac{1}{\sqrt{\sigma}}$ และความเร็วดังกล่าวมีค่าประมาณสองเท่าของความเร็วเสียงที่วิ่งในอากาศแต่มีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงมากๆ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{u_p}{f} = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu\sigma}} \quad (\text{m}) \quad (2.30)$$

2.4 การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก

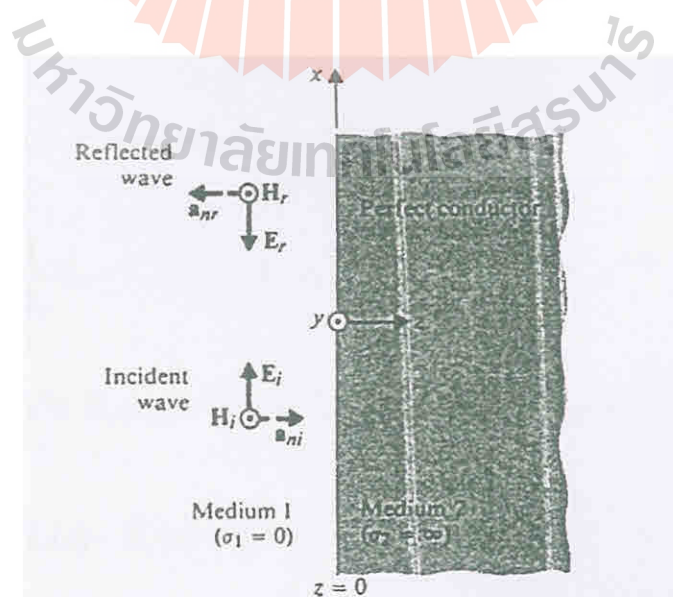
2.4.1 การตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก

จากรูปที่ 2.7 คลื่นที่กำลังจะเดินทางไปตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ในที่นี้จะเรียกว่าคลื่นตกกระทบ (incident wave, E_i และ H_i) เดินทางในทิศทาง $+z$ และรอยต่อของสองตัวกลางดังกล่าวอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบในรูปของเฟสเซอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_i(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_i z} \quad (2.31)$$

$$H_i(z) = a_x \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_i z} \quad (2.32)$$

เมื่อ E_{i0} คือขนาดของ E_i ที่ตำแหน่ง $z = 0$ แต่ β_i และ η_i คือค่าคงที่เฟสและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่หนึ่งตามลำดับ ค่าเวกเตอร์ของพอยน์ติงของคลื่นตกกระทบดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $P_i(z) = E_i(z) \times H_i(z)$ และมีทิศทางไปทาง \hat{a}_z ซึ่งเป็นทิศทางของการไหลของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีนี้



รูปที่ 2.7 คลื่นระนาบตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก

ในตัวกลางที่สอง (ตัวนำสมบูรณ์) ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะไม่มีค่า หรือกล่าวคือ $\bar{E}_2 = 0$, $\bar{H}_2 = 0$ จึงทำให้ไม่มีคลื่นถูกส่งผ่านข้ามรอยต่อไปยังตัวกลางที่สอง เพราะฉะนั้นคลื่นจะสะท้อนกลับหมดในตัวกลางที่หนึ่ง ทำให้ได้คลื่นสะท้อน (reflected wave) ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนด้วย \bar{E}_r , \bar{H}_r และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสะท้อนในตัวกลางที่หนึ่งมีค่าดังนี้

$$\bar{E}_r(z) = \bar{a}_x E_{r0} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.33)$$

เมื่อเครื่องหมายบวกที่ปรากฏอยู่บนฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลนั้นเกิดเนื่องจากคลื่นสะท้อนเดินทางในทิศทาง $-z$ ดังนั้นความเข้มสนามไฟฟ้ารวมในตัวกลางที่หนึ่งได้จากการรวมกันของ E_i และ E_r ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\bar{E}_1(z) = \bar{E}_i(z) + \bar{E}_r(z) = \bar{a}_x (E_{i0} e^{-j\beta_1 z} + E_{r0} e^{+j\beta_1 z}) \quad (2.34)$$

จากความต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขขอบเขตในองค์ประกอบสัมผัส (tangential component) ของความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ $z = 0$ ทำให้ได้ว่า

$$\bar{E}_1(0) = \bar{a}_x (E_{i0} + E_{r0}) = E_2(0) = 0$$

ดังนั้น $E_{r0} = -E_{i0}$ ซึ่งทำให้สมการ (2.34) กลายเป็น

$$\bar{E}_1(z) = \bar{a}_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} - e^{+j\beta_1 z}) = -\bar{a}_x j 2 E_{i0} \sin \beta_1 z \quad (2.35)$$

ซึ่งสามารถหาความเข้มสนามแม่เหล็กสะท้อนได้จาก E_r ดังนี้

$$\bar{H}_r(z) = \frac{1}{\eta_1} \bar{a}_{rr} \times E_r(z) = \frac{1}{\eta_1} (-\bar{a}_z) \times E_r(z) = -\bar{a}_y \frac{1}{\eta_1} E_{r0} e^{+j\beta_1 z} = \bar{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{+j\beta_1 z}$$

เมื่อรวม $\bar{H}_r(z)$ เข้ากับ $\bar{H}_i(z)$ จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมในตัวกลางที่หนึ่งดังนี้

$$\bar{H}_1(z) = \bar{H}_i(z) + \bar{H}_r(z) = \bar{a}_y 2 \frac{E_{i0}}{\eta_1} \cos \beta_1 z \quad (2.36)$$

จากสูตรหาค่าเฉลี่ยที่ว่า $P_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*)$ เมื่อพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จากสมการ (2.35) และ (2.36) จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยในตัวกลางที่หนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถหาค่าส่วนจริงตามสมการได้ เพื่อพฤติกรรมของคลื่นรวมในตัวกลางที่หนึ่งเทียบกับตำแหน่งและเวลา เราจำเป็นต้องเปลี่ยนความเข้มของสนามทั้งสองให้อยู่ในรูป ณ ขณะหนึ่ง ดังนี้

$$\bar{E}_1(z) = \text{Re}[E_1(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_x 2E_{10} \sin \beta_1 z \sin \omega t \quad (2.37)$$

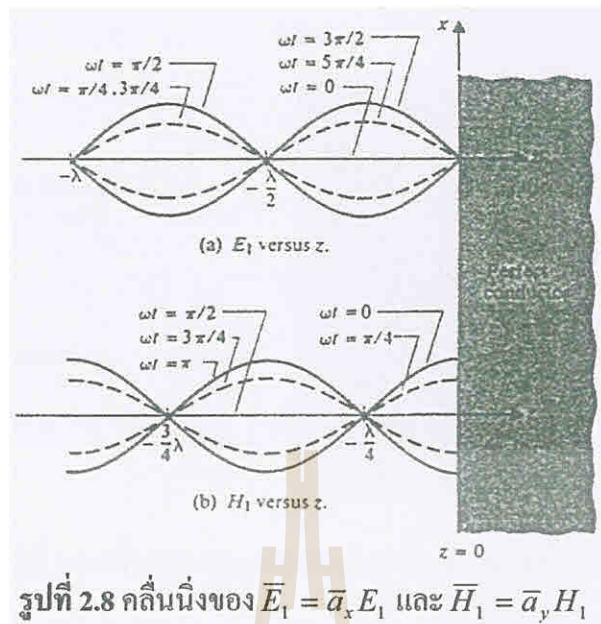
$$\bar{H}_1(z) = \text{Re}[H_1(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_y 2 \frac{E_{10}}{\eta_1} \cos \beta_1 z \cos \omega t \quad (2.38)$$

ทั้ง $\bar{E}_1(z, t)$ และ $\bar{H}_1(z, t)$ มีค่าเป็นศูนย์และสูงสุดที่ตำแหน่งคงที่นับจากรอยต่อไม่ว่าเวลาจะเปลี่ยนไปเท่าใดตาม ซึ่งสามารถหาค่าตำแหน่งได้ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \text{Zeros of } \bar{E}_1(z, t) \\ \text{Maxima of } \bar{H}_1(z, t) \end{array} \right\} \text{Occur at } \beta_1 z = -n\pi, z = -n \frac{\lambda}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Maxima of } \bar{E}_1(z, t) \\ \text{Zeros of } \bar{H}_1(z, t) \end{array} \right\} \text{Occur at } \beta_1 z = -(2n+1) \frac{\pi}{2}, z = -(2n+1) \frac{\lambda}{4}, n = 0, 1, 2, \dots$$

คลื่นรวมในตัวกลางที่หนึ่งจะไม่ใช่คลื่นจร (traveling wave) อีกต่อไป แต่มันคือคลื่นนิ่ง (หรือคลื่นยืน) ที่มักจะเรียกกันว่า standing wave เป็นผลลัพธ์ของการรวมกันของคลื่นสองคลื่นที่เดินทางสวนทางกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



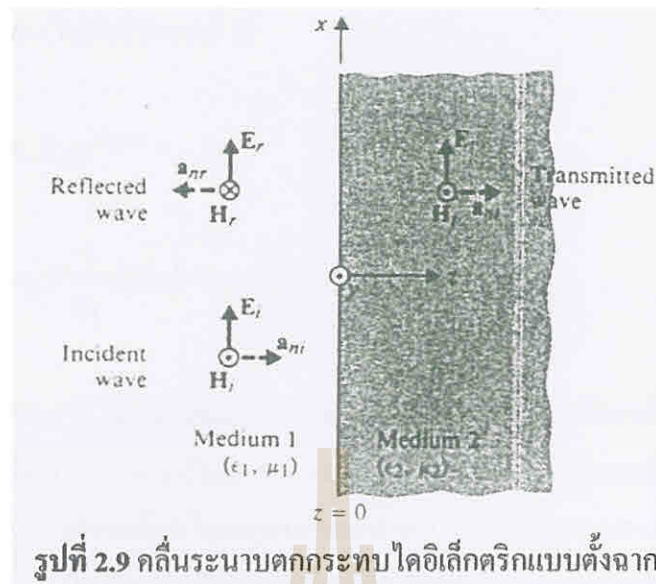
จากรูปที่ 2.8 แบ่งข้อสังเกตออกเป็น 3 ข้อดังนี้

- \vec{E}_1 มีค่าเป็นศูนย์ที่รอยต่อที่เป็นตัวกลาง ($E_{i0} = -E_{i0}$) และจะมีค่าเป็นศูนย์ เช่นนี้ที่ตำแหน่งเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda}{2}$ นับจากรอยต่อของตัวกลาง
- \vec{H}_1 จะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อตัวกลาง ($H_{r0} = H_{i0} = E_{i0}/\eta_1$)
- คลื่นนิ่งของ \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 มีเฟสต่างกันอยู่ 90° และตำแหน่งต่างกันอยู่ $\frac{\lambda}{4}$

2.4.2 การตกกระทบไดอิเล็กตริกแบบตั้งฉาก

ในหัวข้อนี้จะเปลี่ยนตัวกลางที่สองจากที่เคยเป็นตัวนำสมบูรณ์มาเป็นไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบเข้ากับตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก ที่มีค่าอินทรีนซิก อิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากับค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นกำเนิดขึ้นมา ส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับในขณะที่ส่วนที่เหลือจะส่งผ่านไปยังตัวกลางไดอิเล็กตริกที่สอง จะมองเห็นเหตุการณ์นี้ได้ว่าเป็นการไม่สมดุลของอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ผ่านมาคือ สมมติให้คลื่นตกกระทบแบบตั้งฉากจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง และเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ สมมติให้ตัวกลางทั้งสองเป็นตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย ($\sigma = 0$)



จะเริ่มการวิเคราะห์จากรูปที่ 2.9 ที่มีคลื่นตกกระทบบนเดินทางไปในทิศทาง $+z$ และรอยต่อของตัวกลางอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของคลื่นตกกระทบบนและคลื่นสะท้อนในรูปแบบของเฟสเซอร์ได้ ดังนี้

$$E_i(z) = \bar{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.39)$$

$$H_i(z) = \bar{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.40)$$

เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางเกิดที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบบนจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ 2 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

ก) คลื่นสะท้อน

$$E_r(z) = a_x E_{r0} e^{j\beta_1 z} \quad (2.41)$$

$$H_r(z) = (-a_y) \times \frac{1}{\eta_1} E_r(z) = -a_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \quad (2.42)$$

ข) คลื่นส่งผ่าน (ไปยังตัวกลางที่ 2)

$$E_t(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.43)$$

$$H_t(z) = a_z \times \frac{1}{\eta_1} E_r(z) = a_y \frac{E_{i0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.44)$$

เมื่อ E_{t0} คือขนาดของ \bar{E}_t ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ส่วน β และ η คือ ค่าคงที่เฟสและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ จากสมการข้างต้นค่าที่ยังไม่รู้และต้องหาต่อไปก็คือ E_{t0} และ E_{r0} ซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งที่รอยต่อ $z = 0$ องค์กรประกอบในแนวสัมผัส (องค์กรประกอบในแกน x) ของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่อง ดังนั้น

$$\bar{E}_i(0) + \bar{E}_r(0) = \bar{E}_t(0) \quad \text{หรือ} \quad E_{i0} + E_{r0} = E_{t0} \quad (2.45)$$

และ

$$\bar{H}_i(0) + \bar{H}_r(0) = \bar{H}_t(0) \quad \text{หรือ} \quad \frac{1}{\eta_2} (E_{i0} - E_{r0}) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \quad (2.46)$$

แก้สมการ (2.45) และ (2.46) จะได้

$$\bar{E}_{r0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.47)$$

$$\bar{E}_{t0} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.48)$$

อัตราส่วนของ E_{r0}/E_{i0} และ E_{t0}/E_{i0} ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) ตามลำดับซึ่งใช้สัญลักษณ์ และมีความสัมพันธ์กับอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.49)$$

$$\text{และ } \tau = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.50)$$

จะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในสมการ (2.49) มีค่าเป็นไปได้อีกทั้งค่าลบและค่าบวก ขึ้นอยู่กับค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในสมการ (2.50) นั้นมีค่าเป็นบวกเท่านั้น นิยามของ Γ และ τ ในสมการ(2.49) และ (2.50) เป็นจริงในทุกๆ ตัวกลาง ซึ่งในตัวกลางชนิดกระจายตามความถี่ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นดังนี้

$$1 + \Gamma = \tau \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.51)$$

ถ้าตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำสมบูรณ์แล้ว $\eta_2 = 0$ และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.49) และ (2.50) จะได้ว่า $\Gamma = -1$ และ $\tau = 0$ ซึ่งทำให้ $E_{r0} = E_{i0}$ และ $E_{t0} = 0$ ที่ตีความได้ว่าคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับหมดและเกิดคลื่นนิ่งขึ้นที่ด้านตัวกลางที่ 1 ถ้าตัวกลางที่ 2 ไม่ใช่ตัวนำสมบูรณ์ คลื่นตกกระทบบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 ซึ่งทำให้ค่าสนามไฟฟ้ารวมในตัวกลางที่ 1 มีสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_i(z) + E_r(z) = a_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}) \\ &= a_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(e^{j\beta_1 z} - e^{-j\beta_1 z})] \\ &= a_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(j2 \sin \beta_1 z)] \end{aligned}$$

หรือจากสมการ (2.51) จะได้ว่า

$$\bar{E}_1(z) = \bar{a}_x E_{i0} [\tau e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(j2 \sin \beta_1 z)] \quad (2.52)$$

จากสมการ (54) $\bar{E}_1(z)$ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ คลื่นจร (traveling wave) ที่มีขนาดเท่ากับ τE_{i0} และคลื่นนิ่งที่มีขนาดเท่ากับ $2\Gamma E_{i0}$ เนื่องจากการมีอยู่ของคลื่นจร ค่าของ $\bar{E}_1(z)$ จึงไม่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเหมือนกับพฤติกรรมของคลื่นนิ่งทั่วๆ ไปที่ได้ศึกษามา

ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ $|\bar{E}_1(z)|$ หาได้ดังนี้

$$E_1(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma e^{j2\beta_1 z}) \quad (2.53)$$

อัตราส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดสำหรับความเข้มของสนามไฟฟ้าของคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-wave ratio, SWR) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย S

$$S = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.54)$$

หรือเขียนอีกรูปหนึ่งได้

$$|\Gamma| = \frac{S-1}{S+1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.55)$$

ในขณะที่ค่า Γ มีค่าได้ตั้งแต่ -1 ไปถึง +1 ค่าของ S จะมีค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง ∞

2.5 บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับบริเวณสนามไกล (Far-Field Region) นั้นจะเป็นบริเวณที่อยู่ในพื้นที่วงกลมวงนอกสุด (ถัดจากบริเวณเฟสเนต) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า บริเวณเฟราน์โฮเฟอร์ (Fraunhofer Region) การพิจารณาสนามที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะกำหนดให้เทอมของระยะทาง ($1/r$) มีค่ามากกว่าหนึ่งหลายๆ ($\beta r \gg 1$) โดยผลเฉลยของสนามที่ได้จะไม่มียังองค์ประกอบของสนามเชิงมุม เนื่องจากในเงื่อนไขของสนามไกลนี้องค์ประกอบของสนามเชิงมุมจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสายอากาศไปยังจุดสังเกตใดๆ ทั้งสิ้นองค์ประกอบของสนามที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetics Wave: TEM Wave) กับทิศทางการแผ่คลื่น สามารถนำมาพล็อตเพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ที่เกิดขึ้นจากสายอากาศที่ต้องการได้ โดยระยะของสนามไกลของสายอากาศทุกชนิดจะถูกกำหนดโดย

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

2.6 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (Frequency Selective Surfaces: FSS)

Frequency Selective Surfaces (FSS) เป็นการรวมตัวกันของพื้นผิวด้านนอกเพื่อส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในคลื่นความถี่ต่าง ๆ FSS มีส่วนประกอบสามชั้น คือ โลหะสองชั้นกันด้วยวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวน แถวลำดับของอะเพอร์เจอร์ (apertures) จะเกิดขึ้นในสองชั้นนอกซึ่งเป็นสื่อของกระแสไฟฟ้า ส่วนชั้นภายในประกอบด้วยสื่อกระแสไฟฟ้าอะเพอร์เจอร์ (apertures) และทำการปรับปรุงการวางแนวในแบบต่าง ๆ และอาจมีการปรับปรุงรูปร่างของไดโพล, วงกลม, สี่เหลี่ยม

และ tripoles ในการสร้างรูปทรงที่ต้องการให้ได้รูปทรงของอะเพอร์เจอร์ (apertures) และปรับปรุงรูปทรงให้สอดคล้องกันกับทางเรขาคณิต

Dual-band FSS ของอะเพอร์เจอร์ (apertures) มีการปรับปรุงขนาดต่างๆของช่องทางที่สามารถส่งคลื่นที่มีความถี่ที่แตกต่างกันได้สองความถี่ FSS สำหรับส่งความถี่จะต้องทำให้เกิดพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจะประกอบไปด้วย สล็อตในแผ่นเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าโดยเว้นระยะชิดกันและคั่นด้วยฉนวน ช่วงที่มีการปรับให้ความถี่มีการทำงานเป็นตัวกรองความถี่สูงผ่าน และสารภายในวัสดุฉนวน ปรับไปที่ความถี่ที่ต่างจากความถี่เดิมและทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน พลังงานที่ได้รับไปหนึ่งช่วงจะเปลี่ยนเป็นช่วงอื่นๆ ด้วยวัสดุฉนวน

2.6.1 องค์ประกอบของ FSS สำหรับกรองความถี่ต่าง ๆ

- พื้นผิวชั้นแรกจะทำหน้าที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้ารวมทั้งการกำหนดขนาดและรูปร่างที่ปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้รับพลังงานที่ความถี่ต่าง ๆ และทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่
- ชั้นของวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน
- การปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของผิวโลหะ ทำให้คลื่นความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลง
- พื้นผิวชั้นที่สองมีการกำหนดขนาดและรูปร่างเพื่อเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่มีคลื่นความถี่ที่สอง ทำให้ความถี่เปลี่ยนไป ความถี่ที่สองเกิดจากการจัดชิดและห่างกันจากแพทช์กับชั้นฉนวนที่สองเพื่อให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความถี่ที่จะส่งผ่านพื้นผิวจากความถี่แรกที่แพทช์ไปยังความถี่ที่สอง
- มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิต

จากองค์ประกอบของ FSS สำหรับส่งและกรองสองความถี่ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยโครงสร้างหลายชั้น คือ พื้นผิวด้านนอกมีหน้าที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าและรอบ ๆ พื้นผิวของแพทช์ กลางพื้นผิวที่มีการแยกจากแพทช์และแยกจากกันด้วยวัสดุฉนวนของแข็ง มีลักษณะคล้ายกับช่องว่าง (apertures) เป็นตัวกรองความถี่สูงผ่านชิดกันกับอีกพื้นผิวหนึ่ง แต่ละพื้นผิวมีการรวมกันทั้งความถี่แรกของการกำหนดขนาดและรูปร่างปรับเปลี่ยนให้ใช้ได้กับความถี่แรกและความถี่ที่สองของขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน เป็นความถี่สองพื้นผิวมีหน้าที่ในการกรองความถี่ต่ำผ่านและรวมถึงองค์ประกอบที่ปรับเปลี่ยนก่อนการเปลี่ยนแปลงของความถี่แรกและแพทช์ที่สองเป็นการกรองเพื่อไม่ให้ความถี่ที่สองมีการผ่านไป

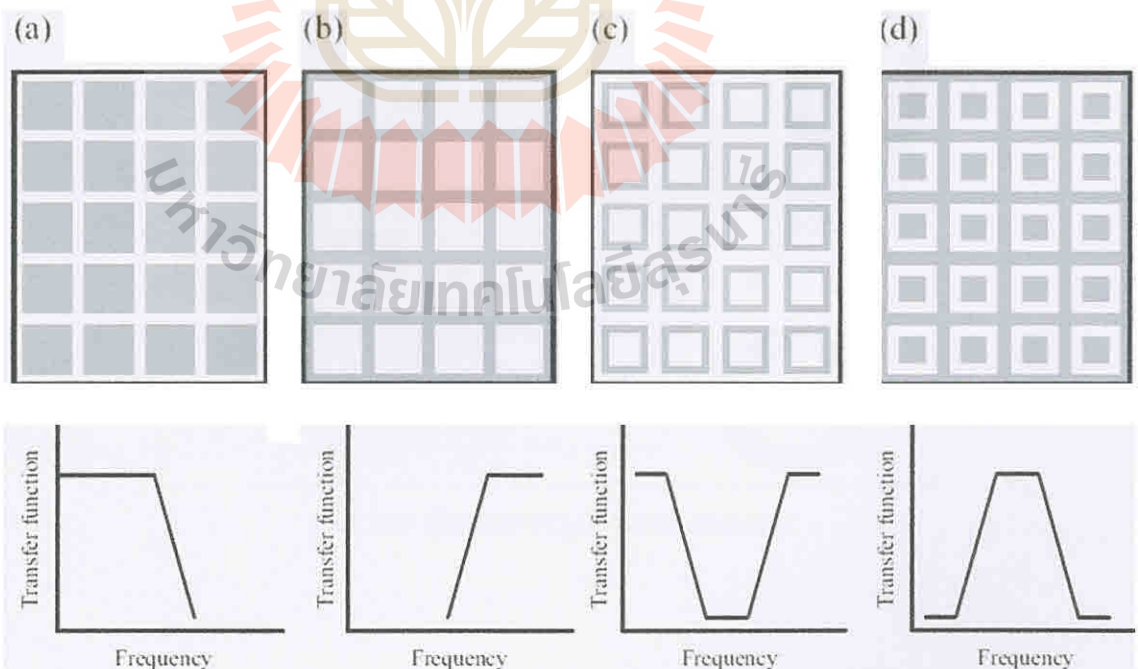
Frequency Selective Surface (FSS) มีการใช้อย่างกว้างขวางในการกรองความถี่ของคลื่นที่มีขนาดเป็นมิลลิเมตรและไมโครเมตร โดยปรับขนาดคุณลักษณะของแถวลำดับของโลหะที่สร้างขึ้น

จะได้ FSS ตามความถี่ที่ต้องการ โครงสร้างเหล่านี้ยังสามารถออกแบบเพื่อใช้ที่ความถี่สูง ความถี่ใกล้อินฟราเรด (IR) และความถี่ที่มองไม่เห็น แต่ FSS โลหะสามารถเกิดความสูญเสียในการดูดซับคลื่นแบบสองความถี่ และกลับมีแบนด์วิดท์ที่แคบมากและน้อยกว่า -20 dB ในแถบหยุด ซึ่งตรงกันข้ามกับแบบที่เป็นตาข่าย (gratings)

การสร้าง FSS ในปัจจุบันมีองค์ประกอบของ FSS ที่มีคุณสมบัติเฉพาะเป็นองค์ประกอบของ FSS คือ มีความสามารถทำเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และมีน้ำหนักเบา สามารถสร้างและขึ้นรูปได้ง่าย สามารถหาซื้อแผงวงจรมีอยู่ในปัจจุบันและเทคนิคเทคโนโลยี radome ในราคาต่ำ นอกจากนี้ องค์ประกอบเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นเพื่อใช้กับพื้นผิวที่มี โครงสร้างที่ซับซ้อนและพื้นผิวที่มีความเรียบได้

FSS สามารถแบ่งออกตามการตอบสนองความถี่เป็นสี่ประเภท ดังนี้

1. ความถี่ต่ำผ่าน (low pass)
2. ความถี่สูงผ่าน (high pass)
3. แถบความถี่ผ่าน (band pass)
4. แถบความถี่หยุดผ่าน (band stop)

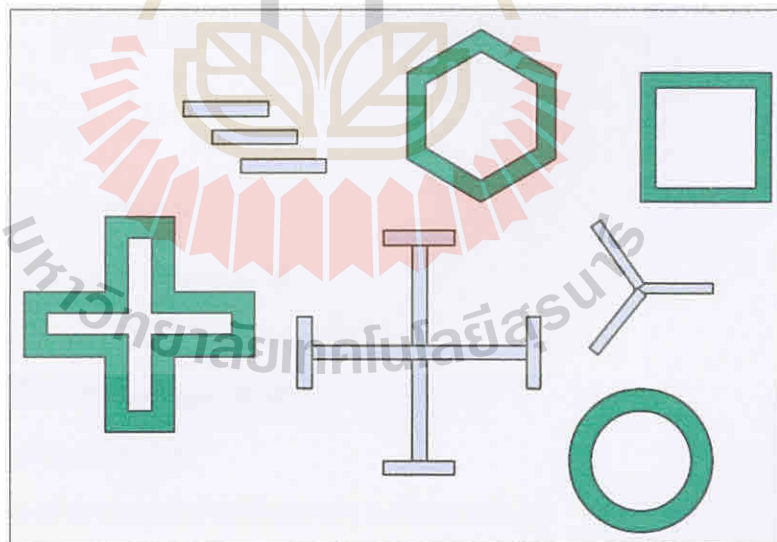


รูปที่ 2.10 ชนิดของการตอบสนองความถี่แบบต่างๆและผลของการตอบสนองแต่ละชนิด โดยพื้นสีเทาหมายถึงพื้นผิวของโลหะ

- a) แถวลำดับของชั้น โลหะและฟังก์ชันการถ่ายโอนผลการตอบสนองของการส่งผ่านแบบความถี่ต่ำผ่าน
- b) ช่องว่างบนตัวกลางที่นำไฟฟ้า และฟังก์ชันการถ่ายโอนของการตอบสนองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน ในอุดมคติ
- c) องค์ประกอบของวงโลหะที่ทำให้เกิดลักษณะของการเรโซแนนซ์ของคลื่นและฟังก์ชันการถ่ายโอนผลการตอบสนองของการส่งผ่านแบบแถบความถี่หยาบผ่าน
- d) องค์ประกอบของวงช่องว่างที่ทำให้เกิดลักษณะของการเรโซแนนซ์ของคลื่นฟังก์ชันการถ่ายโอนผลการตอบสนองของการส่งผ่านแบบแถบความถี่ผ่าน

2.6.2 คุณสมบัติของ FSS มีดังนี้

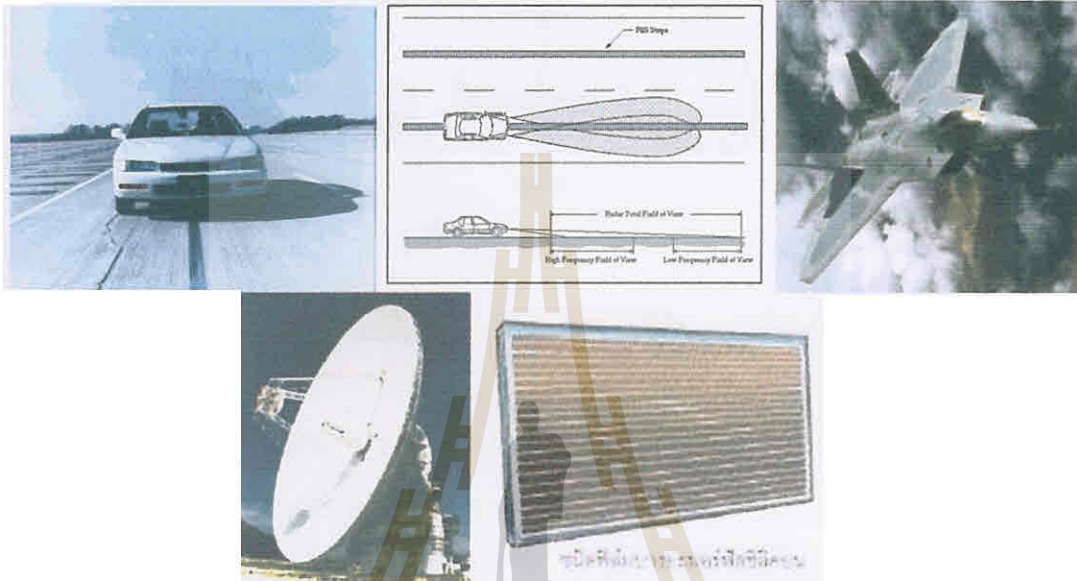
- สามารถออกแบบให้เป็นตัวกรองความถี่ใดๆ ได้
- ใช้กับความถี่ narrow band
- มีรูปร่างลักษณะเป็นแบบสองมิติ
- สามารถออกแบบเป็นรูปร่างและขนาดต่างๆ ได้
- สามารถเลือกและออกแบบองค์ประกอบต่างๆ ได้



รูปที่ 2.11 ลักษณะและรูปร่างของ elements

2.6.3 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS

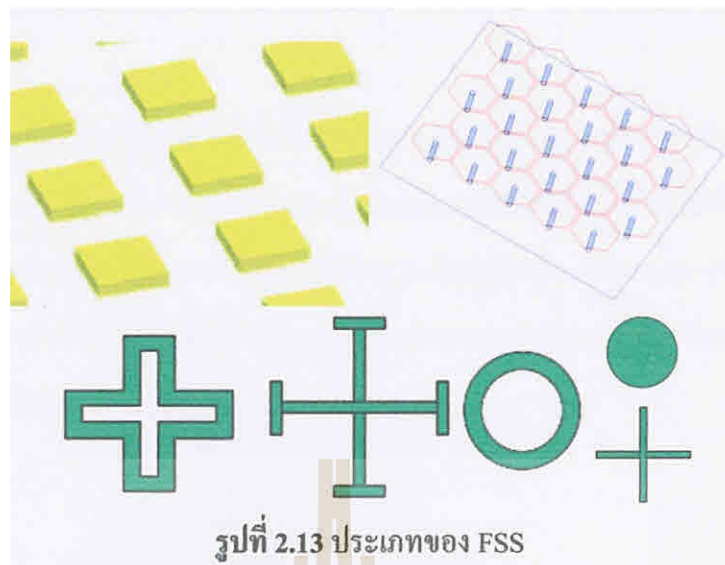
- RFID tags
- ใช้บังคับการเดินทางของรถยนต์
- ใช้ในระบบป้องกันการลักลอบข้อมูล
- ใช้ในการออกแบบวัสดุเคลือบเพื่อลดการสะท้อนของแสงบนแผ่นแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS

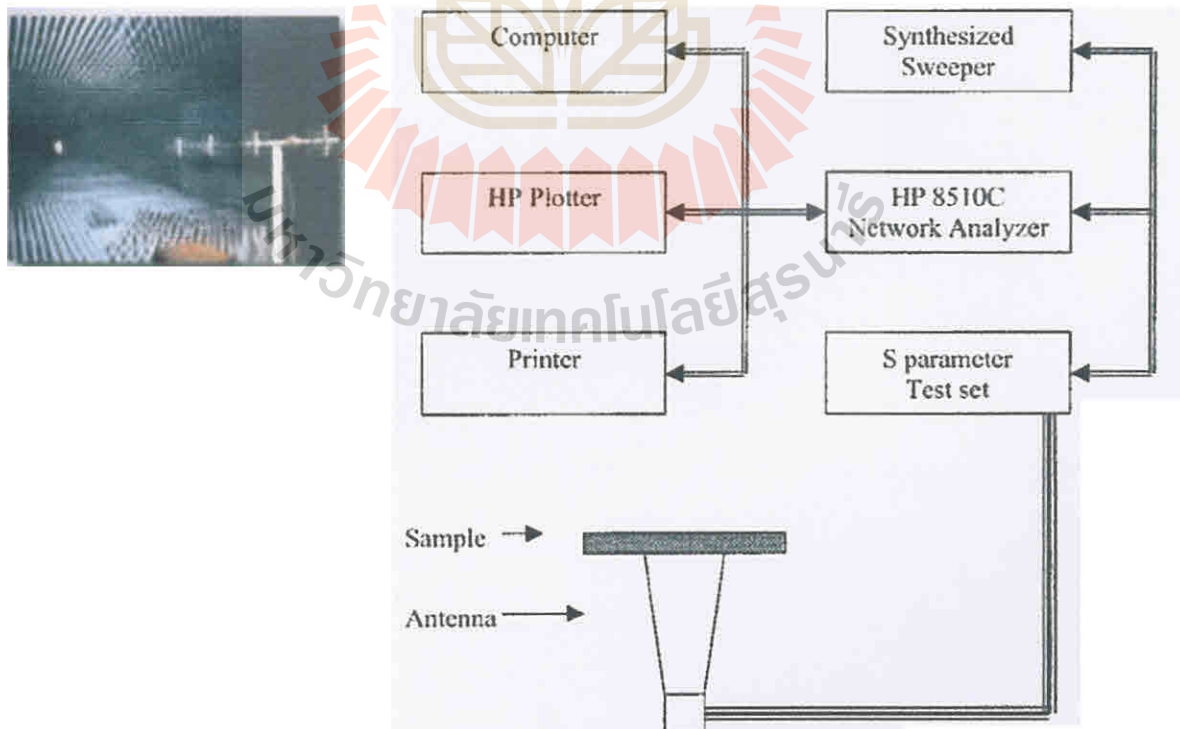
2.6.4 ประเภทของ FSS

- **แบบผิวเรียบ (Planar FSS)**
 - สามารถทำวงจรลงใน substrates ได้
 - สามารถทำเป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นได้
- **แบบผิวไม่เรียบ (Non-Planar FSS)**
 - ทำให้เป็นรูปทรงต่างๆ ได้
 - สามารถนำองค์ประกอบมารวมกันหลายๆ องค์ประกอบได้
- **แบบวงจร**
 - สามารถทำเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านได้ (Band pass)
 - วงจรไม่ให้ความถี่ผ่าน (Band Stop)



2.6.5 หลักการการวิเคราะห์และออกแบบ FSS ทำได้หลายวิธี ดังนี้

- ออกแบบโดยใช้หลักการของ Periodic Moment Method (PMM)
- ออกแบบโดยใช้หลักการของ Method-of-Moments (MOM)
- ออกแบบโดยปรับรูปร่างและองค์ประกอบ
- ออกแบบ โดยการสร้างชิ้นงานแล้ววัดผล



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ FSS

2.7 กล่าวสรุป

ในโครงการระจกเลือกความถี่ผ่านย่าน 900 MHz และ 1800 MHz จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น ทฤษฎีสายอากาศ ทฤษฎีพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะใช้อ้างอิงกับชิ้นงานที่สร้างขึ้น ว่ามีความสามารถในการใช้งานได้จริงมากน้อยเพียงใด และจากการศึกษาพื้นผิวเลือกความถี่ประเภทต่างๆ ได้เห็นว่าพื้นผิวเลือกความถี่ ประเภทแถบความถี่ผ่าน มีคุณสมบัติที่ตรงกับวัตถุประสงค์ของโครงการ



บทที่ 3

การออกแบบกระจกเลือกความถี่ผ่าน โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบชิ้นงานที่จะนำมาใช้เป็นกระจกเลือกความถี่ผ่าน เพื่อปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาจำลองผลในโปรแกรม CST คูณแนวโน้มของการจำลองผลและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ผลการจำลองที่ต้องการ

3.2 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบกระจกเลือกความถี่ผ่าน

ในการออกแบบชิ้นงานซึ่งทำบนแผ่นกระจก มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบได้แก่

1. ความถี่ปฏิบัติงานของชิ้นงาน คือ ย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน (Dielectric constant : ϵ_r) ซึ่งไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็น Glass (Silica) มีค่า ϵ_r เท่ากับ 3.8
3. ความสูงของฉนวน (h) เท่ากับ 1.67 mm.
4. ขนาดของแผ่นกระจก กว้าง 50 cm ยาว 50 cmหนา 0.5 cm

3.3 วิธีการคำนวณค่าต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

1. ออกแบบที่ความถี่ 900 MHz

ซึ่งวัสดุที่ใช้คือกระจก (Glass silica) มีค่า $\epsilon_r = 3.8$ ออกแบบที่ความถี่ $f_r = 900 \times 10^6$ Hz นำค่า ϵ_r แทนลงในสมการที่ 1 เพื่อหาค่า ϵ_{reff} เริ่มจากคำนวณหาค่า b จากสมการที่ 1

$$b = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{3.8}} \quad (3.1)$$

$$b = 6.0757$$

จะได้

จากนั้นนำค่า b แทนลงในสมการ 2 เพื่อหา w

$$w = \frac{2}{\pi} \left[b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right] \times 1.6 \times 10^{-3} \quad (3.2)$$

จะได้

$$w = 0.00341$$

ค่า h คือ ความหนาของแผ่นทองแดงมีค่าเป็น

$$h = d = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

นำค่า w และ d ที่ได้แทนลงในสมการที่ 3

จะได้

$$\frac{w}{d} = \frac{0.00341}{1.6 \times 10^{-3}} = 2.13 \quad (3.3)$$

วัสดุที่ใช้คือกระจก (Glass silica) มีค่า $\epsilon_r = 3.8$ นำค่า ϵ_r แทนลงในสมการที่ 4 เพื่อหาค่า ϵ_{reff}

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

จะได้

$$\epsilon_{\text{reff}} = 5.722$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 3 และ 4 แทนลงในสมการที่ 5

$$\frac{\Delta L}{h} = \frac{0.412(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.5)$$

จะได้

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.371$$

นำค่า h คูณทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้

$$\Delta L = 0.371 \times 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta L = 5.936 \times 10^{-4} \text{ m}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 6 เพื่อหาค่า L

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2f_r(\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}})} - 2\Delta L \quad (3.6)$$

$$L = 0.0843 \text{ m}$$

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.1667$$

2. ออกแบบที่ความถี่ 1800 MHz

วัสดุที่ใช้คือกระจก (Glass silica) มีค่า $\epsilon_r = 3.8$ ออกแบบที่ความถี่ $f_r = 1800 \times 10^6 \text{ Hz}$ นำค่า ϵ_r แทนลงในสมการที่ 1 เพื่อหาค่า ϵ_{reff} เริ่มจากคำนวณหาค่า b จากสมการที่ 3.1;

$$b = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{3.8}}$$

จะได้

$$b = 6.0757$$

จากนั้นนำค่า b แทนลงในสมการ 3.2 เพื่อหา w

$$w = \frac{2}{\pi} \left[b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right] \times 1.6 \times 10^{-3}$$

จะได้

$$w = 0.00341$$

ค่า h คือ ความหนาของแผ่นทองแดงมีค่าเป็น

$$h = d = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

นำค่า w และ d ที่ได้แทนลงในสมการที่ 3.3

จะได้
$$\frac{w}{d} = \frac{0.00341}{1.6 \times 10^{-3}} = 2.13$$

วัสดุที่ใช้คือกระจก (Glass silica) มีค่า $\epsilon_r = 3.8$ นำค่า ϵ_r แทนลงในสมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า ϵ_{reff}

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้
$$\epsilon_{\text{reff}} = 5.722$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 3 และ 4 แทนลงในสมการที่ 3.5

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

จะได้
$$\frac{\Delta L}{h} = 0.371$$

นำค่า h คูณทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้

$$\Delta L = 0.371 \times 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta L = 5.936 \times 10^{-4} \text{ m}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 3.6 เพื่อหาค่า L

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2f_r(\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}})} - 2\Delta L$$

$$L = 0.04156 \text{ m}$$

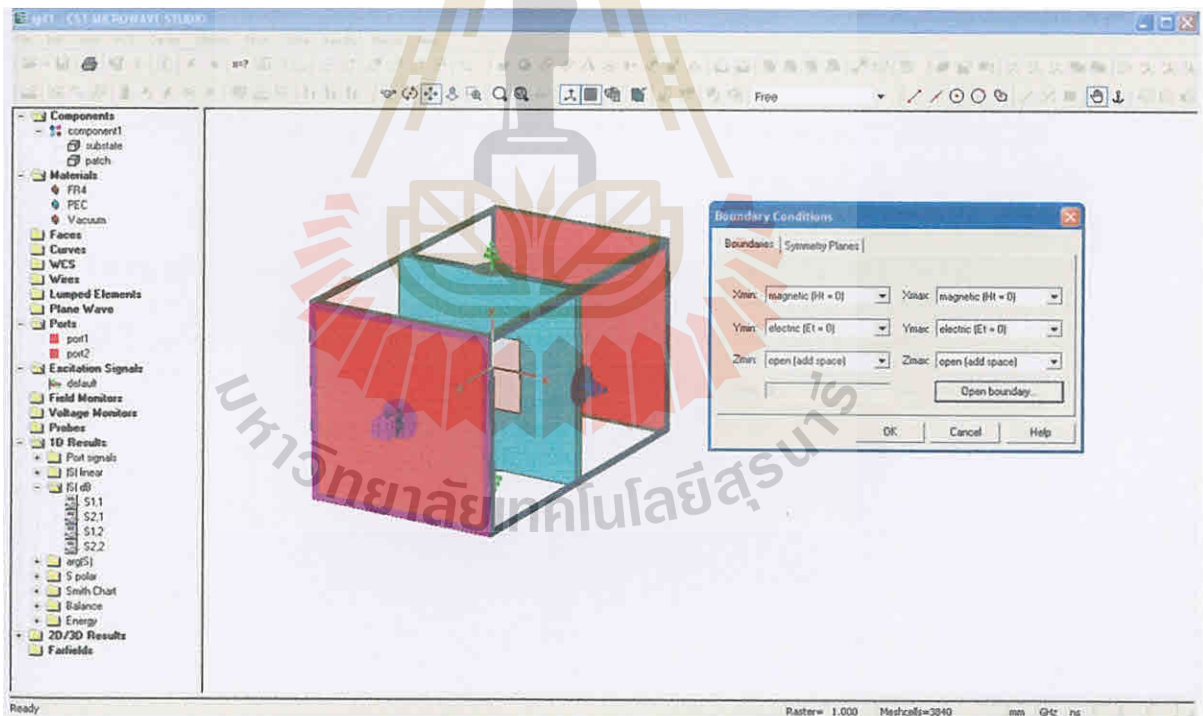
$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.00833$$

3.4 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

1. การตั้งค่า Boundary Condition

เริ่มจากการตั้งค่า X_{\min} และ X_{\max} ให้มีค่าเท่ากับ magnetic ($H_t = 0$) และ ค่า Y_{\min}

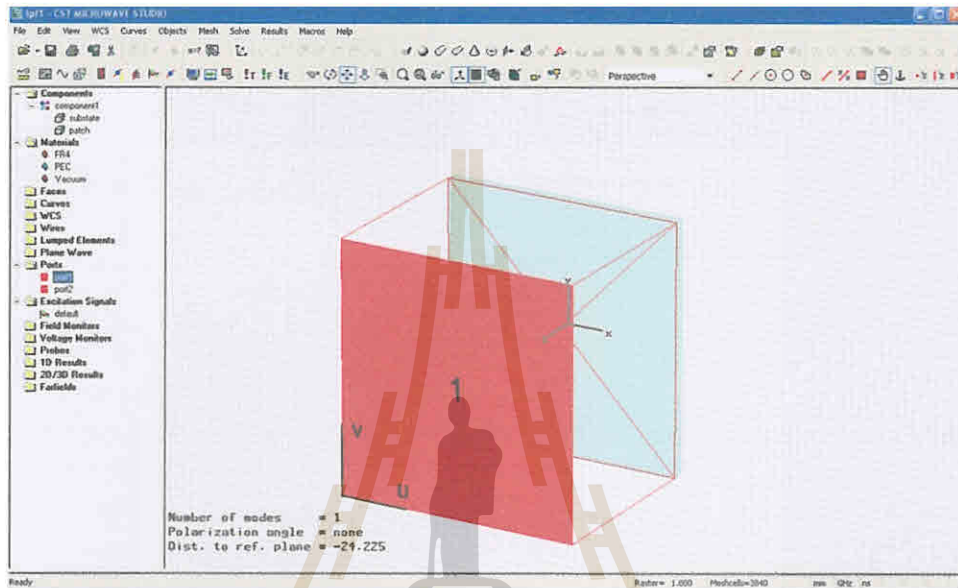
และ Y_{\max} มีค่าเท่ากับ electric ($E_t = 0$) และ ค่า Z_{\min} และ Z_{\max} มีค่าเท่ากับ open (add space)



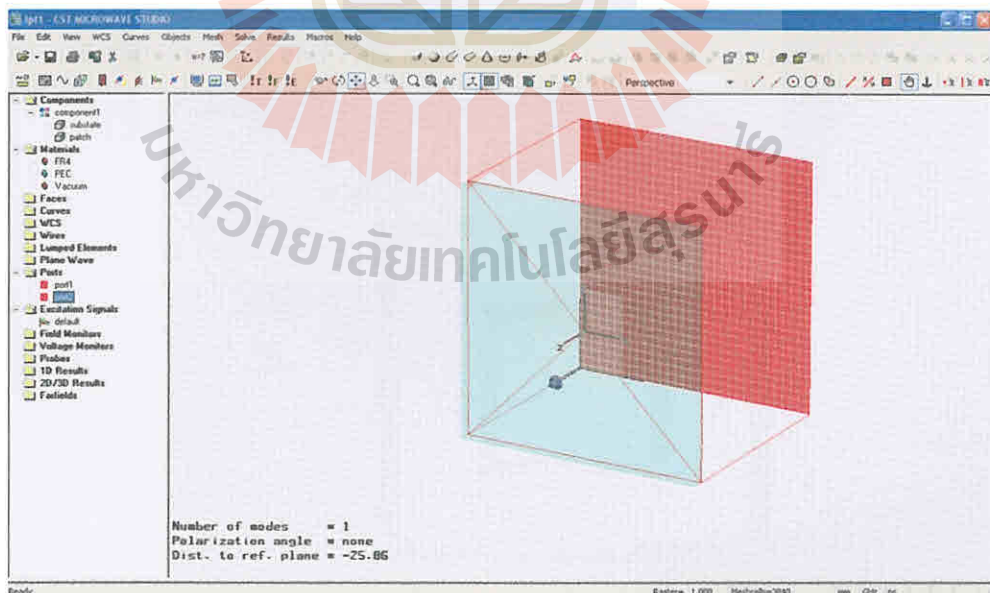
รูปที่ 3.1 การตั้งค่า Boundary Condition

2. การจำลองแบบ Unit Cell ใน waveguide ports

เริ่มจากการคำนวณหาระยะของ port1 และ port2 ก่อน โดยคำนวณหาจากสูตร $\frac{\lambda}{2}$ แล้วนำมาตั้งค่าในโปรแกรม CST โดยใส่ port ทั้งสองด้าน คือ ทั้งด้านหน้า และ ด้านหลัง หรือ port1 และ port2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3

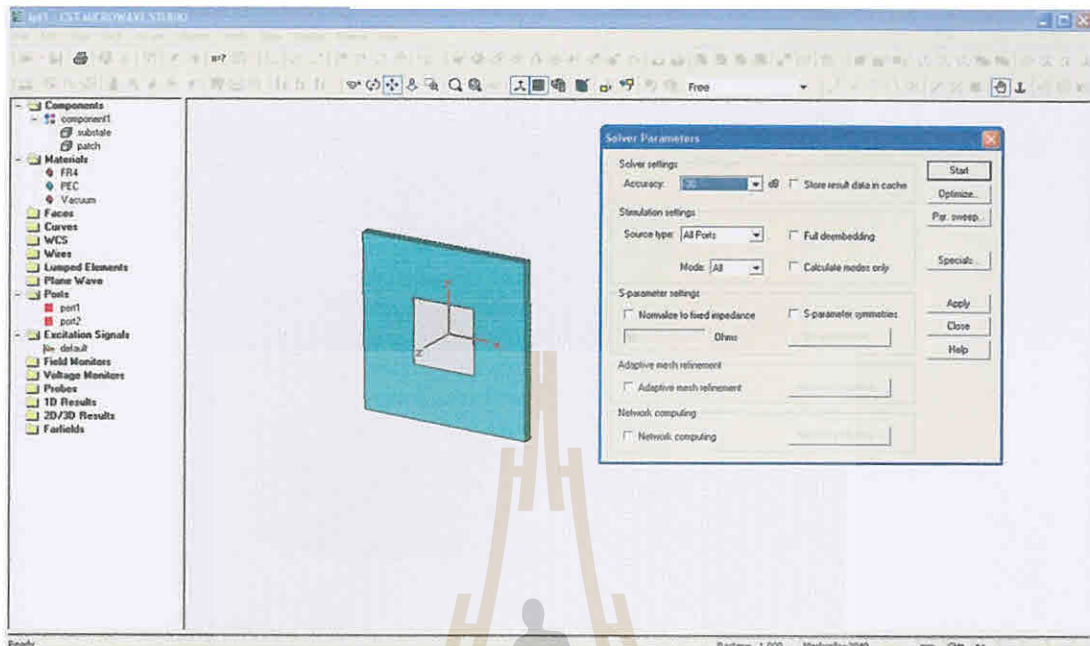


รูปที่ 3.2 การตั้งค่า port 1



รูปที่ 3.3 การตั้งค่า port 2

3. วิธีการ T Solver



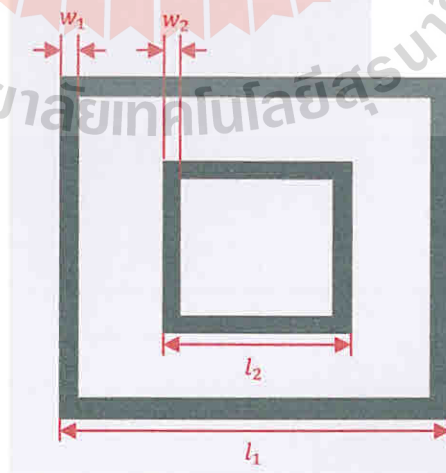
รูปที่ 3.4 วิธีการจำลองผลแบบ T Solver

3.5 ผลการจำลองแบบ

1. ผลการจำลองแบบขึ้นงานโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการ

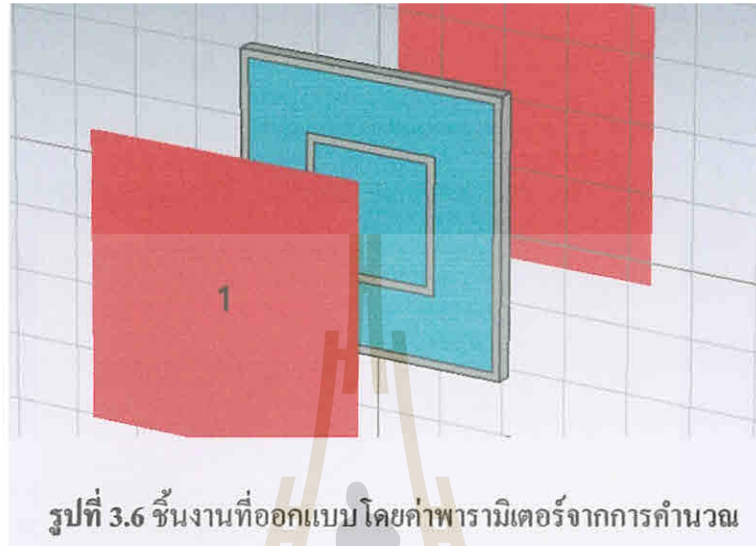
ออกแบบ

ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



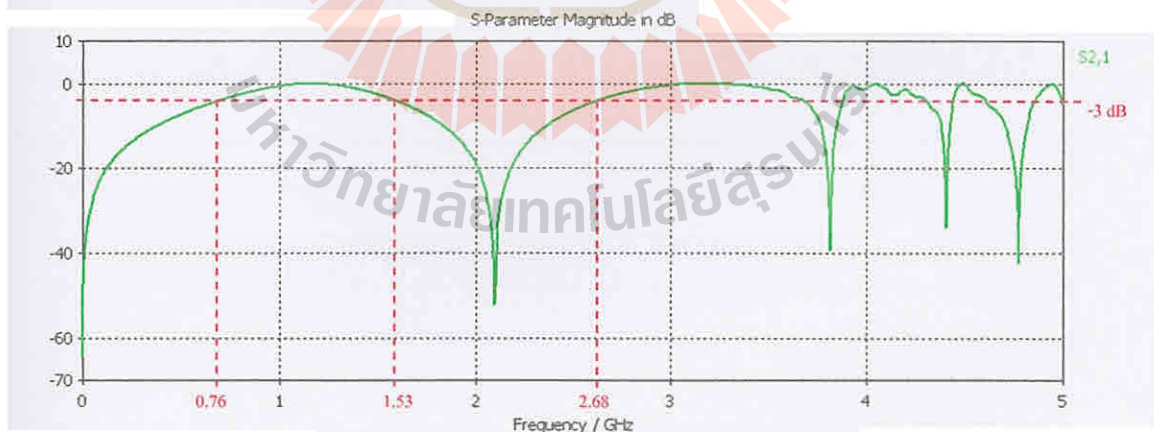
รูปที่ 3.5 พารามิเตอร์ของชิ้นงานต้นแบบ

จากสมการที่ (6) ความถี่ 900 MHz จะได้ค่า $l_1 = 84.3$ mm
 จากสมการที่ (6) ความถี่ 1800 MHz จะได้ค่า $l_2 = 41.5$ mm
 กำหนดให้ w_1 และ w_2 มีความกว้างเท่ากับ 5 mm



รูปที่ 3.6 ชั้นงานที่ออกแบบโดยค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

จากการจำลองผลจะได้ผลกราฟของ S_{21} ซึ่งจะดูที่ -3 dB ว่าได้ช่วงความถี่ตามที่ออกแบบมาหรือไม่ จากรูปที่ 3.7 ที่ย่านความถี่ 900 MHz สามารถทำงานได้ เนื่องจากผลการจำลองที่ -3 dB มีค่าประมาณ 760 MHz – 1530 MHz แต่ในย่านความถี่ 1800 MHz ยังไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากผลการจำลองที่ -3 dB มีค่าประมาณ 2680 MHz

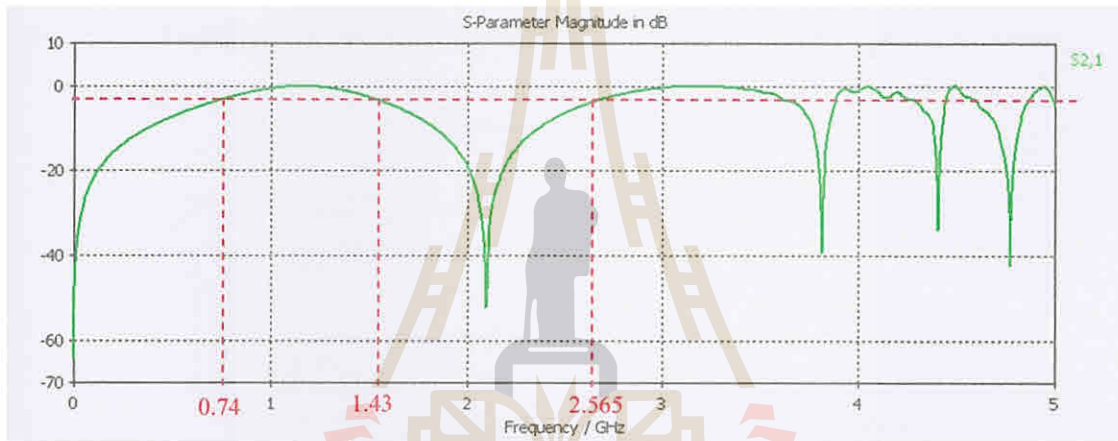


รูปที่ 3.7 ค่า S_{21} จากการวัดจำลองผลชิ้นงาน

เนื่องจากผลการจำลองแบบของชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณมีช่วงความถี่ที่ 1800 MHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์บางค่าจนกระทั่งได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ ซึ่งมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

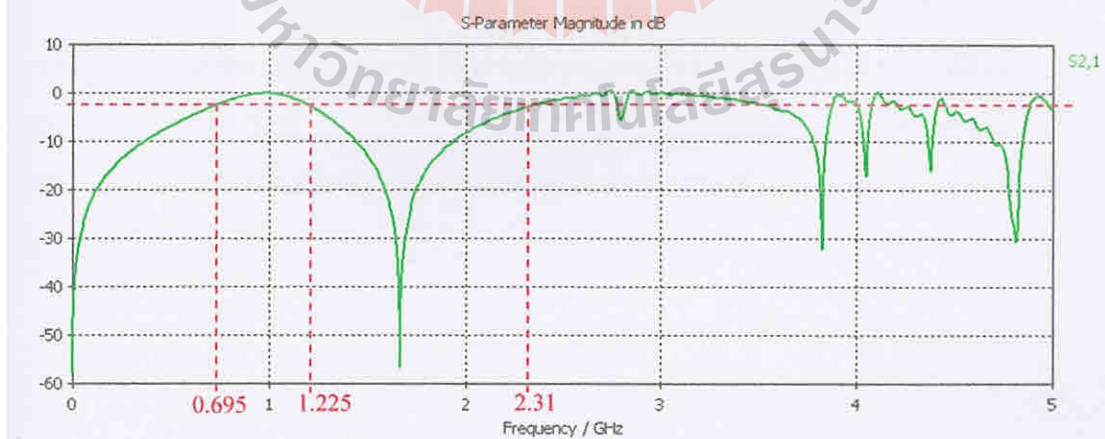
1) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ l_2

เนื่องจากช่วงความถี่ 1800 MHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ จึงได้มีการปรับค่า l_2 ก่อน โดยปรับค่า l_2 เป็น 44 mm, 50 mm, 55 mm และ 59 mm ตามลำดับ โดยที่พารามิเตอร์ตัวอื่นมีค่าเท่าเดิม ซึ่งในการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ l_2 ในแต่ละครั้ง จะมีแนวโน้มของกราฟที่ขึ้นจนอยู่ที่ค่า $l_2 = 59$ mm จะแสดงให้เห็นดังรูปต่อไปนี้



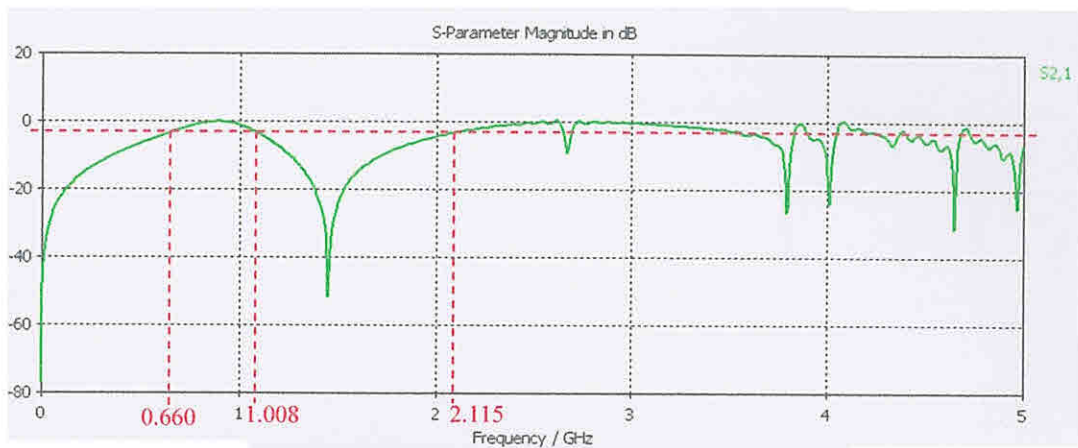
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $l_2 = 44$ mm

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าที่ช่วงความถี่ 1800 MHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ แต่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น



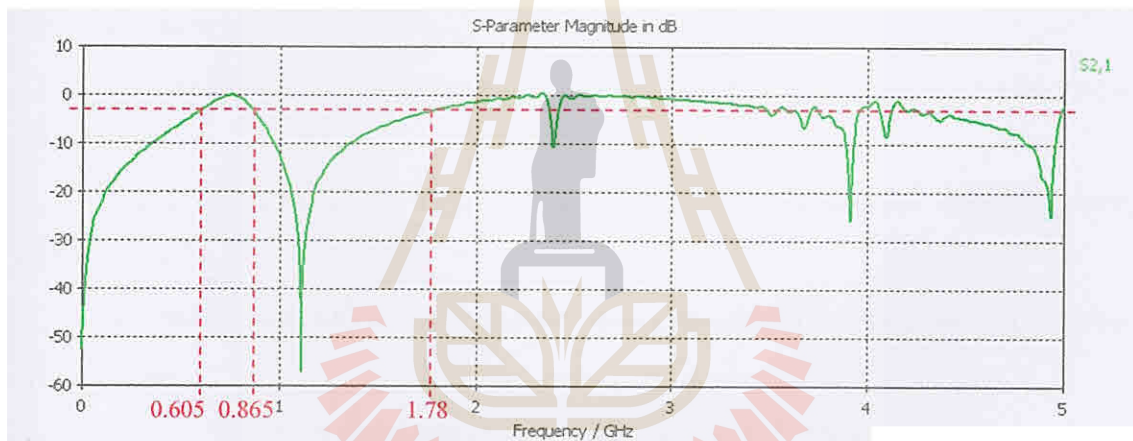
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $l_2 = 50$ mm

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าที่ช่วงความถี่ 1800 MHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ แต่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น



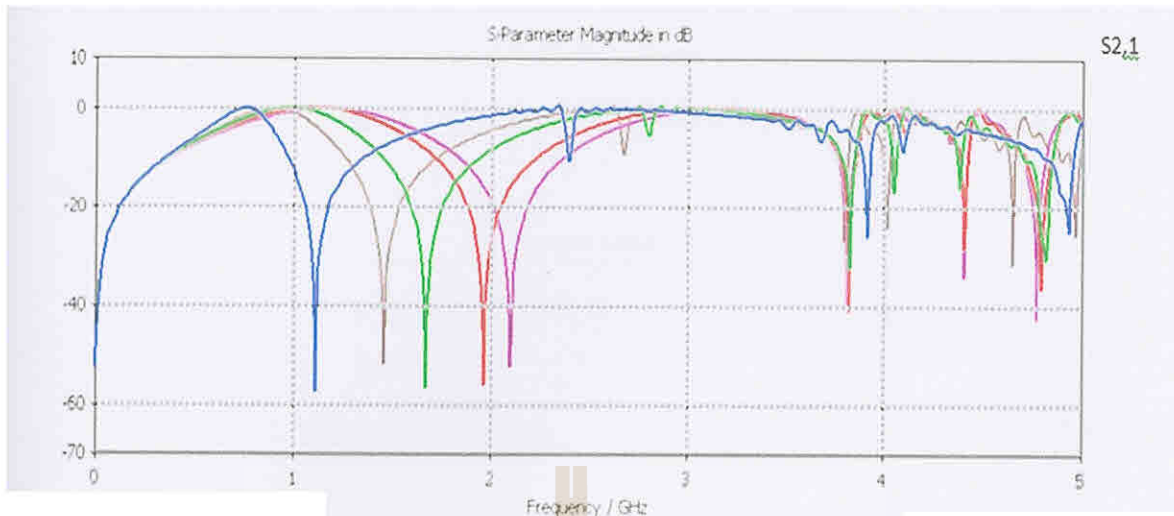
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $l_2 = 55$ mm

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าที่ช่วงความถี่ 1800 MHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ แต่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $l_2 = 59$ mm

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าที่ช่วงความถี่ 1800 MHz สามารถใช้งานได้แล้ว ซึ่งทำงานได้ตั้งแต่ความถี่ที่ 1780 MHz แต่การปรับค่าพารามิเตอร์ l_2 มีผลให้การทำงานของช่วงความถี่ 900 MHz มีค่าแถบลง จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ l_1 ให้มีค่ากว้างขึ้น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ l_2 ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ l_2

$l_2 = 41.5 \text{ mm}$: ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ 750 – 1530 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 2680 MHz

$l_2 = 44 \text{ mm}$: ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ 740 – 1430 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 2565 MHz

$l_2 = 50 \text{ mm}$: ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ 695 – 1225 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 2310 MHz

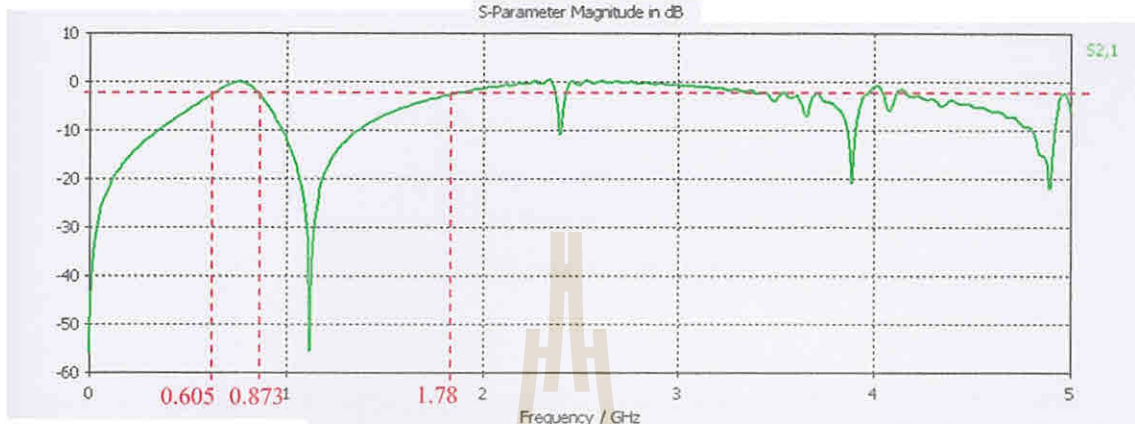
$l_2 = 55 \text{ mm}$: ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ 660 – 1008 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 2115 MHz

$l_2 = 59 \text{ mm}$: ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ 605 – 865 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 1780 MHz

2) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ l_1

ปรับค่าพารามิเตอร์ l_1 เป็น 85 mm จะได้แนวโน้มของกราฟที่ดีขึ้น ซึ่งแสดงดังรูป

ต่อไปนี้

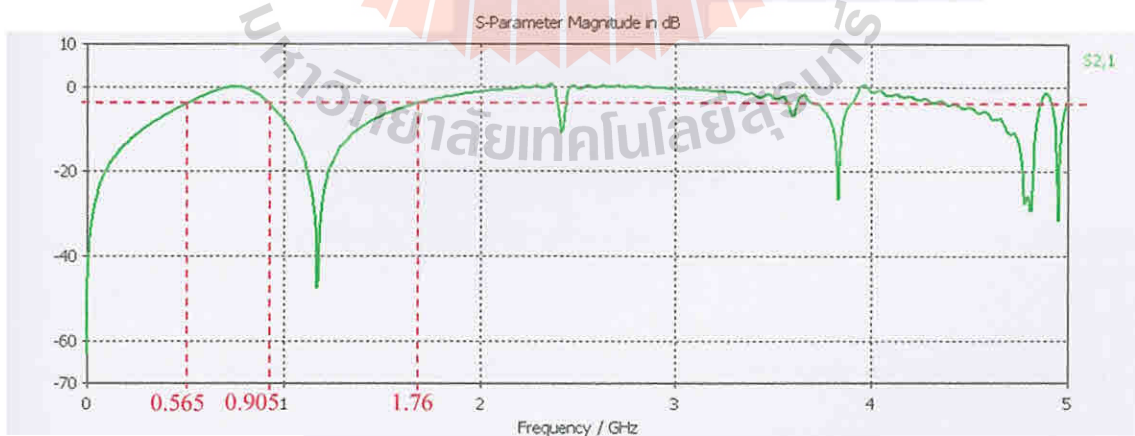


รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $l_1 = 85$ mm

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าช่วงความถี่ 900 MHz สามารถทำงานได้ที่ช่วงความถี่ 605 MHz – 873 MHz แต่ช่วงความถี่ยังไม่กว้างพอ จึงได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ w_1 ให้แคบลง เพื่อให้ช่วงความถี่ของ 900 MHz กว้างขึ้น

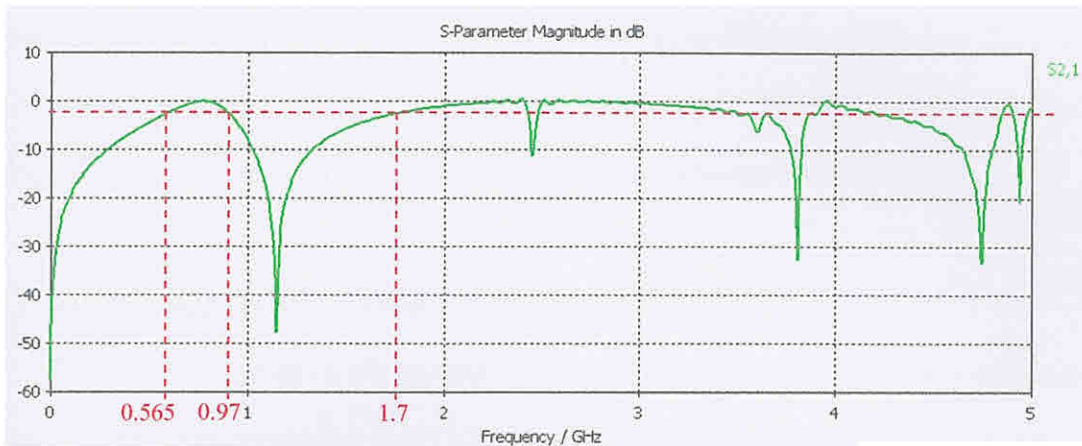
3) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ w_1

ปรับค่า w_1 เป็น 3 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ จะได้ผลการจำลองดังรูป



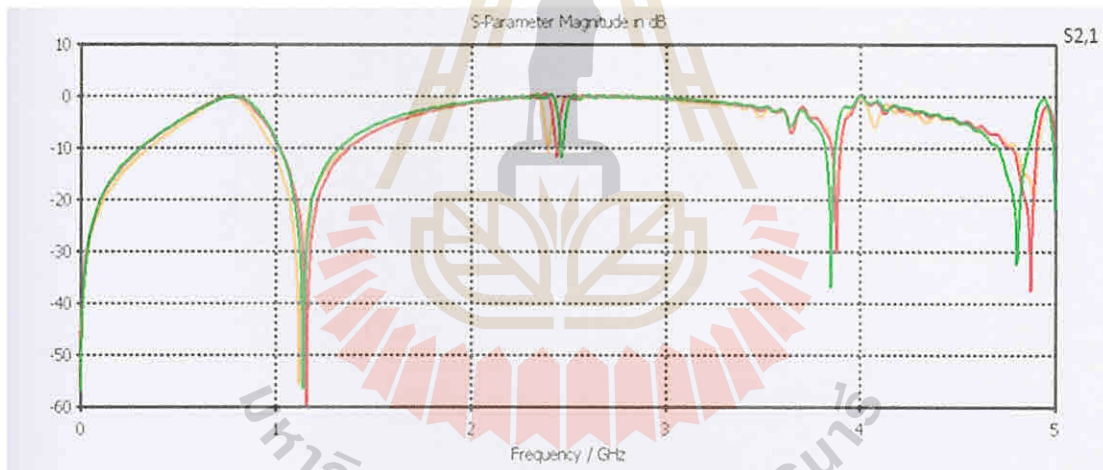
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $w_1 = 3$ mm

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าช่วงความถี่ที่สามารถทำงานได้ในช่วง 900 MHz คือ 565 MHz – 905 MHz ซึ่งยังมีช่วงความถี่ที่ยังไม่กว้างพอ จึงมีการปรับค่าเป็น 2.5 mm



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบ โดยมีค่า $w_1 = 2.5$ mm

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าช่วงความถี่ที่สามารถทำงานได้ในช่วง 900 MHz คือ 565 MHz – 970 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สามารถทำงานได้คือแล้ว



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบการปรับค่า w_1

$w_1 = 5$ mm : ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ความถี่ 605 – 873 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 1780

$w_1 = 3$ mm : ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ความถี่ 565 – 905 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 1760

$w_1 = 2.5$ mm : ที่ย่านความถี่ 900 MHz ทำงานที่ความถี่ 565 – 970 MHz ที่ย่านความถี่ 1800 MHz ทำงานที่ 1700

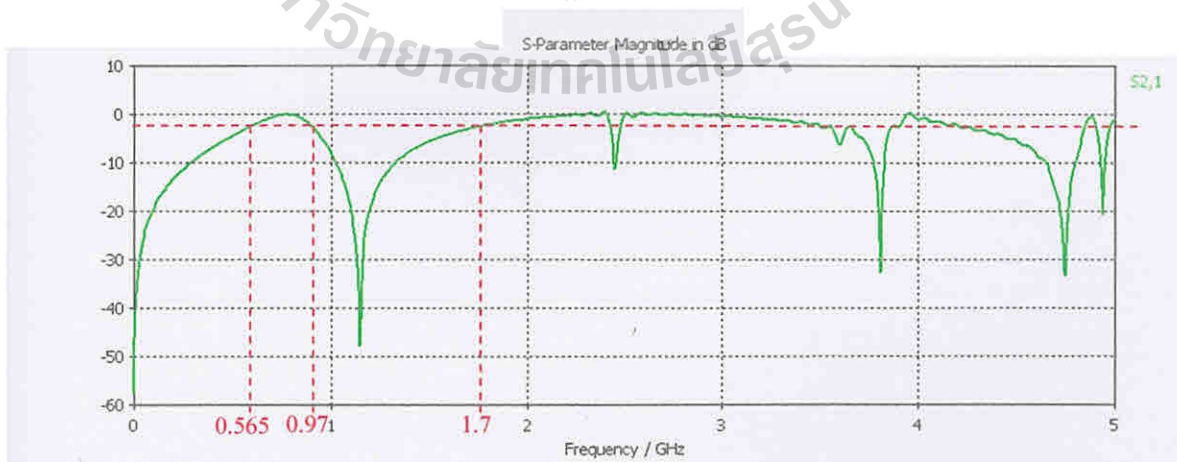
จากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนกระทั่งได้ผลการจำลองตามที่ต้องการ จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปออกแบบเป็นชิ้นงาน ดังนี้ $l_1 = 85 \text{ mm}$, $l_2 = 59 \text{ mm}$, $w_1 = 2.5 \text{ mm}$ และ $w_2 = 5 \text{ mm}$ จากนั้นนำการจำลองแบบชิ้นงาน 1 ชิ้น มาทำเป็นแบบ 5×5 และจำลองผลการออกแบบ

3.6 การออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างจริง

ในการสร้างแบบจำลองที่ได้ออกแบบมาข้างต้นนี้เป็นการออกแบบชิ้นงาน โดยการตั้งค่าแบบ Infinity ซึ่งในการออกแบบชิ้นงานจริงไม่สามารถทำได้ จึงได้ทำการออกแบบชิ้นงานแบบ 5×5 ซึ่งจะได้ผลการจำลองแบบมีค่าเหมือนกับการออกแบบแบบ Infinity แสดงดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.17 การจำลองชิ้นงานแบบ 5×5



รูปที่ 3.18 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5

จากการจำลองผลในรูปที่ 3.18 พบว่าการจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5 มีผลการจำลองที่เหมือนกันกับการออกแบบชิ้นงานแบบ 1×1 จึงได้นำการจำลองแบบชิ้นงานแบบ 5×5 มาทำกระจกเลือกความถี่ผ่านย่าน 900 MHz และ 1800 MHz ต่อไป

3.7 สรุป

ในบทนี้ ที่กล่าวมาเป็นการออกแบบกระจกแบบเลือกความถี่ผ่าน ซึ่งออกแบบไว้ให้ความถี่ย่าน 900 MHz และ 1800 MHz สามารถผ่านได้ และได้ทำการปรับเปลี่ยค่าพารามิเตอร์ความกว้างและความยาวของแผ่นทองแดงทั้งในย่าน 900 MHz และ 1800 MHz เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าพารามิเตอร์ S_{21} ที่มีความเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งค่าได้ในการออกแบบ คือ ค่าความกว้างของแผ่นทองแดงที่ย่าน 900 MHz ด้านนอกเท่ากับ 85 mm ค่าความกว้างของแผ่นทองแดงที่ย่าน 900 MHz ด้านในเท่ากับ 82.5 mm ค่าความกว้างของแผ่นทองแดงที่ย่าน 1800 MHz ด้านนอกเท่ากับ 59 mm และค่าความกว้างของแผ่นทองแดงที่ย่าน 1800 MHz ด้านในเท่ากับ 54 mm เพื่อที่จะได้นำผลไปสร้างชิ้นงานจริงต่อไป



บทที่ 4

การทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

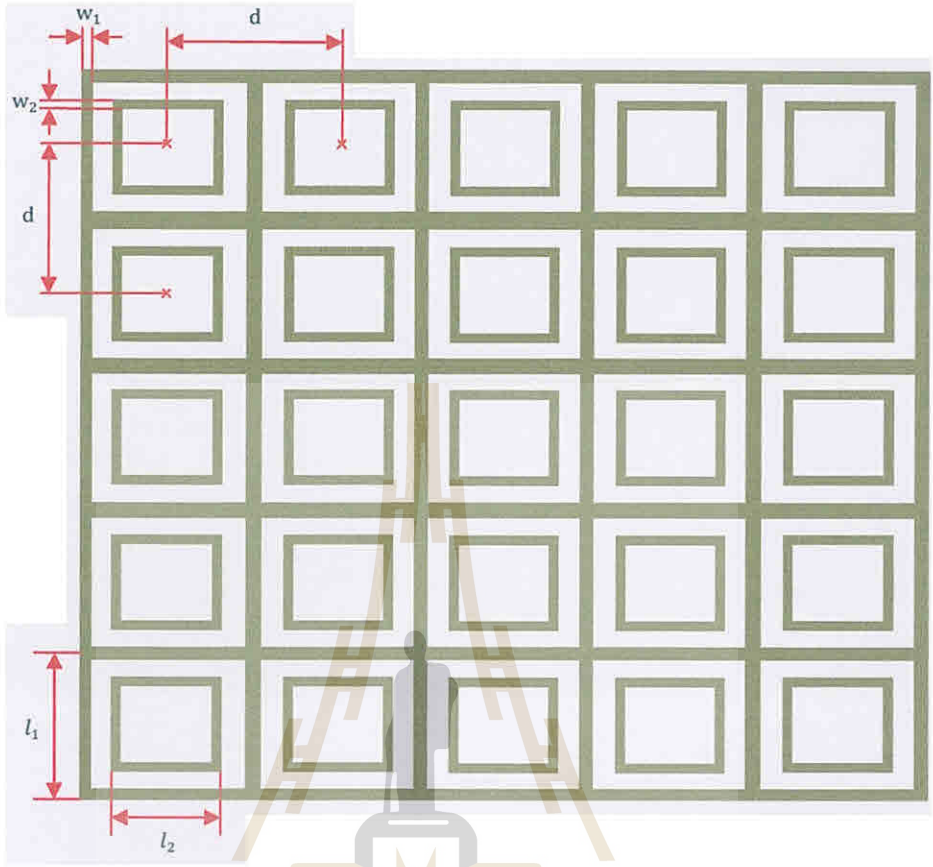
จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 และบทที่ 3 ทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ และพร้อมที่จะนำไปทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ แล้วนำมาวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับทฤษฎี เพื่อตรวจสอบวัตถุประสงค์ของโครงการ

4.2 กระจกเลือกความถี่ผ่านต้นแบบ

ในการสร้างกระจกเลือกความถี่ผ่านนั้นจะเริ่มจากการออกแบบ โดยใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองผลการทดลอง ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้ว จากนั้นนำมาขึ้นงานต้นแบบกระจกเลือกความถี่ผ่านซึ่งมีขนาดดังรูปต่อไปนี้

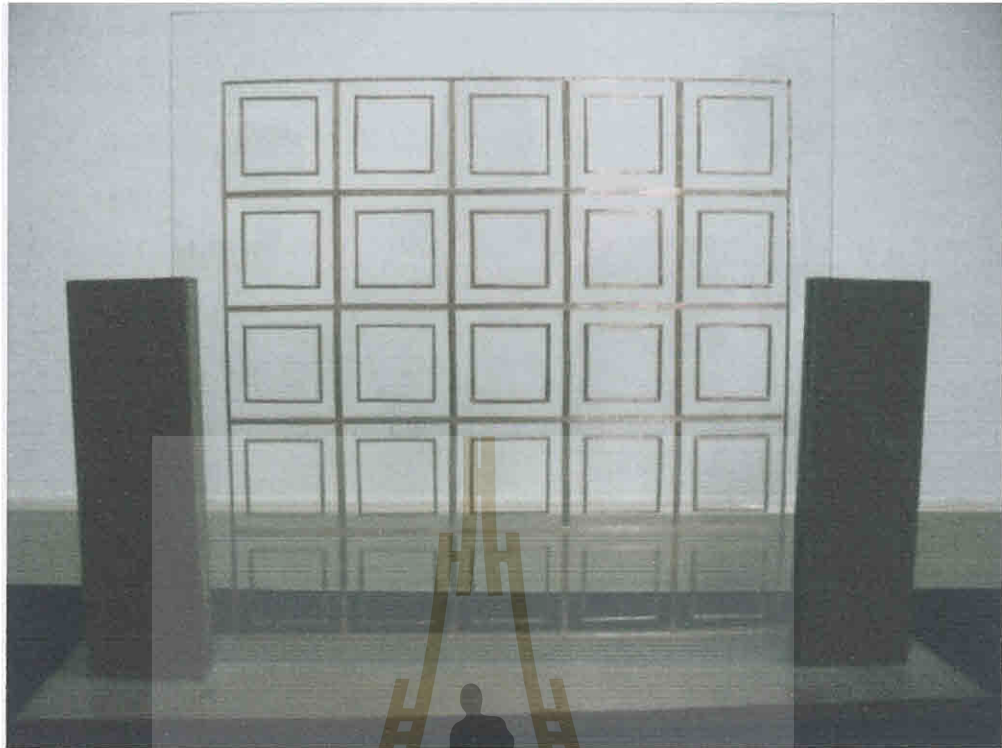
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของกระจกเลือกความถี่ผ่านต้นแบบ

พารามิเตอร์	Scale (mm.)
l_1	85
l_2	59
w_1	2.5
w_2	5
d	85



รูปที่ 4.1 กระจกเลือกความถี่ผ่านต้นแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.2 ชิงงานต้นแบบ

ในการวัดผลชิงงานมีอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. สายอากาศไดโพล 2 ตัว สามารถใช้งานในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz

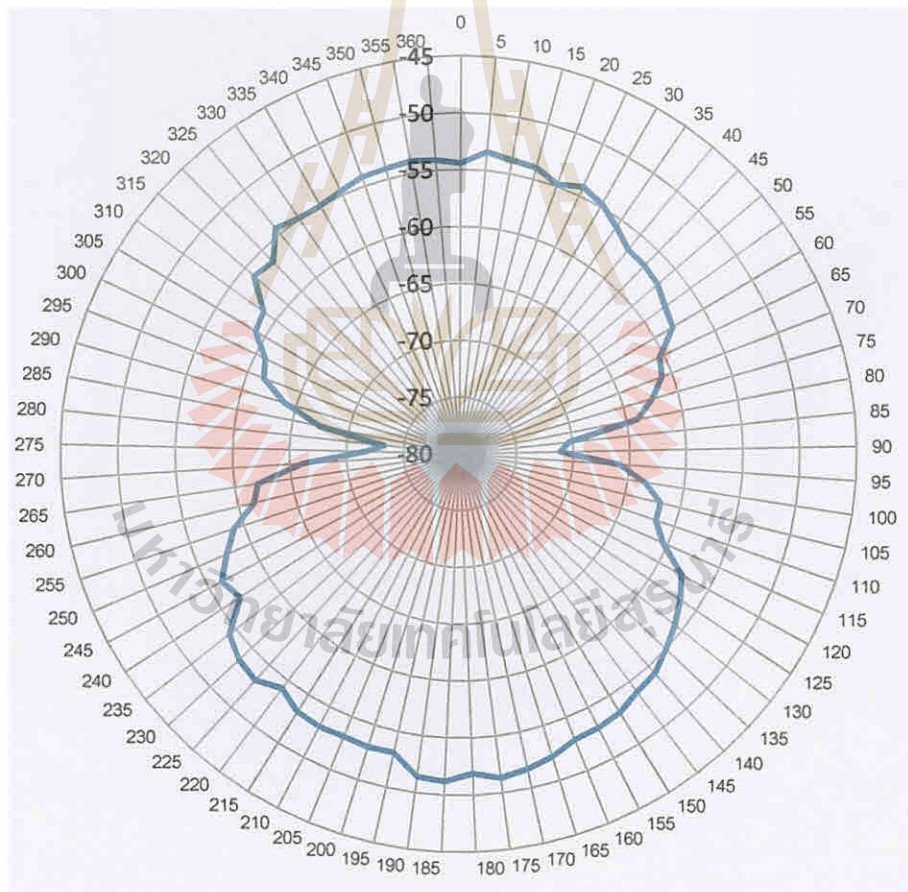


รูปที่ 4.3 สายอากาศไดโพล

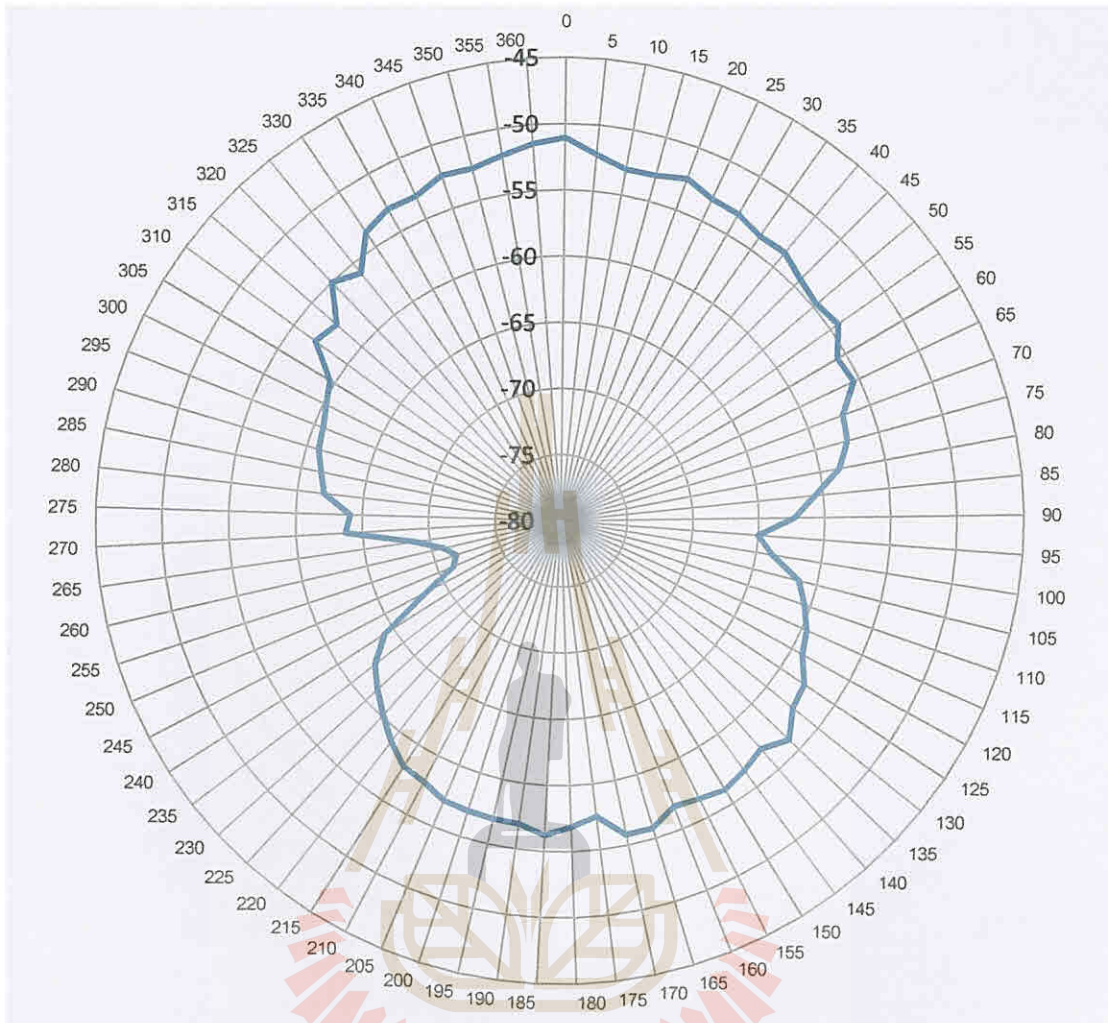
สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- สาย RG174A/U ยาว 3 เมตร
- Frequency range: 824 ~ 960 MHz // 1710 ~ 1990 MHz
- Impedance: 50 Ohm nominal
- Gain: 3.5dBi
- Radiation: Omni
- Polarization: Vertical
- Wave: Half Wave Dipole

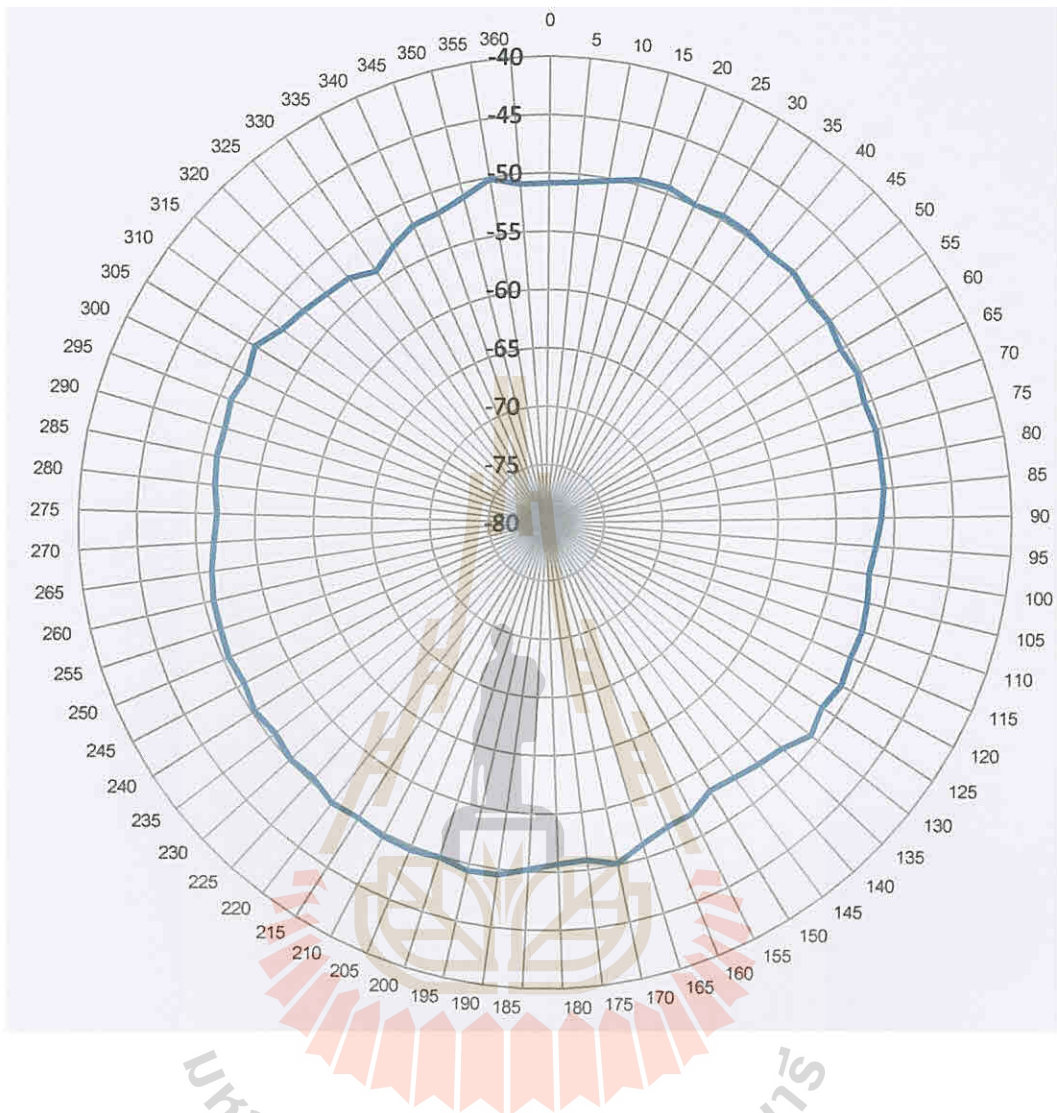
และมีแบบรูปการแผ่พลังงานคลื่นตามรูปต่างๆ ดังนี้



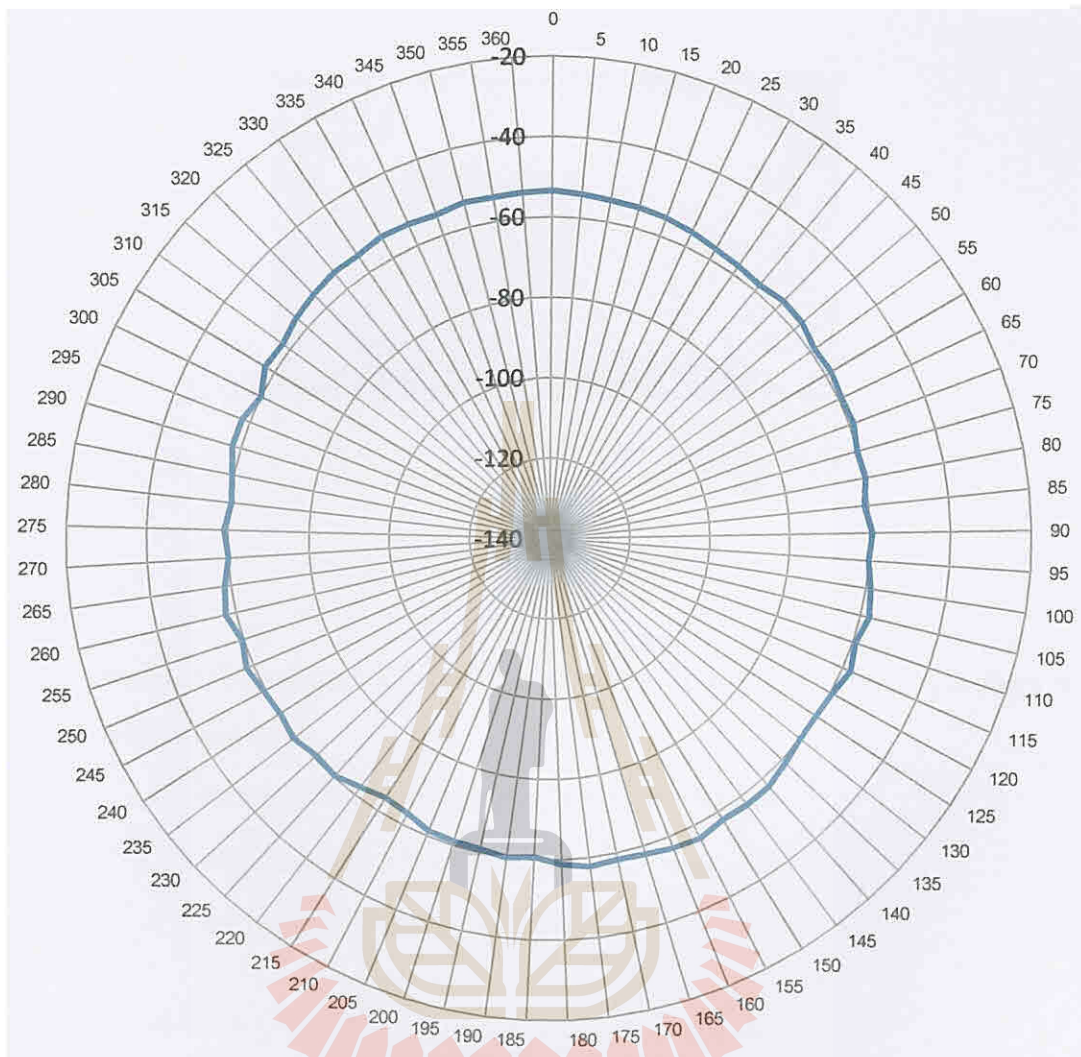
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่รังสีของควมถี่ 900 MHz บนระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่รังสีของควมถี่ 1800 MHz บนระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่รังสีของควมถี่ 900 MHz บนระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่รังสีของควมถี่ 1800 MHz บนระนาบสนามแม่เหล็ก

2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)



รูปที่ 4.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

สำหรับการใช้งานในการวัดผลของเครื่อง โครงข่าย ในตอนเริ่มต้นจะทำการ calibrate แบบ 2-port ก่อนซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ตั้งช่วงความถี่ที่ต้องการวัด (เช่น 2GHz – 6GHz) โดย

- กดปุ่ม Start แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น
- กดปุ่ม Stop แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น

2) กดปุ่ม Cal จากนั้น

- เลือก “CALIBRATE MANU”
- เลือก “FULL 2-PORT” จากนั้นจะปรากฏเมนูให้เลือก 3 ตัว ดังนี้

1) REFLECTION 2) TRANSMISSION 3) ISOLATION

- ให้เลือกทำทีละเมนู โดยเริ่มจาก

2.1 REFLECTION

- เลือก REFLECTION จากนั้นให้ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐานทั้ง 3 ตัว โดยเริ่มจาก

- ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ

Port 1 (2.4 mm.) แล้วเลือก “OPEN” รองนกว่าคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)

- ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ

Port 2 (2.4 mm.) แล้วเลือก “OPEN” รองนกว่าคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)

- ต่ออุปกรณ์โหลคมาตรฐาน SHORT (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.) แล้วเลือก “SHORT” รองจนกว่าคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)

- ต่ออุปกรณ์โหลคมาตรฐาน SHORT (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.) แล้วเลือก “SHORT” รองจนกว่าคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)

- ต่ออุปกรณ์โหลคมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.) แล้วเลือก “LOAD” จากนั้นเลือก “BROADBAND” รองจนกว่าคำว่า BROADBAND ถูกขีดเส้นใต้ (BROADBAND) จากนั้นเลือก “DONE LOADS”

- ต่ออุปกรณ์โหลคมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.) แล้วเลือก “LOAD” จากนั้นเลือก “BROADBAND” รองจนกว่าคำว่า BROADBAND ถูกขีดเส้นใต้ (BROADBAND) จากนั้นเลือก “DONE LOADS”

- เลือก “STANDARDS DONE”

- ให้รองจนกว่า “COMPUTING CAL COEFFICIENTS” ที่กระพริบอยู่

หายไป

- จากนั้น ให้ข้ามทำเมนูที่สามก่อน คือ “ISOLATION” โดยที่ยังไม่ต้องถอดอุปกรณ์โหลคมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ตออก

2.2 ISOLATION

- เลือก “ISOLATION”

- เลือก “OMIT ISOLATION” แล้วรองจนกว่าคำว่า ISOLATION ถูกขีดเส้นใต้ (ISOLATION)

- ถอดอุปกรณ์โหลคมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ตออก

- ต่อสายนำสัญญาณพอร์ต 1 กับ พอร์ต 2 เข้าด้วยกัน

- จากนั้น ให้ทำเมนูที่สอง คือ “TRANSMISSION”

2.3 TRANSMISSION

- เลือก “TRANSMISSION”

- เลือก “DO BOTH FWD+REV”

- รองจนกว่า TRANSMISSION ถูกขีดเส้นใต้ (TRANSMISSION)

- ถอดสายนำสัญญาณทั้งสองแยกออกจากกัน

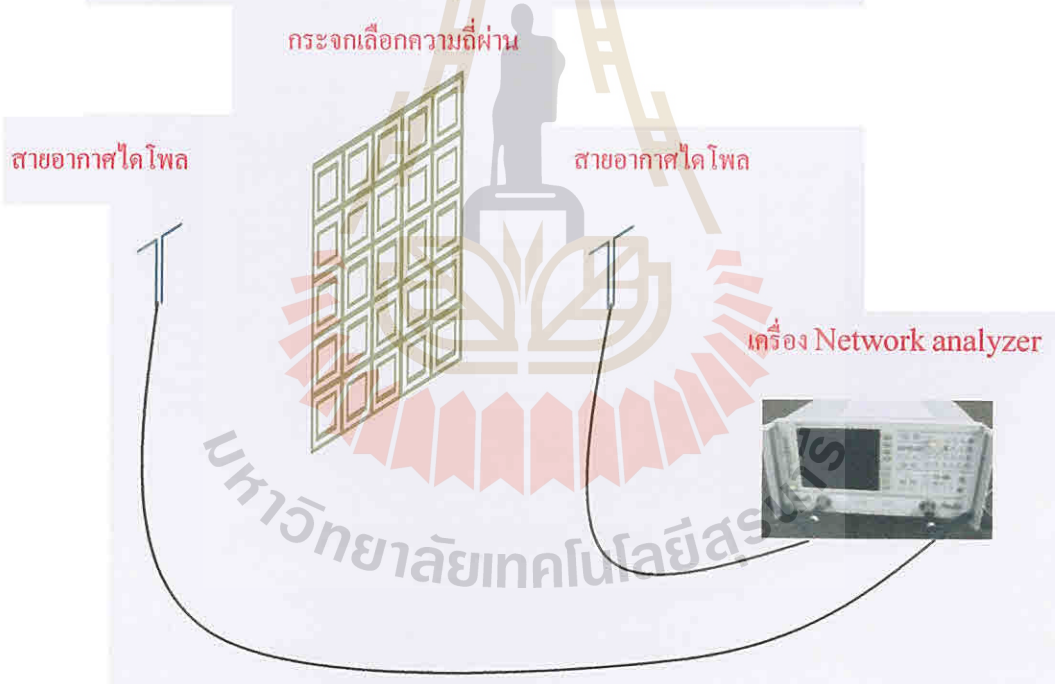
- ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.)
- ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.)
- เลือก “DON’T 2-PORT CAL”

3) ให้รอนจนคำว่า “COMPUTING CAL COEFFICIENTS” ที่กระพริบอยู่หายไป ถือเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ CALIBRATION สำหรับ 2-PORT

หลังจาก calibrate เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้จัดตั้งอุปกรณ์ให้เรียบร้อย ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

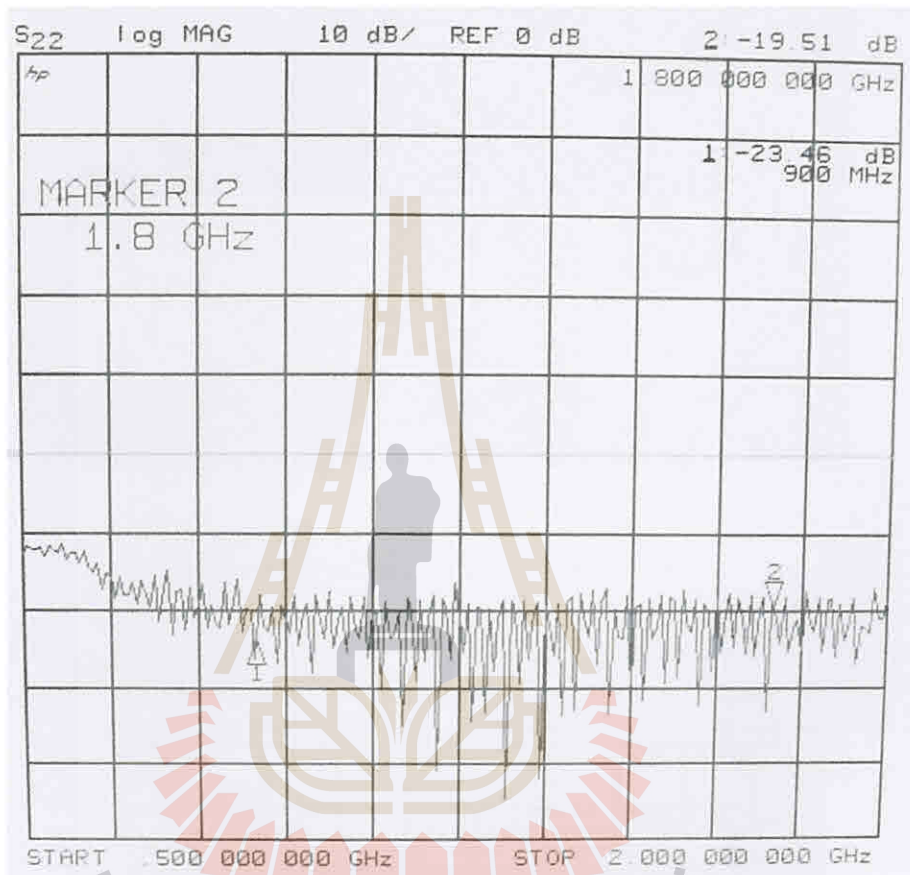
4.3 ผลการวัดทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.9 ดังนี้



รูปที่ 4.9 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล

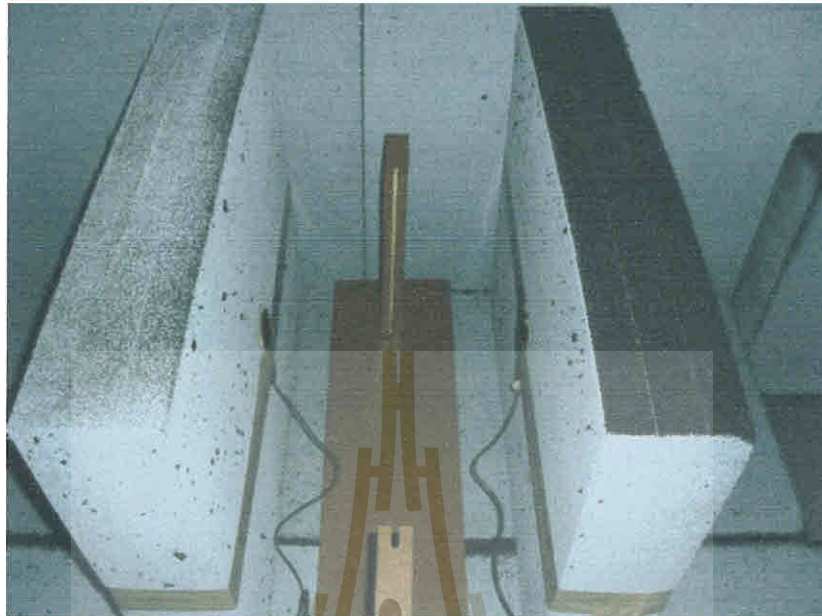
- 1) เริ่มจากวัดทดสอบสายอากาศไดโพล 2 ตัว ว่าใช้งานในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz ได้หรือไม่ โดยการวางสายอากาศไดโพล 2 ตัว ในแนวเดียวกัน ให้ตรงกัน ความสูงเท่ากัน ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.6 ดังนี้



รูปที่ 4.10 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ของสายอากาศไดโพล 2 ตัว

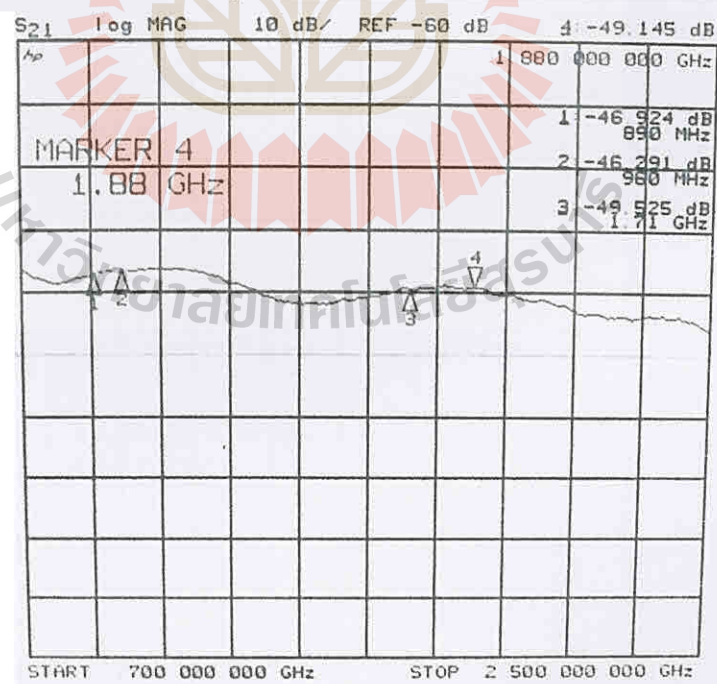
จากภาพผลการทดสอบรูปที่ 4.10 พบว่า สายอากาศไดโพลทั้ง 2 ตัว เริ่มใช้งานได้ตั้งแต่ ประมาณ 500 MHz – 2.5 GHz

2) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านอากาศว่าง ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 การติดตั้งการวัดผลผ่านอากาศว่าง

ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูป



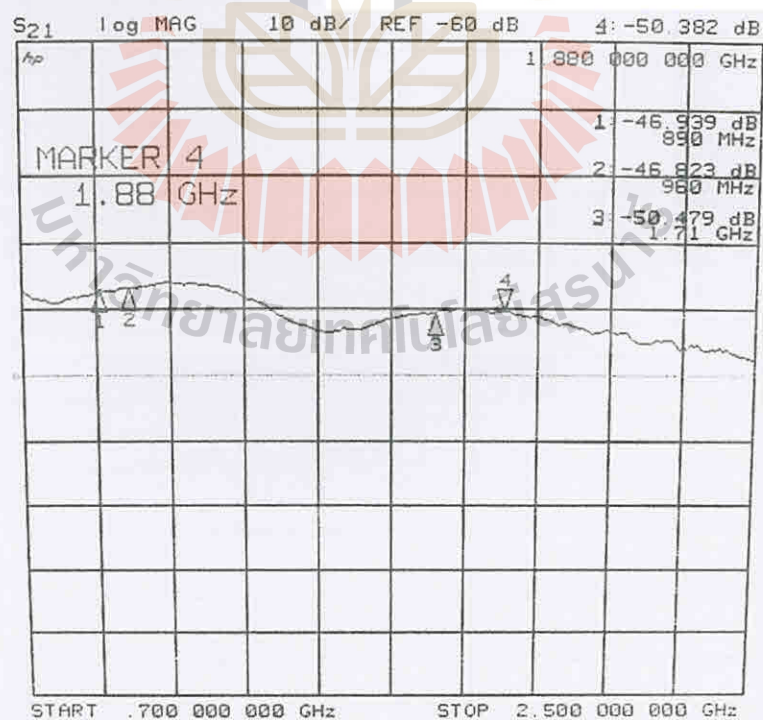
รูปที่ 4.12 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านอากาศว่าง

3) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกใส ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 การติดตั้งการวัดผลผ่านกระจกใส

ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูป



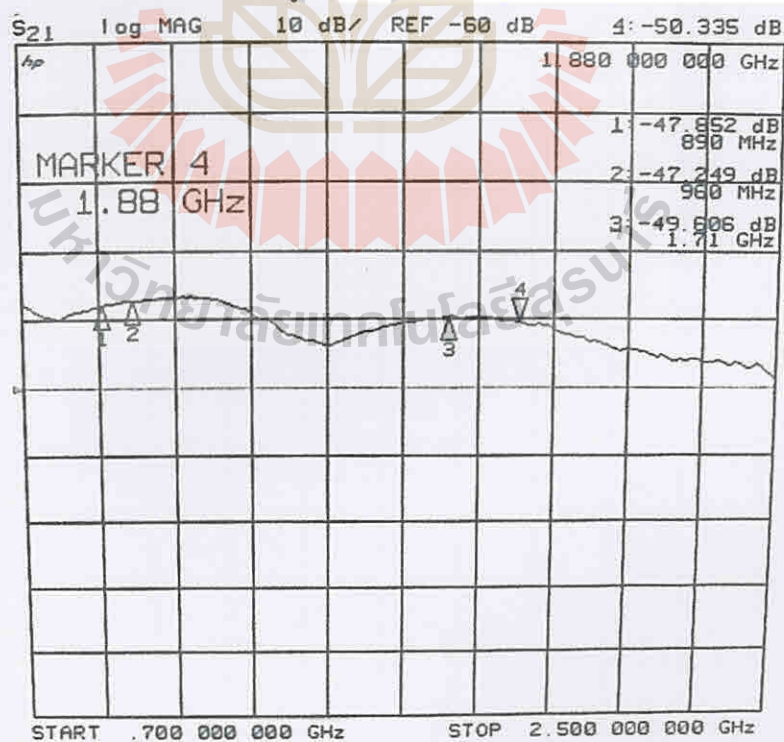
รูปที่ 4.14 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านกระจกใส

4) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกกรองแสง ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 การติดตั้งการวัดผลผ่านกระจกกรองแสง

ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูป

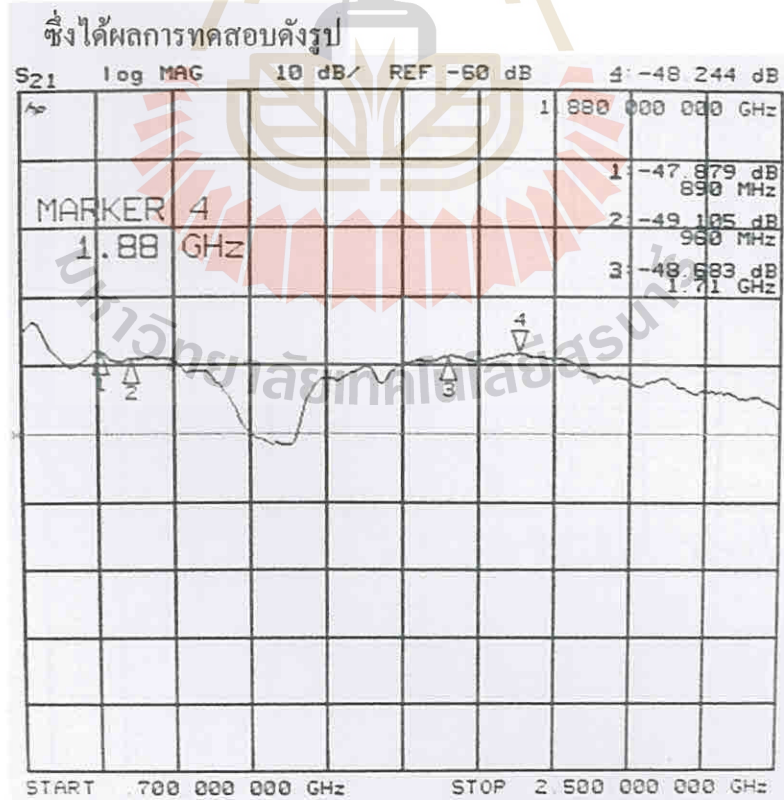


รูปที่ 4.16 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านกระจกกรองแสง

5) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกเลือกความถี่ผ่าน ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.17 การติดตั้งการวัดผลกระจกเลือกความถี่ผ่าน



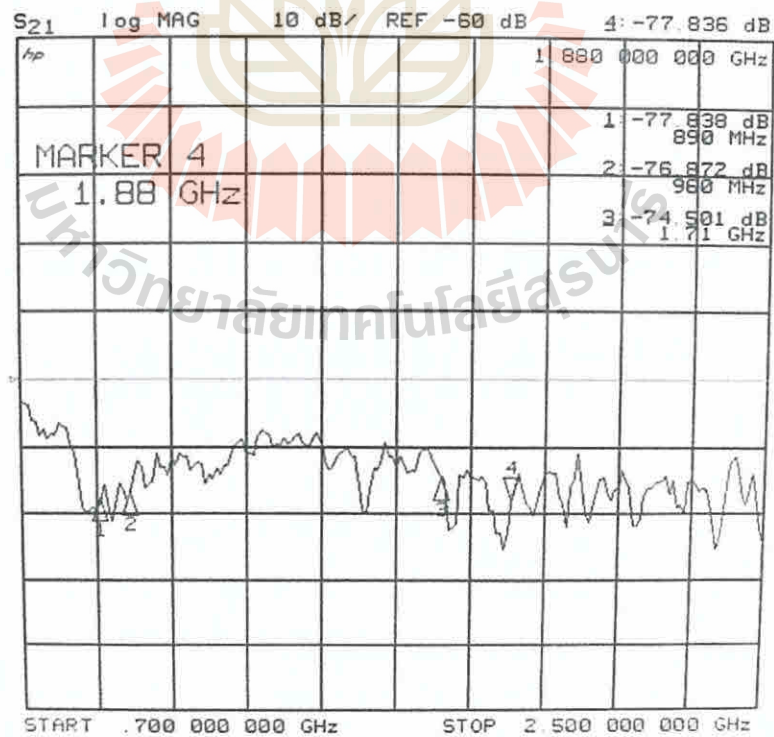
รูปที่ 4.18 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ของกระจกเลือกความถี่ผ่าน

6) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านแผ่น โลหะ ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 การติดตั้งการวัดผลผ่านแผ่น โลหะ

ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูป

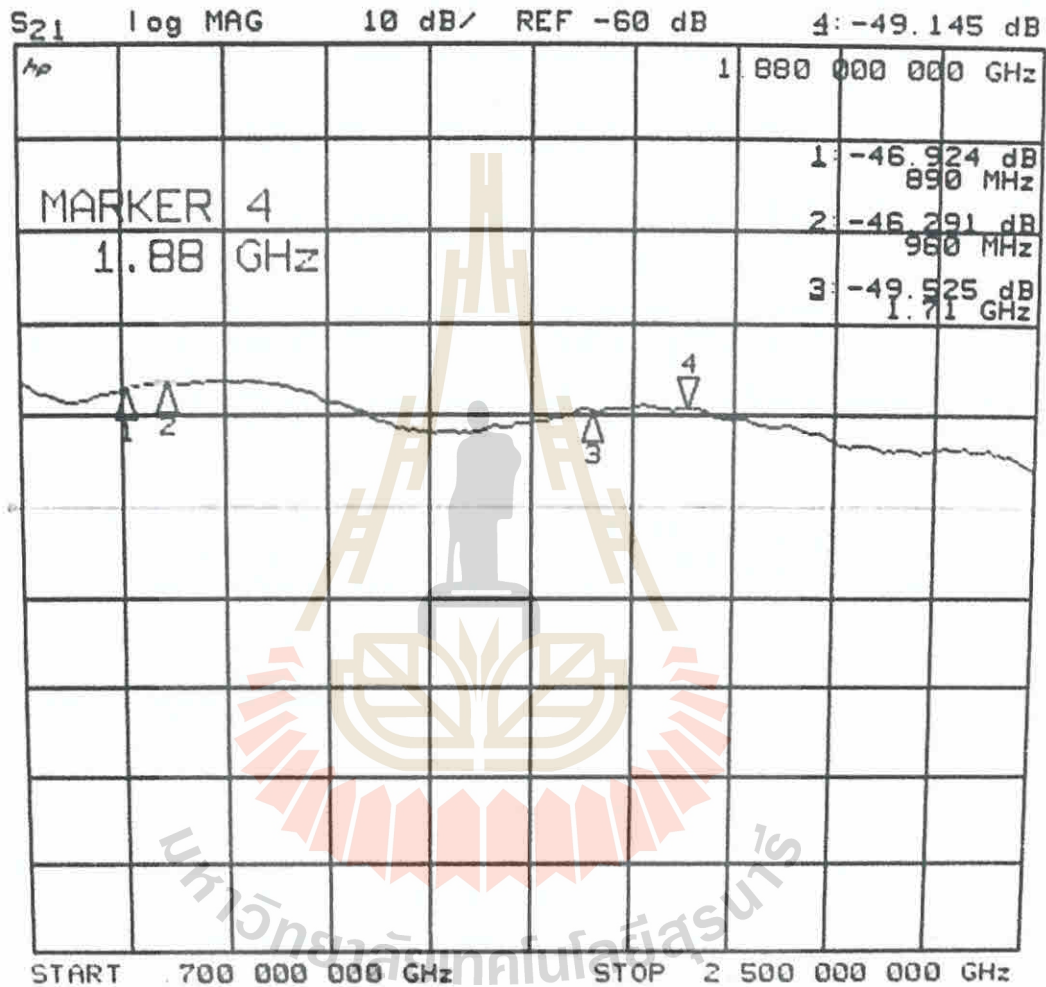


รูปที่ 4.20 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านแผ่น โลหะ

เมื่อเสร็จสิ้นวิธีการวัดทดสอบทั้งหมด ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดทดสอบข้างต้น ซึ่งมีดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการบันทึกการวัดการส่งผ่านคลื่น ที่ย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz

1. แสดงผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่าง



รูปที่ 4.21 ผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านอากาศว่าง

จากรูปที่ 4.21 มีผลค่า S_{21} ดังนี้

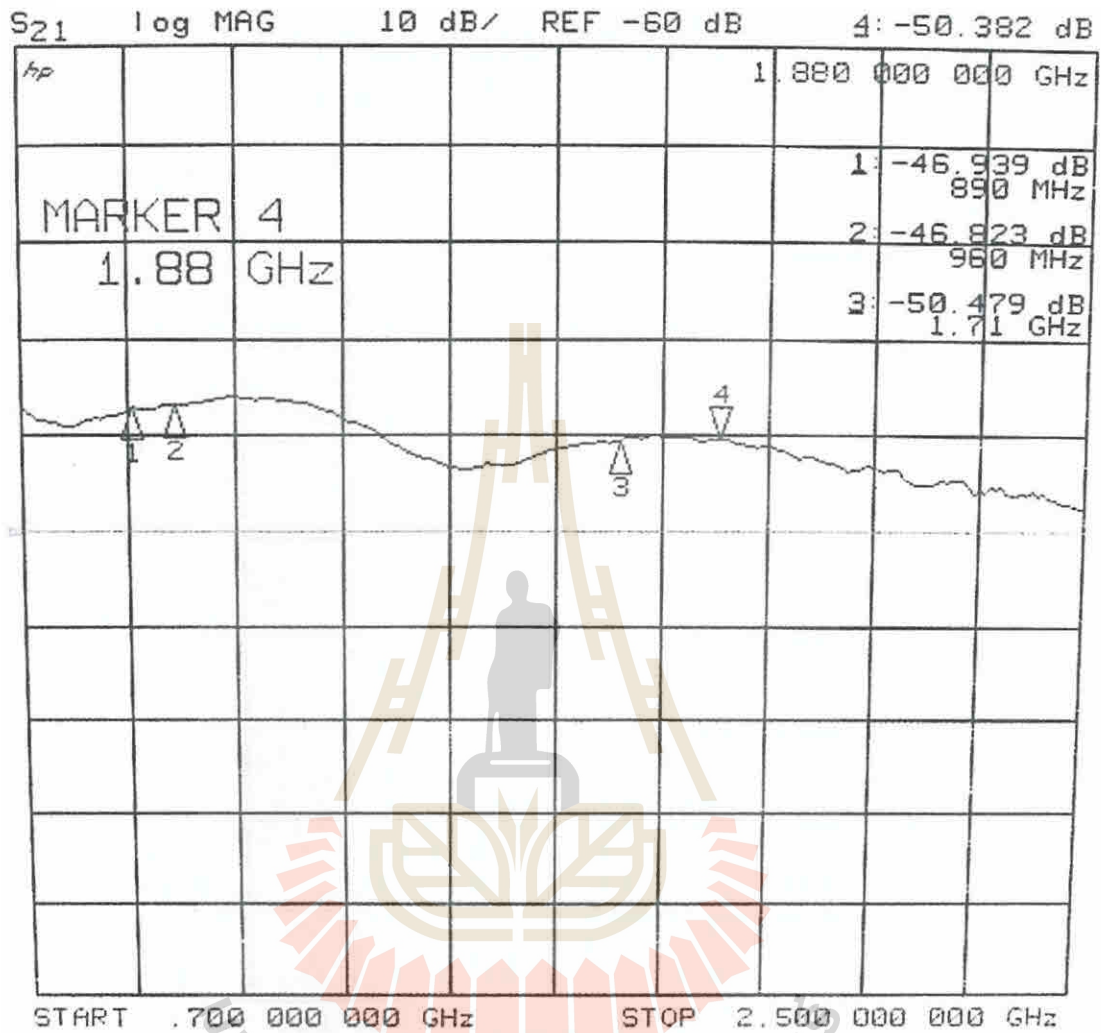
ที่ลูกศรที่ 1 ซึ่งที่ความถี่ 890 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -46.924$ dB

ที่ลูกศรที่ 2 ซึ่งที่ความถี่ 960 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -46.291$ dB

ที่ลูกศรที่ 3 ซึ่งที่ความถี่ 1710 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -49.525$ dB

ที่ลูกศรที่ 4 ซึ่งที่ความถี่ 1880 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -49.145$ dB

2. แสดงผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นผ่านกระจกใส



รูปที่ 4.22 ผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านกระจกใส

จากรูปที่ 4.22 มีผลค่า S_{21} ดังนี้

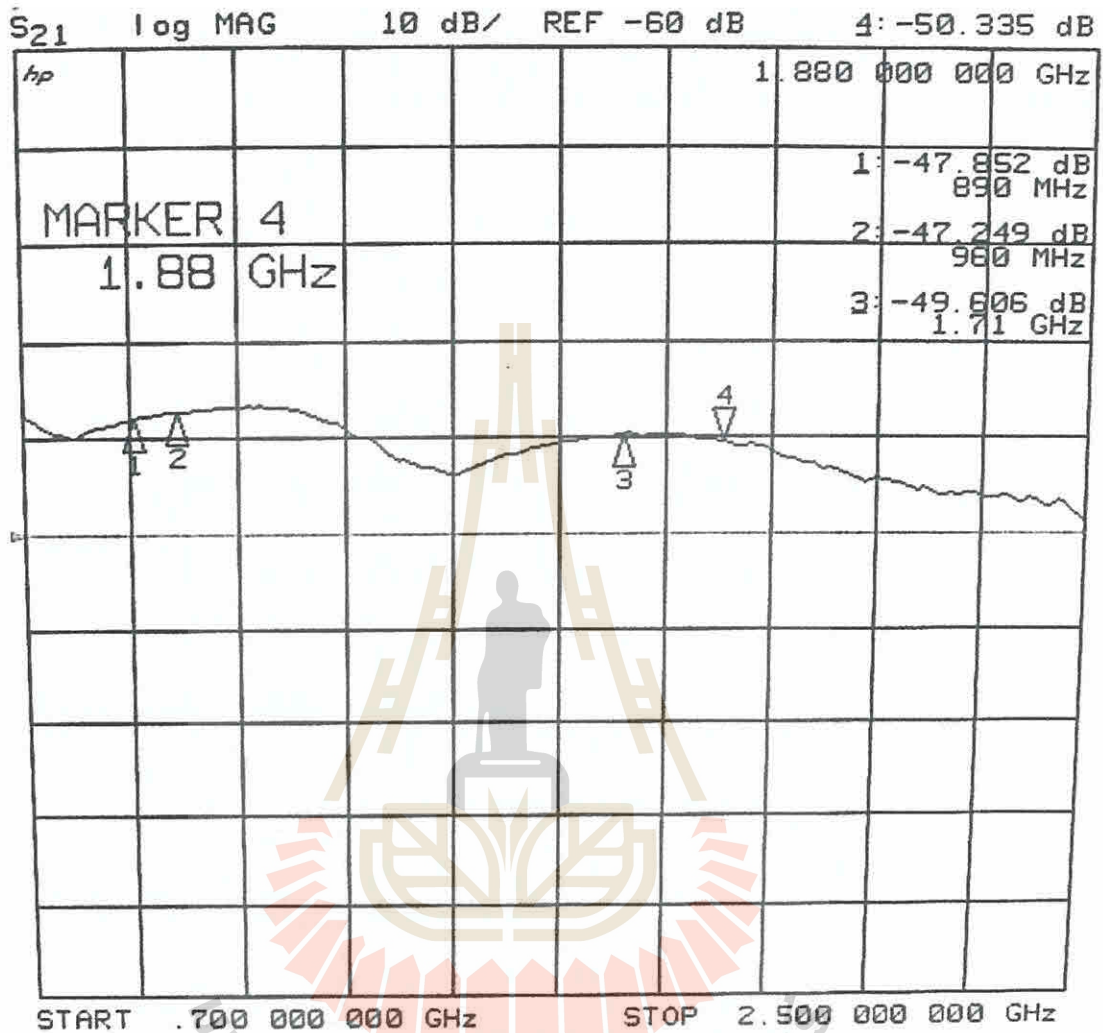
ที่ลูกศรที่ 1 ซึ่งที่ความถี่ 890 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -49.939$ dB

ที่ลูกศรที่ 2 ซึ่งที่ความถี่ 960 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -46.823$ dB

ที่ลูกศรที่ 3 ซึ่งที่ความถี่ 1710 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -50.479$ dB

ที่ลูกศรที่ 4 ซึ่งที่ความถี่ 1880 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -50.382$ dB

3. แสดงผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นผ่านกระจกกรองแสง

รูปที่ 4.23 ผลค่าพารามิเตอร์ S₂₁ โดยส่งผ่านกระจกกรองแสง

จากรูปที่ 4.23 มีผลค่า S₂₁ ดังนี้

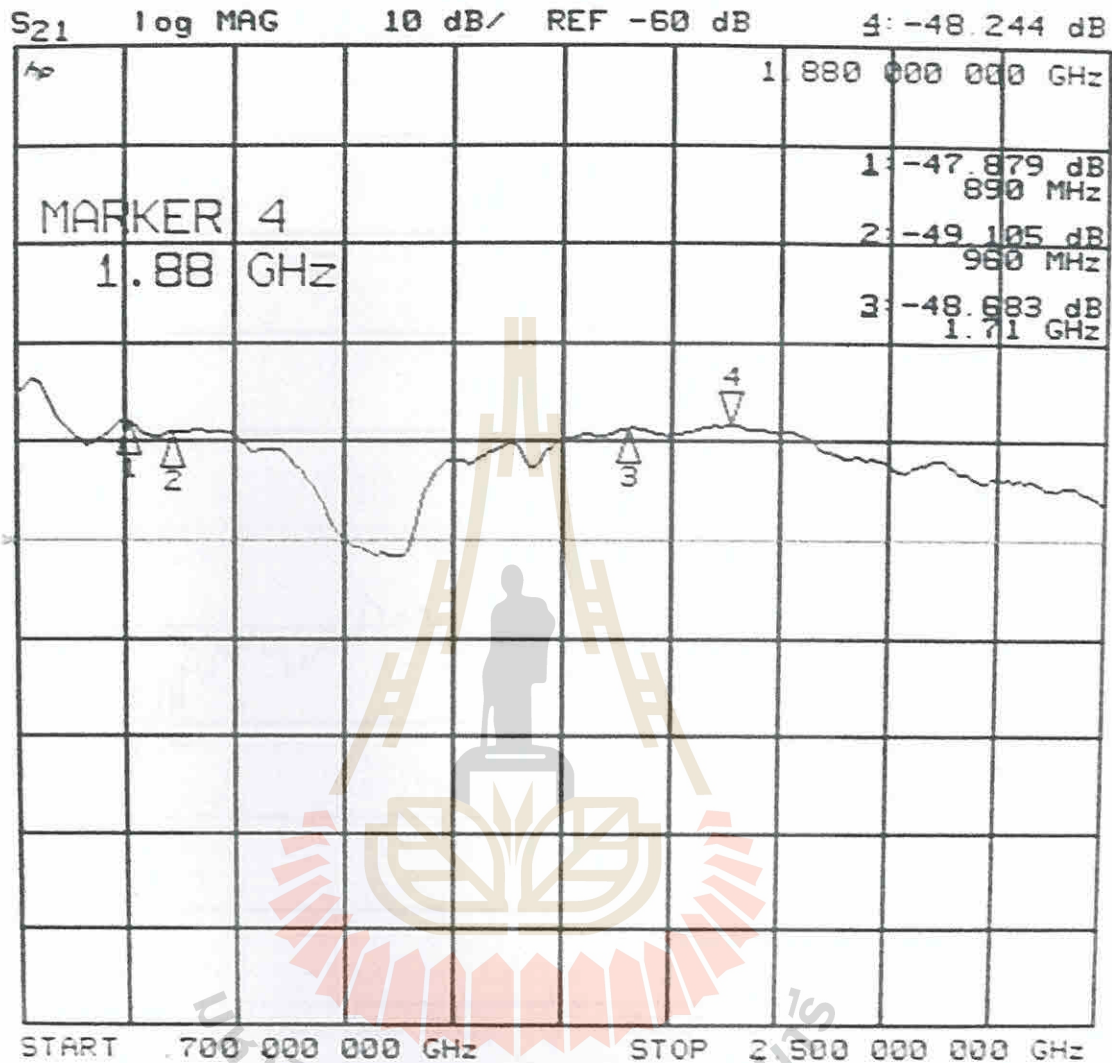
ที่ลูกศรที่ 1 ซึ่งที่ความถี่ 890 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -47.852 dB

ที่ลูกศรที่ 2 ซึ่งที่ความถี่ 960 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -47.249 dB

ที่ลูกศรที่ 3 ซึ่งที่ความถี่ 1710 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -49.606 dB

ที่ลูกศรที่ 4 ซึ่งที่ความถี่ 1880 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -50.335 dB

4. แสดงผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นผ่านกระจกเลือกความถี่ผ่าน

รูปที่ 4.24 ผลค่าพารามิเตอร์ S₂₁ โดยส่งผ่านกระจกเลือกความถี่ผ่าน

จากรูปที่ 4.24 มีผลค่า S₂₁ ดังนี้

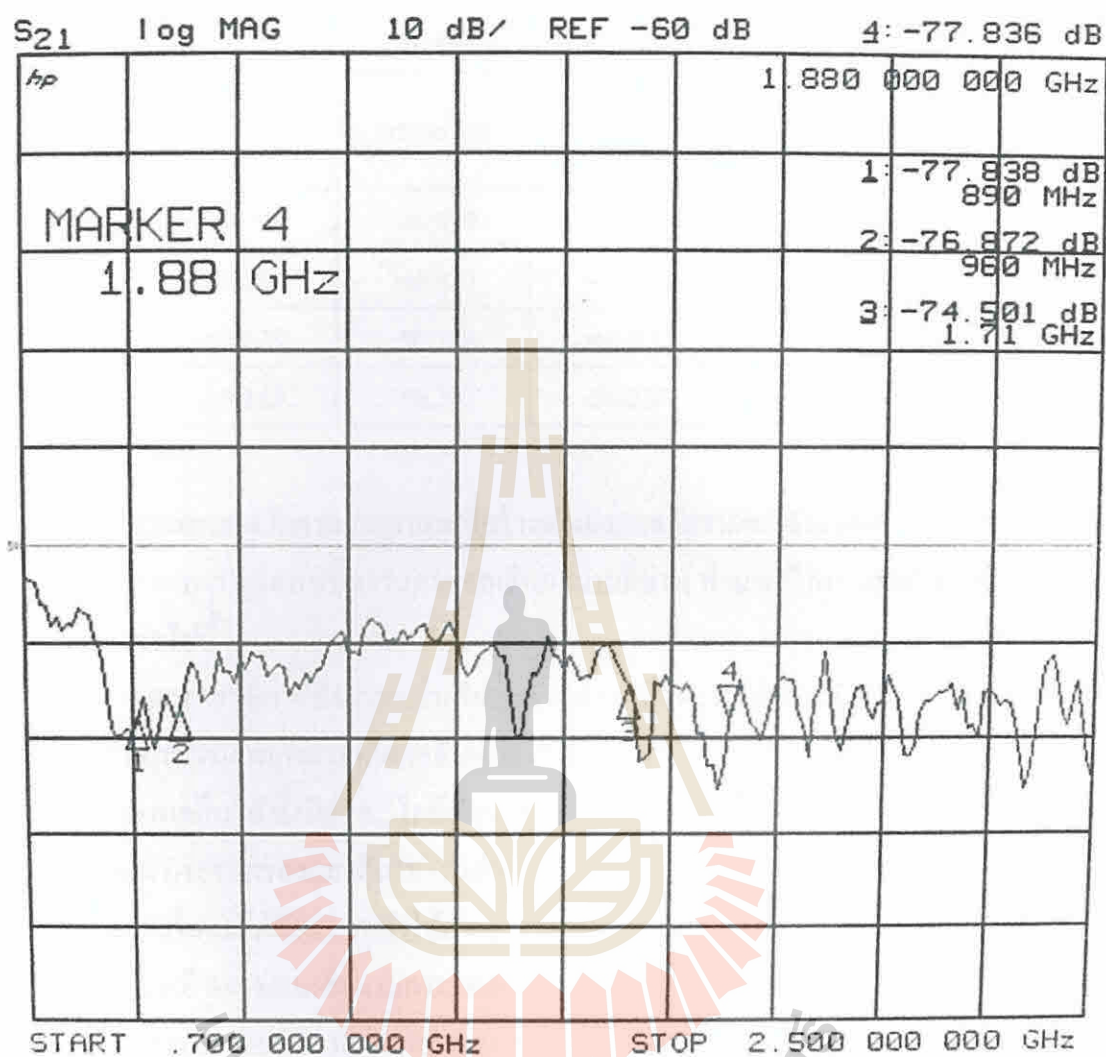
ที่ลูกศรที่ 1 ซึ่งที่ความถี่ 890 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -47.879 dB

ที่ลูกศรที่ 2 ซึ่งที่ความถี่ 960 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -49.105 dB

ที่ลูกศรที่ 3 ซึ่งที่ความถี่ 1710 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -48.683 dB

ที่ลูกศรที่ 4 ซึ่งที่ความถี่ 1880 MHz ได้ ค่า S₂₁ = -48.244 dB

5. แสดงผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นผ่านแผ่นโลหะ

รูปที่ 4.25 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S_{21} โดยส่งผ่านแผ่นโลหะ

จากรูปที่ 4.25 มีผลค่า S_{21} ดังนี้

ที่ลูกศรที่ 1 ซึ่งที่ความถี่ 890 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -77.838$ dB

ที่ลูกศรที่ 2 ซึ่งที่ความถี่ 960 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -76.872$ dB

ที่ลูกศรที่ 3 ซึ่งที่ความถี่ 1710 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -74.501$ dB

ที่ลูกศรที่ 4 ซึ่งที่ความถี่ 1880 MHz ได้ ค่า $S_{21} = -77.836$ dB

ตารางที่ 4.2 ผลการบันทึกการส่งผ่านคลื่นผ่านวัสดุต่างๆ

ความถี่ (MHz)	ค่าพารามิเตอร์ S_{21} ที่ผ่านวัสดุต่างๆ (dB)				
	อากาศว่าง	กระจกใส	กระจกกรองแสง	ชิ้นงานกระจกเลือกความถี่	แผ่นโลหะ
890	-46.924	-46.939	-47.852	-47.879	-77.838
960	-46.291	-46.823	-47.249	-49.105	-76.872
1710	-49.525	-50.749	-49.606	-48.683	-74.501
1880	-49.145	-50.382	-50.335	-48.244	-77.836

4.4 การเปรียบเทียบผลวัดจากสายอากาศที่สร้างจริงและผลวัดจากการจำลองผล

จากผลการทดสอบชิ้นงานกระจกเลือกความถี่ผ่าน นำมาเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดต่างๆ แสดงได้ดังต่อไปนี้

จากผลการวัดการส่งผ่านคลื่นที่ผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ นำมาเปรียบเทียบกับผลจากการส่งผ่านคลื่นผ่านชิ้นงานกระจกเลือกคลื่นผ่าน พบว่าที่ความถี่ 890 MHz ชิ้นงานกระจกเลือกความถี่สามารถส่งผ่านคลื่นได้ ซึ่งมีค่า S_{21} ใกล้เคียงกับการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่าง และการส่งคลื่นผ่านกระจกใสและกระจกกรองแสงก็สามารถส่งผ่านคลื่นได้ค่า S_{21} ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีโลหะกั้น คลื่นจะเดินทางผ่านโลหะได้น้อยมาก ทำให้ค่า S_{21} มีค่าลดลงมาก

ที่ความถี่ 960 MHz ชิ้นงานกระจกเลือกความถี่สามารถส่งผ่านคลื่นได้ ซึ่งมีค่า S_{21} ใกล้เคียงกับการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่าง และการส่งคลื่นผ่านกระจกใสและกระจกกรองแสงก็สามารถส่งผ่านคลื่นได้ค่า S_{21} ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีโลหะกั้น คลื่นจะเดินทางผ่านโลหะได้น้อยมาก ทำให้ค่า S_{21} มีค่าน้อยมาก

พบว่าที่ความถี่ 1710 MHz ชิ้นงานกระจกเลือกความถี่สามารถส่งผ่านคลื่นได้ ซึ่งมีค่า S_{21} ใกล้เคียงกับการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่าง และการส่งคลื่นผ่านกระจกใสและกระจกกรองแสงก็สามารถส่งผ่านคลื่นได้ค่า S_{21} ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อส่งผ่านโลหะ คลื่นจะเดินทางผ่านโลหะได้น้อยมาก ทำให้ค่า S_{21} มีค่าน้อยมาก

พบว่าที่ความถี่ 1880 MHz ชิ้นงานกระจกเลือกความถี่สามารถส่งผ่านคลื่นได้ ซึ่งมีค่า S_{21} ใกล้เคียงกับการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่าง และการส่งคลื่นผ่านกระจกใสและกระจกกรองแสงก็สามารถส่งผ่านคลื่นได้ค่า S_{21} ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อส่งผ่านโลหะ คลื่นจะเดินทางผ่านโลหะได้น้อยมาก ทำให้ค่า S_{21} มีค่าน้อยมาก

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ S_{21} ของชิ้นงาน กระจกเลือกความถี่ที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการวัดที่ได้จากชิ้นงานกระจกเลือกความถี่ สามารถส่งผ่านคลื่นความถี่ในย่าน 900 MHz และ 1800 MHz ได้



บทที่ 5

บทสรุปของโครงการ

5.1 บทสรุป

โครงการระจกเลือกความถี่ผ่านในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800MHz มีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. สายอากาศความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz
2. หัวคอนเน็คเตอร์ (SMA)
4. ชุดอุปกรณ์ในการวัดค่า S21 และแบบรูปการส่งผ่านคลื่นของสายอากาศ ซึ่งได้แก่
 - 4.1 เครื่อง Network Analyzer
 - 4.2 ห้อง Chamber

ในการศึกษาเรื่อง Frequency Selective Surfaces และพบปัญหาการขัดข้องของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามสถานที่ต่างๆ โดยเฉพาะภายในตึกอาคาร บ้านเรือน จึงได้ทำการออกแบบระจกเลือกความถี่ผ่านขึ้นมาเพื่อช่วยลดปัญหาการขัดข้องของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ขึ้นมา ซึ่งในการออกแบบระจกเลือกความถี่ผ่าน จะเริ่มตั้งแต่การออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสูตรการคำนวณมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งในช่วงแรกของการออกแบบพบว่าผลการจำลองแบบในครั้งแรกยังไม่ได้ผลตามที่ต้องการ จึงต้องทำการค่อยๆ ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นงาน จนได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ จากนั้นทำชิ้นงานต้นแบบจริงตามที่ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และนำชิ้นงานต้นแบบไปวัดทดสอบผล

จากผลการทดสอบพบว่า ระจกเลือกความถี่ผ่านในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาสามารถใช้งานได้ตรงตามความถี่ที่ได้ออกแบบไว้และมีประสิทธิภาพตรงตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานจริง

และในบทนี้ยังกล่าวถึงปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และวิธีการพัฒนาโครงการต่อไปของโครงการระจกเลือกความถี่ผ่านในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

ในการทำโครงการระจกเลือกความถี่ผ่านในย่านความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz ปัญหาที่พบได้บ่อยๆ แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน สาเหตุของปัญหา และวิธีการแก้ไขปัญหา

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1. การสร้างชิ้นงานจริง	<p>สาเหตุ เนื่องจากชิ้นงานต้องใช้สติกเกอร์ทองแดงแปะลงบนกระจกให้ตรงตามที่ออกแบบ ในขณะที่แปะสติกเกอร์ทองแดงมีการเบี้ยวไปมาจึงทำให้ผลการวัดมีความคลาดเคลื่อน</p> <p>วิธีแก้ไขปัญหา นำสติกเกอร์สีไปตัดตามลายวงจรที่ออกแบบและนำไปแปะบนกระจก ลอกสติกเกอร์ตรงส่วนที่ต้องการแปะสติกเกอร์ทองแดงออก แล้วจึงนำสติกเกอร์ทองแดงแปะลงในช่องที่ลอกสติกเกอร์สีออก จึงทำให้การแปะสติกเกอร์ทองแดงแปะได้ตรงขึ้น</p>
2. ในการวัดค่าแบบรูปการแผ่ส่งผ่านคลื่นเมื่อมีชิ้นงานกั้นระหว่างสายอากาศ 2 ตัว เกิดความคลาดเคลื่อนและผิดเพี้ยน	<p>สาเหตุ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. อาจเกิดจากความไม่ประณีตในการติดตั้งอุปกรณ์ 2. ความไม่แม่นยำในการอ่านค่า 3. เกิดจากการรบกวนของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในบริเวณที่ทำการทดสอบ <p>วิธีแก้ไขปัญหา</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. มีความประณีตบรรจงในการติดตั้งอุปกรณ์ 2. เพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่ามากขึ้น 3. ในขณะที่วัด ควรหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนดังกล่าว เช่น การปิดโทรศัพท์เคลื่อนที่ในขณะที่ทำการทดสอบ
3. การใช้งานเครื่องมืออุปกรณ์มีจำนวนจำกัด	<p>สาเหตุ ในการวัดค่ารูปแบบการส่งผ่านของคลื่น จำเป็นต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีเพียงเครื่องเดียว และกลุ่มโครงข่ายที่ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีจำนวนมาก ทำให้ต้องรอการใช้งาน และเกิดความล่าช้าในการทำโครงข่าย</p>

	<p>วิธีแก้ไขปัญหา ควรมีการจองใช้เครื่องมือ หรือจัดสรรเครื่อง วิเคราะห์โครงข่ายให้เพียงพอกับการใช้งาน</p>
--	---

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ (filter) ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO มีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องสูง สามารถสังเกตได้จากกราฟการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางจาก task manager ของ windows ผู้ใช้งานควรใช้งาน โปรแกรมนี้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง

5.3.2 ในการวัดขนาด การตัดและการแปะสติกเกอร์ทองแดงนั้นควรทำด้วยความปราณีต ไม่เร่งรีบ เพื่อให้หลายวงจรที่ได้ออกมานั้นมีความเหมือนจริงกับที่ออกแบบมากที่สุด

5.3.3 ในการจัดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่ารูปแบบการส่งผ่านคลื่นนั้น ควรตั้งให้ดี โดยเฉพาะสายอากาศไดโพล 2 ตัวที่ใช้งาน ควรวางให้ตรงกัน ผลการวัดจะได้ ไม่มีความคลาดเคลื่อนมากนัก

5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากกระจกที่นำมาออกแบบเป็นกระจกธรรมดา ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นกระจกกรองแสงได้ เพื่อจะช่วยในการประหยัดพลังงานภายในสถานที่นั้นๆ ด้วย

ประวัติผู้เขียน



นางสาวนาลดา นวมน้อย เกิดวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 74/1 หมู่ 2 ต.บึงพระ อ.เมือง จ.พิษณุโลก จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนนครไทย ปีการศึกษา 2549 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



นางสาวณัชชา วรรณกุล เกิดวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2532 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 139/46 หมู่ 8 ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ์ จังหวัดปราจีนบุรี จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนมัธยมวัดใหม่กรงทอง ปีการศึกษา 2549 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

บรรณานุกรม

ผศ.ดร. รังสรรค์ วงสรรค์ เอกสารประกอบการสอน วิชา 427323 วิศวกรรมสายอากาศ (Antenna Engineering) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2550

ผศ.ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล เอกสารประกอบการสอน วิชา 427321 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2552

Design of Frequency Selective Windows for Improved Indoor Outdoor Communication, Mats Gustafsson, Anders Karlsson, Antonio Pedro Pontes, Rebelo, and Bjorn Widenberg

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี