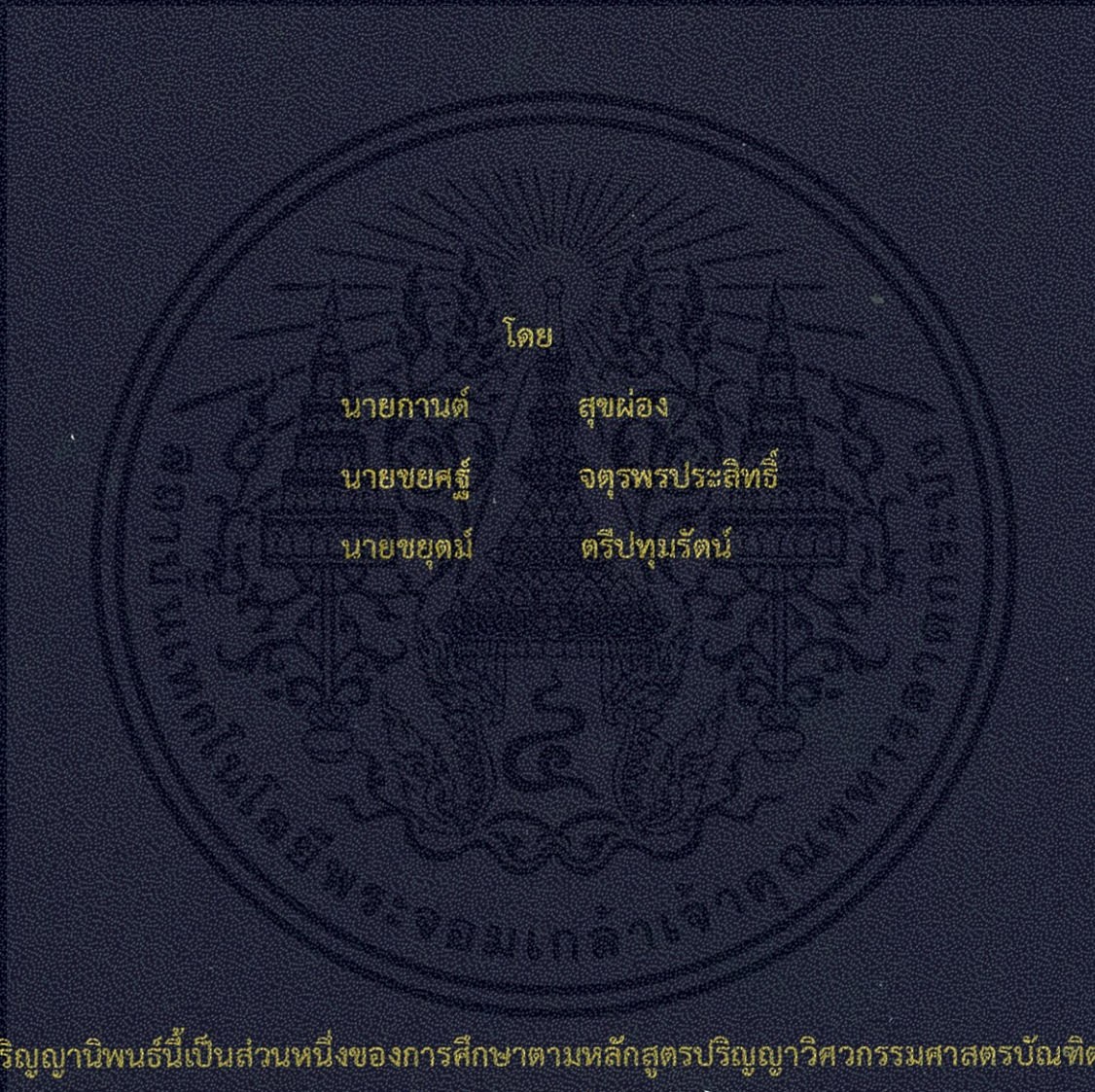


เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้เรดิโอมิเตอร์และสายอากาศร่องเชื่อมต่อร่วม

MICROWAVE SENSOR USING  
RADIOMETER AND COUPLED SLOT ANTENNA



โดย

นายกานต์

สุขผ่อง

นายชยสิทธิ์

จตุรพรประสิทธิ์

นายชยตม์

ตรีปทุมรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้เรดิโอมิเตอร์และสายอากาศร่องเชื่อมต่อร่วม  
MICROWAVE SENSOR USING  
RADIOMETER AND COUPLED SLOT ANTENNA



โดย  
นายกานต์ สุขผ่อง  
นายชยศรัญ จตุรพรประสิทธิ์  
นายชยุตม์ ตรีปทุมรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้เรดิโอมิเตอร์และสายอากาศร่องเชื่อมต่่อร่วม

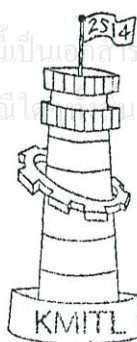
MICROWAVE SENSOR USING  
RADIOMETER AND COUPLED SLOT ANTENNA

โดย

นายกานต์	สุขผ่อง	53010097
นายชยศรัจ	จตุรพรประสิทธิ์	53010313
นายชยุตม์	ตรีปทุมรัตน์	53010315

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ศ.ดร.โมนัย ไกรฤกษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556



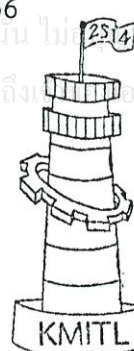
ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(.....)

อาจารย์ที่ปรึกษา

14/3/57

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(.....)

กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

17/3A/57

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้เรดิโอมิเตอร์และสายอากาศร่องเชื่อมต่อร่วม

MICROWAVE SENSOR USING RADIOMETER AND COUPLED SLOT ANTENNA

ผู้จัดทำ

- |               |                 |          |
|---------------|-----------------|----------|
| 1. นาย กานต์  | สุขผ่อง         | 53010097 |
| 2. นาย ชยศรั  | จตุรพรประสิทธิ์ | 53010313 |
| 3. นาย ชยุตม์ | ตรีปทุมรัตน์    | 53010315 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. โมไนย โกรฤกษ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการศึกษา และคอยช่วยเหลือ ติดตามงาน รวมถึงคำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญญา

ขอขอบพระคุณ ดร.ธนวัฒน์ ลิ้มปิติ คุณธนวุฒิ ตันติโสภารักษ์ คุณไพบุลย์ ย้อยหยด คุณประพันธ์ ลีกุลและคุณไชยณรงค์ กิตติญาณ นักศึกษาปริญญาโทและเอก ที่ช่วยไขข้อสงสัยต่างๆ รวมถึงความช่วยเหลือเสมอมาที่คณะผู้จัดทำปฏิบัติงานตลอดมา

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเพื่อนๆ ในคำแนะนำต่างๆ และขอขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้เรดิโอมิเตอร์และสายอากาศร่องเชื่อมต่อร่วม  
MICROWAVE SENSOR USING RADIOMETER AND COUPLED SLOT ANTENNA

โดย	นาย	กานต์	สุขผ่อง	53010097
	นาย	ชยศรั	จตุรพรประสิทธิ์	53010313
	นาย	ชยุตม์	ตรีปทุมรัตน์	53010315

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ โดยใช้สายอากาศท่อนำคลื่นที่ถูกรวมในวัสดุฐานรอง (SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE ANTENNA: SIW) มาประยุกต์ใช้วัดความสุกดิบของมะม่วง เซ็นเซอร์ที่ออกแบบจะเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีที่นำคลื่นเสมือนที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PRINTED CIRCUIT BOARD : PCB) ใช้งานที่ความถี่ 11.7 จิกะเฮิรตซ์ การวัดความสุกดิบของมะม่วง จะใช้หลักการ 2 ชนิดคือ หลักการของเรดิโอมิเตอร์ โดยใช้สายอากาศที่ได้ออกแบบเป็นตัวรับกำลังงานที่ออกมาจากมะม่วง และเทคนิคการวัดอากาศว่าง โดยใช้สายอากาศร่องเชื่อมต่อร่วม (COUPLED SLOT ANTENNA) 2 ตัว ในการวัดคลื่นที่ส่งผ่านมะม่วง ทั้งมะม่วงดิบ และมะม่วงสุก ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกัน กำลังงานที่รับได้จะถูกตรวจจับโดยวงจรตรวจจับกำลังงาน และแปลงค่ากำลังงานเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าที่ได้จะถูกแสดงผลผ่านไดโอดเปล่งแสง (LED) โดยระบบที่ออกแบบนั้น ใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่าย และมีต้นทุนต่ำ เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในงานด้านเกษตรกรรม

### ABSTRACT

THIS DISSERTATION PRESENTS A MICROWAVE SENSOR USING SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE ANTENNA TO DETERMINE THE MATURITY OF MANGO. THE SENSOR UTILIZES 2 SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE (SIW) ANTENNAS DESIGNED ON A PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB), OPERATED AT THE FREQUENCY OF 11.7 GHZ, TO MEASURE THE MANGO. THE MEASUREMENT CAN BE PERFORMED USING 2 DIFFERENT TECHNIQUES, I.E., RADIOMETER AND FREE-SPACE MEASUREMENT. THE RADIOMETER UTILIZES ONLY THE RECEIVING ANTENNA TO SENSE THE EMISSION POWER FROM MANGO AT DIFFERENT MATURITY. IN ADDITION, THE FREE-SPACE TECHNIQUE UTILIZES 2 COUPLED SLOT ANTENNAS TO MEASURE THE FREE-SPACE TRANSMISSION THROUGH THE MANGO AT DIFFERENT MATURITY. THE MEASURED POWER OF BOTH TECHNIQUES WILL BE DETECTED AND CONVERTED TO DC VOLTAGE, AND THEN DISPLAYED THE LEVEL OF MATURITY ON THE LED.

## สารบัญ

	หน้า	
กิตติกรรมประกาศ	I	
บทคัดย่อ	II	
สารบัญ	III	
สารบัญรูป	VI	
สารบัญตาราง	IX	
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์	1
1.3	ขอบเขตของโครงการ	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1	ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือน	3
2.2	พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ	5
2.2.1	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	5
2.2.1.1	แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก	6
2.2.1.2	ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	7
2.2.2	อัตราขยาย	9
2.2.3	ประสิทธิภาพของสายอากาศ	9
2.2.4	อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	10
2.2.5	การสูญเสียย้อนกลับ	10
2.2.6	การโพลาไรซ์	11
2.2.6.1	การโพลาไรซ์เชิงเส้น	11
2.2.6.2	การโพลาไรซ์วงกลม	12
2.2.6.3	การโพลาไรซ์วงรี	12
2.2.7	แบนด์วิดธ์	12
2.3	ทฤษฎีพลังงานจลน์ของสสาร	13
2.3.1	รังสีอินฟราเรด	13
2.3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและอุณหภูมิ	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบเรดิโอมิเตอร์	14
2.5 บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP	17
2.5.1 คุณสมบัติของบอร์ด ET-EASY168 STAMP	17
2.5.2 โครงสร้างของบอร์ด ET-EASY168 STAMP	19
2.6 วงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น	19
2.7 อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนของสัญญาณต่ำ	21
<b>บทที่ 3 การออกแบบ</b>	
3.1 บทนำ	23
3.2 การออกแบบ	24
3.2.1 ท่อนำคลื่นเสมือน	24
3.2.2 การแบบออกสล็อตคลื่นปลิงบนท่อนำคลื่นเสมือน	26
3.2.3 วงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น	27
3.2.4 ส่วนประมวลผลระดับสัญญาณที่ได้รับจากวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น	29
3.3 การจำลองผลสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า	31
3.3.1 การปรับความยาวของสล็อต	32
3.3.2 การปรับความกว้างของสล็อต	33
3.3.3 การปรับความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม	34
3.3.4 การปรับความกว้างของสายนำสัญญาณ	35
3.4 สายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนต้นแบบ	35
3.4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	36
3.4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	36
3.4.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	37
3.4.4 อัตราขยายของสายอากาศ	37
3.4.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน	37
3.5 เซ็นเซอร์ไมโครเวฟ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	ผลการทดลอง
4.1	บทนำ 40
4.2	การทดสอบสายอากาศ 40
4.2.1	การทำสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ 40
4.2.2	การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นเสมือน 41
4.2.3	การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 43
4.2.4	การทดสอบแบบรูปการแพร่พลังงานกระจายคลื่นของสายอากาศ 44
4.2.5	การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ 46
4.3	การจำลองสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนโดยใช้วงจรสมมูล (EQUIVALENT CIRCUIT) 46
4.4	สรุปผลการทดลองของสายอากาศ 51
4.5	วงจรกำเนิดสัญญาณ 52
4.6	การวัดอากาศว่าง 52
4.7	เรดิโอมิเตอร์ 59
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ
5.1	สรุปผล 61
5.2	ข้อเสนอแนะ 63
บรรณานุกรม	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	7
2.5	8
2.6	10
2.7	11
2.8	11
2.9	12
2.10	12
2.11	12
2.12	14
2.13	15
2.14	16
2.15	17
2.16	18
2.17	20
2.18	20
2.19	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การทำงานของหลักการเรดิโอมิเตอร์	23
3.2 การทำงานของหลักการวัดอากาศว่าง	23
3.3 โครงสร้างท่อนำคลื่นเสมือน	24
3.4 การจำลองค่า S พารามิเตอร์ของโครงสร้างท่อนำคลื่นเสมือน	25
3.5 การจำลองความเข้มกระแสไฟฟ้า	26
3.6 โครงสร้างสายอากาศ	27
3.7 กราฟเส้นเส้นตรงของวงจรถยายและการปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณา	28
3.8 วงจรถยายและการปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณาตามสมการ	29
3.9 วงจรการใช้งานร่วมกับบอร์ด ET-EASY168 STAMP	30
3.10 กระบวนการทำงานของการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากวงจรปรับแต่ง ย่านการวัดแบบเชิงเส้น	31
3.11 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ เมื่อความยาวสล็อตเป็น 12 mm.	32
3.12 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ เมื่อความยาวสล็อตเป็น 8.6 mm.	33
3.13 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ โดยสล็อตมีความกว้าง 0.5 mm.	33
3.14 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ โดยสล็อตมีความกว้าง 1.5 mm.	34
3.15 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ โดยปรับความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม	34
3.16 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ โดยปรับความกว้างของสายนำสัญญาณ	35
3.17 การจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ	36
3.18 การจำลองอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	36
3.19 การจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	37
3.20 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ XZ	38
3.21 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ YZ	38
3.22 เซ็นเซอร์ไมโครเวฟ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์	40
4.2 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับกรงจำลอง	41
4.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	42
4.4 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากการจำลอง	42
4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	43
4.6 การติดตั้งการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	44
4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 11.7 GHz	45
4.8 วงจรสมมูลของสายอากาศที่นำคลื่นเสมือน	47
4.9 วงจรสมมูลของสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนโดยแบ่งเป็น 3 ส่วนประกอบ	47
4.10 $ S_{11} $ ของสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนที่ความถี่ 11.586 GHz	48
4.11 ทดลองลดค่าความจุของวงจรสมมูลในส่วนสายอากาศช่องเปิด	49
4.12 $ S_{11} $ ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 11.916 GHz	48
4.13 ทดลองเพิ่มค่าความจุของวงจรสมมูลในส่วนสายอากาศช่องเปิด	49
4.14 $ S_{11} $ ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 11.486 GHz	50
4.15 วงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิด	50
4.16 $ S_{11} $ ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 11.7 GHz	51
4.17 ระดับความแรงของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 11.7 GHz	52
4.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของมะม่วงสุกและมะม่วงดิบ	59
5.1 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดจากการวัดอากาศและมะม่วงดิบ 5 ลูก	62
5.2 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดจากการวัดอากาศและมะม่วงสุก 5 ลูก	62
5.3 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดจากการวัดมะม่วงอ่อนและมะม่วงสุก 5 ลูก	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของการสร้างสายอากาศ	32
4.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของสายอากาศ SIW ที่ความถี่ 11.7 GHz	51
4.2 ทดสอบวัดมะม่วงดิบลูกที่ 1	52
4.3 ทดสอบวัดมะม่วงดิบลูกที่ 2	53
4.4 ทดสอบวัดมะม่วงดิบลูกที่ 3	54
4.5 ทดสอบวัดมะม่วงดิบลูกที่ 4	54
4.6 ทดสอบวัดมะม่วงดิบลูกที่ 5	55
4.7 ทดสอบวัดมะม่วงสุกลูกที่ 1	56
4.8 ทดสอบวัดมะม่วงสุกลูกที่ 2	56
4.9 ทดสอบวัดมะม่วงสุกลูกที่ 3	57
4.10 ทดสอบวัดมะม่วงสุกลูกที่ 4	57
4.11 ทดสอบวัดมะม่วงสุกลูกที่ 5	58
4.12 ผลการทดสอบโดยเฉลี่ย	59
4.13 ทดสอบวัดมะม่วงโดยใช้เรดิโอมิเตอร์	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การคัดวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกัน ด้วยกรรมวิธีทางไมโครเวฟที่มีประโยชน์มากในงานด้านต่างๆที่สำคัญได้แก่ด้านการเกษตรที่ประเทศไทยมีอุตสาหกรรมหลักทางด้านนี้ ตัวอย่างเช่นการคัดแยกผลไม้สุกกับดิบ การใช้เรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) และเทคนิคการวัดอากาศว่าง (free-space technique measurement) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่สามารถรับการแผ่พลังงานมาจากวัตถุต่างๆ และสามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างชนิดของวัตถุตามทฤษฎีทางฟิสิกส์ที่กล่าวว่า “วัตถุใดๆก็ตามที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ จะสามารถแผ่พลังงานออกมาได้” ดังนั้นการร่วมประยุกต์สายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือน (Substrate Integrated Waveguide) กับอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนต่ำจึงนำมาสร้างเป็นเรดิโอมิเตอร์และการวัดอากาศว่าง ที่สามารถแบ่งแยกความแตกต่างของวัตถุได้ เช่นการวัดความแตกต่างของมะม่วงเพื่อที่สามารถระบุความสุกดิบของมะม่วงได้จึงเป็นงานที่มีประโยชน์และควรได้รับการพัฒนา

#### 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการเซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้เรดิโอมิเตอร์และสายอากาศร่องเชื่อมต่อกันเพื่อพัฒนาและออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานที่มีประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม ซึ่งใช้ร่วมกับระบบเรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) และการวัดอากาศว่าง (free-space technique measurement) โดยมุ่งเน้นถึงการประยุกต์ใช้งานให้มีประสิทธิภาพได้ดีมีขนาดที่พอเหมาะและการสร้างได้ง่ายจากวัสดุที่หาซื้อได้ทั่วไป โดยอาศัยหลักการทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพในเรื่องที่เกี่ยวข้องและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทำให้สายอากาศทำงานเข้ากับระบบได้ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือ

- 1) เพื่อศึกษาหลักการท างานสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือน
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือน
- 3) เพื่อใช้หลักการของเรดิโอมิเตอร์และหลักการของการวัดอากาศว่างในการทดลอง

จำแนกความสุกหรือดิบของมะม่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

ศึกษาการทำงานและออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนที่ความถี่ 11.7 GHz เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับหลักการเรดิโอเมเตอร์และหลักการวัดอากาศว่างในการทดลองการจำแนกความสูงหรือดิบของมะม่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

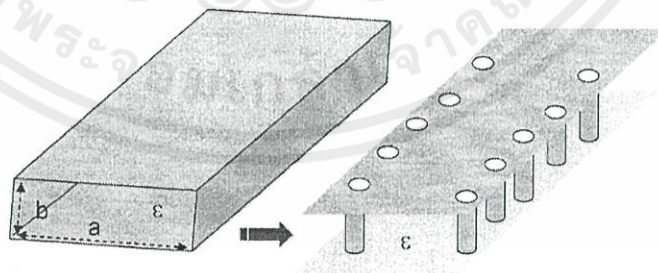
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือน

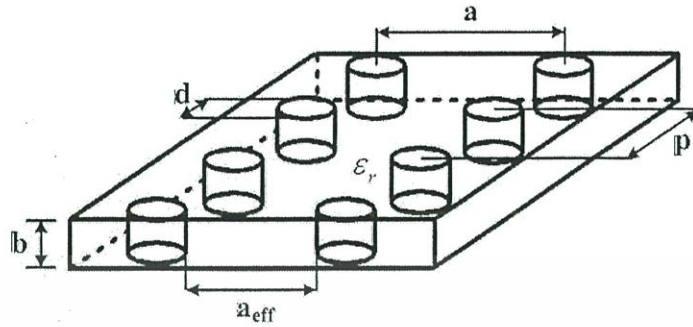
ในปัจจุบันสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนมีความสำคัญและใช้งานกันจำนวนมากในระบบติดต่อสื่อสารต่างๆ[1] สายอากาศท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพการทำงานของสัญญาณสูงเนื่องจากมีองค์ประกอบคุณภาพ (Q-factor) และความจุพลังงานที่สูง แต่ข้อเสียที่สำคัญของสายอากาศท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมนั่นก็คือรูปร่างที่ใหญ่เกินความจำเป็น และใช้วิธีส่งผ่านที่ซับซ้อนในการต่อเข้ากับวงจรระนาบ (Planar Circuit) ในการผลิตยังต้องการใช้เครื่องจักรแบบแม่นยำ ซึ่งในกระบวนการประกอบจึงยากที่จะใช้แค่การวัดคลื่นความถี่แบบความละเอียดสูง ดังนั้นแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ซึ่งมีต้นทุนต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการทำสายอากาศท่อนำคลื่นในวัสดุเหล่านี้ จากผลงานล่าสุดสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนได้ถูกแนะนำและศึกษามาแล้วว่าเป็นโครงสร้างที่ใช้ได้มากที่สุดสำหรับการออกแบบวงจรความถี่สูง นอกจากนี้สายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนสามารถที่จะต่อเข้ากับไมโครสตริปได้ง่ายและมีการส่งผ่านได้ดีสามารถรับทั้งโครงสร้างแบบระนาบและไม่ระนาบได้โดยใช้วัสดุฐานรองเดียวกัน สายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนมีต้นทุนที่ต่ำมีขนาดเล็ก โดยวัสดุในแผ่นวงจรพิมพ์เป็นตัวกำหนดค่าความสูญเสียของคลื่นความถี่สูง แต่ในสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนจะมีองค์ประกอบคุณภาพ (Q-factor) สูงและการรวมตัว (Integration) สูงด้วยเหตุนี้เองสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการทำเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการสร้างสายอากาศทำขึ้นโดยอาศัยสร้างรูขึ้นมาเป็นโครงสร้างเสมือนเป็นผนังของสายอากาศท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม



(ก) โครงสร้างของท่อนำคลื่นเสมือนและท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โครงสร้างภายในของท่อนำคลื่นเสมือน  
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของท่อนำคลื่นเสมือน [1]

จากรูปที่ 2.1 (ก) แสดงโครงสร้างของสายท่อนำคลื่นทั่วไปและท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือนซึ่งจะเจาะรูทะลุแผ่นวัสดุฐานรองแทนที่ด้วยโลหะ ซึ่งโดยส่วนใหญ่สายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนสามารถรักษาข้อดีของสายอากาศท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมไว้ได้เป็นอย่างดี เช่น องค์ประกอบคุณภาพสูงและความจุพลังงานสูงในรูปที่ 2.1 (ข)  $b$  คือความสูงของวัสดุฐานรอง และ  $a$  คือ ระยะห่างระหว่างแนวของรูโดยรอบ สายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกฟิลซึ่งสายอากาศท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมีความกว้างเป็น  $a_{eff}$  มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น  $\epsilon_r$  ค่า  $p$  คือ ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของรูหนึ่งกับรูที่ติดกัน และ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรูแต่ละรู

ขั้นตอนแรกในการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นด้วยเทคโนโลยีท่อนำคลื่นเสมือน คือ หาค่าความถี่คัทออฟ (Cut-off Frequency) ในโหมดคลื่นในสายอากาศท่อนำคลื่นซึ่งใช้โหมด  $TE_{10}$  หาค่าความถี่คัทออฟดังสมการต่อไปนี้

$$f_c(TE_{10}) = \frac{c0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \left( a - \frac{d^2}{0.95 \times p} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

จากรูปที่ 2.1 (ข)  $a_{eff}$  เป็นความระยะทางที่จากรูหนึ่งไปยังอีกรูหนึ่งที่ขนานกันโดยวัดจากปลายรู

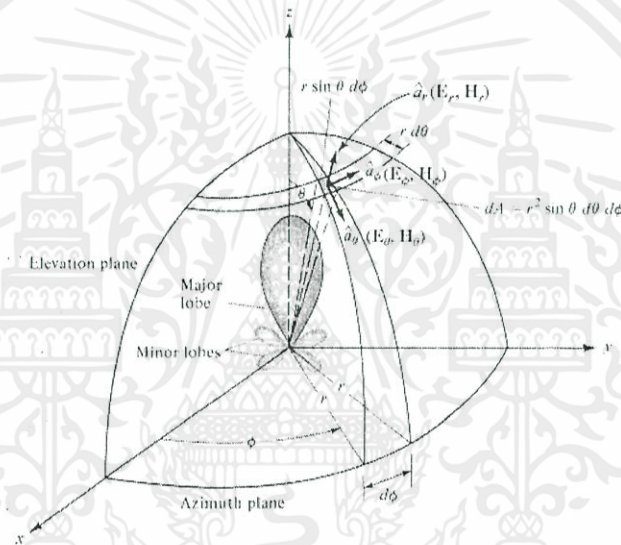
$$a_{eff} = a - 108 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{a} \quad (2.2)$$

เงื่อนไขที่ดีที่สุดของค่าคงที่การลดทอนและการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กระหว่างรูที่มีช่องว่างที่เล็กพอที่จะไม่คำนึงถึงได้นั้นคือ  $d/p \geq 0.5$  และ  $d/\lambda_0 \geq 0.5$  เมื่อ  $\lambda_0$  คือความยาวคลื่นในอากาศ

## 2.2 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ

### 2.2.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

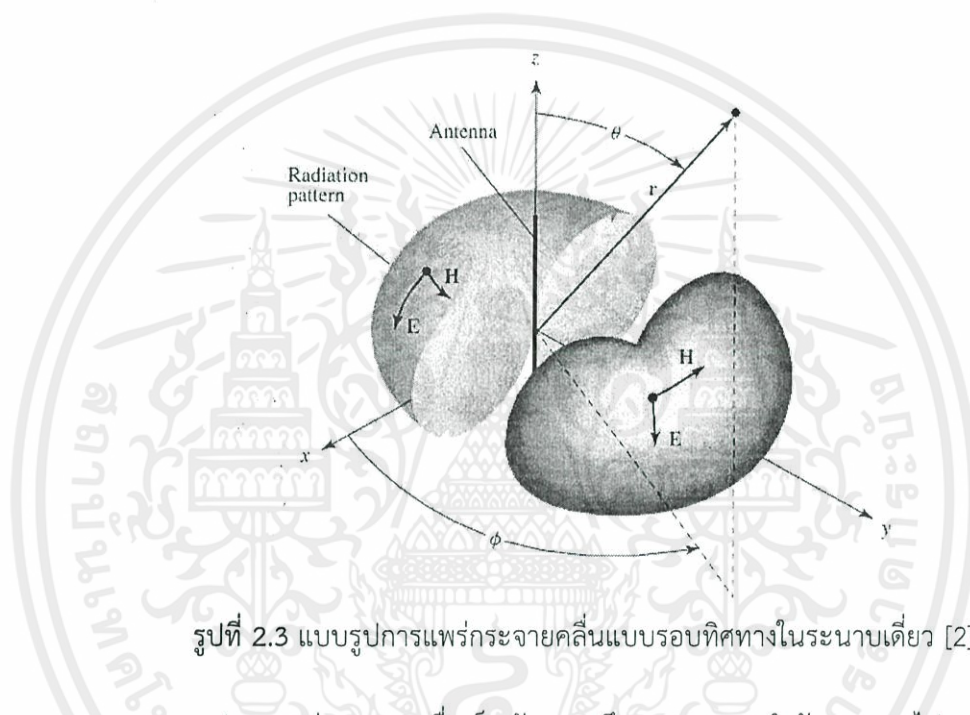
แบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) ได้ถูกนิยามว่า “เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งแสดงในรูปพิกัดตำแหน่ง (Space Coordinate) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (Directional Coordinate) เสมอ” คุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น สามารถแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 2.2 ระบบพิกัดทรงกลมเพื่อใช้อธิบายแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น [2]

จากรูปที่ 2.2 เส้นการกวาดของกำลังงานที่ได้รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่าแบบรูปกำลังงาน (Field Pattern) และอีกวิธีหนึ่ง ถ้าเป็นแบบรูปที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่งเราเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (Amplitude Field Pattern) ในทางปฏิบัตินั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบสามมิติถูกวัดและบันทึกในแบบรูปสองมิติโดยการพล็อตแบบรูปตามฟังก์ชันของมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกันแบบรูปแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) แบบมีทิศทาง (Direction) และแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirection) ตัวแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ “สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่มีการสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่กำลังออกมาเท่ากันทุกทิศทาง” ถึงแม้ว่าตัวแผ่กำลังงานแบบนี้จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีอยู่จริง สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ “สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ” ซึ่งนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด

(Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave Dipole) ซึ่งตัวอย่างของสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 เห็นได้ชัดเจนว่า ในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) ซึ่งเรียกแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้ว่าเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-directional Pattern) โดยมีนิยามว่า “เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้” ในที่นี้คือมุมกวาด (Azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบมีทิศทาง ในกรณีนี้คือมุมเงย (Elevation)

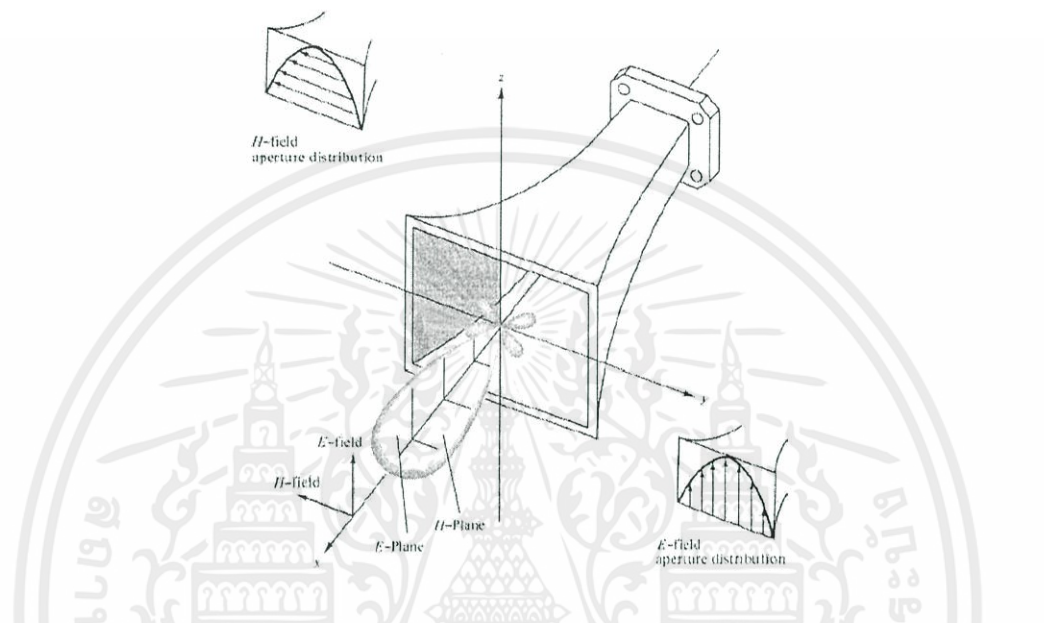


รูปที่ 2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว [2]

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวแสดงถึงการกระจายกำลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปและเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าจะใช้คำว่า “การแพร่กระจายคลื่น” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่งแต่ในความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ในทางปฏิบัติแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 2.2.1.1 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern) ซึ่งประโยชน์ด้านการคำนวณและการอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) สำหรับสายอากาศที่

มีโพลาริซเซชัน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



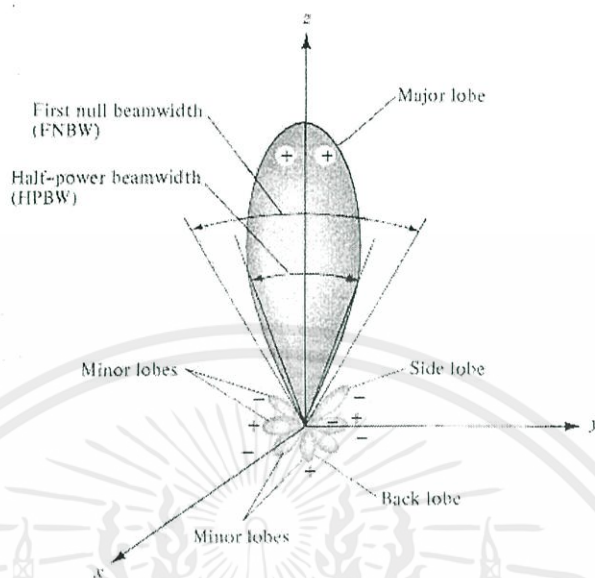
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร [2]

จากรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักโดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าหลัก ส่วนอีกระนาบหนึ่งหรือระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท;  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

#### 2.2.1.2 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำรูปที่ 2.5 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลำคลื่นต่างๆและบีมวิคธ์ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ 3 มิติ [3]

1) ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.5 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta = 0$  สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split-beam Antenna)

2) ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) เป็นลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก

3) ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

4) ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก

ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องการจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุดระดับของลำคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่าระดับของลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe Level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักต้องการให้ระดับของลำคลื่นด้านข้างน้อยกว่า -20 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 อัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

1. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่ได้รับเข้ามา

2. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้นโดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว ส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

### 2.2.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศการสูญเสียต่างๆหาได้จาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตชิงกันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
2. การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน

ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.3)

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.3)$$

$e_t$  คือ ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

$e_r$  คือ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตชิงกันมีค่าเป็น  $(1 - |\Gamma|^2)$

$e_c$  คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ

$e_d$  คือ ประสิทธิภาพของฉนวน (Dielectric)

โดยทั่วไป  $e_c$  และ  $e_d$  จะรวมเป็นตัวเดียวกันตามสมการ (2.4)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.4)$$

$R_r$  คือ ความต้านทานจากการแพร่พลังงานคลื่นออกไป

$R_L$  คือ ความต้านทานที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio)

อัตราส่วนระหว่างแรงดันค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่งเรียกว่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ดังสมการที่ 2.5

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.5)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.6)$$

$\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage Reflection Coefficients) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดันสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.6)

$V_r$  คือ แรงดันสะท้อนกลับ

$V_i$  คือ แรงดันตกกระทบ

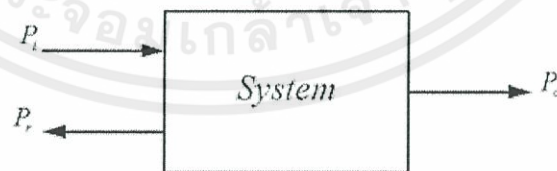
$Z_L$  คือ โหลดอิมพีแดนซ์

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในกรณีที่ต่อไว้ด้วยแมตซ์ชิงโหลดนั้นค่า VSWR เป็น 1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด

### 2.2.5 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.4 ของสายอากาศที่แสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตซ์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ โดยการสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การสูญเสียย้อนกลับ [2]

จากรูป  $P_i$  คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน  $P_r$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลไปยังผู้ใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Return loss (dB)} = -10 \log\left(\frac{P_r}{P_i}\right) \quad (2.7)$$

### 2.2.6 การโพลาไรซ์ (Polarization)

การโพลาไรซ์ได้ถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อธิบายทิศทางและขนาดสัมพัทธ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นรูปที่แสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งหนึ่งๆเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปในการสังเกตลักษณะการกวาดสนามไฟฟ้าตามหลังคลื่นที่เดินทางออกไปอาจสรุปได้อีกนัยหนึ่งว่าการโพลาไรซ์เป็นรูปกราฟที่วาดขึ้นจากการกวาดของปลายลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่ง

การโพลาไรซ์แบ่งเป็น 3 แบบด้วยกันคือ

2.2.6.1 การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization: LP) คือ คลื่นเดินทางไปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศของสนามไฟฟ้าตลอดการเดินทาง

1) การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical Polarization: VP) ทิศของสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางแนวตั้งตลอดการเดินทางดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง [3]

2) การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน (Horizontal Polarization: HP) ทิศของสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางในแนวนอนตลอดการเดินทางดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน [3]

3) การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง (Slant Polarization: SP) ทิศของสนามไฟฟ้าจะเอียงทำมุมใดๆตลอดการเดินทางดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง [3]

2.2.6.2 การโพลาไรซ์วงกลม (Circular Polarization: CP) คือคลื่นเดินทางไปโดยมีการเปลี่ยนแปลงทิศของสนามไฟฟ้าตลอดเวลาโดยรักษาขนาดของสนามไฟฟ้าไว้คงที่

1) การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนขวา (Right-hand Circular Polarization: RHCP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ตามเข็มนาฬิกา (Clockwise Polarization: CCP) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนขวา [3]

2) การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนซ้าย (Left-hand Circular Polarization: LHCP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ทวนเข็มนาฬิกา (Anti-Clockwise Polarization: AWCP) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนซ้าย [3]

2.2.6.3 การโพลาไรซ์วงรี (Elliptical Polarization: EP) คือคลื่นเดินทางไปโดยมีการเปลี่ยนแปลงในทั้งทิศและขนาดของสนามไฟฟ้าตลอดการเดินทางแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1) การโพลาไรซ์แบบหมุนขวา (Right-hand Elliptical Polarization: RHEP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ตามเข็มนาฬิกา (Clockwise Polarization: CWEP)

2) การโพลาไรซ์แบบหมุนซ้าย (Left-hand Elliptical Polarization: LHEP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ทวนเข็มนาฬิกา (Anti-clockwise Polarization: AWEP)

### 2.2.7 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจจะเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุตอิมพีแดนซ์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ความกว้างของลำคลื่น, การโพลาไรซ์, ระดับของลำคลื่นด้านข้าง, ค่าการสูญเสียย้อนกลับ, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบจนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐานสำหรับ

สายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ดีด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ดีด้านต่ำยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดธ์ 10:1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ดีด้านสูงมีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ดีด้านต่ำอยู่ 10 เท่าสำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดธ์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) แล้วหารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดธ์นั้นเช่น แบนด์วิดธ์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดธ์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศที่กล่าวมาไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมดทำให้ไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดธ์ตามคุณสมบัติได้อย่างใดอย่างหนึ่งจึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างปกติแล้วคุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุตอิมพีแดนซ์มักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ[4]

## 2.3 ทฤษฎีพลังงานจลน์ของสสาร

ในสถานะของอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute Zero หรือ  $-273.16^{\circ}C$ ) สสารจะมีพลังงานจลน์ประจำโมเลกุลอยู่จำนวนหนึ่งเสมอ โมเลกุลของสสารไม่อยู่นิ่งในสถานะปกติ เช่น การได้กลิ่นน้ำหอมจากขวดที่เปิดวางไว้บนโต๊ะในห้องที่ลมสงบ และการหยดหมึกด้าลงบนสไลด์แล้วนำไปส่องดูโดยใช้กล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าอนุภาคของคาร์บอนหรือถ่านที่แขวนลอยอยู่ในหมึกด้ามีการเคลื่อนไหวแบบไม่มีทิศทางที่แน่นอนอยู่ตลอดเวลา ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า บราวเนียนมูฟเมนต์ (Brownian Movement) ในทางปฏิบัติยังไม่สามารถสร้างสภาพศูนย์สัมบูรณ์ขึ้นมาได้จริง ปัจจุบันได้นิยามศูนย์สัมบูรณ์ไว้ว่า เป็นอุณหภูมิที่อนุภาคทุกชนิดหยุดการเคลื่อนไหวอย่างสิ้นเชิงตามหลักกลศาสตร์ควอนตัม ดังนั้นศูนย์สัมบูรณ์จึงน่าจะเป็นอุณหภูมิที่โมเลกุลของสสารสั่นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

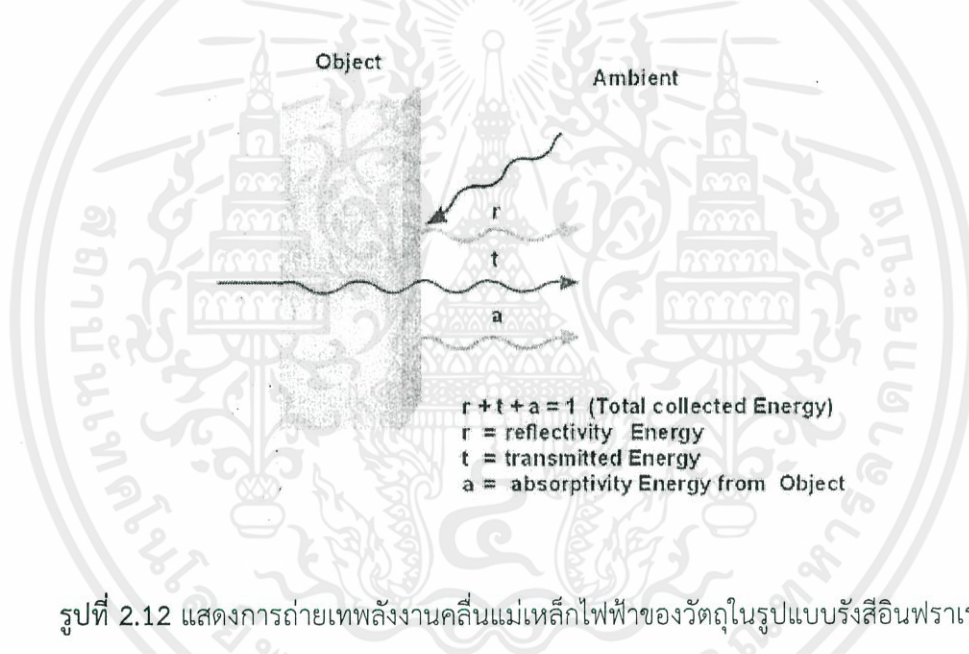
### 2.3.1 รังสีอินฟราเรด (Infrared)

แสงที่มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำกว่าแสงสีแดง แหล่งกำเนิดของรังสีอินฟราเรด คือ ความร้อน (Heat) จะเกิดการแผ่รังสีความร้อนกับวัตถุใดก็ตามที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่า Absolute Zero หรืออุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ( $-273.15$  องศาเซลเซียส หรือ  $0$  องศาเคลวิน) เท่านั้น โดยจะมีการแผ่รังสีในย่านอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัตถุ แม้วัตถุนั้นจะเป็นไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิมิอุณหภูมิต่ำ  $-196$  องศาเซลเซียส ก็ยังมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาได้ ถึงแม้จะมีค่าน้อยก็ตาม ซึ่งในความเป็นจริงและในชีวิตประจำวัน เราจะสัมผัสและเกี่ยวข้องกับรังสีอินฟราเรดอยู่ตลอดเวลา กล่าวคือ เราสัมผัสร้อนเมื่ออยู่กลางแจ้งหรือใกล้ไฟ ถึงแม้ว่าตามมนุษย์จะไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดได้ แต่ผิวเราก็สามารถรู้สึกสัมผัสถึงความร้อนได้ นั่นแสดงให้เห็นว่าวัตถุที่ร้อนย่อมแผ่พลังงานรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดออกมาได้มากกว่าวัตถุที่เย็น

### 2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและอุณหภูมิ

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 เคลวิน มีพลังงานภายในตัว และมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแปรผกผันกับอุณหภูมิมีค่าเพียงสิ่งที่มีอุณหภูมิสูงตั้ง เช่น ดวงอาทิตย์ และไส้หลอดไฟฟ้า จึงมีการแผ่รังสีทุกแต่สิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำตั้งเช่น ร่างกายมนุษย์ และน้ำแข็ง ก็มีการแผ่รังสีเช่นกัน เพียงแต่ตาของเรามองไม่เห็น วัตถุร้อน จะมีพลังงานสูง และแผ่รังสีคลื่นสั้น ส่วนวัตถุเย็นจะมีพลังงานต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว

สำหรับรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนนั้น จะแผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัตถุชิ้นแรกเท่านั้น ในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนจะสะท้อน (Reflected) และบางส่วนจะส่งผ่านหรือทะลุผ่านออกไป (Transmitted) ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้แสดงได้ในรูป เมื่อกำหนดให้ Absorptivity (a), Reflectivity (r) และ Transmissivity (t)

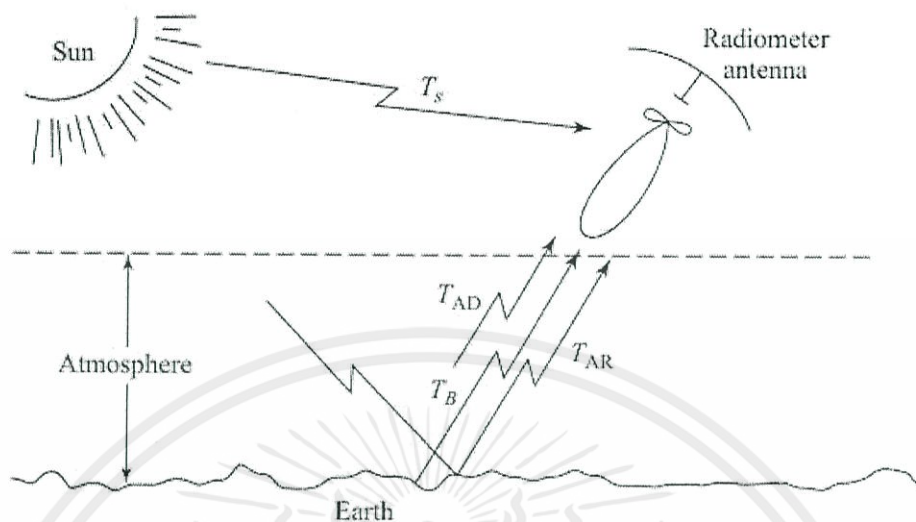


รูปที่ 2.12 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด

## 2.4 ระบบเรดาร์โอมิเตอร์

ในระบบเรดาร์ที่ใช้หลักการส่งสัญญาณและสะท้อนกลับจากวัตถุ ซึ่งเป็นระบบแอคทีฟรีโมทเซ็นซิง (Active Remote Sensing) แต่สำหรับเรดาร์โอมิทริกเป็นระบบพาสซีฟที่ใช้ตรวจจับวัตถุจากการแผ่พลังงานของสัญญาณรบกวน (Blackbody Radiation) ซึ่งแผ่พลังงานมาจากวัตถุโดยรอบเรดาร์โอมิเตอร์จึงเป็นตัวรับที่มีความไวสูง โดยออกแบบสำหรับวัดกำลังของสัญญาณรบกวน[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างกำลังสัญญาณรบกวนของการใช้เรดิโอมิเตอร์ [3]

วัตถุในสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิ ( $T$ ) มีการแผ่พลังงานตามกฎของพลังค์ ในขอบเขตของไมโครเวฟ โดยกำหนดให้สมการเป็น  $P = kTB$  ซึ่ง  $k$  เป็นค่าคงที่โบลซ์มานน์,  $B$  คือ แบนด์วิดธ์ของระบบ และ  $P$  คือ กำลังการแผ่พลังงาน โดยสมการนี้คำนึงถึงวัตถุเท่านั้น ซึ่งเป็นวัตถุในอุดมคติที่ดูดกลืนพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมด และไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้น วัตถุจริงจะมีการแผ่พลังงานเท่ากับพลังงานที่ดูดกลืนไป แต่ในวัตถุที่ไม่ใช่อุดมคตินั้นจะมีการสะท้อนพลังงานเกิดขึ้น และไม่มีการแผ่พลังงานมากเท่ากับวัตถุที่สามารถแผ่พลังงานได้ที่ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นการวัดกำลังของการแผ่พลังงานโดยวัตถุที่มีความสัมพันธ์กับการแผ่พลังงานโดยวัตถุในอุดมคติคือ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ดังสมการ 2.8

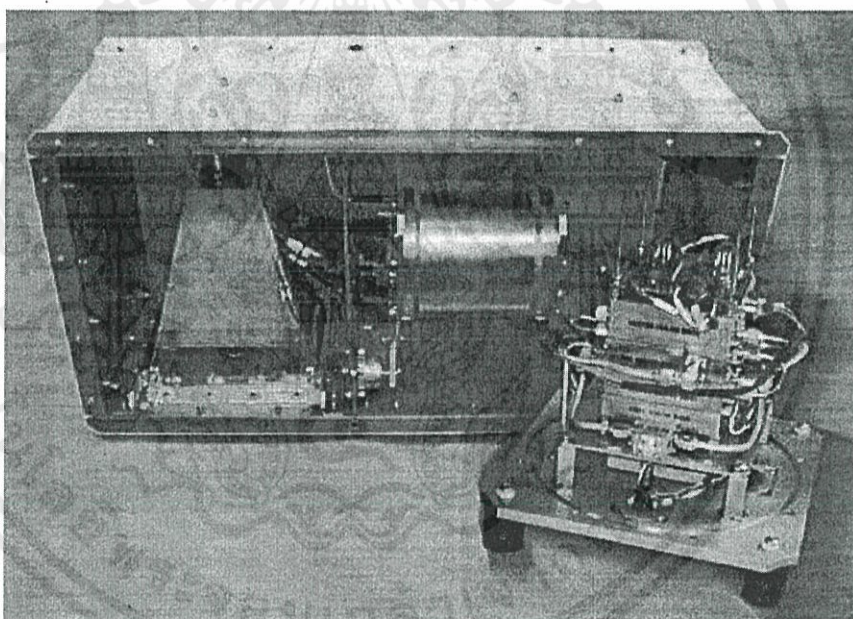
$$e = \frac{P}{kTB} \tag{2.8}$$

$P$  คือ กำลังที่แผ่พลังงานโดยวัตถุที่ไม่ใช่อุดมคติ และ  $kTB$  คือกำลังที่แผ่จากวัตถุโดยสมบูรณ์ค่าของ  $e$  อยู่ระหว่าง  $0 \leq e \leq 1$  ดังนั้นเมื่อ  $e = 1$  จึงเป็นวัตถุโดยสมบูรณ์ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) อาจคำนึงถึงประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการแผ่พลังงานของวัตถุกำลังของสัญญาณรบกวนบอกได้ในรูปของอุณหภูมิสมมูล (Equivalent Temperature) ดังนั้นกำหนดให้อุณหภูมิสว่าง (Brightness Temperature) ดังสมการ 2.9

$$T_B = eT \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

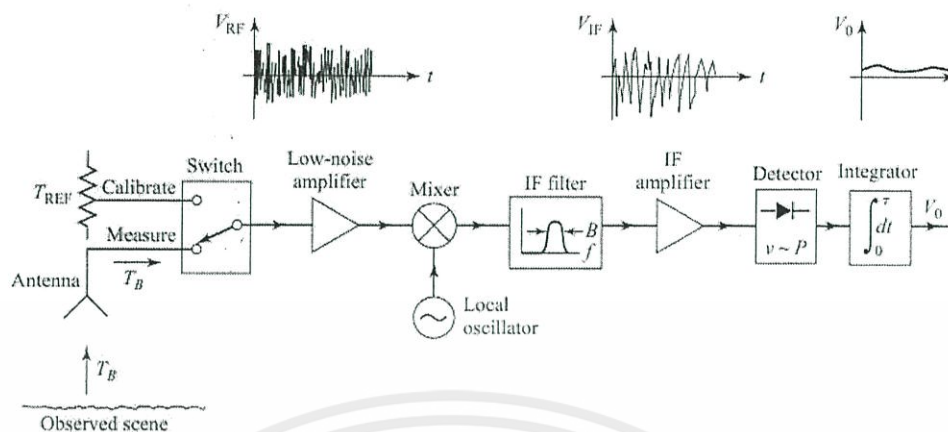
จากรูป 2.13 แสดงภาพของเรดิโอมิเตอร์ที่รับกำลังสัญญาณรบกวนจากหลากหลายแหล่งกำเนิด ซึ่งสายอากาศชี้มายังโลกโดยมีอุณหภูมิส่องสว่างที่เกิดขึ้นจากบริเวณผิวโลก โดยชั้นบรรยากาศมีการแผ่พลังงานในทุกทิศทางไปยังสายอากาศ ( $T_{AD}$ ) ขณะที่อีกส่วนที่สะท้อนจากดวงอาทิตย์ไปที่พื้นผิวโลก และสะท้อนต่อไปยังสายอากาศ คือ  $T_{AR}$  และยังคงคำนึงถึงกำลังของสัญญาณรบกวนที่มาจากดวงอาทิตย์ โดยรับได้ที่พูด้านข้าง (Sidelobe) ของสายอากาศ ดังนั้นเราพบว่า อุณหภูมิส่องสว่างทั้งหมดที่ได้จากเรดิโอมิเตอร์ เป็นการสังเกตการณ์จากสิ่งแวดล้อม รวมถึงมุมที่สังเกตความถี่การไหลเวียนชั้นการลดทอนของชั้นบรรยากาศ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ การวัดจึงรวมถึงสิ่งแวดล้อมจากการวัด, อุณหภูมิส่องสว่าง และการวิเคราะห์ถึงกลไกทางเรดิโอเมทริกจึงมีความสัมพันธ์กับสภาพสิ่งแวดล้อมทางกายภาพด้วย ยกตัวอย่างเช่น ชั้นหิมะเหนือดินอาจมีการสะท้อนของคลื่นเหมือนกับเครื่องบินจากค่าไดอิเล็กทริกที่ต่างกันได้นำไปสู่การพัฒนาอัลกอริทึมที่สมมติให้ความหนาของหิมะ อยู่ในรูปแบบของการวัดอุณหภูมิส่องสว่างที่ความถี่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.14 แสดงการใช้เรดิโอมิเตอร์ทางอากาศสำหรับการตรวจสอบสภาพอากาศ



รูปที่ 2.14 ไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ความถี่ 4.7-7.2 GHz ซึ่งใช้ในเครื่องบินสำหรับการวัดอุณหภูมิส่องสว่าง รวมถึงความเร็วลม ปริมาณน้ำฝน ฝิวน้ำทะเลที่ทำให้เกิดพายุเฮอริเคน [3]

ปัญหาที่พบในการออกแบบเครื่องรับ คือ การทำให้เรดิโอมิเตอร์สามารถแยกแยะระหว่างสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่ต้องการ และสัญญาณรบกวนจากตัวเครื่องรับเองทั้งๆที่กำลังสัญญาณจากภายนอกจะน้อยกว่ากำลังสัญญาณรบกวนของตัวรับก็ตาม แม้ว่ามันจะเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ จึงต้องพิจารณาจากกำลังของเรดิโอมิเตอร์ทั้งหมดเนื่องจากทำให้ง่ายต่อการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมของเรดิโอมิเตอร์ทั้งหมด [3]

จากบล็อกไดอะแกรมกำลังทั้งหมดของเรดิโอมิเตอร์ในรูปที่ 2.16 ซึ่งตัวรับเป็นวงจรซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne) ประกอบด้วยวงจรขยายความถี่ (RF Amplifier) มิกเซอร์ (Mixer) โลคัลออสซิลเลเตอร์ (Local Oscillator) และความถี่กลาง (Intermediate Frequency) และใช้วงจรตรวจจับกำลังงาน (RF Power Detector) ในการตรวจจับแรงดันเอาต์พุต โดยในที่นี้จะสมมติให้สายอากาศไม่มีการสูญเสีย

## 2.5 บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP

### 2.5.1 คุณสมบัติของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

มี MCU ตระกูล AVR8 เบอร์ ATmega168 ของ ATMEL Run ความถี่ 16.00 MHz มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรม 16 Kbyte ถ้าใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านระบบ AVRISP หรือ 14 Kbyte เมื่อใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านระบบ Boot Loader RS232

1) SRAM ใช้งานขนาด 1 Kbyte และ EEPROM ใช้งานขนาด 512 Byte

2) มี GPIO ใช้งานจำนวน 22 bits

3) Digital GPIO จำนวน 14 bits

4) Analog Input (ADC) ขนาดความละเอียด 10 bits จำนวน 8 ช่อง

5) ใช้งานกับแรงดันไฟตรงขนาด +5 V. โดยใช้ได้ทั้งกับแหล่งจ่าย +5 VDC/500 mA

จากพอร์ต USB และจากแหล่งจ่าย +5 V. จากภายนอกได้ด้วยพร้อมไดโอดแปลงแสงแสดงสถานะของแหล่งจ่าย

6) มีวงจร External Reset แบบ RC Reset และ Switch Reset พร้อมภายในบอร์ด

7) ขั้วต่อ USB สำหรับเชื่อมต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC ผ่าน USB Bridge ของ FTDI

เอกสารนี้เป็นรูปแบบของการสื่อสารอนุกรม RS232 สำหรับใช้งานสื่อสารและ Download Code ให้กับ MCU การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดในบอร์ด อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) มีขั้ว AVRISP แบบ IDE 10PIN สำหรับใช้ Download โปรแกรมให้กับ MCU ภายในบอร์ดในกรณีไม่ต้องการใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านทาง Bootloader

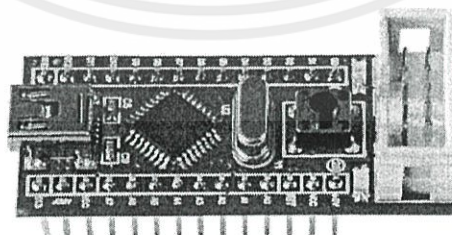
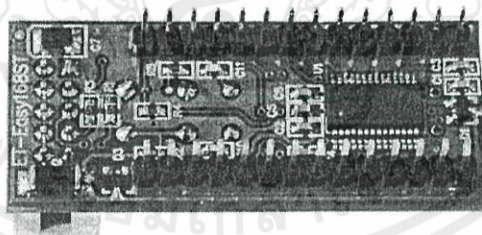
9) มีหลอดไฟ LED แสดงสถานะโดยต่อกับ PB5 ของ AVR สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ทดลองการทำงานอย่างง่าย

เนื่องจากบอร์ด ET-EASY168 STAMP มีการติดตั้งโปรแกรม Bootloader ไว้เรียบร้อยแล้วโดยโปรแกรม Bootloader ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารเพื่อส่ง Upload Code จากคอมพิวเตอร์ให้กับ MCU ในบอร์ดทำงาน โดยไม่ต้องใช้เครื่องโปรแกรมภายนอก โดยคุณสมบัติของ Bootloader ที่ถูกปรับปรุง มีคุณสมบัติในการทำงานเป็นดังนี้

- 1) สื่อสารกับโปรแกรมภายนอกด้วย Protocol แบบ STK500 (STK500V1)
- 2) ใช้ความเร็ว Baudrate 19200 โดยใช้ความถี่ XTAL 16 MHz
- 3) โปรแกรม Bootloader มีขนาด 2 KByte ทำงานที่ตำแหน่ง 0x3800-0x3FFF
- 4) ใช้ LED ที่ต่อกับขา Digital-13 (PB5) เป็นตัวแสดงสถานะในขณะที่ Bootloader

ทำงาน

โปรแกรมใน Bootloader จะทำงานโดยอัตโนมัติทุกครั้งหลังการรีเซ็ตโดย MCU จะเริ่มต้นทำงานใน Bootloader ก่อนเสมอซึ่งถ้าไม่มีการติดต่อสื่อสารจากโปรแกรม Arduino ภายในเวลาประมาณ 3 วินาที MCU ก็จะออกจากการทำงานใน Bootloader เพื่อไปเริ่มต้นทำงานตามคำสั่งที่เป็นของผู้ใช้โดยอัตโนมัติโดยในขณะที่ Bootloader ทำงานตอนเริ่มต้นจะเห็นไดโอดเปล่งแสงที่ต่อไว้กับขาสัญญาณ Digital-13 (PB5) กระพริบ 3 ครั้งแล้วติดค้างเพื่อรอการติดต่อสื่อสารจากโปรแกรมสำหรับสั่งให้ทำการ Upload Code ให้กับ MCU ซึ่งถ้าไม่มีการติดต่อสื่อสารจากโปรแกรมของ Arduino ภายในระยะเวลาประมาณ 3 วินาที โปรแกรมก็จะกระโดดไปทำงานในตำแหน่งเริ่มต้นที่เป็นส่วนของโปรแกรมที่ผู้ใช้เขียนขึ้นทันที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปมอบเอาให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.16 ลักษณะของบอร์ด ET-EASY168 STAMP [5]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 โครงสร้างของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

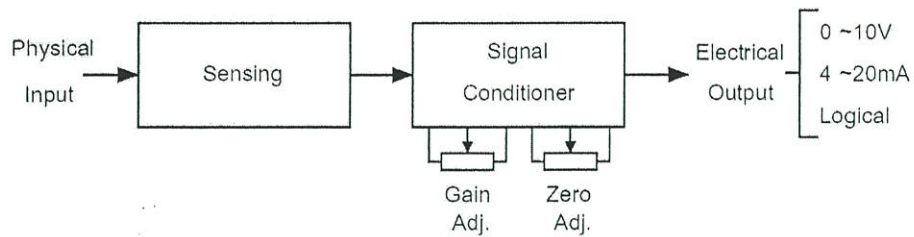
ลักษณะของบอร์ด ET-EASY168 STAMP จากรูปที่ 2.16 จำแนกหน้าที่ของขาสัญญาณได้ดังนี้

- 1) +5 V. (+Vin) เป็นขาสำหรับใช้เป็นจุดรับแรงดันขนาด +5 V. DC จากภายนอกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด
- 2) +VCC (+5V.) เป็นขาแหล่งจ่ายไฟจุดเดียวกันกับที่ป้อนให้กับ +VCC ของ MCU ซึ่งจุดนี้จะรับแรงดันมาจาก 2 แหล่งด้วยกันคือขารับแรงดัน +5 V. (+Vin) จากขา 28 ของบอร์ดและจากขา +VUSB (+5V.) จากหัว USB ของบอร์ดโดยมี Diode ป้องกันการย้อนกลับของแรงดันไว้แล้ว
- 3) +AREF เป็นขาสำหรับรับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (Analog Reference) ให้กับวงจร Analog Input ในกรณีต้องการใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก
- 4) RESET# เป็นขาสัญญาณ RESET ของ CPU ทำงานที่ Logic “0”
- 5) Digital [0-13] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V.) ต่างๆ
- 6) Analog [0-7] เป็นขา Input แบบ Analog สามารถรับ Input แบบอนาล็อกตั้งแต่ 0 จนถึง 5 V.

## 2.6 วงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น

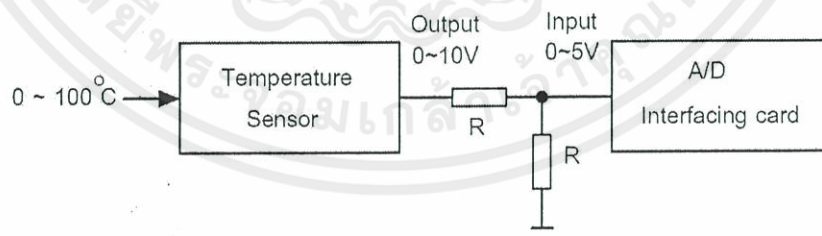
ในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าโดยใช้วงจรตรวจจับกำลังงานและวัดผ่านทางการ์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ A/D (Analog to Digital Interfacing Card) ซึ่งมีย่านวัดของสัญญาณขาเข้าจะต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 5 V. เท่านั้นส่วนบริเวณหรือขอบเขตของสัญญาณที่ต้องการสังเกตการณ์นั้นจะมีช่วงแคบอาจจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 1 V. เท่านั้นโดยโครงสร้างทั่วไปของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณจะมีด้วยกันอยู่สองส่วนได้แก่ส่วนแรกเป็นตัวรับรู้คุณลักษณะสมบัติทางด้านฟิสิกส์ (Physical Sensing) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของอุณหภูมิแสงเสียงความชื้นน้ำหนักแรงกระทำความดันหรืออื่นๆซึ่งตัวรับรู้สามารถที่แปรเปลี่ยนปริมาณทางฟิสิกส์นี้ให้กลายเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ต่อนั้นก็จะส่งสัญญาณไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กันกับปริมาณทางฟิสิกส์นี้เข้าสู่วงจรปรับแต่งสัญญาณตามเงื่อนไขที่กำหนด (Signal Conditioner) ดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณโดยทั่วไป [6]

โดยสัญญาณที่ออกมาทางเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณอาจจะอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟตรงระหว่าง 0 ถึง 10 V. ซึ่งเป็นข้อกำหนดมาตรฐานของอุปกรณ์ตรวจจับโดยทั่วไปโดยอาจจะมีตัวช่วยปรับอัตราขยาย (Gain Adjust) และตัวช่วยปรับค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ (Zero Adjust) ให้ผู้ใช้ทำการปรับแต่งเองได้บ้างเล็กน้อยแต่ส่วนมากตัวตรวจจับที่สามารถปรับแต่งได้บ้างนั้นมีราคาสูงหรือสัญญาณขาออกอาจถูกปรับปรุงเป็นสัญญาณที่ระดับแรงดันสูงและต่ำเท่านั้นโดยเทียบเท่ากับสัญญาณทางลอจิกในเชิงของดิจิทัลคือลอจิก “1” หรือ “High” และลอจิก “0” หรือ “Low” ก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่ข้อกำหนดในการออกแบบวงจรปรับแต่งรูปแบบของสัญญาณทางขาออกและเป้าหมายของการนำเอาอุปกรณ์ตัวตรวจจับไปใช้งานสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับที่ใช้เป็นชนิดที่มีการจัดรูปแบบของสัญญาณขาออกอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟตรงโดยผ่านการวัดตลอดช่วงของการวัดเรียกว่า “สเปน” (Span) เมื่อตัวตรวจจับอุณหภูมิตัวหนึ่งมีย่านวัดอยู่ในช่วง 0~100°C และมีแรงดันขาออกระหว่าง 0 ถึง 10 V. ที่สัมพันธ์กันกับอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นและแรงดันขาออกนี้ถูกเชื่อมต่อไปยังการ์ดเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ A/D ขนาด 8 bits ซึ่งมีย่านวัดของสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 5 V. ทั้งนี้ถ้าต้องการสังเกตการณ์ตลอดทั้งช่วงของสเปนต้องทำการลดค่าแรงดันสูงสุดของสเปนลงเป็นครึ่งหนึ่งซึ่งอาจใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานทั้งสองมีค่าเท่ากันดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การวัดสัญญาณตลอดช่วงสเปนโดยการลดระดับแรงดันลงเป็นครึ่งหนึ่งเพื่อเชื่อมโยงกับ A/D card [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

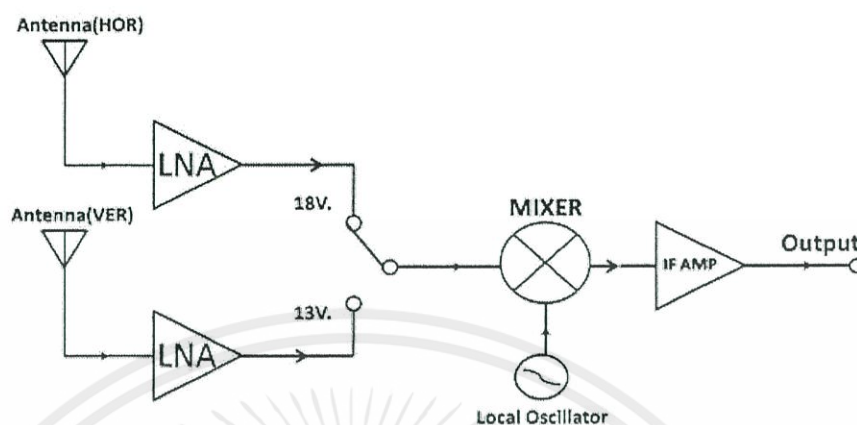
## 2.7 อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนของสัญญาณต่ำ (Low Noise BlockdownFeedhorn: LNBF)

พื้นฐานการทำงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนของสัญญาณต่ำมีหน้าที่รับสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมสัญญาณที่ส่งจากดาวเทียมมาที่จานรับสัญญาณ แล้วสะท้อนไปรวมกันที่จุดโฟกัส ณ จุดโฟกัสที่มีอุปกรณ์ที่เรียกว่า LNBF ภายใน LNBF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้แรงขึ้นและแปลงสัญญาณที่ได้ให้มีความถี่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ที่ส่งลงมาจากดาวเทียมนั้น มีความถี่สูงมาก โดยย่าน C-BAND มีความถี่อยู่ในช่วง 3.4 – 4.2 GHz ส่วนย่าน KU-BAND มีความถี่อยู่ในช่วง 10.7 - 12.75 GHz ซึ่งความถี่ที่สูงขนาดนี้ไม่สามารถส่งผ่านสายนำสัญญาณได้ สัญญาณจะสูญเสีย (Loss) ไปในสายจนหมดจึงต้องทำการแปลงความถี่ให้ต่ำลงเพียงพอที่จะส่งลงมาตามสายนำสัญญาณโดยไม่เกิดการสูญเสียมากนัก โดยเรียกความถี่ที่ถูกแปลงแล้วว่าความถี่กลาง (Intermediate Frequency: IF) ซึ่งอยู่ในช่วง 950 MHz ความถี่กลางที่ออกมาจาก LNBF จะถูกส่งผ่านสายเคเบิลไปยังเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อแปลงสัญญาณที่รับได้นั้นให้เป็นภาพและเสียง

โดยพื้นฐานแล้วภายใน LNBF จะต้องทำหน้าที่หลักๆ สองหน้าที่คือ ส่วนของการขยายสัญญาณซึ่งเรียกว่าชุดขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier: LNA) หน้าที่ของชุดขยายแบบสัญญาณรบกวนต่ำคือ ทำการขยายสัญญาณจากดาวเทียมให้มีความแรงมากขึ้นและทำหน้าที่ขจัดสัญญาณรบกวนในขณะเดียวกัน หน้าที่ที่สอง คือจะต้องแปลงความถี่ที่ขยายจากชุดขยายแบบสัญญาณรบกวนต่ำให้มีความถี่ต่ำลง วงจรในส่วนนี้ถูกเรียกว่าดาวนคอนเวอร์เตอร์ (Down Converter) วงจรในส่วนของแปลงความถี่ให้ต่ำลงนั้น ใช้หลักการเช่นเดียวกันกับเครื่องรับวิทยุ มีวงจรกำเนิดความถี่ภายใน (Local Oscillator: LO) ความถี่ที่ได้จากวงจรมีความถี่ภายในถูกส่งไปยังวงจรรวมความถี่ (Mixer) เพื่อทำการผสมสัญญาณกับสัญญาณที่ถูกส่งมาจากชุดขยายแบบสัญญาณรบกวนต่ำ

ภายในวงจรรวมสัญญาณสัญญาณทั้งสองจะถูกผสมกันตามสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีทั้งการเอามาบวก ลบ คูณ หาร และอื่นๆ แต่ในที่นี้จะกรองเอาเฉพาะความถี่ที่มีการลบกันหรือความถี่ผลต่างมาใช้งาน ซึ่งวงจรในส่วนนี้ถูกเรียกว่าอุปกรณ์กรองความถี่กลาง (IF Filter) ภายในอุปกรณ์กรองความถี่กลางซึ่งมีวงจรขับ (Driver) เพื่อทำให้สัญญาณมีความแรงพอที่จะส่งสัญญาณไปตามสายเคเบิล เพื่อส่งต่อไปยังเครื่องรับต่อไปดังรูป 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงจรต่างๆภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนของสัญญาณต่ำ

จากรูปเห็นได้ว่ามีสายอากาศแนวตั้ง (Vertical Antenna) และแนวนอน (Horizontal Antenna) จากการใช้งานแล้วหลักการคือเป็นการควบคุมให้เลือกรับสัญญาณได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน เนื่องจากดาวเทียมบางดวงมีการแพร่สัญญาณแบบวงกลม (Circular) เป็นการแพร่กระจายคลื่นแบบเป็นเกลียวหมุนวนซ้ายหรือขวา ซึ่งตัวรับสัญญาณเป็นสายอากาศแนวตั้งหรือแนวนอนจะรับสัญญาณได้ดี และเป็นการจัดสรรความถี่ให้ได้รับประโยชน์มากที่สุด โดยมีการรบกวนกันน้อยที่สุด

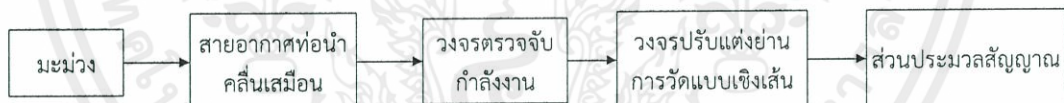
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

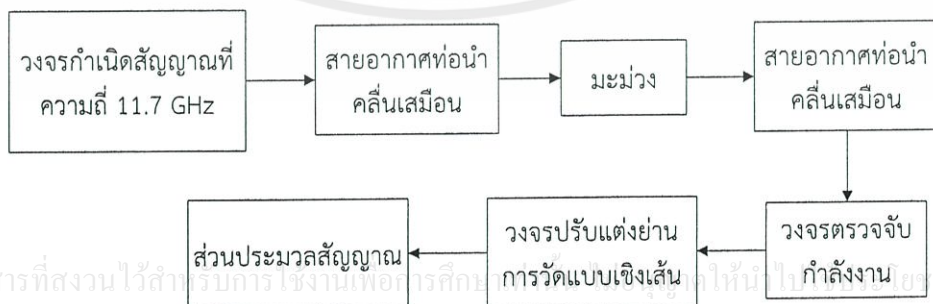
#### การออกแบบ

##### 3.1 บทนำ

การทำงานของเซนเซอร์ไมโครเวฟนั้นเริ่มต้นจากการรับสัญญาณเข้าไปยังระบบ โดยในระบบนี้จะใช้สายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนเป็นตัวรับสัญญาณเข้าระบบโดยออกแบบที่ความถี่ 11.7 GHz ซึ่งในการรับสัญญาณมานั้น ในปริภูมิตฤษฎีได้นำเสนอมาเป็น 2 หลักการคือ หลักการเรดิโอมิเตอร์ทำหน้าที่รับกำลังงานที่ถูกแพร่ออกมาจากมะม่วงและอากาศ หลักการการวัดอากาศว่าง (Free space technique) หลักการทำงานนี้มีสายอากาศช่องเชื่อมต่อยุ่กัน (Coupled Slot Antenna) 2 ตัว ในการทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณผ่านมะม่วง จากนั้นสัญญาณถูกส่งไปยังกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนของสัญญาณต่ำ (Low Noise Blockdown Feedhorn: LNBF) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีความแรงของสัญญาณเพิ่มมากขึ้น และแปลงสัญญาณที่ได้ให้อยู่ในความถี่กลางที่อยู่ในช่วง 1 GHz และสัญญาณที่แปลงแล้วถูกส่งต่อไปให้กับวงจรตรวจจับกำลังงาน (Detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่รับได้ให้เป็นแรงดันไฟตรง ต่อจากนั้นวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น (Zero and Span) เพื่อขยายย่านการวัดให้ง่ายต่อการประมวลผล และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนประมวลผลระดับสัญญาณที่ได้รับมาทำหน้าที่เปรียบเทียบระดับแรงดันไฟตรงที่ได้รับเพื่อแยกแยะความสุกดิบของมะม่วงได้สามารถสรุปการทำงานออกได้ดังบล็อกไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 3.1 การทำงานของหลักการเรดิโอมิเตอร์

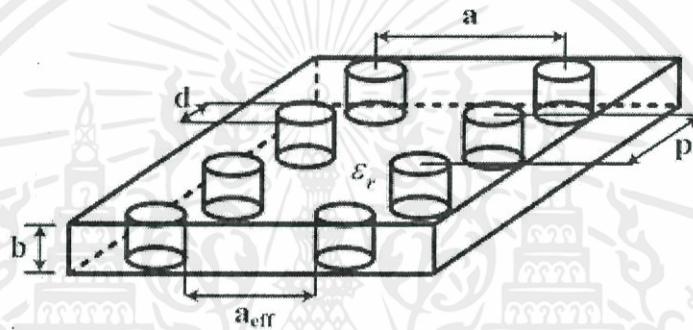


รูปที่ 3.2 การทำงานของหลักการวัดอากาศว่าง

## 3.2 การออกแบบ

### 3.2.1 ท่อนำคลื่นเสมือน (Substrate Integrated Waveguide: SIW)

ท่อนำคลื่นเสมือนเป็นการใช้เทคนิคของท่อนำคลื่น ซึ่งจะมีการออกแบบโดยใช้โครงสร้างรูเป็นทางตรงแบบเพอริออดิก (Periodic Via-Hole) เป็นเหมือนกำแพงกั้นขอบทั้งสองข้างในของแผ่นวัสดุฐานรองของแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) โดยเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพของการแพร่กระจายของท่อนำคลื่นเสมือนซึ่งวิเคราะห์ตามรูปแบบของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมควมมีระยะห่างที่น้อยที่สุด เพื่อป้องกันการรั่วไหลของการแผ่พลังงาน



รูปที่ 3.3 โครงสร้างท่อนำคลื่นเสมือน [1]

จากรูปที่ 3.3  $a$  คือ ระยะห่างระหว่างแถวลำดับของแถบรูที่คู่ขนานกัน,  $b$  คือ ความสูงของแผ่นวัสดุฐานรอง,  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละรูและ  $p$  คือ ระยะห่างของรูแต่ละลำดับในทางปฏิบัติแล้ว โหมดของท่อนำคลื่นเสมือน เป็นโหมด  $TE_{1,0}$  ซึ่งสามารถหาความถี่คัทออฟของโหมด  $TE_{1,0}$  จากสูตร

$$f_c(TE_{10}) = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \times \left( a - \frac{d^2}{0.95 \times p} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

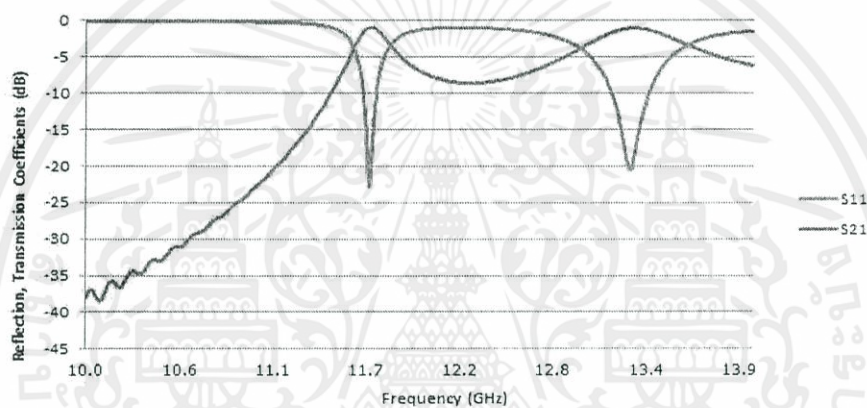
ซึ่งกำหนดให้  $f_c = 11.6 \times 10^9$  Hz,  $c_0 = 3 \times 10^8$  m/s,  $\epsilon_r = 2.2$  ในที่นี้ใช้แผ่นวัสดุฐานรองชนิด Rogers (RT 5880) Duroid,  $d = 1$  mm,  $p = 2$  mm สามารถคำนวณจะได้  $a = 9.24$  mm ความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของขอบเขตท่อนำคลื่นเสมือนและความกว้างประสิทธิภาพ  $a_{eff}$  ของรูปแบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม มีคุณลักษณะการแผ่พลังงานที่เหมือนกัน แสดงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ด้านการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_{eff} = a - 1.08 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{a} \quad (3.2)$$

สามารถคำนวณ  $a_{eff} = 8.71$  mm โดยสภาพที่ดีที่สุดของการลดทอนคงที่และการรั่วไหลของการแผ่พลังงานระหว่างรูควรจะเป็นดังนี้  $d/p \geq 0.5$  และ  $d/\lambda_0 \leq 0.1$  ซึ่ง  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศ

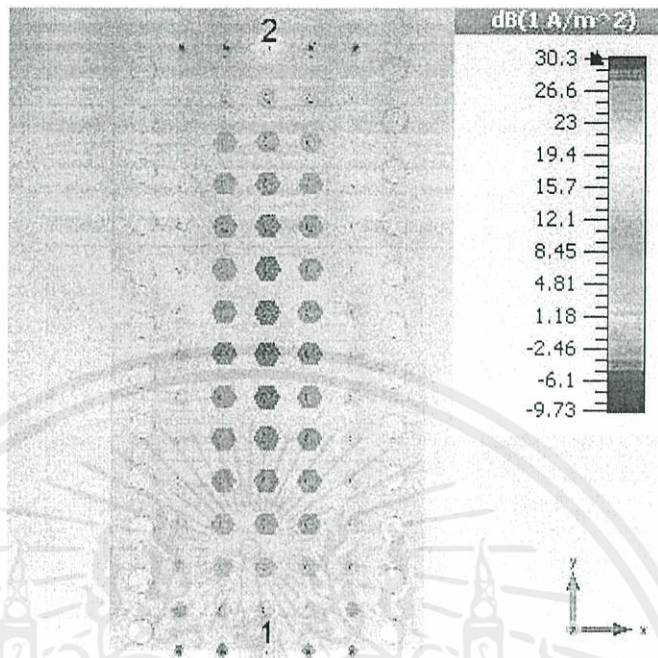
จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ท่อนำคลื่นเสมือนทำงานที่ความถี่ 11.7 GHz โดยใช้แผ่นวัสดุฐานรองคือ Rogers (RT 5880) Duroid มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) = 2.2 และ ค่ามุมสัมผัสสูญเสียน (loss tangent) = 0.0009 และมีความหนา 1.6 mm ความถี่คัทออฟ (Cut-off Frequency) โหมด  $TE_{1,0}$  ซึ่งกำหนดให้  $d$  เท่ากับ 1 mm และ  $p$  เท่ากับ 2 mm ค่าความกว้าง  $a$  และ  $a_{eff}$  ได้เท่ากับ 9.24 mm และ 8.71 mm ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้ใช้ในการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 การจำลองค่า S พารามิเตอร์ของโครงสร้างท่อนำคลื่นเสมือน

ค่า  $|S_{21}|$  จากการจำลองด้วยมีค่าความถี่คัทออฟ (Cut-off Frequency) อยู่ที่ 11.6 GHz ขณะที่  $|S_{11}|$  มีค่าต่ำกว่า -10 dB และมีค่าต่ำสุดที่ความถี่ 11.7 GHz ซึ่งรูปที่ 3.5 แสดงถึงระดับความเข้มของกระแสไฟฟ้าในท่อนำคลื่นเสมือนโดยจะมีค่าความเข้มกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่กึ่งกลางและลดระดับความเข้มลงไปเรื่อยๆ เมื่อถึงขอบของรู ซึ่งรูช่วยในการป้องกันการรั่วไหลของความเข้มกระแสไฟฟ้า เป็นเสมือนกำแพงจำกัดความเข้มกระแสไฟฟ้าไว้ข้างใน หากระยะห่างระหว่างรูแต่ละลำดับ เป็นระยะที่เหมาะสม ใดๆก็ตาม ท่อนำคลื่นเสมือนที่ได้ออกแบบไว้ ก็ยังมีความเข้มกระแสไฟฟ้ารั่วออกมาบ้างเล็กน้อย ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การจำลองความเข้มกระแสไฟฟ้า

### 3.2.2 การออกแบบสล็อตบนท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

การออกแบบสล็อตบนท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมต้องคำนวณความยาวของสล็อต ซึ่งความยาวสล็อตต้องอยู่ระหว่าง  $\frac{\lambda_g}{2} < L < \frac{\lambda_0}{2}$  โดยที่  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศคำนวณจาก

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.3)$$

โดย  $c = 3 \times 10^8$  m/s,  $f = 11.7 \times 10^9$  Hz สามารถคำนวณได้  $\lambda_0 = 0.0256$  m ดังนั้น

$$\frac{\lambda_0}{2} = 0.0128 \text{ m และคำนวณ } \frac{\lambda_g}{2} \text{ จาก}$$

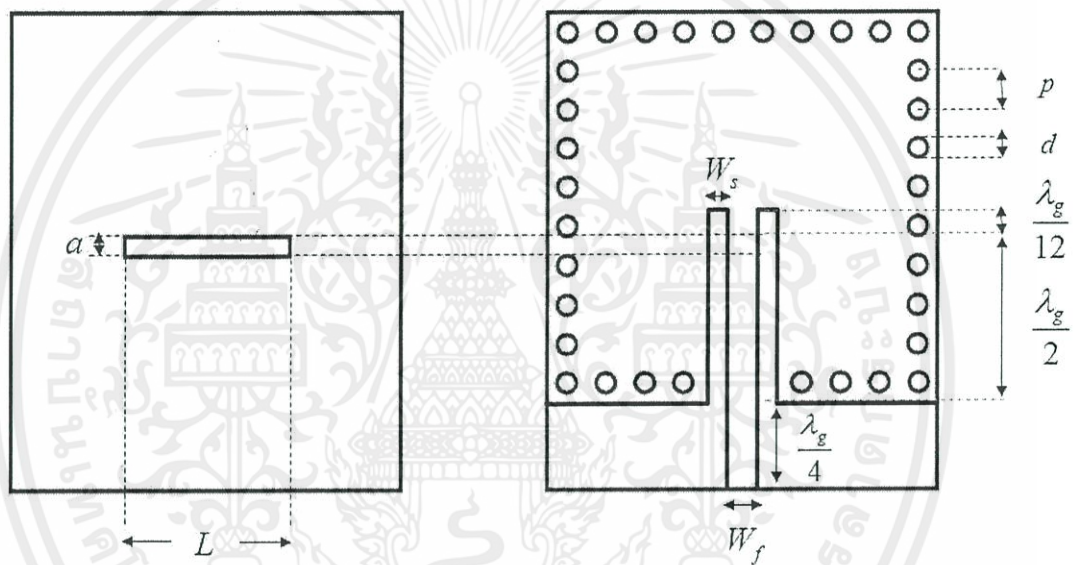
$$\frac{\lambda_g}{2} = \frac{\lambda_0/2}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ในที่นี้ใช้แผ่นวัสดุฐานรองเป็น RT Duroid 5880 มีค่าเท่ากับ 2.2 สามารถคำนวณได้  $\frac{\lambda_g}{2} = 0.0086$  m

ดังนั้นความยาวของร่องสล็อตควรรู้อยู่ระหว่าง  $0.0086 < L < 0.0128$  m และความยาวของสายนำสัญญาณเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{4} + \frac{\lambda_g}{2} + \frac{\lambda_g}{12}$  m

โดย  $\frac{\lambda_g}{4}$  มีค่าเท่ากับ 4.32 mm,  $\frac{\lambda_g}{2}$  มีค่าเท่ากับ 8.64 mm,  $\frac{\lambda_g}{12}$  คือ stub tuner มีค่าเท่ากับ 1.44 mm จะได้ความยาวสายนำสัญญาณเท่ากับ 14.4 mm

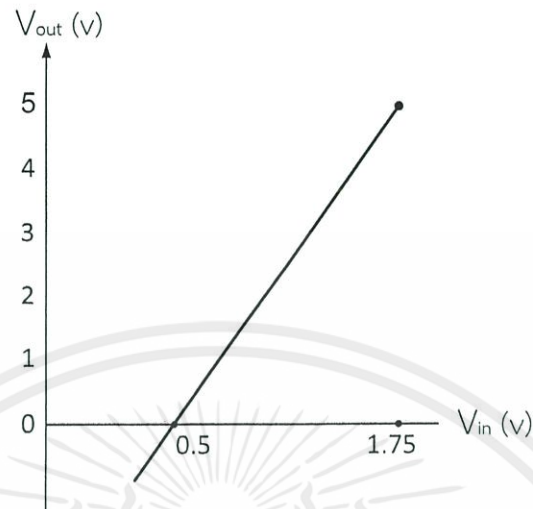


รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศ

### 3.2.3 วงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น

วงจรมีเป็นวงจรขยายที่ทำให้ช่วงที่พิจารณานั้นขยายขึ้นทำให้ง่ายต่อการพิจารณาความแตกต่างของระดับสัญญาณอนาล็อกที่ได้รับ ซึ่งช่วงที่ทำการพิจารณานั้นคือช่วง 0.5 ถึง 1.75 V. เนื่องจากเป็นระดับของสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรตรวจจับสัญญาณ และปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณาเพื่อให้เชื่อมต่อเข้ากับบอร์ด ET-EASY168 STAMP ซึ่งรับสัญญาณอนาล็อกที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 5 V. เท่านั้น โดยวงจรมีจะอยู่ตรงกลางระหว่างวงจรตรวจจับสัญญาณ และ ET-EASY168 STAMP โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้า ( $V_{in}$ ) และแรงดันขาออก ( $V_{out}$ ) ได้ในรูปแบบของกราฟเส้นตรงได้ ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟเส้นตรงของวงจรขยายและการปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.7 สามารถหาสมการเส้นตรงของกราฟนั้น โดยคำนวณหาค่าความชัน (Slope) และหาค่าจุดตัดบนแกนแรงดันขาออก โดยรูปแบบของสมการได้ดังนี้

$$V_{out} = mV_{in} + c \quad (3.5)$$

เมื่อ  $m$  คือ ค่าความชันของเส้นตรงโดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.6  
 $c$  คือ จุดตัดบนแกนบนแกนของแรงดันขาออก

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.6)$$

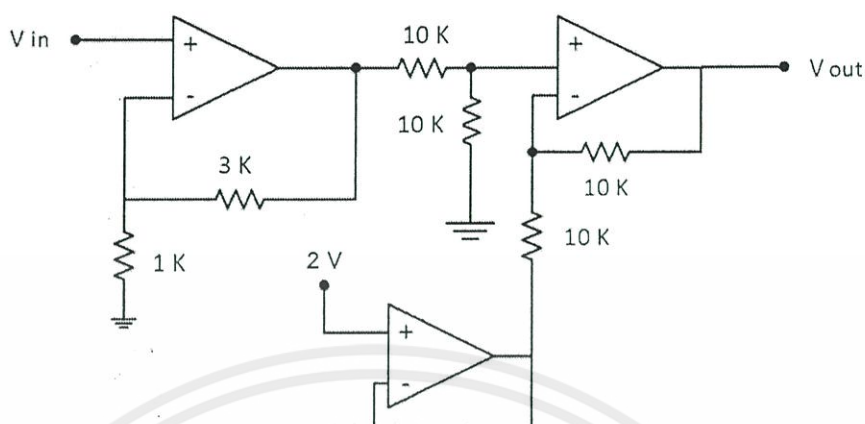
ได้ค่า  $m$  เป็น 4 และ  $c$  เป็น -2

แทนค่าที่ได้ลงสมการของกราฟเส้นตรงของวงจรขยายและปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณาที่ต้องการในสมการที่ 3.7

$$V_{out} = 4V_{in} - 2 \quad (3.7)$$

เมื่อได้สมการที่ต้องการปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณาออกมาแล้ว สามารถสร้างวงจร โดยอาศัยวงจรขยายสัญญาณได้ ดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



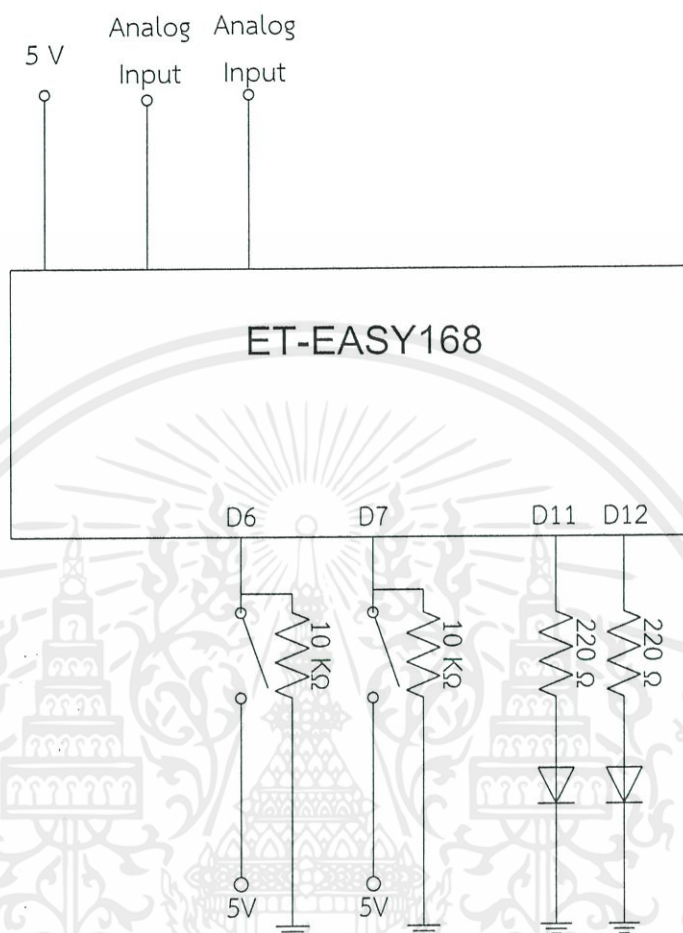
รูปที่ 3.8 วงจรขยายและปรับแต่งย่านของช่วงที่พิจารณาตามสมการ

จากวงจรที่แสดงดังรูปที่ 3.8 ออปแอมป์ตัวที่ 1 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting Amplifier) ที่มีอัตราขยายเป็น 4 ทำให้แรงดันขาเข้าถูกขยายเป็น 4 เท่า ออปแอมป์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแบบกันชน (Buffer Amplifier) ซึ่งมีอัตราขยายเป็น 1 ทำให้มีแรงดันคงที่จากแรงดันที่เข้ามาภายในนั้นคือ 2 V. และออปแอมป์ตัวที่ 3 ทำหน้าที่เป็น วงจรขยายผลต่างแรงดัน (Differential Amplifier) โดยในวงจรเป็นการหักกลับสัญญาณที่เข้ามาภายในวงจรขยายผลต่างแรงดันนี้ จึงทำให้แรงดันขาออกจากวงจรนี้มีสมการเช่นเดียวกันกับในสมการที่ 3.7 และจึงทำการส่งแรงดันนี้เข้าไปยังบอร์ด ET-EASY168 STAMP เพื่อทำการประมวลผลต่อไป

### 3.2.4 ส่วนประมวลผลระดับสัญญาณที่ได้รับจากวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น

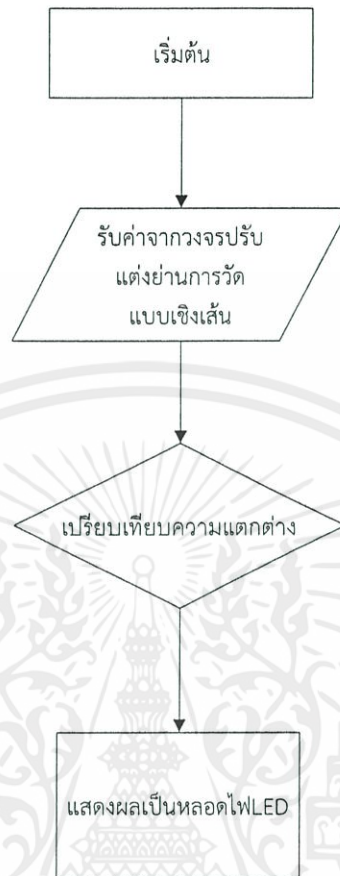
ในส่วนนี้เป็นการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับมาจากวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในช่วงของ 0 ถึง 5 V. ทำการประมวลผลในบอร์ด ET-EASY168 STAM โดยแยกเป็น 2 แบบ คือ ประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากเรดิโอมิเตอร์ซึ่งนำมาหาความแตกต่างระหว่างการวัดสภาพแวดล้อม ณ ขณะนั้น และการวัดค่ากำลังงานของมะม่วง ประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากการวัดอากาศว่าง ซึ่งส่งสัญญาณผ่านมะม่วงและนำมาหาความแตกต่างระหว่างการส่งผ่านในอากาศ และส่งผ่านมะม่วง ว่ามีความแตกต่างเป็นเท่าไร จากนั้นแสดงผลเป็นไดโอดเปล่งแสงโดยมีระดับความสุกดิบของมะม่วงเป็นเกณฑ์การแสดงผลและอาศัยผลในการทดลองการวัดมะม่วงเป็นตัวเปรียบเทียบระดับความสุกดิบของมะม่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรการใช้งานร่วมกับบอร์ด ET-EASY168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กระบวนการทำงานของการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากวงจรปรับตั้งย่านการวัดแบบเชิงเส้น

### 3.3 การจำลองผลสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์สายอากาศจะต้องใช้พารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาสายอากาศ เช่น  $|S_{11}|$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้คำนวณแล้วมาจำลองผลด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศ และสร้างสายอากาศ โดยกำหนดพารามิเตอร์จากรูปที่ 3.11 ดังตารางที่ 3.1

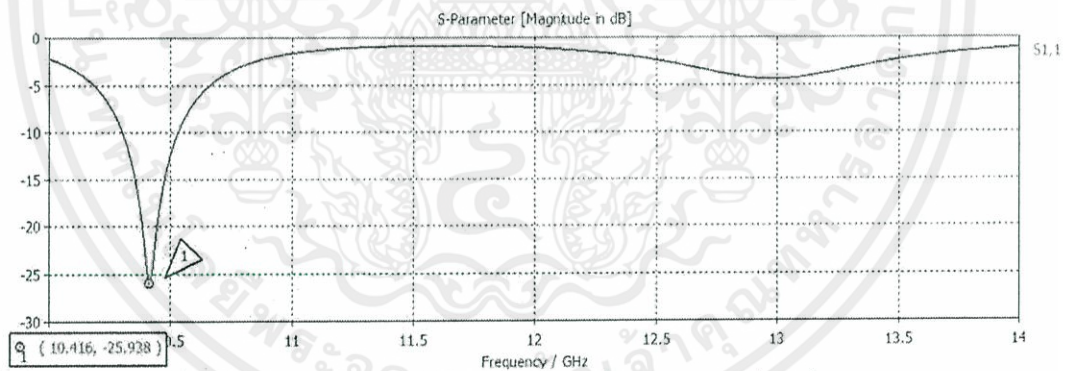
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของการสร้างสายอากาศ

พารามิเตอร์	คำจำกัดความ
$a$	ความกว้างของสลีต
$L$	ความยาวของสลีต
$W_s$	ความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม
$W_f$	ความกว้างของสายนำสัญญาณ
$p$	ระยะห่างระหว่างรูแต่ละลำดับ
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละรู

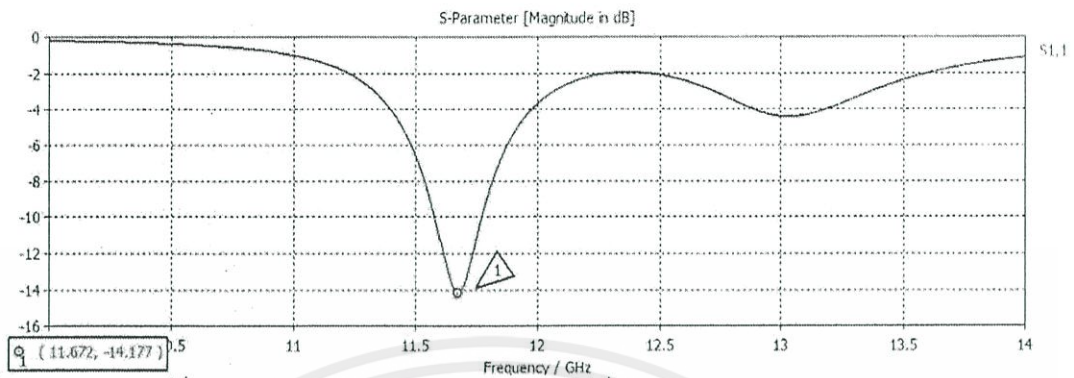
### 3.3.1 การปรับความยาวของสลีต

ในที่นี้จะให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์ค่า  $|S_{11}|$  เป็นสำคัญ ซึ่งเมื่อทำการทดลอง ออกแบบสายอากาศตามขนาดที่ได้คำนวณไว้ได้ค่า  $|S_{11}|$  ดังรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเมื่อความยาวสลีตเป็น 12 mm

จากการคำนวณความยาวของสลีตที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง  $8.6 < L < 12.8$  ในรูปที่ 3.11 ได้ทดลองใช้ความยาวของสลีต ( $L$ ) เท่ากับ 12 mm, ความกว้างของสลีต ( $a$ ) เท่ากับ 1 mm, ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) เท่ากับ 2 mm และความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) เท่ากับ 1 mm เห็นได้ว่าค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 10.416 GHz และค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -25.938 dB ซึ่งต้องปรับความยาวของสลีตให้เล็กลงเพื่อให้ความถี่เลื่อนไปทางขวาที่ 11.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

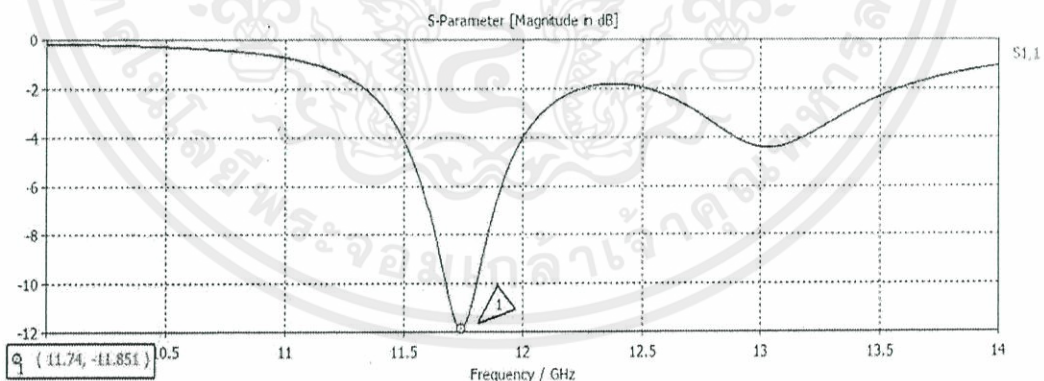


รูปที่ 3.12 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ เมื่อความยาวสลีตเป็น 8.6 mm

เมื่อปรับขนาดให้ความยาวสลีตเล็กลง จนได้ความยาวของสลีต ( $L$ ) เท่ากับ 8.6 mm ความกว้างของสลีต ( $a$ ) เท่ากับ 1 mm และความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) เท่ากับ 2 mm พบว่าค่า  $|S_{11}|$  มีค่าต่ำสุดที่ความถี่ 11.627 GHz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงความถี่ 11.7 GHz ที่ต้องการ และค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -14.177 dB

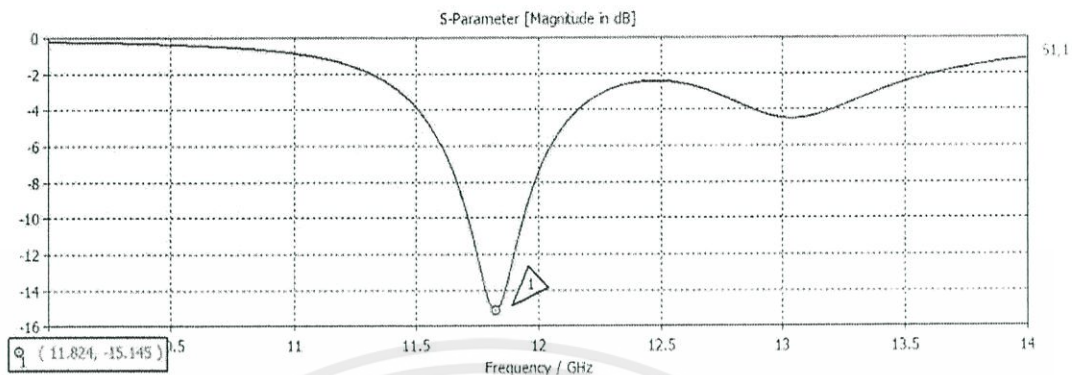
### 3.3.2 การปรับความกว้างของสลีต

การศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของความกว้างสลีต ( $a$ ) โดยให้สลีตมีความยาว ( $L$ ) 8.6 mm เท่าเดิม และทดลองปรับความกว้างของสลีต ( $a$ ) ให้มีความกว้าง 0.5 mm และ 1.5 mm ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ โดยสลีตมีความกว้าง 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

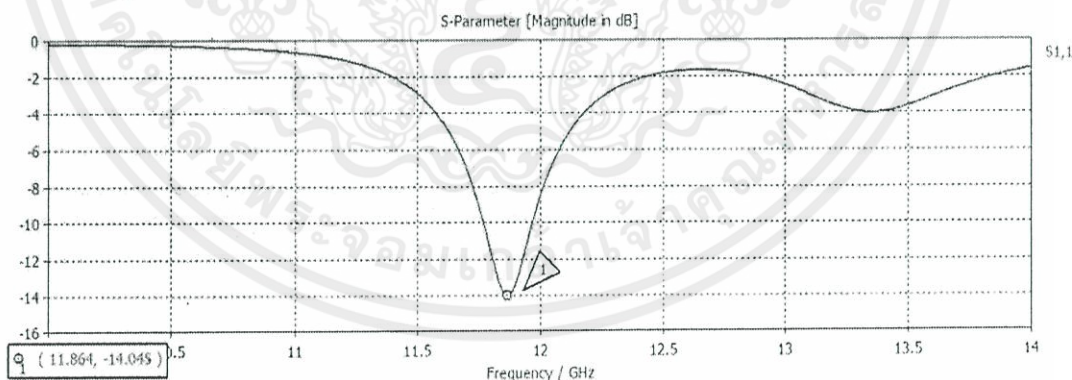


รูปที่ 3.14 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ โดยสลีตมีความกว้าง 1.5 mm

จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 พบว่าการเปลี่ยนแปลงโดยปรับความกว้างของสลีต ( $a$ ) ทำให้ค่า  $|S_{11}|$  และความถี่มีการเปลี่ยนแปลงโดย เมื่อลดความกว้างของสลีตลงเหลือ 0.5 mm ค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -11.851 dB ที่ความถี่ 11.74 GHz และเมื่อเพิ่มความยาวสลีตเท่ากับ 1.5 mm ค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -15.145 dB ที่ความถี่ 11.824 GHz

### 3.3.3 การปรับความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม

การศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตั้งนี้ความยาวของสลีต ( $L$ ) เท่ากับ 12 mm, ความกว้างของสลีต ( $a$ ) เท่ากับ 1 mm, ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) เท่ากับ 2 mm และทดลองปรับความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) เท่ากับ 1.5 mm ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15

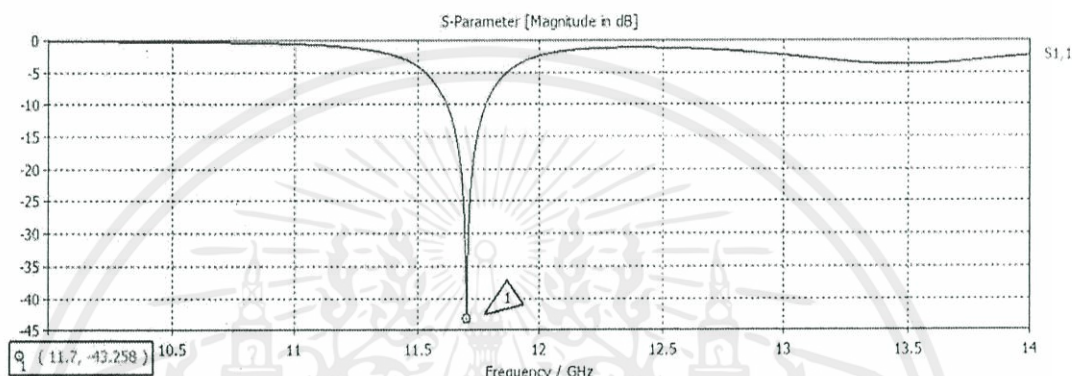


รูปที่ 3.15 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ โดยปรับความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 3.15 เมื่อทดลองปรับความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) ให้มีความกว้างเท่ากับ 1.5 mm พบว่าค่า  $|S_{11}|$  มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ -14.046 dB โดยความถี่เลื่อนไปที่ 11.864 GHz การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การปรับความกว้างของสายนำสัญญาณ

การศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตั้งนี้ความยาวของสล็อต ( $L$ ) เท่ากับ 12 mm, ความกว้างของสล็อต ( $a$ ) เท่ากับ 1 mm, ความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) เท่ากับ 1 mm และทดลองปรับความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) เท่ากับ 1.5 mm ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ โดยปรับความกว้างของสายนำสัญญาณ

เมื่อปรับความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) เท่ากับ 1.5 mm พบว่าค่า  $|S_{11}|$  อยู่ที่ความถี่ 11.7 GHz และมีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -43.258 dB ซึ่งเป็นค่าที่สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

สายอากาศขนาดที่ให้ผลค่า  $|S_{11}|$  ที่ดีที่สุด ควรมีความยาวของสล็อต ( $L$ ) เท่ากับ 8.6 mm ความกว้างของสล็อต ( $a$ ) เท่ากับ 1 mm ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_f$ ) เท่ากับ 1.5 mm และความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) เท่ากับ 1 mm

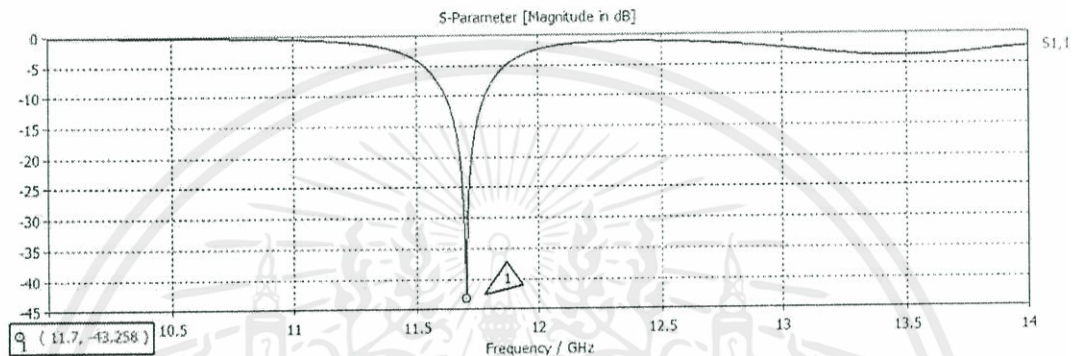
### 3.4 สายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนต้นแบบ

การวิเคราะห์สายอากาศนั้น ใช้พารามิเตอร์หลายตัวในการพิจารณาเช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อิมพีแดนซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะต้องใช้ค่าจากการคำนวณในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 ในการจำลองการสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนำไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

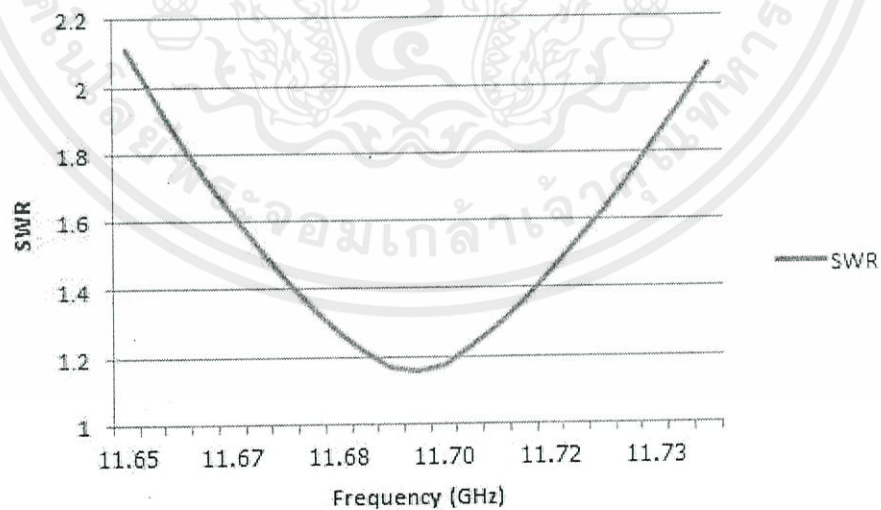
ค่า  $|S_{11}|$  จะต้องน้อยกว่า  $-10$  dB สายอากาศจึงจะสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ ซึ่งจากรูปที่ 3.17 การจำลองด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าให้ผล  $|S_{11}|$  ที่น้อยกว่า  $-10$  dB และสายอากาศมีแบนวิดธ์จาก 11.6 GHz ถึง 11.78 GHz



รูปที่ 3.17 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

### 3.4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันคือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันที่มากที่สุดต่อแรงดันที่น้อยที่สุดของคลื่น ซึ่งได้จากการรวมกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันและเฟสตรงกันข้ามตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันควรมีค่าไม่เกิน 2 และไม่ต่ำกว่า 1

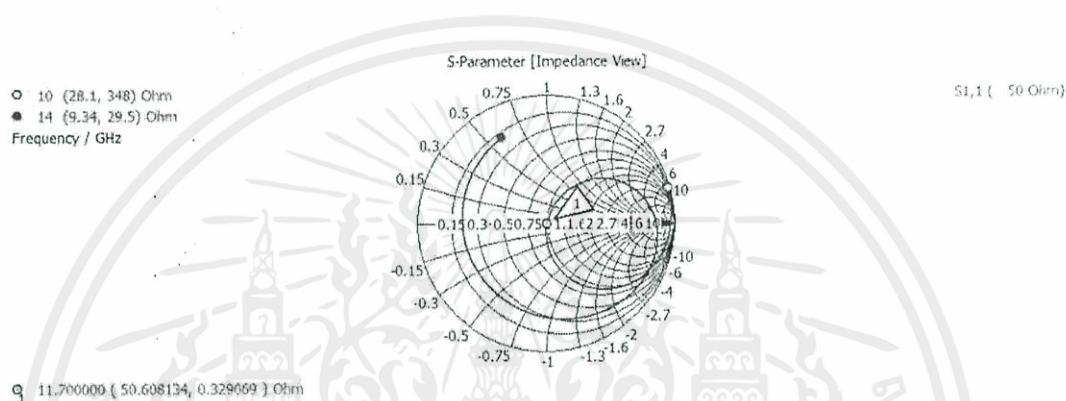


รูปที่ 3.18 การจำลองอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์จะต้องปรับให้ได้เท่ากับ  $50 \Omega$  เนื่องจากอุปกรณ์เชื่อมต่อส่วนใหญ่มีการกำหนดมาตรฐาน เพื่อให้สัญญาณมีการสูญเสียน้อยที่สุด ดังนั้นการออกแบบสายอากาศจึงควรออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ได้ใกล้เคียง  $50 \Omega$  มากที่สุด ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมได้อิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50.61 \Omega$  ที่ความถี่  $11.7 \text{ GHz}$



รูปที่ 3.19 การจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

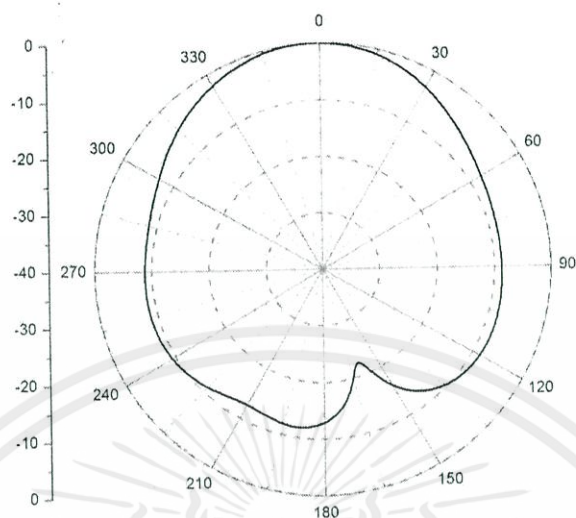
### 3.4.4 อัตราขยายของสายอากาศ

จากการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าที่ความถี่  $11.7 \text{ GHz}$  ให้ อัตราขยาย  $5.678 \text{ dBi}$

### 3.4.5 แบบรูปการแผ่พลังงาน

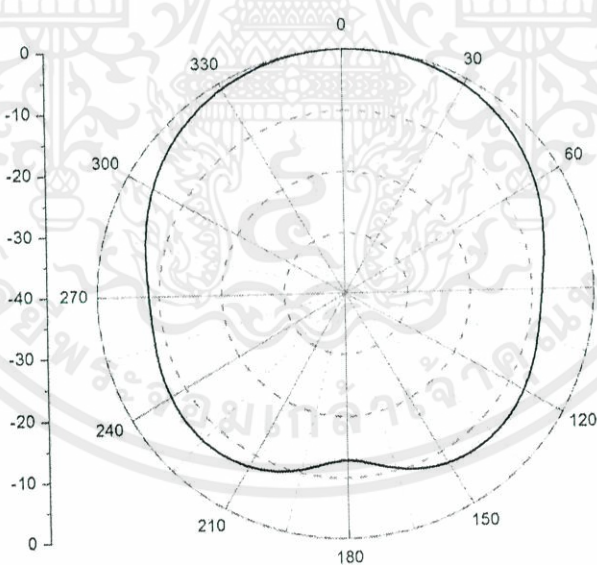
ในระนาบ XZ เมื่อพิจารณาที่ความถี่  $11.7 \text{ GHz}$  มีอัตราขยาย  $5.7 \text{ dBi}$  ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth) เท่ากับ  $64.10 \text{ deg}$ . และระดับลำคลื่นย่อยเท่ากับ  $-8.4 \text{ dB}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ XZ

ในระนาบ YZ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 11.7 GHz มีอัตราขยาย 5.7dBi ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth) เท่ากับ 98.40 deg. และระดับลำคลื่นย่อยเท่ากับ - 6.9 dB

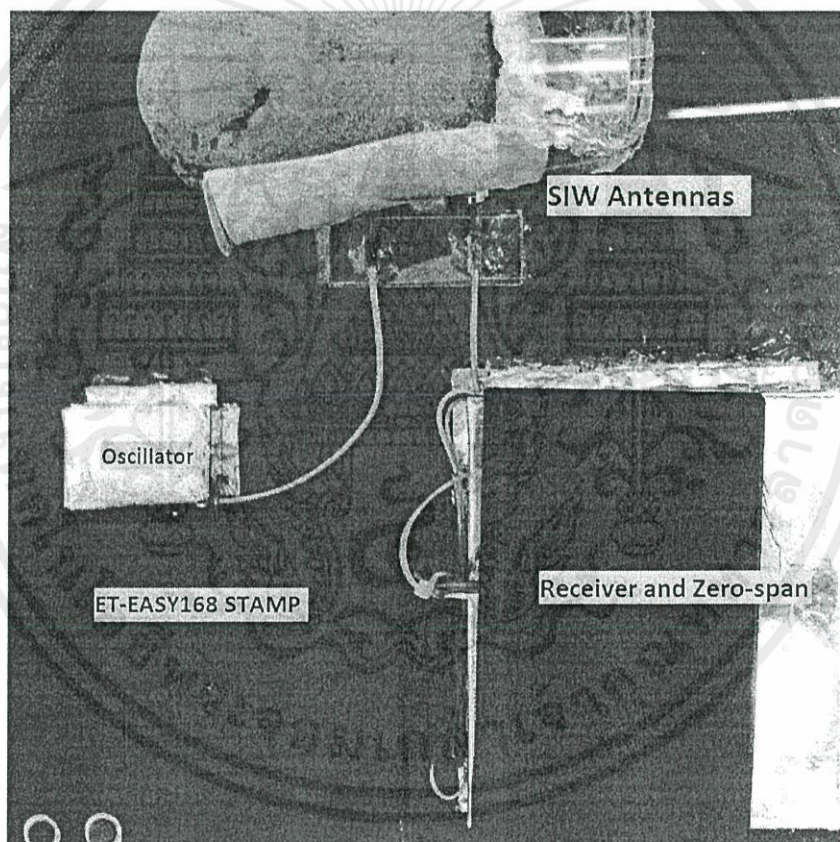


รูปที่ 3.21 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 เซ็นเซอร์ไมโครเวฟ

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟประกอบด้วยภาครับ ภาคส่ง และส่วนประมวลผล ซึ่งภาคส่งประกอบด้วยสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน (SIW Antenna) 1 ตัวทำงานที่ความถี่ 11.7 GHz ต่ออยู่กับวงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) โดยสายอากาศท่อนำคลื่นอีกตัวรับคลื่นที่สะท้อนจากมะม่วง แล้วแปลงเป็นความถี่กลาง (IF Frequency) ผ่านวงจร LNB จากนั้นตรวจจับด้วยวงจรตรวจจับสัญญาณ (RF Power Detector) ซึ่งค่ากำลังที่รับได้จากวงจรตรวจจับสัญญาณจะผ่านการขยายด้วยวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น เพื่อนำค่าที่ไปประมวลผลการวัดความสุกของมะม่วงด้วยบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP



รูปที่ 3.22 เซ็นเซอร์ไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

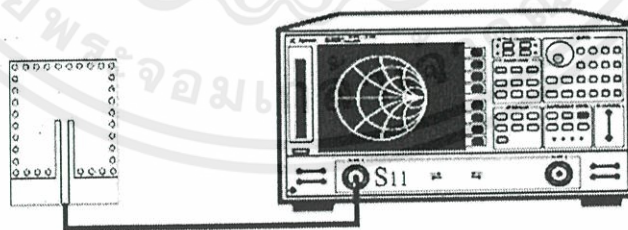
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน ที่ความถี่ 11.7 GHz สำหรับการนำไปประยุกต์เข้ากับการทดลองการจำแนกมะม่วงโดยอาศัยหลักการวัดอากาศว่าง และหลักการเรดิโอมิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ  $|S_{11}|$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ผลการทดสอบการแปรรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ และระนาบ YZ ค่าอัตราขยายของสายอากาศ และทดลองการวัดความสุกดิบของมะม่วงที่อาศัยหลักการการวัดอากาศว่าง

#### 4.2 การทดสอบสายอากาศ

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของสายอากาศที่จำเป็นต่อการทำงานของสายอากาศร่องเชื่อมต่อร่วม

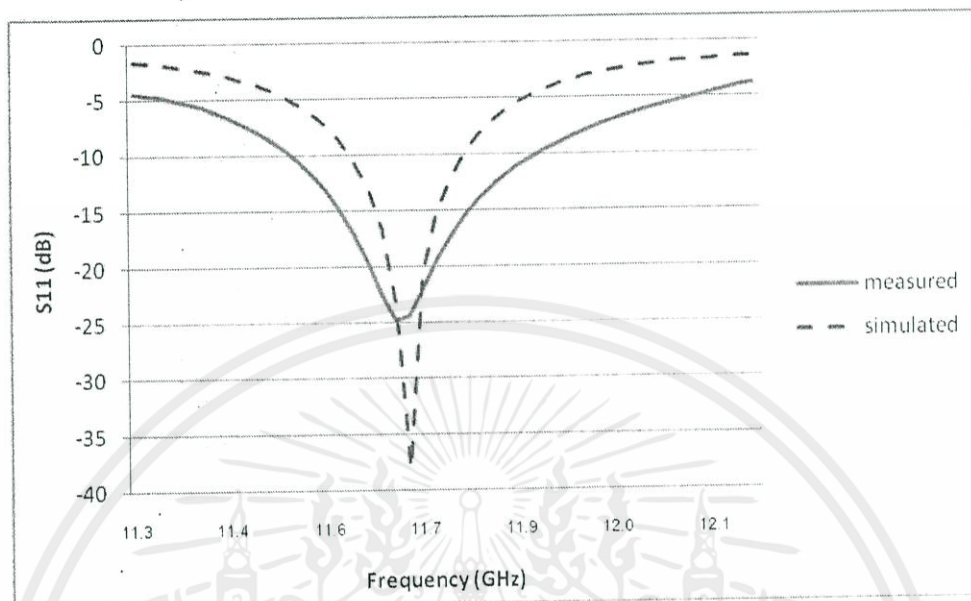
##### 4.2.1 การทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ในการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ ซึ่งเป็นค่าสมบรูณ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นที่เนื่องจากการไม่แมตช์ สามารถทดสอบได้จากการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector Network Analyzer) รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz โดยทำการติดตั้งดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน ได้กราฟที่ได้จากการวัดดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน เห็นได้ว่าที่ความถี่ 11.7 GHz มีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -24.384 dB สามารถนำมาใช้งานได้เนื่องจากมีค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟแสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน มีค่าใกล้เคียงกับที่จำลองมาที่ความถี่ 11.7 GHz ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง และการเลือกวัสดุการทำสายอากาศ ตลอดจนการขั้นตอนการสร้างสายอากาศ

#### 4.2.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน

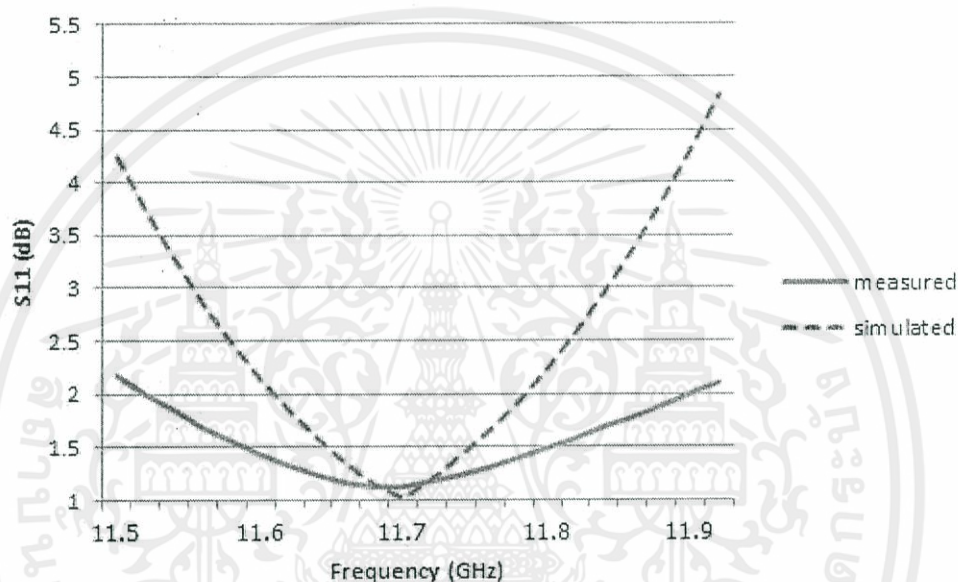
อิมพีแดนซ์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพราะหากว่าสายอากาศที่วัดมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่แมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแล้ว สายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้งานปฏิบัติจริงได้ เพราะจะทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นขึ้นภายในสายนำสัญญาณและจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนต้องมีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50  $\Omega$  มากที่สุด โดยสามารถดูได้จากแผนภูมิสมิท (Smith Chart) จากการที่วัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน มีค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



#### 4.2.3 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งคือค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ส่งไปและคลื่นที่สะท้อนกลับมายังเครื่องส่ง คุณสมบัติของสายอากาศที่จำเป็นต้องพิจารณาคือ สายอากาศที่ดีต้องมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็น 2:1 แต่สายอากาศที่ดีที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงต้องมีอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 1.5:1 จากการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนนั้นได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็น 1.128 ที่ความถี่ 11.7 GHz ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

#### 4.2.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

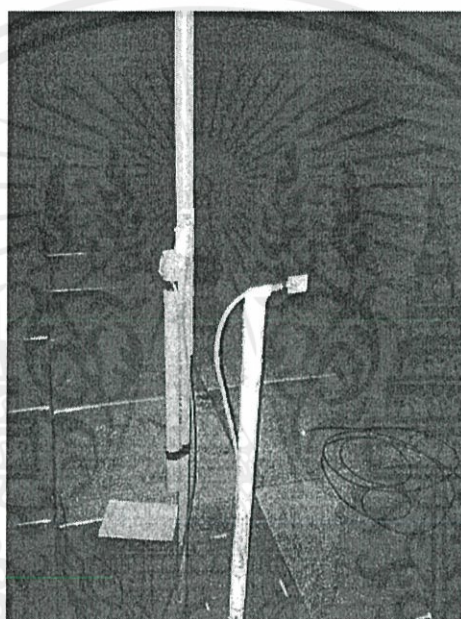
ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ต้องทดสอบในสถานที่ที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำได้ในห้องไร้การสะท้อนที่เป็นห้องสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยทดสอบสายอากาศที่สนามระยะไกล ซึ่งเป็นระยะการแพร่ของสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่ใช้วัดในมุมที่แตกต่างกัน โดยเริ่มจากการคำนวณที่สนามระยะไกลตามสมการที่ 4.1

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นโดยที่การที่ส่งงาน  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (เมตร) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีที่ผิดแบบส่งมอบให้ และต้องอยู่ในเงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณระยะที่ใช้ในการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ความถี่ 11.7 GHz มีสนามระยะไกลอยู่ที่ 7.02 cm.

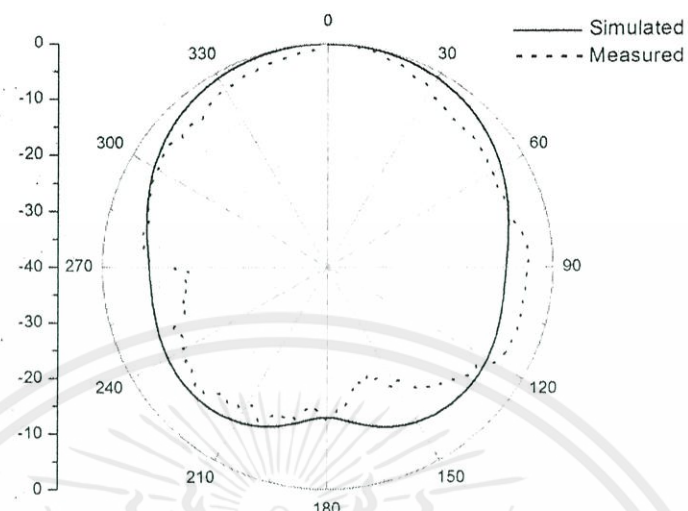
ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในการวัดกำลังส่งและกำลังรับของสายอากาศที่ถูกติดตั้งอยู่ในห้องไร้การสะท้อน โดยสายอากาศตัวรับและตัวส่งวางห่างกันเป็นระยะ 30 cm. และตั้งสูงจากพื้น 1.5 m. โดยใช้สายอากาศตัวส่งเป็นสายอากาศที่นำคลื่นเหมือนอีกตัวหนึ่ง ดังรูปที่ 4.6



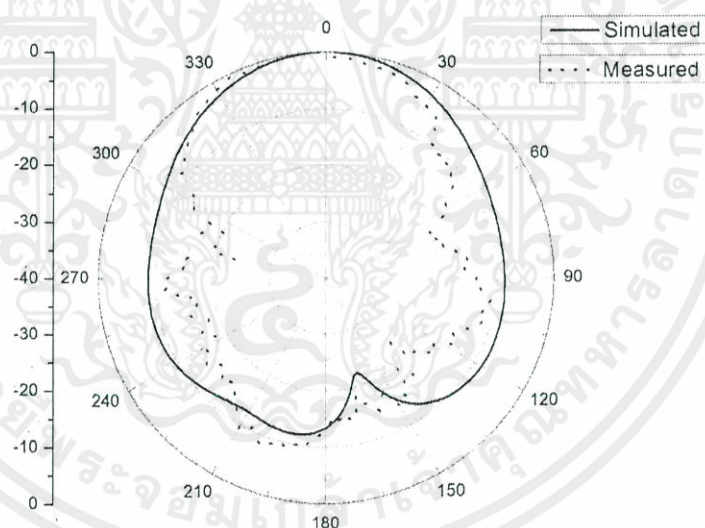
รูปที่ 4.6 การติดตั้งการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ซึ่งในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะทดสอบสองระนาบด้วยกัน คือ ระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ระนาบแกน XZ



ข) ระนาบแกน YZ

รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 11.7 GHz

จากรูปที่ 4.7 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ พิจารณาที่เอกสารนี้เป็นความถี่ 11.7 GHz รูปที่ 4.7 (ก) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 20 deg, ระดับพุด้านข้าง -4.36 dB และไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 4.7 (ข) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 48 deg, ระดับพุด้านข้าง -10.52 dB ซึ่งผลที่ได้จากการ

ทดสอบในทั้งสองระนาบสามารถให้ลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการจำลอง

#### 4.2.5 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศซึ่งที่นี่ได้ใช้สายอากาศตัวรับ และตัวส่งเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน โดยนำมาวางที่ระยะห่างกว่าระยะสนามไกลแล้ว จึงใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและการคำนวณ ซึ่งสัญญาณที่ได้รับนั้นมีค่าเท่ากับ  $\frac{P_r}{P_t}$  และค่าในเทอมของ  $\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2$  เป็นค่าการสูญเสียในอากาศ (Free Space Loss) และเมื่อกำหนดให้สายอากาศทั้งคู่มีค่าอัตราขยายเท่ากัน สามารถหาอัตราขยายของสายอากาศได้ โดยคำนวณจากสมการฟรีสส์ (Friis's Formula)

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

เมื่อ

$P_r$  คือ กำลังงานด้านรับ

$P_t$  คือ กำลังงานด้านส่ง

$G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

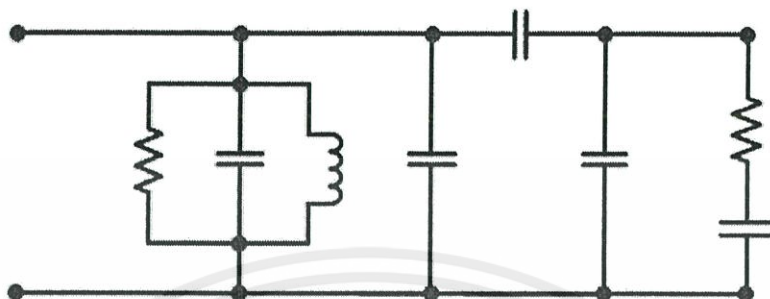
$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง สายอากาศรับ ที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกล (เมตร)

เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่ที่ใช้งานเป็น 11.7 GHz โดยในการวัดใช้สนามระยะไกลเป็น 30 cm และ  $10 \log \frac{P_r}{P_t} = -33 \text{ dB}$  สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศได้เป็น 5.174 dBi

#### 4.3 การจำลองสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนโดยใช้วงจรสมมูล (Equivalent Circuit)

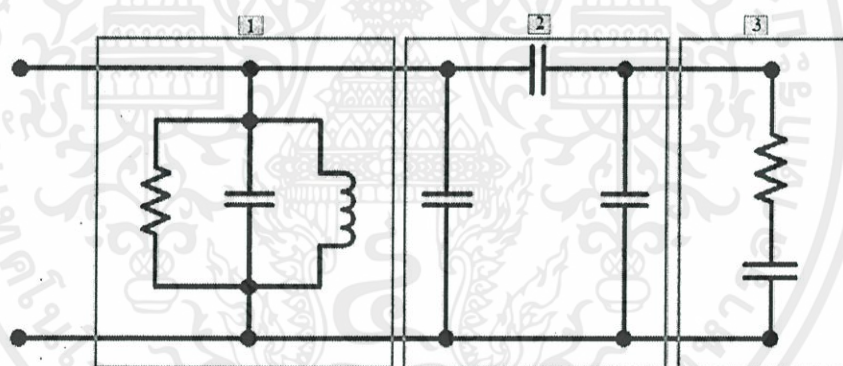
ในการวิเคราะห์สายอากาศใช้วงจรสมมูลจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการกำหนดค่าความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ในวงจรสมมูลเพื่อจำลองค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ ทำงานที่ความถี่ 11.7 GHz ซึ่งสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน

กำหนดค่าความต้านทาน ค่าความจุ และค่าความเหนี่ยวนำโดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรสมมูลของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นโพรงสี่เหลี่ยม (Rectangular Cavity) ส่วนที่สองเป็นการเชื่อมต่อ (Coupling) และส่วนที่สามเป็นสายอากาศช่องเปิด (Slot Antenna) ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลของสายอากาศท่อนำคลื่นเสมือนโดยแบ่งเป็น 3 ส่วนประกอบ

จากรูปที่ 4.9 ในส่วนที่หนึ่งเป็นวงจรสมมูลของโพรงสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นวงจรสั่นพ้อง (Resonant Circuit) แบบขนาน ซึ่งวงจรจะประกอบด้วยค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่วนค่ารีแอคแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมด ( $X_L = X_C$ ) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะเท่ากับค่าของความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานเท่ากับ  $50 \Omega$  และคำนวณค่าความจุ และค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่  $11.7 \text{ GHz}$  โดยคำนวณจากสมการที่ 4.3

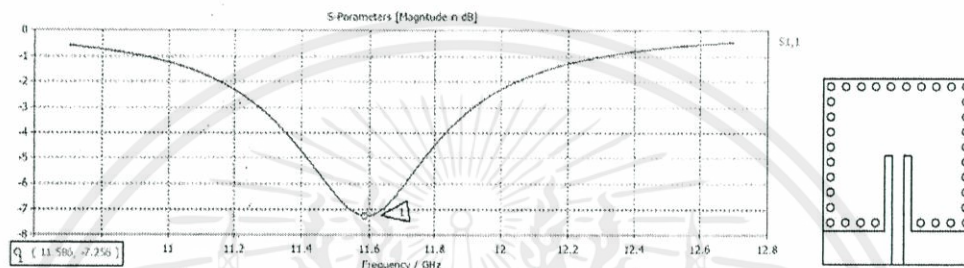
$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $f_0 = 11.7$  GHz

จากสมการที่ 4.3 คำนวณได้ค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) = 13.6 pH และค่าความจุ ( $C$ ) = 13.6 pF

ในส่วนที่สองเป็นการเชื่อมต่อของสายอากาศ โดยทดลองปรับค่าความจุ ( $C$ ) ทั้งสามตัว ซึ่งทำทดลองปรับค่าความจุให้ผลการทดลอง ค่า  $|S_{11}|$  ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10  $|S_{11}|$  ของสายอากาศหอนำคลื่นเสมือนที่ความถี่ 11.586 GHz

จากรูปที่ 4.10 เห็นว่า  $|S_{11}|$  ที่ความถี่ 11.586 GHz มีค่าเท่ากับ -7.256 dB ซึ่งจะต้องปรับค่าความต้านทาน และค่าความจุ ในวงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิดเพื่อปรับค่า  $|S_{11}|$  ให้ทำงานที่ความถี่ 11.7 GHz

และในส่วนที่สามเป็นวงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิด (Slot Antenna) โดยคำนวณค่าความต้านทาน และค่าความจุจากสมการที่ 4.4

$$Z_s = \frac{Z_0^2}{Z_d} \quad (4.4)$$

โดย  $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์ในอากาศมีค่าเท่ากับ 376.7  $\Omega$

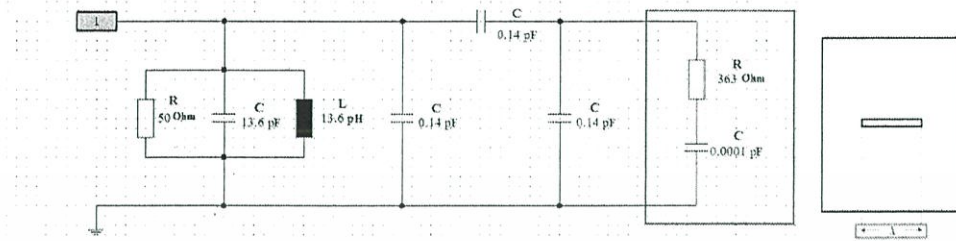
$Z_d$  คือ อิมพีแดนซ์ของไดโพลความยาวครึ่งลำคลื่น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 73  $\Omega + j42.5 \Omega$

สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดได้เท่ากับ 363  $\Omega - j211 \Omega$  ซึ่งใช้ค่า  $X_c = j211 \Omega$  จากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดนำไปคำนวณหาค่าความจุจากสมการ 4.5

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.5)$$

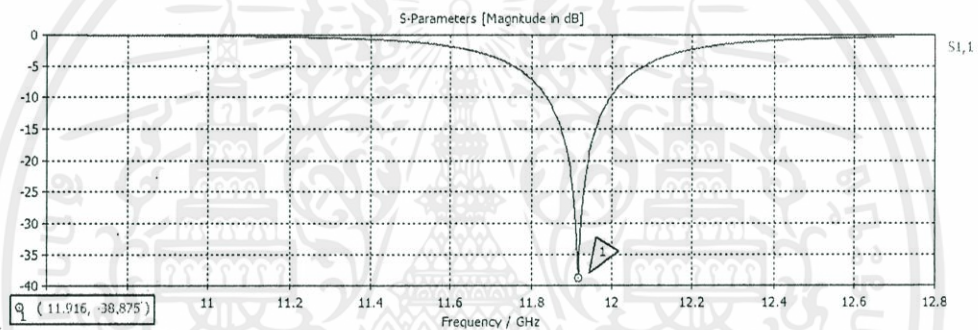
ซึ่งคำนวณค่ารีแอคแตนซ์ของค่าความจุที่ความถี่ 11.7 GHz จะได้ค่าความจุเท่ากับ 0.064 pF จากนั้นแทนค่าความต้านทาน และค่าความจุที่ได้จากการคำนวณลงในวงจรสมมูลเพื่อจำลองค่า  $|S_{11}|$  โดยกำหนดค่าความต้านทานเป็น 363  $\Omega$  และค่าความจุเท่ากับ 0.0001 pF ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ทดลองลดค่าความจุของวงจรสมมูลในส่วนสายอากาศช่องเปิด

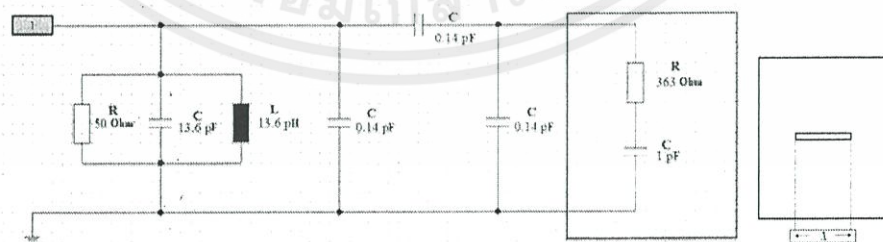
เมื่อกำหนดให้สายอากาศช่องเปิดมีความต้านทานเท่ากับ  $363 \Omega$  และค่าความจุเท่ากับ  $0.0001 \text{ pF}$  ค่า  $|S_{11}|$  จากการจำลองมีค่าเท่ากับ  $-39.057 \text{ dB}$  ที่ความถี่  $11.916 \text{ GHz}$  ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12  $|S_{11}|$  ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่  $11.916 \text{ GHz}$

จากรูปที่ 4.12 เห็นว่าเมื่อปรับค่าความจุให้ต่ำกว่าค่าที่คำนวณไว้ ความถี่เลื่อนไปทางขวาที่ความถี่  $11.916 \text{ GHz}$  ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.12

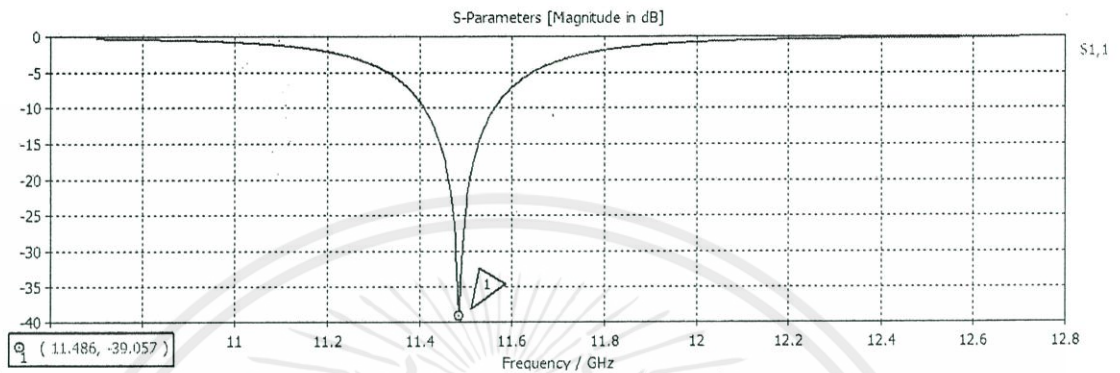
ทดลองปรับค่าความจุให้มีค่าเท่ากับ  $1 \text{ pF}$  โดยเป็นค่าที่มากกว่าค่าความจุที่ได้คำนวณไว้ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ทดลองเพิ่มค่าความจุของวงจรสมมูลในส่วนสายอากาศช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

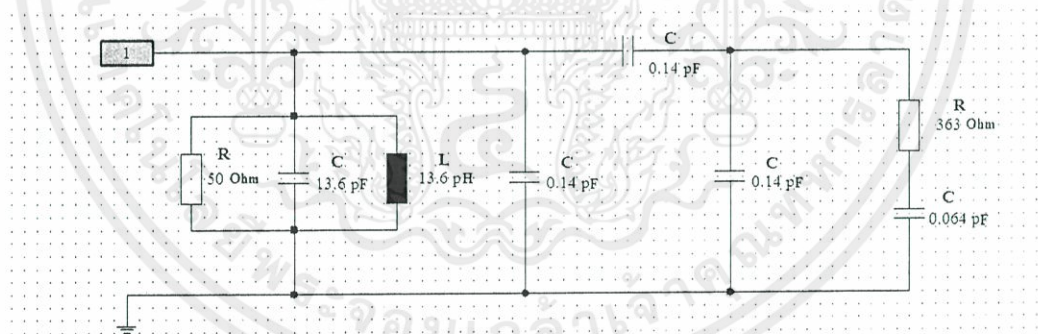
เมื่อกำหนดให้สายอากาศช่องเปิดมีความต้านทานเท่ากับ  $363 \Omega$  และค่าความจุเท่ากับ  $1 \text{ pF}$  ค่า  $|S_{11}|$  จากการจำลองมีค่าเท่ากับ  $-39.057 \text{ dB}$  ที่ความถี่  $11.916 \text{ GHz}$



รูปที่ 4.14  $|S_{11}|$  ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่  $11.486 \text{ GHz}$

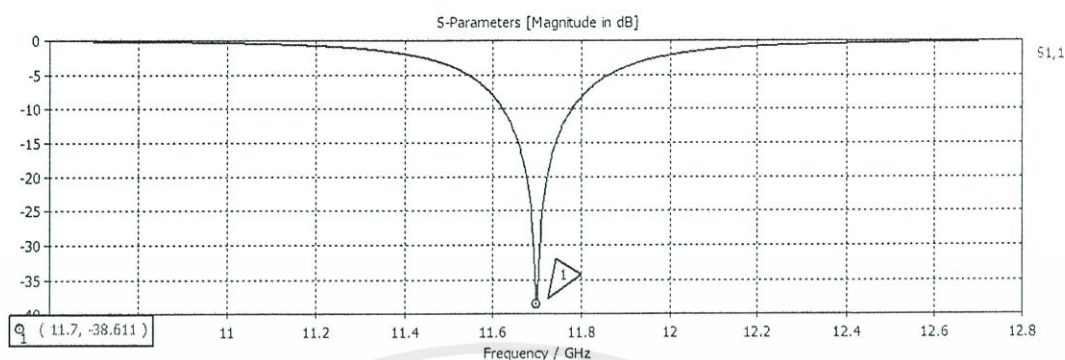
จากรูปที่ 4.14 เห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าความจุให้มากกว่าค่าที่คำนวณไว้ ความถี่เลื่อนไปทางซ้ายที่ความถี่  $11.486 \text{ GHz}$  ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.11

ดังนั้นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวงจรสมมูลของสายอากาศหอนาคลิ้นเสมือนที่ความถี่  $11.7 \text{ GHz}$  ควรมีค่าความต้านทาน ค่าความจุ และค่าความเหนี่ยวนำดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16  $|S_{11}|$  ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 11.7 GHz

จากรูปที่ 4.16 เห็นว่า ค่า  $|S_{11}|$  ที่ความถี่ 11.7 GHz มีค่าเท่ากับ -38.611 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.16

#### 4.4 สรุปผลการทดลองของสายอากาศ

ในการทดสอบสายอากาศที่นำคลื่นเสมือน เห็นได้อย่างชัดเจนว่าคุณลักษณะที่ทดสอบได้มีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับคุณลักษณะที่ได้จำลองด้วยโปรแกรม ได้ดังตารางที่ 4.1

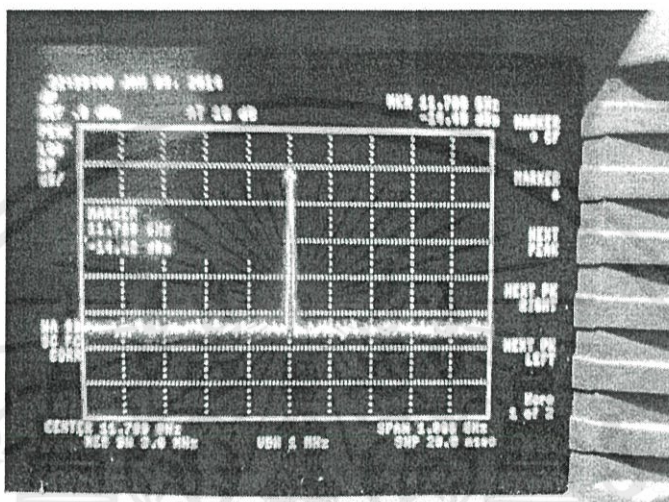
ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะโดยทั่วไปของสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนที่ความถี่ 11.7 GHz

คุณลักษณะ	ค่าที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่นำคลื่นเสมือน
$ S_{11} $ ความถี่ 11.7 GHz	-24.384 dB
อัตราขยาย	5.174 dBi
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์เชิงเส้น
ระนาบ XZ	
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	40 deg.
ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-4.6 dB
ระนาบ YZ	
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	48 deg.
ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-10.52 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator)

วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 11.7 GHz ใช้ในการวัดอากาศว่าง โดยทดสอบความแรงของสัญญาณด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ได้ผลดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ระดับความแรงของสัญญาณจากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณความถี่ 11.7 GHz

#### 4.6 การวัดอากาศว่าง (Free Space Measurement Technique)

เก็บผลการทดลองโดยใช้สายอากาศช่องเชื่อมต่อกัน (Coupled Slot Antenna) 2 ตัว ในการวัดคลื่นที่ส่งผ่านมะม่วง ทั้งมะม่วงดิบ และมะม่วงสุก ซึ่งกำลังงานที่รับได้จากมะม่วงแต่ละชนิด จะถูกตรวจจับโดยวงจรตรวจจับกำลังงาน และแปลงค่ากำลังงานเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อผ่านวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น (Zero and Span) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่นำไปใช้ในการประมวลผลด้วยบอร์ด ET-EASY168 STAMP โดยในการทดลองวัดมะม่วงดิบ 5 ผล และมะม่วงสุก 5 ผล ผลละ 10 ครั้ง แสดงผลเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังตารางที่ 4.2 ตาราง 4.11

ตารางที่ 4.2 ทดสอบวัดมะม่วงดิบผลที่ 1

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.800	1.524
0.796	1.372
0.780	1.360
0.744	1.448

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาก่อนจะเผยแพร่ไปยังผู้อื่น หากฝ่าฝืนจะถือว่าผิดเงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.820	1.476
0.748	1.308
0.836	1.548
0.788	1.372
0.732	1.536
0.756	1.392

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงดิบในผลที่ 1 ตามตารางที่ 4.2 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.780 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.434 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 0.654 V.

ตารางที่ 4.3 ทดสอบวัดมะม่วงดิบผลที่ 2

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.744	1.360
0.772	1.388
0.816	1.320
0.772	1.340
0.736	1.316
0.756	1.276
0.768	1.376
0.744	1.324
0.784	1.320
0.784	1.292

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงดิบในผลที่ 2 ตามตารางที่ 4.3 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.768 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.331 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 0.564 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ทดสอบวัดมะม่วงดิบผลที่ 3

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.752	1.512
0.700	1.360
0.680	1.492
0.732	1.328
0.724	1.476
0.752	1.372
0.752	1.536
0.768	1.352
0.716	1.356
0.708	1.428

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงดิบในผลที่ 3 ตามตารางที่ 4.4 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.728 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.421 V. และค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 0.693 V.

ตารางที่ 4.5 ทดสอบวัดมะม่วงดิบผลที่ 4

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.752	1.568
0.792	1.328
0.760	1.456
0.700	1.412
0.728	1.300
0.768	1.296
0.784	1.284
0.768	1.432
0.760	1.456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.740	1.208

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงดิบในผลที่ 4 ตามตารางที่ 4.5 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.755 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.374 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 0.619 V.

ตารางที่ 4.6 ทดสอบวัดมะม่วงดิบผลที่ 5

อากาศ	มะม่วงดิบ
0.748	1.46
0.768	1.484
0.732	1.316
0.804	1.348
0.836	1.408
0.748	1.392
0.736	1.392
0.700	1.412
0.696	1.396
0.732	1.388

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงดิบในผลที่ 5 ตามตารางที่ 4.6 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.750 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.400 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 0.650 V.

จากตารางแสดงผลการทดลองจากการวัดมะม่วงดิบและอากาศดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 - 4.6 นั้น เห็นได้ว่าวัดมะม่วงจะมีค่าของระดับแรงดันไฟตรงที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการวัดอากาศ เนื่องจากค่าคงที่ไดโอดเล็กทริกของมะม่วงมีค่ามากกว่าอากาศ ดังนั้นค่าที่ได้จากการส่งคลื่นผ่านมะม่วงจึงสามารถรับค่าพลังงานนั้นได้มากกว่า ทำให้ค่าความแตกต่างในการวัดมะม่วงกับอากาศเป็น 0.637 V. โดยคำนวณจากค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ย 5 ผล

เมื่อเก็บผลการวัดค่าของมะม่วงดิบเรียบร้อยแล้ว จึงเก็บผลการวัดค่าของมะม่วงสุก เพื่อนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบในการตัดสินใจเลือกมะม่วงสุกหรือดิบจากค่าความแตกต่างระหว่างอากาศและมะม่วง ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ทดสอบวัตมะม่วงสุกผลที่ 1

อากาศ	มะม่วงสุก
0.740	1.972
0.768	2.020
0.756	1.896
0.748	1.736
0.760	1.776
0.748	1.876
0.752	1.776
0.732	1.836
0.748	1.740
0.716	2.076

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงสุกในผลที่ 1 ตามตารางที่ 4.7 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.747 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.870 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 1.124 V.

ตารางที่ 4.8 ทดสอบวัตมะม่วงสุกผลที่ 2

อากาศ	มะม่วงสุก
0.728	1.892
0.748	1.688
0.804	1.856
0.788	1.932
0.768	1.952
0.736	1.876
0.756	1.904
0.800	1.828
0.756	1.952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ	มะม่วงสุก
0.772	1.692

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงสุกในผลที่ 2 ตามตารางที่ 4.8 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.766 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.857 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 1.092 V.

ตารางที่ 4.9 ทดสอบวัดมะม่วงสุกผลที่ 3

อากาศ	มะม่วงสุก
0.768	1.852
0.748	1.584
0.744	1.688
0.740	1.704
0.728	1.636
0.740	1.796
0.764	1.808
0.784	1.752
0.740	1.728
0.796	1.788

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงสุกในผลที่ 3 ตามตารางที่ 4.9 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.755 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.734 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 0.978 V.

ตารางที่ 4.10 ทดสอบวัดมะม่วงสุกผลที่ 4

อากาศ	มะม่วงสุก
0.748	1.924
0.776	1.716
0.716	1.628
0.736	1.724

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ	มะม่วงสุก
0.752	1.660
0.756	1.740
0.776	1.896
0.764	1.836
0.748	1.800
0.732	1.772

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงสุกในผลที่ 4 ตามตารางที่ 4.10 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.750 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.770 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 1.019 V.

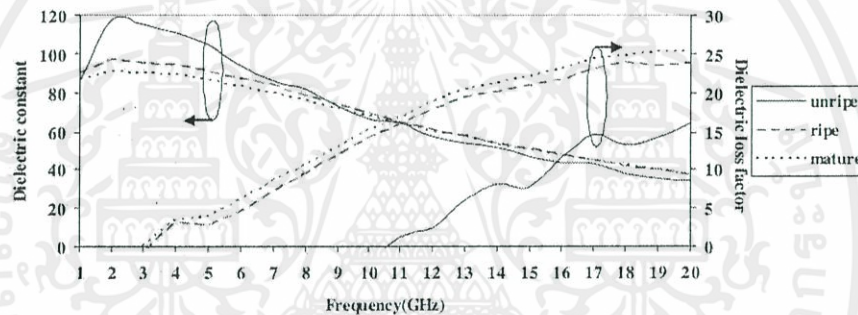
ตารางที่ 4.11 ทดสอบวัดมะม่วงสุกผลที่ 5

อากาศ	มะม่วงสุก
0.776	1.948
0.768	1.808
0.748	1.936
0.756	1.828
0.736	1.908
0.728	1.792
0.700	1.836
0.716	1.808
0.736	1.792
0.752	1.968

ผลการทดลองในการวัดมะม่วงสุกในผลที่ 5 ตามตารางที่ 4.11 นั้น มีค่าเฉลี่ยของการวัดอากาศเป็น 0.742 V. ค่าเฉลี่ยในการวัดมะม่วงเป็น 1.862 V. และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับมะม่วงเป็น 1.121 V. ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งจากตารางแสดงผลการทดลองจากการวัดมะม่วงสุกและอากาศดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7-4.11 นั้น เห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการวัดมะม่วงจะมีค่าของระดับแรงดันไฟตรงที่สูงกว่าค่าที่ได้จาก

การวัดอากาศ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของมะม่วงมีค่ามากกว่าอากาศ ดังนั้นค่าที่ได้จากการส่งคลื่นผ่านมะม่วงจึงสามารถรับค่าพลังงานนั้นได้มากกว่า ทำให้ค่าความแตกต่างในการวัดมะม่วงสุกกับอากาศเป็น 1.067 V. โดยคำนวณจากค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ย 5 ผล

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างอากาศและมะม่วงดิบและค่าความแตกต่างระหว่างอากาศและมะม่วงสุกนั้น เห็นได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างมะม่วงสุกและอากาศมีค่าผลต่างของแรงดันไฟตรงมากกว่าค่าความแตกต่างระหว่างมะม่วงดิบกับอากาศ เนื่องจากมะม่วงสุกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเป็น 64 มะม่วงดิบมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 59 ที่ความถี่ 11.7 GHz ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นแตกต่างกันอยู่ 5 จึงทำให้ค่าที่ส่งผ่านมะม่วงสุกสามารถสะท้อนกลับเข้ามาหาสายอากาศตัวรับได้มากกว่า ค่ากำลังงานที่รับได้ของมะม่วงสุกจึงมากกว่ามะม่วงดิบ จึงสามารถใช้แยกแยะความสุกดิบของมะม่วงได้ จากค่าที่ได้ตัดสินใจคือค่า 0.82 V. โดยกำหนดให้มะม่วงที่วัดมีความแตกต่างกับอากาศ 0.82 V. เป็นมะม่วงสุก และต่ำกว่า 0.82 V. เป็นมะม่วงดิบดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของมะม่วงสุกและมะม่วงดิบ[7]

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบโดยเฉลี่ย

ค่าความแตกต่างระหว่างอากาศและมะม่วงดิบโดยเฉลี่ย	ค่าความแตกต่างระหว่างอากาศและมะม่วงสุกโดยเฉลี่ย	ค่าในการตัดสินใจ
0.636 V.	1.067 V.	0.82 V.

#### 4.7 เรดิโอมิเตอร์ (Radiometer)

เก็บผลการทดลองโดยใช้สายอากาศท่อนำคลื่นเสมือน (SIW Antenna) 1 ตัว ในการวัดค่ากำลังงานที่รับได้จากมะม่วง และตรวจจับโดยวงจรถ่วงจับกำลังงาน และแปลงค่ากำลังงานเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อผ่านวงจรถ่วงจับกำลังงานแบบเชิงเส้น (Zero and Span) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างกันของมะม่วงโดยวัดมะม่วงดิบ และมะม่วงสุกอย่างละ 5 ผล แสดงผลดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.13 ทดสอบวัดมะม่วงโดยใช้เรดิโอมิเตอร์

อากาศ	มะม่วงดิบ	มะม่วงสุก
1.192	1.212	1.208
1.180	1.208	1.200
1.184	1.220	1.224
1.156	1.188	1.164
1.160	1.208	1.196

จากตารางที่ 4.13 เป็นการวัดกำลังของสัญญาณรบกวน โดยใช้เรดิโอมิเตอร์ตรวจจับวัดจากการแผ่พลังงานของสัญญาณรบกวน (Blackbody Radiation) ซึ่งแผ่พลังงานมาจากวัตถุโดยรอบ ในที่นี้จะพิจารณาถึงกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด รวมถึงกำลังของสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมของการวัด สายอากาศ และตัวเครื่องรับ ทำให้ความแตกต่างระหว่างการวัดอากาศ มะม่วงสุก และมะม่วงดิบ มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการสะท้อนของคลื่นจากมะม่วงสุก และมะม่วงดิบมีค่าต่างกันเล็กน้อยที่ความถี่ 11.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

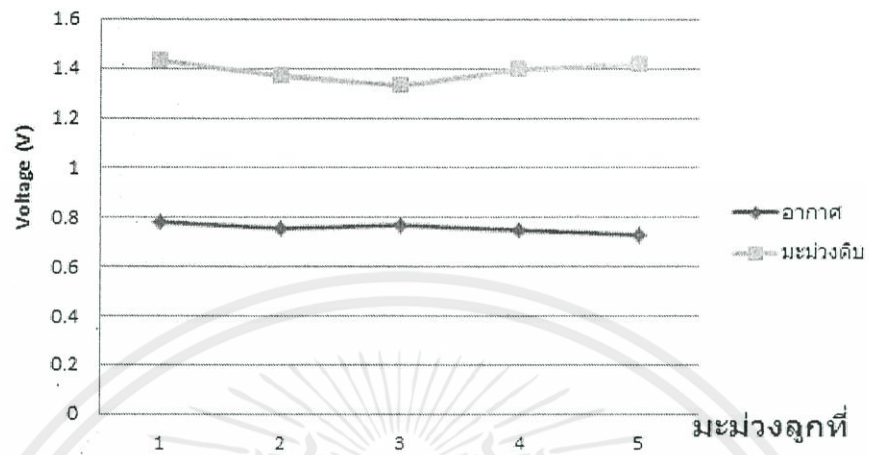
จากการออกแบบสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนที่ความถี่ 11.7 GHz ซึ่งใช้งานร่วมกับเรดิโอมิเตอร์ และการวัดอากาศว่าง (Free-Space Technique Measurement) ใช้งานในย่านความถี่ Ku-Band และมีการโพลาไรซ์เชิงเส้น รวมไปถึงการศึกษาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ ของสายอากาศ สามารถสรุปผลของการทดลองออกได้เป็นดังนี้

ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนกำลังงานที่สะท้อนกลับต่อกำลังงานที่ตกกระทบ โดยถ้าหากว่าค่า  $|S_{11}|$  มีค่าที่น้อย แสดงว่าสายอากาศได้รับกำลังงานไว้ได้มาก โดยปกติทั่วไปค่าของ  $|S_{11}|$  ควรจะมีค่าที่ ต่ำกว่า  $-10$  dB ซึ่งที่ความถี่ 11.7 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำคลื่นเสมือน มีค่า  $|S_{11}|$  เป็น  $-24.384$  dB มีอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่สายอากาศ ก่อนที่จะทำการแพร่พลังงาน ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศนั้นมีค่าเป็น  $46.871 \Omega$  รวมถึงสายอากาศที่นำคลื่นเสมือนที่ได้ทำการออกแบบมานั้นมีการโพลาไรซ์เป็นเชิงเส้น และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว

อัตราส่วนคลื่นนิ่งซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลองของสายอากาศนี้มีค่าเป็น  $1.128$  V. เป็นค่าที่ทำให้ทราบถึงว่าเมื่อป้อนสัญญาณเข้าไปในสายอากาศจะมีการสะท้อนมากหรือน้อยเพียงใด เป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศอีกด้วย ซึ่งโดยสรุปแล้วสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีการใช้งานได้ดีที่ความถี่ 11.7 GHz ดังที่คาดหวังไว้และนำไปใช้งานร่วมกับเรดิโอมิเตอร์ และการวัดอากาศว่าง

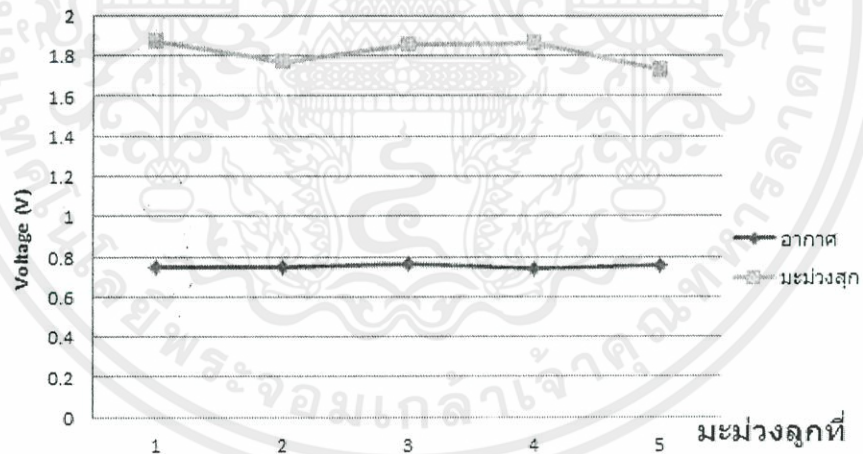
ในการทดลองวัดความสุกดิบของมะม่วงโดยใช้หลักการของการวัดอากาศว่างพบว่า มีความแตกต่างกันระหว่างแรงดันไฟฟ้า แสดงผลดังรูปที่ 5.1 และ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดจากการวัดอากาศและมะม่วงดิบ 5 ลูก

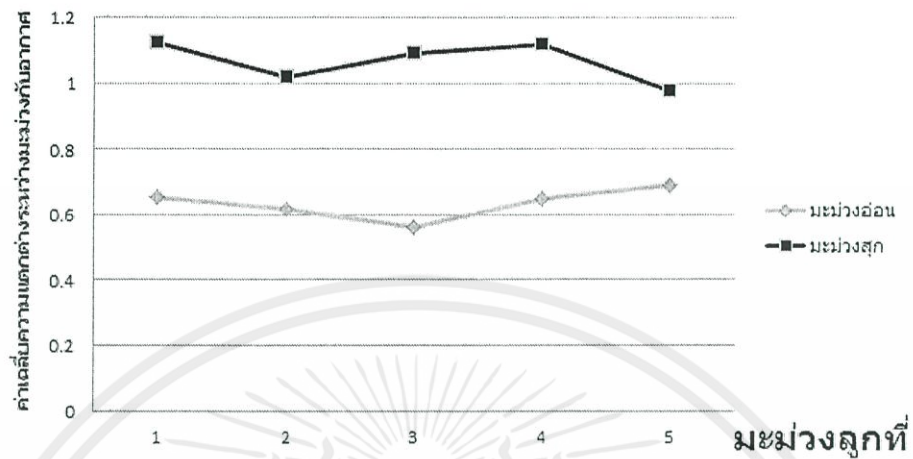
จากรูปที่ 5.1 การวัดอากาศมีค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย 0.75 V. และมะม่วงดิบทั้ง 5 ลูกมีค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย 1.4 V.



รูปที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดจากการวัดอากาศและมะม่วงสุก 5 ลูก

จากรูปที่ 5.2 การวัดอากาศมีค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย 0.75 V. และมะม่วงสุกทั้ง 5 ลูกมีค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย 1.8 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดจากการวัดเมฆม่วงอ่อนและเมฆม่วงสุก 5 ลูก

จากรูปที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศและเมฆม่วงดิบซึ่งเท่ากับ 0.636 V. และค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศและเมฆม่วงสุกเท่ากับ 1.067 V. โดยค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างอากาศกับเมฆม่วงจะถูกวิเคราะห์โดยวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น ซึ่งกำหนดให้ค่าที่มากกว่า 0.82 V. เป็นเมฆม่วงสุก และต่ำกว่า 0.82 V. เป็นเมฆม่วงดิบ ซึ่งแสดงผลโดยไดโอดเปล่งแสง (LED) แสดงความสุกหรือดิบของเมฆม่วง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและการสร้างเรดิโอมิเตอร์และการวัดอากาศว่าง ทำให้พบปัญหาข้อผิดพลาดบางส่วน จึงมีข้อเสนอแนะทางแก้ไขและพัฒนาอุปกรณ์ให้มีความแน่นอนมากขึ้น

การเลือกใช้วัสดุในการสร้างสายอากาศควรใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ และค่ามุมสัมผัสสูญเสีย (Loss Tangent) ต่ำ เนื่องจากสายอากาศที่ต้องการออกแบบใช้ความถี่สูงวัสดุจึงมีผลต่อการแมตซ์ของสายอากาศเป็นอย่างมาก

ในการวัดอากาศว่างค่อนข้างมีความอ่อนไหวต่อสิ่งรบกวนภายนอก ดังนั้นสภาพแวดล้อมในขณะที่เก็บผลการทดลองจะต้องนิ่งและคงที่ตลอด นอกจากนี้ขนาดของเมฆม่วงก็มีผลต่อการวัดเช่นกัน โดยในที่นี้ให้เมฆม่วงมีขนาดความกว้างประมาณ 7 cm. และความยาวประมาณ 15 cm. เพื่อเป็นการลดปัญหาเรื่องขนาดของเมฆม่วง ตลอดจนการวางตำแหน่งของเมฆม่วงยังส่งผลต่อค่าผลการทดลอง ดังนั้นทุกครั้งที่ทำกรวัดจริงต้องมีการกำหนดตำแหน่งการวางที่แน่นอน เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงค่าความผิดพลาดของการทดลอง

## บรรณานุกรม

- [1] Thunyawat Limpiti. Switchable Antennas and Their Application in Dielectric Properties Determination. Faculty of Engineering. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013
- [2] Constantine A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design . 3rd ed. United States of America . : A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005.
- [3] Pozar, David M. Microwave Engineering. 3rd ed. United States of America : John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005.
- [4] รังสรรค์ วงศ์สรรค์ . *วิศวกรรมสายอากาศ* . พิมพ์ครั้งที่ 2 . นครราชสีมา : ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี , 2552
- [5] คู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-EASY168 STAMP
- [6] บุญเรือง วังศิลาบัตร. การออกแบบวงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น
- [7] P. Yoiod, M. Monai Krairiksh. "Analysis of a Cost-effective Remote Sensing System for Fruit Monitoring  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6711203>

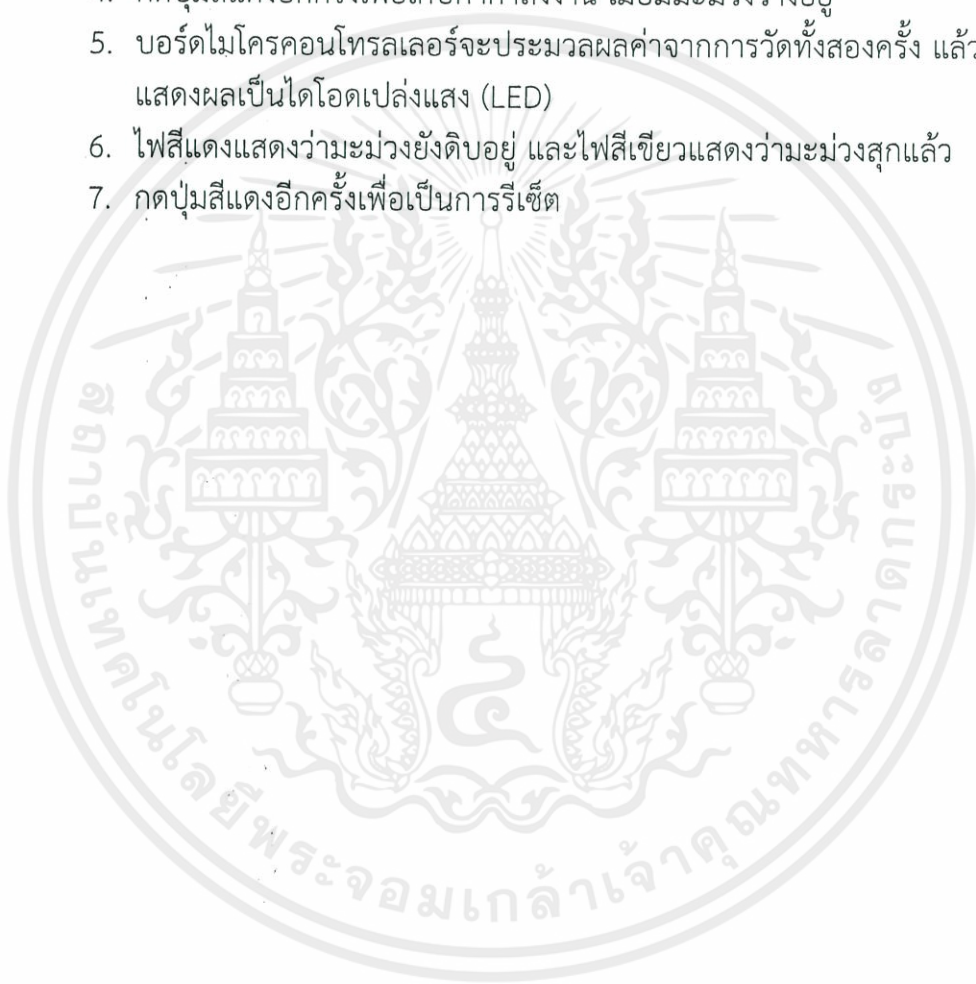
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการใช้เซ็นเซอร์ไมโครเวฟ

1. ต่อเซ็นเซอร์ไมโครเวฟเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ โดยใช้ไฟ +12V
2. กดปุ่มสีแดงเพื่อปรับเทียบกับอากาศ (Calibration) โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะเก็บค่ากำลังงานในขณะนั้น
3. นำมะม่วงวางที่ตำแหน่งของสายอากาศ
4. กดปุ่มสีแดงอีกครั้งเพื่อเก็บค่ากำลังงาน เมื่อมีมะม่วงวางอยู่
5. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลค่าจากการวัดทั้งสองครั้ง แล้วแสดงผลเป็นไดโอดเปล่งแสง (LED)
6. ไฟสีแดงแสดงว่ามะม่วงยังดิบอยู่ และไฟสีเขียวแสดงว่ามะม่วงสุกแล้ว
7. กดปุ่มสีแดงอีกครั้งเพื่อเป็นการรีเซ็ต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ชุดคำสั่งควบคุมหน่วยการประมวลผล

```
const int buttonPin = 6;  
const int buttonPin3 = 5;  
const int buttonPin4 = 4;  
int analogInpin1 = A0;  
int buttonState = LOW;  
int buttonSwitch = LOW;  
int buttonSwitch2 = LOW;
```

```
const int led1 = 12;  
const int led2 = 11;
```

```
int num1 = 0;  
int Var1 = 0;  
int Var2 = 0;  
int total = 0;
```

```
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);  
  int Var1 = analogRead(analogInpin1);  
  int Var2 = analogRead(analogInpin1);  
  pinMode(led1,OUTPUT);  
  pinMode(led2,OUTPUT);  
  pinMode(buttonPin,INPUT);  
  pinMode(buttonSwitch,INPUT);  
  pinMode(buttonSwitch2,INPUT);  
}
```

```
void loop()  
{  
  buttonSwitch = digitalRead(buttonPin3);
```

```
  buttonState = digitalRead(buttonPin);  
  buttonSwitch2 = digitalRead(buttonPin4);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(buttonState == HIGH && num1 == 0 && buttonSwitch == HIGH && buttonSwitch2
== HIGH)
{Var1 = analogRead(analogInpin1);
Serial.println(Var1);
num1++;
buttonState = LOW;
delay(1500);
}

```

```

if(buttonState == HIGH && num1 == 1 && buttonSwitch == HIGH && buttonSwitch2
== HIGH)
{
Var2 = analogRead(analogInpin1);
total = Var2-Var1;
Serial.println(Var2);
Serial.println(total);
num1++;
buttonState = LOW;
delay (1000);

if(total <= 168)
{
digitalWrite(led1, LOW);
digitalWrite(led2, HIGH);
}

else if(total > 168)
{
digitalWrite(led1,HIGH);
digitalWrite(led2,LOW);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ห้ามนำไปตีพิมพ์หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (buttonState == HIGH && num1 == 2 && buttonSwitch == HIGH && buttonSwitch2
== HIGH)

```

```
{  
  digitalWrite(led1, LOW);  
  digitalWrite(led2, LOW);  
  delay(1000);  
  num1 = 0;  
  
  buttonState = LOW;  
}  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

## Dual Low Power Operational Amplifiers

Utilizing the circuit designs perfected for recently introduced Quad Operational Amplifiers, these dual operational amplifiers feature 1) low power drain, 2) a common mode input voltage range extending to ground/ $V_{EE}$ , 3) single supply or split supply operation and 4) pinouts compatible with the popular MC1558 dual operational amplifier. The LM158 series is equivalent to one-half of an LM124.

These amplifiers have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. They can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V, with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

- Short Circuit Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Single and Split Supply Operation
- Similar Performance to the Popular MC1558
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness of the Device without Affecting Operation

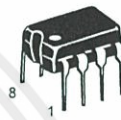
### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	LM258 LM358	LM2904 LM2904V	Unit
Power Supply Voltages				Vdc
Single Supply	$V_{CC}$	32	26	
Split Supplies	$V_{CC}, V_{EE}$	$\pm 16$	$\pm 13$	
Input Differential Voltage Range (Note 1)	$V_{IDR}$	$\pm 32$	$\pm 26$	Vdc
Input Common Mode Voltage Range (Note 2)	$V_{ICR}$	-0.3 to 32	-0.3 to 26	Vdc
Output Short Circuit Duration	$t_{SC}$	Continuous		
Junction Temperature	$T_J$	150		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55 to +125		$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$			$^\circ\text{C}$
LM258		-25 to +85	-	
LM358		0 to +70	-	
LM2904		-	-40 to +105	
LM2904V		-	-40 to +125	

- NOTES: 1. Split Power Supplies.  
2. For Supply Voltages less than 32 V for the LM258/358 and 26 V for the LM2904, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

### DUAL DIFFERENTIAL INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

#### SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

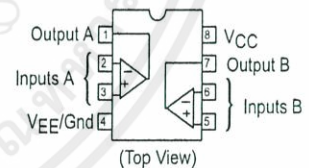


**N SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626



**D SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)

### PIN CONNECTIONS



### ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
LM2904D	$T_A = -40^\circ$ to $+105^\circ\text{C}$	SO-8
LM2904N		Plastic DIP
LM2904VD	$T_A = -40^\circ$ to $+125^\circ\text{C}$	SO-8
LM2904VN		Plastic DIP
LM258D	$T_A = -25^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$	SO-8
LM258N		Plastic DIP
LM358D	$T_A = 0^\circ$ to $+70^\circ\text{C}$	SO-8
LM358N		Plastic DIP

# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>CC</sub> = 5.0 V, V<sub>EE</sub> = Gnd, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LM258			LM358			LM2904			LM2904V			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage V <sub>CC</sub> = 5.0 V to 30 V (26 V for LM2904, V), V <sub>IC</sub> = 0 V to V <sub>CC</sub> -1.7 V, V <sub>O</sub> = 1.4 V, R <sub>S</sub> = 0 Ω T <sub>A</sub> = 25°C T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> (Note 1) T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> (Note 1)	V <sub>IO</sub>	-	2.0	5.0	-	2.0	7.0	-	2.0	7.0	-	-	-	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	ΔV <sub>IO</sub> /ΔT	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	μV/°C
Input Offset Current T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	I <sub>IO</sub>	-	3.0	30	-	5.0	50	-	5.0	50	-	5.0	50	nA
Input Bias Current T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	I <sub>IB</sub>	-	-45	-150	-	-45	-250	-	-45	-250	-	-45	-250	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	ΔI <sub>IO</sub> /ΔT	-	10	-	-	10	-	-	10	-	-	10	-	pA/°C
Input Common Mode Voltage Range (Note 2), V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V) V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub>	V <sub>ICR</sub>	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	24.3	0	-	24.3	V
Differential Input Voltage Range	V <sub>IDR</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, V <sub>CC</sub> = 15 V, For Large V <sub>O</sub> Swing, T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	A <sub>VOL</sub>	50	100	-	25	100	-	25	100	-	25	100	-	V/mV
Channel Separation 1.0 kHz ≤ f ≤ 20 kHz, Input Referenced	CS	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	dB
Common Mode Rejection R <sub>S</sub> ≤ 10 kΩ	CMR	70	85	-	65	70	-	50	70	-	50	70	-	dB
Power Supply Rejection	PSR	65	100	-	65	100	-	50	100	-	50	100	-	dB
Output Voltage—High Limit (T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> ) (Note 1) V <sub>CC</sub> = 5.0 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, T <sub>A</sub> = 25°C V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), R <sub>L</sub> = 10 kΩ	V <sub>OH</sub>	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	V
Output Voltage—Low Limit V <sub>CC</sub> = 5.0 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ, T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	V <sub>OL</sub>	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	mV
Output Source Current V <sub>ID</sub> = +1.0 V, V <sub>CC</sub> = 15 V	I <sub>O+</sub>	20	40	-	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
Output Sink Current V <sub>ID</sub> = -1.0 V, V <sub>CC</sub> = 15 V V <sub>ID</sub> = -1.0 V, V <sub>O</sub> = 200 mV	I <sub>O-</sub>	10	20	-	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 3)	I <sub>SC</sub>	-	40	60	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Power Supply Current (T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> ) (Note 1) V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), V <sub>O</sub> = 0 V, R <sub>L</sub> = ∞ V <sub>CC</sub> = 5 V, V <sub>O</sub> = 0 V, R <sub>L</sub> = ∞	I <sub>CC</sub>	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	mA

NOTES: 1. T<sub>low</sub> = -40°C for LM2904  
= -40°C for LM2904V  
= -25°C for LM258  
= 0°C for LM358  
T<sub>high</sub> = +105°C for LM2904  
= +125°C for LM2904V  
= +85°C for LM258  
= +70°C for LM358

2. The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is V<sub>CC</sub> -1.7 V.

3. Short circuits from the output to V<sub>CC</sub> can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EVALUATION KIT  
AVAILABLE**



# 100MHz to 2500MHz, 45dB RF Detector in a UCSP

**MAX4003**

## General Description

The MAX4003 low-cost, low-power logarithmic amplifier is designed to detect the power levels of RF power amplifiers (PAs) operating from 100MHz to 2500MHz. A typical dynamic range of 45dB makes this logarithmic amplifier useful in a variety of wireless applications including cellular handset PA control, TSSI for wireless terminal devices, and other transmitter power measurements. This logarithmic amplifier provides much wider measurement range and superior accuracy than typical diode-based detectors. Excellent temperature stability is achieved over the full operating range of -40°C to +85°C.

The MAX4003 logarithmic amplifier is a voltage-measuring device with a typical signal range of -58dBV to -13dBV. The input signal is internally AC-coupled by an on-chip 5pF capacitor in series with a 2kΩ resistance. This highpass coupling, with a corner at 16MHz, sets the lowest operating frequency and allows the input signal source to be DC grounded. The MAX4003 also features a power-on delay, which holds the detector output (OUT) low for approximately 5μs to ensure glitchless controller output.

The MAX4003 is available in an 8-bump chip-scale package (UCSP™), an 8-pin μMAX package, and an 8-pin thin QFN package.

## Applications

- Cellular Handsets (TDMA, CDMA, GPRS, GSM)
- TSSI for Wireless Terminal Devices
- Transmitter Power Measurement and Control
- RSSI for Fiber Modules

UCSP is a trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

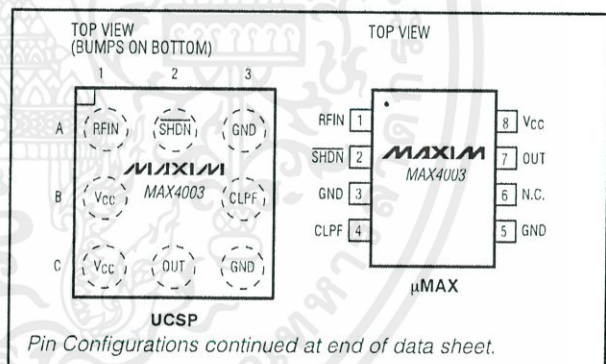
## Features

- ◆ Complete RF Detector
- ◆ Frequency Range from 100MHz to 2500MHz
- ◆ Input Range of -58dBV to -13dBV (-45dBm to 0dBm into 50Ω)
- ◆ Fast Response: 70ns in 10dB Steps
- ◆ Low-Current Consumption: 5.9mA at V<sub>CC</sub> = 3.0V
- ◆ 13μA (typ) Shutdown Current
- ◆ Available in 8-Bump UCSP or 8-Pin μMAX and Thin QFN Packages

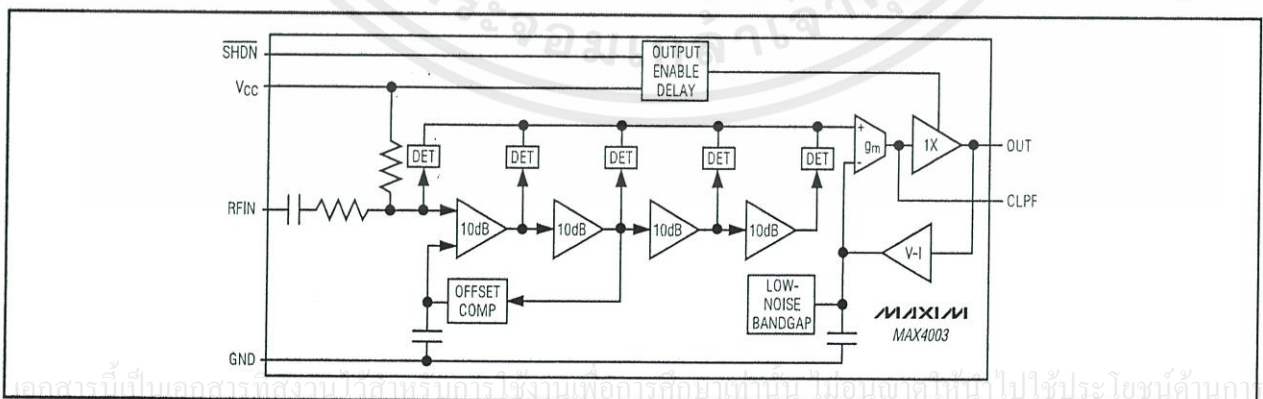
## Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN/BUMP-PACKAGE	TOP MARK
MAX4003EBL-T	-40°C to +85°C	8 UCSP-8	ABV
MAX4003EUA	-40°C to +85°C	8 μMAX	—
MAX4003ETA-T	-40°C to +85°C	8 Thin QFN-EP	ADG

## Pin Configurations



## Functional Diagram



**For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com).**

# 100MHz to 2500MHz, 45dB RF Detector in a UCSP

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V<sub>CC</sub> to GND .....-0.3V to +5.25V  
 SHDN, CLPF to GND .....-0.3V to (V<sub>CC</sub> + 0.3V)  
 RFIN .....+6dBm  
 OUT Short Circuit to GND ..... 10s  
 Continuous Power Dissipation (T<sub>A</sub> = +70°C)  
 8-Bump UCSP (derate 4.7mW/°C above +70°C) .....379mW

8-Pin  $\mu$ MAX (derate 4.5mW/°C above +70°C) .....362mW  
 8-Pin Thin QFN (derate 24.4mW/°C above +70°C) ...1951mW  
 Operating Temperature Range .....-40°C to +85°C  
 Junction Temperature .....+150°C  
 Storage Temperature Range .....-65°C to +150°C  
 Lead Temperature (soldering, 10s) .....+300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V<sub>CC</sub> = 3.0V, V<sub>SHDN</sub> = V<sub>CC</sub>, C<sub>CLPF</sub> = 0.1 $\mu$ F, T<sub>A</sub> = -40°C to +85°C. Typical values are at T<sub>A</sub> = +25°C, unless otherwise noted.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>		2.7		5.0	V
Supply Current	I <sub>CC</sub>	V <sub>CC</sub> = 5.0V	V <sub>SHDN</sub> = 1.8V	5.9	10	mA
			V <sub>SHDN</sub> = 0.8V	13	30	$\mu$ A
Shutdown Input Current	I <sub>SHDN</sub>	V <sub>SHDN</sub> = 3.0V		5	20	$\mu$ A
		V <sub>SHDN</sub> = 0V		-0.01	$\pm$ 5	
Logic High Threshold Voltage	V <sub>IH</sub>		1.8			V
Logic Low Threshold Voltage	V <sub>IL</sub>				0.8	V
<b>DETECTOR OUTPUT</b>						
Voltage Range	V <sub>OUT</sub>	RFIN = 0dBm		1.45		V
		RFIN = -45dBm		0.36		
Output Voltage in Shutdown	V <sub>OUT</sub>	V <sub>SHDN</sub> = 0V		1		mV
Output-Referred Noise		f <sub>o</sub> = 150kHz		8		nV/ $\sqrt$ Hz
Small-Signal Bandwidth	BW	C <sub>CLPF</sub> = 150pF		8		MHz
Slew Rate		V <sub>OUT</sub> = 0.36V to 1.45V, C <sub>CLPF</sub> = 150pF		5		V/ $\mu$ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า