

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมโนโพล เชื่อมต่อร่วม  
MICROWAVE SENSOR USING COUPLED MONOPOLE ANTENNA

โดย

นายวิทวัส	เด่นไพโรจน์
นายสุกฤษฎ์	เตโชทินกร
นายอภิวัฒน์	ฮุดเชียง

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมโนโพล เชื่อมต่อรวม  
MICROWAVE SENSOR USING COUPLED MONOPOLE ANTENNA



โดย

นายวิฑูรย์ เต๋นไพโรจน์

นายสุกฤษฎี เตโชทินกร

นายอภิวัฒน์ ฮุดเชียง

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมโนโพล เชื่อมต่อร่วม  
MICROWAVE SENSOR USING COUPLED MONOPOLE ANTENNA

โดย

นายวิทวัส	เด่นไพโรจน์	53011478
นายสุกฤษฎี	เตโชทินกร	53011715
นายอภิวัฒน์	ฮุดเชียง	53011872

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

 ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว  
()  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
17/3/57  
วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

 ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว  
()  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน  
17/3/57.  
วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

โครงการปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมโนโพล เชื่อมต่อร่วม

MICROWAVE SENSOR USING COUPLED MONOPOLE ANTENNA

ผู้จัดทำ

- |                |             |          |
|----------------|-------------|----------|
| 1. นายวิหวัส   | เด่นไพโรจน์ | 53011478 |
| 2. นายสุกฤษฎี  | เตโชทินกร   | 53011715 |
| 3. นายอภิวัฒน์ | ฮุดเชียง    | 53011872 |

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ศ.ดร.โมเนย ไกรฤกษ์)

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการจนเสร็จตามวัตถุประสงค์ที่จัดทำตั้งใจไว้ทุกประการโดยได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการศึกษา ออกแบบ และการสร้าง จากอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำที่ดีในการดำเนินงานและช่วยเหลือสนับสนุนในทุกด้านตลอดจน พี่ๆปริญญโทและเอก ที่สอนใช้เครื่องมือวัด ให้คำแนะนำในการออกแบบ เพื่อนๆ ที่ไม่สามารถกล่าวนามได้หมด ทำให้งานชิ้นนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งใจไว้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จวัตถุประสงค์

คณะผู้จัดทำ

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมโนโพล เชื่อมต่อร่วม  
MICROWAVE SENSOR USING COUPLED MONOPOLE ANTENNA

โดย นาย วิทวัส เต๋นไพโรจน์ 53011478  
นาย สุกฤษฎ์ เตโชทินกร 53011715  
นาย อภิวัฒน์ ฮุดเชียง 53011872

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพล ใช้งานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง และนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านเกษตรกรรม โดยใช้เป็นตัววัดความแตกต่างความชื้นในดินที่มีขนาดกะทัดรัด โครงสร้างของระบบวัดจะเป็นสายอากาศ 2 ตัววางคู่ขนานกัน สามารถวัดค่า  $S_{11}$  และ  $S_{21}$  ได้โดยใช้วงจรสวิตช์ความถี่วิทยุในการสวิตช์คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง เพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ S ที่ต้องการ โดยระบบจะทำงานที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์

ABSTRACT

This dissertation presents the microwave sensor for determining the moisture content of soil. The sensor utilizes 2 parallel monopole antennas with directional coupler to measure the  $S_{11}$  and  $S_{21}$ . These S-parameters can be selected for the measurement by using the RF switch at the directional coupler. The operating frequency is at 2.45 GHz.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
<b>บทที่ 1</b>	<b>1</b>
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	1
<b>บทที่ 2</b>	<b>2</b>
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย (SCATTERING PARAMETER)	2
2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป	4
2.2.1 การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล	5
2.2.2 การหาค่าความยาวของคลื่น ค่าคงที่การแพร่กระจายค่าความเร็วเฟส และค่าความยาวสนามไฟฟ้า	8
2.2.3 การสังเคราะห์สัดส่วนความกว้างต่อ ความหนาของแผ่นไมโครสตริป $W/h$	9
2.2.4 ผลกระทบจากความหนาของตัวนำสตริป	9
2.2.5 การแพร่กระจายของคลื่นบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป	11
2.2.6 การสูญเสียบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป	12
2.3 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบคัปเปิลไลน์	13
2.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคู่ (EVEN MODE CAPACITANCE)	14
2.3.2 ค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคี่ (ODD MODE CAPACITANCE)	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดโอดีลิกตริก สัมพันธ์ประสิทธิภาพของโหมดคู่และโหมดคี่	17
2.4 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล	18
2.5 การหาคุณสมบัติไดโอดีลิกตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วม ระหว่างสายอากาศ	21
2.6 เฟสล็อกกลุ่	23
2.6.1 ทฤษฎีเฟสล็อกกลุ่	24
2.6.2 องค์ประกอบเฟสล็อกกลุ่	24
2.6.2.1 วงจรเปรียบเทียบเฟส	25
2.6.2.2 วงจรกรองสัญญาณ	25
2.6.2.3 วงจรแกว่งควบคุมด้วยแรงดัน	25
2.6.3 สภาพะการทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุ่	25
2.6.3.1 สภาพะการทำงานเป็นอิสระ (FREE- RUNNING)	25
2.6.3.2 สภาพะจับยึด (CAPTURE)	25
2.6.3.3 สภาพะเฟสล็อก (LOCKED PHASE)	25
2.7 การหาความชื้นในดิน	26
2.7.1 กล่าวนำ	26
2.7.2 วิธีการหาค่าความชื้นในดิน	26
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำโครงการงาน</b>	<b>27</b>
3.1 บล็อกไดอะแกรม	27
3.2 การออกแบบ	27
3.3 การออกแบบสายอากาศโมโนโพล	33
3.4 อุปกรณ์ส่วนกำเนิดสัญญาณ	36
3.5 ส่วนควบคุม	38
3.6 การจัดเก็บผลการทดลอง	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4</b>	<b>43</b>
<b>ผลการทดลอง</b>	<b>43</b>
4.1 ผลการทดสอบสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง	43
4.2 วงจรสมมูล	47
4.2.1 ปรับค่าความต้านทานวงจรสมมูลของสายอากาศ	48
4.2.2 ปรับค่าความเหนี่ยวนำวงจรสมมูลของสายอากาศ	49
4.2.3 ปรับค่าตัวเก็บประจุวงจรสมมูลของสายอากาศ	50
4.2.4 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ	51
4.2.4.1 ปรับค่าความจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ	53
2 ตัว) ของการเชื่อมต่อร่วม	
4.2.5 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ	55
4.2.5.1 ปรับค่าความจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ	56
port 1 กับ port3) ของการเชื่อมต่อร่วม	
4.3 ผลการทดสอบสวิตซ์ความถี่วิทยุ	58
4.4 ผลการทดสอบวงจรความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับสัญญาณ	61
4.5 ผลการทดสอบวงจรส่วนกำเนิดสัญญาณ	62
4.6 ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความชื้นของดิน	67
4.6.1 ขั้นตอนการทดสอบ	67
4.6.2 ขั้นตอนการคำนวณ	67
วิจารณ์ผลการทดลอง	69
<b>บทที่ 5</b>	<b>71</b>
<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>71</b>
5.1 สรุปผล	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>73</b>
ภาคผนวก ก	คู่มือการใช้อุปกรณ์วัดความชื้น
ภาคผนวก ข	ชุดคำสั่ง

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	2
2.2	3
2.3	3
2.4	5
2.5	5
2.6	13
2.7	14
2.8	18
2.9	19
2.10	19
2.11	20
2.12	21
2.13	22
2.14	23
2.15	24
3.1	27
3.2	32
3.3	33
3.4	34
3.5	34
3.6	35
3.7	35
3.8	35
3.9	36
3.10	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 อุปกรณ์ส่วนกำเนิดสัญญาณ	37
3.12 ส่วนควบคุม	38
3.13 การวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลตัวที่ 1	39
3.14 การวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลตัวที่ 2	39
3.15 การวัดค่า $S_{21}$ ของสายอากาศ	40
3.16 การวัดในสภาพดินที่ปกติ	40
3.17 การวัดในสภาพดินที่ผสมน้ำ 250 ml และทำการคลุกให้เข้ากัน	41
3.18 การวัดในสภาพดินที่ผสมน้ำ 750 ml และทำการคลุกให้เข้ากัน	41
3.19 การวัดในสภาพดินที่ผสมน้ำ 1,000 ml และทำการคลุกให้เข้ากัน	41
3.20 ชั่งน้ำหนักกระป๋องเปล่า	42
3.21 ชั่งน้ำหนักกระป๋องที่ใส่ดิน	42
4.1 การกำหนดพอร์ทขงสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง	43
4.2 วัดค่า $S_{11}$ ของสายอากาศตัวที่ 1	44
4.3 วัดค่า $S_{11}$ ของสายอากาศตัวที่ 2	44
4.4 วัดค่า $S_{31}$ ของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง	45
4.5 ผลการจำลองสายอากาศในดินที่มีความชื้นปานกลาง	46
4.6 ผลการจำลอง $S_{11}$ สายอากาศทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชื้นปานกลาง	46
4.7 ผลการจำลอง $S_{66}$ สายอากาศทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชื้นปานกลาง	46
4.8 ผลการจำลอง $S_{61}$ สายอากาศทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชื้นปานกลาง	47
4.9 วงจรสมมูลของสายอากาศโมโนโพล	47
4.10 แบบจำลองอุปกรณ์	47
4.11 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศ	48
4.12 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าความต้านทานมากขึ้น	48
4.13 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าความต้านทานน้อยลง	49
4.14 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเหนี่ยวนำมากขึ้น	49
4.15 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเหนี่ยวนำน้อยลง	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น	50
4.17 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง	51
4.18 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ	51
4.19 แบบจำลองอุปกรณ์การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ	52
4.20 ผลการจำลอง $S_{11}$	52
4.21 ผลการจำลอง $S_{31}$	52
4.22 ผลการจำลอง $S_{11}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น	53
4.23 ผลการจำลอง $S_{31}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น	53
4.24 ผลการจำลอง $S_{11}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง	54
4.25 ผลการจำลอง $S_{31}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง	54
4.26 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ	55
4.27 แบบจำลองอุปกรณ์การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ	55
4.28 ผลการจำลอง $S_{11}$	56
4.29 ผลการจำลอง $S_{21}$	56
4.30 ผลการจำลอง $S_{11}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น	56
4.31 ผลการจำลอง $S_{21}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น	57
4.32 ผลการจำลอง $S_{11}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง	57
4.33 ผลการจำลอง $S_{21}$ เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง	57
4.34 ขาของวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุ	58
4.35 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5	58
4.36 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 8	59
4.37 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5	59
4.38 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 8	60
4.39 กราฟผลการทดลองวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับ	62
4.40 รูปสัญญาณจากสเปกตรัมในส่วนกำเนิดสัญญาณ	62
4.41 การกำหนดพอร์ทของอุปกรณ์	63
4.42 กราฟค่าเฉลี่ยแรงดันของแต่ละกรณี	66
4.43 กราฟเปรียบเทียบความชื้นในดินกับแรงดัน	69
4.44 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันที่พอร์ท 2 กับดิน 5 ประเภท	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ 3 กับดิน 5 ประเภท	70

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าสภาพยอมที่ใช้ในการจำลองดิน	34
4.1 ค่าสภาพยอมที่ใช้ในการจำลองดิน	45
4.2 ผลการทดลองวงจรสวิตซ์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับ	61
4.3 ผลการวัดในดินแห้งปกติ	64
4.4 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 250 ml	64
4.5 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 500 ml	65
4.6 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 750 ml	65
4.7 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 1,000 ml	66
4.8 ผลการเก็บค่าวัดความชื้นในดิน	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากอุทกภัยครั้งใหญ่ในปี 2554 ทำให้เกิดแนวคิดในการเตือนภัย ซึ่งการมีเซ็นเซอร์วัดความชื้นของดิน จะช่วยให้สามารถเตือนภัยได้ล่วงหน้า การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีหนึ่งที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพ โครงการนี้เราได้ศึกษาผลกระทบของการเชื่อมต่อของสายอากาศโมโนโพลโดยใช้งานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ จากผลกระทบนั้นเราจึงนำสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าความชื้นภายในดินที่สภาพแวดล้อมของดินที่แตกต่างกันออกไปโดยการปรับความชื้นภายในดินจากดินแห้งไปเป็นดินเปียกในระดับต่างๆและออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดกะทัดรัด และราคาย่อมเยา

### 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการเซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมโนโพล เชื่อมต่อร่วม มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่เชื่อมต่อกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง โดยมุ่งเน้นถึงการใช้งาน และขนาดที่กะทัดรัด ซึ่งวัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือ

- 1) ศึกษาการทำงานของสายอากาศและเปรียบเทียบผลการทดลอง
- 2) เพื่อทดสอบความแตกต่างของความชื้นภายในดิน
- 3) สร้างอุปกรณ์วัดความแตกต่างของความชื้นในดินที่มีขนาดกะทัดรัด

### 1.3 ขอบเขตของปริิญญาณิพนธ์

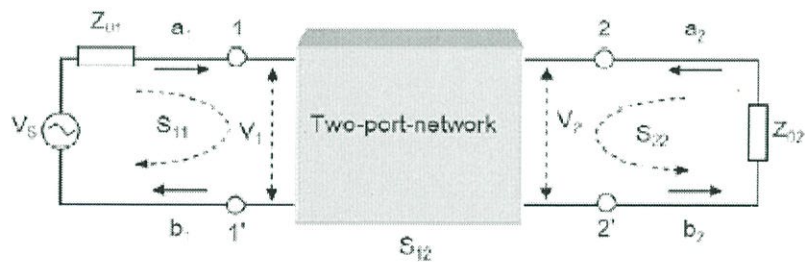
ศึกษาหลักการทำงานการออกแบบสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในย่านความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดความแตกต่างของความชื้นในดิน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย (Scattering Parameter)

การวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสารส่วนใหญ่แล้วเป็นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์แบบอิมพีแดนซ์ (Z Parameters) แอดมิตแตนซ์ (Y Parameters) และ ABCD Matrix ในเทอมของความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 สำหรับในโครงงานนี้จะนำเสนอความสัมพันธ์ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนในระบบของข่ายงานทางไฟฟ้าที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของคลื่นและบอกผลของอัตราส่วนของการแพร่กระจายของกำลังไฟฟ้าในระบบได้เป็นอย่างดี โดยการวิเคราะห์จากค่าพารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย (Scattering Parameter) [1]



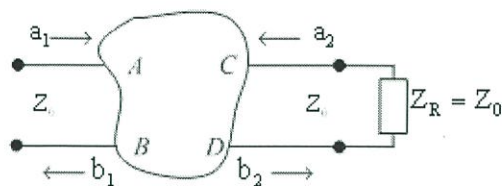
รูปที่ 2.1 โครงข่ายแบบสองพอร์ตและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ [1]

จากรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาข่ายงานที่มี 2 พอร์ตจะได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

การหาค่าพารามิเตอร์แบบกระจัดกระจายในแต่ละตัว สามารถดำเนินการได้ 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้พอร์ตที่ 2 ของข่ายงานต่อกับภาระที่มีค่า  $Z_R = Z_0$



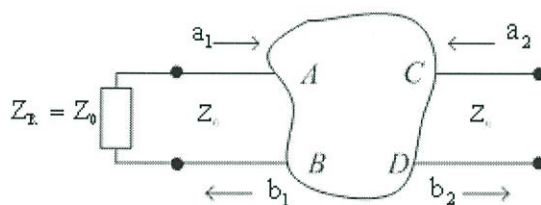
รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การจัดกระจายของข่ายงานสองพอร์ต [1]

จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของคลื่นประกอบด้วย  $a_2$  ซึ่งเป็นคลื่นสะท้อนกลับและ  $b_2$  เป็นคลื่นตกกระทบภาระโหลดที่พอร์ตที่ 2 เมื่อ  $Z_R = Z_0$  (Matching) จะได้ว่า  $a_2 = 0$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad \text{และ} \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $S_{11}$  เป็น สัมประสิทธิ์การสะท้อน  
 $S_{21}$  เป็น สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดให้พอร์ตที่ 1 ของข่ายงานต่อกับภาระที่มีค่า  $Z_R = Z_0$



รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การจัดกระจายของข่ายงานสองพอร์ต [1]

จะเห็นว่าคลื่น  $a_1$  เป็นคลื่นสะท้อนและ  $b_1$  เป็นคลื่นตกกระทบภาวะโหนดที่พอร์ตที่ 1 เมื่อ  $Z_R = Z_0$  (Matching) จะได้ว่า  $a_1 = 0$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad \text{และ} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $S_{22}$  เป็น Reflection Coefficient (Output)

$S_{12}$  เป็น Inverse Transmission Coefficient

ดังนั้น สรุปความหมายของพารามิเตอร์แบบกระจาย (S-Parameter) เป็นดังนี้

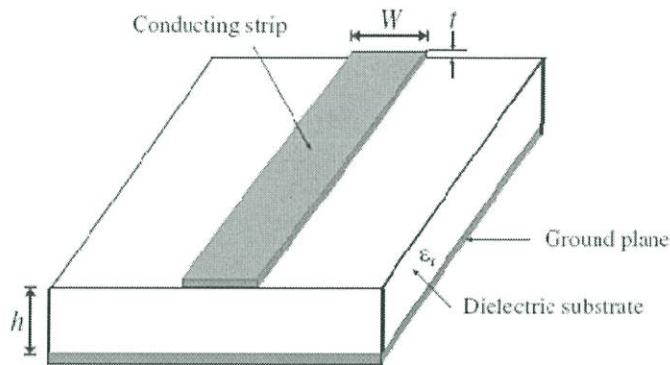
$$S_{ii} = \left. \frac{b_i}{a_i} \right|_{a_j=0, j \neq i} \quad \text{หมายถึง Reflection Coefficient (Input / Output)}$$

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_j=0, j \neq i} \quad \text{หมายถึง Transmission Coefficient (Forward / Reverse)}$$

## 2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป

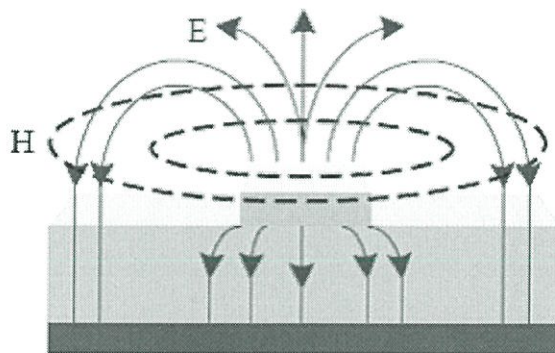
สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณแบบระนาบ (Planar Structure) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และง่ายต่อการออกแบบเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuits) ดังนั้นควรจะศึกษารายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเพื่อจะได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟ

โครงสร้างทั่วไปของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.4 ประกอบด้วย สตริป (Strip) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นสายตัวนำ มีความกว้างเป็น  $W$  และมีความหนาเป็น  $t$  โดยสตริปจะอยู่บนชั้นของฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant)  $\epsilon_r$  และมีความหนาเป็น  $h$  สำหรับแผ่นโลหะตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ (Ground-Plane) ของวงจร [1],[2]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป [1]

เนื่องจากพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านชั้นฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างสตริปกับระนาบกราวด์ ซึ่งเส้นแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปไม่ได้อยู่ภายในชั้นซับสเตรทแสดงดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นรูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปจึงไม่ใช่รูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวางอย่างแท้จริง (TEM Mode) แต่จะเป็นรูปแบบการแพร่กระจายคล้ายรูปแบบ TEM(Quasi-Tem Mode)



รูปที่ 2.5 รูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

2.2.1 การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล การวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristics Impedance,  $Z_0$ ) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant,  $\epsilon_{eff}$ ) สามารถหาได้ดังนี้ [1]

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_d}{C_a} \quad (2.4)$$

$$Z_o = \frac{1}{c\sqrt{C_a C_d}} \quad (2.5)$$

โดยที่ค่า  $C_d$  เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสตริปเทียบกับชั้นของไดอิเล็กทริกฐานรอง  $C_a$  เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสตริปเทียบกับชั้นของไดอิเล็กทริกฐานรองที่แทนด้วยอากาศ นั่นคือเป็นค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสตริปที่ด้านบนของชั้นไดอิเล็กทริกนั่นเอง และค่า  $c$  เป็นค่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศมีค่าประมาณ  $3 \times 10^8$  m / s

สำหรับค่าความหนาของแผ่นสตริปที่มีค่าน้อยมาก ( $t$  เข้าใกล้ 0) จะได้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 1% ดังสมการที่ (2.6) ถึง (2.9) [1]

สำหรับค่าอัตราส่วน  $W/h$  ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $W/h \leq 1$ ) จะได้ว่า

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left\{ \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-0.5} + 0.04 \left[ 1 - \frac{W}{h} \right]^2 \right\} \quad (2.6)$$

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right] \quad (2.7)$$

สำหรับค่าอัตราส่วน  $W/h$  ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $W/h \geq 1$ ) จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left[ \frac{W}{h} + 1.444 \right]^{-1} \right\} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-0.5} \right] \quad (2.9)$$

Hammerstad และ Jensen ได้เสนอวิธีการในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์  
คุณลักษณะ ค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำมากกว่าดังสมการที่ (2.10)  
และสมการที่ (2.13)

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ \left[ 1 + \frac{10}{u} \right]^{-ab} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ  $u$  คือ ค่าอัตราส่วนของ  $W/h$  และค่า  $a$  กับ  $b$  มีค่าดังนี้

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left( \frac{u^4 + (u/52)^2}{u^4 + 0.432} \right) + 1.87 \ln \left[ 1 + (u/18.1)^3 \right] \quad (2.11)$$

$$b = 0.564 \left( \frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (2.12)$$

ผลของการคำนวณของค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพมีความผิดพลาดน้อย  
กว่า 0.2 % เมื่อค่า  $\varepsilon_r$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ 128 และค่า  $u$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 100  
( $\varepsilon_r \leq 128$ ) และ ( $0.01 \leq u \leq 100$ )

สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้จาก

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[ \frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left( \frac{2}{u} \right)^2} \right] \quad (2.13)$$

โดยค่า  $F$  หาได้จาก

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[ - \left( \frac{30.666}{u} \right)^{0.7528} \right] \quad (2.14)$$

สำหรับค่า  $Z_o \sqrt{\varepsilon_{eff}}$  จะมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 % เมื่อ  $u$  มีค่าน้อยกว่าหรือ  
เท่ากับ 1 ( $u \leq 1$ ) และจะมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.03 % เมื่อ  $u$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1000  
( $u \leq 1000$ )

## 2.2.2 การหาค่าความยาวของคลื่น ค่าคงที่การแพร่กระจาย ค่าความเร็วเฟส และค่าความยาวสนามไฟฟ้า

จากการอธิบายที่ผ่านมาข้างต้นเมื่อทราบค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าความยาวคลื่นบนสตริป ( $\lambda_g$ ) และค่าคงที่การแพร่กระจาย อันได้แก่ ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Propagation Constant,  $\beta$ ) และค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity,  $v_p$ ) คือ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\lambda_0$  เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ ณ ความถี่ใช้งาน  $f$  เพื่อความสะดวกในการคำนวณกำหนดให้ความถี่มีหน่วยเป็นจิกะเฮิร์ตซ์(GHz) ทำให้ได้ค่าของความยาวคลื่นแสดงในหน่วยของมิลลิเมตรดังสมการ

$$\lambda_g (mm) = \frac{300}{f (GHz) \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.16)$$

สำหรับค่าคงที่ของการแพร่กระจาย และค่าความเร็วเฟส สามารถหาได้จาก

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (2.17)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $c$  คือค่าความเร็วของแสงในอากาศว่าง ( $c \approx 3.0 \times 10^8$  m/s)

$\omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมมีค่าเท่ากับ  $2\pi f$  มีหน่วยเป็น rad/s

### 2.2.3 การสังเคราะห์ที่สัดส่วนความกว้างต่อ ความหนาของแผ่นไมโครสตริป $W/h$

ในการประมาณค่าคำนวณหาความกว้างต่อความหนา  $W/h$  ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_0$  และค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ  $\epsilon_r$  ซึ่ง Wheeler และ Hammerstad ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ดังนี้ [1]

สำหรับ  $W/h \leq 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2.19)$$

ซึ่งหาค่า  $A$  ได้จาก

$$A = \frac{Z_c}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{0.5} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (2.20)$$

สำหรับ  $W/h \geq 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B-1) - \ln(B-1) + \frac{\epsilon_r}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.21)$$

ซึ่งหาค่า  $B$  ได้จาก

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.22)$$

### 2.2.4 ผลกระทบจากความหนาของตัวนำสตริป

โดยปกติในการวิเคราะห์จะมองข้ามความหนาตัวนำสตริป ( $t$ ) เนื่องจากมีค่าน้อยมากๆ แต่ในทางปฏิบัติค่าความหนานั้นมีผลกระทบต่อกรวิเคราะห์ซึ่งไม่อาจที่จะมองข้ามได้ ซึ่งค่าความหนาดังกล่าวจะมีผลต่อทั้งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับ  $W/h \leq 1$

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left\{ \frac{8h}{W_c(t)} + 0.25 \frac{W_c(t)}{h} \right\} \quad (2.23)$$

สำหรับ  $W/h \geq 1$

$$Z_o = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{W_c(t)}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_c(t)}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$\frac{W_c(t)}{h} = \begin{cases} \frac{W}{h} + \frac{1.25}{\pi} \frac{t}{h} \left( 1 + \ln \frac{4\pi W}{t} \right) & ; (W/h \leq 0.5\pi) \\ \frac{W}{h} + \frac{1.25}{\pi} \frac{t}{h} \left( 1 + \ln \frac{2h}{t} \right) & ; (W/h \geq 0.5\pi) \end{cases} \quad (2.25)$$

จะพิจารณาค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่ได้รับผลกระทบจากความหนาของสตริปได้ว่า

$$\epsilon_{eff}(t) = \epsilon_{eff} - \frac{\epsilon_{eff} - 1}{4.6} \frac{t}{h\sqrt{W/h}} \quad (2.26)$$

โดยที่ค่า  $\epsilon_{eff}$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่พิจารณาให้ความหนาของสตริปเป็นศูนย์ ( $t = 0$ ) และจากการพิจารณาสมการจะพบว่าผลกระทบจากความหนาของสตริปที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะมีผลน้อยมาก เมื่ออัตราส่วนของความหนาของสตริปต่อความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกมีค่าน้อย ( $t \ll h$ ) อย่างไรก็ตามความหนาของแผ่นสตริปจะมีผลกระทบที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการสูญเสียบนแผ่นตัวนำ (Conductor Loss) ของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

### 2.2.5 การแพร่กระจายของคลื่นบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป

การแพร่กระจายออกของคลื่นจะมีค่าที่ไม่คงที่เนื่องจากค่าความเร็วเฟสจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นที่เดินทางบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลใหม่ที่แปรผันตามความถี่เป็น  $\epsilon_{eff}(f)$  มีค่าดังนี้ [1]

$$\epsilon_{eff}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{eff}}{1 + \left(\frac{f}{f_{50}}\right)^m} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$f_{50} = \frac{f_{TM_0}}{0.75 + (0.75 - 0.332\epsilon_r^{-1.73})W/h} \quad (2.28)$$

$$f_{TM_0} = \frac{c}{2\pi h \sqrt{\epsilon_r - \epsilon_{eff}}} \tan^{-1} \left( \epsilon_r \sqrt{\frac{\epsilon_{eff} - 1}{\epsilon_r - \epsilon_{eff}}} \right) \quad (2.29)$$

$$m = m_0 m_c \leq 2.32 \quad (2.30)$$

$$m_0 = 1 + \frac{1}{1 + \sqrt{W/h}} + 0.32 \left( \frac{1}{1 + \sqrt{W/h}} \right)^3 \quad (2.31)$$

$$m_c = \begin{cases} 1 + \frac{1.4}{1 + W/h} \left\{ 0.15 - 0.235 \exp\left(\frac{-0.45f}{f_{50}}\right) \right\} & ; W/h \leq 0.7 \\ 1 & ; W/h \geq 0.7 \end{cases} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $c$  คือ ค่าความเร็วของคลื่นแสงในอวกาศว่าง และหากว่าผลคูณของ  $m_0$  กับ  $m_c$  มีค่ามากกว่า 2.32 จะทำการแทนค่าของพารามิเตอร์  $m$  ให้มีค่าเท่ากับ 2.32 (ค่าของ  $m$  ไม่เกิน 2.32) ซึ่งจากสมการที่ (2.27) จะเห็นได้ว่าหากค่าความถี่ยิ่งสูงมากขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ประสิทธิภาพที่มีผลต่อความถี่  $\epsilon_{eff}(f)$  จะเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นไดอิเล็กตริกบน โครงสร้างไมโครสตริป  $\epsilon_r$  นั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากสมการที่กล่าวมาจะมีความผิดพลาด เพียง 0.06 % เมื่อค่าอัตราส่วน  $W/h$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  มีค่า อยู่ระหว่าง 1 ถึง 128 สำหรับผลกระทบที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสามารถประมาณได้จาก

$$Z_o(f) = Z_c \frac{\epsilon_{eff}(f) - 1}{\epsilon_{eff} - 1} \sqrt{\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_{eff}(f)}} \quad (2.33)$$

โดย  $Z_c$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะปกติ

### 2.2.6 การสูญเสียบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป

หากพิจารณาการสูญเสียบนสายนำสัญญาณไมโครสตริปตามส่วนประกอบของ โครงสร้างการสูญเสียอาจเกิดได้จาก การสูญเสียของแผ่นตัวนำ (Conductor Loss), การสูญเสีย ของชั้น ไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) และการสูญเสียจากการแผ่ (Radiation Loss) จากที่ได้ ทราบค่าคงที่ของการแผ่กระจายหากไม่มีการสูญเสีย สมการการแผ่กระจายจะมีค่าเฉพาะที่เป็น ส่วนของค่าจินตภาพ หากจะพิจารณาค่าจริงที่เป็นค่าการลดทอน ( $\alpha$ ) ดังนั้นค่าคงตัวการ แผ่กระจายของคลื่นคือ  $\gamma = \alpha + j\beta$  และสามารถหาค่าการลดทอนของคลื่น (ในหน่วยของเดซิเบลต่อความยาวหนึ่งหน่วย) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha (\text{dB/unit length}) &= (20 \log_{10} e) \alpha (\text{nepers/unit length}) \\ &\approx 8.686 \alpha (\text{nepers/unit length}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

จะหาค่าการลดทอนของคลื่นบนแผ่นตัวนำ (ในหน่วยของเดซิเบลต่อความยาวหนึ่งหน่วย) ได้จาก

$$\alpha_c = \frac{8.686 R_s}{Z_c W} (\text{dB/unit length}) \quad (2.35)$$

เมื่อ  $Z_c$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของไมโครสตริปที่มีความกว้างของสตริปเป็น  $W$  และมีค่าความลึกของผิวตัวนำ ( $R_s$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์มต่อพื้นที่หน้าตัดของตัวนำบนไมโครสตริปและแผ่นระนาบกราวด์

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \quad (2.36)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าความนำของแผ่นตัวนำ,  $\mu_0$  เป็นค่าความซึมซาบในอวกาศว่าง และ  $\omega$  เป็นค่าความถี่ตอบสนอง

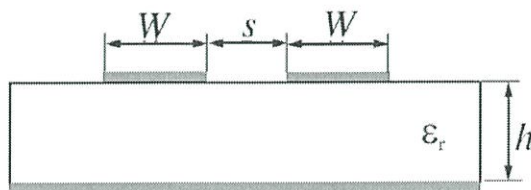
สำหรับค่าการลดทอนของคลื่นในชั้นไดอิเล็กทริก สามารถหาได้จาก

$$\alpha_d = 8.686\pi \left( \frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_r - 1} \right) \frac{\epsilon_r \tan \delta}{\epsilon_{re} \lambda_g} \text{ (dB/unit length)} \quad (2.37)$$

เมื่อค่า  $\tan \delta$  คือ ค่า Loss Tangent ของชั้นฐานรองไดอิเล็กทริก และในส่วนของค่าการลดทอนอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีนั้นเกิดจากโครงสร้างของไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งเปิดทำให้คลื่นสามารถแผ่กระจายออกไปในอากาศได้ ซึ่งเป็นข้อเสียของโครงสร้างเช่นนี้ แต่สามารถแก้ไขเพื่อลดการสูญเสียได้โดยการเพิ่มระนาบปิดล้อมรอบสตริปในลักษณะที่เรียกว่า “Enclosure” หรืออาจจะเรียกว่า “Housing Loss”

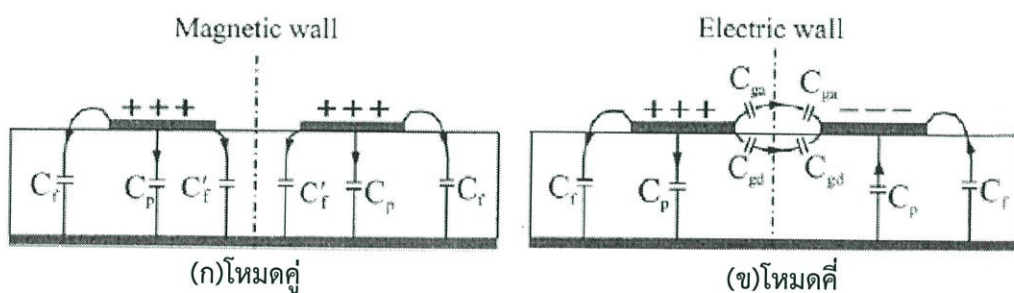
## 2.3 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบคัปเปิลไลน์

สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ออกแบบด้วยโครงสร้างที่เป็นแบบคัปเปิลไลน์เป็นนั้นเป็นที่นิยมมากในการออกแบบเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่สามารถออกแบบได้ง่ายโดยโครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบคัปเปิลไลน์ [1] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบคัปเปิลไลน์ [1]

จากลักษณะการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริปที่มีความกว้างของสตริปเป็น  $W$  และมีระยะห่างระหว่างการคัปปลิงผ่านของสายนำสัญญาณเป็น  $s$  สามารถเชื่อมต่อได้สองลักษณะด้วยกัน คือ การเชื่อมต่อในแบบขนานของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (Parallel coupled) และการเชื่อมต่อทางด้านปลายของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (Edge-coupled) ซึ่งจะทำให้เกิดโหมดในการเชื่อมต่อสัญญาณเป็นสองโหมด คือ โหมดคู่ (Even Mode) และโหมดคี่ (Odd Mode) [1] แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบคัปเปิลไลน์ทั้งโหมดคู่และโหมดคี่ [1]

### 2.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคู่ (Even Mode Capacitance)

จากรูปที่ 2.7(ก) สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคู่  $C_e$  ได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหมดคู่ของสายนำสัญญาณแบบคัปเปิลไลน์ [1],[3] คือ

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแผ่นเพลทขนาน (Parallel Plate Capacitance)  $C_p$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำสตริปกับระนาบกราวด์

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าบริเวณขอบ (Fringe Capacitance)  $C_f$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขอบนอกของแผ่นตัวนำสตริปกับระนาบกราวด์

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าบริเวณขอบระหว่างแผ่นเพลท (Fringe between Plate Capacitance)  $C'_f$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขอบแผ่นเพลทตัวนำสตริปทั้งสองกับระนาบกราวด์

ดังนั้นสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคู้ได้จากความสัมพันธ์

$$C_e = C_p + C_f + C'_f \quad (2.38)$$

โดยที่

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{w}{h} \quad (2.39)$$

$$C_f = \frac{\sqrt{\epsilon_{seff}}}{2cZ_0} - \frac{C_p}{2} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{seff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} - \frac{\epsilon_r - 1}{2} F(w/h) \quad (2.41)$$

$$F(w/h) = \begin{cases} (1 + 12h/w)^{-1/2} + 0.041(1 - w/h)^2 & ; w/h \leq 1 \\ (1 + 12h/w)^{-1/2} & ; w/h \geq 1 \end{cases} \quad (2.42)$$

$$C'_f = \frac{C_f}{1 + A \left( \frac{h}{s} \right) \tanh \left( \frac{10h}{s} \right)} \left( \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{seff}} \right)^{1/4} \quad (2.43)$$

$$A = \exp \left[ -0.1 \exp \left( 2.33 - 1.5 \frac{W}{h} \right) \right] \quad (2.44)$$

### 2.3.2 ค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคู้ (Odd Mode Capacitance)

จากรูปที่ 2.7(ข) ค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคู้สามารถหาได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหมดคู้ของสายนำสัญญาณคัปเปิลไลน์ [1],[3] คือ

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแผ่นเพลทขนาน (Parallel Plate Capacitance)  $C_p$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำสตรีปกับระนาบกราวด์

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าบริเวณขอบ (Fringe Capacitance)  $C_f$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขอบนอกของแผ่นตัวนำสตริปกับระนาบกราวด์

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าช่องว่างไดอิเล็กทริก (Dielectric Gap Capacitance)  $C_{gd}$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำสตริปในวัสดุไดอิเล็กทริก

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าช่องว่างอากาศ (Air Gap Capacitance)  $C_{ga}$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำสตริปในอากาศ

ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคี่สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$C_o = C_p + C_f + C_{gd} + C_{ga} \quad (2.45)$$

โดยที่

$$C_{gd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left\{ \coth \left( \frac{\pi s}{4h} \right) \right\} + 0.65 C_f \left[ \frac{0.02}{(s/h)} \sqrt{\epsilon_r} + \left( 1 - \frac{1}{\epsilon_r^2} \right) \right] \quad (2.46)$$

ซึ่งในส่วนของค่า  $C_{ga}$  จะสามารถพิจารณาได้จากลักษณะโครงสร้างสตริประนาบร่วม หรือ (Coplanar Strip) ได้ว่า

$$C_{ga} = \epsilon_0 \frac{K(k')}{K(k)} \quad (2.47)$$

เมื่อ

$$\frac{K(k')}{K(k)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left[ 2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right] & ; 0 \leq k^2 \leq 0.5 \\ \frac{\pi}{\ln \left[ 2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right]} & ; 0.5 \leq k^2 \leq 1 \end{cases} \quad (2.48)$$

$$k = \frac{s/h}{s/h + 2W/h} \quad (2.49)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2.50)$$

2.3.3 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของ โหมดคู่และโหมดคี่

ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคัปเปิลไลน์โหมดคู่  $Z_{oe}$  และโหมดคี่  $Z_{oo}$  หาได้จากค่า ความจุไฟฟ้าตามสมการดังนี้

$$Z_{oe} = \frac{1}{c\sqrt{C_e C_{e1}}} \quad (2.51)$$

$$Z_{oo} = \frac{1}{c\sqrt{C_o C_{o1}}} \quad (2.52)$$

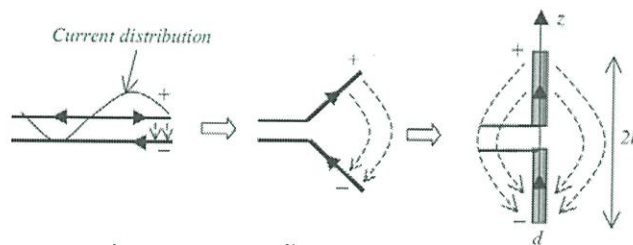
โดยที่ค่า  $C_{e1}$  และ  $C_{o1}$  เป็นความจุไฟฟ้าของโหมดคู่และโหมดคี่เมื่อแทนไดอิเล็กตริก ด้วยอากาศและค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของโหมดคู่และโหมดคี่หาได้จากสมการดังนี้

$$\epsilon_{effe} = \frac{C_e}{C_{e1}} \quad (2.53)$$

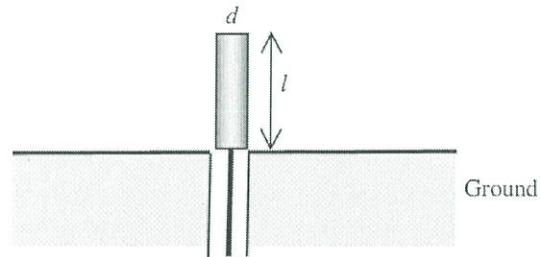
$$\epsilon_{effo} = \frac{C_o}{C_{o1}} \quad (2.54)$$

## 2.4 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพลมีหลักการทำงานมาจากสายอากาศไดโพล [5] ที่ทำงานแบบสองขั้ว พื้นฐานการทำงานของสายอากาศไดโพลแสดงดังรูปที่ 2.8 โครงสร้างจะเป็นสายส่งสองตัวนำปลายเปิดสองเส้น จุดที่ความยาวจากปลายสุดเท่ากับ  $\lambda/4$  เมื่อโค้ง หรือหักงอให้ปลายสายมีลักษณะบานออกหรือหันไปทางตรงข้ามกันจะทำให้สายตัวนำเกิดการแผ่กระจายคลื่นออกไป ซึ่งเรียกว่าสายอากาศไดโพล ความยาวทั้งหมดของสายอากาศไดโพลเท่ากับ  $\lambda/2$  ของความถี่ที่ใช้งาน ส่วนสายอากาศโมโนโพล จะใช้ตัวนำด้านบนเพียงตัวเดียวที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่น ส่วนตัวนำด้านล่างจะเป็นระนาบกราวด์ จะเห็นได้ว่าที่ความถี่เดียวกันสายอากาศโมโนโพลจะมีความยาวตัวแผ่กระจายคลื่น เท่ากับ  $\lambda/4$  แต่สายอากาศไดโพลจะเป็นเท่ากับ  $\lambda/4$  สองข้าง สามารถพิจารณาได้ว่า สายอากาศโมโนโพลอาศัยหลักการทำงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล และมีระนาบกราวด์เข้ามาทดแทนอีกครึ่งหนึ่ง เพื่อให้กระบวนการทำงานสมบูรณ์ จากรูปที่ 2.9 สายอากาศโมโนโพลจะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียวและจะใช้ระนาบกราวด์แทนขั้วที่เหลือแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลจะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของระนาบกราวด์ซึ่งในทางอุดมคติแล้วระนาบกราวด์ของสายอากาศโมโนโพลจะเป็นระนาบกราวด์สมบูรณ์แบบและเป็นอนันต์ส่งผลให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีเพียงด้านบน หรือเพียงครึ่งด้านบนของสายอากาศไดโพล แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะพบว่า ไม่สามารถออกแบบระนาบกราวด์ได้ตามอุดมคติ ดังนั้นระนาบกราวด์สายอากาศโมโนโพลในทางปฏิบัติจึงเล็กกว่าในทางทฤษฎีมาก จึงทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเกิดการเปลี่ยนทิศทางออกไปทางด้านหลังของระนาบกราวด์ด้วย หากออกแบบให้สายอากาศโมโนโพล มีระนาบกราวด์ขนาดเล็กมาก จะพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ซึ่งมักจะเรียกกันว่ามีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นคล้ายรอบตัว (like omnidirectional)



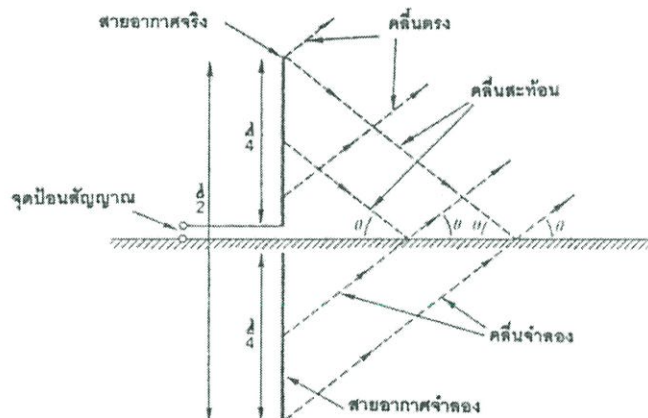
รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศไดโพล [5]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศโมโนโพล [5]

เมื่อ  $d$  คือ ความกว้างของสายอากาศโมโนโพล  
 $l$  คือ ความยาวของสายอากาศโมโนโพล

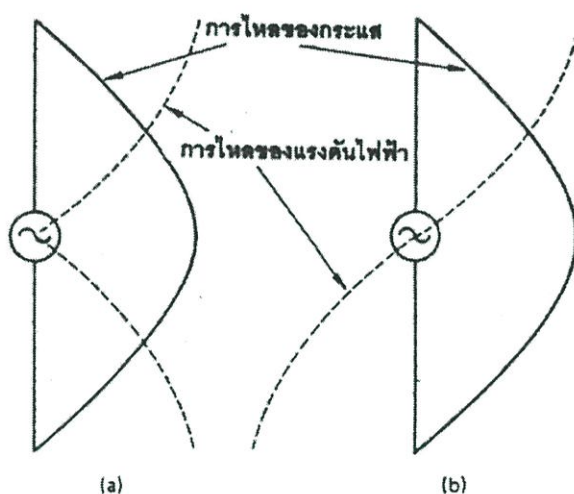
การส่งคลื่นโดยใช้สายอากาศในย่านความถี่ตั้งแต่ต่ำมาก (VLF), ต่ำ (LF) และปานกลาง (MF) จะต้องให้ความสนใจความสูงของสายอากาศ และการติดตั้งในแนวตั้งกับพื้นโลกเนื่องจากที่ความถี่ระดับนี้ค่าความยาวคลื่นมีค่ามาก จึงคิดค้นวิธีใช้สายอากาศที่มีความยาวเพียง  $\lambda/4$  แทน ด้วยเหตุผลที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแพร่คลื่นของสายอากาศโมโนโพล [5]

จากรูปเป็นภาพของสายอากาศขนาด  $\lambda/4$  ติดตั้งในแนวตั้งกับพื้นโลก โดยมีจุดพีดที่บริเวณด้านล่างระหว่างสายอากาศกับพื้นดิน เราเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่า ยูนิโพล (unipole) หรือ โมโนโพล [5] (monopole) ซึ่งมีคุณสมบัติแพร่คลื่นได้ขนาดเท่ากันทุกทิศทางในระนาบแนวอน ส่วนระนาบแนวตั้งมีพลังงานบางส่วนพุ่งสู่ฟ้าและอีกบางส่วนพุ่งเข้าหาพื้นดิน เหมือนกับที่แสดงด้วยเส้นประในรูปคลื่นที่มีทิศลงจะกระทบพื้นดิน และสะท้อนกลับขึ้นมาโดยมีค่ามุมตกกระทบเท่ากับค่า

มุมสะท้อน (คิดจากพื้นโลกที่เรียบ) ณ จุดหนึ่งที่ห่างจากสายอากาศ พลังงานคลื่นที่รับได้เกิดจากคลื่นตรงและคลื่นที่สะท้อนกับพื้นโลก ค่าความเข้มสนามที่จุดนี้ เป็นค่ารวมของความเข้มสนามในคลื่นแต่ละแบบ ถ้ามีผู้สังเกตอยู่ที่จุดนี้ อาจคิดได้ว่าคลื่นสะท้อนนั้นสามารถจินตนาการว่าแพร่ออกสายอากาศส่วนที่ได้พื้นดิน (ความจริงไม่มีส่วน) จากรูปเราเห็นสายอากาศในความคิดนี้ เรียกว่าสายอากาศจำลอง (image antenna) ก็ได้ ซึ่งจะแสดงว่าสายอากาศถูกใช้งานที่มีความยาว 2 เท่าของความจริงของมัน ความสูงทั้งหมด ของสายอากาศ (รวมส่วนจำลอง) มีค่า  $\lambda/2$  ดังนั้นการไหลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะเหมือนกับสายอากาศไดโพลขนาด  $\lambda/2$  ทุกประการค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนี้ มีค่าเป็นความต้านทานอย่างเดียวคือ 37 โอห์ม และ ในรูปที่ 2.11 จะแสดงการกระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศไดโพลแบบ  $\lambda/2$



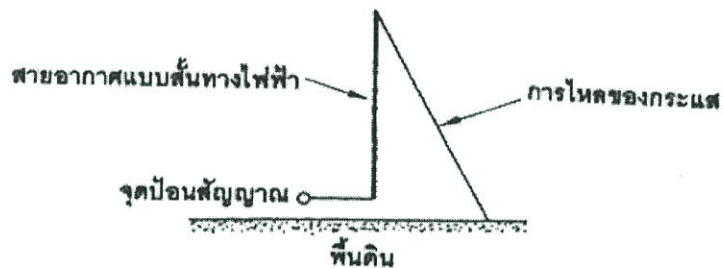
รูปที่ 2.11 ลักษณะของกระแส - แรงดันไฟฟ้าบนไดโพลแบบ  $\lambda/2$  [5]

(a) คิดจาก r.m.s

(b) คิดจาก peak

จากรูป 2.11 ที่แสดงลักษณะของกระแสนำมาวิเคราะห์กับสายอากาศแบบ  $\lambda/2$  หรือโมโนโพลได้ว่า คลื่นนิ่งหรือสแตนด์เวฟ (Standing Wave) ที่เกิดขึ้นจะมีค่ากระแสมากที่สุดที่จุดปลายสายอากาศอาจมีผลลัพธ์ให้ค่ากระแสปริมาณมากไหลจากสายอากาศลงพื้นดิน และสูญเสียพลังงานส่วนนี้ไป การแก้ไขให้สูญเสียพลังงานส่วนนี้น้อยที่สุด เพื่อรักษาประสิทธิภาพของสายอากาศให้สูงสุดเท่าที่ทำได้มีแนวทาง คือ พื้นดินต้องมีสภาพตัวนำสูง โดยการนำลวดทองแดงต่อออกจากฐานรอบสายอากาศ เป็นระยะทางเท่ากับความสูงของเสา และฝังลงดินด้วยความลึกประมาณ  $1/3$  เมตรซึ่งเส้นลวดนี้ทำหน้าที่คล้ายกราวด์ให้กับสายอากาศทำให้เกิดการสะท้อนของ

คลื่นอย่างสมบูรณ์บางกรณีการใช้สายอากาศแนวตั้งลักษณะไม่จำเป็นต้องเป็นโมโนโพลเสมอไป (มีความสูงหรือความยาวเท่ากับ  $\lambda/4$ ) อย่างเช่นที่ค่าความถี่ต่ำมากค่าความยาวขนาด  $\lambda/4$  จัดว่าสูงมากได้ เช่น ที่ความถี่ 300 KHz มีค่า  $\lambda/2 = 500$  เมตร, ค่า  $\lambda/4 = 250$  เมตร หรือความถี่ 30 KHz มีค่า  $\lambda/2 = 5,000$  เมตร, ค่า  $\lambda/4 = 2,500$  เมตร เห็นได้ว่าการสร้างสายอากาศโมโนโพลในย่านความถี่ต่ำขนาดนี้ไม่คุ้มค่าเลย จึงแก้ไขโดยสร้างสายอากาศให้มีขนาดสั้นลงและไม่จำเป็นต้องมีขนาด  $\lambda/4$  เสมอไป อาจจะทำที่ขนาด  $\lambda/16$  หรือน้อยกว่านี้ เราเรียกสายอากาศแบบนี้ว่าสายอากาศอย่างสั้นทางไฟฟ้า (electrically short) ซึ่งมีการตั้งเสาในแนวตั้งกับโลก และมีจุดพิงที่จุดฐานของสายอากาศกับพื้นดิน ส่วนการไหลของกระแสที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะของกระแสบนสายอากาศแบบสั้นทางไฟฟ้า [5]

การสร้างสายอากาศที่ขนาดน้อยกว่า  $\lambda/4$  จะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีองค์ประกอบทางประจุไฟฟ้าเพิ่มเข้ามา (เกิดรีแอ็กแตนซ์)
- ลดค่าความต้านทานการแผ่คลื่นของสายอากาศ
- ลดค่ากระแสในสายอากาศ (ค่ากระแสในวงจรจนทั่วไปมีค่าสูงสุดที่รีโซแนนซ์)

การที่จะทำให้สายอากาศกลับมารีโซแนนซ์ใหม่ ต้องต่อค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอนุกรมเข้าที่จุดป้อนสัญญาณ แต่พบว่าโชคไม่ดีที่ค่าสูงสุดของกระแสที่มีขึ้นอยู่เลยความยาวสายอากาศไปด้วยเหตุนี้ทำให้กำลังส่งที่ออกมาของสายอากาศแบบสั้นทางไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าที่ประเมินไว้

## 2.5 การหาคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ

เราสามารถจำแนกวัสดุได้โดยใช้คุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ [6] ซึ่งพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้สำหรับบอกความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ค่าสภาพยอม ( $\epsilon$ ) และค่าความซึมซาบได้ ( $\mu$ ) ค่าสภาพยอมเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของวัสดุในสนามไฟฟ้า ค่าสภาพยอม

ประกอบด้วยส่วนจริง ( $\epsilon'$ ) ที่เรียกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และส่วนจินตภาพ ( $\epsilon''$ ) ที่เรียกว่าตัวประกอบสูญเสีย ดังนั้นสามารถแสดงค่าสภาพยอมได้ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.55)$$

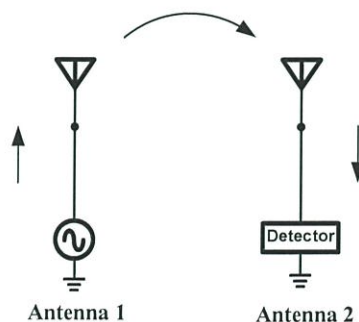
โดยที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ตัวประกอบสูญเสียบ่งบอกถึงพลังงานของสนามไฟฟ้าที่สูญเสียในตัววัสดุ นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่มักใช้อยู่บ่อยครั้งเรียกว่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบสูญเสียกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมของวัสดุมักถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ด้วยค่าสภาพยอมของสุญญากาศและเรียกใหม่ว่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (2.56)$$

โดยที่  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m นอกจากนี้ค่าตัวประกอบสูญเสียสัมพัทธ์สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของสภาพนำ ( $\sigma$ ) ได้ดังนี้

$$\epsilon''_r = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.57)$$

ค่าสภาพยอมเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านได้จะทำให้รู้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้นได้



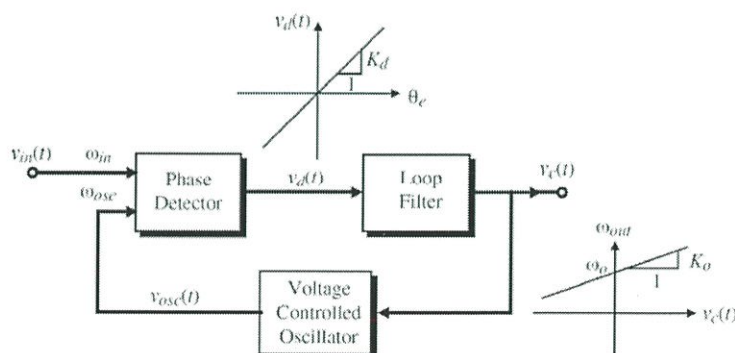
รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ [6]

จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ [6] โดยที่สายอากาศตัวหนึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ สายอากาศอีกตัวต่ออยู่กับตัวตรวจจับสัญญาณ เมื่อสายอากาศตัวที่หนึ่งส่งสัญญาณผ่านตัวกลางมายังสายอากาศตัวที่สอง ขนาดของสัญญาณที่สายอากาศตัวที่สองตรวจจับได้ เรียกว่า ขนาดของการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ซึ่งค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมมีผลกระทบโดยตรงมาจากอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศ ดังนั้นเมื่อรู้ค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม จะสามารถหาค่าไดโอดเล็กทรอนิกส์ของตัวกลางของคลื่นที่เดินทางผ่านได้

## 2.6 เฟสล็อกกลูบ

### 2.6.1 ทฤษฎีเฟสล็อกกลูบ

ฟังก์ชันของวงจรเฟสล็อกกลูบดังแสดงในรูปที่ 2.14 [7] จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักๆอยู่ 4 ตัวด้วยกันคือ วงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase comparator) วงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter) วงจรขยายที่มีอัตราขยายต่ำ (Low-gain amplifier) และวงจรแกว่งควบคุมแรงดัน (Voltage-controlled oscillator VCO) ขณะที่ไม่มีสัญญาณจากภายนอกเข้าวงจรแรงดันขาออกก็จะมีค่าศูนย์ และ VCO จะมีการตั้งค่าความถี่ทำงานเสรี (Free-running frequency) ได้จากตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ต่ออยู่ภายนอกวงจร แต่ถ้ามีสัญญาณป้อนเข้าระบบ วงจรเปรียบเทียบเฟสก็จะเปรียบเทียบเฟส ระหว่างความถี่ของสัญญาณขาเข้ากับความถี่ทำงานอิสระของ VCO และให้แรงดันผิดพลาด (Error voltage) ออกมาที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างระหว่างเฟสกับความถี่ของสัญญาณทั้งสอง จากนั้นแรงดันผิดพลาดนี้จะถูกกรองสัญญาณด้วยวงจรกรองผ่านต่ำและถูกขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายที่มีอัตราขยายต่ำ จากนั้นจึงถูกป้อนกลับไปยังขาเข้าของ VCO ถ้าให้ความถี่ขาเข้าใกล้เคียงความถี่ทำงานอิสระของ VCO ได้พอ ดังนั้นการป้อนกลับในวงจรเฟสล็อกกลูบจะทำให้ VCO ซึ่งโคโรไนส์หรือเกิดล็อกความถี่ของสัญญาณขาเข้าได้ซึ่งทำให้ความถี่ของ VCO เหมือนกันกับความถี่ของสัญญาณขาเข้า ยกเว้นแต่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฟส (Phase error) ที่เกิดจากเฟสของสัญญาณขาเข้าลบกับสัญญาณขาออกของ VCO

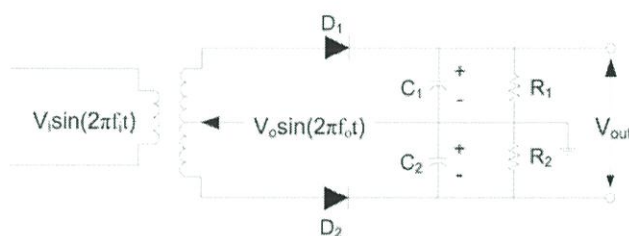


รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันของวงจรเฟสล็อกกลูบ [7]

## 2.6.2 องค์ประกอบเฟสล็อกกลุ๊ป

### 2.6.2.1 วงจรเปรียบเทียบเฟส

วงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase detector) เป็นอุปกรณ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear device) ที่ป้อนสัญญาณขาเข้าด้วยกัน 2 สัญญาณคือสัญญาณที่มีความถี่  $f_i$  ที่สร้างจากภายนอก และสัญญาณขาออกจากวงจรแกว่งควบคุมแรงดันที่มีความถี่  $f_o$  สำหรับสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบเฟสจะเป็นผลคูณของสัญญาณความถี่  $f_i$  และ  $f_o$  ดังนั้นสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบเฟสจึงประกอบไปด้วยสัญญาณที่มีความถี่ผลรวม และสัญญาณที่มีความถี่ผลต่าง  $(f_i \pm f_o)$  ด้วยกัน ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับวงจรผสมสัญญาณ โดยรูปที่ 2.15 แสดงถึงแผนผังวงจรเปรียบเทียบเฟสอย่างง่ายโดยมีสัญญาณ  $V_o$  ป้อนเข้าที่แท่งกลางของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง  $T_1$  พร้อมกับป้อนสัญญาณ  $V_i$  เข้าทางขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_1$



รูปที่ 2.15 แผนผังวงจรเปรียบเทียบเฟส [7]

จากรูปที่ 2.15 ในส่วนของ  $D_1$ ,  $R_1$ , และ  $C_1$  จะประกอบกันเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half-wave rectifier) เช่นเดียวกับในส่วนของ  $D_2$ ,  $R_2$  และ  $C_2$  โดยที่  $C_1 = C_2$  และ  $R_1 = R_2$  ขณะ ช่วงครึ่งบวกของ  $V_o$ ,  $D_1$  และ  $D_2$  ก็จะไบอัสไปหน้า หรือนำกระแสและทำให้  $C_1$  และ  $C_2$  เกิดการอัดประจุที่มีระดับแรงดันเท่ากันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน ดังนั้นแรงดันขาออกเฉลี่ยเป็น  $V_{out} = V_{c1} + (-V_{c2})$  เท่ากับ และขณะช่วงครึ่งลบของ  $V_o$  จะไบอัสย้อนกลับหรือหยุดนำกระแส ดังนั้น  $C_1$  และ  $C_2$  ก็จะคายประจุเท่าๆกันผ่าน  $R_1$  และ  $R_2$  ตามลำดับ ซึ่งยังคงให้ระดับแรงดันขาออกมีค่าเป็น 0 V ซึ่งวงจรเรียงกระแสทั้งสองนี้จะให้แรงดันขาออกที่มีขนาดเท่ากันแต่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นแรงดันขาออกขณะที่แรงดัน  $V_o$  คงที่ และมีค่าเป็น 0 V โดยที่รูปคลื่นขาเข้าและขาออกเมื่อป้อนสัญญาณ VCO เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม เมื่อมีการป้อนสัญญาณขาเข้าจากภายนอก  $v_i = V_i \sin(2\pi f_i t)$  ให้แก่วงจรเปรียบเทียบเฟส โดยแรงดันนี้ไปรวมกับ  $V_o$  ซึ่งทำให้  $C_1$  และ  $C_2$  มีการอัดประจุ และคายประจุที่ทำให้แรงดันขาออกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามสัดส่วนของขนาดแรงดันขาเข้า  $V_i$  ที่ป้อนจากภายนอก

### 2.6.2.2 วงจรกรองสัญญาณ

วงจรกรองความถี่สูง ทำหน้าที่กำจัดองค์ประกอบของสัญญาณไฟสลับที่อยู่ใน  $v_d(t)$  ออกไป จึงทำให้สัญญาณ  $v_c(t)$  ที่ได้เป็นแรงดันคงที่

### 2.6.2.3 วงจรแกว่งควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรกรองความถี่สูง ทำหน้าที่กำจัดองค์ประกอบของสัญญาณไฟสลับที่อยู่ใน  $v_d(t)$  ออกไป จึงทำให้สัญญาณ  $v_c(t)$  ที่ได้เป็นแรงดันคงที่วงจรแกว่งที่ควบคุมแรงดัน (Voltage-controlled oscillator) ได้นำมาใช้เป็นวงจรมอดูเลตเชิงความถี่ โดยจะมีวงจรต่าง ๆ มากมายที่ใช้ในการควบคุมความถี่ของวงจรแกว่ง แต่วิธีที่ง่ายคือการใช้ตัวเก็บประจุที่แปรค่าตามแรงดัน หรือไดโอดวาร์เรกเตอร์ในวงจรมัลติไวเบเรเตอร์ เมื่อแรงดันไบอัสของไดโอดวาร์เรกเตอร์เปลี่ยนจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของวงจรแกว่งตามแรงดันไบอัสที่เปลี่ยนนั่นเอง

## 2.6.3 สภาวะการทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุ่

สำหรับสภาวะการทำงานของเฟสล็อกกลุ่ นั้นโดยทั่วไปจะมีการทำงานอยู่ 3 สภาวะ ดังนี้

### 2.6.3.1 สภาวะการทำงานเป็นอิสระ (Free-Running)

ความถี่ของวงจรถูกกำหนดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันจะถูกกำหนดจากโครงสร้างของวงจรเองนั่นคือ ในขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้าของวงจรถูกกำหนดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันจะให้สัญญาณที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งเป็นความถี่เริ่มต้น

### 2.6.3.2 สภาวะจับยึด (Capture)

เป็นสภาวะที่ความถี่ของสัญญาณจากวงจรถูกกำหนดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันกำลังลู่เข้าหาความถี่ของสัญญาณขาเข้า โดยย่านความถี่ที่วงจรเฟสล็อกกลุ่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณขาเข้าได้นั้นเรียกว่า ย่านล็อก (Lock Range)

### 2.6.3.3 สภาวะเฟสล็อก (Locked Phase)

เมื่อความถี่ของสัญญาณจากวงจรถูกกำหนดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณขาเข้า โดยย่านความถี่ที่วงจรเฟสล็อกกลุ่สามารถเข้าถึงสภาวะเฟสล็อกได้นั้นเรียกว่า ย่านจับยึด (Capture Range)

## 2.7 การหาความชื้นในดิน

### 2.7.1 กล่าวนำ

ความชื้นของดินตามธรรมชาติ [8] (Natural Water Content) เป็นการทดสอบพื้นฐานที่จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพของดิน เช่น แร่เหนียว อัตราส่วน ช่องว่างในดิน การทรุดตัวของดิน เป็นต้น ค่าพิกัดแอตเตอร์เบอร์ก (Atterberg Limits) ต่างๆ ที่ทดสอบก็คือความชื้นของดินนั่นเอง (ในสถานะต่างกับความชื้นตามธรรมชาติ) การทดสอบความชื้นของดินจึงมีความจำเป็นในการทดสอบดิน ในทางปฏิบัติความชื้นของดินหาได้จากการนำตัวอย่างดินที่มีขนาดน้ำหนักมากพอ (สำหรับขนาดเม็ดดินแต่ละชนิด) ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 – 24 ชั่วโมงจนดินแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้ววัดความชื้นของดินเป็นสัดส่วนต่อน้ำหนักดินแห้งเป็นเปอร์เซ็นต์ ดินที่มีเม็ดละเอียดจะมีความชื้นได้สูงกว่าดินที่มีเม็ดหยาบ เนื่องจากดินเม็ดละเอียดมีพื้นที่เฉพาะ (Specific Surface) ซึมซับน้ำได้มากกว่า

### 2.7.2 วิธีการหาค่าความชื้นในดิน

ดินหากนำมาแยกดูจะพบว่าก้อนดินที่ปริมาตรหนึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนที่เป็นของแข็ง อากาศ และน้ำ หากดินก้อนดังกล่าวไม่มีน้ำอยู่แล้วเรียกว่า “Dry Soil” หรือดินแห้ง แต่ถ้าช่องว่างของดินเต็มไปด้วยน้ำเรียกว่า “Saturated Soil” หรือดินอิ่มตัว ถ้าดินก้อนนั้นมีน้ำปนอยู่แต่ไม่เต็มช่องว่างเรียกว่า “Unsaturated Soil” หรือดินไม่อิ่มตัว ซึ่งความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำ อากาศ และของแข็ง ของก้อนดินเราสามารถหาปริมาณความชื้นในมวลดินได้จาก

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับน้ำหนัก (Weight-Weight Relationships) มีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับน้ำหนักที่สำคัญเพียง 1 ชนิด คือ

$$\text{Water Content, } W\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.62)$$

$$= \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (2.63)$$

เมื่อ

- $W_w$  = น้ำหนักน้ำในดิน (กรัม)
- $W_s$  = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)
- $W_3$  = น้ำหนักตัวอย่างดินแห้ง + ครอบ (กรัม)
- $W_2$  = น้ำหนักตัวอย่างดินเปียก + ครอบ (กรัม)
- $W_1$  = น้ำหนักครอบดิน (กรัม)

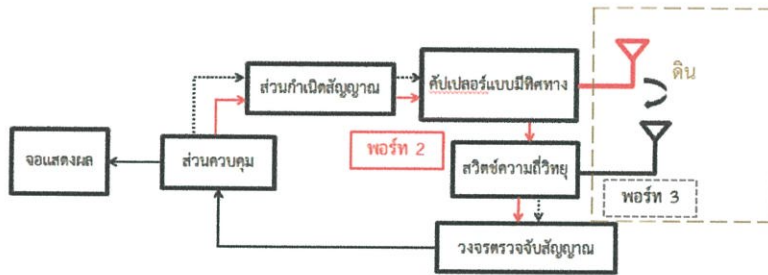
ค่า Water Content สำหรับดินแห้งจะเป็น 0 สำหรับดินที่อิ่มตัวอาจมีค่ามากกว่า 100%

### บทที่ 3

#### การออกแบบและการจัดทำโครงการ

##### 3.1 บล็อกไดอะแกรม

การทำงานจะมีการวัดสัญญาณออกที่ 2 พอร์ต คือ วัดแรงดันที่พอร์ต 2 และ พอร์ต 3 มีสวิตซ์ความถี่วิทยุเป็นตัวเลือกการทำงานระหว่างพอร์ต 2 หรือ พอร์ต 3 ในส่วนกำเนิดสัญญาณทำหน้าที่ปล่อยสัญญาณที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อใช้งานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางและสายอากาศโมโนโพลที่วางคู่ขนานกัน วงจรตรวจจับสัญญาณช่วยในการจับแรงดันที่วัดค่าได้ และส่วนควบคุมทำหน้าที่ล็อกสัญญาณที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล คำนวณค่าความชื้นที่วัดได้แสดงผ่านทางหน้าจอ



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม

##### 3.2 การออกแบบ

จะแบ่งการออกแบบนี้ออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 คือการหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหมดคู่และโหมดคี่

$$Z_{oe} = Z_0 \sqrt{\frac{1+10^{c/20}}{1-10^{c/20}}} \quad (3.1)$$

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1-10^{c/20}}{1+10^{c/20}}} \quad (3.2)$$

โดยที่ค่า  $c$  นั้นคือว่าการเชื่อมต่อที่เราต้องการโดยกำหนดเป็นเดซิเบล

ขั้นตอนที่ 2 คือการหาค่าขนาดของ  $s/h$  และ  $w/h$

สูตรหาค่า  $s/h$

$$\frac{s}{h} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{w}{h} \right)_{so} \right] + \cosh \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{w}{h} \right)_{so} \right] - 2}{\cosh \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{w}{h} \right)_{so} \right] + \cosh \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{w}{h} \right)_{se} \right]} \right] \quad (3.3)$$

สูตรหาค่า  $w/h$

$$\frac{w}{h} = \frac{\sqrt{\left[ \exp \left( \frac{R}{42.4} \sqrt{(\epsilon_r + 1)} \right) - 1 \right] \frac{7 + (4/\epsilon_r)}{11} + \frac{1 + (1/\epsilon_r)}{0.81}}}{\left[ \exp \left( \frac{R}{42.4} \sqrt{(\epsilon_r + 1)} \right) - 1 \right]} \quad (3.4)$$

ที่

$$R = \frac{Z_{oe}}{2} \quad \text{หรือ} \quad R = \frac{Z_{oo}}{2} \quad (3.5)$$

$Z_{ose}$  และ  $Z_{oso}$  นั้นสามารถหาได้จาก

$$Z_{ose} = \frac{Z_{oe}}{2} \quad (3.6)$$

$$Z_{oso} = \frac{Z_{oo}}{2} \quad (3.7)$$

$$(w/h)_{se} = (w/h) \Big|_{R=Z_{oe}} \quad (3.8)$$

$$(w/h)_{so} = (w/h) \Big|_{R=Z_{oo}} \quad (3.9)$$

หาค่า  $(w/h)'$  และนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.3)

$$\left(\frac{w}{h}\right)'_{so} = 0.78 \left(\frac{w}{h}\right)_{so} + 0.1 \left(\frac{w}{h}\right)_{se} \quad (3.10)$$

เราจะได้อัตราส่วนของ  $s/h$  และ  $w/h$  และต่อมาคือหาอัตราส่วนของ  $(w/h)$  จากสูตร

$$\left(\frac{w}{h}\right) = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1}(d) - \frac{1}{2} \left(\frac{s}{h}\right) \quad (3.11)$$

ที่

$$d = \frac{\cosh \left[ \frac{\pi}{2} \left(\frac{w}{h}\right)_{se} \right] (g+1) + g - 1}{2} \quad (3.12)$$

$$g = \cosh \left[ \frac{\pi}{2} \left(\frac{s}{h}\right) \right] \quad (3.13)$$

ขั้นตอนที่ 3 การหาความยาวของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

สูตรการหาค่าความยาวคือ

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.14)$$

$c$  คือค่าความเร็วแสงเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s และ  $f$  คือค่าความถี่ที่เราใช้ในย่านนั้นๆ จากนั้นทำการหาค่า  $\epsilon_{eff}$  โดยหาจาก

$$\epsilon_{eff} = \left[ \frac{\sqrt{\epsilon_{effe}} + \epsilon_{effo}}{2} \right]^2 \quad (3.15)$$

โดยที่

$$\epsilon_{effe} = \frac{C_e}{C_{e1}} \quad (3.16a)$$

$$\epsilon_{effo} = \frac{C_o}{C_{o1}} \quad (3.16b)$$

$C_{e1,o1}$  คือค่าความจุไฟฟ้ากับอากาศ

1) โหมดคู่การหาผลรวมของตัวเก็บประจุ คือ

$$C_e = C_p + C_f + C'_f \quad (3.17)$$

$C_p$  คือ ค่าความจุที่ของแผ่นขนาดที่สามารถหาได้โดย

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{w}{h} \quad (3.18)$$

$C_f$  สามารถหาได้จาก

$$C_f = \frac{\sqrt{\epsilon_{seff}}}{2cZ_0} - \frac{C_p}{2} \quad (3.19)$$

$\epsilon_{seff}$  โดยที่สามารถหาค่าคงที่ได้อิเล็กตริกประสิทธิผลของไมโครสตริปเดี่ยวได้จาก

$$\epsilon_{seff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} - \frac{\epsilon_r - 1}{2} F(w/h) \quad (3.20)$$

เมื่อ

$$F(w/h) = \begin{cases} (1+12h/w)^{-1/2} + 0.041(1-w/h)^2 & , \text{for } \left(\frac{w}{h} \leq 1\right) \\ (1+12h/w)^{-1/2} & , \text{for } \left(\frac{w}{h} \geq 1\right) \end{cases} \quad (3.21)$$

สามารถหา  $C'_f$  ได้จากสมการดังนี้

$$C'_f = \frac{C_f}{1 + A \left( \frac{h}{s} \right) \tanh \left( \frac{10h}{s} \right)} \left( \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{seff}} \right)^{1/4} \quad (3.22)$$

$$A = \exp \left[ -0.1 \exp \left( 2.33 - 1.5 \frac{W}{h} \right) \right] \quad (3.23)$$

2) โหมดคือการหาผลรวมของตัวเก็บประจุ คือ

$$C_o = C_p + C_f + C_{gd} + C_{ga} \quad (3.24)$$

$C_{ga}$  คือค่าความจุไฟฟ้าในโหมดที่ข้ามช่องว่างในอากาศ สามารถหาโดย

$$C_{ga} = \epsilon_0 \frac{K(k')}{K(k)} \quad (3.25)$$

เมื่อ

$$\frac{K(k')}{K(k)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left[ 2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right] & ; 0 \leq k^2 \leq 0.5 \\ \frac{\pi}{\ln \left[ 2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right]} & ; 0.5 \leq k^2 \leq 1 \end{cases} \quad (3.26)$$

$$k = \frac{s/h}{s/h + 2W/h} \quad (3.27)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (3.28)$$

$C_{gd}$  คือค่าความจุไฟฟ้าในโหมดคิที่ข้ามช่องว่างในไดเรกทริกซ์สามารถหาโดย

$$C_{gd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left\{ \coth \left( \frac{\pi s}{4 h} \right) \right\} + 0.65 C_f \left[ \frac{0.02}{(s/h)} \sqrt{\epsilon_r} + \left( 1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (3.29)$$

เนื่องจาก

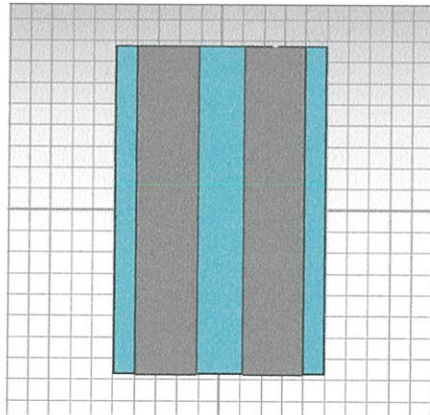
$$Z_{oe} = \frac{1}{c \sqrt{C_e C_{e1}}} \quad (3.30)$$

$$Z_{oo} = \frac{1}{c \sqrt{C_o C_{o1}}} \quad (3.31)$$

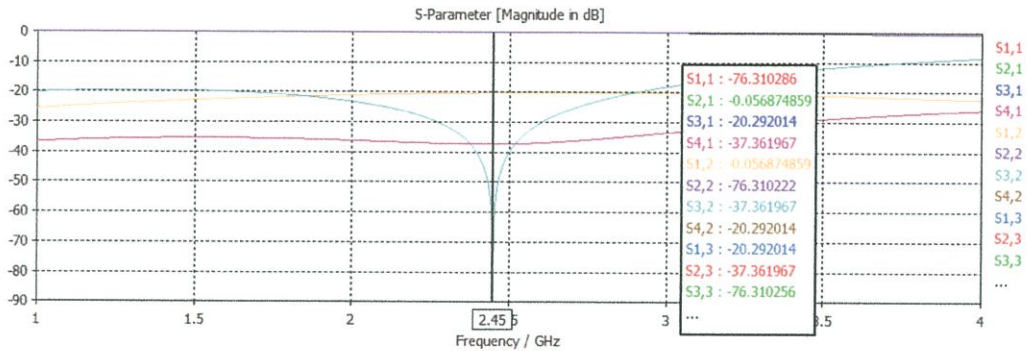
$$C_{e1} = \frac{1}{c^2 C_e Z_{oe}^2} \quad (3.32)$$

$$C_{o1} = \frac{1}{c^2 C_o Z_{oo}^2} \quad (3.33)$$

จากนั้นนำไปออกแบบกับโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 3.2 ออกแบบคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางบนโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 พารามิเตอร์ต่างๆของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

### 3.3 การออกแบบสายอากาศโมโนโพล

สายอากาศแบบโมโนโพลเป็นสายอากาศเส้นลวดตรงที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพลนั่นเอง โดยนำมาใช้เพียงแขนด้านบนของความยาวไดโพลทั้งหมด และป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางเช่นกัน แต่ใช้วิธีเทียบกับระนาบกราวน์แทน ทำให้โมโนโพลมีความยาวเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น  $\frac{\lambda}{4}$  คำนวณสมการเบื้องต้นโดย

$$\text{ความยาวของสายอากาศ (L)} = \frac{\lambda}{4} ; \lambda = \frac{c}{f} \quad (3.34)$$

กำหนดค่า  $c = 3 \times 10^8$  m/s และ  $f = 2.45$  GHz จากการคำนวณได้ความยาวประมาณ  $L = 3$  cm โดยกำหนดค่าคงที่ต่างๆบนแผ่น FR-4 เป็นดังนี้

ค่าความหนาของแผ่นทองแดง = 0.0795 mm

ค่าความหนาของฐานรองไดอิเล็กตริก = 1.44 mm

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก = 4.26 mm

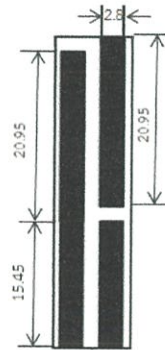
จากนั้นนำไปออกแบบกับโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเลือกใช้ค่าสภาพยอมที่ใช้ในการจำลองดินที่มีขนาด  $\lambda \times \lambda$  ค่าคงที่ที่ใช้เป็นดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าสภาพยอมที่ใช้ในการจำลองดิน

	$\epsilon'$	$\epsilon''$	Loss Tangent
ความชื้นมาก	15	2.65	0.1747
ความชื้นปานกลาง	9.37	1.4075	0.1502
ความชื้นน้อย	3.75	0.165	0.044

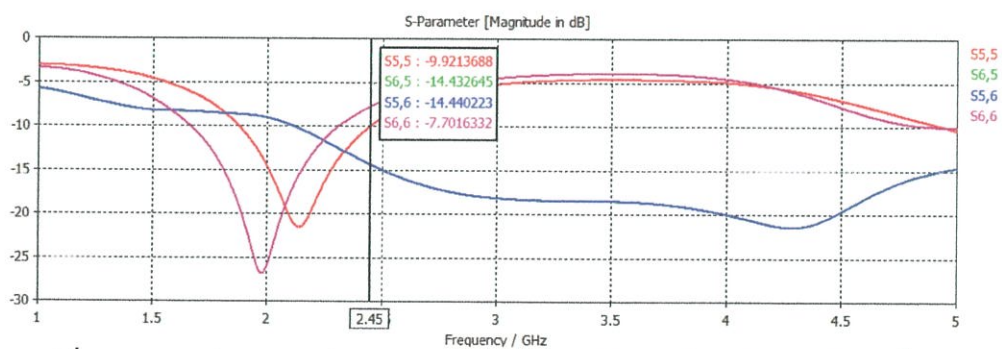
การออกแบบนั้นผู้จัดทำได้ทำการจำลองดินทั้ง 3 กรณีโดยการเปลี่ยนค่าคงที่ตามตารางที่ 3.1 เพื่อดูผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ได้เป็นดังนี้

โดยทั้ง 3 กรณี กำหนดความยาวของสายอากาศและการจำลองเป็นดังนี้



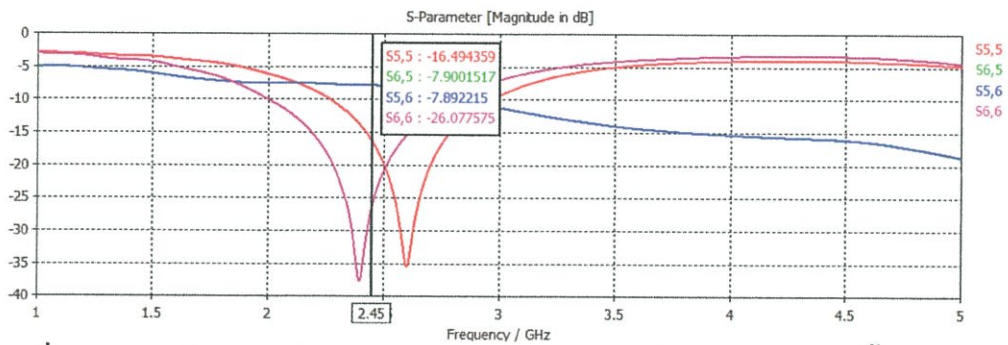
รูปที่ 3.4 กำหนดขนาดของอุปกรณ์

กรณีดินที่มีความชื้นมาก



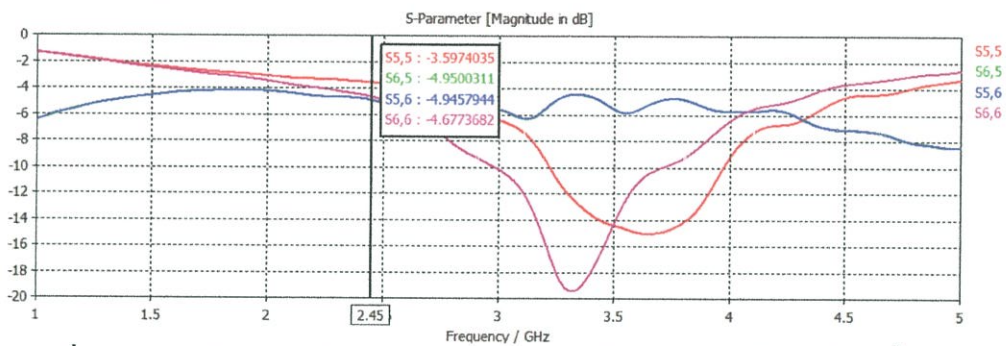
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชื้นมาก

กรณีความถี่ปานกลาง



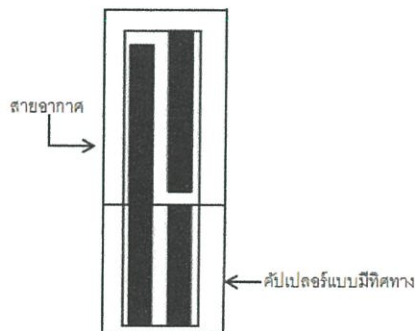
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชั้นปานกลาง

กรณีความถี่น้อย

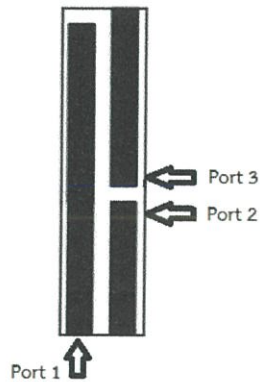


รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชั้นน้อย

จากรูปข้างต้นผู้จัดทำเลือกใช้ค่าคงที่ค่าสภาพยอมปานกลางเป็นตัวการออกแบบสายอากาศ โครงสร้างโดยรวมทั้งหมด และการกำหนดพอร์ทเป็นดังนี้



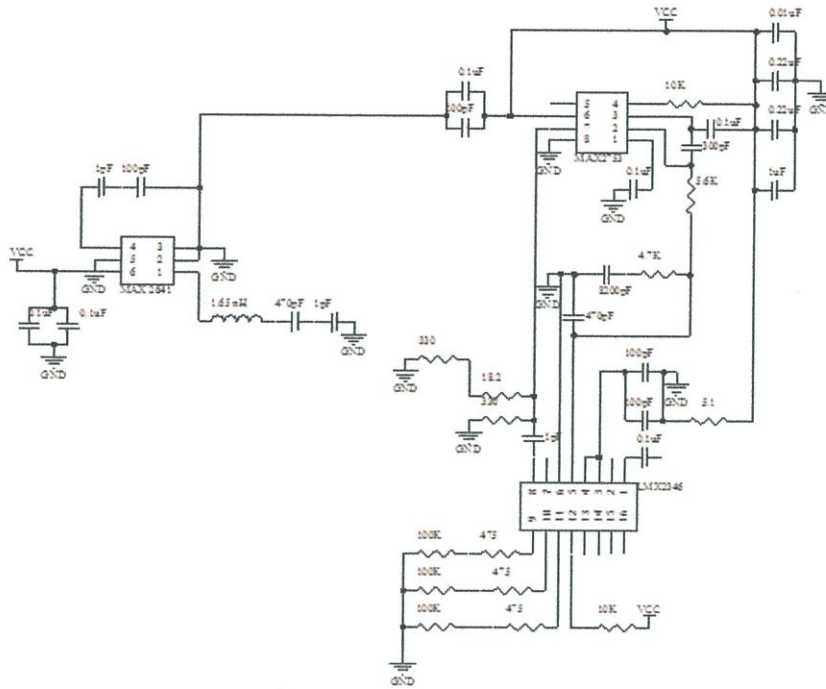
รูปที่ 3.8 โครงสร้างของอุปกรณ์



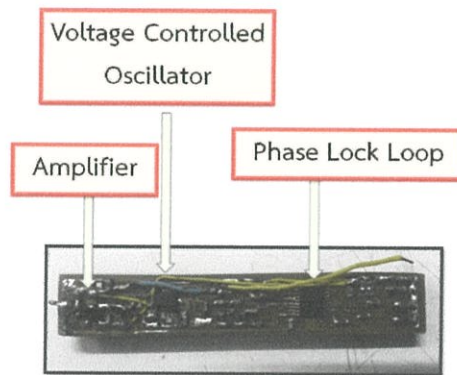
รูปที่ 3.9 การกำหนด Port ของอุปกรณ์

### 3.4 อุปกรณ์ส่วนกำเนิดสัญญาณ

เราได้ออกแบบในส่วนกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยในส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงจรที่ใช้ระดับแรงดันไปควบคุมการสร้างความถี่ วงจรขยายสัญญาณ และวงจรเฟสล็อกกลูบ โดยเราเลือกใช้ตัววงจรที่ใช้ระดับแรงดันไปควบคุมการสร้างความถี่เบอร์ MAX2750 วงจรขยายสัญญาณเบอร์ MAX2641 และ วงจรเฟสล็อกกลูบเบอร์ 2347 โจทย์ในการออกแบบต้องการให้อุปกรณ์มีขนาดกะทัดรัดผู้จัดทำจึงออกแบบลายวงจรให้มีขนาดใกล้เคียงกับสายอากาศที่เราออกแบบไว้แล้วโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งาน อุปกรณ์ในส่วนกำเนิดสัญญาณและรูปวงจรเป็นดังนี้



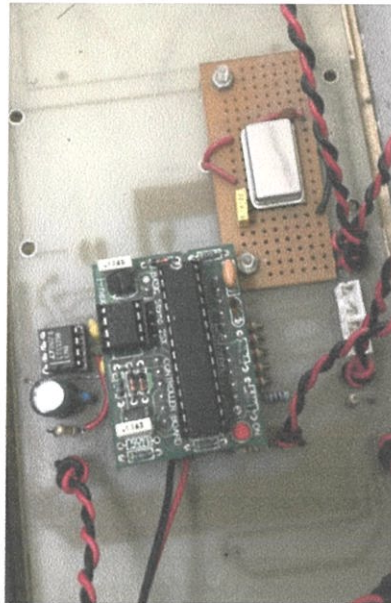
รูปที่ 3.10 วงจรส่วนกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ส่วนกำเนิดสัญญาณ

### 3.5 ส่วนควบคุม

ในส่วนควบคุมเราใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดเบสิกแอสตัมป์เป็นตัวควบคุมเฟสล็อกกรุป เพื่อให้กำเนิดสัญญาณอยู่ในความถี่คงที่ และส่วนควบคุมเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อแสดงผลแรงดันของสัญญาณทางหน้าจอ จะมีสวิทช์ 2 ตัว ตัวที่ 1 (ด้านขวา)จะเป็นตัวสวิทช์เลือกการทำงานของพอร์ท 2 หรือ พอร์ท 3 โดยถ้ากดครั้งที่ 1 จะเป็นการวัดแรงดันที่พอร์ท 3 และ กดครั้งที่ 2 จะเป็นการวัดสัญญาณที่พอร์ท 2 กดครั้งที่ 3 จะเป็นการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดิน และสวิทช์ ตัวที่ 2 (ด้านซ้าย) จะทำหน้าที่รีเซ็ตระบบ



รูปที่ 3.12 ส่วนควบคุม

### 3.6 การจัดเก็บผลการทดลอง

ในการออกแบบสายอากาศของโครงการนี้เราได้ออกแบบสายอากาศโมนิโพลที่มีความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ที่ใช้งานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางซึ่งเราได้สร้างสายอากาศเหมือนกันสองตัววางคู่ขนานสายอากาศตัวที่หนึ่งเชื่อมต่อติดกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง สายอากาศตัวที่สองวางไม่เชื่อมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางโดยจะมีวงจรสวิตต์ความถี่วิทยุคั่นกลางไว้ เราสามารถสวิตซ์เลือกได้ว่าจะให้ สายอากาศหรือคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางทำงาน และวงจรตรวจจับสัญญาณมาเป็นตัวช่วยในการวัดค่า และป้อนด้วยส่วนกำเนิดสัญญาณ ป้อนไฟ 5 V จากแบตเตอรี่ และทำการเก็บผล ก่อนการจัดเก็บการทดลองวัดความชื้นในดินเราจะทดสอบสายอากาศก่อน โดยก่อนการเก็บผลการทดสอบสายอากาศที่ทำงานคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางเราต้องทำการปรับเทียบ (Calibrate) ก่อนทุกครั้งเพื่อที่จะทำการเซตเครื่องให้อยู่ในสภาวะที่พร้อมการใช้งาน

ในการเก็บผลการทดลองของสายอากาศที่ใช้งานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางเราได้ ออกสายอากาศโมนโพลที่มีความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่แมตซ์ ในดินซึ่งในการจัดเก็บผลการ ทดสอบสายอากาศเราจะทำการวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโมนโพลตัวที่ 1 และ ค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโมนโพลตัวที่ 2 โดยพอร์ทที่เหลือจะทำการต่อด้วยความ ต้านทาน 50  $\Omega$



รูปที่ 3.13 การวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโมนโพลตัวที่ 1



รูปที่ 3.14 การวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโมนโพลตัวที่ 2

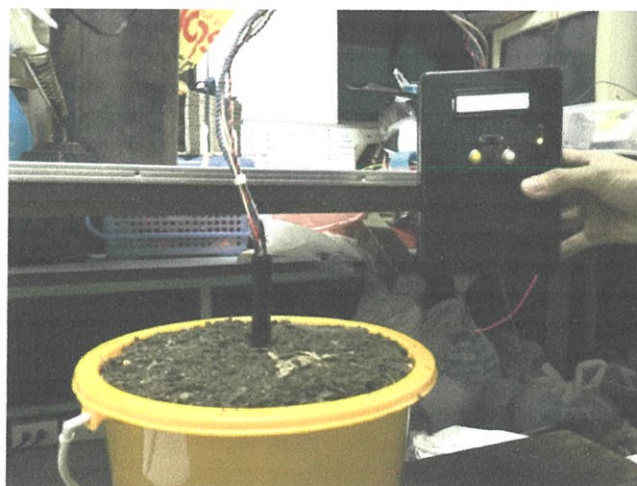
จากนั้นทำการวัดค่า  $S_{21}$  ของสายอากาศ



รูปที่ 3.15 การวัดค่า  $S_{21}$  ของสายอากาศ

เมื่อทดสอบสายอากาศที่ทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางแล้วจากนั้นจึงนำมาทดสอบกับดินสายอากาศที่เราออกแบบมีสายอากาศสองตัววางขนานกันโดยเราจะทำการวัดแบบ  $S_{11}$  และ แบบ  $S_{21}$  และเราได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็นหลายๆกรณีดังนี้

1. วัดดินในสภาพดินที่ปกติ
2. วัดในดินที่ผสมน้ำ 250 mL และคลุกให้เข้ากัน
3. วัดในดินที่ผสมน้ำ 500 mL และคลุกให้เข้ากัน
4. วัดในดินที่ผสมน้ำ 750 mL และคลุกให้เข้ากัน
5. วัดในดินที่ผสมน้ำ 1,000 mL และคลุกให้เข้ากัน



รูปที่ 3.16 การวัดในสภาพดินที่ปกติ



รูปที่ 3.17 การวัดในสภาพดินที่ผสมน้ำ 250 mL และทำการคลุกให้เข้ากัน



รูปที่ 3.18 การวัดในสภาพดินที่ผสมน้ำ 750 mL และทำการคลุกให้เข้ากัน



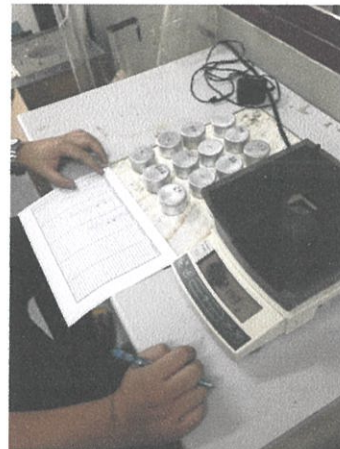
รูปที่ 3.19 การวัดในสภาพดินที่ผสมน้ำ 1,000mL และทำการคลุกให้เข้ากัน

และหลังจากที่เก็บผลการวัดความแตกต่างในดินแล้ว ผู้จัดทำนำตัวอย่างดินในแต่ละกรณีอย่างละ 4 ตัวอย่างโดยการนำดินใส่ในขวดปิดทึบแสงเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและนำไปอบด้วยตู้อบทันที

ชั่งน้ำหนักของกระป๋องก่อนและหลังใส่ดิน



รูปที่ 3.20 ชั่งน้ำหนักกระป๋องเปล่า



รูปที่ 3.21 ชั่งน้ำหนักกระป๋องที่ใส่ดิน

นำดินตัวอย่างหาค่าความชื้นด้วยวิธีการอบด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบ 24 ชั่วโมงนำดินออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อวัดหามวลน้ำหนักที่ระเหยไป

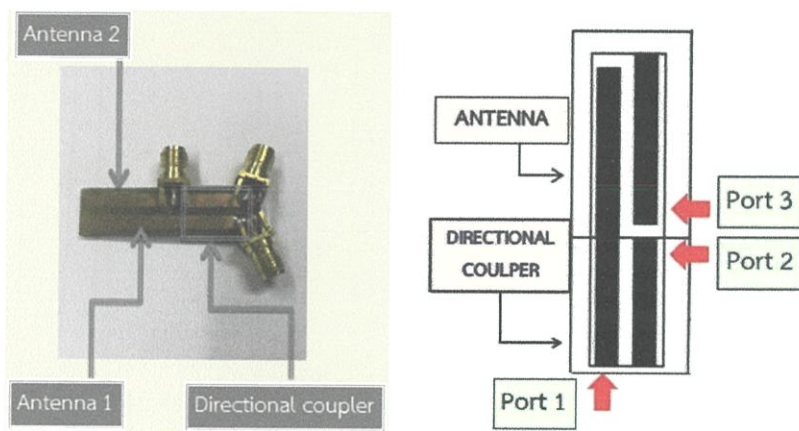
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดสอบสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

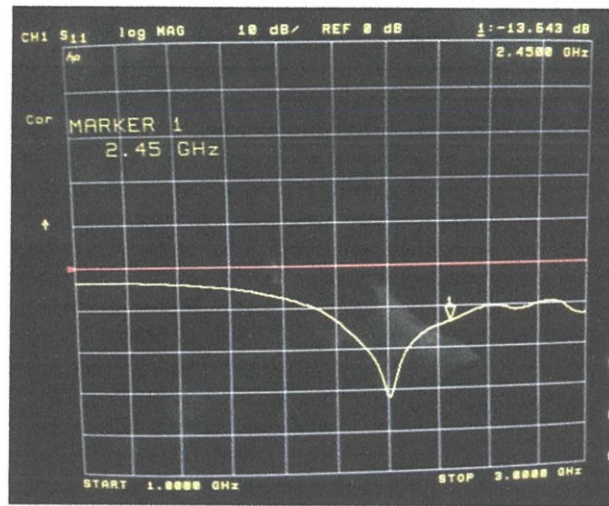
ทดสอบสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในย่านความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ต ด้วยเครื่อง Vector Network Analyzer

สายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง



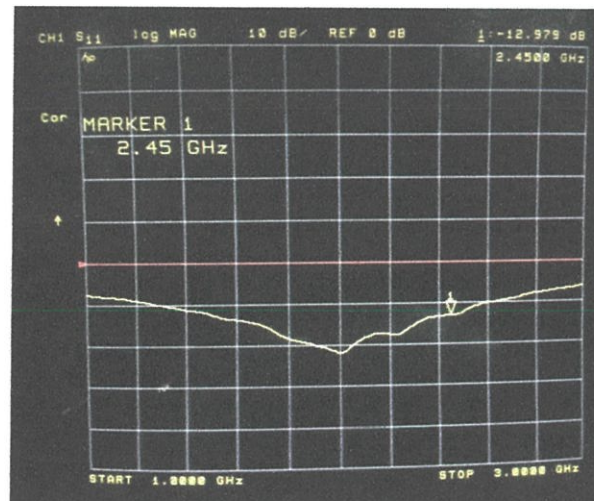
รูปที่ 4.1 การกำหนดพอร์ตของสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

วัดแบบ  $S_{11}$  ของสายอากาศตัวที่ 1



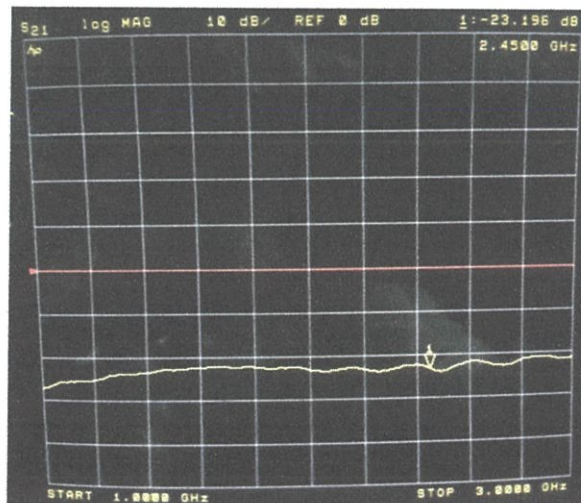
รูปที่ 4.2 วัดค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศตัวที่ 1

วัดแบบ  $S_{11}$  ของสายอากาศตัวที่ 2



รูปที่ 4.3 วัดค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศตัวที่ 2

วัดแบบ  $S_{31}$  ของคัปเปอเรอร์แบบมีทิศทาง



รูปที่ 4.4 วัดค่า  $S_{31}$  ของคัปเปอเรอร์แบบมีทิศทาง

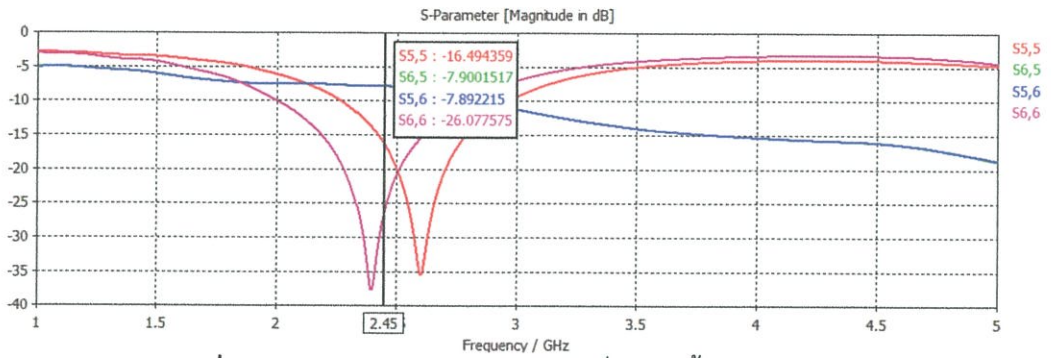
ผลจากการ Simulation สายอากาศ โดยใช้โปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้

การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า เราใช้ค่าคงที่ที่ความถี่ขึ้นปานกลางของตารางที่ 4.1 การกำหนดพอร์ทในการจำลองสายอากาศและคัปเปอเรอร์แบบมีทิศทางเรากำหนดคัปเปอเรอร์แบบมีทิศทางพอร์ทที่ 1 ให้สายอากาศตัวที่ 1 เป็นพอร์ทที่ 5 และสายอากาศตัวที่ 2 เป็นพอร์ทที่ 6

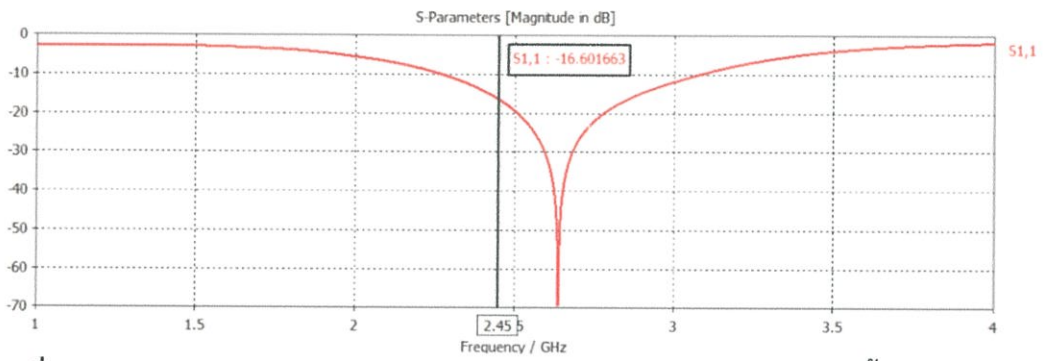
ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพยอมที่ใช้ในการจำลองดิน

	$\epsilon'$	$\epsilon''$	Loss Tangent
ความถี่สูง	15	2.65	0.1747
ความถี่ปานกลาง	9.37	1.4075	0.1502
ความถี่ต่ำ	3.75	0.165	0.044

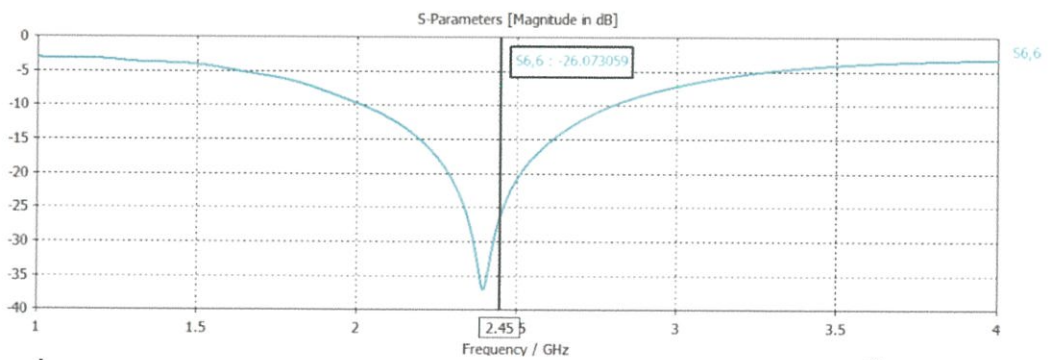
### จำลองสายอากาศในดินที่มีความชื้นปานกลาง



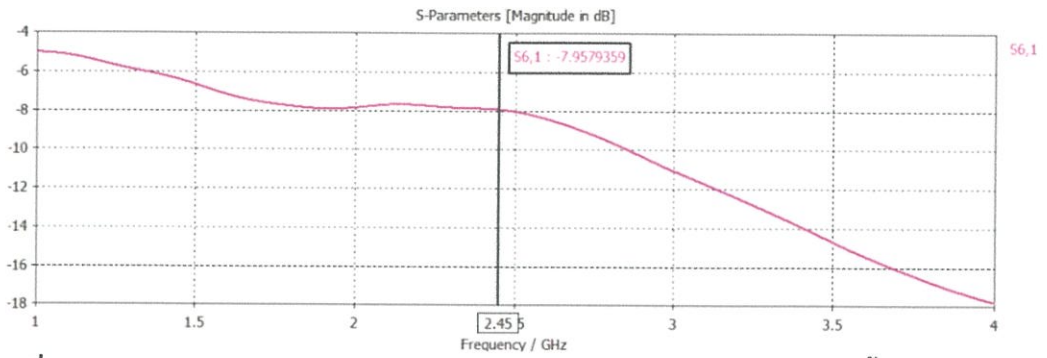
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองสายอากาศในดินที่มีความชื้นปานกลาง



รูปที่ 4.6 ผลการจำลอง  $S_{11}$  สายอากาศทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชื้นปานกลาง



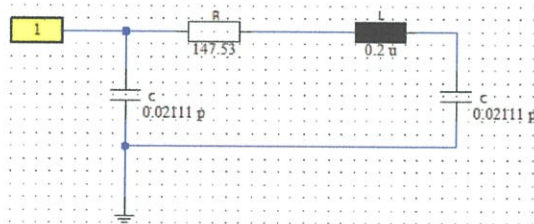
รูปที่ 4.7 ผลการจำลอง  $S_{66}$  สายอากาศทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชื้นปานกลาง



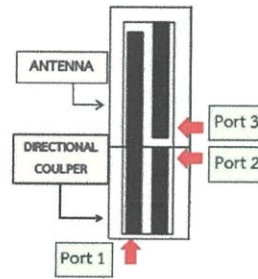
รูปที่ 4.8 ผลการจำลอง  $S_{61}$  สายอากาศทำงานร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในดินชั้นปานกลาง

### 4.2 วงจรสมมูล

จำลองรูปแบบวงจรสมมูลของสายอากาศเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสายอากาศ โดยวงจรสมมูลของสายอากาศเป็นดังนี้



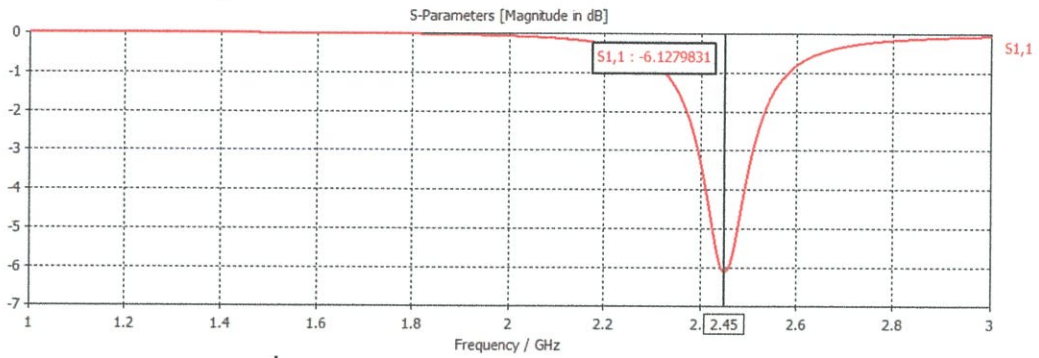
รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลของสายอากาศโมโนโพล



รูปที่ 4.10 แบบจำลองอุปกรณ์

จากวงจรสมมูลรูปที่ 4.9 แสดงถึงวงจรสมมูลของสายอากาศโมโนโพลเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10

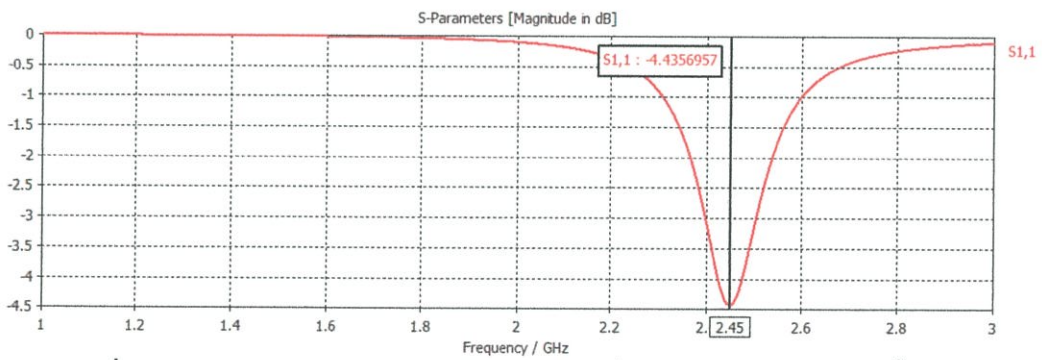
ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศ



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศ

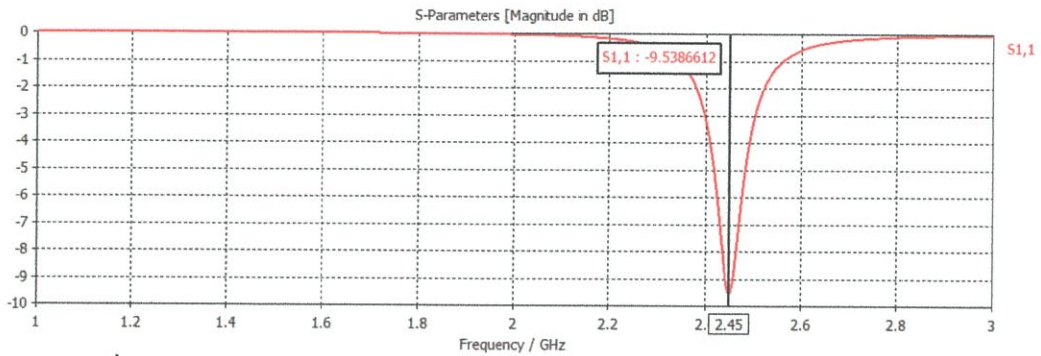
#### 4.2.1 ปรับค่าความต้านทานวงจรสมมูลของสายอากาศ

ทำการปรับค่าความต้านทาน(R) ให้มากขึ้นจาก 147.53  $\Omega$  เป็น 200  $\Omega$  ผลการจำลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าความต้านทานมากขึ้น

ทำการปรับค่าความต้านทาน(R) ให้น้อยลงจาก  $147.53\ \Omega$  เป็น  $100\ \Omega$  ผลการจำลองเป็นดังนี้

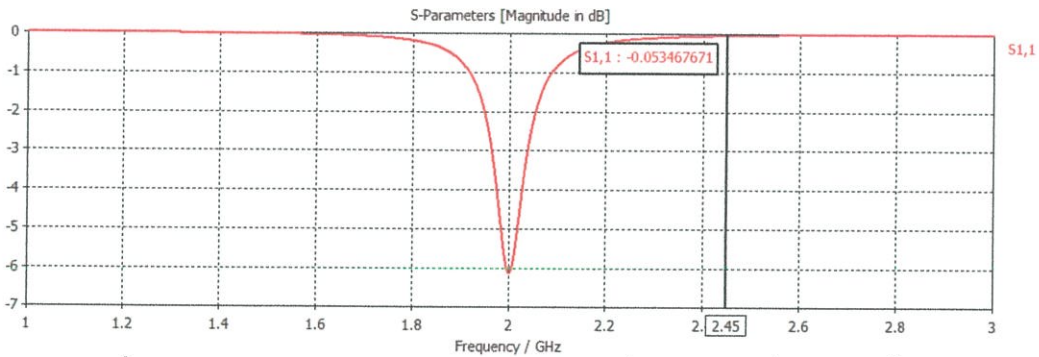


รูปที่ 4.13 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าความต้านทานน้อยลง

จากการปรับค่าความต้านทานเปรียบเสมือนการปรับความยาวของสายอากาศ โดยการปรับค่าความต้านทานมากขึ้นหรือน้อยลงจะไม่ส่งผลใดๆต่อความถี่ แต่จะมีผลกับความแอมพลิจูดของสายอากาศ

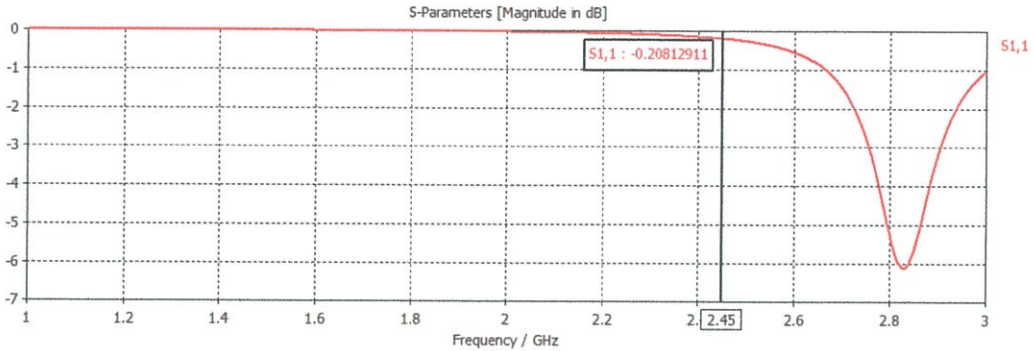
#### 4.2.2 ปรับค่าความเหนี่ยวนำวงจรสมมูลของสายอากาศ

ทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำ(L) ให้มากขึ้นจาก  $0.2\ \mu H$  เป็น  $0.3\ \mu H$  ผลการจำลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเหนี่ยวนำมากขึ้น

ทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำ(L) ให้น้อยลงจาก  $0.2 \mu H$  เป็น  $0.15 \mu H$  ผลการจำลองเป็นดังนี้

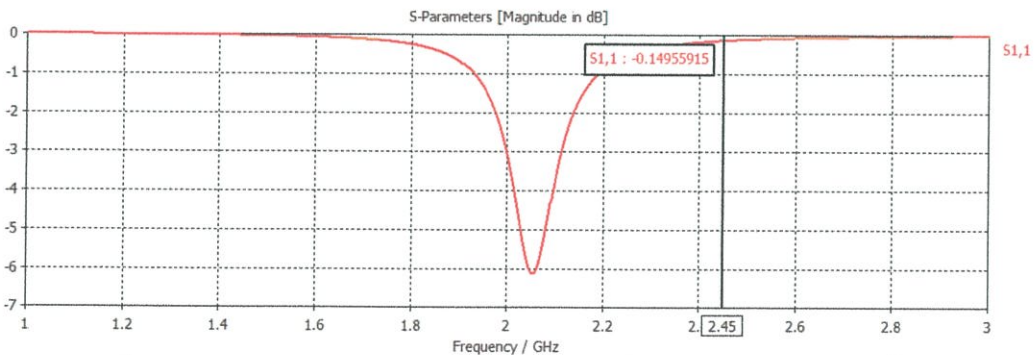


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเหนี่ยวนำน้อยลง

จากผลการจำลองการปรับค่าตัวความเหนี่ยวนำนั้นจะส่งผลกับความถี่และความกว้างของแถบคลื่นความถี่ เมื่อปรับค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นจะส่งผลให้กราฟจะเลื่อนความถี่ไปที่ความถี่ต่ำลงและความกว้างของแถบคลื่นความถี่มีขนาดแคบลงดังรูปที่ 4.14 เมื่อปรับค่าความเหนี่ยวนำน้อยลงจะส่งผลให้กราฟจะเลื่อนความถี่ไปที่ความถี่สูงขึ้นและความกว้างของแถบคลื่นความถี่มีขนาดกว้างขึ้นดังรูปที่ 4.15 ดังนั้นถ้าปรับค่าตัวความเหนี่ยวนำมากขึ้นจะส่งผลให้สายอากาศมีขนาดที่ยาวขึ้น ความถี่ต่ำลง และถ้าปรับค่าตัวความเหนี่ยวนำน้อยลงจะส่งผลให้สายอากาศมีขนาดที่สั้นลง ความถี่สูงขึ้น

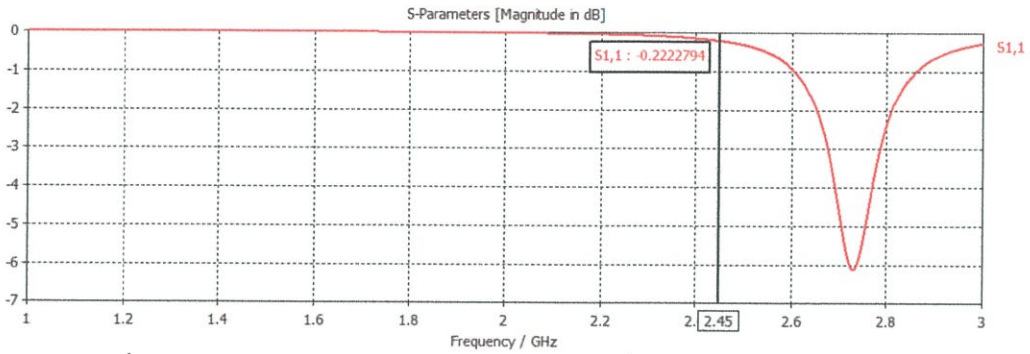
#### 4.2.3 ปรับค่าตัวเก็บประจุวงจรสมมูลของสายอากาศ

ทำการปรับค่าตัวเก็บประจุ(C) ให้มากขึ้นจาก  $0.02111 pF$  เป็น  $0.03 pF$  ผลการจำลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น

ทำการปรับค่าตัวเก็บประจุ(C) ให้น้อยลงจาก  $0.02111 \text{ pF}$  เป็น  $0.017 \text{ pF}$  ผลการจำลองเป็นดังนี้

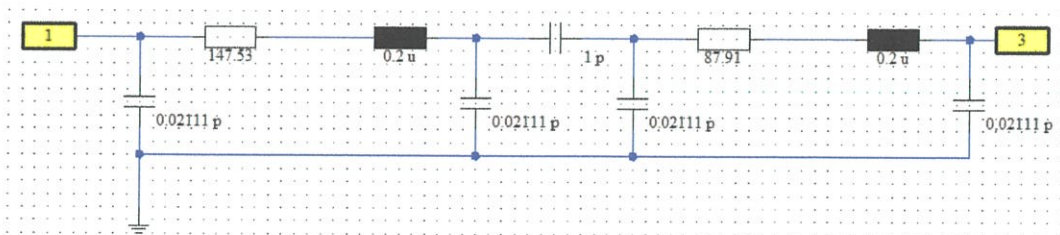


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองวงจรสมมูลของสายอากาศที่ปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง

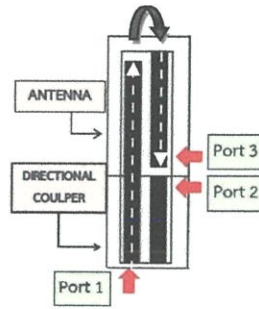
จากการจำลองพบว่า เมื่อเราปรับค่าตัวเก็บประจุจะส่งผลต่อความถี่เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลงกราฟจะเลื่อนความถี่ไปที่ความถี่ที่ต่ำลงดังรูปที่ 4.16 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลงกราฟจะเลื่อนไปความถี่ที่สูงขึ้นดังภาพ 4.17 ดังนั้นถ้าปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลงจะส่งผลให้สายอากาศมีขนาดที่ยาวขึ้น ความถี่ที่ต่ำลง และถ้าปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลงจะส่งผลให้สายอากาศมีขนาดที่สั้นลง ความถี่ที่สูงขึ้น

จำลองวงจรสมมูลของทั้งระบบโดยระบบมีการวัดแบบ 2 กรณี คือการวัดแรงดันที่พอร์ท 3 และ การวัดแรงดันที่พอร์ท 2

#### 4.2.4 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ



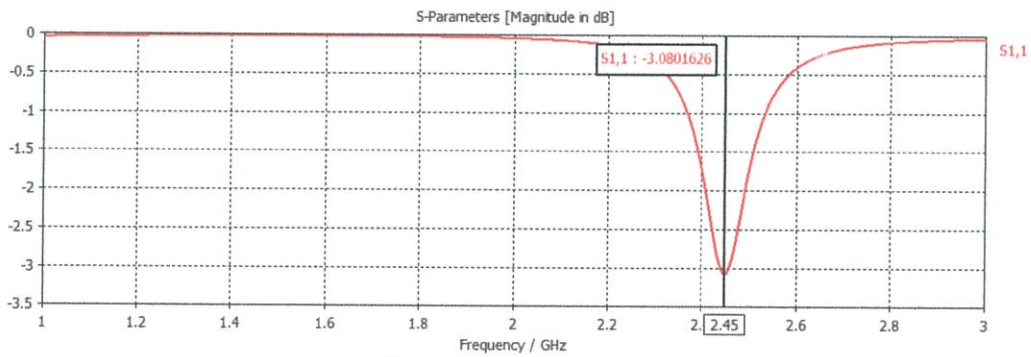
รูปที่ 4.18 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ



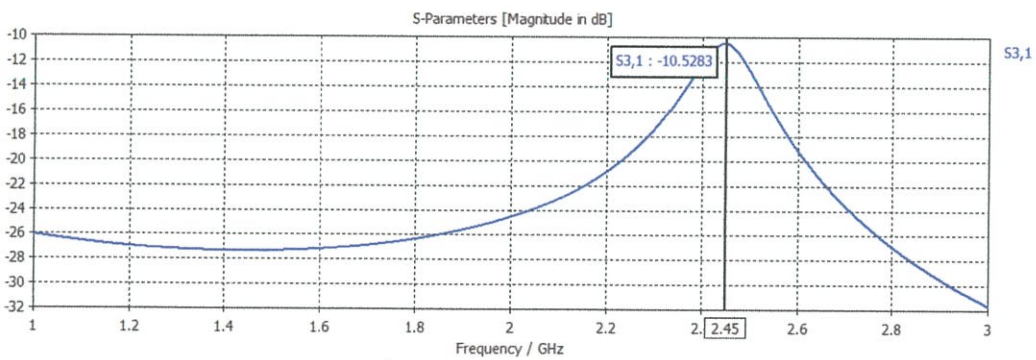
รูปที่ 4.19 แบบจำลองอุปกรณ์การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.19 แบบจำลองอุปกรณ์การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศนั้นสามารถวาดเป็นวงจรสมมูลได้เป็นรูปที่ 4.18 โดยรูปที่ 4.18เป็นวงจรสมมูลที่วัดแรงดันที่พอร์ท 3 ของอุปกรณ์

ผลการจำลองของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศเป็นดังนี้



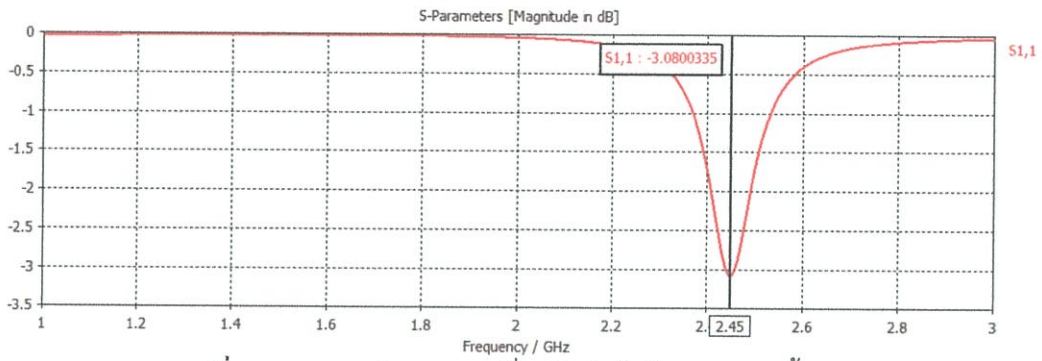
รูปที่ 4.20 ผลการจำลอง S11



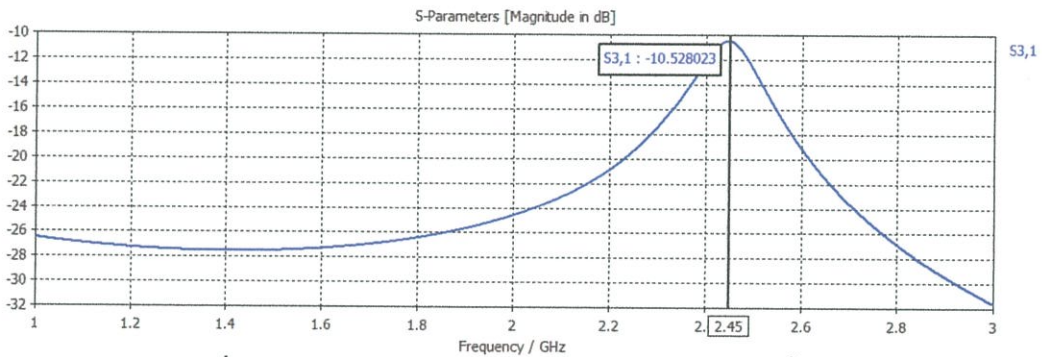
รูปที่ 4.21 ผลการจำลอง S31

#### 4.2.4.1 ปรับค่าความจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ 2 ตัว) ของการเชื่อมต่อร่วม

ทำการปรับค่าตัวเก็บประจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ 2 ตัว) ให้มากขึ้นจาก  $1\text{ pF}$  เป็น  $1\text{ }\mu\text{F}$  ผลการจำลองเป็นดังนี้

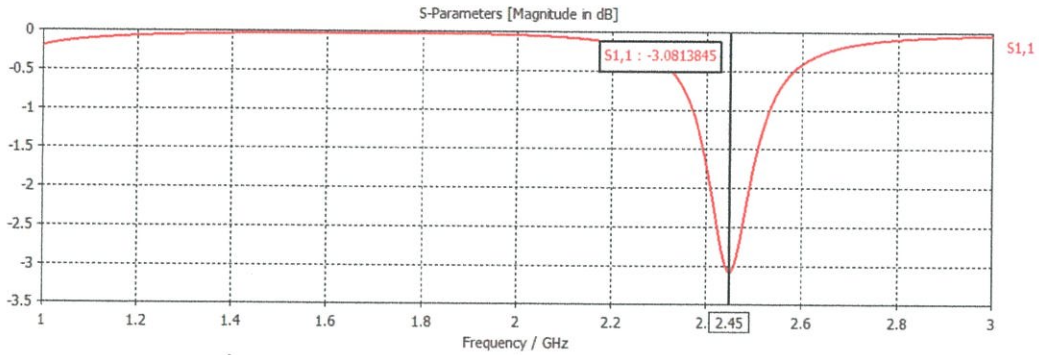


รูปที่ 4.22 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น

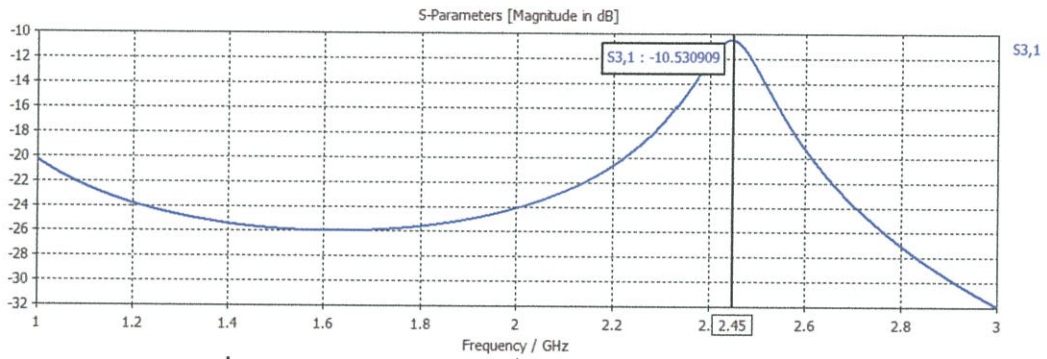


รูปที่ 4.23 ผลการจำลอง S31 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น

ทำการปรับค่าตัวเก็บประจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ 2 ตัว) ให้น้อยลงจาก  $1\text{ pF}$  เป็น  $0.1\text{ pF}$  ผลการจำลองเป็นดังนี้



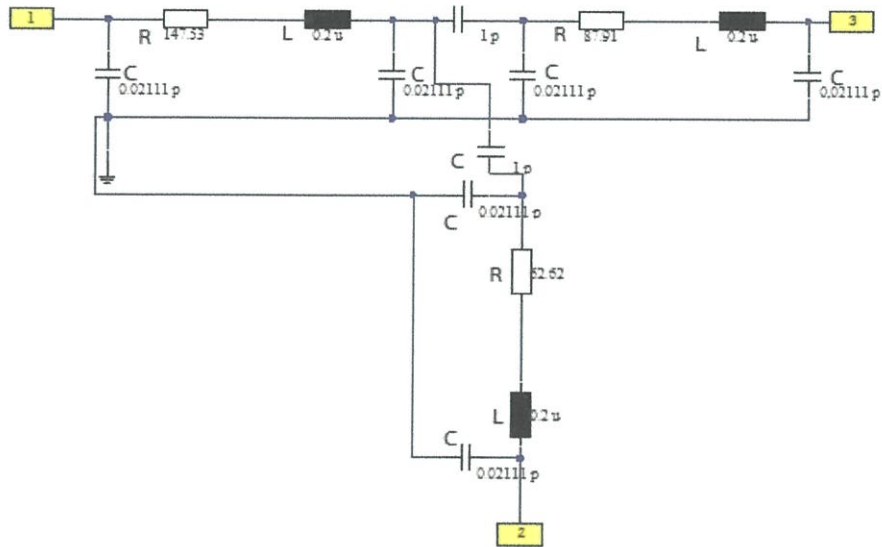
รูปที่ 4.24 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง



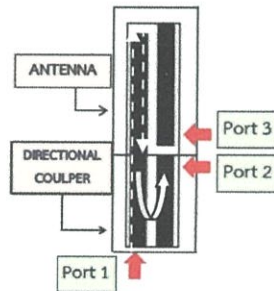
รูปที่ 4.25 ผลการจำลอง S31 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง

ในการปรับค่าตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างพอร์ท 1 และพอร์ท 3 นั้นจะไม่ส่งผลต่อสายอากาศ

#### 4.2.5 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ



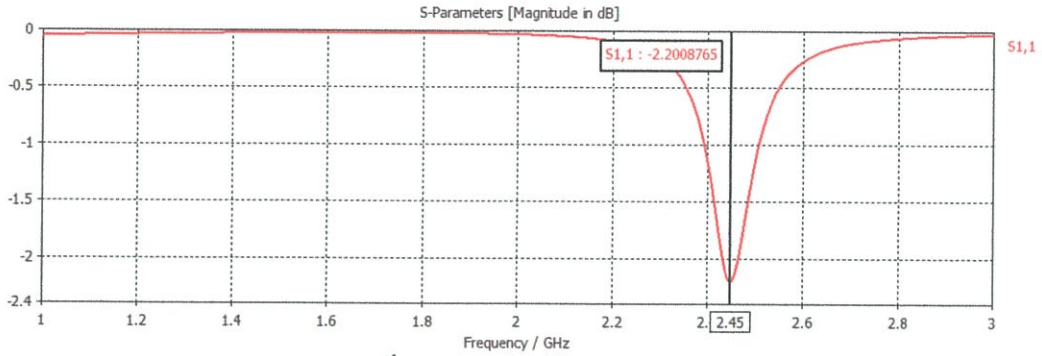
รูปที่ 4.26 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ



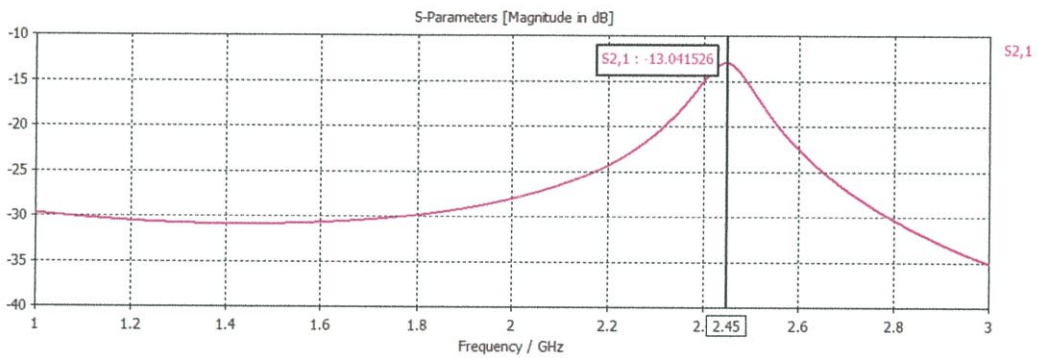
รูปที่ 4.27 แบบจำลองอุปกรณ์การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.27 คือแบบจำลองอุปกรณ์การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ สามารถวาดเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.26 และรูปนั้นคือการแสดงการวัดแรงดันที่พอร์ท 2

ผลการจำลองของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ



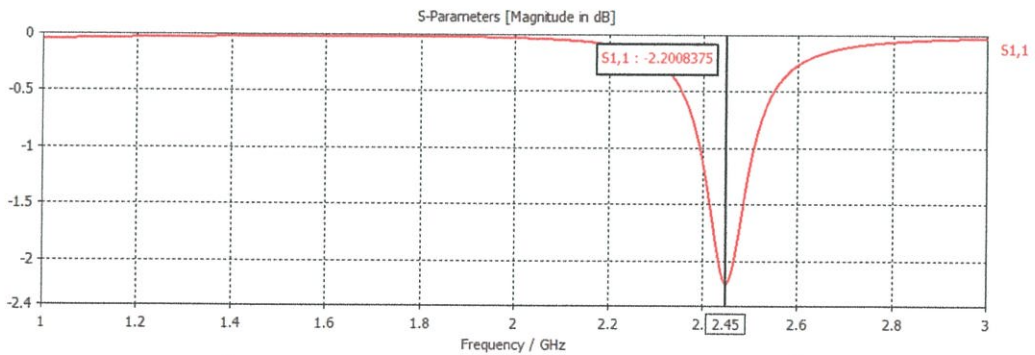
รูปที่ 4.28 ผลการจำลอง S11



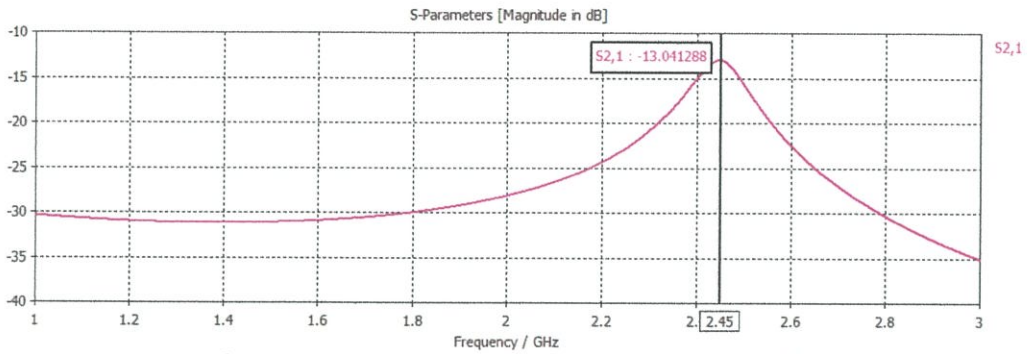
รูปที่ 4.29 ผลการจำลอง S21

4.2.5.1 ปรับค่าความจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ port 1 กับ port 3)  
ของการเชื่อมต่อร่วม

ทำการปรับค่าตัวเก็บประจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ port 1 กับ port 3) ให้มากขึ้นจาก  $1\text{ pF}$  เป็น  $1\text{ }\mu\text{F}$  ผลการจำลองเป็นดังนี้

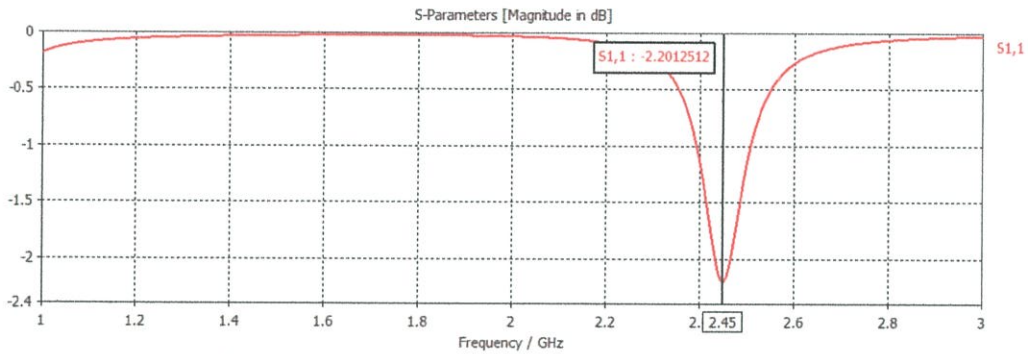


รูปที่ 4.30 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น

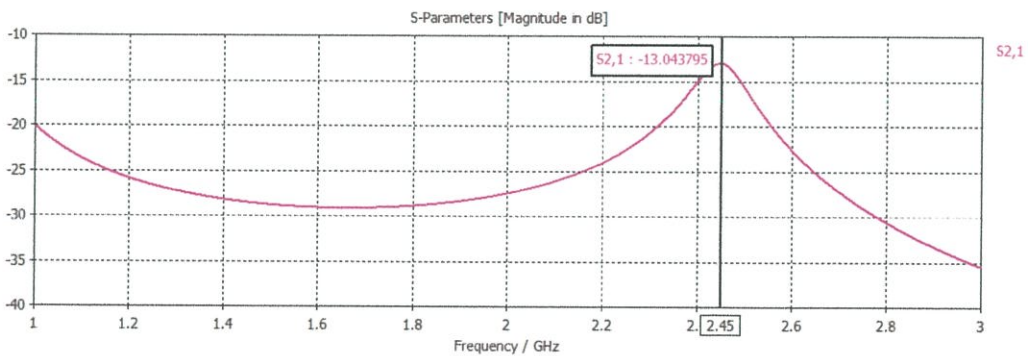


รูปที่ 4.31 ผลการจำลอง S21 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุมากขึ้น

ทำการปรับค่าตัวเก็บประจุ (เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ port 1 กับ port 3) ให้น้อยลงจาก  $1\text{ pF}$  เป็น  $0.1\text{ pF}$  ผลการจำลองเป็นดังนี้



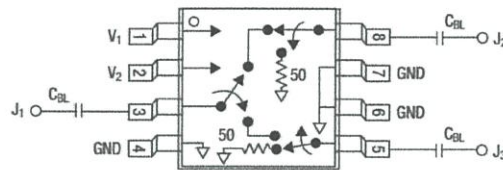
รูปที่ 4.32 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง



รูปที่ 4.33 ผลการจำลอง S21 เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุน้อยลง

ในการปรับค่าตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างพอร์ท 1 และพอร์ท 2 นั้นจะไม่ส่งผลต่อสายอากาศ การปรับค่าความยาวของสายอากาศนั้นสามารถเปรียบเทียบได้กับการปรับวงจรสมมูล โดยเสมือนปรับค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุของสายอากาศ ถ้าความยาวมากค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะมีค่าน้อยทำให้ความถี่ต่ำ ถ้าความยาวสายอากาศสั้นค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่ามากทำให้ความถี่สูง

### 4.3 ผลการทดสอบสวิตช์ความถี่วิทยุ



รูปที่ 4.34 ขาของวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุ

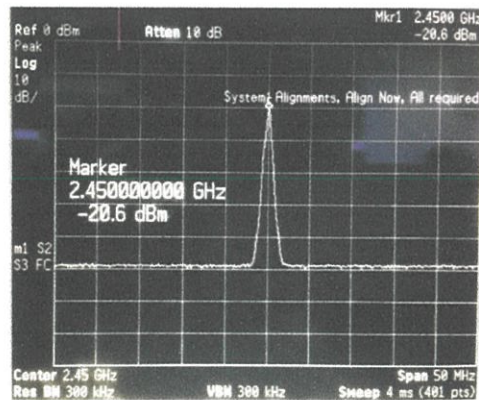
กรณีที่ 1 ผลการทดลองวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับสัญญาณ

ป้อนสัญญาณ ความถี่เข้าที่ขา 3 : 0 dBm

ป้อนไฟขา 1 : 0 V

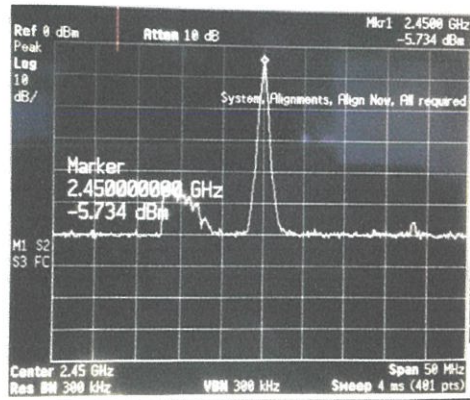
ป้อนไฟขา 2 : 5 V

วัดสัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5 ได้ -20.6 dBm



รูปที่ 4.35 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5

วัดสัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5 ได้ -5.73 dBm



รูปที่ 4.36 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 8

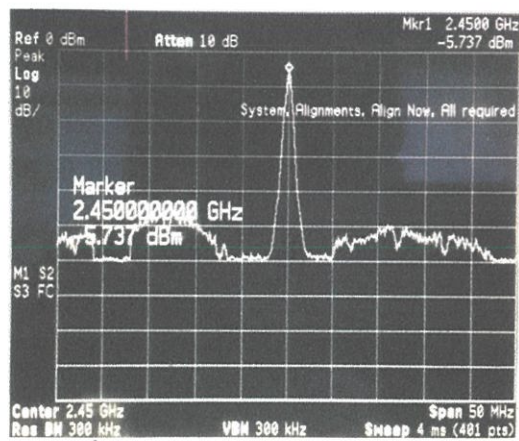
กรณีที่ 2 ผลการทดลองวงจรสวิตซ์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับสัญญาณ

ป้อนสัญญาณ ความถี่เข้าที่ขา 3 : 0 dBm

ป้อนไฟขา 1 : 5 V

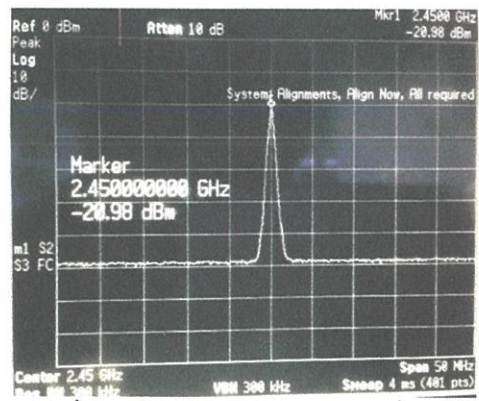
ป้อนไฟขา 2 : 0 V

วัดสัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5 ได้ -5.73 dBm



รูปที่ 4.37 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 5

วัดสัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 8 ได้ -20.98 dBm



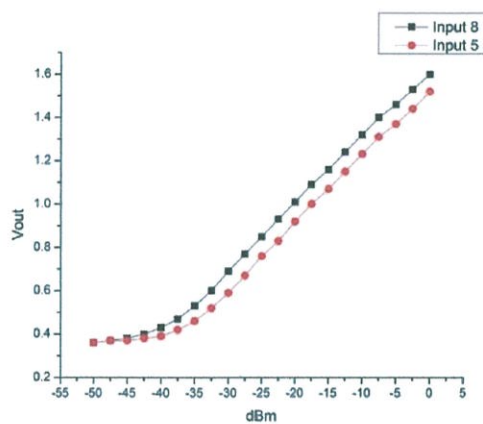
รูปที่ 4.38 สัญญาณจากสเปกตรัมที่ขา 8

#### 4.4 ผลการทดสอบวงจรความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับสัญญาณ

ผลการทดลองวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับสัญญาณ

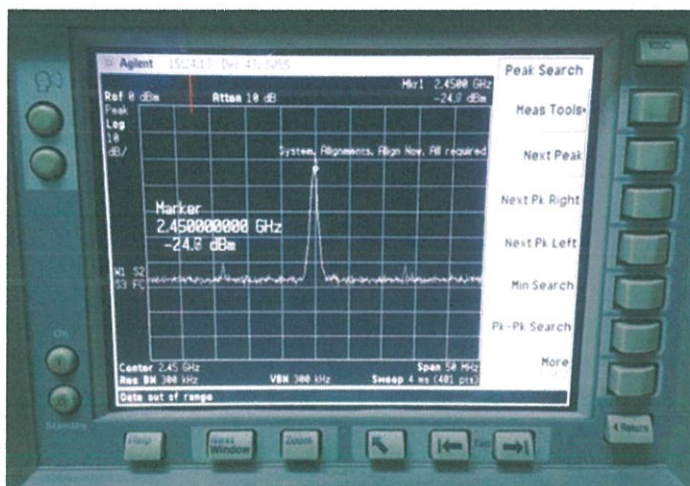
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับ

dB	ค่าที่วัดได้		dB	ค่าที่วัดได้	
	Input 8	Input 5		Input 8	Input 5
0	1.6	1.52	-32.5	0.6	0.52
-2.5	1.53	1.44	-35	0.53	0.46
-5	1.46	1.37	-37.5	0.47	0.42
-7.5	1.4	1.31	-40	0.43	0.39
-10	1.32	1.23	-42.5	0.4	0.38
-12.5	1.24	1.15	-45	0.38	0.37
-15	1.16	1.07	-47.5	0.37	0.37
-17.5	1.09	1.00	-50	0.36	0.36
-20	1.01	0.92			
-22.5	0.93	0.83			
-25	0.85	0.76			
-27.5	0.77	0.67			
-30	0.69	0.59			



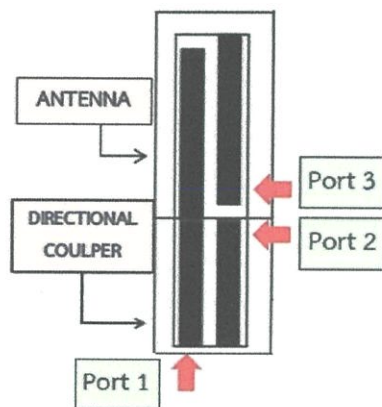
รูปที่ 4.39 กราฟผลการทดลองวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุและวงจรตรวจจับ

#### 4.5 ผลการทดสอบวงจรส่วนกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 4.40 รูปสัญญาณจากสเปกตรัมในส่วนกำเนิดสัญญาณ

การทดสอบการวัดค่าความถี่ในดินเรากำหนดพอร์ทการวัดออกเป็น 3 พอร์ทด้วยกัน คือ พอร์ทที่ 1 จะเป็นพอร์ทที่ส่งสัญญาณ การวัดค่าจะมีด้วยกัน 2 กรณี คือค่าแรงดันที่ออกจากพอร์ท 2 และ พอร์ท 3 โดยการกำหนดพอร์ทจะเป็นดังนี้



รูปที่ 4.41 การกำหนดพอร์ตของอุปกรณ์

การเก็บผลการทดลองนั้นเราจะแบ่งการวัดออกเป็นหลายๆกรณี เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าในดินที่มีความเปียกที่แตกต่างกัน โดยเราจะแบ่งการวัดออกเป็นดังนี้

- 1.) วัดในดินที่แห้งปกติ
- 2.) ดินที่ผสมน้ำ 250 mL
- 3.) ดินที่ผสมน้ำ 500 mL
- 4.) ดินที่ผสมน้ำ 750 mL
- 5.) ดินที่ผสมน้ำ 1,000 ML

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดในดินแห้งปกติ

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดในดินแห้งปกติ

ครั้งที่	Port2	Port3	ครั้งที่	Port2	Port3
1	0.846	0.875	11	0.849	0.861
2	0.843	0.878	12	0.836	0.871
3	0.865	0.872	13	0.84	0.87
4	0.839	0.859	14	0.841	0.858
5	0.835	0.862	15	0.836	0.864
6	0.837	0.873	16	0.834	0.845
7	0.843	0.856	17	0.838	0.854
8	0.82	0.872	18	0.851	0.855
9	0.826	0.882	19	0.836	0.872
10	0.83	0.878	20	0.828	0.868

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดในดินที่ผสมน้ำ 250 mL

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 250 mL

ครั้งที่	Port2	Port3	ครั้งที่	Port2	Port3
1	0.82	0.868	11	0.797	0.832
2	0.801	0.836	12	0.796	0.839
3	0.828	0.858	13	0.818	0.845
4	0.814	0.866	14	0.82	0.868
5	0.806	0.854	15	0.83	0.848
6	0.798	0.868	16	0.829	0.834
7	0.835	0.846	17	0.83	0.858
8	0.8	0.845	18	0.832	0.857
9	0.811	0.845	19	0.817	0.836
10	0.832	0.885	20	0.832	0.868

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดในดินที่ผสมน้ำ 500 mL

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 500 mL

ครั้งที่	Port2	Port3	ครั้งที่	Port2	Port3
1	0.804	0.856	11	0.778	0.847
2	0.792	0.863	12	0.778	0.847
3	0.791	0.856	13	0.793	0.855
4	0.761	0.861	14	0.794	0.862
5	0.79	0.858	15	0.76	0.869
6	0.807	0.865	16	0.794	0.86
7	0.791	0.847	17	0.789	0.855
8	0.783	0.836	18	0.77	0.874
9	0.799	0.861	19	0.773	0.86
10	0.8	0.835	20	0.787	0.866

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดในดินที่ผสมน้ำ 750 mL

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 750 mL

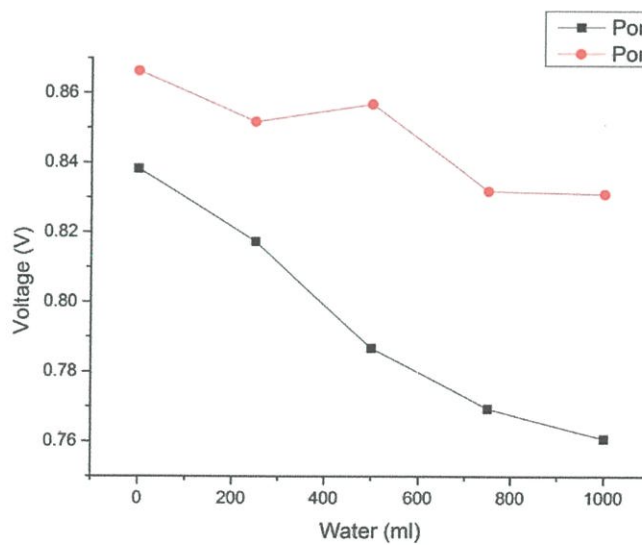
ครั้งที่	Port2	Port3	ครั้งที่	Port2	Port3
1	0.78	0.856	11	0.761	0.825
2	0.764	0.863	12	0.763	0.833
3	0.768	0.856	13	0.753	0.842
4	0.789	0.861	14	0.753	0.844
5	0.771	0.858	15	0.771	0.813
6	0.771	0.865	16	0.773	0.82
7	0.789	0.847	17	0.752	0.828
8	0.769	0.836	18	0.797	0.812
9	0.755	0.861	19	0.782	0.825
10	0.772	0.835	20	0.759	0.85

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดในดินที่ผสมน้ำ 1,000 mL

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดในดินที่ผสมน้ำ 1,000 mL

ครั้งที่	Port2	Port3	ครั้งที่	Port2	Port3
1	0.769	0.859	11	0.752	0.82
2	0.773	0.844	12	0.746	0.8
3	0.761	0.82	13	0.776	0.802
4	0.767	0.84	14	0.774	0.829
5	0.773	0.867	15	0.751	0.827
6	0.748	0.841	16	0.747	0.806
7	0.756	0.836	17	0.756	0.841
8	0.75	0.817	18	0.776	0.844
9	0.758	0.851	19	0.764	0.8
10	0.756	0.854	20	0.762	0.822

นำผลการทดลองทั้งหมดในแต่ละกรณีมาหาค่าเฉลี่ยและพอร์ตกราฟค่าที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 4.42 กราฟค่าเฉลี่ยแรงดันของแต่ละกรณี

#### 4.6 ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความชื้นของดิน

นำตัวอย่างดินที่ทำการทดลอง มาหาค่าความชื้นโดยวิธีมาตรฐานเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวเซ็นเซอร์วัดความชื้นโดยวิธีการหาค่าความชื้นเป็นดังนี้

##### 4.6.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำความสะอาดกระป๋องตัวอย่างดิน ตรวจสอบเบอร์กระป๋อง ชั่งน้ำหนักกระป๋อง (W1)

2. ตรวจสอบสภาพตัวอย่างดิน เลือกตัวอย่างดินที่เป็นตัวอย่างดินคงสภาพ

3. บรรจุตัวอย่างดินลงในกระป๋อง และปิดฝา

4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินเปียกรวมกระป๋อง (W2)

5. นำกระป๋องตัวอย่างเข้าไปในตู้อบ กระป๋องที่มีฝาปิด ควรเปิดฝาทิ้งไว้ได้ฝากระป๋อง

6. หลังอบตัวอย่างดินไว้ข้ามคืน เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง นำกระป๋องตัวอย่างดินออกจากตู้อบ แล้วปิดฝากะป๋องนำตัวอย่างกระป๋องตัวอย่าง ไปใส่ไว้ในอ่างแก้วดูดความชื้น ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

7. นำกระป๋องตัวอย่างที่เย็นแล้วชั่งชั่ง เป็นน้ำหนักตัวอย่างดินแห้งรวมกระป๋อง (W3) จดบันทึกน้ำหนักของแต่ละกระป๋อง

8. จากนั้นคำนวณตามสูตรที่ (4.1) เพื่อหาความชื้นของดิน

##### 4.6.2 ขั้นตอนการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ความชื้นของดิน} = W(\% \text{ db}) &= \frac{W_w}{W_s} \times 100 \\ &= \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \end{aligned} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $W_w$  = น้ำหนักในดิน (กรัม)

$W_s$  = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

$W_1$  = น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักตัวอย่างดินตัวอย่าง + กระป๋อง (กรัม)


$W_3$  = น้ำหนักตัวอย่างดินหลังอบ + กระป๋อง (กรัม)

ผลการคำนวณและผลการทดลองจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดความชื้นเป็นดังตาราง 4.8

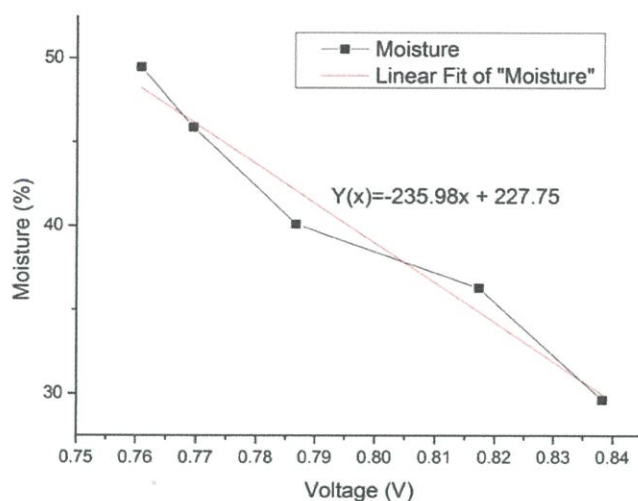
ตาราง 4.8 ผลการเก็บค่าวัดความชื้นในดิน

ผลการทดลอง

สภาพดิน	กระป๋อง	น้ำหนักกระป๋อง	น้ำหนักกระป๋อง+ดินเปียก	น้ำหนักกระป๋อง+ดินแห้ง	น้ำหนักโมดิน	น้ำหนักดินแห้ง	เปอร์เซ็นต์ (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ได้จาก Sensor	ความชื้น (%db)	ค่าความชื้นเฉลี่ยจาก Sensor	ค่า Error (%)
ดินปกติ	1	14.958	50.407	42.349	8.058	27.391	29.418	29	29.63 ± 0.15	30.75 ± 1.7	1.12
	2	14.989	49.771	41.798	7.973	26.809	29.740	31			
	3	14.927	54.296	45.267	9.029	30.34	29.759	33			
	4	14.583	49.537	41.549	7.988	26.966	29.622	30			
เติมน้ำ 200 ml	5	18.046	54.903	45.284	9.619	27.238	35.314	33	36.28 ± 0.77	35.75 ± 2.63	0.53
	6	15.381	54.962	44.467	10.495	29.086	36.082	34			
	7	16.03	50.798	41.383	9.415	25.353	37.135	38			
	8	15.739	52.47	42.627	9.843	26.888	36.607	38			
เติมน้ำ 500 ml	9	14.996	57.23	44.952	12.278	29.956	40.987	39	40.08 ± 0.96	42 ± 2.16	1.92
	10	15.707	55.315	44.126	11.189	28.419	39.371	43			
	11	15.736	58.537	46.123	12.414	30.387	40.853	44			
	12	15.448	58.201	46.174	12.027	30.726	39.142	42			
เติมน้ำ 750 ml	13	15.305	59.027	45.106	13.921	29.801	46.713	42	45.87 ± 0.56	44.75 ± 2.21	1.12
	14	15.439	70.374	53.178	17.196	37.739	45.565	44			
	15	15.929	63.821	48.818	15.003	32.889	45.617	47			
	16	14.498	69.309	52.147	17.162	37.649	45.584	46			
เติมน้ำ 1,000 ml	17	15.577	72.314	53.791	18.523	38.214	48.471	46	49.46 ± 1.21	47.25 ± 2.21	2.21
	18	15.178	75.344	55.723	19.621	40.545	48.393	45			
	19	16.084	77.497	56.81	20.687	40.726	50.795	50			
	20	15.73	72.242	53.353	18.889	37.623	50.205	48			

 ( รศ.ดร.ปานเนต สิริสมบูรณ์ )  
อาจารย์ควบคุมการทดลอง

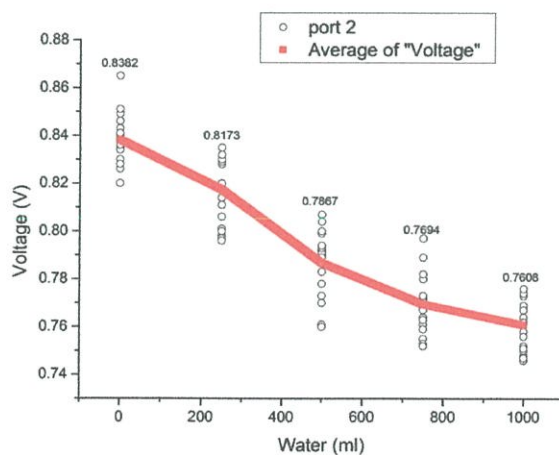
จากตารางข้างต้นนั้นแสดงถึงค่าความชื้นที่วัดจากวิธีสากลและค่าความชื้นจากอุปกรณ์โดยผลที่วัดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันและตารางนั้นแสดงบอกค่าความผิดพลาดระหว่างวิธีวัดความชื้นสากลและจากอุปกรณ์ โดยค่าความผิดพลาดมากที่สุด คือ 2.21 เมื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากการทดลองมาตรฐานได้แล้วนำมาพอร์ตรกราฟเปรียบเทียบความชื้นในดินและแรงดันที่วัดได้เป็นดังนี้



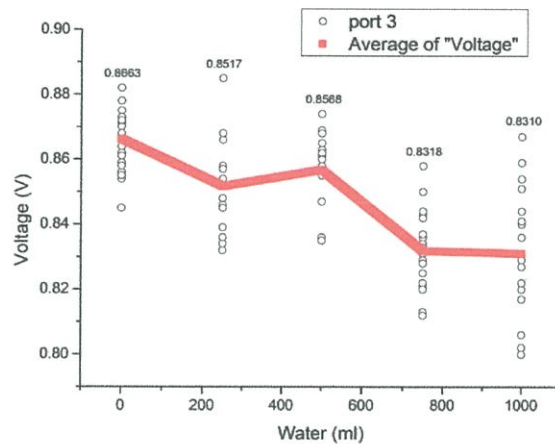
รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบความชื้นในดินกับแรงดัน

### วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองนี้นักศึกษามีการวัดค่าในกรณีต่างๆโดยจะมีการวัดออกเป็นสองแบบ คือ ค่าแรงดันที่พอร์ท 2 และ ค่าแรงดันที่พอร์ท 3 ในการวัดแต่ละแบบจะใช้วงจรสวิตช์ความถี่วิทยุเป็นตัวเลือกจะทำให้วัดค่าที่พอร์ท 2 หรือ พอร์ท 3 การวัดแต่ละแบบจะเป็นออกเป็นหลายๆกรณีดังนี้ วัดในดินแห้ง วัดในดินที่ผสมน้ำ 250 mL วัดในดินที่ผสมน้ำ 500 mL วัดในดินที่ผสมน้ำ 750 mL และ วัดในดินที่ผสมน้ำ 1,00 mL จากหลายๆกรณีได้ผลการทดลองเป็นกราฟดังนี้



รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันที่พอร์ท 2 กับดิน 5 ประเภท



รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันที่พอร์ท 3 กับดิน 5 ประเภท

จากผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ออกจากพอร์ท 2 นั้นเราสามารถแยกแยะความแตกต่างของดินได้ดีกว่าการวัดแรงดันที่ออกจากพอร์ท 3 ค่าที่พอร์ท 2 หากเป็นดินแห้งปกติจะมีค่าแรงดันสูงกว่า แบบดินที่ผสมน้ำ 250 mL 500 mL 750 mL และ 1,000 mL ตามลำดับ ถ้าหากเราผสมน้ำมากขึ้น ค่าแรงดันที่วัดได้จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ค่าแรงดันนี้จะเป็นตัวบ่งบอกความแตกต่างของดิน ค่าการวัดแรงดันที่พอร์ท 3 ค่าแรงดันจะมีความกว้างไม่เกาะกลุ่มจึงไม่เหมาะกับการนำมาคิดหาค่าความชื้นในดินจึงไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของดินได้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ในโครงการนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์เครื่องวัดความชื้นในดินโดยการประยุกต์ใช้งานสายอากาศร่วมกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ความถี่ 2,450 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยในส่วนของภาคเรียนที่ 1 นักศึกษาได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้งาน ได้แก่ คัปเปิลอร์แบบมีทิศทางเชื่อมต่อกับสายอากาศโมโนโพลโดยมีสวิตช์ความถี่วิทยุ วงจรตรวจจับสัญญาณมาเป็นตัวช่วยในการวัด จากนั้นนำอุปกรณ์ที่ได้ทำมาต่อยอดในภาคเรียนที่ 2 จากการวางแผนการทำงาน นักศึกษาได้สร้างส่วนกำเนิดสัญญาณและวงจรควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาช่วยในการทำงานของระบบ โดยอุปกรณ์ที่นักศึกษาได้สร้างนั้นมีขนาดกะทัดรัดและทำงานได้ การทดลองที่ลองลงทำโดยแบ่งเป็นกรณีออกเป็น 5 กรณี ที่สภาพดินแตกต่างกันออกไป ดินแห้งปกติ ดินที่ผสมน้ำ 250 mL ดินที่ผสมน้ำ 500 mL ดินที่ผสมน้ำ 750 mL และดินที่ผสมน้ำ 1,000 mL ในการทดลองอุปกรณ์มีสายอากาศ วางคู่ขนานกัน 2 ตัว สายอากาศตัวที่หนึ่งจะเชื่อมต่อติดกับคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง และสายอากาศตัวที่สองจะเว้นระหว่างสายอากาศและคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางจะคั่นกลางด้วยวงจรสวิตช์ความถี่วิทยุ ซึ่งจะเป็นตัวสวิตช์เลือกว่าจะให้สายอากาศตัวที่สองทำงานหรือคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางทำงาน ส่วนกำเนิดสัญญาณจะปล่อยสัญญาณให้อุปกรณ์ทำงาน โดยแบ่งการวัดค่าออกเป็น 2 แบบ คือ การวัดสัญญาณออกที่พอร์ท 2 และการวัดสัญญาณออกที่พอร์ท 3 ซึ่งผลที่ได้นั้นจะปรากฏบนหน้าจอที่กล่องควบคุม ค่าที่ออกมาจะแสดงผลเป็นแรงดัน และเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดิน ซึ่งในบทที่ 4 จากผลการเปรียบเทียบการวัดแบบข้างต้นเราสามารถบ่งบอกได้ว่าการวัดค่าสัญญาณออกที่พอร์ท 2 จะสามารถแยกแยะความแตกต่างของดินได้ดีกว่าการวัดค่าสัญญาณออกที่พอร์ท 3 และ ถ้าเป็นดินแห้งปกติจะค่าแรงดันที่ออกมาจะมีค่าสูงกว่า แบบดินที่ผสมน้ำ 250 mL, 500 mL, 750 mL, 1000mL ตามลำดับ ถ้าผสมน้ำมากขึ้น ค่าแรงดัน ที่วัดได้จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ค่าแรงดันจะเป็นตัวบ่งบอกความแตกต่างของดิน การวัดค่าที่พอร์ท 3 ค่าที่วัดได้จะไม่ค่อยเสถียรและแกว่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่พอร์ท 2 จะเห็นได้ว่าการวัดด้วยวิธีนี้จะสามารถแบ่งแยกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำทดลองผู้ทดลองไม่ควรกดอุปกรณ์ลงดินแรงเพื่อป้องกันการเสียหาย และการใส่อุปกรณ์ลงในดินควรใส่ให้ได้ถึงขีดที่ระบุไว้เพื่อทำการวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้งานอย่างระมัดระวังในกรณีวัดดินเปียกแล้วมาวัดในดินแห้งกรณีการอัสกครู่ เนื่องจากอุปกรณ์อาจจะมิดินที่เปียกติดกับแท่งอุปกรณ์อยู่ให้น้ำดินที่ติดออกก่อนและเช็ดให้แห้ง จากนั้นจึงค่อยทำการทดลองวัดค่าต่อไป การผสมน้ำกับดินควรจะผสมน้ำกับดินให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อการวัดให้ได้มีประสิทธิภาพ

## บรรณานุกรม

- [1] นายศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์. “การศึกษาและออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์แบบคัปเปิลสำหรับระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.
- [2] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. United States of America : John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Abdullah Eroglu & Jay Kyoon Lee. “The Complete Design of Microstrip Directional Couplers Using the Synthesis Technique.” <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4550742&tag=1>
- [4] V.V.Tikhonov. “Dielectric model of bound water in wet soils for microwave remote sensing” <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=606366&queryText%3DDielectric+model+of+bound+water+in+wet+soils+for+microwave+remote+sensing>
- [5] นิพนธ์ ทางทอง. “สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [6] นายธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ. “การหาคุนสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่มีโพลาริเซชันแบบตั้งฉากและแบบขนาน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [7] รศ.ดร.จิรัสสา โกษียาภรณ์. “วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ Engineering Electronic”. พิมพ์ครั้งที่ 1. วศ.สจล.
- [8] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. “การทดลองหาปริมาณความชื้นในดิน” [http://sisley.en.kku.ac.th/project/2011/COE201121/DATA%20FILE/lab%201%20Water\\_Content.pdf](http://sisley.en.kku.ac.th/project/2011/COE201121/DATA%20FILE/lab%201%20Water_Content.pdf)

ภาคผนวก ก  
คู่มือการใช้อุปกรณ์วัดความชื้น

## วิธีการใช้อุปกรณ์วัดความชื้น

- 1.เตรียมดินที่ต้องการวัด
- 2.เปิดอุปกรณ์ เลื่อนปุ่มสวิตช์ไปด้านขวา
- 3.อุปกรณ์จะมีสวิตช์ สีขาวและสีเหลือง
- 4.กดสวิตช์สีขาวครั้งที่ 1 เป็นการวัดสัญญาณที่พอร์ท 3
- 5.กดสวิตช์สีขาวครั้งที่ 2 เป็นการวัดสัญญาณที่พอร์ท 2
- 6.กดสวิตช์สีขาวครั้งที่ 3 เป็นค่าความชื้นเปอร์เซ็นต์
- 7.สวิตช์สีเหลืองคือปุ่มรีเซ็ต
- 8.ควรจุ่มด้ามอุปกรณ์จนถึงขีดที่กำหนด

ภาคผนวก ข  
ชุดคำสั่ง

' {\$STAMP BS2sx}

' {\$PBASIC 2.5}

\*\*\*\*\*

'Purpose : Show '%MOISTURE SENSOR' on SLCD

'Hardware : Connect SLCD at PO, DAT\_OUT from A/D at P8

\*\*\*\*\*

'Define Variable

SW\_VAR VAR Byte

'Define SW\_VAR as byte variable

Trans VAR Byte

'Define for storing measured data

Loss VAR Byte

'Define for storing measured data

AD\_VALUE VAR Word

' Define Word variable to keep A/D

Value

ANALOGV VAR Word

CONTROL VAR Nib

' Define Nibble variable to keep control

ADDT VAR Word

' Define 10-byte array

index VAR Nib

' Define normal nibble variable

bt VAR Byte(4)

SLCD\_DATA VAR Byte

' Define Byte variable to keep LCD data.

N VAR Byte

' Define Byte variable

checktrans VAR Word

checktrans1 VAR Word

checkloss VAR Word

checkloss1 VAR Word

moisture1 VAR Word

' Define I/O connection

SWITCH CON 0

'Connect SWITCH P0\_input!

SLCD CON 1

'Connect SLCD P1!

RED\_LED CON 3

'Connect RED\_LED P3!

ORANGE\_LED CON 4

'Connect ORANGE\_LED P4!

CLOCK CON 6

'Connect CLOCK\_PLL\_P5!

DATS CON 5

'Connect DATS\_PLL\_P6!

LATCH CON 7

'Connect LATCH\_PLL\_P7!

D\_IN CON 8

'Connect D\_IN\_A/D\_P10\_input!

```

CLK      CON 9           'Connect CLK_A/D_P9!
D_OUT    CON 10          'Connect D_out_A/D_P8!
CS       CON 12          'Connect CS_A/D_P12

' Define constant
'BAUD CON 240            '9600bps constant
CMD CON $FE             'SLCD command constant

' Define I/O port direction
DIRS = %1111111011111110

'=====
=====

Initialize:
LOW  RED_LED            'Off light
LOW  ORANGE_LED         'Off light
'// HIGH CS             ' Disable ADC chip
PAUSE 500               'Delay for SLCD initialize
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1] 'Clear SLCD screen
SEROUT SLCD,16624,5,[CMD,$80," Moisture Meter"] 'Show %MOISTURE
SENSOR message on 1st line
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%11000000] ' Set DDRAM to $40 (line 2)
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%00001111] ' Set Display on & cursor blink
PAUSE 100
SEROUT SLCD,16624,5,[" READY TO TEST?"] 'Show READY TO TEST? on
2nd line
DEBUG "LCD shown",CR
PAUSE 2000              'Delay 2 s

Main: BUTTON SWITCH,0,255,0,SW_VAR,1,TOG_REDLIGHT 'Wait for
switch is pressed
'//  DEBUG "No pressed for cross",CR
      IF SW_VAR<>1THEN
          SEROUT SLCD,16624,5,[CMD,$80," Moisture Meter"] 'Show
%MOISTURE SENSOR message on 1st line

```

```

SEROUT SLCD,16624,5,[" READY TO TEST?"] 'Show READY TO TEST?
on 2nd line
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%00001111] ' Set Display on & cursor
blink
ENDIF
GOTO Main
Main_1:
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1] 'Clear SLCD screen
GOSUB ControlPLL
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1," Port 3 "] ' Send message line 1
LP_Trans:
GOSUB detectVoltage

checktrans = addt
checktrans1 = addt*(%01)
DEBUG "output : ",SDEC checktrans1,CR
GOSUB showVoltToLCD
-----loss-measurement-----
Main_2:
BUTTON SWITCH,0,255,0,SW_VAR,1,TOG_ORANGELIGHT 'Wait for
switch is pressed
'// DEBUG "No pressed for co",CR
IF SW_VAR<>1THEN
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%00001111] ' Set Display on &
cursor blink
'PAUSE 250
ENDIF
GOTO Main_2
Main_2_2:
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1]
GOSUB ControlPLL
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1," Port 2 "] ' Send message line 1
LP_Loss:
GOSUB detectVoltage 'Clear SLCD screen

checkloss = addt

```

```

        checkloss1 = addt*(%101)
        DEBUG "output : ",DEC checkloss1,CR
        GOSUB showVoltToLCD
'-----MOISTURE CONTENT-----

        Main_3: BUTTON SWITCH,0,255,0,SW_VAR,1,TOG_BOTHLIGHT      'Wait
for switch is pressed
        '//          DEBUG "No pressed for moisture content",CR
                IF SW_VAR<>1THEN
                LOW Red_Led
                LOW orange_led
                'PAUSE 250
                ENDIF
                GOTO Main_3
Main_3_3:
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1]
SEROUT SLCD,16624,[CMD,1,"%Moisture Meter"] ' Send message line 1
ADDT = bt(1)-48
ADDT = ADDT*100
ADDT = ADDT+checkloss
ADDT = (24*ADDT)
ADDT = ADDT/100
ADDT = (230-ADDT)
moisture1 = ADDT
DEBUG " % = ",DEC moisture1,CR
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%11000000]      ' SET DDRAM to $40 (line 2)
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%00001111]      ' Set Display on & cursor
blink
                SEROUT SLCD,16624,[" % = ",DEC moisture1]      ' Send message line 2
send data slowly
                PAUSE 200
        END

```

\*\*\*\*\*

'Subroutine : Toggle light to show the status of switching polarization

\*\*\*\*\*

```
TOG_REDLIGHT:HIGH RED_LED           'ON light status
      LOW ORANGE_LED
      DEBUG "ligh on"
      GOTO Main_1                     'Jump to main
```

```
TOG_ORANGELIGHT:LOW RED_LED
      HIGH ORANGE_LED                'ON light status
      DEBUG "ligh on"
      GOTO Main_2_2                   'Jump to main
```

```
TOG_BOTHLIGHT: HIGH RED_LED
      HIGH ORANGE_LED                'ON light status
      DEBUG "ligh on"
      GOTO Main_3_3                   'Jump to main
```

\*\*\*\*\*

'-----[Control PLL]-----

ControlPLL:

'// OUTPUT 6 'P8 as an output pin. Used to TX register data for PLL.

'// OUTPUT 5 'P9 as an output pin. Used as a clock for transfer of register data for PLL.

'// OUTPUT 7 'P10 as an output pin. Used to control the load enable for PLL.

'//OUT7 = 0 'Start with "LE" LOW.

LOW LATCH

PAUSE 10

SHIFTOUT 5, 6, 1, [%0010111111011010\16,%00\2] 'Data to be sent to "RF N COUNTER" of PLL.

'PAUSE 5

PULSOUT LATCH,250

PAUSE 10

SHIFTOUT 5, 6, 1, [%0000010000011001\16,%01\2] 'Data to be sent to "RF R COUNTER" of PLL.

```

HIGH LATCH                                'Delay 1 s
PAUSE 500
RETURN
'-----['Dectector, control a/d]-----

detectVoltage:
DEBUG HOME
ADDT = 0
FOR index = 0 TO 7                        ' Repeat with index= 0, 1, 2...7
CONTROL=%1101                            ' Single-ended Ch.0, MSBFIRST
GOSUB READ_OUT                            ' Read out value
DEBUG "Value ",DEC index," = ",DEC4 AD_VALUE,CR
ADDT = AD_VALUE + ADDT                    ' Write index*13 to each cell of array
NEXT
ADDT = ADDT / 8                          ' average data

ANALOGV = (ADDT*5)/4095                   ' convert binary data to Voltage *****
DEBUG "Average data = ",DEC4 ADDT," ,Bin : ",BIN12 ADDT," ,Voltage :
",SDEC ANALOGV," V.",CR ' Debug Ch.0 Value
'----- convert to data voltage for show on LCD 4 digits -----
bt(0) = ADDT/1000
ADDT = ADDT - (bt(0)*1000)
bt(1) = ADDT/100
ADDT = ADDT - (bt(1)*100)
bt(2) = ADDT/10
bt(3) = ADDT - (bt(2)*10)
'// DEBUG "before convert to ASCII : ",DEC bt(0)," ",DEC bt(1)," ",DEC bt(2),"
",DEC bt(3),CR
bt(0) = bt(0) + $30 : bt(1) = bt(1) + $30 : bt(2) = bt(2) + $30 : bt(3) = bt(3) +
$30 :
'// DEBUG "After convert to ASCII : ",DEC bt(0)," ",DEC bt(1)," ",DEC bt(2),"
",DEC bt(3),CR
RETURN
'-----

```

READ\_OUT:

```
// OUTPUT D_OUT      ' Make P2 as output first
  LOW CS      ' Enable chip
  PAUSE 5
  SHIFTOUT D_OUT,CLK,1,[CONTROL\4] ' Send command
  SHIFTIM D_IN,CLK,2,[AD_VALUE\12] ' Received 12 bit data
  HIGH CS     ' Disable chip
  RETURN      ' Return
```

' Note: Baud constants are

' 2400BPS DI 1021 , INV 17405

' 9600BPS DI 240, INV 16624

showVoltToLCD:

```
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%11000000] ' Set DDRAM to $40 (line 2)
SEROUT SLCD,16624,[CMD,%00001100] ' Set Display on & cursor blink
SEROUT SLCD,16624,[" Voltage : ",bt(0),".",bt(1),bt(2),bt(3)] ' Send
```

message line 2 send data slowly

```
  PAUSE 200
```

```
  RETURN
```