

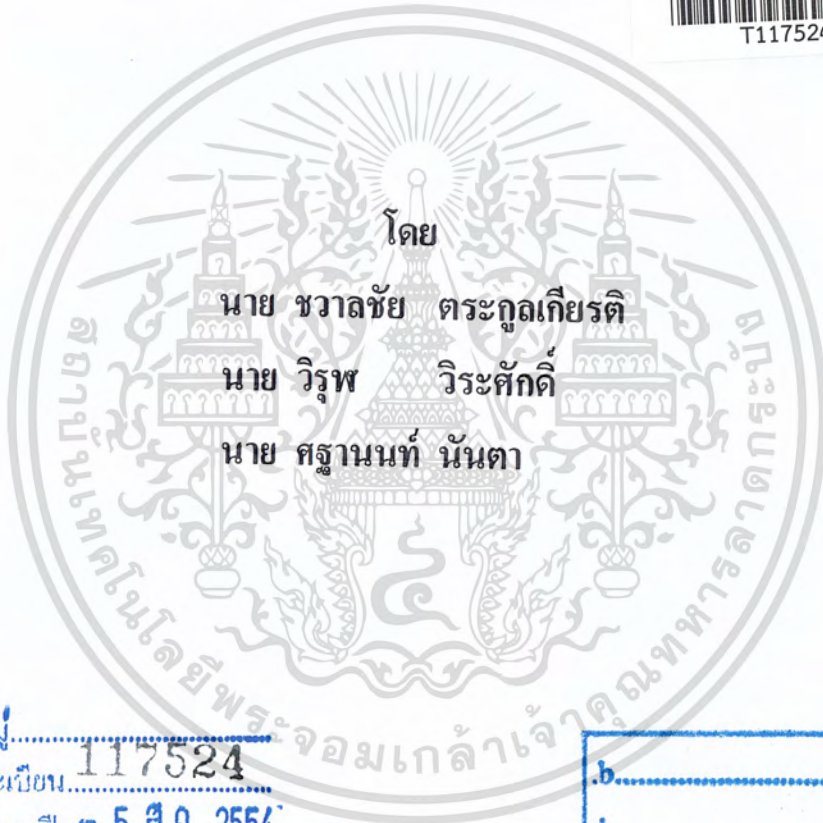
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องตรวจจับโลหะ สามารถระบุขนาดวัตถุได้

METAL DETECTOR WITH SIZE IDENTIFICATION CAPABILITY



T117524



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 117524

วัน,เดือน,ปี..... 5. 8. 2554

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตรวจจับโลหะ สามารถระบุขนาดวัตถุได้  
METAL DETECTOR WITH SIZE IDENTIFICATION CABILITY

โดย

นาย ขวาลชัย	ตระกูลเกียรติ	50010332
นาย วิรุฬ	วิระศักดิ์	50011484
นาย ศฐานนท์	นันทา	50011522

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ไม่ว่าวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องตรวจจับโลหะ สามารถระบุขนาดวัตถุได้

**METAL DETECTOR WITH SIZE IDENTIFICATION CAPABILITY**

ผู้จัดทำ

1. นาย ชวาลชัย ตระกูลเกียรติ 50010332
2. นาย วิรุฬ วิระศักดิ์ 50011484
3. นาย ศฐานนท์ นันตา 50011522

(ศ.ดร. ไม่นาย ไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ เรื่อง เครื่องตรวจจับโลหะ ระบุขนาดได้ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วย ความเมตตาช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำปรึกษาข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวงศ์ พงษ์เจริญพานิชที่ได้ให้ความกรุณาใช้เครื่อง NETWORK ANALYZER ในการทดลองจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณที่ศึกษาปริญญาโททุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือและกำลังใจที่คอยถามไถ่ห่วงใย

การทำปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีและความดีที่ได้จากการทำปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำขอขอบแต่ บิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีของผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมา และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นาย ชวาลชัย ตระกูลเกียรติ

นาย วิรุฬ วัระศักดิ์

นาย ศฐานนท์ นันตา

ผู้จัดทำ

เครื่องตรวจจับโลหะ สามารถระบุขนาดวัตถุได้  
METAL DETECTOR WITH SIZE IDENTIFICATION  
CAPABILITY

โดย นาย ขวาลชัย ตระกูลเกียรติ 50010332  
นาย วิรุฬห วิระศักดิ์ 50011484  
นาย ศฐานนท์ นันดา 50011522

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

**บทคัดย่อ**

ปัจจุบัน เทคโนโลยีในการตรวจจับโลหะมีใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่โดยทั่วไปไม่ได้ระบุขนาดและตำแหน่งของวัตถุ ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำจึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะ ให้สามารถข้ามขีดจำกัดดังกล่าวได้ โดยใช้สายอากาศส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วเลื่อนเครื่องมือไปบนพื้นที่ต้องสงสัย ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับจะมีค่าสูงสุดเมื่อเครื่องมืออยู่ตรงบริเวณที่มีวัตถุ เมื่อได้ตำแหน่งของวัตถุแล้ว เลื่อนสายอากาศรับไปยังตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดไว้ แล้วบันทึกคลื่นสะท้อนที่ระยะต่างๆ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการคำนวณจากวัตถุขนาดต่างๆ ไว้แล้ว ว่าใกล้เคียงกับวัตถุขนาดใดมากที่สุด จากนั้นจะคำนวณหาความลึกของวัตถุ จากการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อสะท้อนกลับ เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถช่วยค้นหาวัตถุที่ถูกฝังอยู่ได้

**ABSTRACT**

Nowadays, metal detector technology is widely used. In general, those can not identify size and depth of concealed materials. According to this problem, we intend to improve the metal detector by using antennas to radiate an electromagnetic wave. The equipment is moved on a suspected area then the intensity of returned electromagnetic will be peaked where the equipment is setting on. Now we can identify where the medium is, then we will move a received antenna to each fixed positions. Then, storing reflected wave at each points to compare to the values which we have calculated for each size and figuring out whether the value is likely to be which specimen mediums. The depth of the medium from a surface will be calculated from the losses of reflected wave. This equipment will be useful in detecting of concealed objects.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1.2 วัตถุประสงค์
	1.3 ขอบเขตของโครงการ
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>
	2.1 การกระเจิงโดยตัวนำทรงกลม
	2.2 สนามระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบและการโครงการ</b>
	3.1 การคำนวณหาค่าสนามการกระเจิงกลับโดยตัวนำทรงกลม
	3.2 โครงสร้างของระบบ
	3.3 สายอากาศ SLOT แบบร่อง
	3.4 วงจร RF SWITCH
	3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
	3.6 การจัดเก็บผลการทดลอง

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลอง</b>
4.1	การสร้างและทดสอบคุณสมบัติสายอากาศ
4.2	วงจร RF SWITCH
4.3	การวิเคราะห์หาวัตถุโลหะทรงกลมในข้าวเปลือก
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>
5.1	สรุปผล
5.2	ข้อเสนอแนะ
<b>บรรณานุกรม</b>	
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>โปรแกรมคำนวณหาค่าสนามการกระเจิง</b>
<b>ภาคผนวก ข</b>	<b>โปรแกรมแสดงผลการค้นหาโลหะทรงกลม</b>

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 คลื่นระนาบบนตัวนำทรงกลม	3
2.2 รูปแบบปัญหาของสายอากาศแบบร่อง	9
3.1 สายอากาศร่องใกล้วัตถุทรงกลม	12
3.2 การเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศตัวรับ	14
3.3 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิงกับ N ของทรงกลมขนาด 4 CM	15
3.4 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิงกับ N ของทรงกลมขนาด 7 CM	16
3.5 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิงกับ N ของทรงกลมขนาด 12 CM	16
3.6 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิง กับ สายอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ	18
3.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบ	19
3.8 แผนภูมิการทำงานของการค้นหาขนาดวัตถุ	20
3.9 โครงสร้างสายอากาศร่อง	21
3.10 ขนาดของร่อง	22
3.11 สายป้อนไมโครสตริป	22
3.12 RF SWITCH 2 CH ตามแบบ DATASHEET	23
3.13 RF SWITCH 4 CH	23
3.14 จัดเตรียมถังข้าวเปลือกและลูกเหล็ก	24
3.15 CALIBRATE เครื่อง OSCILLOSCOPE	25
3.16 การวัดค่า RETURN LOSS และ ค่า SCATTER จากสายอากาศ	26
4.1 โครงสร้างสายอากาศที่ใช้ทดสอบ(ก) รูปด้านหน้า (ข) รูปด้านหลัง	28
4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ SLOT ที่ 1	29
4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ SLOT ที่ 2	29
4.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ SLOT ที่ 3	30
4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ SLOT ที่ 4	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ SLOT ที่ 5	31
4.7 การทำสอบ วงจร RF SWITCH	32
4.8 การทดสอบหาวัตถุโลหะทรงกลมในข้าวเปลือก	33
4.9 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ SLOT ที่ 1	34
4.10 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ SLOT ที่ 2	34
4.11 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ SLOT ที่ 3	35
4.12 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ SLOT ที่ 4	35
4.13 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ SLOT ที่ 5	36
4.14 ค่าเฟสของ SLOT ที่ 2 เทียบกับตัวที่ 1	36
4.15 ค่าเฟสของ SLOT ที่ 3 เทียบกับตัวที่ 1	37
4.16 ค่าเฟสของ SLOT ที่ 4 เทียบกับตัวที่ 1	37
4.17 ค่าเฟสของ SLOT ที่ 5 เทียบกับตัวที่ 1	38

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ	31
4.2	ผลการทดสอบ การส่งผ่านของ RF SWITCH	32
4.3	ฐานข้อมูลการสะท้อนของโลหะทรงกลมขนาดเล็ก	38
4.4	ฐานข้อมูลการสะท้อนของโลหะทรงกลมขนาดกลาง	39
4.5	ฐานข้อมูลการสะท้อนของโลหะทรงกลมขนาดใหญ่	39
4.6	การสู่มตัวอย่างค้นหา	40
4.7	สรุปผลการค้นหา	41



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมมีความเจริญก้าวหน้าอย่างมาก มีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้เป็นเครื่อง หรืออุปกรณ์ที่มีประโยชน์ต่างๆ ในระบบสื่อสาร (Communication system) สายอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบสื่อสารที่ใช้คลื่น สายอากาศจึง ถูกคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ จะเห็นได้ว่าการศึกษาเรียนรู้ สายอากาศนั้นเป็นสิ่งจำเป็น เครื่องตรวจจับวัตถุโลหะ เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ต้องอาศัยการ ประยุกต์ นำเอาสายอากาศออกแบบโดยใช้คุณสมบัติต่างๆ ของการแพร่กระจายคลื่น การกระเจิง ของคลื่นระนาบแล้วสร้างเป็นเครื่องตรวจจับวัตถุโลหะ

เครื่องตรวจจับ โลหะถูกนำมาใช้งานหลายประเภท อาทิเช่น การตรวจหาโลหะที่อยู่ ใต้พื้นดิน การตรวจหาอาวุธก่อนเข้าสนามบิน การตรวจสอบตำแหน่งที่ตั้งของท่อ หรือแม่กระทั่งแต่ งานก่อสร้างที่ต้องการทราบว่ามีบริเวณใดมีสายเคเบิล แต่โดยทั่วไปไม่ได้ระบุขนาดและตำแหน่งของ วัตถุโลหะ ในการตรวจหาวัตถุโลหะที่สามารถระบุขนาดและตำแหน่งได้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในการใช้งานของเครื่องตรวจจับวัตถุโลหะให้เกิดประโยชน์มากขึ้นตามลักษณะของผู้ใช้งาน

เครื่องตรวจจับวัตถุโลหะส่วนใหญ่สามารถตรวจจับวัตถุโลหะที่อยู่ลึกลงไปจาก ผิวหน้า 8-12 นิ้ว ความสามารถในการตรวจจับวัตถุโลหะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ นอกจาก ความไวของหัวตรวจจับแล้ว ชนิดของโลหะก็มีผล เช่น เหล็ก สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้แรง กว่าโลหะชนิดอื่น การตรวจจับจึงทำได้ง่าย ขนาดของวัตถุก็มีส่วนสำคัญ วัตถุที่มีขนาดเล็กก็ถูก ตรวจจับได้ยากกว่าวัตถุขนาดใหญ่ เครื่องตรวจจับวัตถุโลหะสมัยใหม่ นอกจากตรวจจับได้ว่ามีวัตถุ ที่ทำจากโลหะแล้วยังระบุขนาดและความลึกของวัตถุอย่างคร่าวๆ ได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การสะท้อนและการกระเจิงของคลื่น
- 2) เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการคำนวณหาตำแหน่งของโลหะทรงกลม
- 3) เพื่อสร้างเครื่องตรวจจับโลหะที่สามารถบอกขนาดของวัตถุได้

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

- 1) สามารถค้นหาและระบุตำแหน่งของวัตถุได้ โดยวัตถุที่ใช้เป็นโลหะทรงกลมเมื่อฝังอยู่ในข้าวเปลือก
- 2) สามารถระบุขนาดของวัตถุตัวอย่าง 3 ขนาด คือ 4 cm , 7 cm และ 12 cm ได้ โดยใช้ย่านความถี่ 2.45 GHz
- 3) สามารถบอกความลึกของผิวได้ ในระยะไม่เกิน 10 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การกระเจิงโดยตัวนำทรงกลม

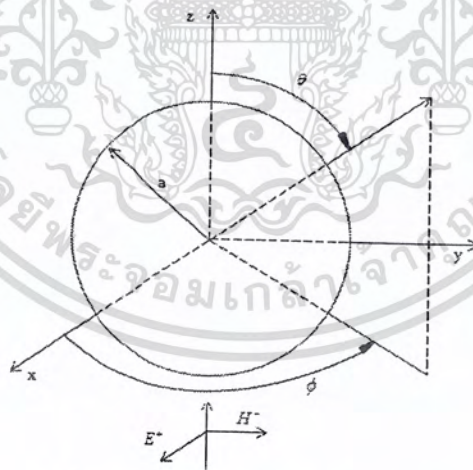
ปัญหาหลักของการกระเจิง คือ การกระเจิงที่เกิดจากคลื่นระนาบ เพราะความสมมาตรของมัน ทรงกลมมักใช้อ้างอิง เมื่อทดสอบคุณสมบัติการกระเจิง (เช่น RCS) ต่างๆ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องรู้และเข้าใจ องค์ประกอบของการกระเจิงของตัวนำทรงกลมในที่นี้ ให้สนามไฟฟ้าในทิศ  $x$  และเดินทางตามแนวแกน  $z$  สนามไฟฟ้าของคลื่นสามารถเขียนได้เป็น

$$E^i = \hat{a}_x e_x^i = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta r} = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta r \cos \theta} \quad (2.1)$$

เขียนองค์ประกอบ  $x$  ให้อยู่ในรูปของทรงกลมได้เป็น

$$E^i = \hat{a}_r E_r^i + \hat{a}_\theta E_\theta^i + \hat{a}_\phi E_\phi^i \quad (2.2)$$

ในขณะที่



รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบบนตัวนำทรงกลม

$$E_r^i = E_x^i \sin \theta \cos \phi = E_0 \sin \theta \cos \phi e^{-j\beta r \cos \theta} = E_0 \frac{\cos \phi}{j\beta r} \frac{\partial}{\partial \theta} (e^{-j\beta r \cos \theta}) \quad (2.3)$$

$$E_\theta^i = E_x^i \cos \theta \cos \phi = E_0 \sin \theta \cos \phi e^{-j\beta r \cos \theta} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\phi^i = -E_x^i \sin \phi = -E_0 \sin \phi e^{-j\beta r \cos \theta} \quad (2.5)$$

จาก 
$$E_x^i = e^{-j\beta^2} = e^{-j\beta r \cos \theta} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n j_n(\beta r) P_n(\cos \theta) \quad (2.6)$$

และ 
$$a_n = j^{-n} (2n+1) \quad (2.7)$$

สามารถแสดงองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าได้เป็น

$$E_r^i = E_0 \frac{\cos \phi}{j\beta r} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) j_n(\beta r) \frac{\partial}{\partial} [P_n(\cos \theta)] \quad (2.8)$$

$$E_\theta^i = E_0 \cos \theta \cos \phi \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) j_n(\beta r) P_n(\cos \theta) \quad (2.9)$$

$$E_\phi^i = -E_0 \sin \phi \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) j_n(\beta r) P_n(\cos \theta) \quad (2.10)$$

จาก 
$$\hat{B}_n(\beta r) = \beta r b_n(\beta r) = \beta r \sqrt{\frac{\pi}{2\beta r}} B_n + \frac{1}{2}(\beta r) = \sqrt{\frac{\pi\beta r}{2}} B_n + \frac{1}{2}(\beta r) \quad (2.11)$$

$$j_n(\beta r) = \frac{1}{\beta r} \hat{j}_n(\beta r) \quad (2.12)$$

และ 
$$\frac{\partial P_n}{\partial \theta} = P_n^1(\cos \theta) \quad (2.13)$$

$$P_n^1 = 0$$

สามารถเขียน(2.8) กับ (2.9) ได้เป็น

$$E_r^i = -jE_0 \frac{\cos \phi}{(\beta r)^2} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(\beta r) P_n^1(\cos \theta) \quad (2.14)$$

$$E_\theta^i = E_0 \frac{\cos \theta \cos \phi}{\beta r} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(\beta r) P_n^0(\cos \theta) \quad (2.15)$$

$$E_\phi^i = -E_0 \frac{\sin \phi}{\beta r} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(\beta r) P_n^0(\cos \theta) \quad (2.16)$$

คลื่นและสนามกระเจิงโดยทรงกลมเขียนแสดงแบบรูปเพลอร์โพซิชั่นของ  $TE^r$  และ  $TM^r$  สนาม  $TE^r$  เกิดจากให้เวกเตอร์โพเทนเชียล  $A=0$  และ  $F = \hat{a}_r F_r(r, \theta, \phi)$  สนาม  $TM^r$  เกิดจาก  $A = \hat{a}_r A_r(r, \theta, \phi)$  และ  $F=0$

$E_0^i$  แสดงในโหมด  $TM^r$  หรือ  $A_0^i$  จาก

$$E_r = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \beta^2 \right) A_r \quad (2.17)$$

เขียนสนามได้

$$E_r' = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \beta^2 \right) A_r' \quad (2.18)$$

จับ (2.18) เท่ากับ (2.14) เขียนแสดง  $A_r'$  ได้เป็น

$$A_r' = E_0 \frac{\cos\phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \hat{J}_n(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (2.19)$$

ซึ่ง

$$a_n = j^{-n} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \quad (2.20)$$

$A_r'$  ทำให้  $E_r'$  มีความถูกต้อง ซึ่งนำไปสู่  $H_r' = 0$

องค์ประกอบการแพร่ของสนามแม่เหล็ก เขียนโดยใช้วิธีเดียวกันแต่ในโหมด  $TE'$  หรือ  $F_r'$  ได้เป็น

$$F_r' = E_0 \frac{\sin\phi}{\omega\eta} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \hat{J}_n(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (2.21)$$

ที่  $a_n$  ดังสมการที่ (2.20) นำไปสู่  $H_r'$  ที่ถูกต้อง และ  $E_r' = 0$  ดังนั้นผลบวกของ (2.19) และ (2.21) จะให้ค่าที่ถูกต้องของ  $E_r', H_r'$  และองค์ประกอบทางไฟฟ้าและแม่เหล็กที่เหลือ

เนื่องจากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นระนาบแสดงใน  $TM'$  และ  $TE'$  โหมด โดยใช้  $A_r'$  และ  $F_r'$  สมการที่ (2.19) และ (2.21) สนามกระเจิงสามารถเขียนแสดงใน  $TM'$  และ  $TE'$  ได้เช่นกัน และใช้  $A_r^s$  และ  $F_r^s$

รูปแบบของ  $A_r^s$  และ  $F_r^s$  คล้ายกับ  $A_r'$  และ  $F_r'$  ของสมการ (2.19) และ (2.21) แสดงได้เป็น

$$A_r^s = E_0 \frac{\cos\phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (2.22)$$

$$F_r^s = E_0 \frac{\sin\phi}{\omega\eta} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (2.23)$$

ในขณะที่สัมประสิทธิ์  $b_n$  และ  $c_n$  เกิดจากการใช้เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม ในสมการ (2.22) และ (2.23) สเปรีคอลลเฮงเกลฟังก์ชัน อันดับ 2  $\hat{H}_n^{(2)}(\beta r)$  แทนที่ สเปรีคอลลเบสเซลฟังก์ชัน  $\hat{J}_n(\beta r)$  ใน (2.19) และ (2.21) เพื่อแสดงการเดินทางของคลื่น ดังนั้นองค์ประกอบทั้งหมดของสนาม, คลื่น รวมทั้งการกระเจิง หาได้จากผลบวกของ

$$E_r' = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{1}{r} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \beta \right) A_r' \quad (2.24)$$

$$E'_\theta = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 A'_r}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{\epsilon} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial F'_r}{\partial \phi} \quad (2.25)$$

$$E'_\phi = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 A'_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{\epsilon} \frac{1}{r} \frac{\partial F'_r}{\partial \phi} \quad (2.26)$$

$$H'_r = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \beta \right) F'_r \quad (2.27)$$

$$H'_\theta = \frac{1}{\mu} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A'_r}{\partial \phi} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 F'_r}{\partial r \partial \theta} \quad (2.28)$$

$$H'_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial A'_r}{\partial \phi} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 F'_r}{\partial r \partial \theta} \quad (2.29)$$

ในขณะที่  $A'_r$  และ  $F'_r$  ต่างก็เท่ากับ (2.19), (2.21), (2.22) และ (2.23)

$$A'_r = A'_r + A_r^s = E_0 \frac{\cos \phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(\beta r) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)] P_n^1(\cos \theta) \quad (2.30)$$

$$F'_r = F'_r + F_r^s = \frac{\sin \phi}{\omega \eta} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(\beta r) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)] P_n^1(\cos \theta) \quad (2.31)$$

$$a_n = j^{-n} \frac{2n+1}{n(n+1)} \quad (2.32)$$

เพื่อแสดงสัมประสิทธิ์  $b_n$  และ  $c_n$  เงื่อนไขขอบเขตเป็นดังนี้

$$E'_\theta(r=a, 0 \leq \theta \leq R, 0 \leq \phi \leq 2R) = 0 \quad (2.33)$$

$$E'_\phi(r=a, 0 \leq \theta \leq R, 0 \leq \phi \leq 2R) = 0 \quad (2.34)$$

จาก (2.30) และ (2.31) เขียน (2.25) ได้เป็น

$$E'_\theta = -j \frac{E_0}{\omega \mu \epsilon r} \left\{ \frac{\beta}{\omega} \cos \phi [a_n \hat{J}_n(\beta r) + b_n \hat{H}_n^{(2)'}(\beta r)] P_n^1(\cos \theta) \right\} - \frac{E_0}{\epsilon r \sin \theta} \left\{ \frac{1}{\omega \eta} \cos \phi [a_n \hat{J}_n(\beta r) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)] P_n^1(\cos \theta) \right\} \quad (2.35)$$

$$\text{ในขณะที่ } ' = \frac{\partial}{\partial(\beta r)} \text{ สำหรับสเฟียริคอลเบสเซลฟังก์ชัน} \quad (2.36)$$

$$' = \frac{\partial}{\partial \theta} \text{ สำหรับเลอจองฟังก์ชัน} \quad (2.37)$$

ในสมการ (2.35) ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต (2.33) จะได้

$$a_n \hat{J}_n(\beta r) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) = 0 \Rightarrow b_n = -a_n \frac{\hat{J}_n(\beta r)}{\hat{H}_n^{(2)'}(\beta r)} \quad (2.38)$$

$$a_n \hat{J}_n(\beta r) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) = 0 \Rightarrow c_n = -a_n \frac{\hat{J}_n(\beta r)}{\hat{H}_n^{(2)}(\beta r)} \quad (2.39)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้ากระเจิง โดยใช้สมการ(2.22) และ (2.23) เขียนได้เป็น

$$E_r^s = -jE_0 \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} b_n [\hat{H}_n^{(2)*}(\beta r) + \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)] P_n^1(\cos \theta) \quad (2.40)$$

$$E_\theta^s = \frac{E_0}{\beta r} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[ j b_n \hat{H}_n^{(2)'}(\beta r) \sin \theta P_n^1(\cos \theta) - c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] \quad (2.41)$$

$$E_\phi^s = \frac{E_0}{\beta r} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[ j b_n \hat{H}_n^{(2)'}(\beta r) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} - c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \sin \theta P_n^1(\cos \theta) \right] \quad (2.42)$$

ซึ่ง  $' = \frac{\partial}{\partial(\beta r)}$  สำหรับสเฟียริคัลแองเกิลฟังก์ชัน (2.43)

" =  $\frac{\partial^2}{\partial(\beta r)^2}$  สำหรับสเฟียริคัลแองเกิลฟังก์ชัน (2.44)

' =  $\frac{\partial}{\partial(\cos \theta)} = -\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}$  เกี่ยวข้องกับเลอจองฟังก์ชัน (2.45)

$$\hat{H}_n^{(2)}(\beta r) = \sqrt{\frac{\pi \beta r}{2}} H_{n+1/2}^{(2)}(\beta r) \quad (2.46)$$

เนื่องจากค่า  $\beta r$  ที่มีค่ามากๆ ใช้แองเกิลฟังก์ชัน แสดงได้เป็น

$$H_{n+1/2}^{(2)}(\beta r) \approx \sqrt{\frac{2j}{\pi \beta r}} j^{n+1/2} e^{-j\beta r} = j \sqrt{\frac{2}{\pi \beta r}} j^n e^{-j\beta r} \quad (2.47)$$

จากสมการ (2.46) มาเขียน ประมาณ

$$H_n^{(2)}(\beta r) \approx j^{n+1} e^{-j\beta r} \quad (2.48)$$

$$H_n^{(2)'}(\beta r) = \frac{\partial H_n^{(2)}(\beta r)}{\partial(\beta r)} \approx -j^2 j^n e^{-j\beta r} = j^n e^{-j\beta r} \quad (2.49)$$

$$H_n^{(2)''}(\beta r) = \frac{\partial^2 H_n^{(2)}(\beta r)}{\partial(\beta r)^2} \approx -j^{n+1} e^{-j\beta r} \quad (2.50)$$

สำหรับสนามระยะไกล ( $\beta r \rightarrow \infty$ ) องค์ประกอบสนามไฟฟ้า (2.40) - (2.42) สามารถหาค่าประมาณ (2.48) - (2.50) เนื่องจากองค์ประกอบการแพร่  $E_\theta^s$  ของสมการ (2.48) - (2.50) เป็น 0 แล้ว สนามไกลของสมการ (2.40) - (2.42) ประมาณโดย

$$E_r^s \approx 0 \quad (2.51)$$

$$E_\theta^s \approx jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[ b_n \sin \theta P_n^1(\cos \theta) - c_n \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] \quad (2.52)$$

$$E_\phi^s \approx jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[ b_n \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} - c_n \sin \theta P_n^1(\cos \theta) \right] \quad (2.53)$$

ซึ่ง  $b_n$  และ  $c_n$  ได้จากสมการ (2.38) และ (2.39)

ไบสแตติกครอสเช็คค้นหาได้จากสมการ  $\sigma_{3-D} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[ 4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right]$  เขียนในเทอมของสมการ

(2.1) และ (2.51) และ (2.53) ได้เป็น

$$\sigma(bi\text{static}) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[ 4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right] = \frac{\lambda^2}{\pi} \left[ \cos^2 \phi |A_\theta|^2 + \sin^2 \phi |A_\phi|^2 \right] \quad (2.54)$$

$$|A_\theta|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[ b_n \sin \theta P_n^1(\cos \theta) - c_n \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] \right|^2 \quad (2.55)$$

$$|A_\phi|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[ b_n \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} - c_n \sin \theta P_n^1(\cos \theta) \right] \right|^2 \quad (2.56)$$

โมโนสแตติกเรดาร์เช็คค้นหาได้จาก ชั้นแรก ลดขนาดสนามที่สังเกต  $\theta = \pi$  สนามของการกระเจิงที่สนใจในทิศทางเดียวกับองค์ประกอบ  $E_x^s$  และหาสมการได้จาก (2.51) ถึง (2.53) และ

เป็นการแปลงจาก  $H_\phi = -jI_e \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta\rho) \approx I_e \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}}$  โดยการประมาณ  $\beta\rho \rightarrow \text{large}$

$$E_x^s = E_\theta^s \cos \theta \cos \phi \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=\pi}} = E_\theta^s \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=\pi}} \quad (2.57)$$

$$E_x^s = -E_\phi^s \sin \phi \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=3\pi/2}} = E_\phi^s \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=3\pi/2}} \quad (2.58)$$

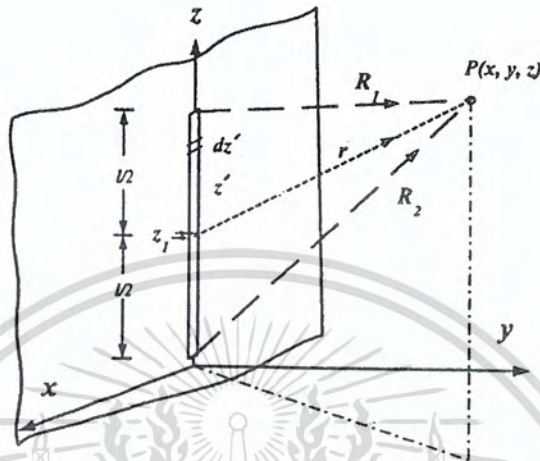
เมื่อได้สมการ (2.57) หรือ (2.58) จำเป็นต้องประมาณค่าเลขของฟังก์ชันและอนุพันธ์เมื่อ  $\theta = \pi$  ซึ่งแสดงได้เป็น

$$\frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \Big|_{\theta=\pi} = (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} \quad (2.59)$$

$$\sin \theta P_n^1(\cos \theta) \Big|_{\theta=\pi} = \sin \theta \frac{dP_n^1}{d(\cos \theta)} = -\frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} = (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} \quad (2.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง



รูปที่ 2.2 รูปแบบปัญหาของสายอากาศแบบร่อง

พิจารณาสายอากาศแบบร่องขนาดความยาวร่องหนึ่ง วางอยู่ในแนวแกน Z ณ ตำแหน่ง  $(0,0,z_1)$  ในตัวกลางเดี่ยวที่มีคุณสมบัติประจำตัวเป็น  $(\mu, \epsilon)$  ดังรูปที่ 2.2 หากร่องมีความกว้างน้อย สามารถพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก (Magnitude Current Source) ที่ตัวของสายอากาศแบบร่อง ว่ามีการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก  $(\vec{I}_m(x', y', z'))$  บนตัวสายอากาศแบบร่องเป็นไปในลักษณะสัญญาณไซน์ เช่นเดียวกับกรณีของการพิจารณาสายไดโพล และเนื่องจากสายอากาศแบบร่องมีโครงสร้างที่เป็นคู่เติมเต็ม (Complementary structure) กับสายอากาศไดโพล ดังนั้นจึงมีรูปแบบของการแก้สมการเพื่อหาสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นไปในทำนองเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนจากการพิจารณาศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กมาเป็นศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเมื่อแก้สมการแล้ว จะได้สมการของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศแบบร่องโดยตรง สมการของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง เป็นดังนี้

$$\vec{E} = E_\phi \hat{a}_\phi \quad (2.61)$$

โดย

$$E_\phi = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \{e^{-jk_0 R_1} + e^{-jk_0 R_2} - 2\cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right)e^{-jk_0 r}\} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการคำนวณรูปแบบการกระจายขนาดของสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบ ร่อง ๓ ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศแบบร่องมีความยาวเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งมี ค่าประมาณ 6.1 เซนติเมตร วางอยู่ในช่องว่างอิสระ (Free space) ที่จุดกำเนิด รูปทางด้านซ้ายแสดง สนามไฟฟ้าในระนาบ YZ และรูปทางด้านขวาแสดงสนามไฟฟ้าในระนาบ XZ ที่ตำแหน่ง  $y = 5$  เซนติเมตร จะเห็นว่าสายอากาศทั้งสองชนิดต่างก็มีสนามไฟฟ้าแรงที่สุดที่ตรงกลางของ สายอากาศ

### 2.2.1 การปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศร่อง

การปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศโดยทั่วไปนั้น จะมีความ แรงของสนามไฟฟ้า ณ บริเวณกึ่งกลางของสายอากาศ ดังเช่นกรณีของการกระจายสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไดโพล และสายอากาศแบบร่องที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จากการศึกษาพบว่า สำหรับ กรณีที่สายอากาศมีจำนวนมากกว่า 1 ตัว สามารถปรับความแรงของสนามไฟฟ้าให้เปลี่ยน ตำแหน่งไปจากบริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศได้ สายอากาศแบบร่องเป็นสายอากาศที่มี โครงสร้างที่ง่ายในการสร้างและทำการทดลองรูปแบบหนึ่ง และสามารถควบคุมให้มีการกระจาย คลื่นได้จากทางด้านเดียว จึงเลือกสายอากาศชนิดนี้ เพื่อทำการศึกษากลไกการปรับตำแหน่งความ แรงของสนามไฟฟ้า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า สามารถกระทำได้โดย การปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่หรือแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ การปรับ ตำแหน่งของสายอากาศแบบร่อง เป็นปัจจัยแรก เพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่ของสนามไฟฟ้ากว้างและมี ความสม่ำเสมอมากที่สุด ในระยะที่สนใจ ก่อนการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆ ต่อไป

พิจารณารูปแบบของปัญหา เมื่อจัดลักษณะตำแหน่งการวางสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องในแนวแกน Z ณ ตำแหน่ง  $-z_1$  และ  $z_1$  ตามลำดับ จากสมการสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบ ร่อง จะได้ว่าสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแบบร่องทั้งสองสามารถรวมกันแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\bar{E}_T = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 \quad (2.63)$$

โดย

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_1 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \{e^{-jk_0 R_1} + e^{-jk_0 R_2} - 2\cos(\frac{k_0 l}{2})e^{-jk_0 r_1}\} \hat{a}_\phi \quad (2.64)$$

$$\bar{E}_2 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \{e^{-jk_0 R_3} + e^{-jk_0 R_4} - 2\cos(\frac{k_0 l}{2})e^{-jk_0 r_2}\} \hat{a}_\phi \quad (2.65)$$

$\bar{E}_1, \bar{E}_2$  เป็นสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง ร่องบนและร่องล่างตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและการจัดทำโครงการ

#### 3.1 การคำนวณหาค่าสนามการกระเจิงกลับโดยตัวนำทรงกลม

สายอากาศร่องวางอยู่ใกล้วัตถุตัวกลางทรงกลมที่ไม่มีการสูญเสีย โดยที่ลักษณะโครงสร้าง การป้อนคลื่นสัญญาณ และการหาสนามระยะใกล้วัตถุทรงกลม



รูปที่ 3.1 สายอากาศร่องใกล้วัตถุทรงกลม

การคำนวณหาค่าสนามการกระเจิงกลับโดยตัวนำทรงกลมที่มีขนาด 4, 7, 12 เซนติเมตร สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_\theta^s \approx jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \cos\phi \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[ b_n \sin\theta P_n^1(\cos\theta) - c_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} \right] \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่จะนำสมการ (3.1) มาคำนวณหาค่าสนามการกระเจิงกลับ โดยตัวนำทรงกลม จะต้องหาค่า  $n$  ที่ทำให้สมการ (3.1) มีค่าสนามคงที่จากเงื่อนไขที่กำหนดคือ  $\theta = \pi$  ดังนั้นจะสมการสนามเป็นดังนี้

$$E_x^s = E_\theta^s \cos \theta \cos \phi \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=\pi}} = E_\theta^s \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=\pi}} \quad (3.2)$$

$$E_x^s = -E_\phi^s \sin \phi \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=3\pi/2}} = E_\phi^s \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=3\pi/2}} \quad (3.3)$$

จากการแทน  $\theta = \pi$  จะทำให้สามารถประมาณค่าเลขจอร์จฟังก์ชันและอนุพันธ์ที่  $\theta = \pi$  ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \Big|_{\theta=\pi} = (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} \quad (3.3)$$

$$\sin \theta P_n^1(\cos \theta) \Big|_{\theta=\pi} = \sin \theta \frac{dP_n^1}{d(\cos \theta)} = -\frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} = (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} \quad (3.4)$$

เมื่อแทนค่า (3.3) และ (3.4) ลงในสมการ (3.1) จากนั้นทำการแทนค่า  $n$  ไปเรื่อยๆ จนได้ค่าสนามคงที่ ทำให้เราสามารถหาค่าสนามการกระเจิง โดยตัวนำทรงกลมได้จากการนำค่า  $n$  มาแทนค่าสนามการกระเจิงโดยตัวนำทรงกลมที่ระยะ  $\beta r$  และ  $\theta$  ต่างๆ สามารถเขียนสมการ (3.1) ได้เป็น

$$E_\theta^s \Big|_{\substack{\theta=\pi \\ \phi=\pi}} = jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} [b_n - c_n] \quad (3.4)$$

เมื่อ

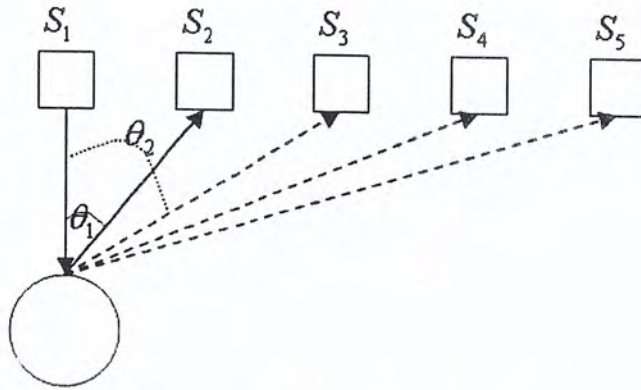
$$a_n = j^{-n} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \quad (3.5)$$

$$b_n = -a_n \frac{\hat{J}'_n(\beta a)}{\hat{H}_n^{(2)}(\beta a)} \quad (3.6)$$

$$c_n = -a_n \frac{\hat{J}_n(\beta a)}{\hat{H}_n^{(2)}(\beta a)} \quad (3.7)$$

ทำการคำนวณจากสมการ (3.4) โดยการเพิ่มค่า  $n$  จนกระทั่งได้ค่า สนามกระเจิง  $E_\theta^s$  คงที่ ในที่นี้พบว่า เมื่อ  $\beta a = 4$  cm, 7 cm, และ 12 cm ได้ค่า  $n$  ที่ทำให้สนามกระเจิงคงที่คือ 7, 12 และ 18 ตามลำดับ

นำค่า  $n$  ที่ได้แทนลงในสมการ (3.1) แล้วทำการเปลี่ยน  $\theta$



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศตัวรับ

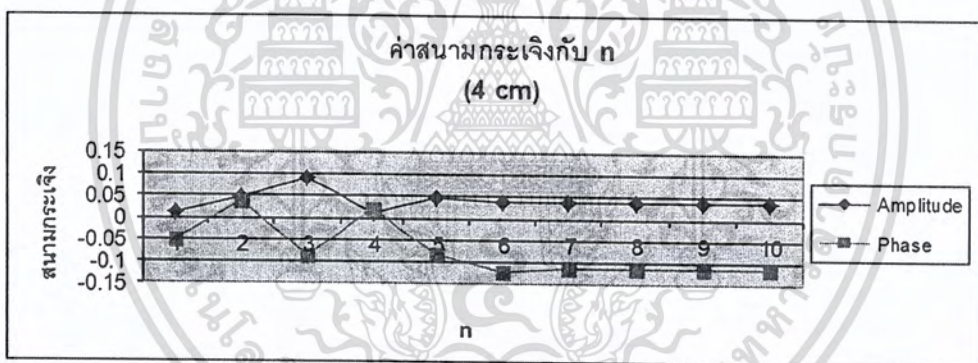
จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศรับจะมีผลทำให้ค่าของ  $\theta$  เปลี่ยนไปเรื่อยๆตามตำแหน่งของสายอากาศรับที่เปลี่ยนไปด้วย

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสนามกระเจิง เมื่อ เปลี่ยน  $n$  จนกระทั่งสนามกระเจิง มีค่าคงที่

Distance n	4cm		7cm		12cm	
	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)
1	0.013724	-0.051521	0.0014765	-0.032402	0.005608	-0.0070483
2	0.047721	0.039205	0.019335	-0.0065569	0.046352	0.073433
3	0.089625	-0.087442	0.063984	0.059465	0.082198	0.030417
4	0.01185	0.021931	0.12892	-0.065606	0.14821	0.074375
5	0.046481	-0.083398	0.16037	-0.017482	0.20669	-0.088478
6	0.038495	-0.12032	0.062336	-0.0045731	0.23424	-0.047523
7	0.039459	-0.11296	0.17831	-0.031261	0.11719	-0.018161
8	0.039459	-0.11296	0.091447	-0.021272	0.013806	0.54199
9	0.039459	-0.11296	0.11861	-0.023764	0.19643	-0.068693
10	0.039459	-0.11296	0.11296	-0.023361	0.25388	-0.23326
11	0.039459	-0.11296	0.11384	-0.023429	0.1311	-0.3056
12	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.33269	-0.040538

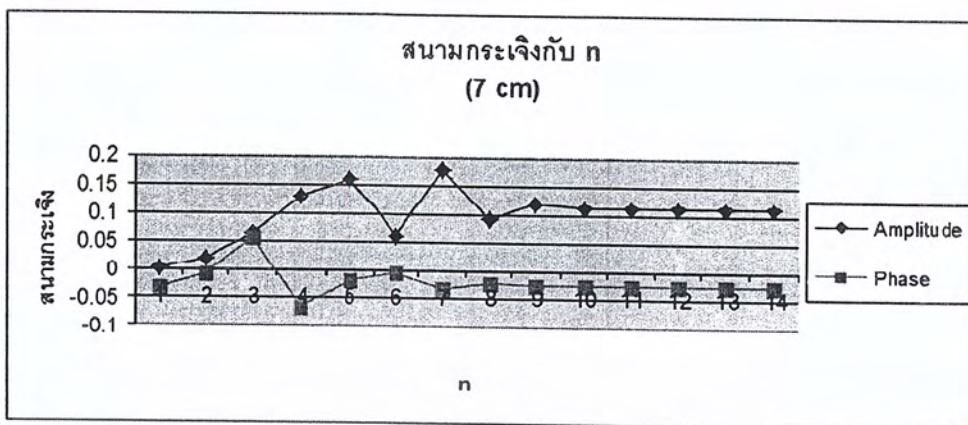
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Distance n	4cm		7cm		12cm	
	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)
13	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.15525	-0.021661
14	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.23421	-0.026857
15	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.21037	-0.026107
16	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.21597	-0.026269
17	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.21486	-0.026233
18	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.21509	-0.02624
19	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.21509	-0.02624
20	0.039459	-0.11296	0.1137	-0.023438	0.21509	-0.02624

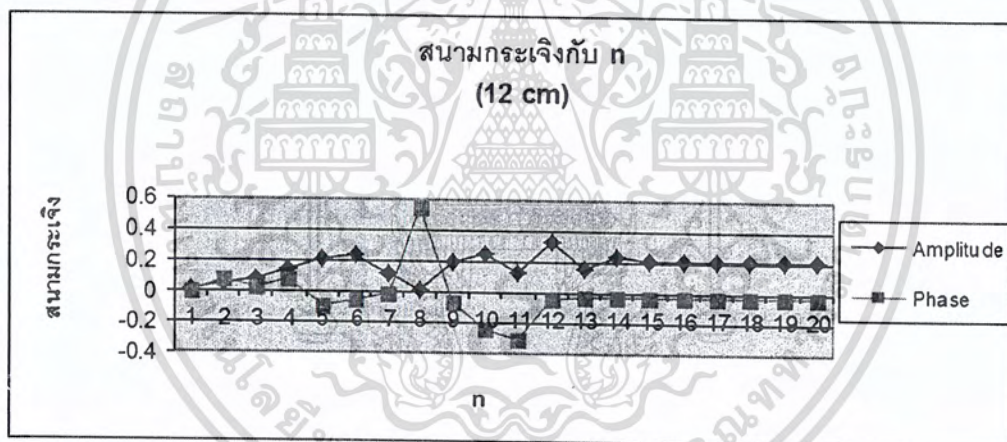


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิงกับ n ของทรงกลมขนาด 4 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิงกับ  $n$  ของทรงกลมขนาด 7 cm

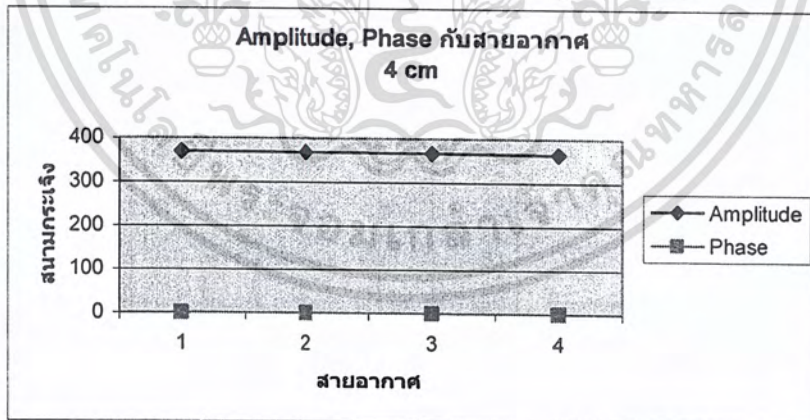


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิงกับ  $n$  ของทรงกลมขนาด 12 cm

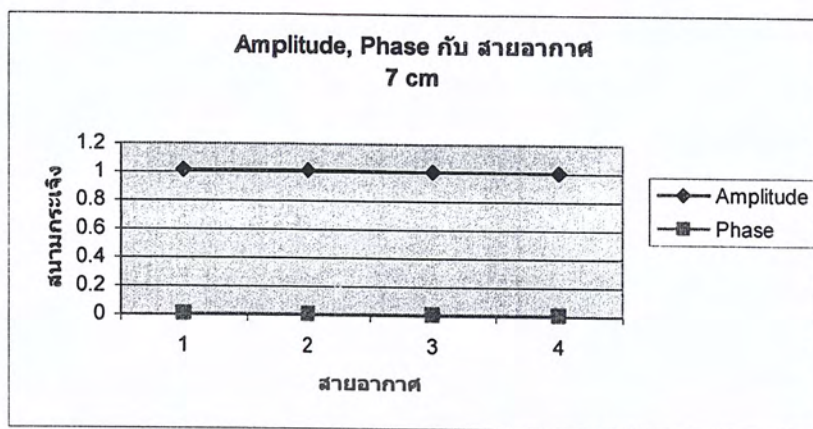
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสนามกระเจิงเมื่อ  $n$  คงที่ และเปลี่ยนค่า  $\theta$  (ตำแหน่งต่างๆ)

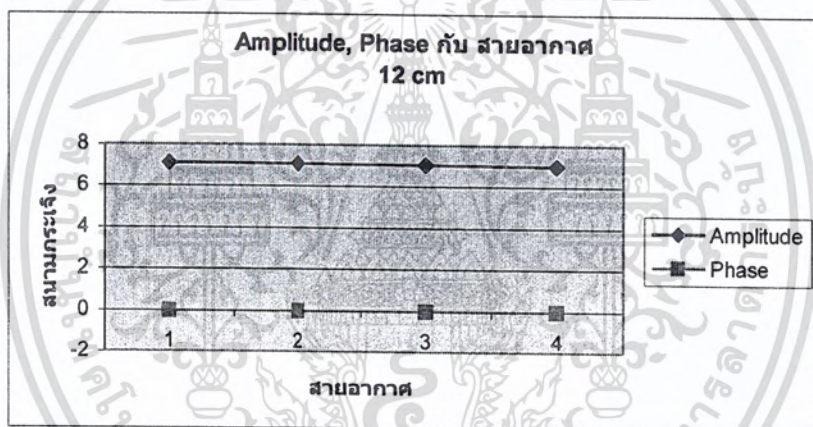
สายอากาศ	Amplitude (mV)	Phase (degree)
S,(2)/ $\theta=0.091$	369.3386	0.009358
S,(3)/ $\theta=0.812$	368.3585	0.0093575
S,(4)/ $\theta=0.273$	366.7391	0.0093579
S,(5)/ $\theta=0.364$	364.5021	0.0093577
M,(2)/ $\theta=0.091$	1.0172	0.0092665
M,(3)/ $\theta=0.812$	1.0144	0.009266
M,(4)/ $\theta=0.273$	1.01	0.0092654
M,(5)/ $\theta=0.364$	1.0038	0.0092658
L,(2)/ $\theta=0.091$	7.0792	-0.032847
L,(3)/ $\theta=0.812$	7.0605	-0.032846
L,(4)/ $\theta=0.273$	7.0294	-0.032846
L,(5)/ $\theta=0.364$	6.9866	-0.032847



(ก)



(ข)



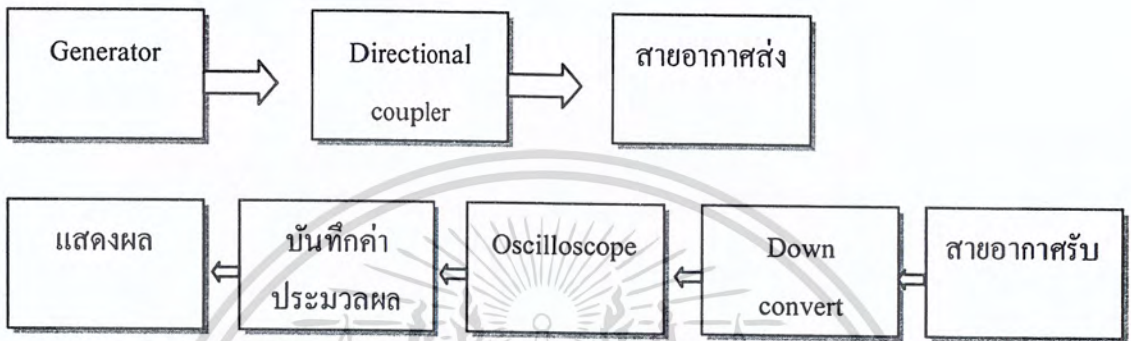
(ค)

รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าสนามกระเจิง กับ สายอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ  
(ก)ขนาดเล็ก (ข) ขนาดกลาง (ค) ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 โครงสร้างของระบบ

เครื่องตรวจจับโลหะ สามารถระบุขนาดวัตถุได้นี้มีหลักการการออกแบบให้มีโครงสร้างการทำงานแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

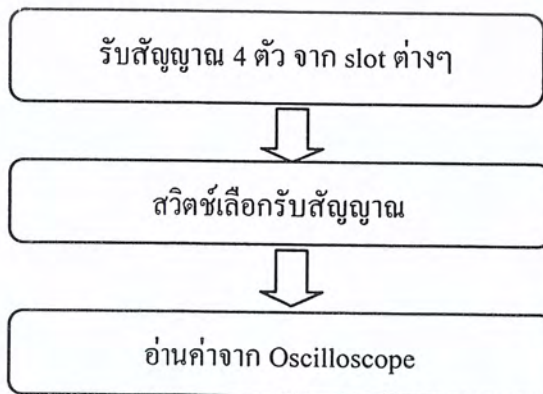


รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

การทำงานในแต่ละบล็อกจะมีหลักการทำงานดังนี้

- Generator ปล่อยสัญญาณความถี่ 2.45 GHz เพื่อเป็นตัวกำเนิดสัญญาณของสายอากาศ แล้วนำไปต่อกับ Directional coupler
- Directional coupler รับสัญญาณความถี่ 2.45 GHz จากเครื่อง Generator และมีคุณสมบัติหาค่าการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณได้จากสายอากาศตัวส่ง
- สายอากาศส่ง ออกแบบสายอากาศร่องที่มีความถี่ 2.45 GHz เพื่อส่งสัญญาณความถี่ 2.45 GHz

บล็อกไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายอากาศรับ จะมีการออกแบบให้มีสายอากาศรับทั้งหมด 5 ตัววางเรียงกันเพื่อใช้ในการหาค่า Scatter โดยมี slot ที่ 2 เป็นตัวส่งสัญญาณ แล้ว slot ที่ 1 ใช้เป็นตัวอ้างอิงเฟส ส่วน slot อื่นๆ ใช้วัดค่าจากวัตถุโลหะทรงกลมที่ระยะตามที่กำหนด

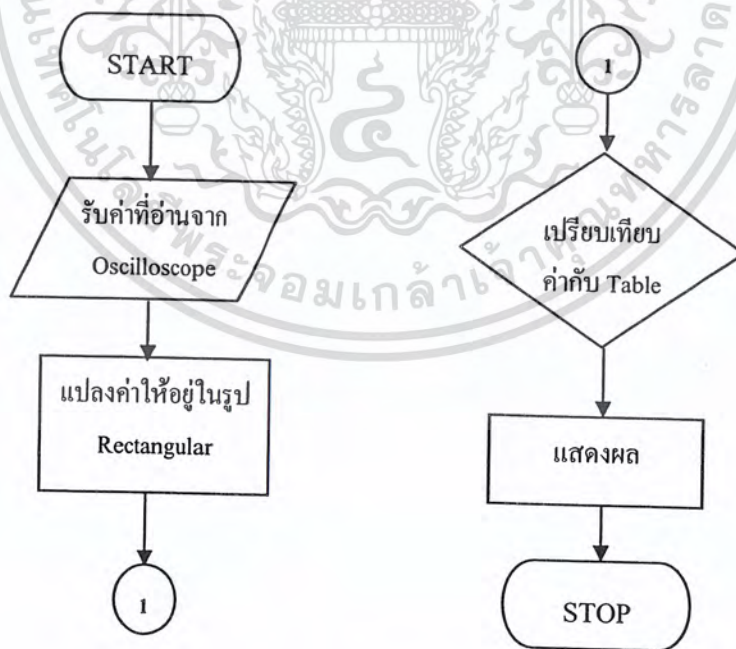
- เครื่อง Down convert เพื่อใช้ในการดาวน์โหลดก่อนเวิร์ดความถี่ที่เหลือ 40 MHz เพื่อสามารถใช้อ่านค่าจาก Oscilloscope ได้

- วัดค่าที่ได้จากสายอากาศตัวรับทั้ง 5 ตัว

- การบันทึกค่าและแสดงผลจะใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณค่าที่ได้จากสายอากาศทั้ง 5 ตัวตัดสินใจว่าค่าที่ได้จากการวัดมีการฟุ้งกระจายโลหะทรงกลมขนาด และอยู่ความลึกเท่าไร

- ทำการวัดและจัดเก็บข้อมูล ของโลหะทรงกลมทั้ง 3 ขนาด ที่ความลึก 0, 2.5, 5, 7.5, 10 เซนติเมตร มาเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจ โดยใช้โปรแกรมแมทแลปเป็นตัวประมวล ซึ่งการค้นหาค่าวัตถุนั้น จะทำการอ่านค่าจาก Oscilloscope แล้วทำการป้อนข้อมูลลงบน โปรแกรมแมทแลป จากนั้นทำการแปลงค่าสัญญาณที่อ่านให้เหลือแต่ขนาดของการสะท้อน นำข้อมูลชุดนี้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลว่า ตรงและใกล้เคียงกับตำแหน่งใด

โดยมีโฟลว์ชาร์ตของ โปรแกรมแมทแลปเป็นดังนี้



รูปที่ 3.8 แผนภูมิการทำงานของการค้นหาขนาดวัตถุ

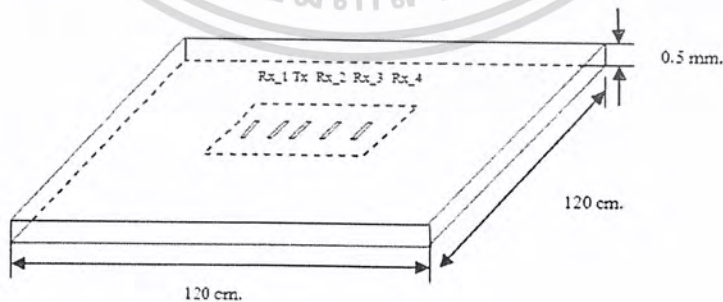
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สายอากาศ Slot แบบร่อง

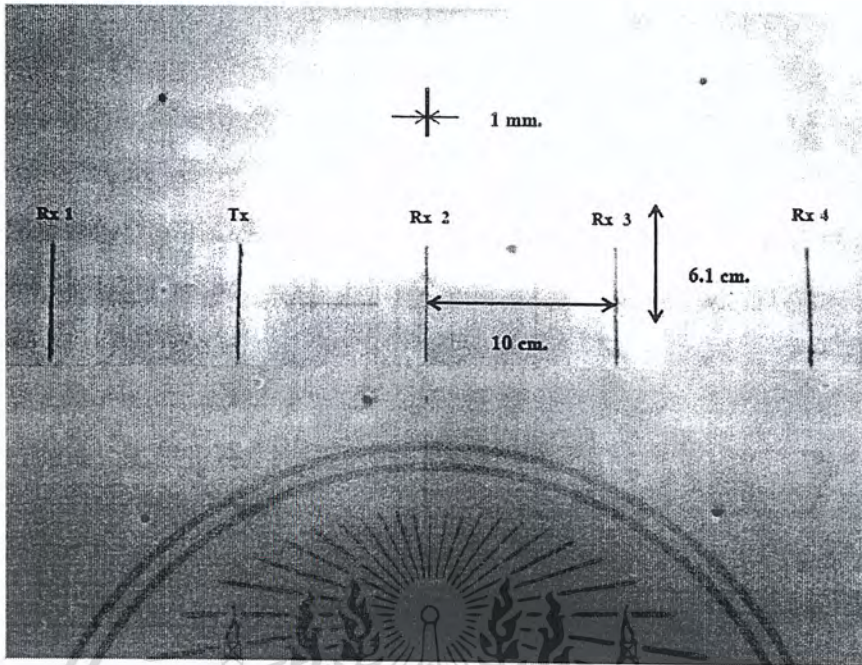
#### 3.3.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศร่อง

การออกแบบสายอากาศร่องให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเราจะกำหนดให้ระนาบกราวด์มีขนาด  $(10\lambda)$   $120 \times 120$  ตารางเซนติเมตร ที่บริเวณจุดกึ่งกลางแผ่นระนาบเสาร่องที่ความกว้าง 1 มิลลิเมตร ความยาวร่อง 6.1 เซนติเมตร จำนวน 5 ร่องในแต่ละร่องห่างกัน 10 เซนติเมตร จากโครงสร้างสายอากาศร่องไม่สามารถป้อนสัญญาณคลื่นได้โดยตรงที่บริเวณปากร่อง ดังนั้นจึงได้ออกแบบใช้สายป้อนไมโครสตริป (Microstrip feed) ป้อนสัญญาณคัปปลิงไปยังปากสายอากาศร่องแทน โดยใช้แผ่นพิมพ์เอพอาร์โพร์ (FR4) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.36 ค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับ 0.01178 แผ่นพิมพ์หนา 0.8115 มิลลิเมตร ที่สายป้อนไมโครสตริปกำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม กว้าง 2.8 มิลลิเมตร ระยะจากตัวต่อ SMA ถึงมุมฉากยาว 6 เซนติเมตร ช่วงสายไมโครสตริปพาดผ่านร่องยาว 4 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างสายป้อนเป็น 11 เซนติเมตร สายป้อนทั้งหมดมีจำนวนเท่ากับร่องของสายอากาศที่สร้างขึ้น ซึ่งชุดที่เป็นสายอากาศไมโครสตริปจะมีขนาด  $10 \times 50$  ตารางเซนติเมตร ในการออกแบบได้จำลองส่วนประกอบของโครงสร้างสายอากาศทีละส่วนแล้วนำมาประกอบร่วมกัน

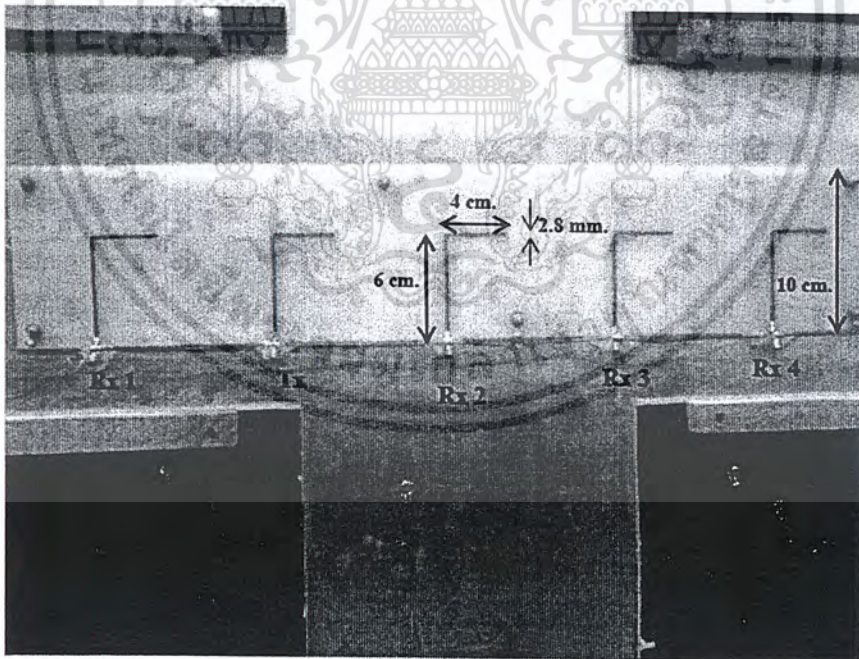
ในส่วนการสร้างเสาอากาศทำตามที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 0.5 มิลลิเมตรมาทำเป็นแผ่นระนาบกราวด์และชุดสายป้อนไมโครสตริป



รูปที่ 3.9 โครงสร้างสายอากาศร่อง



รูปที่ 3.10 ขนาดของร่อง



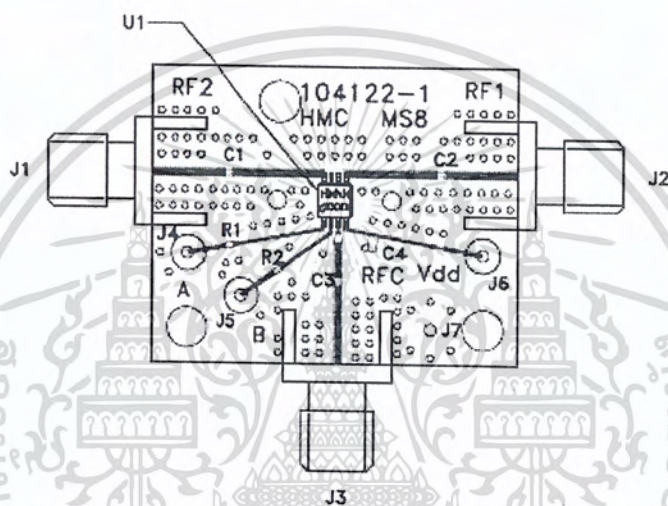
รูปที่ 3.11 สายป้อนไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

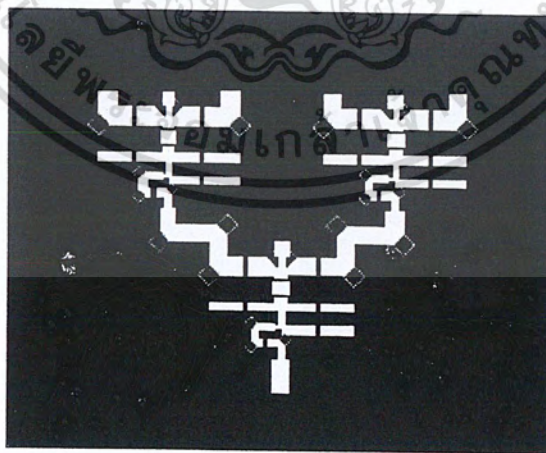
### 3.4 วงจร RF switch

#### 3.4.1 การออกแบบ RF switch

เพื่อเก็บข้อมูลจากสายอากาศ แต่ละ slot เพื่อนำมา เปรียบเทียบเฟสกับอ้างอิงที่ slot ที่ 1 กับ slot อื่นๆ โดยทำการออกแบบจาก สวิตซ์ 2 ทาง แล้วนำมาเข้าสวิตซ์อีกครั้ง เพื่อเลือกรับได้ 4 slot



รูปที่ 3.12 RF switch 2 ch ตามแบบ datasheet



รูปที่ 3.13 RF switch 4 ch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในการวัดผลการทดลองของสายอากาศในโครงการนี้จะเครื่องมือในการวัดผลดังนี้

- นำสายอากาศที่ออกแบบไว้ มาส่งและรับ
- เครื่อง Generator
- เครื่อง Oscilloscope
- เครื่อง Down convert
- สาย Coaxial
- ห้อง Chamble
- Directional coupler
- ชุด Calibrate kit
- ถังข้าวเปลือก
- โลหะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 7, 12 เซนติเมตร

### 3.6 การจัดเก็บผลการทดลอง

- 1) เตรียมอุปกรณ์และทดสอบในห้อง anechoic chamble



รูปที่ 3.14 จัดเตรียมถังข้าวเปลือกและลูกเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทำการ Calibrate เครื่อง Oscilloscope และทำการต่อสายอากาศร่องเข้ากับเครื่อง

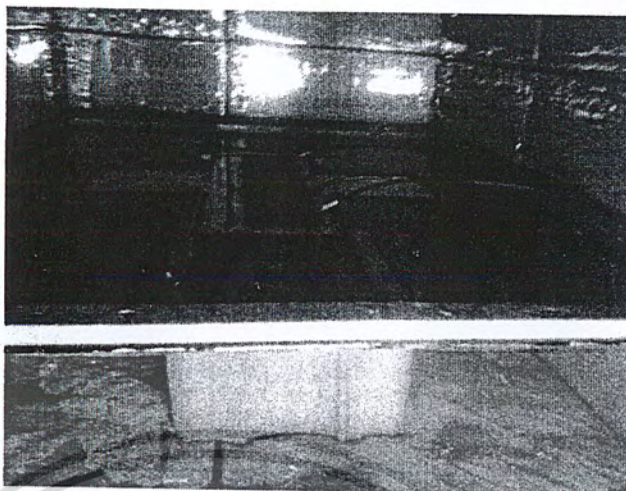


รูปที่ 3.15 Calibrate เครื่อง Oscilloscope

3) ทำการฝังวัดทรนกลมโลหะ 3 ขนาด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4,7,12 เซนติเมตร ลงในข้าวเปลือก และฝังลึกในระยะ 10, 2.5, 5, 7.5, 10 เซนติเมตร

4) นำสายอากาศตัวที่ 1 (Tx) วัด Return Loss (S1, 1) โดยสายอากาศอยู่เหนือพื้นข้าวเปลือกที่มีลูกโลหะทรงกลมฝังอยู่ แล้วบันทึกผลที่อ่านได้จากเครื่อง Oscilloscope

5) วัด Scatter (S2, 1) จากสายอากาศตัวที่ 2 (Rx 1) ที่อยู่ห่างจากสายอากาศตัวแรก (Tx) ระยะ 10 เซนติเมตรในแนวระนาบ แล้วเปลี่ยนไปวัด Scatter (S2, 1) จากสายอากาศตัวอื่นจนครบทุกตัว



รูปที่ 3.16 การวัดค่า Return loss และ ค่า Scatter จากสายอากาศ

- 6) ทำซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 4) ข้อ 5) โดยเปลี่ยนขนาดของวัตถุโลหะทรงกลมทั้งสามขนาด และที่ความถี่ทั้งสองความถี่ แล้วบันทึกผลที่อ่านได้จากเครื่อง Oscilloscope ลงตารางเขียนกราฟแสดงผล
- 7) นำค่าที่ได้จากการทดลองไปทำเป็นตารางข้อมูล
- 8) ข้อมูลที่บันทึกจะมีขนาดและเฟส รวมถึงผลจากสายอากาศตัวอื่นๆ จึงต้องทำการลบค่าจากการสะท้อนของผิวขั้วเปลือกและการส่งผ่านของสายอากาศตัวอื่น
- 9) นำค่าที่ได้จากการแปลงค่าไปจัดเก็บเป็นฐานข้อมูลเพื่อประมวลผล

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการจะเป็นการบันทึกค่าทดลองและผลที่ได้จากการทดสอบรวมทั้งตรวจสอบสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียย้อนกลับและค่าภายในห้องปฏิบัติการ โครงการงาน เพื่อประเมินคุณภาพการใช้งาน

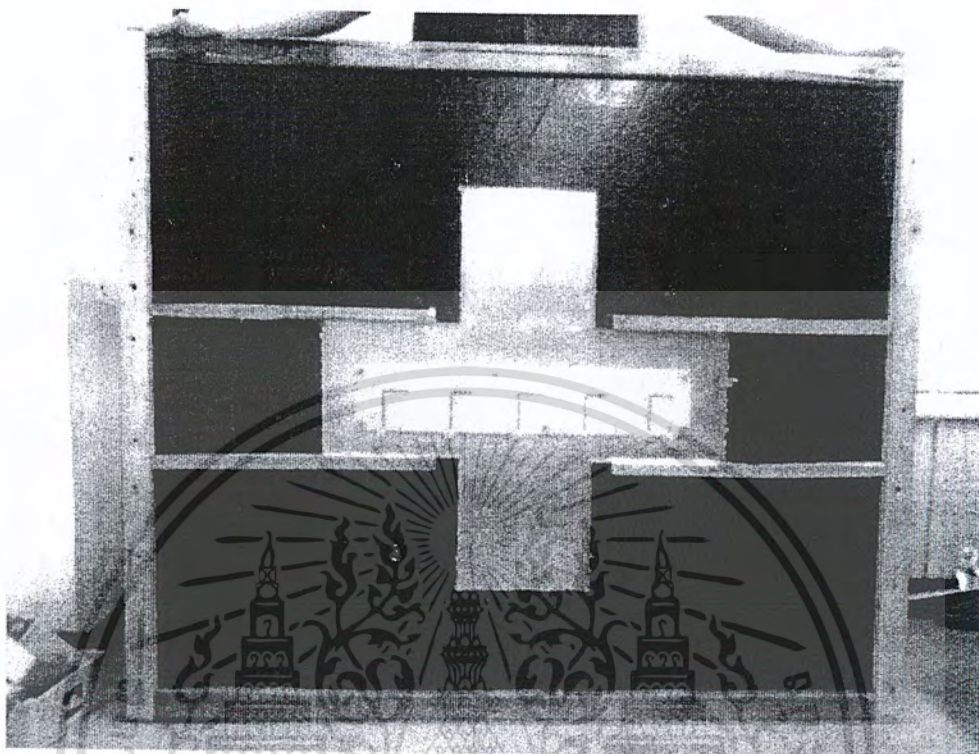
#### 4.1 การสร้างและทดสอบคุณสมบัติสายอากาศ

สายอากาศที่นำมาทดสอบมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 4.1 ซึ่งได้นำมาทดสอบ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่แต่ละตัว



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

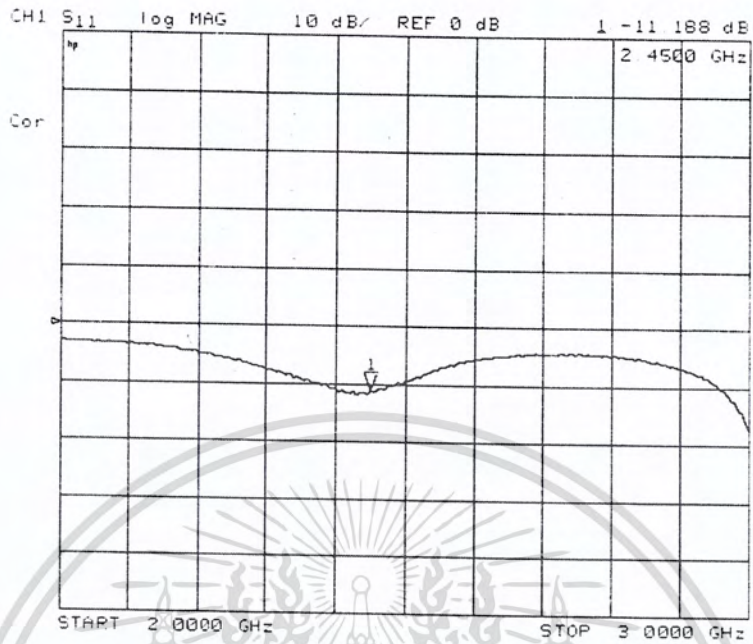
รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศที่ใช้ทดสอบ

(ก) รูปด้านหน้า (ข) รูปด้านหลัง

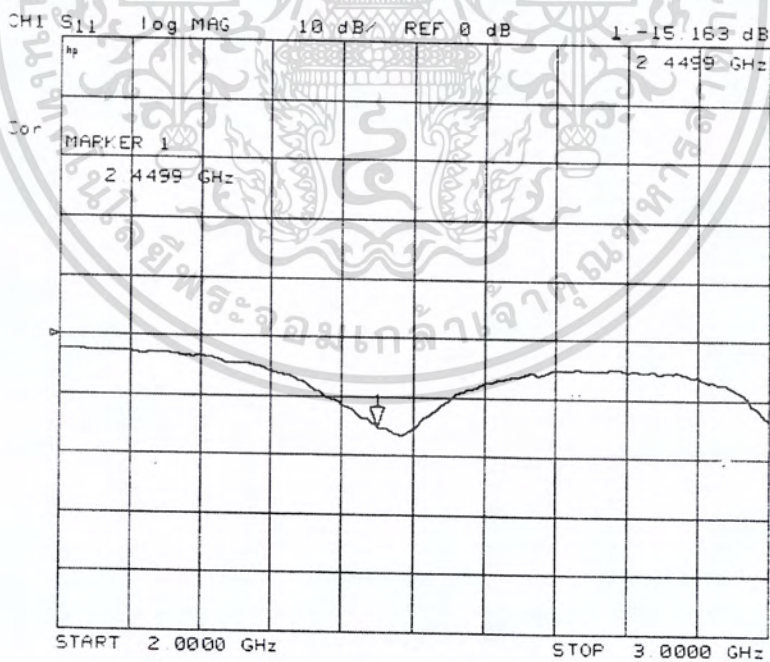
#### 4.1.1 ความสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียย้อนกลับของ ผลที่ได้จากการวัด จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้นี้สามารถยอมรับได้ เนื่องจากมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งค่านี้เองจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศมีค่าไม่เกิน 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

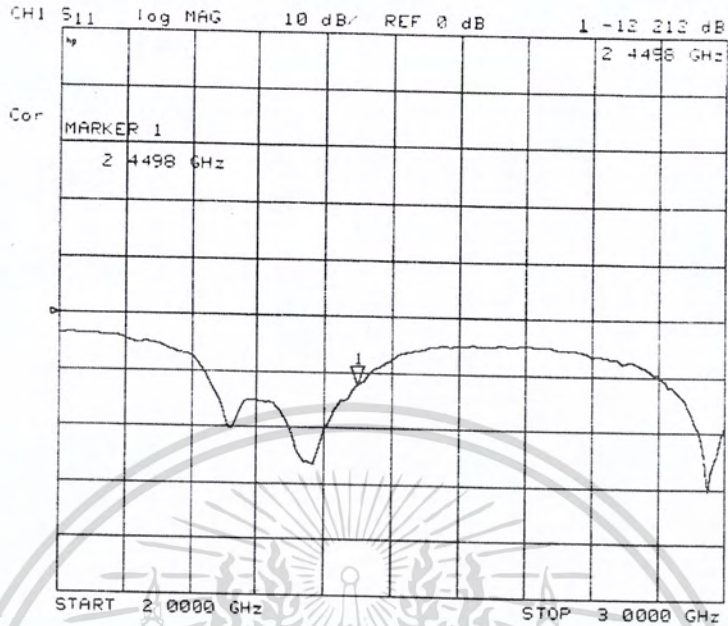


รูปที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ slot ที่ 1

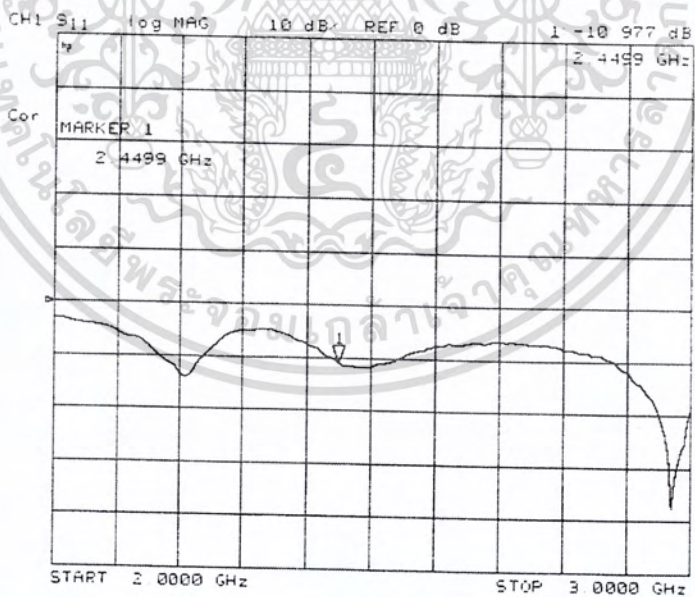


รูปที่ 4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ slot ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

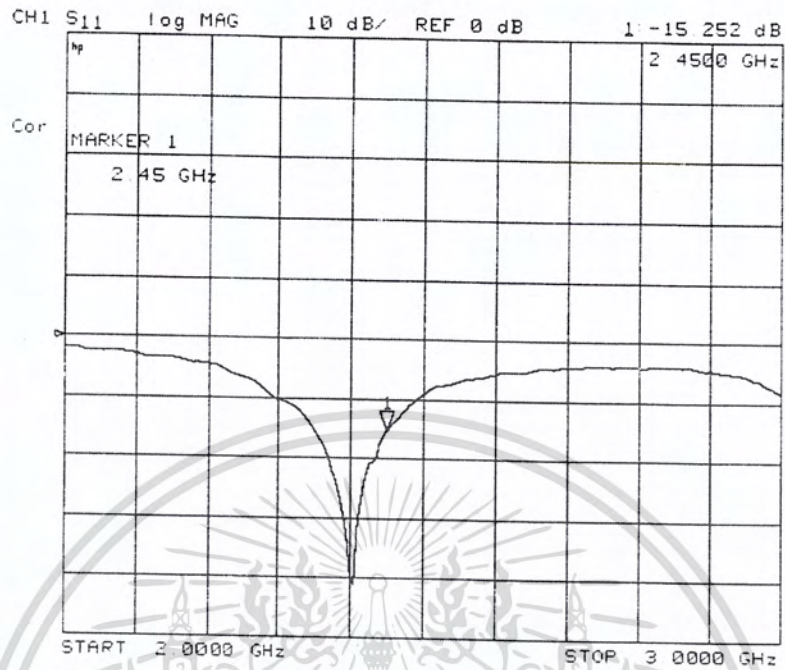


รูปที่ 4.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ slot ที่ 3



รูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ slot ที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ slot ที่ 5

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ลำดับที่	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ Return loss (dB)	ค่าอิมพีแดนซ์ Impedance ( $\Omega$ )	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง SWR
1	-11.188	49.77+j8.81	1.673
2	-15.163	46.07+j5.44	1.417
3	-12.212	44.68+j3.28	1.541
4	-10.977	47.22+j0.48	1.789
5	-15.252	47.04+j0.13	1.428

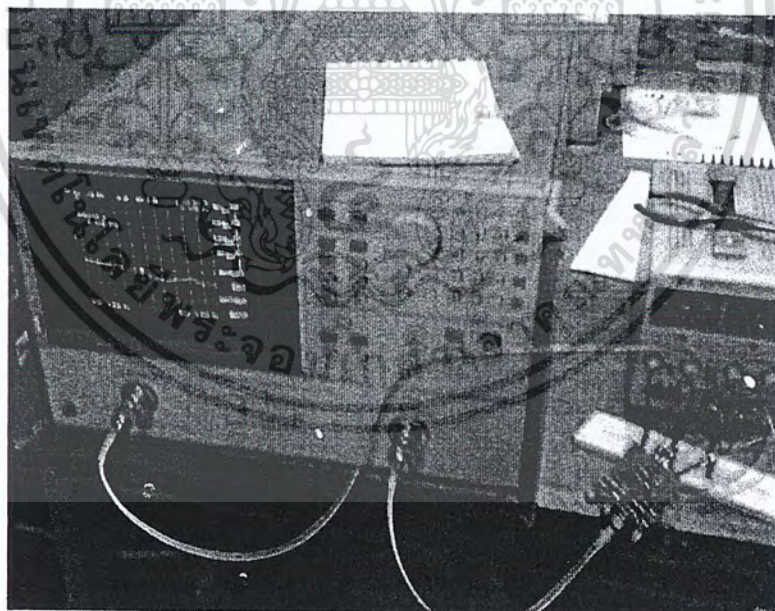
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วงจร RF Switch

ในส่วนนี้เป็นการทำวงจร RF switch เพื่อเลือกรับค่าจากสายอากาศ slot ต่างๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบเฟสกับ สายอากาศ slot ที่ 1 โดยผลการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ การส่งผ่านของ RF switch

port ที่ 1	port ที่ 2	port ที่ 3	port ที่ 4
-17.3 dB	-22.5 dB	-21.3 dB	-29.02 dB
-21.24 dB	-16.93 dB	-21.81 dB	-32.44 dB
-22.21 dB	-23.55 dB	-18.65 dB	-16.35 dB
-22.87 dB	-19.88 dB	-15.81 dB	-33.15 dB

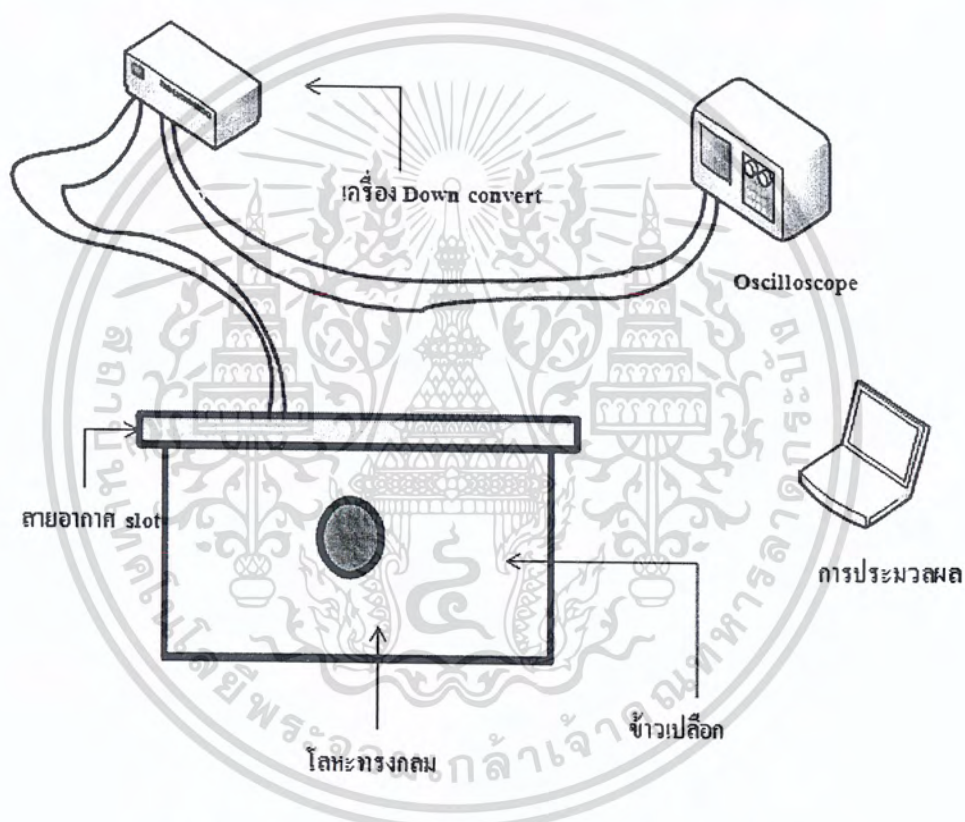


รูปที่ 4.7 การทำสอบ วงจร RF switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 การวิเคราะห์หาวัตถุโลหะทรงกลมในข้าวเปลือก

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์หารูปแบบของวัตถุโลหะทรงกลมโลหะในข้าวเปลือก สำหรับการทดลองในกรณีนี้ได้ใช้โลหะทรงกลม 3 ขนาด คือ 4 เซนติเมตร ,7เซนติเมตร และ 12 เซนติเมตร โดยทำการทดลองฝังไว้ที่ความลึกต่างๆ ไม่เกิน 10 เซนติเมตรตามรูปที่ 4.7 หากค่าสูญเสียย้อนกลับ  $S(1,1)$  และค่าการกระเจิง  $S(2,1)$  โดยบันทึกค่า จากเครื่อง Oscilloscope

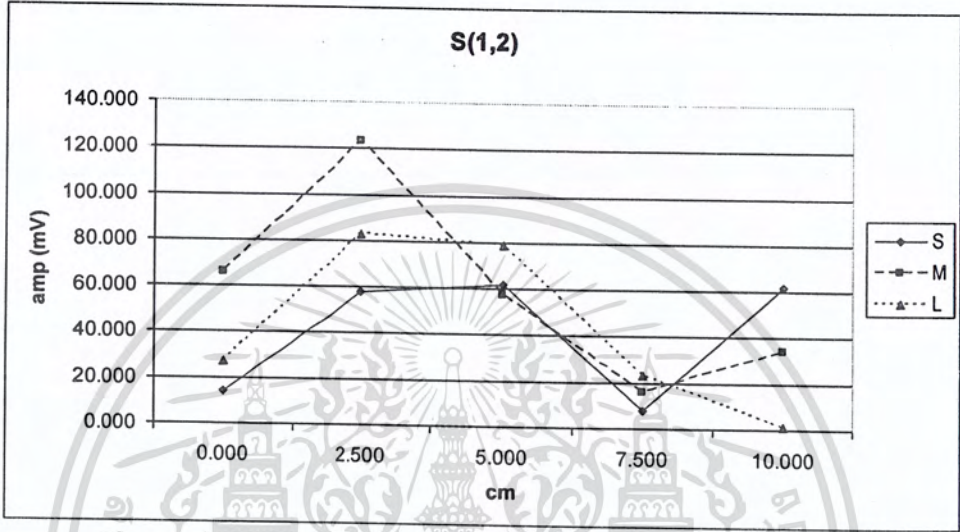


รูปที่ 4.8 การทดสอบหาวัตถุโลหะทรงกลมในข้าวเปลือก

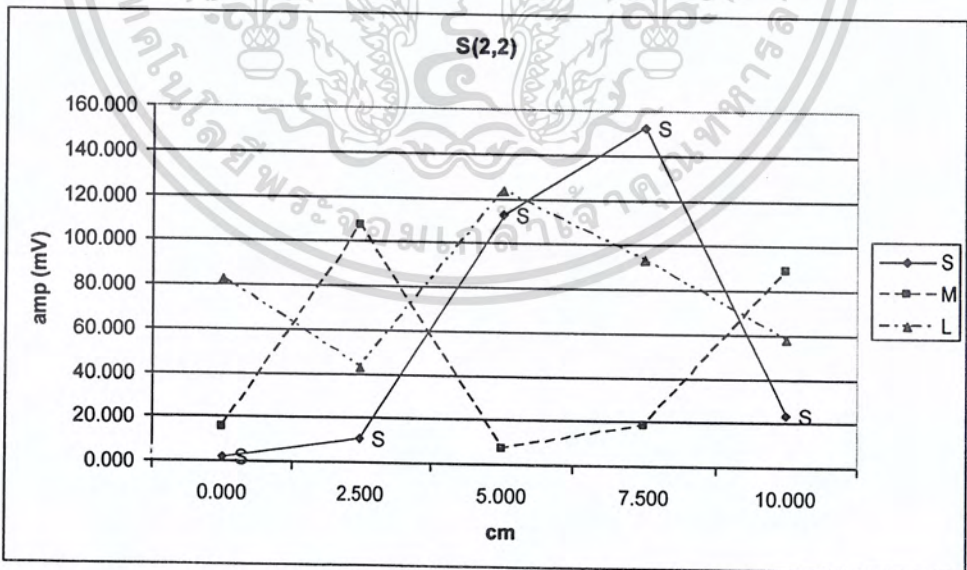
ในการวิเคราะห์รูปแบบนั้นจะทำการหาขนาดวัตถุ โดยการสังเกตค่าสูญเสียย้อนกลับ  $S(1,1)$  ณ จุดตำแหน่งที่วัตถุถูกฝังอยู่แล้วหาค่าการกระเจิง  $S(2,1)$  ทั้งขนาดและเฟส โดยให้สายอากาศตัวส่งอยู่ในตำแหน่งเดียวกับวัตถุแล้วเก็บค่าต่างๆมาทำการทำการขจัดผลของอากาศ นำผลการทดลองมาเขียนกราฟได้ดังต่อไปนี้

### 4.3.1 วิเคราะห์ค่าการกระเจิง

#### 4.3.1.1 การเปรียบเทียบค่าตามขนาดวัตถุ

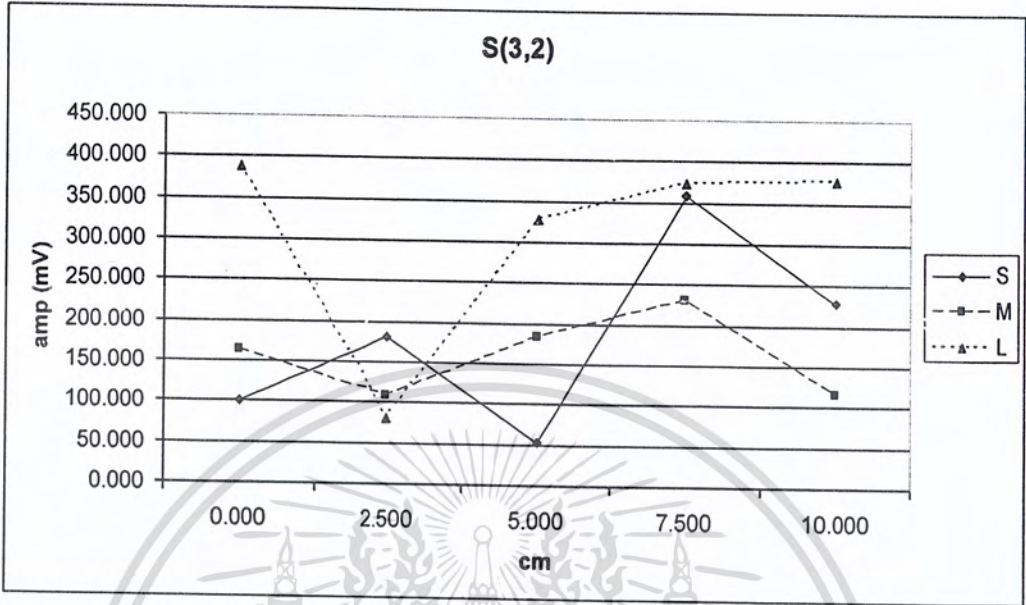


รูปที่ 4.9 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ slot ที่ 1

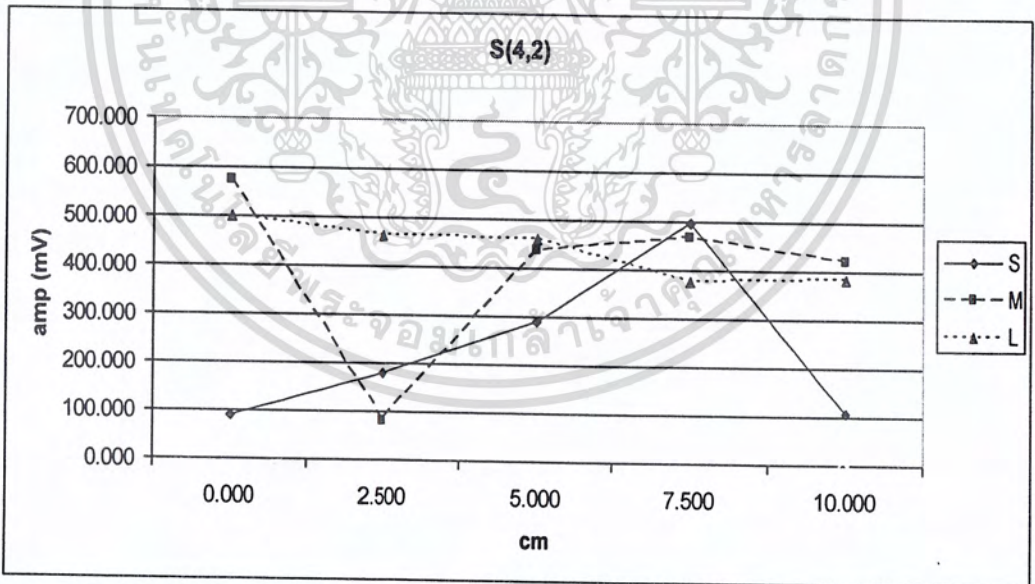


รูปที่ 4.10 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ slot ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

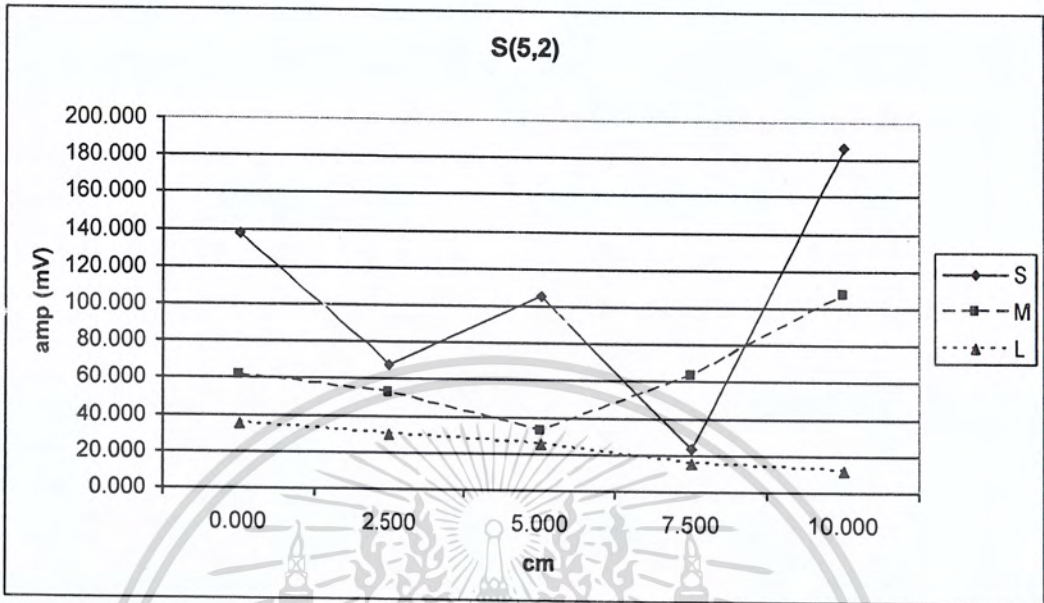


รูปที่ 4.11 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ slot ที่ 3

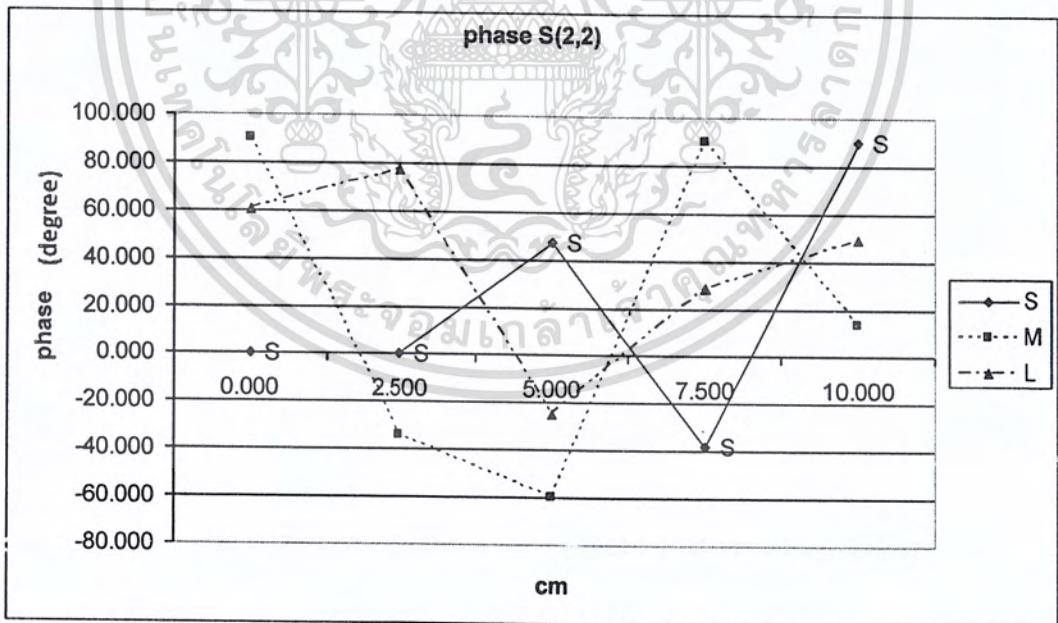


รูปที่ 4.12 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ slot ที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

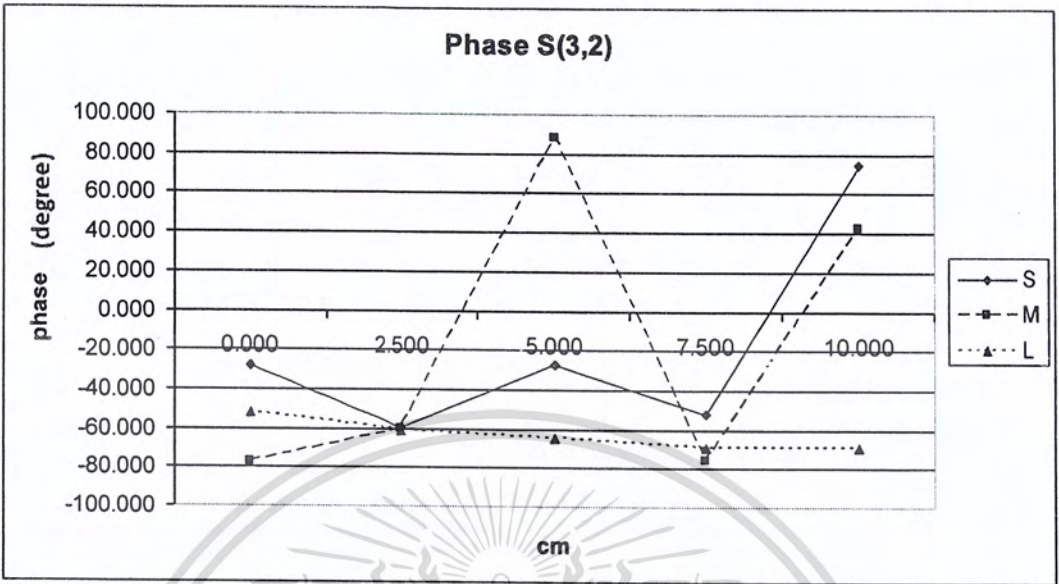


รูปที่ 4.13 ค่าที่รับได้จากสายอากาศ slot ที่ 5

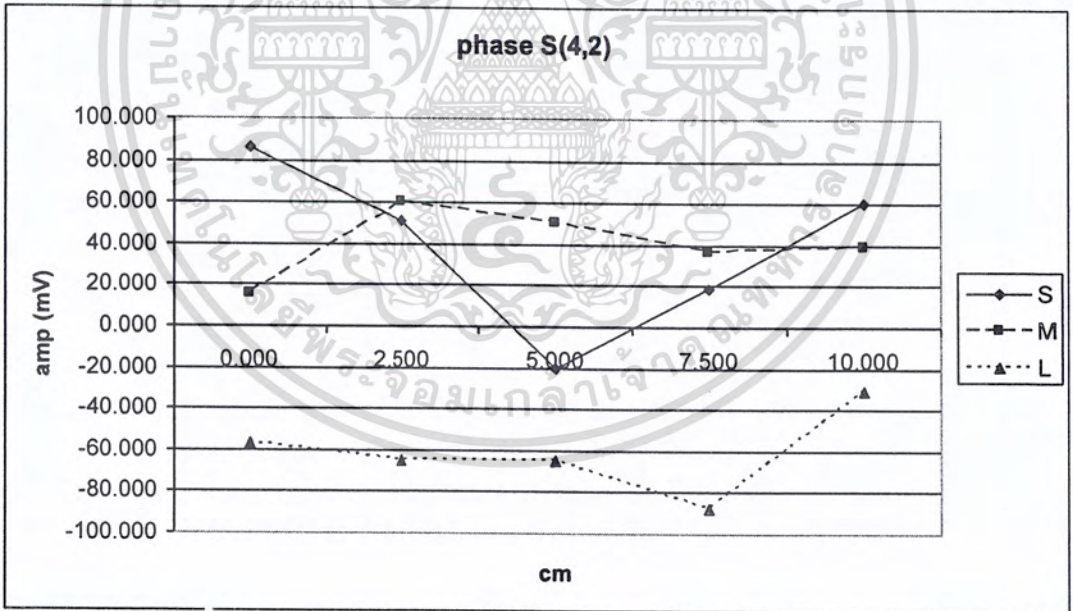


รูปที่ 4.14 ค่าเฟสของ slot ที่ 2 เทียบกับตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

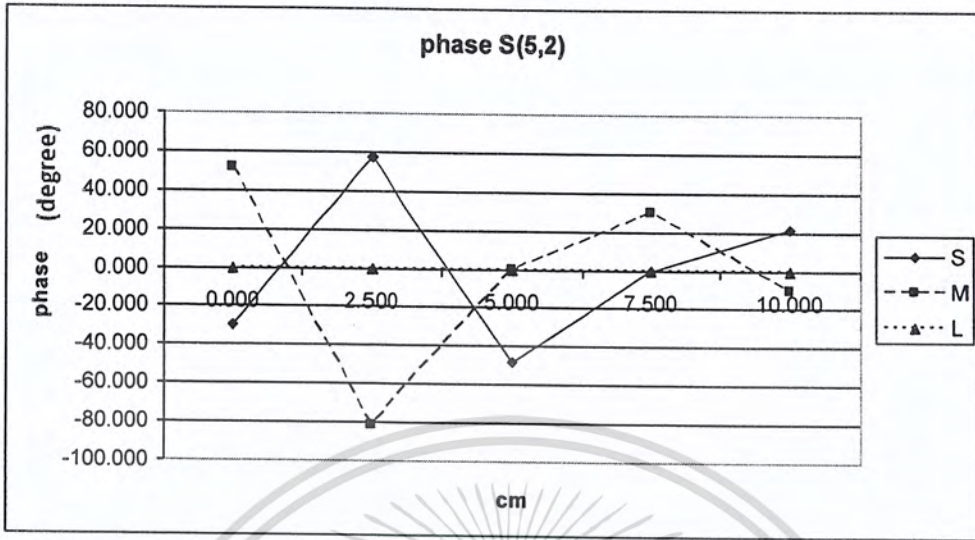


รูปที่ 4.15 ค่าเฟสของ slot ที่ 3 เทียบกับตัวที่ 1



รูปที่ 4.16 ค่าเฟสของ slot ที่ 4 เทียบกับตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าเฟสของ slot ที่ 5 เทียบกับตัวที่ 1

จากรูปที่ 4.9 – 4.17 เป็นการเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดและเฟส ของโลหะทรงกลม 3 ขนาด คือ 4 cm, 7 cm, 12cm ที่ระยะความลึก 0 cm, 2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm ,10 cm ซึ่งนำข้อมูลชุดนี้ไปทำเป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมเมทแลปเพื่อเป็นตัวประมวลผลในการเปรียบเทียบค้นหาขนาดวัตถุ

### 4.3.2 ฐานข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ฐานข้อมูลการสะท้อนของโลหะทรงกลมขนาดเล็ก

slot	S0		S2.5		S5		S7.5		S10	
	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)
S(2,2)	2.000	0.000	11.000	0.000	112.539	47.521	152.319	-38.195	23.000	90.000
S(1,2)	14.000	0.000	58.000	0.000	62.000	0.000	8.000	0.000	62.000	0.000
S(3,2)	100.051	-28.164	181.519	-59.180	53.566	-27.149	358.454	-52.139	228.272	74.501
S(4,2)	91.280	86.042	180.786	51.130	291.179	-20.617	498.173	18.655	106.000	60.000
S(5,2)	137.928	-29.539	67.359	57.119	104.995	-47.745	23.000	0.000	186.075	21.435

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ฐานข้อมูลการสะท้อนของโลหะทรงกลมขนาดกลาง

slot	M0		M2.5		M5		M7.5		M10	
	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)
S(2,2)	15.000	90.000	107.251	-33.919	7.000	-60.000	18.000	90.000	89.055	13.757
S(1,2)	66.000	0.000	123.000	0.000	57.000	0.000	16.000	0.000	34.000	0.000
S(3,2)	163.099	-77.284	108.000	-60.000	182.518	88.252	230.480	-75.863	114.545	42.100
S(4,2)	571.881	15.778	80.000	60.000	437.875	50.801	466.402	36.587	419.189	39.059
S(5,2)	60.973	51.927	52.214	-81.924	32.000	0.000	63.000	30.000	107.240	-10.748

ตารางที่ 4.5 ฐานข้อมูลการสะท้อนของโลหะทรงกลมขนาดใหญ่

slot	L0		L2.5		L5		L7.5		L10	
	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)	Amplitude (mV)	Phase (degree)
S(2,2)	82.302	-60.362	43.007	77.575	123.467	-24.889	93.059	28.217	58.122	48.963
S(1,2)	27.000	0.000	83.000	0.000	79.000	0.000	23.000	0.000	1.000	0.000
S(3,2)	388.104	-51.696	80.454	-60.726	326.914	-65.089	372.512	-69.325	376.161	-69.074
S(4,2)	498.959	-56.531	464.151	-65.232	459.616	-64.971	375.714	-87.951	381.700	-30.627
S(5,2)	35.000	0.000	30.000	0.000	25.000	0.000	15.000	0.000	12.000	0.000

จากตารางที่ 4.2 – 4.5 ข้อมูลของสายอากาศ slot 1-5 ทั้ง ขนาดและเฟส โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย แล้วจัดเก็บเป็นฐานข้อมูลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อระบุขนาดและความลึกของโลหะทรงกลม 3 ขนาดดังกล่าว จากข้อมูลของเฟส จะเห็นได้ว่า มีทั้งที่เป็นค่าบวก และค่าลบ ค่าบวกเกิดจากเฟสของการกระเจิง นำเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่เพื่อทดสอบ ส่วนค่าที่เป็นลบเกิดจากเฟสของการกระเจิงตามเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่เพื่อทดสอบ

### 4.3.3 ความผิดพลาด

จากการทดลองฟังวัตถุ ตามกรณีต่างๆ ตามที่บันทึกในฐานข้อมูล จำนวน 10 ตัวอย่าง แล้วนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลป เพื่อหาขนาดและความถี่ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.6 การสุ่มตัวอย่างค้นหา

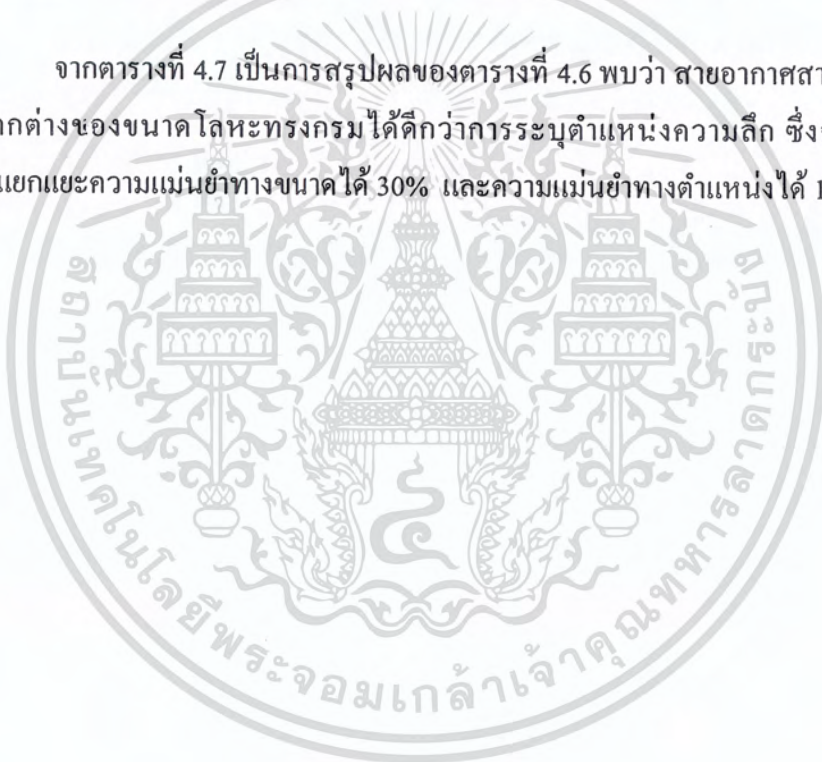
	S2.5	L0	M2.5	M7.5	L2.5	S0	M0	M5	S5	M10
Slot1	2.5			7.5			M	M	5	M
Slot2				7.5		S	M			M
Slot3		ถูกต้อง			L	0	0			
Slot4	ถูกต้อง		ถูกต้อง	7.5	L	S				
Slot5	ถูกต้อง		M			S	0		S	
Phase2	S	0								
Phase3					L	0		M	S	
Phase4			M	M		0		M		
Phase5				ถูกต้อง		0	M	M		M

จากตารางที่ 4.6 คือค่าที่แสดงจากการสุ่มฟัง โลหะทรงกลมทั้ง 3 ขนาด ที่ความถี่ต่างๆ แล้วทำการทดลอง เก็บผล ขนาดและเฟส จากนั้นนำมาประมวลผลผ่านโปรแกรมแมทแลป ซึ่งเป็นการแสดงผลการค้นหา 1 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่าง ตัวเลขที่แสดง (0, 2.5, 5, 7.5) หมายความว่า ทำนายตำแหน่ง (ความถี่) ได้ถูกต้อง ตัวอักษรที่แสดง (S, M, L) หมายความว่า ทำนายขนาดได้ถูกต้อง และคำว่าถูกต้อง หมายถึงสามารถบอกทั้งขนาดและตำแหน่ง (ความถี่) ได้ถูกต้อง ซึ่งผลการทดสอบมีความแม่นยำไม่มากนัก โดยจะสามารถแยกความแตกต่างของขนาดได้ดี แต่ยังระบุความถี่ได้ไม่ถี่เท่าที่ควร และสามารถทำนายได้ถูกต้องเมื่อฟังที่ถี่ มากกว่าการฟังที่ถี่

ตารางที่ 4.7 สรุปผลเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการตรวจสอบ

Slot1		Slot2		Slot3		Slot4		Slot5	
ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ
30%	30%	30%	10%	20%	30%	40%	30%	40%	10%
Phase2		Phase3		Phase4		Phase5			
ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ	ขนาด	ระยะ		
10%	10%	30%	10%	30%	10%	40%	20%		

จากตารางที่ 4.7 เป็นการสรุปผลของตารางที่ 4.6 พบว่า สาขาอากาศสามารถแยกแยะความแตกต่างของขนาดโลหะทรงกลมได้ดีกว่าการระบุตำแหน่งความลึก ซึ่งจากตัวอย่างนี้สามารถแยกแยะความแม่นยำทางขนาดได้ 30% และความแม่นยำทางตำแหน่งได้ 17.7%



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากทฤษฎีต่างๆ ที่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างชิ้นงานและเก็บผลการทดลอง ทำให้ทางผู้จัดทำได้ทราบว่า ในทางทฤษฎีกับทางปฏิบัตินั้นจะมีความแตกต่างกัน มีปัญหาและความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นหลายประการ ทำให้ต้องใช้ความอดทนในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

#### 5.1 สรุป

ผลสรุปการทดลองระบบการค้นหาวัดดูโลหะทรงกลม โดยใช้สายอากาศร่องทำงานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz วัดดูประสงค์เพื่อต้องการนำไปค้นหาและระบุขนาดวัตถุที่ถูกฝังโดยอาศัยหลักการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การสะท้อนและการกระเจิงของคลื่น เริ่มต้นด้วยการค้นหาวัดดูโดยการพิจารณาค่าความสูญเสียย้อนกลับ โดยการตั้งสมมุติฐานว่าหากพบตำแหน่งของวัตถุ ค่าดังกล่าวนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจึงพิจารณาการกระเจิงของคลื่นเพื่อวิเคราะห์หาขนาด โดยใช้สายอากาศ slot ที่เหลือ มารับค่า สำหรับโครงการนี้ได้ทดลองโดยใช้วัตถุทรงกลมโลหะ 3 ขนาด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm, 7 cm และ 12 cm และใช้ข้าวเปลือกในการฝังวัตถุดังกล่าวเป็นระยะ 0 cm, 2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm และ 10 cm โดยทำการเก็บบันทึกค่าเป็นฐานข้อมูล ซึ่งการวัดและเก็บแต่ละครั้งไม่ตรงกันทำให้เป็นปัญหาสำหรับความแม่นยำและความถูกต้องของฐานข้อมูล ที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบอ้างอิงต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการทดสอบสายอากาศร่องโดยใช้ที่ย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ทั้งนี้อาจเกิดความผิดพลาดจากการใช้งานที่ใช้ เป็นย่านเดียวกับความถี่ไวเลต เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณในการทำการทดลอง ดังนั้นจึงต้องลดผลกระทบให้น้อยที่สุด โดยการทดลองในห้อง ป้องกันสัญญาณรบกวน สำหรับการทดลอง

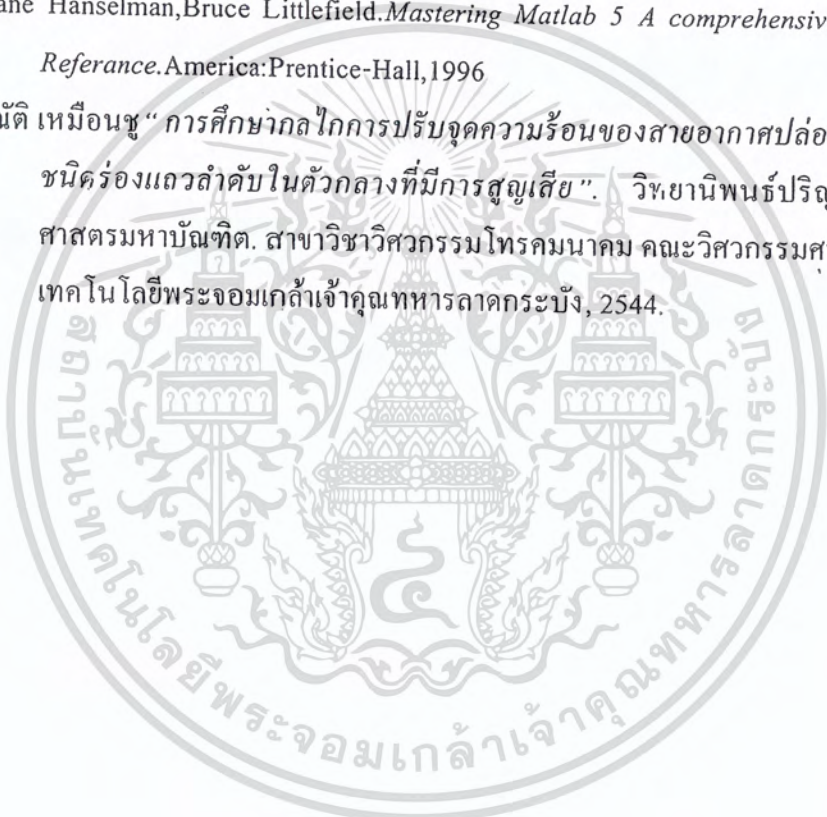
ส่วนการฝังวัตถุ โลหะทรงกลมในข้าวเปลือกนั้นอาจเป็นเพราะพื้นผิวในการฝังไม่เรียบ การฝังที่ให้ได้ระยะที่แม่นยำทำได้ยาก และย่านความถี่ที่ใช้มีค่าความยาวคลื่นสั้นรวมถึงกำลังส่งค่อนข้างต่ำ ปัญหาดังกล่าวเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนและการระบุที่ระยะลึกๆ เนื่องจากคลื่นส่งผ่านพื้นผิวไปได้น้อย

ในส่วนของโปรแกรมประมวลผลเพื่อตัดสินใจ อัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ และฐานข้อมูลยังไม่เที่ยงตรง ทำให้ระบบการบอกขนาดวัตถุไม่ถูกต้อง ซึ่งอาจต้องมีการพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อหาจุดที่ถูกต้องและระบบให้มีความแม่นยำมากขึ้น

การวัดผลจากสายอากาศ ในการอ่านค่าเฟสจะต้องอ่านค่าโดยการคำนวณจากค่าคาบที่ได้จากเครื่อง Oscilloscope เพื่อความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] ศ.ดร. โม ไนย ไกรฤกษ์. *วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*. กรุงเทพฯ : พิมพ์สวย, 2544.
- [2] ทีมสมาร์ทเลิร์นนิ่ง. *เรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ด้วยภาษาCพร้อมโครงการ* . พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: หัวหุ้นส่วนสามัญสมาร์ทเลิร์นนิ่ง, 2543.
- [3] Balanis, Constantine A. *Advanced engineering electromagnetics*. America: Hamilton Printing, 1938
- [4] Duane Hanselman, Bruce Littlefield. *Mastering Matlab 5 A comprehensive tutorial and Reference*. America: Prentice-Hall, 1996
- [5] อาณัติ เหมือนชู “ การศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศปลายคลื่นแอกทีฟ ชนิดร่องแฉกลำดับในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.





ภาคผนวก ก

โปรแกรมคำนวณหาค่าสนามการกระเจิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกเล็ก (4 cm)  
ที่ระยะ 1 เมตร

```
clear all;
```

```
clc ;
```

```
betaa=0.04;
```

```
betar=1;
```

```
E0=1 ;
```

```
n=input('n =');
```

```
an=j^n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
```

```
J = besselj(n,betaa);
```

```
H = besselh(n,2,betaa);
```

```
cn=-an*(J/H);
```

```
Jn=(besselj(n-0.5,betaa))-(((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
```

```
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
```

```
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
```

```
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
```

```
Hd=Jd-j*Nnd;
```

```
bn=-an*(Jd/Hd);
```

```
for n=1:n
```

```
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n)* ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
```

```
end
```

```
X=sum(x);
```

```
display(X);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
```

```
Ethe=s*X;
```

```
display(Ethe);
```

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหาสนามกระเจิงจากตัวนำทรงกลมขนาดกลาง (7 cm) ที่ระยะ 1 เมตร

```
clear all;
```

```
clc ;
```

```
betaa=0.07;
```

```
betar=1;
```

```
E0=1 ;
```

```
n=input('n =');
```

```
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
```

```
J = besselj(n,betaa);
```

```
H = besselh(n,2,betaa);
```

```
cn=-an*(J/H);
```

```
Jn=(besselj(n-0.5,betaa)-(((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
```

```
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
```

```
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi)-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
```

```
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
```

```
Hd=Jd-j*Nnd;
```

```
bn=-an*(Jd/Hd);
```

```

for n=1:n
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n)* ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);

s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกใหญ่ (12 cm)
ที่ระยะ 1 เมตร

clear all;
clc ;

betaa=0.04;
betar=6.3;
E0=1 ;
n=input('n =');
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
J = besselj(n,betaa);
H = besselh(n,2,betaa);
cn=-an*(J/H);
Jn=(besselj(n-0.5,betaa)-(((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa)));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Jd=((pi*betaa/2)^0.5)*Jn+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
Hd=Jd-j*Nnd;
bn=-an*(Jd/Hd);

```

```

for n=1:n
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n) * ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);
s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

```

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกเล็ก (4 cm) ที่ระยะ 6.3 เมตร

```
clear all;
```

```
clc ;
```

```
betaa=0.04;
```

```
betar=6.3;
```

```
E0=1 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

n=input('n =');
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
J = besselj(n,betaa);
H = besselh(n,2,betaa);
cn=-an*(J/H);
Jn=(besselj(n-0.5,betaa)-((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
Hd=Jd-j*Nnd;
bn=-an*(Jd/Hd);
for n=1:n
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n)* ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);

s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกกลาง (7 cm)  
ที่ระยะ 6.3 เมตร

```
clear all;
```

```
clc ;
```

```
betaa=0.07;
```

```
betar=6.3;
```

```
E0=1 ;
```

```
n=input('n =');
```

```
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
```

```
J = besselj(n,betaa);
```

```
H = besselh(n,2,betaa);
```

```
cn=-an*(J/H);
```

```
Jn=(besselj(n-0.5,betaa))-(((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
```

```
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
```

```
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
```

```
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
```

```
Hd=Jd-j*Nnd;
```

```
bn=-an*(Jd/Hd);
```

```
for n=1:n
```

```
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n)* ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
```

```
end
```

```
X=sum(x);
```

```
display(X);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
```

```
Ethe=s*X;
```

```
display(Ethe);
```

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกใหญ่ (12 cm) ที่ระยะ 6.3 เมตร

```
clear all;
```

```
clc ;
```

```
betaa=0.12;
```

```
betar=6.3;
```

```
E0=1 ;
```

```
n=input('n =');
```

```
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
```

```
J = besselj(n,betaa);
```

```
H = besselh(n,2,betaa);
```

```
cn=-an*(J/H);
```

```
Jn=(besselj(n-0.5,betaa)-((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
```

```
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
```

```
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
```

```
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
```

```
Hd=Jd-j*Nnd;
```

```
bn=-an*(Jd/Hd);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for n=1:n
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n) * ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);

s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

```

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกเล็ก (4 cm) ที่ระยะ 63 เมตร

```

clear all;
clc ;

betaa=0.04;
betar=63;
E0=1 ;
n=input('n =');
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
J = besselj(n,betaa);
H =esselh(n,2,betaa);
cn=-an*(J/H);
Jn=(besselj(n-0.5,betaa)-(((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
Hd=Jd-j*Nnd;
bn=-an*(Jd/Hd);

```

```

for n=1:n
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n)* ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);

s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

```

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกกลาง (7 cm) ที่ระยะ 63 เมตร

```

clear all;
clc ;

betaa=0.07;
betar=63;
E0=1 ;
n=input('n =');
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

J = besselj(n,betaa);
H =esselh(n,2,betaa);
cn=-an*(J/H);
Jn=(besselj(n-0.5,betaa))-(((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa));
Jd=(((pi*betaa/2)^0.5)*Jn)+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
Hd=Jd-j*Nnd;
bn=-an*(Jd/Hd);

for n=1:n
    x(n)=(j^n) * (((-1)^n) * ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);

s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

```

โค้ด matlab สำหรับการคำนวณหา ค่าสนามกระเจิง ของตัวนำทรงกลมลูกใหญ่ (12 cm) ที่ระยะ 63เมตร

```
clear all;
```

```
clc ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

betaa=0.12;
betar=63;
E0=1 ;
n=input('n =');
an=j^-n * ((2*n)+1)/(n*(n+1));
J = besselj(n,betaa);
H = besselh(n,2,betaa);
cn=-an*(J/H);
Jn=(besselj(n-0.5,betaa))-((n+0.5)/betaa)*besselj(n+0.5,betaa);
Jd=((pi*betaa/2)^0.5)*Jn+(besselj(n+0.5,betaa))*(pi/((4*pi*betaa/2)^0.5));
Nn=((besselj(n,betaa)*cos(n*pi))-(besselj(-n,betaa)))/sin(n*pi);
Nnd=2/((pi*betaa)*Besselj(n,betaa));
Hd=Jd-j*Nnd;
bn=-an*(Jd/Hd);
for n=1:n
    x(n)=(j^n * (((-1)^n)* ((n^2+n)/2)*(bn-cn));
end
X=sum(x);
display(X);

s=j*E0*((exp(-j*betar))/betar);
Ethe=s*X;
display(Ethe);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

โปรแกรมแสดงผลการค้นหาโลหะทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ส่วนโปรแกรมฐานข้อมูลและค้นหาวัตถุ

```

clear all;
clc
D1=[ 14 58 62 8 62 66 123 57 16 34 27 83 79 23 1
2 11 112.539 152.319 23 15 107.251 7 18 89.055 82.302 43.007
123.467 93.059 58.122
0 0 47.521 -38.195 90 90 -33.919 -60 90 13.757 60.362 77.575
-24.889 28.2170 48.963
100.051 181.519 53.566 358.454 228.272 163.099 108.000 182.518
230.480 114.545 388.104 80.454 326.914 372.512 376.161
-28.164 -59.18 -27.149 -52.139 74.501 -77.284 -60 88.252 -75.863
42.1 -51.696 -60.726 -65.0890 -69.325 -69.074
91.28 180.786 291.179 498.173 106 571.881 80 437.875 466.402
419.189 498.959 464.151 459.616 375.714 381.7
86.042 51.13 -20.617 18.655 60 15.778 61 50.801 36.587 39.059
-56.531 -65.232 -64.971 -87.971 -30.627
137.928 67.359 104.995 23 -186.075 60.973 52.214 32 63 107.24 35
30 25 15 12
-29.539 -59.18 -47.745 0 21.435 51.927 -81.924 0 30 -10.748 0
0 0 0 0];

xc1=input('ampCal 1 : ');
% yc1=input('phaseCal 1 : ');
xc2=input('ampCal 2 : ');
yc2=input('phaseCal 2 : ');
xc3=input('ampCal 3 : ');
yc3=input('phaseCal 3 : ');
xc4=input('ampCal 4 : ');
yc4=input('phaseCal 4 : ');
xc5=input('ampCal 5 : ');
yc5=input('phaseCal 5 : ');

xm1=input('amp 1 : ');
% ym1=input('phase 1 : ');
xm2=input('amp 2 : ');
ym2=input('phase 2 : ');
xm3=input('amp 3 : ');
ym3=input('phase 3 : ');
xm4=input('amp 4 : ');
ym4=input('phase 4 : ');
xm5=input('amp 5 : ');
ym5=input('phase 5 : ');

ac1=xc1*cos(0*pi/180);
bc1=xc1*sin(0*pi/180);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ac2=xc2*cos(yc2*pi/180);
bc2=xc2*sin(yc2*pi/180);
```

```
ac3=xc3*cos(yc3*pi/180);
bc3=xc3*sin(yc3*pi/180);
```

```
ac4=xc4*cos(yc4*pi/180);
bc4=xc4*sin(yc4*pi/180);
```

```
ac5=xc5*cos(yc5*pi/180);
bc5=xc5*sin(yc5*pi/180);
```

```
am1=xm1*cos(0*pi/180);
bm1=xc1*sin(0*pi/180);
```

```
am2=xm2*cos(ym2*pi/180);
bm2=xm2*sin(ym2*pi/180);
```

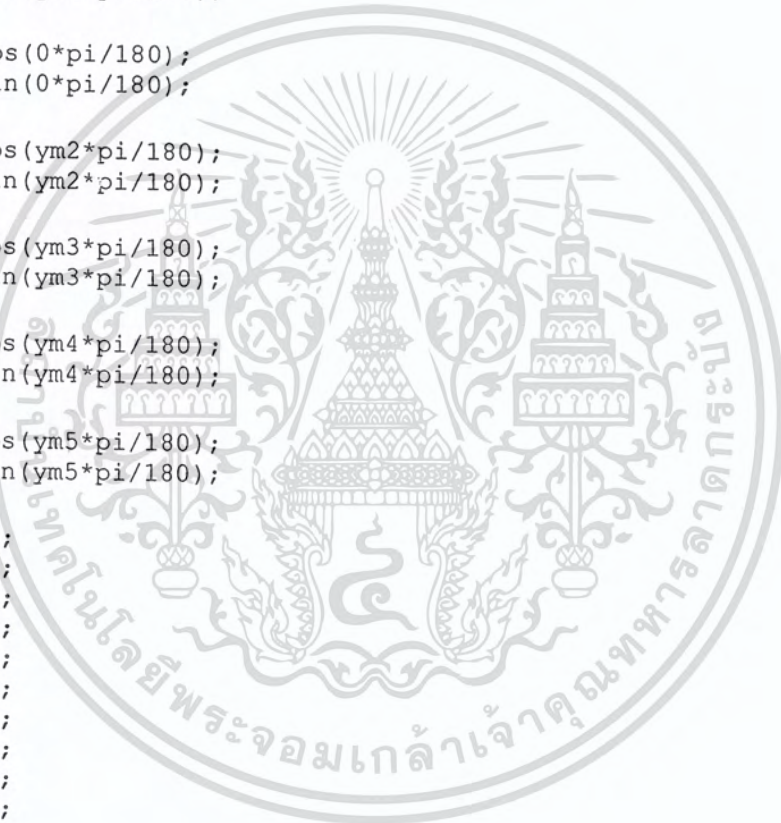
```
am3=xm3*cos(ym3*pi/180);
bm3=xm3*sin(ym3*pi/180);
```

```
am4=xm4*cos(ym4*pi/180);
bm4=xm4*sin(ym4*pi/180);
```

```
am5=xm5*cos(ym5*pi/180);
bm5=xm5*sin(ym5*pi/180);
```

```
r1=am1-ac1;
i1=bm1-bc1;
r2=am2-ac2;
i2=bm2-bc2;
r3=am3-ac3;
i3=bm3-bc3;
r4=am4-ac4;
i4=bm4-bc4;
r5=am5-ac5;
i5=bm5-bc5;
```

```
a1=(((r1)^2)+((i1)^2))^0.5;
p1=atan(i1/r1)*(180/pi);
a2=(((r2)^2)+((i2)^2))^0.5;
p2=atan(i2/r2)*(180/pi);
a3=(((r3)^2)+((i3)^2))^0.5;
p3=atan(i3/r3)*(180/pi);
a4=(((r4)^2)+((i4)^2))^0.5;
p4=atan(i4/r4)*(180/pi);
a5=(((r5)^2)+((i5)^2))^0.5;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

p5=atan(i5/r5)*(180/pi);

A=[D1(1,:)-a1].^2;
B=min(A);
C1=find(A==B);

if C1==1
    disp 'Slot 1 is Small 0 cm'
elseif C1==2
    disp 'Slot 1 is Small 2.5 cm'
elseif C1==3
    disp 'Slot 1 is Small 5 cm'
elseif C1==4
    disp 'Slot 1 is Small 7.5 cm'
elseif C1==5
    disp 'Slot 1 is Small 10 cm'
elseif C1==6
    disp 'Slot 1 is Middle 0 cm'
elseif C1==7
    disp 'Slot 1 is Middle 2.5 cm'
elseif C1==8
    disp 'Slot 1 is Middle 5 cm'
elseif C1==9
    disp 'Slot 1 is Middle 7.5 cm'
elseif C1==10
    disp 'Slot 1 is Middle 10 cm'
elseif C1==11
    disp 'Slot 1 is Large 0 cm'
elseif C1==12
    disp 'Slot 1 is Large 2.5 cm'
elseif C1==13
    disp 'Slot 1 is Large 5 cm'
elseif C1==14
    disp 'Slot 1 is Large 7.5 cm'
elseif C1==15
    disp 'Slot 1 is Large 10 cm'
end

A2=[D1(2,:)-a2].^2;
B2=min(A2);
C2=find(A2==B2);

if C2==1
    disp 'Slot 2 is Small 0 cm'
elseif C2==2
    disp 'Slot 2 is Small 2.5 cm'
elseif C2==3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        disp 'Slot 2 is Small 5 cm'
    elseif C2==4
        disp 'Slot 2 is Small 7.5 cm'
    elseif C2==5
        disp 'Slot 2 is Small 10 cm'
    elseif C2==6
        disp 'Slot 2 is Middle 0 cm'
    elseif C2==7
        disp 'Slot 2 is Middle 2.5 cm'
    elseif C2==8
        disp 'Slot 2 is Middle 5 cm'
    elseif C2==9
        disp 'Slot 2 is Middle 7.5 cm'
    elseif C2==10
        disp 'Slot 2 is Middle 10 cm'
    elseif C2==11
        disp 'Slot 2 is Large 0 cm'
    elseif C2==12
        disp 'Slot 2 is Large 2.5 cm'
    elseif C2==13
        disp 'Slot 2 is Large 5 cm'
    elseif C2==14
        disp 'Slot 2 is Large 7.5 cm'
    elseif C2==15
        disp 'Slot 2 is Large 10 cm'
    end

A3=[D1(3,:)-p2].^2;
B3=min(A3);
C3=find(A3==B3);

if C3==1
    disp 'Phase slot 2 is Small 0 cm'
elseif C3==2
    disp 'Phase slot 2 is Small 2.5 cm'
elseif C3==3
    disp 'Phase slot 2 is Small 5 cm'
elseif C3==4
    disp 'Phase slot 2 is Small 7.5 cm'
elseif C3==5
    disp 'Phase slot 2 is Small 10 cm'
elseif C3==6
    disp 'Phase slot 2 is Middle 0 cm'
elseif C3==7
    disp 'Phase slot 2 is Middle 2.5 cm'
elseif C3==8
    disp 'Phase slot 2 is Middle 5 cm'
elseif C3==9
    disp 'Phase slot 2 is Middle 7.5 cm'

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

elseif C3==10
    disp 'Phase slot 2 is Middle 10 cm'
elseif C3==11
    disp 'Phase slot 2 is Large 0 cm'
elseif C3==12
    disp 'Phase slot 2 is Large 2.5 cm'
elseif C3==13
    disp 'Phase slot 2 is Large 5 cm'
elseif C3==14
    disp 'Phase slot 2 is Large 7.5 cm'
elseif C3==15
    disp 'Phase slot 2 is Large 10 cm'
end

A4=[D1(4,:)-a3].^2;
B4=min(A4);
C4=find(A4==B4);

if C4==1
    disp 'Slot 3 is Small 0 cm'
elseif C4==2
    disp 'Slot 3 is Small 2.5 cm'
elseif C4==3
    disp 'Slot 3 is Small 5 cm'
elseif C4==4
    disp 'Slot 3 is Small 7.5 cm'
elseif C4==5
    disp 'Slot 3 is Small 10 cm'
elseif C4==6
    disp 'Slot 3 is Middle 0 cm'
elseif C4==7
    disp 'Slot 3 is Middle 2.5 cm'
elseif C4==8
    disp 'Slot 3 is Middle 5 cm'
elseif C4==9
    disp 'Slot 3 is Middle 7.5 cm'
elseif C4==10
    disp 'Slot 3 is Middle 10 cm'
elseif C4==11
    disp 'Slot 3 is Large 0 cm'
elseif C4==12
    disp 'Slot 3 is Large 2.5 cm'
elseif C4==13
    disp 'Slot 3 is Large 5 cm'
elseif C4==14
    disp 'Slot 3 is Large 7.5 cm'
elseif C4==15
    disp 'Slot 3 is Large 10 cm'
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

A5=[D1(5,:)-p3].^2;
B5=min(A5);
C5=find(A5==B5);

if C1==5
    disp 'Phase slot 3 is Small 0 cm'
elseif C5==2
    disp 'Phase slot 3 is Small 2.5 cm'
elseif C5==3
    disp 'Phase slot 3 is Small 5 cm'
elseif C5==4
    disp 'Phase slot 3 is Small 7.5 cm'
elseif C5==5
    disp 'Phase slot 3 is Small 10 cm'
elseif C5==6
    disp 'Phase slot 3 is Middle 0 cm'
elseif C5==7
    disp 'Phase slot 3 is Middle 2.5 cm'
elseif C5==8
    disp 'Phase slot 3 is Middle 5 cm'
elseif C5==9
    disp 'Phase slot 3 is Middle 7.5 cm'
elseif C5==10
    disp 'Phase slot 3 is Middle 10 cm'
elseif C5==11
    disp 'Phase slot 3 is Large 0 cm'
elseif C5==12
    disp 'Phase slot 3 is Large 2.5 cm'
elseif C5==13
    disp 'Phase slot 3 is Large 5 cm'
elseif C5==14
    disp 'Phase slot 3 is Large 7.5 cm'
elseif C5==15
    disp 'Phase slot 3 is Large 10 cm'
end
A6=[D1(6,:)-a4].^2;
B6=min(A6);
C6=find(A6==B6);

if C6==1
    disp 'Slot 4 is Small 0 cm'
elseif C6==2
    disp 'Slot 4 is Small 2.5 cm'
elseif C6==3
    disp 'Slot 4 is Small 5 cm'
elseif C6==4
    disp 'Slot 4 is Small 7.5 cm'
elseif C6==5
    disp 'Slot 4 is Small 10 cm'

```

```

elseif C6==6
    disp 'Slot 4 is Middle 0 cm'
elseif C6==7
    disp 'Slot 4 is Middle 2.5 cm'
elseif C6==8
    disp 'Slot 4 is Middle 5 cm'
elseif C6==9
    disp 'Slot 4 is Middle 7.5 cm'
elseif C6==10
    disp 'Slot 4 is Middle 10 cm'
elseif C6==11
    disp 'Slot 4 is Large 0 cm'
elseif C6==12
    disp 'Slot 4 is Large 2.5 cm'
elseif C6==13
    disp 'Slot 4 is Large 5 cm'
elseif C6==14
    disp 'Slot 4 is Large 7.5 cm'
elseif C6==15
    disp 'Slot 4 is Large 10 cm'
end
A7=[D1(1,:)-p4].^2;
B7=min(A7);
C7=find(A7==B7);

if C7==1
    disp 'Phase slot 4 is Small 0 cm'
elseif C7==2
    disp 'Phase slot 4 is Small 2.5 cm'
elseif C7==3
    disp 'Phase slot 4 is Small 5 cm'
elseif C7==4
    disp 'Phase slot 4 is Small 7.5 cm'
elseif C7==5
    disp 'Phase slot 4 is Small 10 cm'
elseif C7==6
    disp 'Phase slot 4 is Middle 0 cm'
elseif C7==7
    disp 'Phase slot 4 is Middle 2.5 cm'
elseif C7==8
    disp 'Phase slot 4 is Middle 5 cm'
elseif C7==9
    disp 'Phase slot 4 is Middle 7.5 cm'
elseif C7==10
    disp 'Phase slot 4 is Middle 10 cm'
elseif C7==11
    disp 'Phase slot 4 is Large 0 cm'
elseif C7==12
    disp 'Phase slot 4 is Large 2.5 cm'

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

elseif C7==13
    disp 'Phase slot 4 is Large 5 cm'
elseif C7==14
    disp 'Phase slot 4 is Large 7.5 cm'
elseif C7==15
    disp 'Phase slot 4 is Large 10 cm'
end

A8=[D1(8,:)-a5].^2;
B8=min(A8);
C8=find(A8==B8);

if C8==1
    disp 'Slot 5 is Small 0 cm'
elseif C8==2
    disp 'Slot 5 is Small 2.5 cm'
elseif C8==3
    disp 'Slot 5 is Small 5 cm'
elseif C8==4
    disp 'Slot 5 is Small 7.5 cm'
elseif C8==5
    disp 'Slot 5 is Small 10 cm'
elseif C8==6
    disp 'Slot 5 is Middle 0 cm'
elseif C8==7
    disp 'Slot 5 is Middle 2.5 cm'
elseif C8==8
    disp 'Slot 5 is Middle 5 cm'
elseif C8==9
    disp 'Slot 5 is Middle 7.5 cm'
elseif C8==10
    disp 'Slot 5 is Middle 10 cm'
elseif C8==11
    disp 'Slot 5 is Large 0 cm'
elseif C8==12
    disp 'Slot 5 is Large 2.5 cm'
elseif C8==13
    disp 'Slot 5 is Large 5 cm'
elseif C8==14
    disp 'Slot 5 is Large 7.5 cm'
elseif C8==15
    disp 'Slot 4 is Large 10 cm'
end

A9=[D1(9,:)-p5].^2;
B9=min(A9);
C9=find(A9==B9);

if C1==9

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    disp 'Phase slot 5 is Small 0 cm'
elseif C9==2
    disp 'Phase slot 5 is Small 2.5 cm'
elseif C9==3
    disp 'Phase slot 5 is Small 5 cm'
elseif C9==4
    disp 'Phase slot 5 is Small 7.5 cm'
elseif C9==5
    disp 'Phase slot 5 is Small 10 cm'
elseif C9==6
    disp 'Phase slot 5 is Middle 0 cm'
elseif C9==7
    disp 'Phase slot 5 is Middle 2.5 cm'
elseif C9==8
    disp 'Phase slot 5 is Middle 5 cm'
elseif C9==9
    disp 'Phase slot 5 is Middle 7.5 cm'
elseif C9==10
    disp 'Phase slot 5 is Middle 10 cm'
elseif C9==11
    disp 'Phase slot 5 is Large 0 cm'
elseif C9==12
    disp 'Phase slot 5 is Large 2.5 cm'
elseif C9==13
    disp 'Phase slot 5 is Large 5 cm'
elseif C9==14
    disp 'Phase slot 5 is Large 7.5 cm'
elseif C9==15
    disp 'Phase slot 5 is Large 10 cm'
end

Z=[C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9];
Z1=mode(Z);

if Z1==1
    disp 'The size is Small 0 cm'
elseif Z1==2
    disp 'The size is Small 2.5 cm'
elseif Z1==3
    disp 'The size is Small 5 cm'
elseif Z1==4
    disp 'The size is Small 7.5 cm'
elseif Z1==5
    disp 'The size is Small 10 cm'
elseif Z1==6
    disp 'The size is Middle 0 cm'
elseif Z1==7
    disp 'The size is Middle 2.5 cm'
elseif Z1==8

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    disp 'The size is Middle 5 cm'
elseif Z1==9
    disp 'The size is Middle 7.5 cm'
elseif Z1==10
    disp 'The size is Middle 10 cm'
elseif Z1==11
    disp 'The size is Large 0 cm'
elseif Z1==12
    disp 'The size is Large 2.5 cm'
elseif Z1==13
    disp 'The size is Large 5 cm'
elseif Z1==14
    disp 'The size is Large 7.5 cm'
elseif Z1==15
    disp 'The size is Large 10 cm'
end

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้