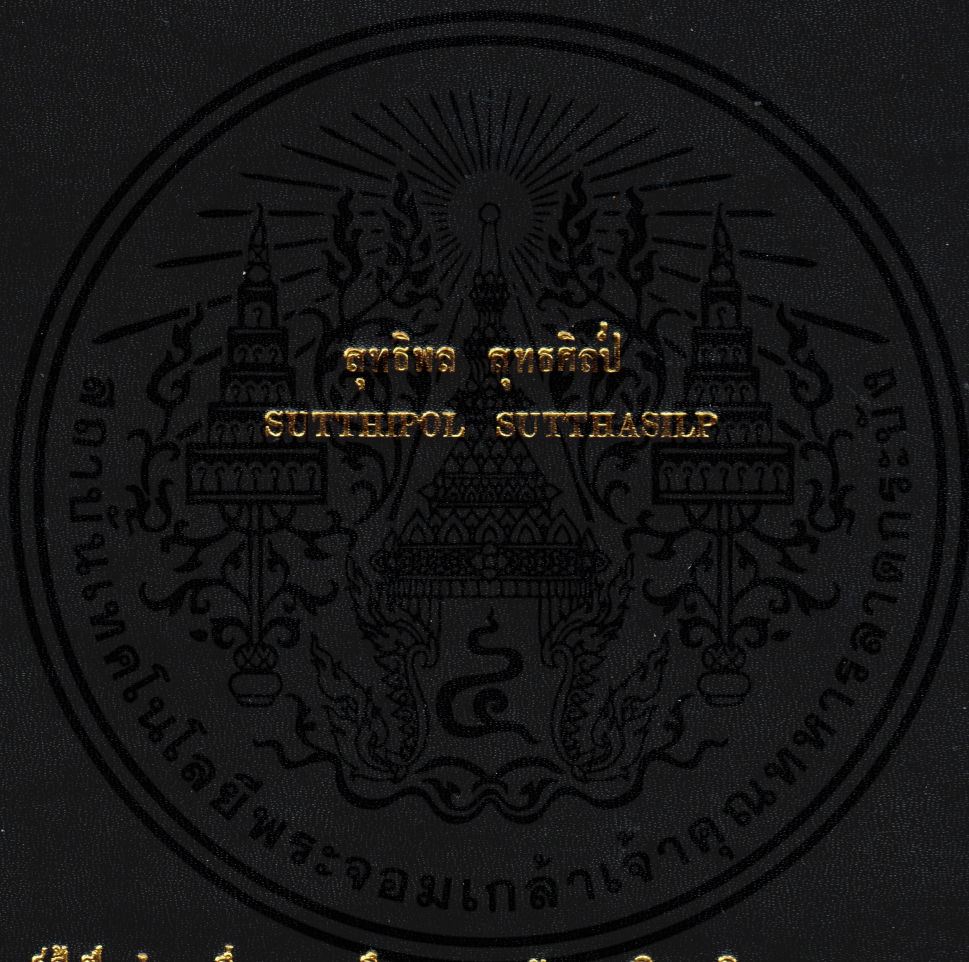


การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบขนาน

DESIGN OF PLANAR NEAR-FIELD MEASUREMENT SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-622-708-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

DESIGN OF PLANAR NEAR-FIELD MEASUREMENT SYSTEM



สุทธิพล สุทธิศิลป์

SUTTHIPOL SUTTHASILP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน พ.ศ. 2543 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก ISBN 974-622-708-4 เป็นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 35719

วัน, เดือน, ปี 1.9 ค.ย. 2543

DESIGN OF PLANAR NEAR-FIELD MEASUREMENT SYSTEM



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก ISBN 974-622-708-4 เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

เอกสาร **SCHOOL OF GRADUATE STUDIES** การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่า **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** การนำไปได้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ
DESIGN OF PLANAR NEAR-FIELD MEASUREMENT SYSTEM
ชื่อนักศึกษา นายสุทธิพล สุทธิศิลป์
รหัสประจำตัว 36061048
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.วิวัฒน์	กิรานนท์	
รศ.ณรงค์	เหมกรณ์	
รศ.ดร.ปราโมทย์	วาดเขียน	
ผศ.เวช	วิเวก	
รศ.ดร. โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 16 มีนาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ. ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 12 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ
นักศึกษา	นายสุทธิพล สุทธิศิลป์
รหัสประจำตัว	36061048
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการออกแบบระบบการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากสนามระยะใกล้ด้วยการวัดแบบระนาบ ซึ่งแปลงข้อมูลจากสนามระยะใกล้ไปสู่สนามระยะไกล โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ ระบบการวัดประกอบด้วยเครื่องกวาดโพรบ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนโพรบ, ควบคุมเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ให้ทำการวัดขนาด และเฟสของสนามระยะใกล้ รวมทั้งทำการคำนวณข้อมูลที่ได้จากการวัด โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ไปสู่สนามระยะไกล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่องและสายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศทดสอบ โดยใช้สายอากาศที่นำคลื่นเปิดปลายเป็นโพรบที่ใช้ในการวัด จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาเทียบกับการวัดจากสนามระยะไกลโดยตรง มีความใกล้เคียงกันในบริเวณพหุคลื่นหลัก ส่วนบริเวณอื่นยังมีข้อผิดพลาด อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของการวัดบางประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of Planar Near-Field Measurement System
Student	Mr. Sutthipol Sutthasilp
Student ID.	36061048
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis shows the design of antenna radiation pattern measurement system by using planar near-field measurement. The far-field pattern is obtained from the measured data by Fourier transform. The system consists of probe-scanner, network analyzer and computer that controls the probe scanning, controls network analyzer that measures amplitude and phase of the near-field and performs Fourier transform that calculates measured data to obtain the far-field pattern. Planar slotted array antenna and the horn antenna were employed as antenna under test. An open-end waveguide antenna was employed as a probe in the measurement. Measured radiation patterns from the near-field and far-field measurements are in good agreement in the major lobe. However, in the minor lobes region, the results are different due to some restriction in measurement system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่บังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี อันเนื่องมาจากได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษา และคำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ที่ได้มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวคือ

- คุณคมศักดิ์ เมฆสมุทร และคุณชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ในการช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ ในห้องวิจัย
- คุณศราชัย แสงนิคม ในการช่วยตรวจสอบโปรแกรมต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ
- คุณงามพิศ ฐิติพรรณกุล ในการช่วยพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์

และขอขอบพระคุณ มูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ที่ได้มอบทุนเพื่อการศึกษาตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาโท

สุทธิพล สุทธิศิลป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์และข้อกำหนดในการทำวิทยานิพนธ์	1
1.3 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 หลักการของการวัดสนามระยะใกล้	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 บริเวณสนาม	4
2.2.1 การแบ่งขอบเขตสนาม	4
2.2.1.1 การหาขอบเขตสนามระยะใกล้	6
2.2.1.2 การหาขอบเขตสนามระยะใกล้	7
2.2.1.3 การหาขอบเขตสนามรีแอกทีฟระยะใกล้	9
2.2.2 บริเวณสนามในระบบการแพร่กระจายคลื่นในอากาศ	9
2.2.2.1 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้	9
2.2.2.2 บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้	10
2.2.2.3 บริเวณสนามแพร่กระจายระยะไกล	10
2.3 การวัดสนามระยะใกล้แบบต่างๆ	10
2.3.1 การแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัดในสนามระยะใกล้ไปสู่สนามระยะไกล	11
2.3.1.1 พิจารณาการแจกแจงของแหล่งกำเนิดที่ได้จากการวัดสนามระยะใกล้	11
2.3.1.2 พิจารณาผลรวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของเวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัม	13
2.3.1.2.1 การกวาดแบบระนาบ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1.2.2 การกวาดแบบทรงกระบอก15

2.3.1.2.3 การกวาดแบบทรงกลม17

2.3.2 วิธีคอมแพคเรนท์18

2.3.2.1 แบบบริเวณแหล่งกำเนิดแบบเชิงเส้น19

2.3.2.2 แบบบริเวณแหล่งกำเนิดแบบจุด19

2.3.2.3 การออกแบบคอมแพคเรนท์20

2.3.2.3.1.) การแพร่กระจายโดยตรงจากตัวป้อน20

2.3.2.3.2.) การแตกกระจายจากตัวป้อนและส่วนอื่นๆ21

2.3.2.3.3.) การแตกกระจายจากขอบของตัวสะท้อน21

2.3.2.3.4.) การดิโพลาไรเซชัน21

2.3.2.3.5.) การลดทอนระยะจากตัวป้อน21

2.3.2.3.6.) ปฏิกริยาระหว่างบริเวณที่ใช้วัดกับสายอากาศทดสอบ22

2.3.2.3.7.) การแพร่กระจายแบบสเตรย์ภายในห้องทดสอบ22

2.3.2.3.8.) พื้นผิวของตัวสะท้อน23

2.3.3 วิธีเทคนิคดีโฟกัสซิ่ง23

2.4 สรุป25

บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณหาสนามระยะใกล้แบบระนาบ27

3.1 กล่าวนำ27

3.2 สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง27

3.2.1 สมการแมกซ์เวลล์27

3.2.2 สมการคลื่น28

3.3 ทฤษฎีการคำนวณหาสนามระยะใกล้แบบระนาบ30

3.4 การคำนวณหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้จาก

ข้อมูลที่ได้จากสนามระยะใกล้35

3.5 สรุป36

บทที่ 4 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 กล่าวนำ	37
4.2 รูปร่างของอะเพอร์เจอร์ที่ใช้ในการกวาด	37
4.3 ขนาดของการกวาด	38
4.4 คุณสมบัติของโพรบ	39
4.5 รูปแบบการกวาด	40
4.6 ระยะห่างของระนาบที่เหมาะสมกับสายอากาศทดสอบ	41
4.7 ระยะห่างในการกวาดบนระนาบที่เหมาะสม	42
4.8 สรุป	45
บทที่ 5 การชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัด	46
5.1 กล่าวนำ	46
5.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ	46
5.3 สรุป	53
บทที่ 6 การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	54
6.1 กล่าวนำ	54
6.2 หลักการของการออกแบบระบบ	54
6.3 ผังภูมิของโปรแกรมการแปลงสนามระยะใกล้ไปเป็นสนามระยะไกล	55
6.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวาดโพรบ	56
6.4.1 เครื่องกวาดโพรบ	56
6.4.2 การทำงานของเครื่องกวาดโพรบ	56
6.4.3 การขับสเต็ปมอเตอร์	57
6.4.4 วงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด	59
6.4.5 ภาษาที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกวาดโพรบ	60
6.4.6 การนำไปใช้ในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	61
6.4.7 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวาดโพรบ	61
6.5 อุปกรณ์อื่นๆ	61
6.6 สรุป	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 แนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	63
7.1 กล่าวนำ	63
7.2 แนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	63
7.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวัด	63
7.3.1 ทำการคำนวณหาขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ	64
7.3.2 ทำการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบออกเป็นส่วน ๆ	64
7.3.3 ทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบในการวัดแต่ละส่วน	65
7.3.4 ทำการวัดสนามระยะใกล้โดยการกวาดโพรบ	65
7.3.5 ทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลที่วัดได้ในแถวเลขที่	65
7.3.6 ทำการแปลงข้อมูลจากค่าไฟล์ให้เป็นเทกซ์ไฟล์	66
7.3.7 ทำการรวมข้อมูลสนามระยะใกล้ที่วัดได้ทั้งหมด	66
7.3.8 ทำการแปลงข้อมูลจากเทกซ์ไฟล์ให้เป็นค่าไฟล์	66
7.3.9 ทำการแปลงข้อมูลสนามระยะใกล้ด้วยโปรแกรมแปลงฟูรีเยร์	66
7.4 สรุป	66
บทที่ 8 การทดลอง	68
8.1 กล่าวนำ	68
8.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	68
8.3 ขั้นตอนการทดลอง	69
8.3.1 การวัดสายอากาศในสนามระยะใกล้	70
8.3.2 การวัดสายอากาศในสนามระยะไกล	72
8.3.3 การวัดสายอากาศตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้ แบบระนาบ	72
8.4 สรุป	73
บทที่ 9 ผลการทดลอง	74
9.1 กล่าวนำ	74
9.2 ผลการทดลอง	74
9.2.1 ผลการวัดของสายอากาศที่นำคลื่นเปิดปลาย	74

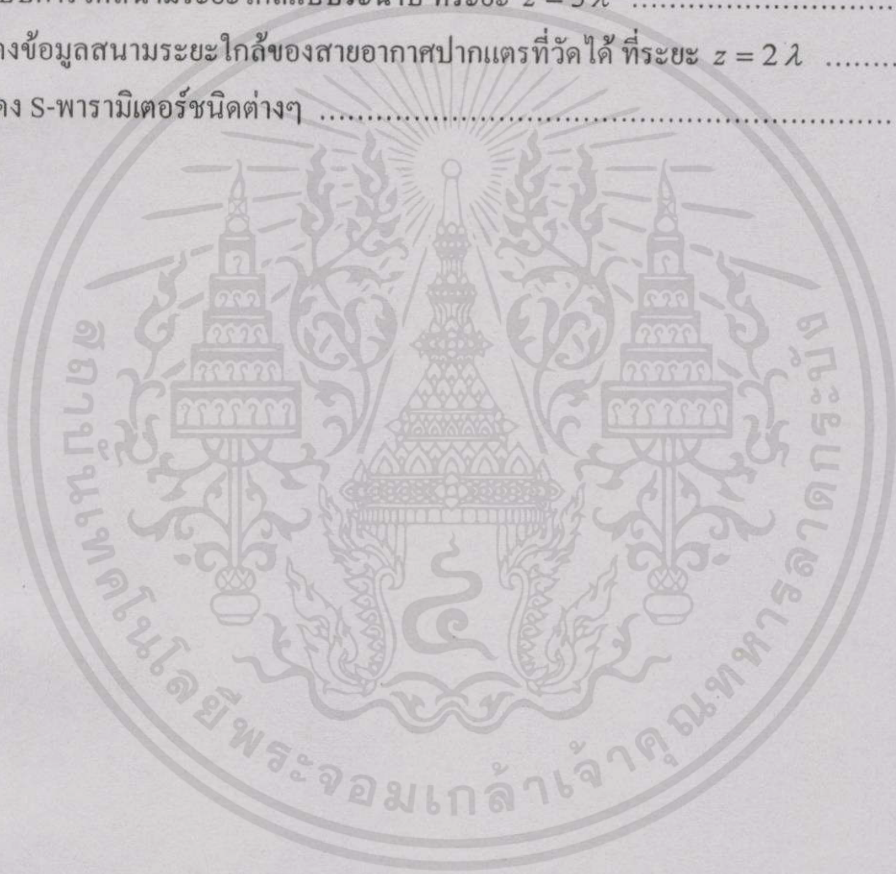
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.2.2 ผลการวัดของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง	77
9.2.2.1 ผลการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	77
9.2.2.2 ผลการวัดสนามระยะไกล	93
9.2.2.3 ผลการวัดสนามระยะใกล้เปรียบเทียบกับผลการวัดสนามระยะไกล	93
9.2.2.4 ผลการวัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้ แบบระนาบ	97
9.2.3 ผลการวัดของสายอากาศปากแตร	115
9.2.3.1 ผลการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	115
9.2.3.2 ผลการวัดสนามระยะไกล	127
9.2.3.3 ผลการวัดสนามระยะใกล้เปรียบเทียบกับผลการวัดสนามระยะไกล	127
9.3 สรุป	131
บทที่ 10 สรุป	133
10.1 ข้อจำกัดในการทดสอบ	134
10.2 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	134
10.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	134
เอกสารอ้างอิง	136
ภาคผนวก	137
ก การใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	138
ข ผังภูมิและโปรแกรมการแปลงฟูริเยร์	143
ค ผังภูมิโปรแกรมควบคุมการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	164
บทความเกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์	188
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ประวัตินักเขียน	189

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงเปรียบเทียบการกวาดโพรบแบบต่างๆ ในสนามระยะใกล้	38
6.1 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์กรณีหมุนแบบเต็มสเต็ป	58
6.2 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์กรณีหมุนแบบครึ่งสเต็ป	58
9.1 แสดงข้อมูลสนามระยะใกล้ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่วัดได้ ที่ระยะ $z = 2 \lambda$	80
9.2 แสดงข้อมูลสนามระยะใกล้ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่วัดได้ ตามแนวทางการพัฒนา ระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ที่ระยะ $z = 3 \lambda$	98
9.3 แสดงข้อมูลสนามระยะใกล้ของสายอากาศปากแตรที่วัดได้ ที่ระยะ $z = 2 \lambda$	116
ก.1 แสดง S-พารามิเตอร์ชนิดต่างๆ	139



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของโคโพลที่มีความยาว l สำหรับประมาณสนามระยะไกล	5
2.2 แสดงบริเวณสนามของสายอากาศ	9
2.3 แสดงการกวาดแบบระนาบ	14
2.4 แสดงระยะห่างระหว่างจุดของการวัดในการกวาดแบบระนาบ	15
2.5 แสดงการกวาดแบบทรงกระบอก	16
2.6 แสดงระยะห่างระหว่างจุดของการวัดในการกวาดแบบทรงกระบอก	16
2.7 แสดงการกวาดแบบทรงกลม	17
2.8 แสดงระยะห่างระหว่างจุดของการวัดในการกวาดแบบทรงกลม	18
2.9 แสดงรูปแบบของคอมแพคเร็นจ์ที่ใช้ตัวป้อนและตัวสะท้อนคลื่น	19
2.10 แสดงผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องจากรังสีที่แผ่ออกมาไม่ขนานกัน	23
2.11 แสดงการสะท้อนของรังสีจากตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก	24
3.1 แสดงอะเพอร์เจอร์ในระนาบ z เท่ากับศูนย์	30
4.1 แสดงบริเวณทดสอบสนามระยะใกล้แบบระนาบ	39
4.2 แสดงรูปแบบการกวาดโพรบแบบราสเตอร์ และแบบสตาร์เบิร์สต์	40
4.3 แสดงระนาบของการวัดสนามระยะใกล้	41
5.1 แสดงภาพการชดเชยโพรบในเชิงเรขาคณิต	47
6.1 แสดงฟังก์ชันของระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ	54
6.2 แสดงฟังก์ชันของโปรแกรมการแปลงสนามระยะใกล้ไปเป็นสนามระยะไกล.....	55
6.3 แสดงเครื่องกวาดโพรบ	56
6.4 แสดงวงจรขับสเต็ปมอเตอร์เบื้องต้น	57
6.5 แสดงฟังก์ชันการขับสเต็ปมอเตอร์ในแผงวงจรควบคุม	59
7.1 แสดงการแบ่งอะเพอร์เจอร์ออกเป็น 4 ส่วนและการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบ ..	65
8.1 แสดงสายอากาศทดสอบแบบแถวลำดับแบบร่อง และสายอากาศปากแคร์	68
8.2 แสดงสายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย	69
8.3ก แสดงระบบการทดลองวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบกรณีสายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศ แถวลำดับแบบร่อง	70
8.3ข แสดงระบบการทดลองวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบกรณีสายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศ ปากแคร์	71
9.1ก แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบในระนาบ xz แบบโพลาไรซ์	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
9.1ข แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบในระนาบ yz แบบโพลาไรซ์	75
9.2ก แสดงส่วนของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ ที่นำไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz	76
9.2ข แสดงส่วนของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ ที่นำไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz	76
9.3ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลแบบยูนิฟอร์มของสนามระยะใกล้ในระนาบ xz	79
9.3ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลแบบยูนิฟอร์มของสนามระยะใกล้ในระนาบ yz	79
9.4ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz	89
9.4ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz	89
9.5ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ xz	90
9.5ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ yz	90
9.6ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ในสนามระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำกรชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz.....	91
9.6ข แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ในสนามระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำกรชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz.....	91
9.7ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ xz	92
9.7ข แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ yz	92

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
9.8ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะไกลในระนาบ xz	94
9.8ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะไกลในระนาบ yz	94
9.9ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ xz	95
9.9ข แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ yz	95
9.10ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาไรซ์ในระนาบ xz	96
9.10ข แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาไรซ์ในระนาบ yz	96
9.11ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz	110
9.11ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz	110
9.12ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง ที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ xz	111
9.12ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่อง ที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ yz	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
9.13ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างกรณีที่ทำกรชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz	112
9.13ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างกรณีที่ทำกรชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz	112
9.14ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ xz	113
9.14ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ yz	113
9.15ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาร์ในระนาบ xz	114
9.15ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาร์ในระนาบ yz	114
9.16ก	แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz	123
9.16ข	แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz	123
9.17ก	แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ xz	124
9.17ข	แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ yz	124

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
9.18ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรในสนามระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำกราดตรวจคุณสมบัติของ โพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำกราดตรวจคุณสมบัติของ โพรบในระนาบ xz	125
9.18ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรในสนามระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำกราดตรวจคุณสมบัติของ โพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำกราดตรวจคุณสมบัติของ โพรบในระนาบ yz	125
9.19ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ xz	126
9.19ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ yz	126
9.20ก	แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะไกลในระนาบ xz	128
9.20ข	แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะไกลในระนาบ yz	128
9.21ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างกราดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลในระนาบ xz	129
9.21ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างกราดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลในระนาบ yz	129
9.22ก	แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างกราดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลแบบโพลาร์ในระนาบ xz	130
9.22ข	แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างกราดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลแบบโพลาร์ในระนาบ yz	130
ก.1	แสดง S-พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ 2 ช่องสัญญาณ และแสดงภาพการส่งสัญญาณ โดย “a” หมายถึง สัญญาณทางด้านเข้า และ “b” หมายถึงสัญญาณทางด้านออก	138
ก.2	แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบเข้าด้วยกัน	140
ก.3	แสดงขั้นตอนการปรับตำแหน่งมาตรฐานของการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันวิวัฒนาการทางการติดต่อสื่อสารได้เจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว มีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในงานต่าง ๆ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ และความสะดวก รวดเร็วขึ้นในการติดต่อสื่อสารกัน สำหรับระบบสื่อสารไร้สายที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ดาวเทียม, ระบบไมโครเวฟ, วิทยุ, โทรศัพท์เคลื่อนที่ และอื่นๆ ฯลฯ ซึ่งระบบที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ คงปฏิเสธไม่ได้ว่า มีอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบการรับส่งสัญญาณข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการใช้งาน นั่นคือ สายอากาศ ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายทุกชนิด

ในการจะนำสายอากาศใด ๆ ไปใช้ในงานต่างๆ มีความจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในงานนั้น ๆ เสียก่อน ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศขั้นพื้นฐานได้แก่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยทั่วไปแล้วจะทำการวัดในบริเวณที่กว้าง ๆ ไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ และระยะห่างของการวัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศที่ทำการวัด ซึ่งจะอยู่ในบริเวณที่เรียกว่าสนามระยะไกล

จากการค้นคว้าในเรื่องของการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ผ่านมา นั้น ต่อมาได้มีแนวความคิดที่จะทำการวัดในบริเวณสนามระยะใกล้ ซึ่งจะใช้พื้นที่ในการทดสอบน้อยกว่า ไม่เหมือนกับกรวัดในสนามระยะไกลโดยตรง วิธีการดังกล่าวนี้จะใช้คณิตศาสตร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะได้ออกมาถึงรายละเอียดของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในบทต่อ ๆ ไป

1.2 วัดอุปสรรคและข้อกำหนดในการทำวิทยานิพนธ์

การหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้เทคนิคการวัดสนามระยะใกล้ เป็นวิธีที่สะดวกกว่าการวัดจากสนามระยะไกล เนื่องจากสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อระบบการวัดได้ ซึ่งต่างจากการวัดสนามระยะไกลโดยตรง โดยเฉพาะเมื่อสายอากาศที่ใช้ทดสอบมีขนาดใหญ่ ระยะที่ใช้ทดสอบจริงจะไกลมากทำให้เป็นการยากในการควบคุมสภาพแวดล้อมให้ได้ตามต้องการ สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบระบบการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้เทคนิคการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในระบบการวัดสนามระยะใกล้ โดยจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อจัดทำเป็นชุดการทดลองวัดสายอากาศในบริเวณสนามระยะใกล้ โดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ ประกอบในการวัด เช่น เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย, คอมพิวเตอร์ และเครื่องกวาดโพรบ ซึ่งได้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการกวาดเก็บ

ข้อมูลของสนามระยะใกล้ สำหรับสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบนั้น ได้ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบ ร่องและสายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศทดสอบ และใช้สายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลายเป็น โพรบ ที่ใช้ในการกวาดและวัดข้อมูล เริ่มจากการชักตัวอย่างข้อมูลบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ เพื่อเก็บข้อมูลของขนาดและเฟสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัด จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ออกไปแปลง ให้เป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะใกล้อีกครั้ง ผลที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ ผลการวัดโดยตรงในสนามระยะใกล้ เพื่อหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น และหาแนวทางการปรับปรุง ระบบให้ดีขึ้น เพื่อให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับผลของการวัดในสนามระยะใกล้ให้มากที่สุด

1.3 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 10 บท โดยบทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงมูลเหตุของ การนำเอาวิธีการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้ มาใช้แทนการ วัดจากสนามระยะใกล้โดยตรง

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการของการวัดสนามระยะใกล้ โดยเริ่มตั้งแต่การแบ่งขอบเขตของ สนามออกเป็นส่วนๆ เพื่อกำหนดบริเวณการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในขอบเขตนั้นๆ รวมทั้งได้กล่าวถึงวิธีการวัดสนามระยะใกล้ในแบบต่างๆ ที่สามารถใช้แทนการวัดจากสนามระยะใกล้ ได้

บทที่ 3 กล่าวถึงที่มาของสมการต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศในบริเวณสนามระยะใกล้ โดยเริ่มจากสมการขั้นพื้นฐาน คือ สมการแมกซ์เวลล์ และ สมการคลื่น เพื่อนำไปสู่การหาสมการคลื่นสเปคตรัมแบบระนาบต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้ แบบระนาบ เช่น รูปร่างของอะเพอร์เจอร์ที่จะทำการวัด, ขนาดของการกวาด, คุณสมบัติของโพรบที่ ใช้วัด, รูปแบบของการกวาด และระยะต่างๆ ที่ใช้ในการกวาดโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ

บทที่ 5 กล่าวถึงการชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้ในการวัด หลังจากที่ได้ทำการวัดข้อมูล ในสนามระยะใกล้แล้ว ต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัดด้วย เนื่องจากโพรบที่ใช้วัดถือว่าเป็นสายอากาศชนิดหนึ่ง ซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเช่นกัน

บทที่ 6 กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ และอุปกรณ์ ที่ใช้ประกอบในการวัด เช่น เครื่องกวาดโพรบ, เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รวมทั้งผังภูมิของ โปรแกรมการแปลงฟูริเยร์ที่ใช้ในการคำนวณ

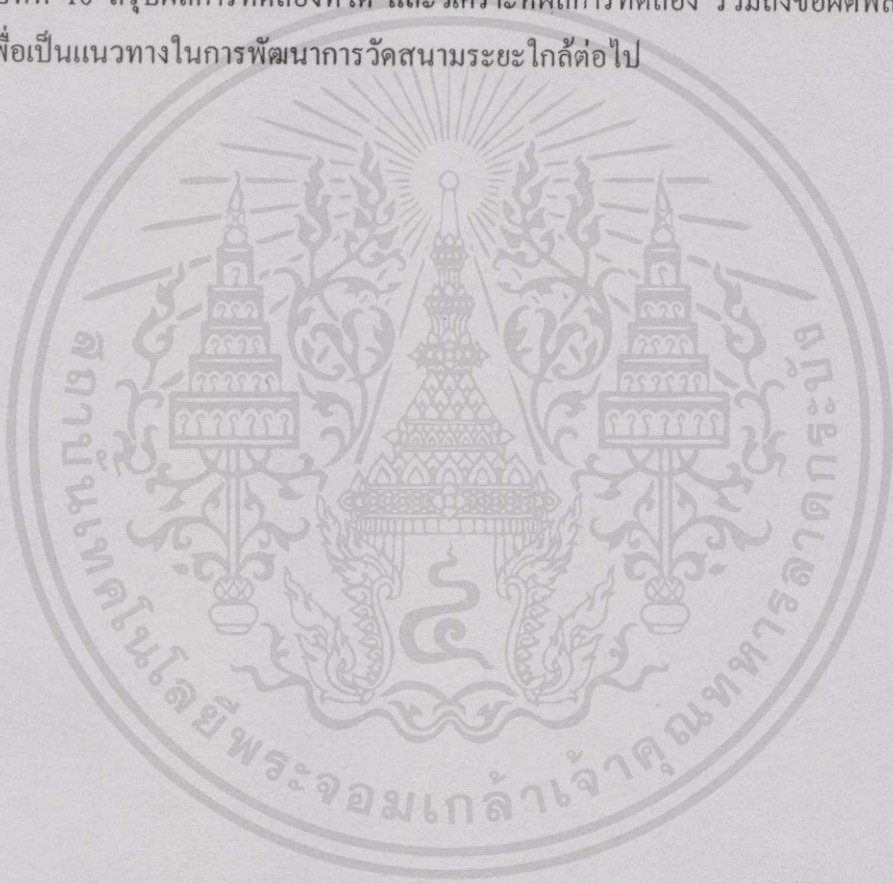
บทที่ 7 กล่าวถึงแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ในกรณีที่สาย อากาศมีขนาดใหญ่ ขนาดของอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัดจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ซึ่งเครื่องกวาด โพรบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการกวาดเก็บข้อมูลได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงใช้แนวคิดโดยการแบ่ง

การวัดออกเป็นส่วน ๆ หลังจากนั้นจะนำผลการวัดที่ได้ในแต่ละส่วนมาทำการรวมข้อมูลทั้งหมด และนำไปคำนวณในโปรแกรมฟูริเยร์ต่อไป

บทที่ 8 กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวัดสายอากาศโดยใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง และสายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศทดสอบ ส่วนสายอากาศที่โอนำคลื่นเปิดปลายใช้เป็นโพรบสำหรับการวัดข้อมูลบนอะเพอร์เจอร์ ซึ่งทำการทดสอบวัดสายอากาศทั้งในสนามระยะใกล้แบบระนาบและในสนามระยะไกล เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดสายอากาศทดสอบทั้งจากสนามระยะใกล้ และสนามระยะไกล รวมถึงผลการวัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

บทที่ 10 สรุปผลการทดลองที่ได้ และวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมถึงข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการวัดสนามระยะใกล้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการของการวัดสนามระยะไกล

2.1 กล่าวนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงคลื่นที่ถูกบังคับอยู่ในที่จำกัดไปเป็นคลื่นที่แพร่กระจาย ในอากาศ หรือในทางกลับกันเป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงคลื่นที่แพร่กระจายในอากาศเข้าสู่ท่อนำคลื่น โดยทั่วไปการแจกแจงสนามของสายอากาศเป็นฟังก์ชันระหว่างระยะทางจากสายอากาศกับพิสัยเชิงมุม เนื่องจากจุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ต้องการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ดังนั้นสิ่งแรกที่จะต้องพิจารณาคือ ธรรมชาติของบริเวณสนามที่ล้อมรอบสายอากาศในสนามระยะต่างๆ โดยจะพิจารณาระยะขอบเขตของสนาม [1] เพื่อกำหนดระยะที่จะทำการวัดของสายอากาศทดสอบในสนามระยะไกล

สำหรับการวัดสนามระยะไกล มีด้วยกันหลายแบบที่สามารถนำมาใช้แทนการวัดจากสนามระยะไกลได้โดยตรง ซึ่งได้กล่าวถึงไว้ในส่วนท้ายของบทนี้ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบ เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบ

2.2 บริเวณสนาม

2.2.1 การแบ่งขอบเขตสนาม

สำหรับการแบ่งขอบเขตสนามออกเป็นบริเวณต่างๆ นั้น จะพิจารณาจากสายอากาศไดโพลที่มีความยาว l วางตามแกน z ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และมีกระแสไฟฟ้า (Electric Current : I_e) โดยใช้ความสัมพันธ์ของศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential : A) จะได้สมการ

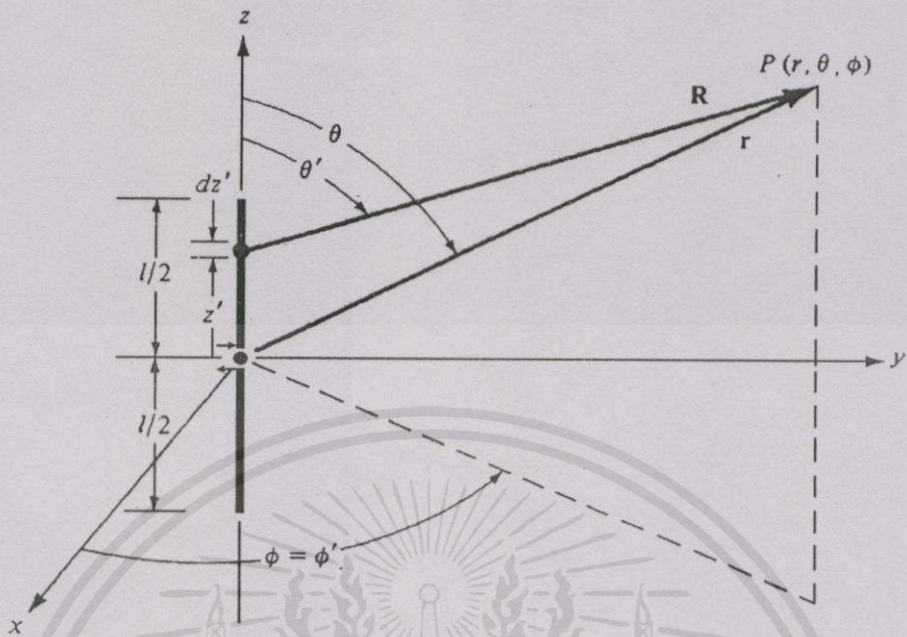
$$A(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi c} \int \frac{I_e(x', y', z') e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.1ก)$$

โดยที่

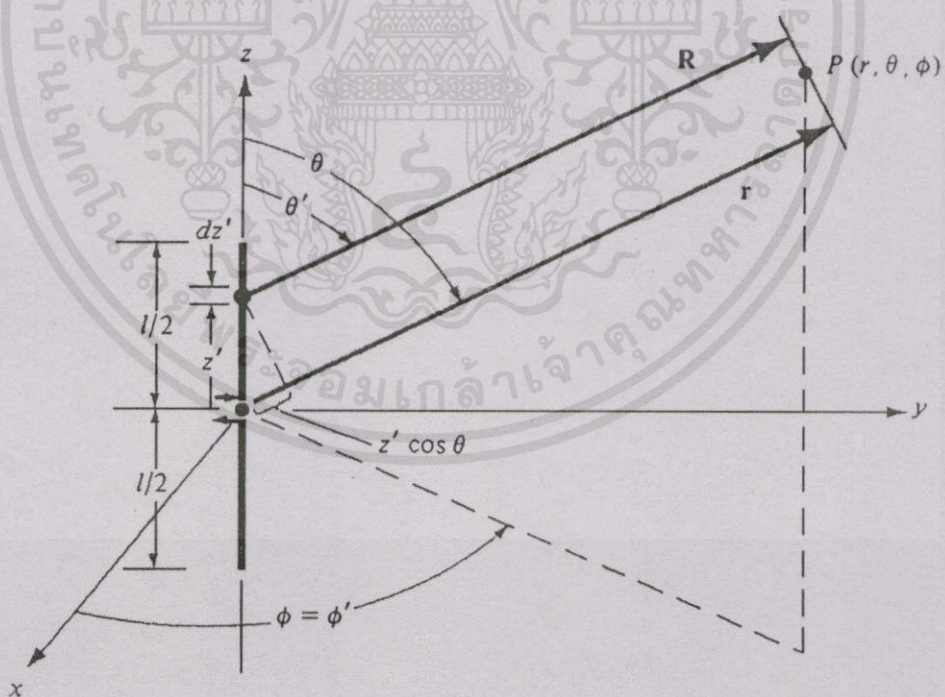
$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.1ข)$$

ซึ่ง R เป็นระยะทางจากจุดใดๆ บนแหล่งกำเนิดไปสู่จุดสังเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านวิชาการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในการพิจารณาสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กมากที่มีความยาวเท่ากับ l ซึ่งวางอยู่บนตำแหน่งจุดออริจินในระบบแกนโคออร์ดิเนตตามแนวแกน z ดังแสดงตามภาพที่ 2.1ก จึงสามารถสมมติให้ $x' = y' = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.1ข) ใหม่ ได้ดังนี้



(ก) แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของไดโพลที่มีความยาว l



(ข) แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของการประมาณสนามระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.1 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของไดโพลที่มีความยาว l สำหรับประมาณสนามระยะไกล

สำหรับสายอากาศทั่วไป ที่มีขนาดหรือความยาวที่ยาวกว่าความยาวคลื่น ($l > \lambda$) จะกำหนดให้มีค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุด (Maximum Total Phase Error) น้อยกว่าหรือเท่ากับ $\frac{\pi}{8}$ เรเดียน (22.5°) ดังนั้นจากสมการ (2.6) จะได้ค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุด ดังสมการ

$$\frac{k(z')^2}{2r} \leq \frac{\pi}{8} \quad (2.7)$$

โดยที่ $-\frac{l}{2} \leq z' \leq \frac{l}{2}$

ดังนั้นจะได้

$$r \geq 2 \left(\frac{l^2}{\lambda} \right) \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) ระยะทางจากจุดสังเกต r ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $2l^2/\lambda$ เมื่อ l เป็นขนาดของโครงสร้างสายอากาศที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งจะให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุดไม่เกิน $\pi/8$ เรเดียน

สำหรับการประมาณขอบเขตสนามระยะไกลนั้น สามารถประมาณได้ดังนี้

ในเทอมของเฟส คิดจาก $R \approx r - z' \cos \theta$

ในเทอมของขนาด คิดจาก $R \approx r$

โดยค่า r หาได้จากสมการ (2.8) ในกรณี $R \approx r - z' \cos \theta$ เมื่อ θ เป็นมุมที่วัดจากแนวแกน z ดังนั้นรัศมีของเวกเตอร์ R และ r จะขนานกัน ดังแสดงตามภาพที่ 2.1 ข

สำหรับสายอากาศแบบอื่นต่างๆ ไปนั้น ขนาดของสายอากาศที่ใหญ่ที่สุด (Maximum Dimension) จะแทนด้วย D ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.8) ใหม่ ได้ดังนี้

$$r \geq 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (2.9)$$

2.2.1.2 การหาขอบเขตสนามระยะใกล้

การหาขอบเขตสนามระยะใกล้ สามารถหาได้ในกรณีที่ระยะทางจากจุดสังเกตไปยังจุดออริจินมีค่าน้อยกว่า $r = 2l^2/\lambda$ โดยใช้หลักการของค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุดเท่ากับ $\pi/8$ เช่นเดียวกับการหาขอบเขตสนามระยะไกล อย่างไรก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จากสมการ (2.4) สามารถประมาณค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุดได้ดังสมการ

$$R \approx r - z' \cos \theta + \frac{1}{r} \left(\frac{z'^2}{2} \sin^2 \theta \right) \quad (2.10)$$

โดยเทอมที่ 4 ในสมการ (2.4) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อทำการหาอนุพันธ์เทียบกับ มุม θ ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{r^2} \left(\frac{z'^3}{2} \cos \theta \sin^2 \theta \right) \right] = \frac{z'^3}{2r^2} \sin \theta \left[-\sin^2 \theta + 2 \cos^2 \theta \right] = 0 \quad (2.11)$$

ซึ่งสมการ (2.11) จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ

$$\left(-\sin^2 \theta + 2 \cos^2 \theta \right)_{\theta = \theta_1} = 0 \quad (2.12ก)$$

หรือ

$$\theta_1 = \tan^{-1}(\pm \sqrt{2}) \quad (2.12ข)$$

ถ้าค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุดมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า $\pi/8$ แล้ว และ $z' = l/2$ ดังนั้นระยะทาง r จะหาได้จากสมการ

$$\frac{kz'^3}{2r^2} \cos \theta \sin^2 \theta \Big|_{\theta = \tan^{-1} \sqrt{2}} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{l^3}{8r^2} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{2}{3} \right) = \frac{\pi}{12\sqrt{3}} \left(\frac{l^3}{\lambda r^2} \right) \leq \frac{\pi}{8} \quad (2.13)$$

สามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$r^2 \geq \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{l^3}{\lambda} \right) = 0.385 \left(\frac{l^3}{\lambda} \right) \quad (2.14ก)$$

หรือ

$$r \geq 0.62 \sqrt{\frac{l^3}{\lambda}} \quad (2.14ข)$$

จากค่า r ที่ได้ในสมการ (2.14ก) จะให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุดไม่เกิน $\pi/8$ ดังนั้นขอบเขตสนามระยะใกล้จะมีค่าอยู่ในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก 212 ข้อหา และต้องอ้างอิง $\frac{2l^2}{\lambda} > r \geq 0.62 \sqrt{\frac{l^3}{\lambda}}$ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.15)

2.2.1.3 การหาขอบเขตสนามรีแอกทีฟระยะใกล้

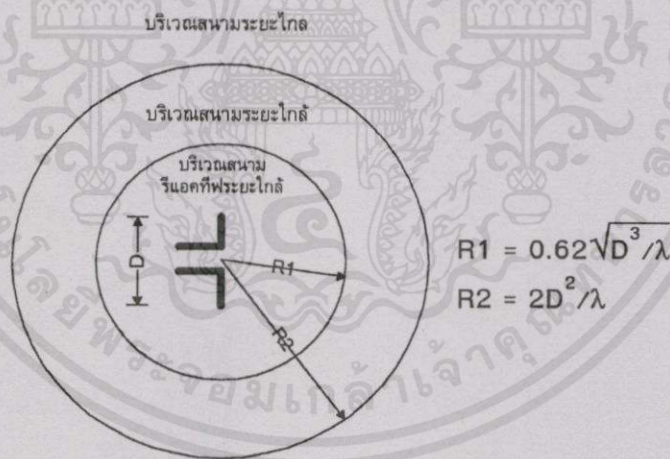
สำหรับขอบเขตสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ นั้น เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากสนามระยะใกล้เข้ามาจนถึง ขอบพื้นผิวของสายอากาศใดๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ระยะทางจากจุดสังเกตเข้าสู่จุดออริจิน นั้นมีค่าน้อยกว่าขอบเขตของสนามระยะใกล้ โดยสามารถแทนด้วยสมการได้ดังนี้

$$0.62 \sqrt{\frac{l^3}{\lambda}} > r > 0 \quad (2.16)$$

โดยที่ l เป็นความยาวของสายอากาศ

2.2.2 บริเวณสนามในระบบการแพร่กระจายคลื่นในอากาศ

จากที่ได้กล่าวถึง ที่มาของขั้นตอนการหาขอบเขตสนามในบริเวณต่างๆ แล้วนั้น สามารถแบ่งพื้นที่รอบๆ สายอากาศออกได้เป็น 3 บริเวณ [1,2] ได้แก่ บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive Near-Field Region), บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้ (Radiating Near-Field Region; Fresnel) และบริเวณสนามแพร่กระจายระยะไกล (Far-Field ; Fraunhofer) แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงบริเวณสนามของสายอากาศ

2.2.2.1 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive Near-Field Region) เป็นบริเวณสนามที่อยู่รอบๆ ใกล้ตัวสายอากาศมากที่สุด ซึ่งบริเวณนี้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างจากสายอากาศเพิ่มขึ้น จึงแทบจะไม่มี การแพร่กระจายคลื่นเกิดขึ้นในบริเวณนี้ที่ใกล้ สำหรับสายอากาศโดยทั่วไป ขอบเขตของบริเวณนี้จะกำหนดไว้ที่ระยะ $R < 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$ จากพื้นผิวของสายอากาศ เมื่อ λ แทนความยาวคลื่น และ D แทนขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

2.2.2.2 บริเวณสนามแผ่กระจายระยะใกล้

บริเวณสนามแผ่กระจายระยะใกล้ (Radiating Near-Field Region) เป็นบริเวณสนามที่มีการแผ่กระจายคลื่นสัมพันธ์กับระยะทางจากสายอากาศ โดยเราจะทำการวัดสนามระยะใกล้ของสายอากาศในบริเวณนี้ และแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยใช้การแปลงทางคณิตศาสตร์ไปเป็นข้อมูลของสนามระยะไกล สำหรับขอบเขตบริเวณนี้อยู่ช่วงระหว่างระยะ $2D^2/\lambda > R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$

2.2.2.3 บริเวณสนามแผ่กระจายระยะไกล

บริเวณสนามแผ่กระจายระยะไกล (Far-Field Region) เป็นบริเวณสนามที่มีการแจกแจงเชิงมุมไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ดังนั้นจึงใช้บริเวณนี้สำหรับทดสอบการวัดโดยตรงจากสนามระยะไกล ซึ่งจะวัดที่ระยะห่าง $R \geq 2D^2/\lambda$ จากสายอากาศสำหรับขอบเขตบริเวณนี้จะเริ่มตั้งแต่ $R \geq 2D^2/\lambda$ ไปจนถึงระยะอนันต์ (Infinity)

2.3 การวัดสนามระยะใกล้แบบต่างๆ

สายอากาศที่ใช้งานอยู่ทั่วไปได้ถูกออกแบบให้สามารถส่งคลื่นไปในระยะทางไกลๆ ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทราบลักษณะของรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถหาได้จากการวัดในสนามระยะไกล โดยกำหนดให้สายอากาศตัวส่งอยู่ห่างจากสายอากาศทดสอบ (ตัวรับ) เป็นระยะมากกว่าหรือเท่ากับ $2D^2/\lambda$ สำหรับการวัดในบริเวณดังกล่าวนี้จะมีหน้าคลื่นทรงกลม (Spherical Wavefront) แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศตัวส่ง ที่ทำให้เกิดค่าเบี่ยงเบนเฟสสูงสุดต่างจากคลื่นระนาบเท่ากับ $\pi/8$ ที่ขอบของสายอากาศ และนอกจากค่าเบี่ยงเบนเฟสสูงสุดนี้แล้วยังมีปัญหาของการสะท้อนคลื่นจากพื้นดินและสิ่งต่างๆ รอบๆ สายอากาศที่สามารถทำให้การวัดเกิดการผิดพลาดขึ้นได้

เมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศตัวส่ง กับสายอากาศทดสอบ (ตัวรับ) เพิ่มขึ้น การควบคุมไม่ให้เกิดการสะท้อนของคลื่นจากพื้นดินและสิ่งแวดลอมต่างๆ ทำได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อสายอากาศมีขนาดใหญ่ และใช้กับความยาวคลื่นสั้นๆ ระยะทางที่จะทำการวัดสนามแผ่กระจายระยะไกลอาจจะไกลมาก ทำให้ไม่สามารถทำการวัดได้ในทางปฏิบัติจริง และนอกจากนั้นยังเป็นการไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายสายอากาศทดสอบไปยังระยะของการวัดในสนามระยะไกลโดยตรง รวมทั้งในกรณีจำนวนของข้อมูลที่ต้องการวัดมีมากเกินไป ซึ่งต้องใช้เวลาในการวัดนานๆ

จากเหตุผลดังกล่าวเหล่านี้ ทำให้เกิดความต้องการที่จะหารูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกล จากการวัดที่กระทำในบริเวณสนามระยะใกล้แทนการวัดในสนามระยะไกลโดยตรง [2] ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัดในสนามระยะใกล้ไปสู่สนามระยะไกล

2. วิธีคอมแพคเร็นจ์ เป็นวิธีสร้างคลื่นระนาบโดยการสะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นในระยะไกลๆ กับสายอากาศทดสอบ
3. วิธีเทคนิคดีโฟกัสซึ่ง สายอากาศทดสอบจะถูกโฟกัสภายในบริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้ การวัดจะทำในระยะที่สั้นลง และสายอากาศจะถูกโฟกัสอีกครั้งหนึ่งที่ระยะอนันต์ ซึ่งทั้ง 3 วิธีนี้ จะกล่าวถึงโดยรายละเอียดในส่วนตัวต่อไป

2.3.1 การแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัดในสนามระยะใกล้ไปสู่สนามระยะไกล

เป็นวิธีที่ใช้การแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัดในสนามระยะใกล้ไปเป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกล โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ สามารถแบ่งลักษณะการดำเนินการออกได้เป็น 2 วิธีดังนี้ คือ

1. หากจากการแจกแจงของแหล่งกำเนิดจากการวัดสนามระยะใกล้ โดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่รอบๆ สายอากาศ สามารถคำนวณหาได้ ถ้าทราบค่าการแจกแจงของกระแสหรือประจุอย่างใดอย่างหนึ่งที่อยู่รอบๆ โครงสร้างของสายอากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวัดสนามแม่เหล็กในแนวผิวสัมผัส ที่บริเวณใกล้ๆ โครงสร้างของสายอากาศ
2. หากจากผลรวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของ เวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัม โดยขนาด และเฟสหาได้จากการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ พื้นผิวที่เหมาะสมในสนามระยะใกล้ เช่น พื้นผิวระนาบสำหรับสเปคตรัมคลื่นระนาบ, พื้นผิวทรงกระบอกสำหรับสเปคตรัมคลื่นทรงกระบอก และพื้นผิวทรงกลมสำหรับสเปคตรัมคลื่นทรงกลม เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะไกลต่อไป

2.3.1.1 พิจารณาการแจกแจงของแหล่งกำเนิดที่ได้จากการวัดสนามระยะใกล้

จากหลักการเบื้องต้นที่ว่าสนามไฟฟ้า (Electric Field :E) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field :H) ภายในปริมาตรที่กำหนด สามารถแสดงได้ในเทอมของความหนาแน่นกระแสของแหล่งกำเนิดภายในปริมาตร และค่าของสนามบนขอบเขตของปริมาตรนั้น ผลที่ได้นี้เกิดจากการใช้ทฤษฎีเวกเตอร์ของกรีน (Vector Green's Theorem) กับคู่ของสมการเวกเตอร์เฮล์มโฮลทซ์ (Vector Helmholtz Equation) ซึ่งแทนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในปริมาตร ถ้าในกรณีแหล่งกำเนิดคลื่นไม่ได้อยู่ในปริมาตรที่กำลังพิจารณา และอยู่ในขอบเขตของพื้นที่ผิวปิด (Closed Surface :S) แล้ว สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุด P ภายในปริมาตรจะแสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{E}_p = \frac{1}{4\pi} \int_s [-j\omega\mu\psi(\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}) + (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}) \times \nabla\psi + (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{E}) \nabla\psi] da \quad (2.17)$$

$$\mathbf{H}_p = \frac{1}{4\pi} \int_s [-j\omega\epsilon\psi(\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}) + (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}) \times \nabla\psi + (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{H}) \nabla\psi] da \quad (2.18)$$

เมื่อ \hat{n} เป็นยูนิตเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส
และ ψ เป็นฟังก์ชันสเกลาร์ของ กรีนฟังก์ชัน
โดยให้

$$\psi = \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.19)$$

โดยที่ k เป็นเวฟนัมเบอร์ในอากาศ (Free Space Wavenumber)

และ r เป็นระยะทางจากจุดบนพื้นผิวไปยังจุด P

สำหรับฟังก์ชัน ψ จะเป็นไปตามเงื่อนไขของการแพร่กระจายคลื่น ก็ต่อเมื่อค่าของการอินทิเกรต บนพื้นผิวที่เป็นทรงกลมที่ระยะอนันต์ มีค่าเท่ากับศูนย์

เมื่อต้องการหาการแจกแจงกระแส หรือประจุบนพื้นผิวของสายอากาศ แทนการแจกแจงของสนามในอะเปอร์เจอร์ ดังนั้นสมมติให้พื้นที่ผิวปิดเป็นตัวนำที่ดี และอยู่ภายใต้ตามเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ดังนี้

$$\hat{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.20)$$

$$\hat{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{K} \quad (2.21)$$

$$\hat{n} \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_s}{\epsilon} \quad (2.22)$$

$$\hat{n} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.23)$$

โดยที่ \mathbf{K} เป็นความหนาแน่นกระแสบนพื้นผิว

และ ρ_s เป็นความหนาแน่นประจุบนพื้นผิว

นอกจากสมการของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและประจุจะถูกนำมาใช้แล้ว สมการสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ในเทอมของความหนาแน่นกระแสหรือประจุอย่างใดอย่างหนึ่ง ในกรณีของความหนาแน่นกระแสบนพื้นผิวดำนำที่ดี สามารถหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุด P ในปริมาตร ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การนำออกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

$$\mathbf{E}_p = \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int_s [(\mathbf{K} \cdot \nabla) \nabla + k^2 \mathbf{K}] \frac{e^{-jkr}}{r} da \quad (2.24)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{H}_p = \frac{1}{4\pi} \int_s (\mathbf{K} \times \nabla) \frac{e^{-jkr}}{r} da \quad (2.25)$$

ดังนั้นสูตรพื้นฐานในการหารูปแบบสนามจากการแจกแจงของแหล่งกำเนิด ในกรณีที่เป็น การแจกแจงอะเพอร์เจอร์ ใช้สมการ (2.17) และ (2.18) เป็นการวัดสนามระยะใกล้ เพื่อหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรอบๆ สายอากาศ ส่วนในกรณีที่เป็นการแจกแจงกระแส ใช้สมการ (2.24) และ (2.25) โดยเป็นการวัดสนามแม่เหล็กในแนวผิวสัมผัส หรือสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับผิวของสายอากาศ เพื่อที่จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ผิวหรือประจุที่ผิวของสายอากาศ และนำไปใช้หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อไป

2.3.1.2 พิจารณาผลรวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของเวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัม

เป็นวิธีที่ใช้โพรบทำการวัด เก็บข้อมูล การแจกแจงขนาดและเฟส ไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศในการวัดที่บริเวณสนามระยะใกล้ และทำการแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้นไปสู่รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกล

หลักการของวิธีนี้ คือหาผลรวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของเวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัม โดยสามารถหาขนาดและเฟสได้จากการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ พื้นผิวที่เหมาะสมในสนามระยะใกล้ ซึ่งจากการดำเนินการในลักษณะของการกวาดโพรบ ไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศดังกล่าว เวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัมที่ได้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการกวาดโพรบไปบนพื้นผิว [2,3] ที่พิจารณา โดยสามารถแบ่งลักษณะการกวาด โพรบบนพื้นผิวดังกล่าว ออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. การกวาดแบบระนาบ
2. การกวาดแบบทรงกระบอก
3. การกวาดแบบทรงกลม

2.3.1.2.1 การกวาดแบบระนาบ

ในการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ จะใช้โพรบกวาดเก็บข้อมูลการแจกแจงขนาดและเฟส ไปบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบของสายอากาศ แสดงได้ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงอย่างคร่าวๆ เพื่อเป็นแนวทางศึกษาในบทต่อไป

ฟังก์ชันเวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัม สำหรับการหาสนามระยะใกล้แบบระนาบ สามารถหาได้จากส่วนประกอบในแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้ารอบๆ อะเพอร์เจอร์แบบระนาบที่กำลังพิจารณา ดังนั้น ถ้าอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศอยู่ในระนาบ z เท่ากับศูนย์แล้ว สเปคตรัมคลื่นระนาบ (Plane Wave Spectrum) [4,5] สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$A(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, 0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.26)$$

โดยที่ $A(k_x, k_y)$ เป็นสเปกตรัมคลื่นระนาบ

k_x และ k_y เป็นเวฟเนื้มเบอร์ในทิศทาง x และทิศทาง y

สำหรับสนามไฟฟ้าในบริเวณ z มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(k_x, k_y) e^{-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dk_x dk_y \quad (2.27)$$

โดยที่

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = \hat{a}_x k_x + \hat{a}_y k_y + \hat{a}_z \sqrt{(k_0^2 - k_x^2 - k_y^2)} \quad (2.28ก)$$

$$k_x^2 + k_y^2 \geq k_0^2 \quad (2.28ข)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.28ค)$$

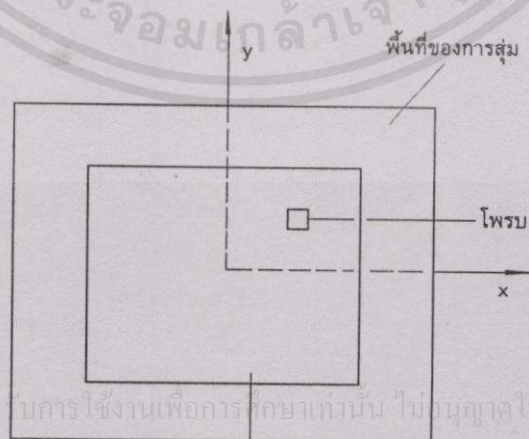
จากสมการ (2.27) สามารถนำไปหารูปแบบของสนามระยะไกลได้ จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = \frac{j 2\pi k \cos \theta e^{-j k \cdot r}}{r} A(k_{x0}, k_{y0}) \quad (2.29)$$

โดยที่

$$k_{x0} = k_0 \sin \theta \cos \phi \quad (2.30ก)$$

$$k_{y0} = k_0 \sin \theta \sin \phi \quad (2.30ข)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

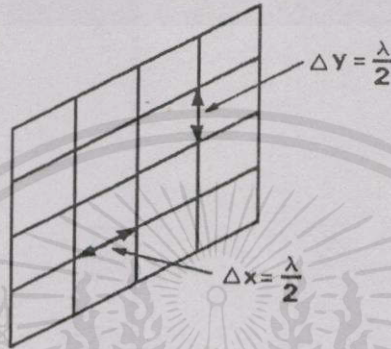
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะเพอร์เจอร์

ภาพที่ 2.3 แสดงการกวาดแบบระนาบ

ในการกวาดโพรบบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ [2,3] แสดงได้ดังภาพที่ 2.4 มีระยะห่างของการกวาดแต่ละตำแหน่งในพื้นที่สี่เหลี่ยมของอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ กำหนดให้เป็น Δx และ Δy จากการศึกษาพบว่าค่ามากที่สุดของระยะห่างจะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda}{2} \quad (2.31)$$



ภาพที่ 2.4 แสดงระยะห่างระหว่างจุดของการวัดในการกวาดแบบระนาบ

สำหรับรายละเอียดในส่วนอื่นๆ นั้น จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 ต่อไป

2.3.1.2.2 การกวาดแบบทรงกระบอก

การกวาดแบบทรงกระบอก เป็นการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการวัดสนามระยะใกล้อีกแบบหนึ่ง โดยใช้โพรบกวาดเก็บข้อมูลการแจกแจงขนาดและเฟส ไปบนอะเพอร์เจอร์แบบทรงกระบอกรอบสายอากาศ ซึ่งอยู่ในรูปของ สเปกตรัมคลื่นทรงกระบอก (Cylindrical Wave Spectrum) ของสายอากาศ [2] โดยได้มาจากสัญญาณเอาท์พุทของโพรบ ที่ได้จากการวัดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสบนผิวขอบเขตของอะเพอร์เจอร์แบบทรงกระบอกรอบสายอากาศแสดงได้ดังภาพที่ 2.5

ในการประมาณหาสนามระยะใกล้ของสเปกตรัมคลื่นทรงกระบอก แสดงได้ดังสมการ

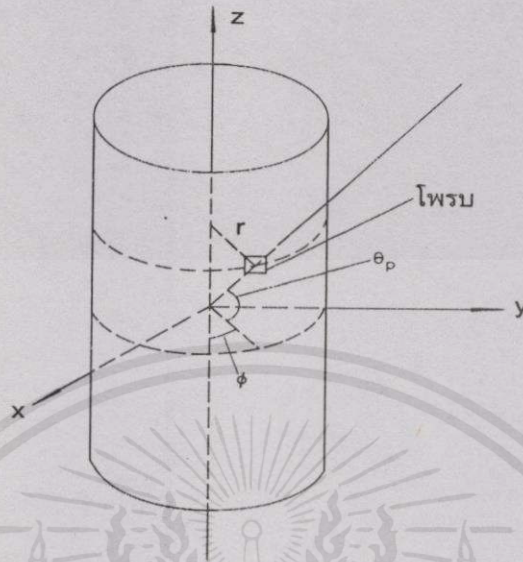
$$E_r = 0 \quad (2.32ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\theta = \frac{-j2\sin\theta}{r} e^{-jk_0 r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n b_n(k_0 \cos\theta) e^{jn\phi} \quad (2.32ข)$$

$$E_\phi = \frac{-2\sin\theta}{r} e^{-jk_0 r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n a_n(k_0 \cos\theta) e^{jn\phi} \quad (2.32ค)$$

โดยที่ $a_n(k_0 \cos \theta)$ และ $b_n(k_0 \cos \theta)$ เป็นฟังก์ชันขนาดของเวกเตอร์คลื่นทรงกระบอก



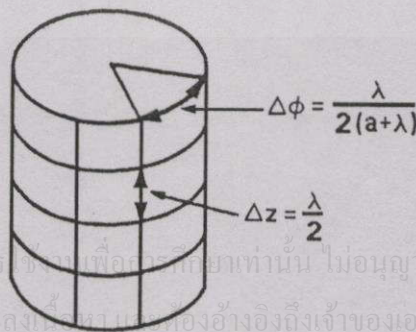
ภาพที่ 2.5 แสดงการกวาดแบบทรงกระบอก

สำหรับระยะห่างในแต่ละตำแหน่งของการกวาดโพรบ บนอะเพอร์เจอร์แบบทรงกระบอก นั้น [2,3] แสดงได้ดังภาพที่ 2.6 จะพิจารณาในมุมอะซิมุส ϕ และทิศทางในแนวแกน z หาได้ดังสมการ

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{2(a+\lambda)} \quad (2.33ก)$$

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2} \quad (2.33ข)$$

โดยที่ a เป็นรัศมีของทรงกระบอกที่เล็กที่สุดที่ล้อมรอบสายอากาศ

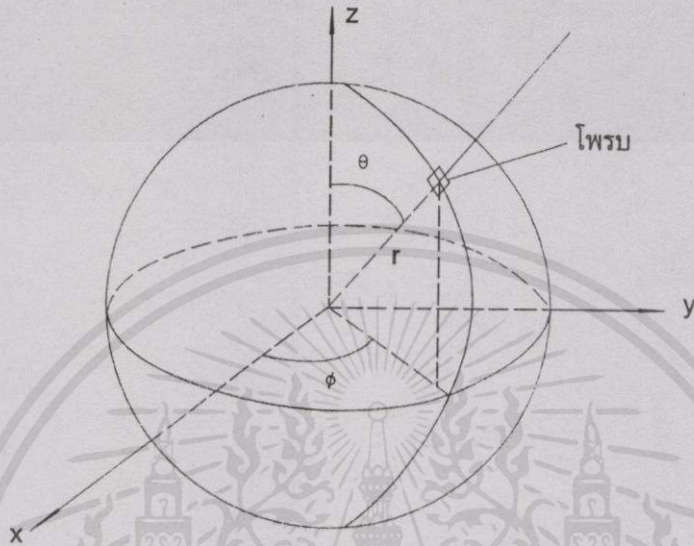


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.6 แสดงระยะห่างระหว่างจุดของการวัดในการกวาดแบบทรงกระบอก

2.3.1.2.3 การกวาดแบบทรงกลม

เป็นการกวาดโพรบเพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการวัดสนามระยะใกล้อีกแบบหนึ่ง โดยใช้โพรบวัดการแจกแจงสนาม ไปบนอะเพอร์เจอร์แบบทรงกลมรอบสายอากาศ แสดงได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงการกวาดแบบทรงกลม

ในการแก้ปัญหাসมการของ ระบบแกนโคออร์ดิเนตทรงกลม ได้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ M_{mn} และ N_{mn} โดยฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์นี้จะแสดงในเทอมของมุมโปลา (Polar Angle : θ), มุมอะซิมุส (Azimuth Angle : ϕ) และรัศมี (Radius : r) ในรูปของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย [2] โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการหาผลรวมของฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์กับสัมประสิทธิ์ (coefficients) ของฟังก์ชันคลื่น ซึ่งได้มาจากการคำนวณสนามไฟฟ้าตามแนวผิวสัมผัสบนผิวทรงกลม สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E(r, \theta, \phi) = -\sum_m \sum_n a_{mn} M_{mn} + b_{mn} N_{mn} \tag{2.34}$$

$$H(r, \theta, \phi) = \left(\frac{k}{j\omega\mu} \right) \sum_m \sum_n a_{mn} M_{mn} + b_{mn} N_{mn} \tag{2.35}$$

โดยที่ a_{mn} และ b_{mn} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มาจากการคำนวณสนามไฟฟ้าตามแนวสัมผัสบนผิวทรงกลม

นอกจากนี้ในเอกสารฉบับนี้ ยังได้นำสมการ (2.34) และ (2.35) ไปใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ บนผิวทรงกลม

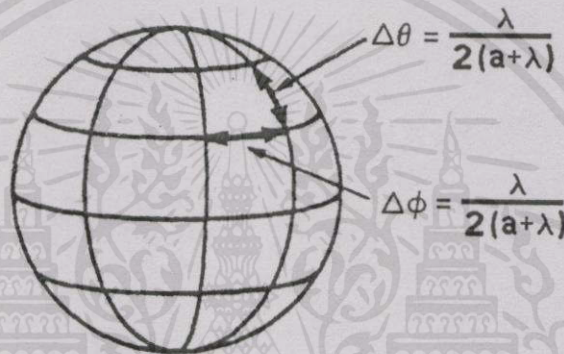
M_{mn} และ N_{mn} เป็นฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์

สำหรับระยะห่างในแต่ละตำแหน่งของการกวาดโอบ ไปบนอะเพอร์เจอร์แบบทรงกลม นั้น [2,3] แสดงได้ดังภาพที่ 2.8 จะพิจารณาในมุมอะซิมุส ϕ และมุมโพล่า θ หาได้ดังสมการ

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{2(a+\lambda)} \quad (2.36ก)$$

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2(a+\lambda)} \quad (2.36ข)$$

โดยที่ a เป็นรัศมีของทรงกลมที่เล็กที่สุดที่ล้อมรอบสายอากาศ



ภาพที่ 2.8 แสดงระยะห่างระหว่างจุดของการวัดในการกวาดแบบทรงกลม

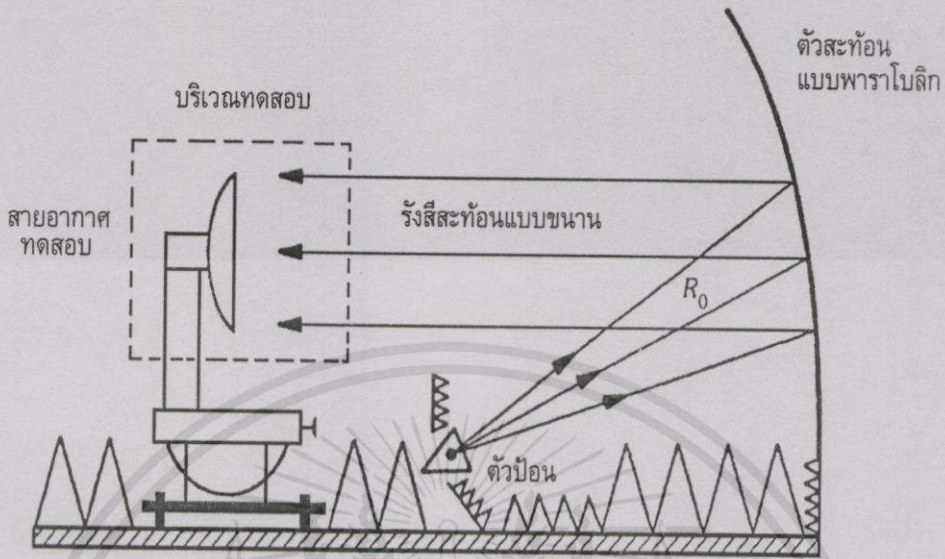
2.3.2 วิธีคอมแพคเรนจ์

วิธีคอมแพคเรนจ์ (Compact Ranges Method) [2,6] เป็นวิธีที่ใช้สร้างคลื่นระนาบจากตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) เข้าสู่สายอากาศทดสอบ จากภาพที่ 2.9 แสดงรูปแบบของคอมแพคเรนจ์ที่ใช้ตัวสะท้อนขนาดใหญ่กับตัวป้อนสัญญาณ (Feed) การแผ่กระจายออกของรังสีจากตัวป้อนสัญญาณจะถูกทำให้ขนานโดยตัวสะท้อน และสายอากาศทดสอบจะอยู่ในบริเวณลำแสงแบบขนาน (Collimated Beam) ใกล้เคียง ตัวสะท้อนคลื่น จากวิธีดังกล่าวนี้สามารถหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกลได้

การวัดรูปแบบสายอากาศในห้องทดลอง เป็นข้อดีที่นิยมใช้ปฏิบัติกันมาเป็นเวลานานแล้ว โดยส่วนใหญ่ของความพยายามในช่วงแรกๆ จะใช้เลนส์ (Lenses) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้รังสีขนานกัน แต่ต่อมานิยมใช้ตัวสะท้อนคลื่น

วิธีคอมแพคเรนจ์ เหมาะสำหรับการวัดสนามระยะไกลของสายอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำได้ภายในห้องทดลองโดยการใช้ตัวสะท้อน ซึ่งจากการพิจารณาแหล่งกำเนิดที่ใช้ในการวัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. แบบบริเวณแหล่งกำเนิดแบบเชิงเส้น (Line-Source Range)
2. แบบบริเวณแหล่งกำเนิดแบบจุด (Point-Source Range)



ภาพที่ 2.9 แสดงรูปแบบของคอมแพคเรนท์ที่ใช้ตัวป้อนและตัวสะท้อนคลื่น

2.3.2.1 แบบบริเวณแหล่งกำเนิดแบบเชิงเส้น

เป็นคอมแพคเรนท์ ในบริเวณที่ประกอบด้วย ตัวสะท้อนพาราโบลาแบบทรงกระบอก (Parabolic-Cylinder Reflector) กับตัวป้อนขนาดใหญ่แบบฮอกฮอร์น (Large Hoghorn Feed) มีข้อดีคือ สามารถสร้างได้ง่าย และให้โพลาไรเซชันเชิงเส้นที่ถูกต้องแท้จริง แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียที่ถือว่าเป็นจุดด้อยของวิธีนี้ คือ ในทางปฏิบัติจะถูกจำกัดให้เป็นการโพลาไรเซชันเชิงเส้นแบบเดี่ยว (Single Linear Polarization) และเป็นการยากที่จะเปลี่ยนแปลงย่านความถี่ (Frequency Band) ที่ใช้ในการวัด เนื่องจากจะต้องทำการเปลี่ยนขนาดของแหล่งกำเนิดซึ่งหมายถึงฮอกฮอร์น ให้เหมาะสมกับตัวสะท้อนพาราโบลาแบบทรงกระบอกที่ใช้งานร่วมกันด้วย จึงเป็นการยากในการดำเนินการดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ค่อยนิยมใช้คอมแพคเรนท์ในลักษณะนี้

2.3.2.2 แบบบริเวณแหล่งกำเนิดแบบจุด

เป็นคอมแพคเรนท์ ในบริเวณที่ประกอบด้วย ตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก (Paraboloidal Reflector) กับ (Small Horn Feed) เป็นแบบที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถกำหนดโพลาไรเซชันได้โดยใช้คุณสมบัติของตัวป้อนเป็นตัวกำหนด และตัวสะท้อนที่ใช้งานสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ที่กว้างได้ การออกแบบและการวางตำแหน่งของระยะที่เหมาะสมนั้นจะทำให้สามารถใช้งานในหลายๆ ย่านความถี่ได้ นอกจากนั้นแล้วยังประกอบด้วยกับวัสดุดูดซับคลื่น (Absorbing Material) โดยวัสดุดูดซับคลื่นนี้จะเป็นตัวช่วยลดมุมของการแพร่กระจายคลื่นจากตัวป้อนให้น้อยลง ช่วยลด

การแพร่กระจายคลื่นแบบสะท้อนกลับ (Back Radiation) และลดการแตกกระจายคลื่น (Diffraction) จากตัวป้อน ซึ่งจะมีผลต่อการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้เป็นอย่างดี

2.3.2.3 การออกแบบคอมแพคเรนท์

ในการออกแบบคอมแพคเรนท์ ในเบื้องต้นนี้จะพิจารณาในส่วนที่เป็นบริเวณแหล่งกำเนิดแบบจุด แสดงได้ดังภาพที่ 2.9 ตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้เป็นแบบพาราโบลิกแบบตัด (Cut Paraboloid) กับ ตัวป้อนแบบออฟเซต (Offset Feed) โดยที่ความยาวโฟกัส (focal length) มีระยะไกล และตัวป้อนสัญญาณต้องอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งของสายอากาศ สำหรับรังสีที่ถูกเรียกว่า คอลลิเมทึม (Collimated Beam) จะสะท้อนมาจากตัวสะท้อนไปสู่ผนังดูดซับคลื่น (Absorbing Panel) และสายอากาศทดสอบจะอยู่ในแนวของรังสีคอลลิเมทึม

นอกจากการแพร่กระจายแบบขนานของรังสีคอลลิเมทึมแล้ว ยังมีการแพร่กระจายแบบสเตรย์ (Stray Radiation) เกิดขึ้นในระบบอีกด้วย ซึ่งการแพร่กระจายแบบสเตรย์นี้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการสร้างคลื่นระนาบ เนื่องจากจะมีผลไปทำให้ค่าความถูกต้องของการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศลดลง ดังนั้นจึงต้องพยายามที่จะลดผลกระทบเหล่านี้

สำหรับการออกแบบคอมแพคเรนท์ ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงมีดังต่อไปนี้

- 1.) การแพร่กระจายโดยตรงจากตัวป้อน (Direct Radiation From The Feed)
- 2.) การแตกกระจายจากตัวป้อนและส่วนอื่นๆ (Diffraction From Feed And Supports)
- 3.) การแตกกระจายจากขอบของตัวสะท้อน (Diffraction From Reflector Edges)
- 4.) การดีโพลาไรเซชัน (Depolarization)
- 5.) การลดทอนระยะจากตัวป้อน (Space Attenuation From Primary Feed)
- 6.) ปฏิกริยาระหว่างบริเวณที่ใช้วัดกับสายอากาศทดสอบ (Interaction Between Range And Test Antenna)
- 7.) การแพร่กระจายแบบสเตรย์ภายในห้องทดสอบ (Stray Radiation Within Room)
- 8.) พื้นผิวของตัวสะท้อน (Reflector Surface Tolerances)

2.3.2.3.1 การแพร่กระจายโดยตรงจากตัวป้อน

การแพร่กระจายคลื่นโดยตรงจากตัวป้อนไปสู่สายอากาศทดสอบนั้น เป็นแหล่งที่มาของปัญหาต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสามารถที่จะลดปัญหาเหล่านั้นให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยการออกแบบตัวป้อน ด้วยการกำหนดการแพร่กระจายให้ต่ำๆ ในทิศทางของสายอากาศทดสอบและใช้วัสดุดูดซับคลื่นที่มีคุณภาพสูงมาวางในตำแหน่งขวางการแพร่กระจายของคลื่น ดังภาพที่ 2.9

2.3.2.3.2 การแตกกระจายจากตัวป้อนและส่วนอื่นๆ

การเกิดการแตกกระจาย (Diffracted or Scattered) จากตัวป้อนและอุปกรณ์ส่วนอื่นๆ นั้นสามารถทำให้ลดลงได้ โดยการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบให้อยู่เหนือตัวป้อน และกำหนดตำแหน่งของวัตถุดูดซับคลื่นให้อยู่ระหว่างตัวป้อนกับสายอากาศทดสอบ

2.3.2.3.3 การแตกกระจายจากขอบของตัวสะท้อน

ในกรณีที่เกิดการแพร่กระจายแบบสเตรย์ โดยเกิดการสลับเฟสหรือเหลื่อมล้ำทางเฟส กับการแพร่กระจายแบบขนานของรังสีคอลลิเมทิมันนั้นทำให้มีการรบกวนเกิดขึ้นกับรังสีคอลลิเมทิมิตั้งนั้นจึงต้องพยายามลดผลของการรบกวนดังกล่าว โดยทำการออกแบบริมขอบของตัวสะท้อนให้เป็นลูกคลื่น (Rolling) เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งรูปร่างของการแตกกระจายจากด้านหน้าของตัวสะท้อนไปสู่ข้างหลังของตัวสะท้อน ซึ่งจะไม่มีผลต่อการวัด โดยปกติแล้วยังรัศมีของส่วนโค้งของลูกคลื่นริมขอบของตัวสะท้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะให้ผลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามขนาด และน้ำหนักของตัวสะท้อนจะเพิ่มขึ้นตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องเลือกค่าของรัศมีที่ใช้งานให้เหมาะสม

2.3.2.3.4 การดีโพลาไรเซชัน

ในการแพร่กระจายคลื่นของสนามจากตัวป้อนที่เป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด จะมีลักษณะของการโพลาไรเซชัน ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวป้อนที่ใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อสนามเกิดการสะท้อนโดยตัวสะท้อนพาราโบลิกแบบดับเบิลเคิร์ฟ (Doubly Curved Paraboloidal Reflector) จะเกิดส่วนของการครอสโพลาไรเซชัน (Cross-Polarized Component) ขึ้น โดยขนาดของส่วนของการครอสโพลาไรเซชันนี้จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวสะท้อน แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเข้าใกล้แกนของตัวสะท้อนคลื่น และจะลดลงเมื่อความยาวโฟกัสมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสำหรับในการวัดอะเพอร์เจอร์ จึงต้องการความยาวโฟกัสที่มีค่ามาก เพื่อใช้ลดผลของการดีโพลาไรเซชันให้ได้ผลในระดับที่ยอมรับได้

2.3.2.3.5 การลดทอนระยะจากตัวป้อน

การแพร่กระจายพลังงานจากตัวป้อนไปสู่ตัวสะท้อน จะเคลื่อนที่ไปแบบหน้าคลื่นทรงกลม (Spherical Wavefront) แต่หลังจากเกิดการสะท้อนแล้ว พลังงานจะถูกทำให้ขนานและจะเคลื่อนที่ไปแบบ หน้าคลื่นแบบระนาบ (Plane Wavefront)

ขณะที่พลังงานที่กระจายออกมาในช่วงระหว่างตัวป้อน และตัวสะท้อนนั้น ค่าความหนาแน่นกำลังของสายอากาศทดสอบ (Power Density : P_r) จะลดลงด้วยกำลังสองของระยะทางจากตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_0} \right)^2 P_f G_f G_r \quad (2.37)$$

- โดยที่ P_r เป็นค่าความหนาแน่นกำลังของสายอากาศทดสอบ (ตัวรับ)
 P_f เป็นค่าความหนาแน่นกำลังที่ถูกส่งจากตัวป้อน
 G_r เป็นอัตรการขยายของสายอากาศทดสอบ
 G_f เป็นอัตรการขยายของตัวป้อน
 R_0 เป็นระยะทางจากตัวป้อนถึงจุดศูนย์กลางของตัวสะท้อน

อย่างไรก็ตามหลังจากเกิดการคอลลิเมทแล้วค่าความหนาแน่นกำลังยังคงมีค่าคงที่ ระยะทางจากจุดโฟกัสไปสู่ตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก จะเพิ่มขึ้นด้วยมุมจากแกนของตัวสะท้อน ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากการลดทอนระยะจากตัวป้อน จะลดลงเมื่อความยาวโฟกัสเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการมีระยะโฟกัสที่ยาวบนคอมแพคเลนจ์

2.3.2.3.6 ปฏิกริยาระหว่างบริเวณที่ใช้วัดกับสายอากาศทดสอบ

ในกรณีที่สายอากาศตัวส่ง และสายอากาศตัวรับอยู่ใกล้กันแล้ว ต้องพึงระวังเพื่อที่จะหลีกเลี่ยง สแตนดิงเวฟ (Standing Waves) ที่เกิดขึ้นระหว่างสายอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการผิดพลาดในการวัดขึ้นได้ โดยเฉพาะในการวัดอัตรการขยาย (gain) สำหรับในสภาวะต่างๆ ไปในการวัดภายนอกอาคาร จะไม่มีปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้น เนื่องจากสายอากาศตัวรับจะรับสัญญาณเพียงบางส่วน ของพลังงานที่ส่งออกมา

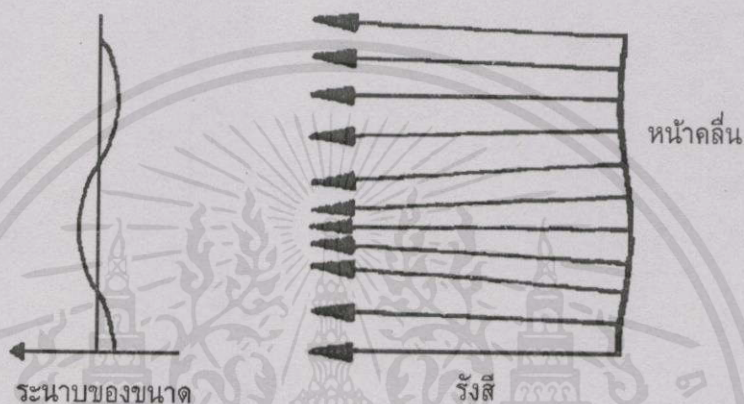
สำหรับปฏิกริยาระหว่างบริเวณที่ใช้วัด กับสายอากาศทดสอบบนคอมแพคเลนจ์ สามารถควบคุมได้ด้วยลักษณะรูปร่างของตัวป้อน โดยที่สายอากาศทดสอบ (ตัวรับ) จะรับสัญญาณเพียงบางส่วน ของพลังงานที่ส่งออกมาจากสายอากาศตัวส่ง ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับที่ทำการวัดภายนอกอาคาร ดังนั้นปฏิกริยาดังกล่าวจึงไม่มีผลต่อการทดสอบ

2.3.2.3.7 การแพร่กระจายแบบสเตรย์ภายในห้องทดสอบ

ผลกระทบของปัญหาที่เกี่ยวกับการแพร่กระจายแบบสเตรย์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดนั้น มักจะเกิดจากส่วนประกอบต่างๆ คอมแพคเลนจ์ แต่ในบางกรณีอาจเกิดจากการสะท้อนของวัตถุรอบข้าง สำหรับการแพร่กระจายแบบสเตรย์ สามารถทำการลดได้ โดยการวางวัตถุดูดซับคลื่นให้ดูดซับคลื่นที่ไม่ต้องการที่แพร่ออกมาจากตัวป้อน และอีกวิธีหนึ่งโดยการวางผนังดูดซับคลื่น (Absorbing Panel) ไว้ข้างหลังสายอากาศทดสอบเพื่อดูดซับรังสีคอลลิเมทที่มีบางส่วนที่ไม่ต้องการ

2.3.2.3.8 พื้นผิวของตัวสะท้อน

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในการออกแบบคอมแพคเรนท์ ความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยของพื้นผิวดำสะท้อนที่ประกอบขึ้น อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลกระทบที่ไม่ต้องการขึ้นในสนามบนสายอากาศทดสอบได้ สำหรับตัวสะท้อนที่ดีนั้น รังสีที่เกิดจากการสะท้อนจะต้องขนานกันและสนามที่เกิดขึ้นบนสายอากาศทดสอบจะเป็นการแจกแจงแบบคลื่นระนาบและมีขนาดคงที่ ความผิดพลาดจากการประกอบตัวสะท้อนเป็นสาเหตุให้ทิศทางของการกระจายเบี่ยงเบนไปไม่ขนานกัน ซึ่งมิผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการแจกแจงขนาดในบริเวณที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 2.10 แสดงผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากรังสีที่แผ่ออกมาไม่ขนานกัน

จากภาพที่ 2.10 แสดงผลกระทบของความผิดพลาดเล็กน้อย อันเนื่องมาจากพื้นผิวของตัวสะท้อนที่ประกอบไม่สมบูรณ์ ถ้าหน้าคลื่น (Wavefront) ที่เกิดขึ้นจากรูปทางขวา มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเล็กน้อยจากระนาบแล้ว รังสีที่แผ่ออกมาจะไม่ขนานกัน และจะมีผลทำให้การแจกแจงของขนาดเป็นแบบไม่ยูนิฟอร์ม (Nonuniform) ที่บางตำแหน่งดังแสดงในรูปทางซ้าย ซึ่งทำให้การคำนวณหาสนามในบริเวณที่ทำการทดสอบของคอมแพคเรนท์ จะยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า การคำนวณที่หาจากรังสีที่แผ่ออกมาแล้วขนานกัน โดยภาพที่ 2.10 นี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลของปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุของการเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยในระยะของตัวสะท้อน

จากผลที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.10 นั้น แสดงให้เห็นว่าการประกอบตัวสะท้อน จะต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะในพื้นที่ข้างหน้าของบริเวณทดสอบของตัวสะท้อน

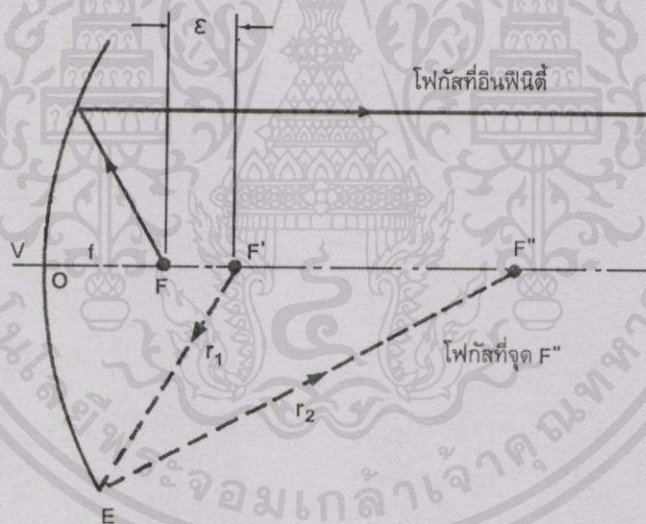
2.3.3 วิธีเทคนิคดีโฟกัส

ในส่วนก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงการหารูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศทั้ง 2 วิธี โดยทำการวัดในบริเวณอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ สำหรับในส่วนนี้จะพิจารณาเกี่ยวกับการจำลองการวัดรูปแบบสนามระยะไกลที่มีระยะน้อยกว่า $2D^2/\lambda$ โดยการวัดนั้นจะทำการโฟกัสสายอากาศให้

ได้รูปแบบของการแพร่กระจายที่ดีที่สุดในระยะทดสอบ ซึ่งสายอากาศจะถูกโฟกัสอีกครั้งที่ระยะอนันต์ และรูปแบบที่ได้จากการวัดในระยะทดสอบนั้นจะใช้สำหรับอธิบาย รูปแบบสนามระยะไกลของสายอากาศ ที่ถูกโฟกัสอีกครั้งภายในบริเวณค่าที่ยอมรับได้ [2]

เทคนิคของการโฟกัสที่ระยะสั้นๆ นี้ จะใช้กับสายอากาศแบบพาราโบลิก หรือเลนส์ที่สามารถโฟกัสได้ โดยใช้หลักการทางด้านเรขาคณิต (Geometrical) มาใช้ในการพิจารณาเลนส์หรือส่วนโค้งพาราโบลิก ที่มีความสัมพันธ์ของสมการในการเคลื่อนที่ของตัวป้อนสัญญาณกับระยะการโฟกัสที่จุดต่างๆ

การนำเอาความรู้ทางเรขาคณิตมาใช้ในการแก้ปัญหาของการโฟกัส สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.11 โดยใช้ตัวสะท้อนเป็นแบบพาราโบลิก และให้ตัวป้อนสัญญาณ อยู่ที่ตำแหน่ง F ซึ่งเป็นจุดโฟกัสของพาราโบลิกนั่นเอง การกระจายคลื่นเป็นแบบทรงกลมกระจายอยู่รอบๆ บริเวณเชิงมุมที่กำหนดไว้โดยตัวสะท้อน โดยรังสีที่สะท้อนจากพาราโบลิกจะขนานกันไปตามแนวแกน z และจะเกิดการโฟกัสอีกครั้งที่ระยะอนันต์ เมื่อตัวป้อนสัญญาณเคลื่อนที่ออกไปจากตัวสะท้อนเป็นระยะทาง ε ที่ตำแหน่ง F' ดังนั้นรังสีสะท้อนจะโฟกัสไปที่ตำแหน่ง F'' บนแกน z ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงการสะท้อนของรังสีจากตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก

จากกฎเกณฑ์สำหรับการโฟกัสจะได้เงื่อนไข ดังนี้

$$r_1 + r_2 = OF'' + OF + \varepsilon \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ก็ตาม เป็นข้อความของเส้นทางการเดินทางจาก F' ไปสู่ F'' โดยการสะท้อนจากเส้นรอบวงของตัวสะท้อน ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการสะท้อนจากขอบสูงสุดของตัวสะท้อน

จากการประมาณค่าของ ε จะให้ความสัมพันธ์ที่มีต่อระยะทางระหว่างสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบกับสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิด (ตัวป้อน) แสดงดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{1}{R} \left[f^2 + \left(\frac{D}{4} \right)^2 \right] \quad (2.39)$$

โดยที่ ε เป็นระยะทางจากตำแหน่งเดิมของตัวป้อนสู่ตำแหน่งใหม่เมื่อตัวป้อนมีการเคลื่อนที่
 f เป็นระยะทางจากจุดโฟกัสของพาราโบลิกเข้าสู่ศูนย์กลางของพาราโบลิกในแนวแกน z
 D เป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของพาราโบลิก
 R เป็นระยะทางจากศูนย์กลางพาราโบลิกไปถึงจุดโฟกัสที่เหมาะสมของเทคนิคดีโฟกัสซึ่ง

2.4 สรุป

บริเวณสนามรอบๆ สายอากาศ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณสนามรีแอดทิฟระยะใกล้, บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้ และบริเวณสนามแพร่กระจายระยะไกล สำหรับการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้ จำเป็นต้องทราบขอบเขตของสนามระยะต่างๆ เนื่องจากถ้าทำการวัดในบริเวณสนามที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ผลของการวัดเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

สำหรับเทคนิคพื้นฐานในการวัดสนามระยะใกล้แบบต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงในบทนี้นั้น มีเทคนิคข้อดี และข้อจำกัด ที่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในแบบต่างๆ ดังนี้

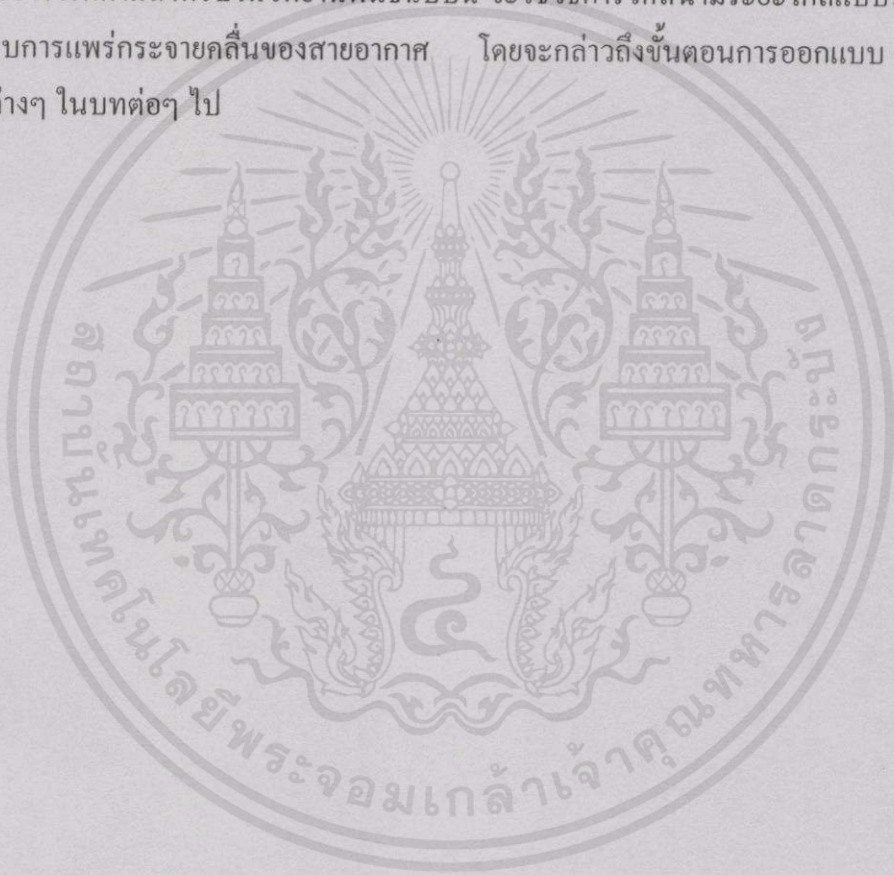
สำหรับเทคนิคแรก เป็นการสุ่มการกระจายของสนามในระยะใกล้ โดยใช้การกวาดโพรบ ซึ่งต้องใช้โพรบที่มีความแม่นยำในการเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งต่างๆ สำหรับการสุ่มบนสนามระยะใกล้ ข้อมูลของสนามระยะใกล้จะถูกเก็บไว้ และนำไปทำการแปลงข้อมูลจากข้อมูลสนามระยะใกล้ไปเป็นรูปแบบสนามระยะไกล ข้อดีของการใช้เทคนิคนี้ที่สำคัญ คือ โพรบที่ใช้วัดนั้น สามารถเคลื่อนย้ายไปทดสอบกับสายอากาศทดสอบในที่ต่างๆ ได้ เหมาะสำหรับในกรณีที่สายอากาศไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปจาก สถานที่ใช้งานจริงได้

เทคนิคที่สอง เป็นการสร้างคลื่นระนาบใกล้ๆ สายอากาศทดสอบโดยวิธีที่เรียกว่า คอมแพค เรนจ์ โดยใช้ตัวป้อนสัญญาณ และตัวสะท้อนคลื่นที่มีความเที่ยงตรงแน่นอน ทำการสะท้อนจากรังสีที่แผ่กระจายออกมาจากตัวป้อนสัญญาณ และจะถูกทำให้ขนานโดยตัวสะท้อนคลื่นเข้าสู่สายอากาศทดสอบ ข้อดีส่วนใหญ่ของคอมแพคเรนจ์ คือมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับใช้ในสถานที่ ที่มีขนาดจำกัด สำหรับข้อจำกัดส่วนใหญ่ นั้น ตัวสะท้อนจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศทดสอบ นอกจากนั้นแล้วโครงสร้างของตัวสะท้อนจะต้องมีความเที่ยงตรงของการประกอบ เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น วิธีคอมแพคเรนจ์นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้สำหรับวัดรูปแบบ

ของสายอากาศ, ใช้เปรียบเทียบอัตราการขยาย, ใช้วัดการสะท้อนจากสัญญาณเรดาร์ และงานอื่นๆ อีกมากมาย

เทคนิคที่สาม เป็นการโพกัสสายอากาศภายในบริเวณสนามแพร่กระจายระยะไกล สำหรับการวัดรูปแบบสนามระยะไกล โดยทำการโพกัสสายอากาศในระยะสั้นๆ และจะทำการโพกัสอีกครั้งหนึ่งที่ระยะอนันต์ ข้อดีส่วนใหญ่ของการใช้เทคนิคนี้ คือ การวัดรูปแบบนี้สามารถที่จะทำได้ในสนามแพร่กระจายระยะไกลกับสายอากาศหลายๆ อัน เมื่อระยะที่ทำการวัดนี้ ไม่ไกลเท่ากับระยะจริงที่ใช้ในการวัดสนามระยะไกล สำหรับเทคนิคที่สามนี้ จะใช้ก็ต่อเมื่อระยะทางของสนามระยะไกลนั้น ไกลเกินกว่าที่จะทำการวัดได้ในทางปฏิบัติ

อย่างไรก็ตามสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้วิธีการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบ เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ และรายละเอียดต่างๆ ในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีการคำนวณหาสนามระยะใกล้แบบระนาบ

3.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศ เช่น การแพร่กระจายคลื่น, การหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ รวมถึงการวัดสนามในแบบต่างๆ นั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐาน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้ในการคำนวณหาสนามระยะใกล้แบบระนาบ โดยจะเริ่มจากสมการแมกซ์เวลล์ [4,7] ซึ่งเป็นพื้นฐานของสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อหาสมการคลื่นของสนามไฟฟ้า โดยใช้หลักการแก้สมการจากสมการเฮล์มโฮลทซ์

สำหรับการคำนวณหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในอากาศจากอะพอร์เจอร์แบบระนาบนั้น จะนำวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยการแปลงฟูรีเยร์มาใช้ เพื่อหาสเปกตรัมคลื่นระนาบ และนำไปหาความสัมพันธ์ในสนามระยะใกล้ต่อไป

3.2 สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 สมการแมกซ์เวลล์

สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ประกอบด้วยสมการต่างๆ ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.4)$$

โดยที่ \mathbf{E} เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น [V/m]

\mathbf{H} เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น [A/m]

\mathbf{D} เป็นความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น [C/m²]

\mathbf{B} เป็นความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น [Wb/m²]

\mathbf{J} เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น [A/m²]

และ ρ เป็นความหนาแน่นประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น [C/m³]

โดยสมการ (3.3) และ (3.4) นั้นได้มาโดยการคิดไดเวอร์เจน ของสมการ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

จากกฎการอนุรักษ์ประจุ (Conservation of Charge) จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า \mathbf{J} และประจุไฟฟ้า ρ ดังนี้

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.5)$$

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นแบบไอโซโทรปิกจะมีความสัมพันธ์ของ \mathbf{D} กับ \mathbf{E} และ \mathbf{B} กับ \mathbf{H} ดังนี้

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3.6)$$

และ

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.7)$$

โดยที่ ϵ เป็นค่าเพอร์มิตติวิตีของตัวกลาง (Permittivity)

โดยที่ μ เป็นค่าความซาบซึมได้ของตัวกลาง (Permeability)

ในกรณีที่ตัวกลางมีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity : σ) กระแสไฟฟ้า \mathbf{J} จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นกระแสที่กระตุ้นจากภายนอก และส่วนที่เกิดจากสนามไฟฟ้า นั่นคือ

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} \quad (3.8)$$

โดยที่ \mathbf{J}_0 เป็นกระแสไฟฟ้าที่ถูกกระตุ้นจากภายนอก

3.3.2 สมการคลื่น

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นแบบไอโซโทรปิก และแบบเชิงเส้น จากสมการแมกซ์เวลล์ (3.1), (3.2) และสมการ (3.6), (3.7), (3.8) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ โปรดให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.10) การคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคิดค่าเคิร์ลของสมการ (3.9) และแทนค่า $\nabla \times \mathbf{H}$ จากสมการ (3.10) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{J}_0}{\partial t} \quad (3.11)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อคิดค่าเคิร์ลของสมการ (3.10) แล้ว แทนค่า $\nabla \times \mathbf{E}$ จากสมการ (3.9) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{J}_0 \quad (3.12)$$

จากการวิเคราะห์เวกเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{P} = \nabla \nabla \cdot \mathbf{P} - \nabla \cdot \nabla \mathbf{P} \quad (3.13)$$

โดยที่ \mathbf{P} เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันใดๆ

ดังนั้นเมื่อใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (3.13) สามารถเขียนสมการ (3.11) และ (3.12) ใหม่ได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \mathbf{J}_0}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \nabla \rho \quad (3.14)$$

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{J}_0 \quad (3.15)$$

ในกรณีที่ตัวกลางไม่มีสภาพการนำไฟฟ้า คือ $\sigma = 0$ จะได้สมการคลื่นเป็น ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial \mathbf{J}_0}{\partial t} + \frac{\nabla \rho}{\epsilon} \quad (3.16)$$

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = -\nabla \times \mathbf{J}_0 \quad (3.17)$$

โดยเรียกสมการ (3.16) และ (3.17) ว่าสมการคลื่นเวกเตอร์อินโฮโมจีเนียส (Inhomogeneous Vector Wave Equations) [7,8]

สำหรับการแก้ปัญหาสมการคลื่นโดยทั่วไป จะพิจารณาในบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิดคลื่น ซึ่งจะทำให้ทางด้านขวามือของสมการ (3.16) และ (3.17) มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงเรียกสมการลักษณะนี้ว่า สมการคลื่นเวกเตอร์โฮโมจีเนียส (Homogeneous Vector Wave Equations)

ตามหลักการของฟูรีเยร์อินทิกรัลนั้น ฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาใดๆ ย่อมสามารถกระจายให้อยู่ในรูปของ $e^{j\omega t}$ ได้เสมอ และเมื่อใช้ $e^{j\omega t}$ เป็นตัวร่วมแสดงการเปลี่ยนแปลงของเวลาแล้ว ฟังก์ชันอนุพันธ์ของเวลา ($\partial/\partial t$) จะสามารถแทนได้ด้วย $j\omega$ ดังนั้นสมการ (3.16) และ (3.17) สามารถเขียนใหม่ ได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = j\omega \mu \mathbf{J}_0 + \frac{\nabla \rho}{\epsilon} \quad (3.18)$$

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = -\nabla \times \mathbf{J}_0 \quad (3.19)$$

โดยที่

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (3.20)$$

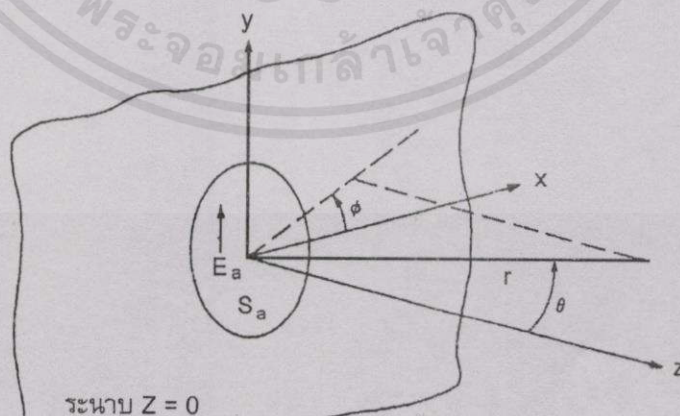
และในบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิดคลื่นจะได้

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (3.21)$$

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (3.22)$$

โดยสมการที่ได้ทั้ง (3.21) และ (3.22) จัดอยู่ในรูปของสมการที่เรียกว่า สมการเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz Equation)

3.3 ทฤษฎีการคำนวณหาสนามระยะใกล้แบบระนาบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำคัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.1 แสดงอะเพอร์เจอร์ในระนาบ z เท่ากับศูนย์

ในการหาสนามที่แพร่กระจายในอากาศจากอะโพร์เจอร์แบบระนาบนั้น จะใช้วิธีการหาอุปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) ของสนามที่อยู่บนอะโพร์เจอร์ โดยใช้คุณสมบัติต่างๆ ของคู่การแปลงฟูริเยร์ ในการหาคุณสมบัติของสายอากาศแบบอะโพร์เจอร์

จากภาพที่ 3.1 เมื่ออะโพร์เจอร์ S_a อยู่ในระนาบ z เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้สนามไฟฟ้าที่สัมผัสกับผิวของอะโพร์เจอร์มีค่าเป็น E พิจารณาสถาณที่แพร่กระจายในบริเวณ z มากกว่าศูนย์ จากกฎเกณฑ์เบื้องต้นของการแปลงฟูริเยร์ เมื่อมีฟังก์ชัน $f(t)$ ใดๆ ในกรณีนี้จะใช้กฎของการสมมาตร (Symmetry) [9] ซึ่งสามารถจัดรูปสมการของการแปลงฟูริเยร์ และรูปสมการผกผันของการแปลงฟูริเยร์ ได้ดังนี้

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.23ก)$$

และสมการผกผันเป็น

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.23ข)$$

และเพื่อให้เหมาะสมกับสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจะกำหนดให้ k_x เทียบได้กับ t และ x เทียบได้กับ ω ซึ่งสามารถเขียนสมการ (3.23ก) และ (3.23ข) ใหม่ ได้ดังนี้

$$f(k_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{jk_x x} dx \quad (3.24ก)$$

และสมการผกผันเป็น

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(k_x) e^{-jk_x x} dk_x \quad (3.24ข)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีฟังก์ชันของทั้ง x และ y คือ $u(x, y)$ จะสามารถใช้กฎเกณฑ์เบื้องต้นของการแปลงฟูริเยร์ ได้ดังนี้

$$U(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (3.25ก)$$

และสมการผกผันเป็น

$$u(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(k_x, k_y) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.25ข)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการ (3.25) ทั้งสองสมการนี้เป็นสมการพื้นฐานที่จะใช้ต่อไป

จากสมการแมกซ์เวลล์ (3.1)-(3.4) ในหัวข้อที่แล้ว ในกรณีที่สนามมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับเวลา เมื่อบริเวณ z มากกว่าศูนย์ ซึ่งทั้ง J และ ρ จะเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการแมกซ์เวลล์ (3.4) จะกลายเป็น $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ ซึ่งจะได้สมการคลื่นเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) [4,10] เป็นดังนี้

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \mathbf{E} = 0 \quad (3.26ก)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (3.26ข)$$

จากคุณสมบัติของการแปลงฟูรีเยร์

$$\mathfrak{F}_t \left\{ \frac{d s(t)}{dt} \right\} = j\omega \mathfrak{F}_t \{ s(t) \} \quad (3.27)$$

นั่นคือ การแปลงฟูรีเยร์ของอนุพันธ์ ของฟังก์ชันเทียบกับเวลา ($\partial/\partial t$) มีค่าเท่ากับ $j\omega$ เท่าของการแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันนั้น และในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\mathfrak{F}_x \left\{ \frac{\partial u(x,y)}{\partial x} \right\} = -jk_x \mathfrak{F}_x \{ u(x,y) \} \quad (3.28ก)$$

$$\mathfrak{F}_x \left\{ \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} \right\} = (-jk_x)^2 \mathfrak{F}_x \{ u(x,y) \} \quad (3.28ข)$$

$$\mathfrak{F}_{yx} \left\{ \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} \right\} = -k_x^2 \mathfrak{F}_{yx} \{ u(x,y) \} \quad (3.28ค)$$

เมื่อกระจายสมการ (3.26ก) และ (3.26ข) จะได้

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) \mathbf{E}(x,y,z) = 0 \quad (3.29ก)$$

$$\frac{\partial E_x(x,y,z)}{\partial x} + \frac{\partial E_y(x,y,z)}{\partial y} + \frac{\partial E_z(x,y,z)}{\partial z} = 0 \quad (3.29ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ∂x ใช้งานเพื่อ ∂y ภาษาเท่านั้น ∂z ญาติให้น่าไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าทำการแปลงฟูรีเยร์ ทั้ง 2 สมการนี้โดยใช้คุณสมบัติการแปลงฟูรีเยร์ ข้างต้นจะได้

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + (k_0^2 - k_x^2 - k_y^2) \right] E(k_x, k_y, z) = 0 \quad (3.30ก)$$

$$k_x E_x(k_x, k_y, z) + k_y E_y(k_x, k_y, z) + j \frac{\partial}{\partial z} E_z(k_x, k_y, z) = 0 \quad (3.30ข)$$

เมื่อ $E(k_x, k_y, z)$ เป็นการแปลงฟูรีเยร์ ของสนามไฟฟ้าเทียบกับ x และ y ถ้ากำหนดให้

$$k_z^2 = k_0^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad (3.31)$$

ดังนั้นสมการ (3.30ก) จะเป็นดังนี้

$$\frac{\partial^2 E(k_x, k_y, z)}{\partial z^2} + k_z^2 E(k_x, k_y, z) = 0 \quad (3.32)$$

ซึ่งผลลัพธ์ของสมการจะอยู่ในรูปของ $e^{\pm j k_z z}$ เนื่องจากสนามประกอบไปด้วยคลื่นที่แพร่กระจายออกจากอะโพเรเจอร์ ไปในทิศทาง z เพราะฉะนั้นจึงมีเฉพาะฟังก์ชัน $e^{-j k_z z}$ เท่านั้นที่เป็นจริง ดังนั้นผลลัพธ์ของสมการ (3.32) จะเป็นดังนี้

$$E(k_x, k_y, z) = A(k_x, k_y) e^{-j k_z z} \quad (3.33)$$

เมื่อ $A(k_x, k_y)$ เป็นฟังก์ชันที่ต้องการหา จากนั้นแทนสมการ (3.33) ลงในสมการ (3.30ข) จะได้

$$k_x A_x + k_y A_y + k_z A_z = 0 \quad (3.34ก)$$

หรือ

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (3.34ข)$$

โดย \mathbf{k} เป็นเวกเตอร์ที่มีส่วนประกอบเป็น k_x, k_y, k_z

เอกสารนี้เป็นเอกสารจากคู่มือเบื้องต้นของการแปลงฟูรีเยร์ เมื่อทำการฝึกฝนสมการของการแปลงฟูรีเยร์แล้ว ไม่ว่าจะตั้งนัยที่ระนาบ z เท่ากับศูนย์ ผลของสนามไฟฟ้าที่ได้จะเป็นค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{A}(k_x, k_y) e^{-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dk_x dk_y \quad (3.35)$$

โดยที่

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = k_x x + k_y y + k_z z \quad (3.36)$$

เมื่อ

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \cos \phi \quad (3.37ก)$$

$$k_y = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \sin \phi \quad (3.37ข)$$

$$k_z = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta \quad (3.37ค)$$

โดยเรียกฟังก์ชัน $\mathbf{A}(k_x, k_y)$ ว่า สเปกตรัมคลื่นระนาบ (Plane Wave Spectrum) [2,4,5,11]

ณ บริเวณสนามที่ระนาบ z เท่ากับศูนย์ จะได้

$$E_x(x, y, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_x(k_x, k_y) e^{+j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3.38ก)$$

$$E_y(x, y, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_y(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3.38ข)$$

จากสมการ (3.38) ทำการผกผันสมการของการแปลงฟูริเยร์ เพื่อหา สเปกตรัมคลื่นระนาบ $A_x(k_x, k_y)$ และ $A_y(k_x, k_y)$ ได้ดังสมการ

$$A_x(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(x, y, 0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.39ก)$$

$$A_y(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, y, 0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.39ข)$$

สเปกตรัมคลื่นระนาบ ที่ได้จากการคำนวณนี้ สามารถที่จะนำไปหารูปแบบของสนามระยะ

ไกลได้ จากความสัมพันธ์ ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = j \frac{2\pi}{r} k_z \mathbf{A}(k_x, k_y) e^{-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \quad (3.40)$$

3.4 การคำนวณหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกลจากข้อมูลที่ได้จากสนามระยะใกล้

จากการศึกษาทฤษฎีการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกล โดยการวัดข้อมูลในสนามระยะใกล้แบบระนาบนั้น สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$A(k_x, k_y) = \iint_{S_a} E_a(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.41)$$

และ

$$E(\mathbf{r}) = j \frac{2\pi}{r} k_0 \cos\theta e^{-jk_0 r} A(k_0 \sin\theta \cos\phi, k_0 \sin\theta \sin\phi) \quad (3.42)$$

$$\text{เมื่อ } k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

โดยที่ $A(k_x, k_y)$ คือ สเปกตรัมคลื่นระนาบของ $E_a(x, y)$

$E_a(x, y)$ คือ สนามระยะใกล้ที่วัดได้

$E(\mathbf{r})$ คือ สนามระยะไกล

เนื่องจากในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ได้มีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ดังนั้นจึงต้องทำการจัดรูปในสมการ (3.41) ให้อยู่ในรูปของสมการการแปลงฟูริเยร์แบบดิสครีต ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$f(t) = \int_0^t F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.43)$$

จากที่กำหนดไว้ในตอนต้นโดยให้ k_x เทียบได้กับ t และ x เทียบได้กับ ω จะได้

$$f(k_x) = \int_0^{k_x} F(x) e^{jk_x x} dx \quad (3.44)$$

แทน $dx \rightarrow \Delta x$ ดังนั้น $x \rightarrow n \Delta x$

จะได้

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย} \quad f(k_x) = \sum_{n=0}^{N-1} F(n \Delta x) e^{jk_x n \Delta x} \Delta x \quad (3.45)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหามาใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.41) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการการแปลงฟูริเยร์แบบดิสครีต ได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(k_x, k_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{E}_a(n \Delta x, m \Delta y) e^{(jk_x n \Delta x + jk_y m \Delta y)} \Delta x \Delta y \quad (3.46ก)$$

สามารถจัดรูปการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(k_x, k_y) = \Delta x \Delta y \sum_{m=0}^{M-1} e^{jk_y m \Delta y} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{E}_a(n \Delta x, m \Delta y) e^{jk_x n \Delta x} \quad (3.46ข)$$

จากสมการ (3.46ข) จะได้ สเปกตรัมคลื่นระนาบของ $\mathbf{E}_a(x, y)$ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่
ได้ไปหาสนามระยะไกล $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ ในสมการ (3.42) ต่อไป

3.5 สรุป

จากสมการแมกซ์เวลล์ เป็นสมการพื้นฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถนำมาใช้เพื่อหาสนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) ในบริเวณสนามระยะไกลได้ โดยจัดให้อยู่ในรูปของสมการเฮล์มโฮลทซ์แบบสมการคลื่นเวกเตอร์โฮโมจีเนียส เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามระยะไกลแบบระนาบ

ในการคำนวณหาสนามระยะไกลแบบระนาบ เพื่อแปลงไปสู่สนามระยะไกลนั้น สามารถทำได้โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การแปลงฟูริเยร์ จากข้อมูลที่ได้จากการวัดสนามระยะไกลไปสู่ สเปกตรัมคลื่นระนาบ โดยในส่วนของ การคำนวณนั้น จะใช้การแปลงฟูริเยร์แบบดิสครีต มาช่วยในการจัดรูปแบบของสมการให้ง่ายขึ้นในการเขียนโปรแกรมการแปลงฟูริเยร์ และจะนำข้อมูลสเปกตรัมคลื่นระนาบที่ได้นี้ไปหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะไกลได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้

แบบระนาบ

4.1 กล่าวนำ

ในการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยใช้เทคนิคการวัดสนามระยะใกล้ แบบระนาบนี้ จำเป็นต้องทราบปัจจัยหรือพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบการวัดดังกล่าวเช่น รูปร่างของอะเพอร์เจอร์ที่ใช้ในการกวาด, ขนาดของการกวาด, คุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัด, รูปแบบการกวาด, ระยะห่างของระนาบที่เหมาะสมกับสายอากาศทดสอบ, ระยะห่างในการกวาดบนระนาบที่เหมาะสม เป็นต้น

นอกจากพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆ ของการทดสอบให้เหมาะสมกับอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัดด้วย เช่น ขนาดของอะเพอร์เจอร์แบบระนาบที่ทำการวัด ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะสามารถรองรับพลังงานทั้งหมดที่แพร่ออกมาจากสายอากาศทดสอบ โพรบที่ใช้วัดจะต้องมีความเหมาะสม โดยจะทำการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของโพรบ เพื่อนำมาทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ และในบริเวณสนามระยะใกล้ที่จะทำการวัดจะต้องไม่มีเกรตติ้งโลบ (Grating Lobes) เกิดขึ้นในบริเวณสนามที่จะทำการทดสอบ เนื่องจากเกรตติ้งโลบนั้น มีผลต่อไซด์โลบ (Sidelobes) ทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดขึ้น

สำหรับรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นนั้น สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

4.2 รูปร่างของอะเพอร์เจอร์ที่ใช้ในการกวาด

ในโครงการวิจัยนี้ใช้อะเพอร์เจอร์แบบระนาบในการทดสอบการวัดสนามระยะใกล้ โดยการใช้โพรบเคลื่อนที่ติดไปกับเครื่องมือที่เรียกว่า “ เครื่องกวาดโพรบ ” [12] ซึ่งจะทำการกวาดไปตามแนวเส้นทางที่ได้กำหนดขึ้นตลอดอะเพอร์เจอร์บนสายอากาศทดสอบ ในขณะที่เดียวกันจะทำการวัดข้อมูลคือ ค่าของขนาด และตำแหน่งของเฟสไปพร้อมกับการกวาดในแต่ละตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไป บนอะเพอร์เจอร์ที่ทำการทดสอบ

โดยปกติทั่วไปนั้น การกวาดแบบระนาบ นิยมใช้ทดสอบกับสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง และการใช้การกวาดแบบระนาบยังมีข้อดีในด้านการชดเชยโพรบได้ง่ายกว่าแบบอื่น ๆ ร่วมกันการคำนวณถึงระยะเวลาที่ใช้ในการวัดจะเร็วกว่าแบบอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน จึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้โพรบกวาด เพื่อเก็บข้อมูลบนอะเพอร์เจอร์ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นั้น จากการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมา ได้มีการเปรียบเทียบลักษณะการกวาดแบบต่างๆ ในสนามระยะใกล้

ทั้ง 3 รูปแบบ คือ แบบระนาบ, แบบทรงกระบอกและแบบทรงกลม เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการใช้งานแบบต่างๆ [6] โดยแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงเปรียบเทียบการกวาดโพรบแบบต่างๆ ในสนามระยะใกล้

พารามิเตอร์	แบบระนาบ	แบบทรงกระบอก	แบบทรงกลม
สายอากาศอัตรการขยายสูง	ดีเยี่ยม	ดี	ดี
สายอากาศอัตรการขยายต่ำ	พอใช้	พอใช้	ดีเยี่ยม
สายอากาศอยู่กับที่	แน่นอน	เป็นไปได้	เป็นไปได้
การปรับแต่ง	ง่าย	ยาก	ยาก
การแปลง	ง่าย	ปานกลาง	ปานกลาง
การชดเชยโพรบ	ง่าย	ซับซ้อน	ซับซ้อน
ความเร็ว	เร็ว	ช้า	ช้า

จากตารางเปรียบเทียบในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการวัดสนามระยะใกล้โดยการกวาดโพรบแบบระนาบนั้น เมื่อพิจารณาโดยรวมๆ แล้วจะเห็นว่าเป็นวิธีที่เหมาะสม และสะดวกกว่าแบบการกวาดแบบทรงกระบอกและแบบทรงกลม ดังนั้นวิธีการวัดแบบระนาบนี้ จึงเป็นที่นิยมใช้วัดกันมากที่สุด และก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่งในการเลือกใช้วิธีนี้มาทำการทดสอบในงานวิจัยนี้เอง

4.3 ขนาดของการกวาด

ในการกวาดโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบนั้น พื้นที่ของการกวาดจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรองรับพลังงานทั้งหมดของสนามระยะใกล้ที่แพร่ออกมาจากสายอากาศทดสอบ ขนาดของการกวาดที่ถูกต้อง และเหมาะสมสำหรับการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ สามารถหาได้จากกฎเกณฑ์ 3 ข้อ ดังนี้

1.) สำหรับบริเวณสนามระยะใกล้แบบระนาบ ขนาดของการกวาดจะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างทางกายภาพของสายอากาศทดสอบเป็นหลัก โดยสามารถหาได้จากสูตร

$$L = D + 2z \tan \theta \quad (4.1)$$

โดยที่ L เป็นขนาดของการกวาดบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ

D เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบ

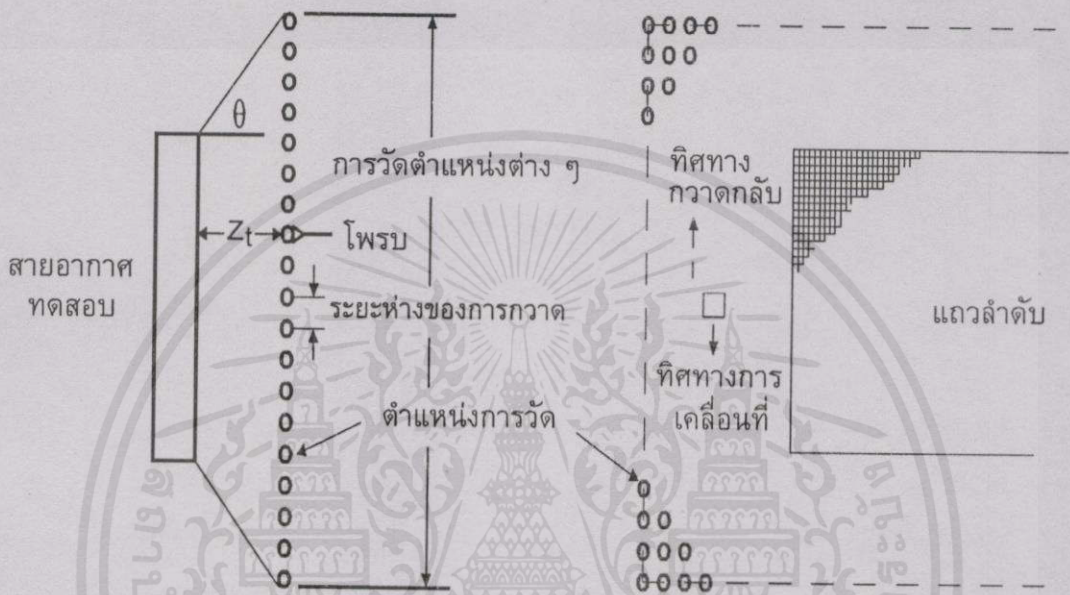
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

z เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบกับโพรบ

θ เป็นมุมของการขยายขนาดอะเพอร์เจอร์ที่ใช้วัด

- 2.) ระดับสัญญาณ RF ควรจะต่ำกว่าสัญญาณไซด์โลปที่ต่ำที่สุดของบริเวณที่ทำการกวาด
- 3.) ขนาดของการกวาดบนอะเพอร์เจอร์ต้องไม่ใหญ่เกินกว่าที่ได้กำหนดไว้ในกฎข้อ 1 เนื่องจากจะทำให้การคำนวณข้อมูลใช้เวลานาน และข้อมูลที่ได้จะมีคุณภาพที่ต่ำลง อันเนื่องมาจากเกิดสัญญาณรบกวนกับข้อมูลเหล่านั้น

จากกฎเกณฑ์ทั้ง 3 ข้อ ที่กล่าวมาแล้วนั้น สามารถแสดงให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงบริเวณทดสอบสนามระยะใกล้แบบระนาบ

4.4 คุณสมบัติของโพรบ

ในการเลือกโพรบเพื่อนำมาใช้วัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนั้น ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของโพรบให้เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดสอบ [13] โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของโพรบที่จะนำมาใช้ ดังต่อไปนี้

- 1.) การรบกวนต่างๆ ของสนามอันเนื่องมาจากโพรบ และอุปกรณ์การวัดอื่นๆ จะต้องไม่ทำให้ค่าความเที่ยงตรงในการวัดคลาดเคลื่อนไป
- 2.) มีขนาดเล็กเพื่อลดสัญญาณรบกวนต่างๆ
- 3.) ลักษณะปากโพรบที่ใช้วัดต้องมีขนาดเล็กเพียงพอ สำหรับการวัดเฉพาะจุดในสนาม
- 4.) มีลักษณะของการโพลาไรเซชันที่เหมาะสม
- 5.) ไม่มีจุดบอด (Null) ในทุกทิศทางของบริเวณที่ทำการวัด
- 6.) เป็นตัวส่งสัญญาณแรงดันที่มีค่ามากเพียงพอ เพื่อที่จะทำการวัดได้อย่างถูกต้อง
- 7.) มีการแพร่กระจายคลื่นของตัวโพรบไปทางด้านหลังน้อย

8.) สามารถใช้งานในย่านความถี่ที่กว้างได้

9.) สามารถเก็บข้อมูลของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ได้ตลอดอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัด

จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จึงได้เลือก ท่อนำคลื่นเปิดปลาย (Open-ended Waveguide) มาใช้เป็นโพรบ เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้อกำหนดข้างต้น ซึ่งสายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลายนี้เหมาะสำหรับการวัดแบบทุกทิศทาง (Omnidirectional Measurement) ของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะมีสัญญาณมารบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยมาก จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก นอกจากจะพิจารณาคูสมบัติของโพรบแล้ว ยังต้องทำการชดเชยโพรบหรือวิธีการที่เรียกว่าโพรบคอลเลกชัน อีกด้วย ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

4.5 รูปแบบการกวาด

ในที่นี้หมายถึงทิศทางหรือแนวทางการเคลื่อนที่ไปบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ [6] รูปแบบการกวาดที่นิยมใช้กันมาก คือ แบบราสเตอร์ (Raster) เป็นการกวาดในระนาบ 2 มิติ แกน x , แกน y สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.2(ก) นอกจากแบบราสเตอร์แล้ว ยังมีวิธีการกวาดอีกแบบหนึ่ง คือแบบเพลนโพลาร์ (Plane Polar) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สตาร์เบิร์สต์ (Starburst) มีลักษณะการกวาดคล้ายกับดาวกระจายแตกออกเป็นวงกลม แสดงได้ดังภาพที่ 4.2(ข)



(ก) แบบราสเตอร์

(ข) แบบสตาร์เบิร์สต์

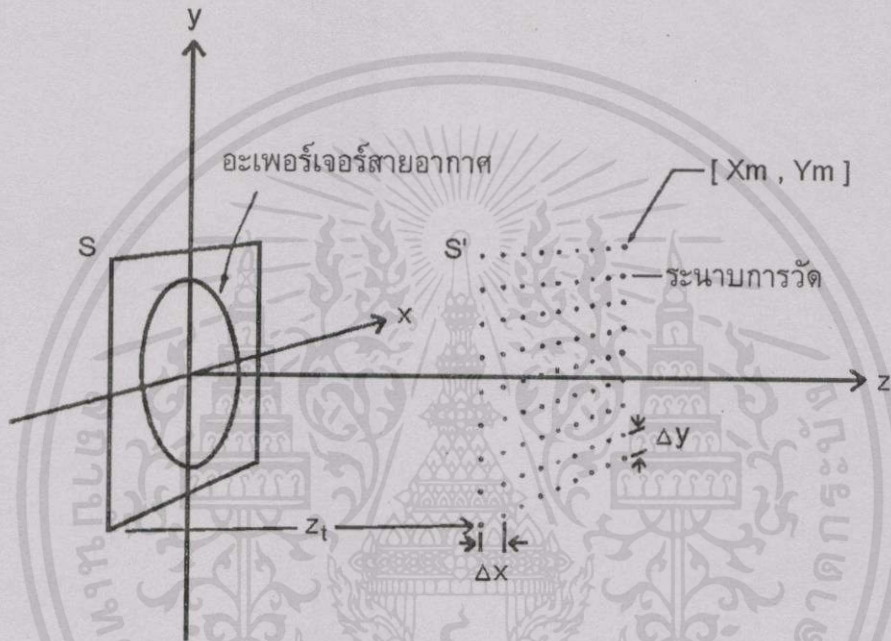
ภาพที่ 4.2 แสดงรูปแบบการกวาดโพรบแบบราสเตอร์ และแบบสตาร์เบิร์สต์

สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้การทดสอบแบบราสเตอร์ เนื่องจากเป็นการสะดวกในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนโพรบ ให้กวาดเป็นแบบราสเตอร์ โดยจะเรียกเครื่องมือชนิดนี้ว่า เครื่องกวาดโพรบ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อของเครื่องกวาดโพรบต่อไป

4.6 ระยะห่างของระนาบที่เหมาะสมกับสายอากาศทดสอบ

ในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำเป็นต้องกำหนดระยะนาบที่จะทำการกวาด และระยะห่างในการกวาดให้เหมาะสม เพื่อผลลัพธ์ที่ออกมาจะได้ค่าใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด สามารถหาได้โดยอาศัยหลักการ ดังนี้

กำหนดให้สายอากาศวางอยู่บนระนาบ z เท่ากับศูนย์ โดยทำการกวาดโพรบเพื่อหาสนามระยะใกล้บนระนาบ z เท่ากับ z_1 และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของการสุ่ม (Sampling) ในแนวแกน x และแนวแกน y เป็น Δx และ Δy ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงระนาบของการวัดสนามระยะใกล้

จากการศึกษาเพื่อหาระยะ z_1 ที่เหมาะสม [4,11] ได้มีการค้นคว้าและทดลองจนสรุปได้ว่า ระยะ z_1 ที่เหมาะสม ควรจะมีค่ามากกว่า 1λ เนื่องจากในช่วงที่ $z_1 < 1\lambda$ นั้น คลื่นที่อยู่ในย่านบริเวณสนามรีแอกทีฟจะมีผลต่อการวัด โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ $|k| = k_0$ เมื่อ $k_x^2 + k_y^2 > k_0^2$ ซึ่งค่าคงที่ในการแพร่กระจายคลื่น k เป็นส่วนจินตภาพ เนื่องจาก $k_0^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ ดังนั้นคลื่นที่เกิดจากส่วนของ k_z จะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล หรืออาจหายไปทิศทาง $z_1 > 1\lambda$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าคลื่นที่เกิดจากส่วนของ k_z จะมีผลในระยะ $z_1 < 1\lambda$ เท่านั้น ซึ่งที่ระยะ $z_1 > 1\lambda$ คลื่นส่วนนี้จะถูกลดทอนไปหมด ดังนั้นในการกำหนดระยะนาบที่จะทำการวัดควรจะให้ระยะห่างจากสายอากาศทดสอบเป็น $z_1 > 1\lambda$ เสมอ ประโยชน์ด้านการคำนวณการวัด นอกจากนั้นแล้วในการกำหนดระยะห่าง z_0 จะต้องทำให้เกิดการคับปลิง ระหว่างโพรบกับสายอากาศทดสอบให้น้อยที่สุดด้วย

4.7 ระยะห่างในการกวาดบนระนาบที่เหมาะสม

สามารถหาได้โดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบดิสครีต (Discrete Fourier Transform) [14] ช่วยในการคำนวณโดยกำหนดให้ฟังก์ชัน $f(t)$ เป็นฟังก์ชันที่มีขอบเขตอยู่ในช่วง $[-x_m, x_m]$ ในการแปลงฟูริเยร์ของฟังก์ชันนี้ จะแทน $f(t)$ ด้วยฟังก์ชัน $f_T(t)$ ซึ่งมีคาบเป็นอนันต์ (Infinity) และจากเอ็กซ์โพเนนเชียลซีรีส์ (Exponential Series) สามารถแทนฟังก์ชัน $f_T(t)$ ได้ดังนี้

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{j n \omega_0 t} \quad (4.2)$$

โดยที่

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) e^{-j n \omega_0 t} dt \quad (4.3)$$

และ

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (4.4)$$

$$\omega_n \triangleq n \omega_0 \quad (4.5)$$

$$F(\omega_n) \triangleq T F_n \quad (4.6)$$

ดังนั้นสมการ (4.2) และ (4.3) จะเป็น

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} F(\omega_n) e^{j \omega_n t} \quad (4.7)$$

และ

$$F(\omega_n) = \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) e^{-j \omega_n t} dt \quad (4.8)$$

และระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมของ $f_T(t)$ เป็น

$$\begin{aligned} \Delta \omega &= \omega_{n+1} - \omega_n \\ &= (n+1) \omega_0 - n \omega_0 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{2\pi}{T} \quad (4.9)$$

ใช้ความสัมพันธ์ของ T ในสมการ (4.7) จะได้

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\omega_n) e^{j\omega_n t} \frac{\Delta\omega}{2\pi} \quad (4.10)$$

เมื่อคาบ T มีขนาดใหญ่ขึ้นจนถึงระยะอนันต์ ฟังก์ชัน $f_T(x)$ ที่ระยะอนันต์จะเป็น

$$\lim_{T \rightarrow \infty} f_T(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\omega_n) e^{j\omega_n t} \Delta\omega \quad (4.11)$$

ดังนั้น

$$f(t) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.12)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการ (4.8) จะเป็น

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.9) ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมของ $f_T(t)$ เป็น $\Delta\omega = 2\pi/T$ นั้น ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของคลื่นสเปกตรัมโดยทั่วไปจะกำหนดให้อยู่ในรูปของ k ดังนั้นจะได้

$$\Delta k = \Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.14)$$

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการกำหนดระยะห่างของสเปกตรัม k_x และ k_y ในอากาศ โดยการกำหนดนี้จะต้องสัมพันธ์กับการแปลงฟูริเยร์แบบอินเวอร์สดีครีต (Inverse Discrete Fourier Transform) ของระนาบ x, y ในอากาศ โดยที่ $x \in [-x_m, x_m]$ และ $y \in [-y_m, y_m]$ ดังนั้น จะได้

$$\Delta k_x = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2x_m} = \frac{\pi}{x_m} \quad (4.15ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2π เพื่อการ $\frac{2\pi}{2y_m} = \frac{\pi}{y_m}$ บ่งชี้ว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $\Delta k_y = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2y_m} = \frac{\pi}{y_m} \quad (4.15ข)$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ y_m ว่างอิงถึง y_m ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการกำหนดระยะห่างในการสุ่มข้อมูล Δx และ Δy จะต้องสัมพันธ์กับสเปกตรัมคลื่นระนาบของ k ในอากาศด้วยเช่นกัน ซึ่ง $k_x \in [-k_{xm}, k_{xm}]$ และ $k_y \in [-k_{ym}, k_{ym}]$ ดังนั้น จะได้

$$\Delta x = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2k_{xm}} = \frac{\pi}{k_{xm}} \quad (4.16ก)$$

$$\Delta y = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2k_{ym}} = \frac{\pi}{k_{ym}} \quad (4.16ข)$$

และเนื่องจาก

$$k_x = k_0 \sin\theta \cos\phi \quad (4.17)$$

ดังนั้น

$$k_{xm} = k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.18)$$

และเนื่องจาก

$$k_y = k_0 \sin\theta \sin\phi \quad (4.19)$$

ดังนั้น

$$k_{ym} = k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.20)$$

เพราะฉะนั้น ระยะห่างในการสุ่มข้อมูลของสนามระยะใกล้แบบระนาบ [4.11] จะได้ดังสมการ

การ

$$\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda}{2} \quad (4.21)$$

นอกจากนี้แล้ว ยังสามารถคำนวณหาจำนวนจุด ในการสุ่มข้อมูลบน แกน x และ แกน y ได้ N_x และ N_y จุด ดังนี้

$$2x_m = N_x \Delta x \quad (4.22ก)$$

$$2y_m = N_y \Delta y \quad (4.22ข)$$

$$2k_{xm} = N_x \Delta k \quad (4.22ค)$$

$$2k_{ym} = N_y \Delta k \quad (4.22ง)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเอกสารไปใช้

4.8 สรุป

ในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ ดังที่ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทนี้แล้ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกใช้การวัดสนามระยะไกลแบบระนาบ เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถทดสอบกับสายอากาศที่มีอัตราการขยายสูงได้ดี สมการที่ใช้ในการแปลงข้อมูลไปยังสนามระยะไกลไม่ซับซ้อน ยุ่งยาก และใช้เวลาในการวัดและการคำนวณน้อยกว่าแบบอื่น ๆ รวมถึงมีความเหมาะสมกับเครื่องมือที่ได้จัดเตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ ที่เรียกว่า เครื่องกวาดโพรบ

สำหรับปัจจัยที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงอีกส่วนหนึ่ง คือ สายอากาศโพรบที่นำมาใช้วัดเก็บข้อมูล จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ สายอากาศแบบท่อนำคลื่นเปิดปลาย มาใช้แทนโพรบ ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วนั้น นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบที่ใช้วัด เพื่อเอาไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ ดังแสดงไว้ในบทผลการทดลอง

ส่วนปัจจัยอื่น ๆ นั้น โดยเฉพาะระยะ และตำแหน่งของการวัดข้อมูลจะต้องถูกต้อง เทียงตรง เนื่องจากจะมีผลอย่างมากกับข้อมูลที่วัดได้ จึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมการเคลื่อนที่ของการกวาดด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมให้เครื่องกวาดโพรบเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ได้ตามต้องการ เพื่อลดความผิดพลาดในส่วน of ระยะและตำแหน่งต่าง ๆ ให้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัด

5.1 กล่าวนำ

โดยทั่วไปโพรบที่ใช้วัดในการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้น เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งเช่นกัน ซึ่งในส่วนของตัวโพรบเองจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของตัวเอง ทำให้การหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบ อาจเกิดข้อผิดพลาด อันเนื่องมาจากการแพร่กระจายคลื่นของโพรบที่ใช้วัดได้ ดังนั้นเมื่อทำการวัดข้อมูลในสนามระยะใกล้แล้ว ข้อมูลที่ได้จะต้องนำมาทำการปรับหรือชดเชยค่าที่ได้ให้เหมาะสมกับโพรบที่ใช้วัด

5.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ

โดยทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า สนามที่ถูกสร้างมาจากประจุหรือกระแสสามารถที่จะหาได้โดยทำการวัดจากแรงที่กระทำบนประจุ ซึ่งอาจจะอยู่นิ่งหรือกำลังเคลื่อนที่ก็ได้ (เปรียบเสมือนเป็นสนามรอบๆ สายอากาศทดสอบ) และในกรณีถ้ามีระบบอีกระบบหนึ่งทำการสร้างประจุขึ้นมาอีกชุดหนึ่ง (เปรียบเสมือนเป็นสนามรอบๆ ตัวโพรบ) โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการวัดสนามที่เกิดจากประจุชุดแรก ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจะทำให้สนามที่ต้องการวัดในครั้งแรกเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากผลของการกระทำกันระหว่างประจุชุดแรกกับชุดที่สองซึ่งหมายถึงตัวโพรบนั่นเอง ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง อย่างไรก็ตามผลกระทบของโพรบสามารถที่จะทำการประมาณค่าได้ โดยถ้าสมมติว่าไม่มีการคัปปลิงกันระหว่างสายอากาศทั้งสอง ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการชดเชยคุณสมบัติของโพรบโดยใช้ทฤษฎีลอเรนซ์รีซิพริคิตี (Lorentz Reciprocity Theorem) [15] มาช่วยในการวิเคราะห์

จากภาพที่ 5.1 สนามที่ถูกสร้างโดยสายอากาศทดสอบ A จะถูกวัดด้วยสายอากาศที่เป็นโพรบ B โดยทำการเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวระนาบที่กำหนดให้ z เท่ากับ z_0

สมมติให้ปริมาตร (Volume : V) เป็นปริมาตรที่ปราศจากแหล่งกำเนิดใดๆ ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยพื้นผิวปิด Σ ประกอบด้วยระนาบ S_0 ที่ z เท่ากับ a , พื้นผิวที่ระยะอนันต์ (Infinity : S_∞) และพื้นผิวปิด Σ_B รอบๆ สายอากาศแบบโพรบ B

กำหนดให้ E_a, H_a เป็นสนามของสายอากาศทดสอบ A

E_b, H_b เป็นสนามของสายอากาศแบบโพรบ B

E_{as}, H_{as} เป็นสนามที่แตกกระจายโดยสายอากาศทดสอบ A เมื่อสายอากาศแบบโพรบ

B ถูกกระตุ้นให้กำเนิดสัญญาณ

สิ่งที่น่าสังเกต คือ ที่จุดทุกจุดบนพื้นผิวระนาบ (S_∞) ค่า $\hat{n} \times \mathbf{E}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และ จากรูปของเวกเตอร์ $\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C})$ มีค่าเท่ากับ $(\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C}$ ดังนั้นส่วนที่อยู่ในวงเล็บจะ หายไป

จากสมการ (5.1) การอินทิเกรตบนพื้นผิวปิด Σ_B จะสามารถคำนวณหาค่าได้ถูกต้อง เมื่อ กำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิว \hat{n}_B มีค่าเท่ากับ $-\hat{n}$ ดังนั้นถ้าตัวกลางที่อยู่ใน ปริมาตร (V_B) เป็นแบบเชิงเส้น และเป็นตัวกลางแบบไอโซโทรปิกแล้ว เมื่อใช้ทฤษฎีลอว์เรนซ์รีซิพ โพรซิติ์ จะได้

$$\begin{aligned} \oint_{\Sigma_B} [(\mathbf{E}_a + \mathbf{E}_{bs}) \times (\mathbf{H}_b + \mathbf{H}_{as}) - (\mathbf{E}_b + \mathbf{E}_{as}) \times (\mathbf{H}_a + \mathbf{H}_{bs})] \cdot (-\hat{n}_B) da \\ = - \int_{V_B} [(\mathbf{E}_b + \mathbf{E}_{as}) \cdot (\mathbf{J}_a + \mathbf{J}_{bs}) - (\mathbf{E}_a + \mathbf{E}_{bs}) \cdot (\mathbf{J}_b + \mathbf{J}_{as})] dv \quad (5.3) \end{aligned}$$

จากข้อกำหนด ให้สนามที่แตกกระจาย (Scattered Field : \mathbf{E}_{bs}) , กระแส (Current : \mathbf{J}_a) และ กระแสที่แตกกระจาย (Scattered Current : \mathbf{J}_{as}) มีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดปริมาตร (V_B) อย่างไรก็ตาม ในการหาผลลัพท์ในสมการ (5.3) ค่าของสนามที่แตกกระจายโดยสายอากาศทดสอบ (Scattered Field : \mathbf{E}_{as}) จะถูกตัดทิ้ง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสนามของโพรบ (\mathbf{E}_b) ดังนั้นฝั่งขวาของสมการ (5.3) จะเป็น

$$\int_{V_B} [\mathbf{E}_b \cdot \mathbf{J}_{bs} - \mathbf{E}_a \cdot \mathbf{J}_b] dv \triangleq P_B(\mathbf{r}_0) \quad (5.4)$$

สำหรับค่าของ $P_B(\mathbf{r}_0)$ จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันที่ได้รับเมื่อเปิดวงจร (Open circuit) ของ สายอากาศแบบโพรบ และจากทฤษฎีโครงข่าย (Network Theory) ได้กำหนดไว้ว่า แรงดันที่ได้รับ ที่ส่งไปยังโหลดอิมพีแดนซ์จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันที่ได้รับเมื่อเปิดวงจร ที่ความถี่ใดๆ ดังนั้น $P_B(\mathbf{r}_0)$ จะแทนสัญญาณที่วัดได้ภายในสัดส่วนที่คงที่ และสามารถเขียนสมการ (5.1) ได้ใหม่ ดัง สมการ

$$\int_{S_0} [(\mathbf{E}_a + \mathbf{E}_{bs}) \times (\mathbf{H}_b + \mathbf{H}_{as}) - (\mathbf{E}_b + \mathbf{E}_{as}) \times (\mathbf{H}_a + \mathbf{H}_{bs})] \cdot \hat{n} da = P_B(\mathbf{r}_0) \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ซึ่งในการอินทิเกรตนี้ เทอมที่เกี่ยวข้องของสนามจากสายอากาศ A และ สนามที่แตก กระจายจะเท่ากับศูนย์ ดังตัวอย่าง เช่น

$$\begin{aligned}
\int_{S_0} (\mathbf{E}_a \times \mathbf{H}_{as} - \mathbf{E}_{as} \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} da &= \oint_{S_0 + S_\infty} (\mathbf{E}_a \times \mathbf{H}_{as} - \mathbf{E}_{as} \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} da \\
&= \int_{V+V_B} (\mathbf{E}_{as} \cdot \mathbf{J}_a - \mathbf{E}_a \cdot \mathbf{J}_{as}) dv \\
&\equiv 0
\end{aligned} \tag{5.6}$$

จากตัวอย่างดังกล่าว ในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะเป็นจริง เนื่องจากภายในบริเวณ V และ V_B ค่ากระแส \mathbf{J}_a และ \mathbf{J}_{as} จะเป็นศูนย์ จากข้อกำหนดข้างต้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงจากการอินทิเกรตบนพื้นผิวเปิด S_0 ไปเป็นการอินทิเกรตแบบพื้นผิวปิด จะสามารถกระทำได้ เนื่องจากส่วนที่ได้มาจากพื้นผิวที่ระยะอนันต์จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแหล่งกำเนิดทั้งหมดคอยู่ภายในระยะทางจำกัดจากจุดกำเนิด

ในส่วนต่อไปจะพิจารณาเทอมในสมการ (5.5) ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะสนามของสายอากาศทั้งสองที่ทำการทดสอบเท่านั้น เนื่องจากสนามที่แตกกระจายต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสนามในส่วนแรกทีกล่าวถึง ดังนั้นจึงสามารถตัดทิ้งในส่วนนี้ได้ โดยสมการ (5.5) สามารถเขียนใหม่ ได้ดังนี้

$$\int_{S_0} (\mathbf{E}_a \times \mathbf{H}_b - \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} da = P_B(\mathbf{r}_0) \tag{5.7}$$

จากสมการ (5.7) สามารถจัดรูปในแต่ละเทอมของสมการให้อยู่ในรูปของเวฟนัมเบอร์สเปกตรัม บนพื้นผิว S_0 ณ ตำแหน่ง $z = a$ ได้ดังนี้

$$\mathbf{E}_a(x, y, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}(k_x, k_y) e^{-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dk_x dk_y \tag{5.8}$$

$$\mathbf{H}_a(x, y, a) = \frac{1}{\omega \mu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{k} \times \mathbf{F}(k_x, k_y) e^{-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dk_x dk_y \tag{5.9}$$

โดยที่

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{F}(k_x, k_y) = 0 \tag{5.10}$$

และ

$$\mathbf{E}_b(x', y', b) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{G}(k'_x, k'_y) e^{-j \mathbf{k}' \cdot \mathbf{r}'} dk'_x dk'_y \tag{5.11}$$

$$\mathbf{H}_b(x', y', b) = \frac{1}{\omega \mu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{k}' \times \mathbf{G}(k'_x, k'_y) e^{-j \mathbf{k}' \cdot \mathbf{r}'} dk'_x dk'_y \tag{5.12}$$

โดยที่

$$\mathbf{k}' \cdot \mathbf{G}(k'_x, k'_y) = 0 \quad (5.13)$$

เมื่อ \mathbf{F} เป็นเวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัมในส่วนของสายอากาศทดสอบ
และ \mathbf{G} เป็นเวฟนิ่งเบอร์สเปคตรัมในส่วนของสายอากาศแบบโพรบ

ดังนั้นจากสมการ (5.7) สามารถจัดรูปเขียนได้ใหม่ โดยใช้สมการ (5.8), (5.9), (5.11) และ (5.12) แทนลงในสมการ (5.7) จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\omega\mu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\mathbf{F}(k_x, k_y) \times \left\{ \mathbf{k}' \times \mathbf{G}(k'_x, k'_y) \right\} - \mathbf{G}(k'_x, k'_y) \times \left\{ \mathbf{k} \times \mathbf{F}(k_x, k_y) \right\} \right] \\ & \quad \cdot (-\hat{\mathbf{z}}) e^{(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r}')} dk'_x dk'_y dk_x dk_y dx dy \\ & = P_B(\mathbf{r}_0) \end{aligned} \quad (5.14)$$

การหาค่าของสมการ (5.14) จะพิจารณาเฉพาะตัวแปร x และ y ในอากาศ (Space) ที่อยู่ใน
เทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียลเท่านั้น จะได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r}')} dx dy = (2\pi)^2 e^{[j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{r}_0 - ja(k_z - k'_z)]} \delta(k_x - k'_x) \cdot \delta(k_y + k'_y) \quad (5.15)$$

โดยที่ δ เป็นฟังก์ชันไดเรกเดลต้า (Dirac Delta Function)

สำหรับการอินทิเกรตในส่วนของ k'_x และ k'_y จะใช้คุณสมบัติการสุมของฟังก์ชัน δ
เพื่อหาค่าในส่วนต่างๆ ของการอินทิเกรต ที่ $k'_x = k_x$ และ $k'_y = -k_y$ โดยส่วนประกอบที่ 3
ของ \mathbf{k}' จะเป็นดังนี้

$$k'_z = \sqrt{(\omega^2 \mu \epsilon - k_x'^2 - k_y'^2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
= $\sqrt{(\omega^2 \mu \epsilon - k_x'^2 - k_y'^2)}$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= k_z \quad (5.16)$$

ในส่วนของเวกเตอร์ \mathbf{k}' จะมีเครื่องหมายเป็นบวก ส่วนเวกเตอร์ \mathbf{k} นั้น จะมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\mathbf{k}' &= k'_x \hat{\mathbf{x}}' + k'_y \hat{\mathbf{y}}' + k'_z \hat{\mathbf{z}}' \\ &= k_x(-\hat{\mathbf{x}}) + (-k_y) \hat{\mathbf{y}} + k_z(-\hat{\mathbf{z}}) \\ &= -\mathbf{k}\end{aligned}\tag{5.17}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (5.14) ได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{4\pi^2}{\omega\mu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\mathbf{F}(k_x, k_y) \times \{\mathbf{k} \times \mathbf{G}(k_x, -k_y)\} + \mathbf{G}(k_x, -k_y) \times \{\mathbf{k} \times \mathbf{F}(k_x, k_y)\}] \cdot \hat{\mathbf{z}} e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0} dk_x dk_y \\ = P_B(\mathbf{r}_0)\end{aligned}\tag{5.18}$$

จากสมการ (5.18) สามารถใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (5.10), (5.13) และ (5.17) แทนลงในสมการ (5.18) จะได้ดังนี้

$$\frac{8\pi^2}{\omega\mu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_z \mathbf{F}(k_x, k_y) \cdot \mathbf{G}(k_x, -k_y) \cdot e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0} dk_x dk_y = P_B(\mathbf{r}_0)\tag{5.19}$$

จะเห็นว่าสมการ (5.19) อยู่ในรูปของสมการการแปลงฟูรีเยร์ 2 มิติ ดังนั้นถ้าทำการแปลงผกผัน (Inverse) บนระนาบ z เท่ากับ z_0 จะได้

$$k_z \mathbf{F}(k_x, k_y) \cdot \mathbf{G}(k_x, -k_y) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)^2 \frac{\omega\mu}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_B(\mathbf{r}_0) e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0} dx_0 dy_0\tag{5.20}$$

เนื่องจากการวัดสายอากาศ โดยทั่วไปแล้วจะแสดงให้อยู่ในรูปของสนามในพิกัดทรงกลม ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงสมการที่ได้ใน (5.20) ที่เป็นแบบพิกัดฉาก ให้อยู่ในรูปของพิกัดทรงกลม โดยจะใช้ความสัมพันธ์จากสมการ (5.17) จะได้มุม $\theta' = \pi - \theta$ และ $\phi' = \phi$ ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้าดังสมการ

$$\begin{aligned}
 & E_\theta(\theta, \phi) E'_\theta(\pi - \theta, \phi) - E_\phi(\theta, \phi) E'_\phi(\pi - \theta, \phi) \\
 &= C \cos \theta e^{j k_{z_0} \cos \theta} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_B(\mathbf{r}_0) e^{(j k_{x_0} \sin \theta \cos \phi + j k_{y_0} \sin \theta \sin \phi)} dx_0 dy_0 \quad (5.21)
 \end{aligned}$$

โดยที่ C เป็นค่าคงที่หาได้จาก ω, μ

r เป็นระยะทางคงที่ไปยังจุดสังเกตในสนามระยะไกล

θ เป็นมุมเงยของทรงกลม (Spherical Elevation Angles) ในสนามระยะไกลของสายอากาศ

ϕ เป็นมุมกวาดของทรงกลม (Spherical Azimuth Angles) ในสนามระยะไกลของสายอากาศ

E_θ และ E_ϕ เป็นค่าสนามไฟฟ้าของการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะไกลของสายอากาศ ทดสอบที่ต้องการหา

E'_θ และ E'_ϕ เป็นค่าสนามไฟฟ้าของการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะไกลของสายอากาศ แบบโพรบ

$k = 2\pi/\lambda$ เป็นเวฟนัมเบอร์ในอากาศ (Free Space Wavenumber)

จากสมการ (5.21) เมื่อพิจารณาระนาบ xy ที่ z เท่ากับศูนย์ จะพิจารณาเฉพาะในส่วนของมุม θ นั้น รูปของสมการที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการสนามระยะไกล จะมีลักษณะเหมือนกัน โดยกำหนดให้ ค่า $P_B(\mathbf{r}_0)$ ที่วัดได้โดยโพรบ เป็นข้อมูลสนามระยะไกล \mathbf{E}_a ที่วัดได้โดยตรง เพื่อนำไปคำนวณหาสเปกตรัมคลื่นระนาบ $A(k_x, k_y)$ ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$A(k_x, k_y) = \iint_{S_a} \mathbf{E}_a(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (5.22)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (5.21) และ (5.22) จะได้สมการ

$$E_\theta(\theta) E'_\theta(\pi - \theta) = C \cos \theta e^{j k_{z_0} \cos \theta} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_a e^{(j k_{x_0} \sin \theta \cos \phi + j k_{y_0} \sin \theta \sin \phi)} dx_0 dy_0 \quad (5.23)$$

จะได้สนามระยะไกลตั้งสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$E_\theta(\theta) = \frac{C}{E'_\theta(\pi - \theta)} \cos \theta e^{j k_{z_0} \cos \theta} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_a e^{(j k_{x_0} \sin \theta \cos \phi + j k_{y_0} \sin \theta \sin \phi)} dx_0 dy_0 \quad (5.24)$$

5.3 สรุป

การชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัดในระบบการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ทฤษฎีลอเรนซ์ซีฟโพธิตี้ ช่วยในการพิสูจน์สมการ สำหรับขั้นตอนดำเนินการจะเริ่มจาก ทำการวัดข้อมูลสนามระยะไกลของโพรบ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลสนามระยะไกลของโพรบที่วัดได้ไปคำนวณกับผลของสเปคตรัมคลื่นระนาบของสายอากาศทดสอบ ที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์แล้ว ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะได้สนามระยะไกลตามต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

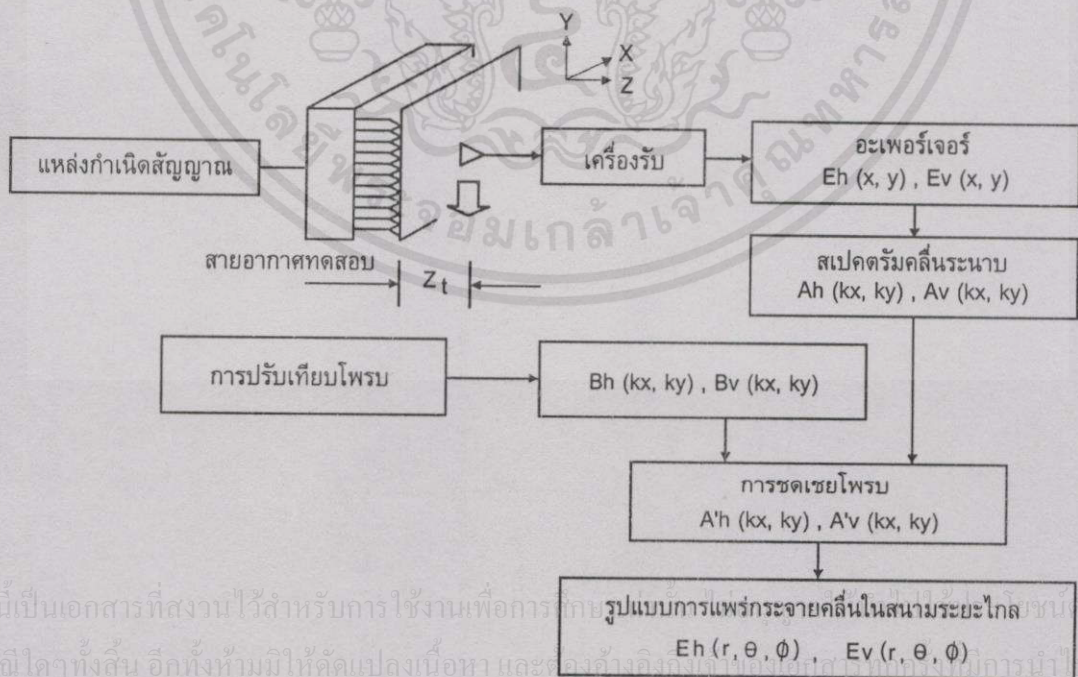
6.1 กล่าวนำ

หลักการเบื้องต้นของการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ คือ สามารถวัดสนามของสายอากาศที่ต้องการทดสอบได้ในระยะทางใกล้ ๆ และใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่าการแปลง ฟูรีเยร์ มาช่วยในการแปลงข้อมูลสนามระยะใกล้ที่ได้จากการวัดไปเป็นสเปกตรัมคลื่นระนาบ ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนขึ้นมาตามความสัมพันธ์ของสมการที่ใช้ในการหา สนามระยะไกล รวมถึงการชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัดด้วย

นอกจากนั้น ระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนี้ยังประกอบด้วยอุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัดหลายอย่างประกอบกัน เช่น สายอากาศทดสอบ, โพรบที่ใช้วัด, เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย, เครื่องกวาดโพรบ และเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ในส่วนต่อไป

6.2 หลักการของการออกแบบระบบ

การวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนต่างๆ สามารถแสดงได้ดังผังภูมิ [5,11] ดังภาพที่ 6.1

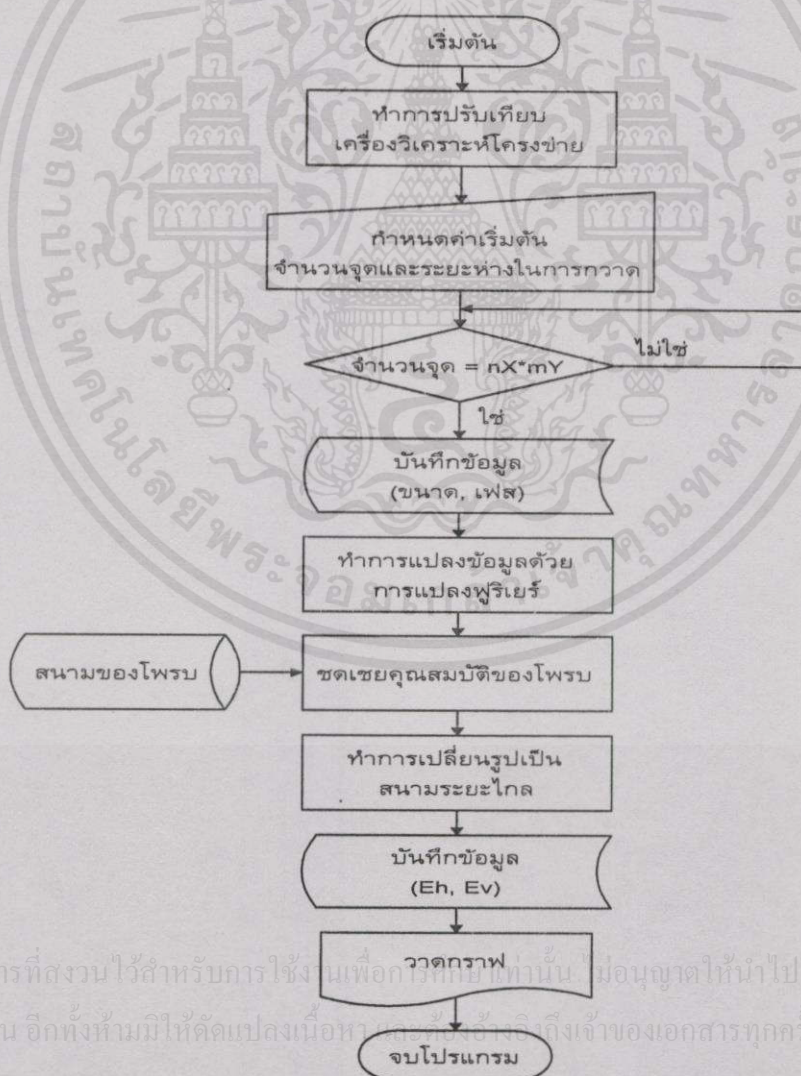


ภาพที่ 6.1 แสดงผังภูมิของระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

ขั้นตอนพื้นฐานแสดงได้ดังภาพที่ 6.1 ในระบบพิกัด xy ในระนาบของสายอากาศและแนวแกน z จะตั้งฉากกับระนาบ xy สมมติให้สายอากาศทดสอบ (Antenna Under Test ; AUT) ทำการส่งสัญญาณเป็นแบบ 2 โพลาริเซชัน คือ $E_h(x,y)$ และ $E_v(x,y)$ ซึ่งถูกสุ่มด้วยโพรบ สำหรับสนามที่วัดได้เหล่านี้ จะนำไปคำนวณเพื่อหาสเปกตรัมคลื่นระนาบ $A_h(k_x, k_y)$ และ $A_v(k_x, k_y)$ โดยการแปลงฟูริเยร์ ผลที่ได้ดังกล่าวยังถูกรบกวนด้วยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัด ดังนั้นสเปกตรัมคลื่นระนาบที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับนำไปหารูปแบบของสนามระยะไกล จะเป็น $A'_h(k_x, k_y)$ และ $A'_v(k_x, k_y)$ ตามลำดับ สำหรับในหัวข้อต่อไป จะกล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการวัด

6.3 ฟังก์ชันของโปรแกรมการแปลงสนามระยะใกล้ไปเป็นสนามระยะไกล

ในส่วนของโปรแกรมการแปลงสนามระยะใกล้ไปเป็นสนามระยะไกล สามารถเขียนฟังก์ชันได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและสิ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6.2 แสดงฟังก์ชันของโปรแกรมการแปลงสนามระยะใกล้ไปเป็นสนามระยะไกล

6.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวาดโพรบ

6.4.1 เครื่องกวาดโพรบ

อุปกรณ์ที่ใช้ขับเคลื่อนโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ ในงานวิจัยนี้เรียกว่าเครื่องกวาดโพรบ [12] มีลักษณะการทำงานพื้นฐานคล้ายกับพล็อตเตอร์ ที่มีการเคลื่อนที่เป็นระนาบ ซึ่งในการใช้งานจริงจะนำโพรบที่ใช้ในการวัดมายึดติดกับแท่นกวาดของตัวเครื่องกวาดโพรบซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการเขียนโปรแกรมสั่งให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ ได้ตามต้องการ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.3



ภาพที่ 6.3 แสดงเครื่องกวาดโพรบ

6.4.2 การทำงานของเครื่องกวาดโพรบ

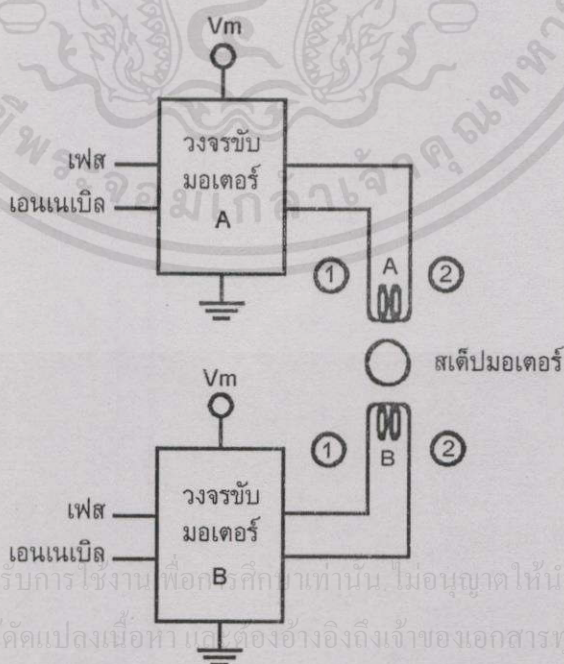
เครื่องกวาดโพรบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีพื้นฐานการออกแบบมาจากพล็อตเตอร์ โดยดัดแปลงให้สามารถนำมาใช้ในการทดสอบสนามระยะใกล้ในครั้งนี้ได้ ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกวาดโพรบ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ชุดกลไก และอุปกรณ์แผงควบคุม โดยอุปกรณ์ชุดกลไกจะเป็นจำพวกชิ้นส่วนอลูมิเนียม, เหล็ก, เส้นลวดสลิง, เส้นเอ็น, ดัลลบลูกปืนขนาดต่างๆ และส่วนที่สำคัญที่สุดของชุดกลไกคือ สเต็ปมอเตอร์ ซึ่งจะไดกล่าวถึงในรายละเอียดอีกครั้งในส่วนต่อไป สำหรับอุปกรณ์แผงควบคุมนั้นเป็นส่วนของวงจรควบคุมให้สเต็ปมอเตอร์ทำงานตามโปรแกรมที่สร้างไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานเบื้องต้นของเครื่องกวาดโพรบ จะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ คอยรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่จะเคลื่อนที่ไป แล้วส่งสัญญาณให้กับวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ เพื่อหมุนสเต็ปมอเตอร์ไปตามจุดต่างๆ ที่คำนวณไว้

สำหรับสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องกวาดโพรบนี้ จะใช้ 2 ตัว เพื่อสามารถขับได้ทั้ง 2 แนว (x,y) โดยจะใช้สเต็ปมอเตอร์แบบเคลื่อนที่ 1.8 องศาต่อสเต็ป หมายถึงในหนึ่งรอบของสเต็ปมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ 200 สเต็ป (360 องศาหารด้วย 1.8) และถ้าเคลื่อนที่แบบครึ่งสเต็ปจะเคลื่อนที่ได้ 400 สเต็ปต่อรอบ ซึ่งในทางปฏิบัติภาคกลไกทำได้ยาก ถ้าใช้สเต็ปมอเตอร์ที่มีความละเอียดสูงกว่านี้ ก็จะหาสเต็ปมอเตอร์ได้ยาก และราคาแพง แต่เราสามารถที่จะทำให้สเต็ปมอเตอร์นั้น มีการเคลื่อนที่ ที่ละเอียดมากขึ้น โดยการใช่วงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งสเต็ปละเอียด (Micro Step Driver)

6.4.3 การขับสเต็ปมอเตอร์

การขับสเต็ปมอเตอร์ในเครื่องกวาดโพรบนี้ ใช้วงจรถับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งสเต็ปละเอียดแสดงได้ดังภาพที่ 6.4 ใช้วงจรถับสเต็ปมอเตอร์ 2 วงจร ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ เพื่อขับสเต็ปมอเตอร์ โดยให้เฟส(Phase) เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดและส่วนขานเนเบิ้ล (Enable) ใช้ควบคุมให้เกิดกระแสไหลในขดลวด ซึ่งความสัมพันธ์ของขาทั้งสองกับกระแสในขดลวดแสดงดังตารางที่ 6.1 ในการขับสเต็ปมอเตอร์แบบเต็มสเต็ป (Full Step Driver) นั้นมีหลักการง่ายๆ คือ ให้มีกระแสไหลในขดลวด 2 ขดสลับกัน ซึ่งสามารถสลับได้ 4 แบบ ดังตารางที่ 6.1



ภาพที่ 6.4 แสดงวงจรถับสเต็ปมอเตอร์เบื้องต้น

ตารางที่ 6.1 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ ๖ ขั้วแบบเต็มสเต็ป

สเต็ป	เอนเนเบิล A	เอนเนเบิล B	เฟส A	เฟส B	กระแสในขดลวด A	กระแสในขดลวด B
1	1	1	0	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ① ไป ②
2	1	1	1	0	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ① ไป ②
3	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ② ไป ①
4	1	1	0	1	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ② ไป ①

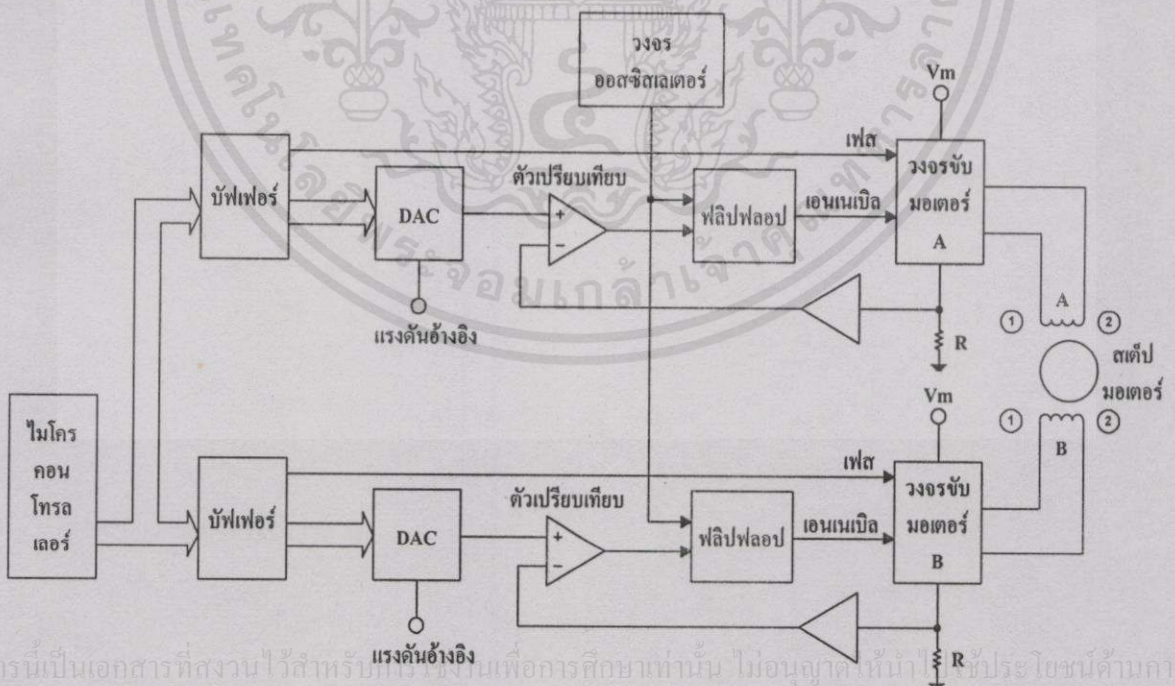
ตารางที่ 6.2 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ ๖ ขั้วแบบครึ่งสเต็ป

สเต็ป	เอนเนเบิล A	เอนเนเบิล B	เฟส A	เฟส B	กระแสในขดลวด A	กระแสในขดลวด B
1	1	1	0	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ① ไป ②
2	1	0	1	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	ไม่มีกระแสไหล
3	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ① ไป ②
4	0	1	0	1	ไม่มีกระแสไหล	กระแสไหลจาก ① ไป ②
5	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ② ไป ①
6	1	0	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	ไม่มีกระแสไหล
7	1	1	0	1	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ② ไป ①
8	0	1	0	1	ไม่มีกระแสไหล	กระแสไหลจาก ② ไป ①

ถ้าต้องการขับให้สเต็ปมอเตอร์หมุนแบบครึ่งสเต็ป (Half Step Driver) ก็กำหนดให้มีการหยุดไหลของกระแสในขดลวด A และ B คั่นสลับอยู่ในลักษณะการหมุนแบบเต็มสเต็ป ก็จะได้การหมุนของสเต็ปมอเตอร์ครึ่งสเต็ป ดังแสดงในตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าสามารถทำให้สเต็ปมอเตอร์ เคลื่อนที่ได้ละเอียดขึ้นอีกเท่าตัวจากแนวคิดอันนี้ จึงนำมาพัฒนาเป็นวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด ซึ่งสามารถทำให้สเต็ปมอเตอร์ธรรมดากลายเป็นสเต็ปมอเตอร์ ที่มีสเต็ปการหมุนที่มีความละเอียดสูง โดยสามารถทำให้มีความละเอียดเท่าไรก็ได้ตามต้องการ ซึ่งในการสร้างเครื่องกวาดโพรบเครื่องนี้ได้กำหนดไว้ 1600 สเต็ปต่อรอบ

6.4.4 วงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด

จากภาพที่ 6.5 แสดงผังภูมิของวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด ที่ภาคขับสเต็ปมอเตอร์จะมีตัวต้านทานต่อลงกราวด์อยู่ภาคละหนึ่งตัว คือ R_s กระแสที่จะไหลผ่านขดลวดจะต้องไหลผ่าน R_s ก่อนลงกราวด์ ฟลิปฟลอปจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของภาคขับ สเต็ปมอเตอร์ (ซึ่งหมายถึงทำหน้าที่ส่งสัญญาณแอนเนเบิลไปให้แก่ภาคขับสเต็ปมอเตอร์นั่นเอง) ฟลิปฟลอปจะทำงานตามสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามา มีวงจรเปรียบเทียบแรงดันอยู่หน้าฟลิปฟลอป ซึ่งได้รับอินพุต 2 ทาง ทางหนึ่งจากภาคเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC) อีกทางมาจากวงจรขยายแรงดันที่ได้มาจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_s ภาค DAC ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผ่านทางบัพเฟอร์ ส่วนขาเฟสต่อเข้ากับบัพเฟอร์โดยตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6.5 แสดงผังภูมิการขับสเต็ปมอเตอร์ในแผงวงจรควบคุม

จากจุดมุ่งหมายเดิมคือ ต้องควบคุมกระแสในขดลวดให้ได้ ในการควบคุมแบบหยุดกระแสในขดลวด A และ B สลับกันในจังหวะที่เหมาะสมแทรกอยู่ในการหมุนแบบเต็มสเต็ป แต่ในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบแบ่งละเอียดต้องทำให้การไหลของกระแสในขดลวด A และ B ให้มีความลดหลั่นกัน คือไม่ถึงกับหยุดไปเลย แต่จะลดหลั่นกันเป็นลำดับแทรกอยู่ในช่วงการหมุนแบบเต็มสเต็ปเหมือนเดิม

วิธีการนี้ได้จากการที่กระแสของขดลวดไหลผ่าน R_s จะเกิดแรงดันตกคร่อม R_s แล้วถูกขยายก่อนที่จะส่งไปยังขดลวดของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน แรงดันที่ขดลวดของวงจรเปรียบเทียบแรงดันต้องเท่ากับแรงดันที่ขาบวกจะมากกว่าไม่ได้ ถ้ามากกว่าวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จะทำให้ฟลิปฟล็อปหยุดทำงานกระแสในขดลวดหยุดไหล ดังนั้นกระแสในขดลวดจึงถูกควบคุมด้วยแรงดันที่ขาบวกของวงจรเปรียบเทียบที่ต่ออยู่กับภาค DAC ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ในขั้นสุดท้าย

สรุปก็คือ การทำงานทุกอย่าง จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมนี้อาจทำการควบคุมให้ขาเฟส A และ B ทำงานสลับกัน 4 ครั้ง ในลักษณะของเต็มสเต็ป และส่งข้อมูล 7 บิต ให้ภาค DAC ทำการแปลงสัญญาณเป็นขั้นบันไดสามเหลี่ยมมีเฟสต่างกัน 180 องศา

6.4.5 ภาษาที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกวาดไพรบ

ในการควบคุมเครื่องกวาดไพรบ จะเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมให้สามารถทำงานตามคำสั่งได้เนื่องจากพื้นฐานการสร้างเครื่องกวาดไพรบมาจากพล็อตเตอร์ ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องกวาดไพรบ จึงต้องเขียนให้อยู่ในรูปของภาษาพล็อตเตอร์ด้วยเช่นกัน เพื่อที่จะได้สื่อสารกันได้อย่างถูกต้องรับ-ส่งข้อมูลโดยนำไปสั่งให้เครื่องกวาดไพรบเคลื่อนที่ไม่ผิดตำแหน่ง ซึ่งภาษาที่ใช้คือ HPGL7475 A (Hewlett Packard Graphics Language)

HPGL เป็นกระบวนคำสั่งต่อเนื่องมีอักษรนำหน้าและปิดท้ายด้วย “ ; “ ต่อหนึ่งคำสั่ง คำสั่งที่ใช้ในเครื่องกวาดไพรบนี้ใช้เพียงไม่กี่คำสั่ง เนื่องจากในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่มีการกวาดไพรบเป็นแบบเส้นตรง ดังนั้นคำสั่งที่นำมาใช้งานจึงมีเพียงแค่ 2 คำสั่ง คือ

PA (Plot Absolute) มี 2 รูปแบบคือ PA ; หรือ PA x, y ; เป็นคำสั่งบอกให้เครื่องกวาดไพรบอยู่ในรูปแบบของการกำหนดจุด x, y ถ้ามี x, y ต่อท้ายก็ให้เคลื่อนที่ไปยังจุดนั้น

PR (Plot Relative) มี 2 รูปแบบคือ PR ; หรือ PR dx, dy ; เป็นคำสั่งบอกให้เครื่องกวาดไพรบอยู่ในรูปแบบของค่าต่อเนื่อง (Relative) ถ้ามี dx, dy ต่อท้ายก็หมายถึง ให้เครื่องที่ไปยังจุดที่เป็นค่าต่อเนื่องนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.6 การนำไปใช้ในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

เนื่องจากวงจรควบคุมของเครื่องกวาดโพรบเป็นแบบเล็กกระทัดรัด จึงไม่มีหน่วยความจำบัฟเฟอร์การส่งคำสั่งจากคอมพิวเตอร์มาที่เครื่องกวาดโพรบ จึงใช้พอร์ตขนานเพียงอย่างเดียว เพราะสามารถทำการตรวจสอบ แฮนด์เชคกิ้ง (Handshaking) ได้ดีกว่าพอร์ตอนุกรม RS-232 และมีความเร็วในการส่งสูงมากกว่า โดยเครื่องกวาดโพรบจะรับคำสั่งเข้ามาทีละคำสั่งแล้วปฏิบัติงานทันที สำหรับการนำมาใช้กับระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนี้ เครื่องกวาดโพรบจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากขึ้นหนึ่ง เนื่องจากในการกวาดไปตามตำแหน่งต่างๆบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบนั้น ระยะห่างของการกวาดจะต้องเที่ยงตรงแม่นยำ เพื่อที่โพรบจะได้วัดค่าได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในการสร้างเครื่องกวาดโพรบขึ้นมาใช้งาน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงระบบกลไกทางกลศาสตร์เป็นสำคัญ เพราะถึงแม้ว่าวงจรขับสเต็ปมอเตอร์จะดีเพียงใดก็ตาม แต่ถ้าระบบกลไกไม่ดีแล้ว ค่าความละเอียดถูกต้องของการกวาดบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบก็จะคลาดเคลื่อนไปด้วยเช่นกัน

6.4.7 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวาดโพรบ

ในการออกแบบสร้างเครื่องกวาดโพรบ เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการนำเอาหลักการทำงานของเครื่องพล็อตเตอร์มาช่วยในการประดิษฐ์ โดยมีความสามารถสูงสุดของการกวาดโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ต้องการวัดเท่ากับขนาดพื้นที่ 54×38 ตารางเซนติเมตรในระนาบ xy ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วัดสายอากาศที่มีขนาดเล็กที่มีพื้นที่ของอะเพอร์เจอร์ไม่เกิน 54×38 ตารางเซนติเมตรดังกล่าว

สำหรับความเที่ยงตรงของการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรบนี้ สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ และใช้สเต็ปมอเตอร์ในการหมุน ที่มีความละเอียดสูง

6.5 อุปกรณ์อื่น ๆ

นอกจากเครื่องกวาดโพรบที่ได้กล่าวถึงแล้วนั้น ยังมีอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดที่จำเป็นต้องใช้ในระบบการวัดนี้ อีก คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะทำหน้าที่ในการวัดข้อมูลขนาด และเฟสของสนามระยะใกล้ในแต่ละตำแหน่งที่เครื่องกวาดโพรบเคลื่อนที่ไปในระนาบอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัด อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศทดสอบเพื่อแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าออกมา

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็น ซึ่งทำหน้าที่หลายอย่างในระบบการวัดสนามระยะใกล้ ดังต่อไปนี้

1. ทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรบ ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการวัดบนระนาบอะเพอร์เจอร์
2. ทำหน้าที่ในการอินเตอร์เฟสกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้มาเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ก่อนนำไปประมวลผลต่อไป
3. ทำหน้าที่ในการประมวลผล และคำนวณโดยใช้โปรแกรมการแปลงฟูริเยร์
4. ทำหน้าที่ในการแสดงผลของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยแสดงในรูปแบบของกราฟ

6.6 สรุป

ระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยสายอากาศทดสอบ, โพรบ, เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย, เครื่องกวาดโพรบ และเครื่องคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามในการทดสอบวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้ของงานวิจัยนี้ ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดอะเพอร์เจอร์ที่ต้องการวัด เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ที่สุดของการกวาดของเครื่องกวาดโพรบที่จะเคลื่อนที่ไปได้ในแนวแกน x และแนวแกน y มีขนาดไม่เกิน 54×38 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นในกรณีถ้าต้องการทดสอบวัดสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ และมีขนาดของอะเพอร์เจอร์ใหญ่เกินกว่า 54×38 ตารางเซนติเมตร จะไม่สามารถวัดได้ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดของเครื่องกวาดโพรบที่มีขนาดเล็ก

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีแนวความคิดในการหาวิธีที่จะทำการวัดสายอากาศที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าความสามารถของเครื่องกวาดโพรบนี้ โดยได้เสนอแนวคิดดังกล่าวไว้ในบทที่ 7 ในหัวข้อของแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

7.1 กล่าวนำ

ในการทำการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ โดยทั่วไปจะดำเนินการวัดและเก็บข้อมูลที่ต้องการวัดให้เสร็จภายในคราวเดียวกัน ซึ่งในการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ลักษณะการวัดตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเช่นกัน แต่ในกรณีถ้าสายอากาศทดสอบมีขนาดใหญ่ จะทำให้ขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบนั้นมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ซึ่งข้อจำกัดของการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ใช้ทดสอบ โดยจะต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินไปกว่าความสามารถในการกวาดสูงสุดของเครื่องกวาดโพรบที่ใช้วัด

จากกรณีดังกล่าว จึงได้เสนอแนวคิดในการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้นี้ โดยใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือที่มีอยู่ทำการวัด ซึ่งจะใช้วิธีโดยการแบ่งพื้นที่ของการวัดข้อมูลสนามระยะใกล้บนระนาบอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบที่มีขนาดใหญ่ออกเป็น ส่วน ๆ และนำข้อมูลที่วัดได้มารวมกัน ก่อนที่จะนำไปทำการแปลงฟูริเยร์ เพื่อหาสนามระยะใกล้ต่อไป

7.2 แนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

ตามที่ได้กล่าวถึงข้อจำกัดของขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบที่จะทำการวัดนั้น ต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินกว่า ขนาดการกวาดสูงสุดของเครื่องกวาดโพรบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีขนาดการกวาดสูงสุดเท่ากับ 54 x 38 ตารางเซนติเมตร และในกรณีที่จำเป็นต้องทำการวัดสายอากาศที่มีขนาดของ อะเพอร์เจอร์ใหญ่กว่า 54 x 38 ตารางเซนติเมตรแล้ว จะใช้วิธีการแบ่งพื้นที่ที่อะเพอร์เจอร์ออกเป็น ส่วน ๆ โดยในแต่ละส่วนต้องมีขนาดไม่เกิน 54 x 38 ตารางเซนติเมตร เพื่อที่จะสามารถใช้เครื่องกวาด โพรบที่มีอยู่ ทำการกวาด, วัด และเก็บข้อมูล ได้เช่นเดียวกับการวัดในกรณีปกติทั่วไป

สำหรับขั้นตอนการดำเนินการต่าง ๆ ตามแนวคิดนี้ จะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

7.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวัด

แนวคิดของการวัดสนามระยะใกล้ โดยการแบ่งพื้นที่ที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ ออกเป็นส่วน ๆ เพื่อทำการวัดข้อมูลในแต่ละส่วนนั้น มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

1. ทำการคำนวณหาขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ
2. ทำการแบ่งพื้นที่ที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบออกเป็น ส่วน ๆ
3. ทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบในการวัดแต่ละส่วน

4. ทำการวัดสนามระยะใกล้โดยการกวาดโพรบ
5. ทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลที่วัดได้ในแถวเลขที่
6. ทำการแปลงข้อมูลจากคาน้ำไฟล์ให้เป็นเทกซ์ไฟล์
7. ทำการรวมข้อมูลสนามระยะใกล้ที่วัดได้ทั้งหมด
8. ทำการแปลงข้อมูลจากเทกซ์ไฟล์ให้เป็นคาน้ำไฟล์
9. ทำการแปลงข้อมูลสนามระยะใกล้ด้วยโปรแกรมแปลงฟูรีเยร์

7.3.1 ทำการคำนวณหาขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ

ในการหาขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบที่ต้องการวัดนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ในหัวข้อขนาดของการกวาด ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$L = D + 2z \tan \theta \quad (7.1)$$

โดยที่ L เป็นขนาดของการกวาดบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ

D เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบ

z เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบกับโพรบ

θ เป็นมุมของการขยายขนาดอะเพอร์เจอร์ที่ใช้วัด

ซึ่งค่า L ที่ได้นี้เป็นความยาวของสี่เหลี่ยมจตุรัสของอะเพอร์เจอร์ที่จะทำการวัด ดังนั้นจะต้องนำมาทำการยกกำลังสอง ตามสูตรของการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมจตุรัสทั่วไป ส่วนค่า D ในกรณีที่สายอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะใช้ขนาดของเส้นทะแยงมุมของสายอากาศนั้น ๆ เป็นขนาดใหญ่ที่สุดเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณขนาดของอะเพอร์เจอร์

สำหรับค่า z นั้นเป็นระยะห่างของการวัดระหว่างสายอากาศทดสอบกับโพรบที่ใช้วัด [4] ควรจะห่างกันไม่ต่ำกว่า 1λ แต่จะต้องไม่เกิน $2D^2/\lambda$ และค่าของมุม θ ที่ใช้ในการวัดนี้จากการศึกษาที่ผ่านมา [5] ค่าของมุม θ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนี้ เท่ากับ 60 องศา

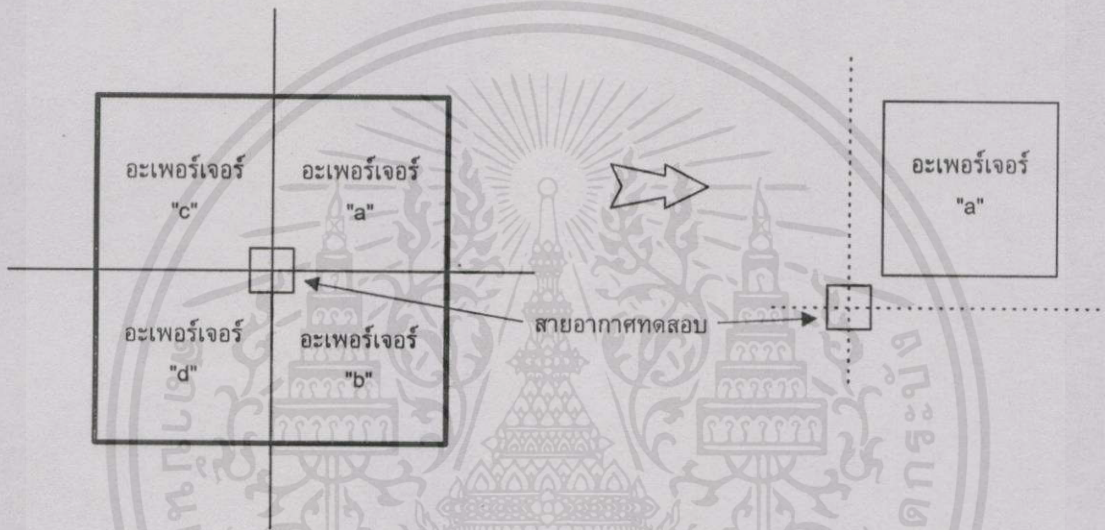
7.3.2 ทำการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบออกเป็น ส่วน ๆ

ในการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบออกเป็น ส่วน ๆ จะพิจารณาจากขนาดสูงสุดของการกวาดของเครื่องกวาดโพรบเป็นหลัก โดยในแต่ละส่วนของอะเพอร์เจอร์ต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินกว่า 54 x 38 ตารางเซนติเมตร เพื่อที่เครื่องกวาดโพรบจะสามารถทำการกวาด เก็บข้อมูลในตำแหน่งต่างๆ บนอะเพอร์เจอร์นั้นได้อย่างครบถ้วนของแต่ละส่วน

7.3.3 ทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบในการวัดแต่ละส่วน

กำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบที่จะวัดในแต่ละส่วนของอะเพอร์เจอร์ให้ถูกต้อง เช่น ในกรณีที่แบ่งอะเพอร์เจอร์ออกเป็น 4 ส่วน แสดงดังภาพที่ 7.1 ซึ่งการวัดข้อมูลสนามระยะใกล้บนอะเพอร์เจอร์ ในส่วนแรกนี้ให้ทำการวัดในส่วนของอะเพอร์เจอร์ "a" ก่อน โดยกำหนดตำแหน่งและขนาดการกวาดของโพรบให้แน่นอน แล้วจึงกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบ โดยให้วางอยู่ในตำแหน่งเอียงไปทางมุมล่างซ้ายของอะเพอร์เจอร์ "a" แล้วจึงทำการวัด

สำหรับอะเพอร์เจอร์ในส่วนที่เหลือ "b", "c" และ "d" จะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบในทำนองเดียวกัน โดยให้สัมพันธ์กับส่วนของอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัด



ภาพที่ 7.1 แสดงการแบ่งอะเพอร์เจอร์ออกเป็น 4 ส่วน และการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทดสอบ

7.3.4 ทำการวัดสนามระยะใกล้โดยการกวาดโพรบ

เริ่มทำการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบไปบนอะเพอร์เจอร์ต่าง ๆ โดยการกวาดโพรบ เพื่อวัดข้อมูลขนาดและเฟสของสนามระยะใกล้ เมื่อทำการวัดข้อมูลในแต่ละอะเพอร์เจอร์เสร็จแล้ว จะทำการบันทึกข้อมูลที่วัดได้ เก็บไว้เป็นแฟ้มข้อมูลแบบดาต้าไฟล์

7.3.5 ทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลที่วัดได้ในแถวเลขที่

หลังจากทำการวัดสนามระยะใกล้ครบทุกส่วนของอะเพอร์เจอร์แล้ว จะนำข้อมูลที่วัดได้ในแต่ละส่วนไปทำการสลับตำแหน่งในแถวเลขที่ของจำนวนแถวของการกวาดไปใช้ (แถวแรกที่ทำ การกวาดกำหนดให้เป็นเลขคู่โดยเริ่มจากแถวที่ศูนย์) เนื่องจากในการกวาดเก็บข้อมูลที่ใช้การกวาดแบบราสเตอร์ ข้อมูลที่วัดได้จะเรียงกันไปตามแนวทิศทางที่โพรบเคลื่อนที่ไปตามแบบราสเตอร์ ดัง

นั้นจึงต้องมีการสลับตำแหน่งของข้อมูลในแถวเลขที่ เพื่อกลับทิศทางให้ถูกต้องตามตำแหน่งจริงของ อะเพอร์เจอร์ในแต่ละส่วน

7.3.6 ทำการแปลงข้อมูลจากคาน้ำไฟล์ให้เป็นเทกซ์ไฟล์

ทำการแปลงข้อมูลที่ได้จากการวัด ซึ่งเป็นเพิ่มข้อมูลแบบคาน้ำไฟล์ให้เป็นเพิ่มข้อมูลแบบเทกซ์ไฟล์ เพื่อให้สามารถอ่านค่าเป็นตัวเลขปกติได้ โดยใช้โปรแกรมแปลงข้อมูลจากคาน้ำไฟล์ให้เป็นเทกซ์ไฟล์

7.3.7 ทำการรวมข้อมูลสนามระยะใกล้ที่วัดได้ทั้งหมด

นำข้อมูลที่ได้ทำการสลับตำแหน่งและแปลงเป็นข้อมูลแบบเทกซ์ไฟล์แล้วในแต่ละส่วนมารวมกันเป็นเพิ่มข้อมูลใหญ่เพียงเพิ่มข้อมูลเดียว โดยนำเอาข้อมูลที่วัดได้ในแต่ละอะเพอร์เจอร์มาต่อกันตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่วัดได้ของแต่ละส่วนให้ถูกต้อง ซึ่งจะเพิ่มข้อมูลของสนามระยะใกล้ทั้งหมดที่ได้จากการวัด

7.3.8 ทำการแปลงข้อมูลจากเทกซ์ไฟล์ให้เป็นคาน้ำไฟล์

จากเพิ่มข้อมูลใหญ่ที่ได้ในหัวข้อที่แล้ว คือ ข้อมูลของสนามระยะใกล้ที่วัดได้ทั้งหมด ซึ่งเพิ่มข้อมูลที่ได้นี้ ยังคงเป็นเพิ่มข้อมูลแบบเทกซ์ไฟล์อยู่ ไม่สามารถนำไปคำนวณในโปรแกรมได้ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงข้อมูลดังกล่าวให้เป็นเพิ่มข้อมูลแบบคาน้ำไฟล์เสียก่อน เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคำนวณในโปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์ได้ต่อไป

ข้อมูลที่ได้ในขั้นตอนนี้ ถือเป็นข้อมูลของสนามระยะใกล้ที่วัดได้ เช่นเดียวกับการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบตามปกติทั่วไป

7.3.9 ทำการแปลงข้อมูลสนามระยะใกล้ด้วยโปรแกรมแปลงฟูรีเยร์

ทำการแปลงข้อมูลสนามระยะใกล้แบบคาน้ำไฟล์ที่วัดได้ในหัวข้อที่แล้วด้วยโปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์ ให้เป็นสเปกตรัมคลื่นระนาบ เพื่อนำข้อมูลที่ได้นี้ไปหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้ต่อไป

7.4 สรุป

ในกรณีที่ต้องการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีอะเพอร์เจอร์ขนาดใหญ่ สามารถทำได้โดยใช้วิธีการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบออกเป็นส่วน ๆ เพื่อทำการวัดสนามระยะใกล้บนอะเพอร์เจอร์นั้น ๆ แล้วจึงนำข้อมูลที่วัดได้ในแต่ละส่วนมารวมกัน จากนั้นจะทำการแปลงข้อมูลของสนามระยะใกล้ให้เป็นสเปกตรัมคลื่นระนาบ โดยใช้การแปลงฟูรีเยร์

ช่วยในการคำนวณ ผลที่ได้จะนำไปสู่การหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนาม
ระยะไกล ด้วยวิธีการวัดจากสนามระยะใกล้ ตามต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

การทดลอง

8.1 กล่าวนำ

จากการที่ได้กล่าวถึงหลักการ, ทฤษฎี และปัจจัยที่จำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เพื่อให้หารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ต้องการทดสอบในบทต้น ๆ นั้น สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ทดสอบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ตามข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยจะทำการทดลองวัดสายอากาศ 2 ชนิด คือ สายอากาศแฉกดำดับแบบร่อง และสายอากาศปากแตร ซึ่งจะทำการวัดทั้งในสนามระยะใกล้ และสนามระยะไกล เพื่อนำผลการวัดที่ได้มาเปรียบเทียบกัน รวมทั้งทำการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่อนาคคลื่นเปิดปลาย ที่ใช้เป็นโพรบในการกวาดเก็บข้อมูลของสนาม บนอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัด เพื่อนำไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ

นอกจากนั้นแล้ว ยังทำการทดลองวัดสนามระยะใกล้ตามแนวทางการพัฒนาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้ว เพื่อสนับสนุนแนวคิดดังกล่าวให้สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้

8.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

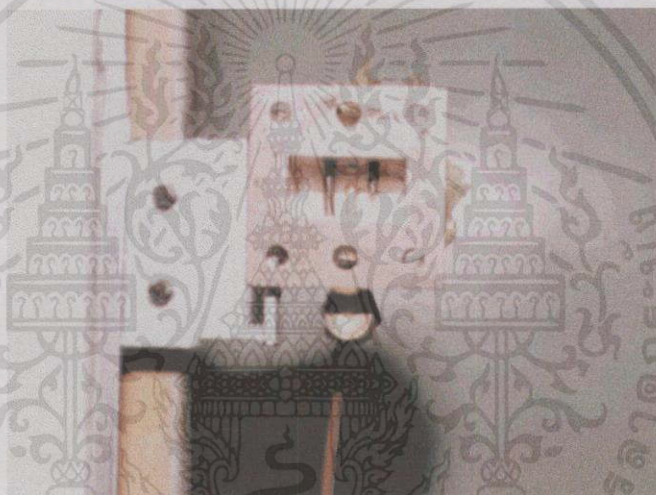
จากหัวข้อการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบในบทที่ 6 นั้น ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในการทดลองวัดสนามระยะใกล้ สำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น (ก) สายอากาศแฉกดำดับแบบร่อง และต้องอ้างอิงถึง (ข) สายอากาศปากแตร

ภาพที่ 8.1 แสดงสายอากาศทดสอบแบบแฉกดำดับแบบร่อง และสายอากาศปากแตร

1. สายอากาศทดสอบ มี 2 ชนิด คือ สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ขนาด 6x6 ร่องที่ความถี่ 11.9909 GHz มีขนาด 11.6 x 11.3 ตารางเซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 8.1ก และ สายอากาศปากแตร ที่ความถี่ 12.5 GHz มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 8.1ข
2. สายอากาศโพรบ ใช้สายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย ขนาด 0.8 x 1.6 ตารางเซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 8.2
3. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รุ่น HP8720C
4. เครื่องกวาดโพรบ มีขนาดการกวาดสูงสุดเท่ากับ 54 x 38 ตารางเซนติเมตร
5. เครื่องคอมพิวเตอร์ รุ่น 486 ขึ้นไป
6. แท่นหมุน (Turn Table) ใช้สำหรับการวัดสนามระยะไกล



ภาพที่ 8.2 แสดงสายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย

8.3 ขั้นตอนการทดลอง

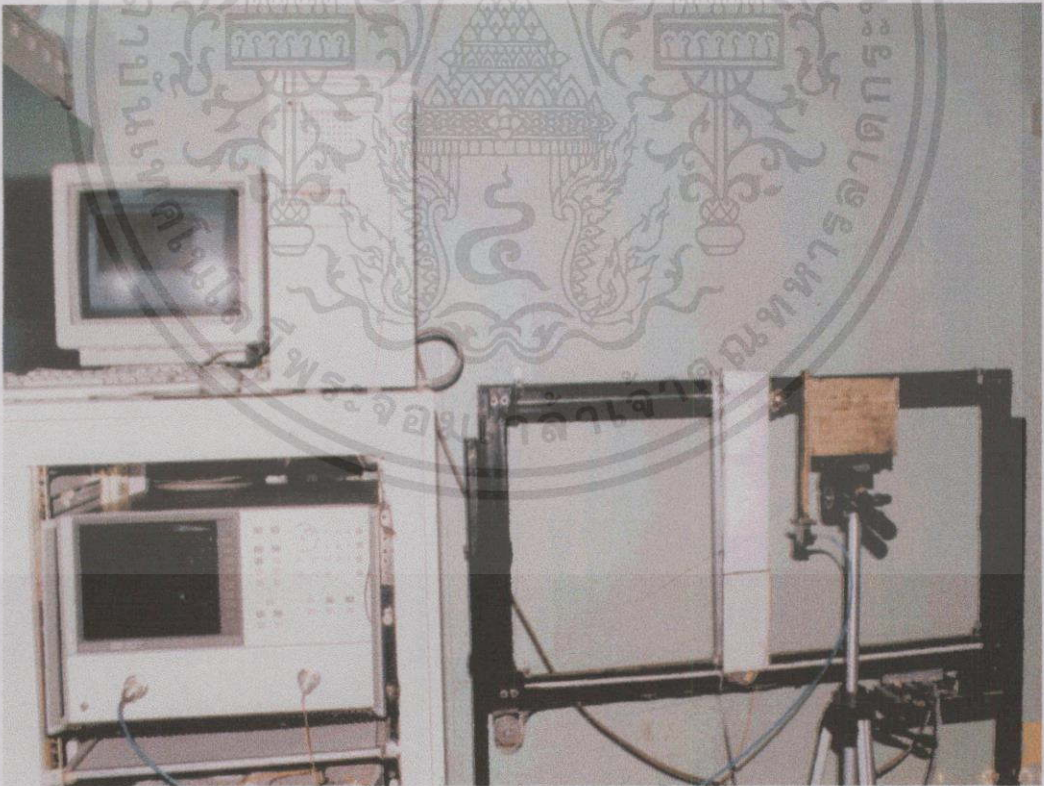
ในการทดลองวัดสนามระยะไกลของงานวิจัยนี้ จะแบ่งการวัดสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ทำการวัดสายอากาศทดสอบทั้ง 2 ชนิด คือ สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง และสายอากาศปากแตร ในสนามระยะใกล้
2. ทำการวัดสายอากาศทดสอบทั้ง 2 ชนิด และสายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลายในสนามระยะไกล

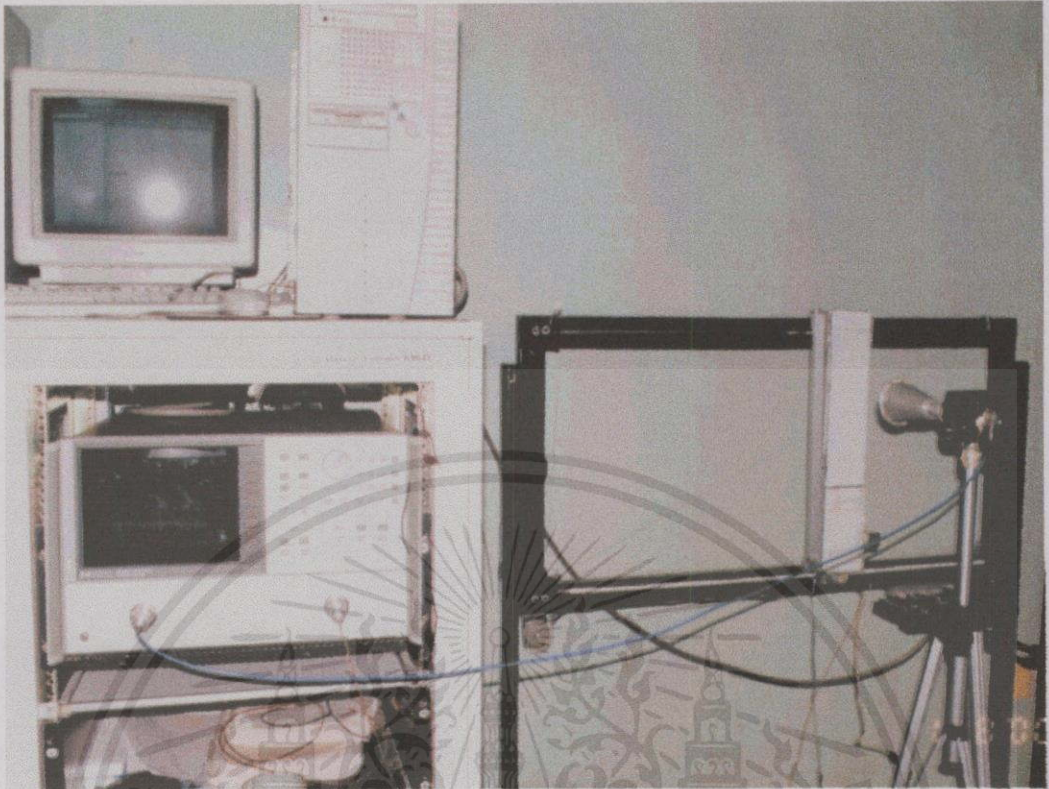
3. ทำการวัดสายอากาศแถวลำดับแบบร่องในสนามระยะใกล้ ตามแนวทางการพัฒนาระบบไม่ว่ากรณีใดข้างต้น อีกทั้งงานนี้ให้คิดเปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การวัดสนามระยะใกล้แบบระยะไกล โดยการแบ่งอะพอร์เจอร์ของสายอากาศออกเป็น ส่วน ๆ

8.3.1 การวัดสายอากาศในสนามระยะใกล้

1. ต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 8.3 โดยใช้สายอากาศทดสอบเป็นตัวส่ง และใช้โพรบเป็นตัวรับสัญญาณ ซึ่งทั้งสองอุปกรณ์นี้จะต่ออยู่กับพอร์ตของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทั้งคู่
2. ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายส่งสัญญาณความถี่ 11.9909 GHz ให้กับสายอากาศทดสอบ ในกรณีใช้สายอากาศทดสอบเป็นแถวลำดับแบบร่อง และส่งสัญญาณความถี่ 12.5 GHz ในกรณีใช้สายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศปากแตร
3. ทำการกวาดโพรบไปบนอะพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ ซึ่งในขณะที่ทำการกวาดไปตามจุดต่าง ๆ จะทำการวัดค่าขนาดและเฟสไปเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลในคอมพิวเตอร์
4. นำข้อมูลที่วัดได้ไปทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมการแปลงฟูริเยร์ เพื่อแปลงข้อมูลจากสนามระยะใกล้ไปเป็นสเปกตรัมคลื่นระนาบ และทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในขั้นตอนต่อไป
5. ทำการหาสนามระยะไกลจากผลที่ได้ในขั้นตอนที่ 4
6. นำข้อมูลสนามระยะไกลที่ได้จากการคำนวณมาวาดกราฟ
7. กราฟที่ได้เป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบ



(ก) กรณีสายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง



(ข) กรณีสายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศปากแตร

ภาพที่ 8.3 แสดงระบบการทดลองวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาได้จากสูตร $L = D + 2z \tan \theta$ โดยที่

L เป็นขนาดของการกวาดบนอะพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ

D เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบ

- กรณีสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง มีขนาดเท่ากับ 15.6 เซนติเมตร (แนวเส้นทแยงมุม)
- กรณีสายอากาศปากแตร มีขนาดเท่ากับ 6.2 เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางของปากแตร)

λ เป็นความยาวคลื่นในอากาศที่ใช้ในการวัด

- กรณีสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง มีขนาดเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ที่ความถี่ 11.9909 GHz

- กรณีสายอากาศปากแตร มีขนาดเท่ากับ 2.4 เซนติเมตร ที่ความถี่ 12.5 GHz

z เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบกับโพรบ

- กรณีสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ทดสอบที่ระยะ 2λ เท่ากับ 5 เซนติเมตร

- กรณีสายอากาศปากแตร ทดสอบที่ระยะ 2λ เท่ากับ 4.8 เซนติเมตร
- θ เป็นมุมการขยายขนาดอะเพอร์เจอร์ที่ใช้วัด เท่ากับ 60 องศา ใช้กับสายอากาศทั้ง 2 ชนิด Δx และ Δy เป็นระยะห่างของการกวาด ($\lambda/2$) ในแนวแกน x และแนวแกน y
- กรณีสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง มีขนาดเท่ากับ 1.25 เซนติเมตร
 - กรณีสายอากาศปากแตร มีขนาดเท่ากับ 1.2 เซนติเมตร
- จำนวนจุดของการกวาดบนแกน x และแนวแกน y (ขึ้นอยู่กับระยะห่าง z ที่ทำการวัด)
- กรณีสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง เมื่อค่า z เท่ากับ 2λ จำนวนจุดที่ใช้ในการกวาดเท่ากับ 27 จุด
 - กรณีสายอากาศปากแตร เมื่อค่า z เท่ากับ 2λ จำนวนจุดที่ใช้ในการกวาดเท่ากับ 20 จุด

8.3.2 การวัดสายอากาศในสนามระยะไกล

สำหรับการวัดสนามระยะไกลของสายอากาศทดสอบ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทำการวัดสายอากาศทดสอบทั้ง 2 ชนิด บริเวณสนามระยะไกลที่ระยะ $2D^2/\lambda$ ในที่โล่ง โดยตั้งวางสายอากาศทดสอบไว้บนแท่นหมุน เพื่อสามารถหมุนสายอากาศทดสอบให้ได้ครบ 360 องศา ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน
 - กรณีสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง มีระยะทดสอบตั้งแต่ 194.68 เซนติเมตรขึ้นไป
 - กรณีสายอากาศปากแตร มีระยะทดสอบตั้งแต่ 32.056 เซนติเมตรขึ้นไป
2. กำหนดให้สายอากาศตัวส่ง ทำการส่งสัญญาณความถี่ 11.9909 GHz ให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง และส่งสัญญาณความถี่ 12.5 GHz ให้กับสายอากาศปากแตร เพื่อทำการวัดความแรงของสัญญาณในแต่ละองศาที่แท่นหมุน หมุนไป
3. ทำการวัดสนามในมุมต่าง ๆ โดยเก็บบันทึกเป็นแฟ้มข้อมูลไว้ในคอมพิวเตอร์
4. นำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการเขียนกราฟ เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบในสนามระยะไกลต่อไป

สำหรับการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่อนาคลื่นเปิดปลายนั้น จะทำการวัดตามขั้นตอนต่าง ๆ เช่นเดียวกันกับการวัดสายอากาศทดสอบในสนามระยะไกล

8.3.3 การวัดสายอากาศตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบ

จากบทที่ 7 ในหัวข้อแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบ ได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวัดมาแล้ว ดังนั้นในส่วนนี้จะไม่นำมากล่าวซ้ำอีก แต่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัด ดังนี้

1. ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่องเป็นสายอากาศทดสอบ

2. ทำการทดสอบวัดสายอากาศที่ระยะห่าง z เท่ากับ 3λ ดังนั้นจากสูตรการคำนวณหาขนาดของการกวาด $L = D + 2z \tan\theta$ จะได้จำนวนจุดของการกวาดเท่ากับ 34 จุด
 3. ทำการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ ออกเป็น 4 ส่วน จะได้พื้นที่อะเพอร์เจอร์ในแต่ละส่วนมีขนาดเท่ากับ 17×17 ตารางเซนติเมตร
 4. ทำการวัดสนามระยะใกล้บนอะเพอร์เจอร์ทั้ง 4 ส่วน หลังจากนั้นดำเนินการวัด ตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 7
- สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้ใช้เหมือนกับกรณีการวัดสนามระยะใกล้

8.4 สรุป

ในการทดลองวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนี้ มีจุดมุ่งหมาย เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แทนการวัดจากสนามระยะไกลโดยตรง ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการวัดทั้งสองแบบทั้งในสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล เพื่อนำมาทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ ถึงผลที่ได้ ว่ามีความถูกต้องหรือผิดพลาดอย่างไรต่อไป

สำหรับการวัด รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำคลื่นเปิดปลาย ในสนามระยะใกล้ นั้น มีส่วนเกี่ยวข้องกับผลของการวัดสายอากาศทดสอบ เนื่องจากต้องนำไปใช้ในส่วนของการคำนวณเพื่อใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ ที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการวัดด้วยเช่นกัน

ในส่วนของการทดลองวัดสายอากาศ ตามแนวความคิดการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ออกเป็นส่วนๆ นั้น สามารถทำได้เช่นเดียวกัน ซึ่งถือเป็นการพัฒนาการใช้ อุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่มีอยู่ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำแนวคิดใหม่มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมและสามารถนำไปปฏิบัติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

ผลการทดลอง

9.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองต่าง ๆ ที่ได้กำหนดหัวข้อการทดลองไว้ในบทที่แล้ว โดยจะแสดงให้อยู่ในรูปของข้อมูลสนามระยะใกล้ที่ได้จากการวัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบในรูปของข้อมูลดิบ จะแสดงอยู่ในรูปของตาราง และในส่วนของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบ จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดสนามสัมพัทธ์ กับ มุมต่าง ๆ ที่ทำการวัด

นอกจากนี้ยังได้แสดงการเปรียบเทียบกราฟของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบที่ได้จากการวัดด้วยวิธีวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ กับการวัดสนามระยะใกล้โดยตรง

9.2 ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแบ่งผลการทดลองที่ได้ ตามชนิดของสายอากาศที่ทำการทดสอบ ดังนี้

1. สายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย ทำหน้าที่เป็นโพรบ วัดสัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศทดสอบ
2. สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทดสอบชนิดที่หนึ่ง ที่ต้องการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
3. สายอากาศปากแตร ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทดสอบชนิดที่สอง ที่ต้องการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ด้วยเช่นกัน

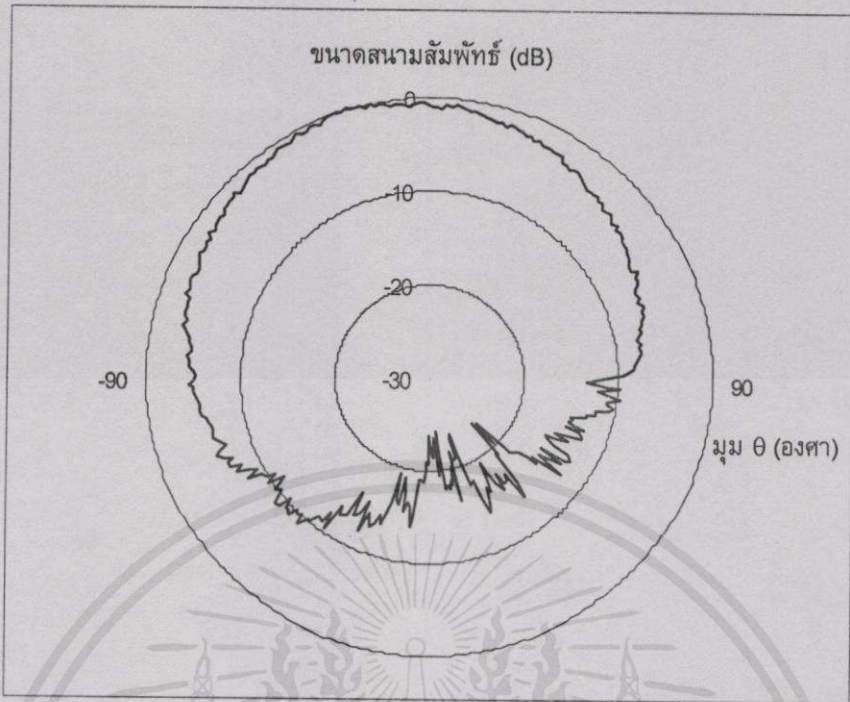
9.2.1 ผลการวัดของสายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย

ในการวัดสายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย ซึ่งทำหน้าที่เป็นโพรบนี้ จำเป็นที่จะต้องทำการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของตัวเองก่อนเป็นอันดับแรก เนื่องจากต้องนำผลที่วัดได้นี้ เตรียมเอาไว้ใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้ในการวัดสนามระยะใกล้ทุกครั้ง

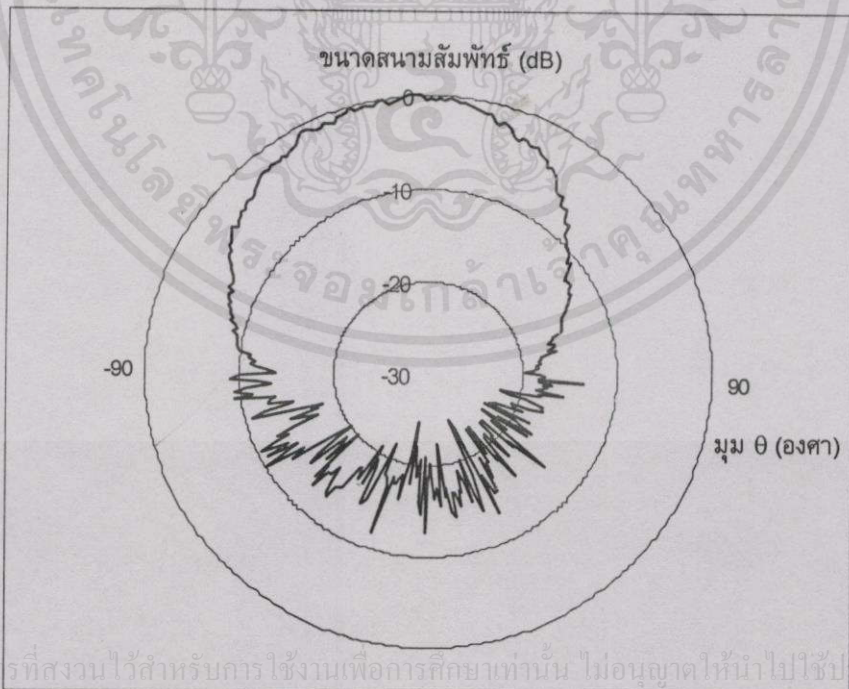
ผลของการวัดที่ได้จากสนามระยะใกล้ แสดงให้เห็นในรูปของกราฟแบบโพลาร์ ดังภาพที่

9.1ก และ 9.1ข ซึ่งแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz

ในการนำเอาข้อมูลของโพรบที่วัดได้นี้ไปใช้งาน จะใช้เฉพาะข้อมูลส่วนหน้าคลื่นที่หันหน้าชนกับสายอากาศทดสอบเท่านั้น ดังนั้นข้อมูลที่น่าไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ จะแสดงดังกราฟ ภาพที่ 9.2ก และ 9.2ข ตามลำดับ

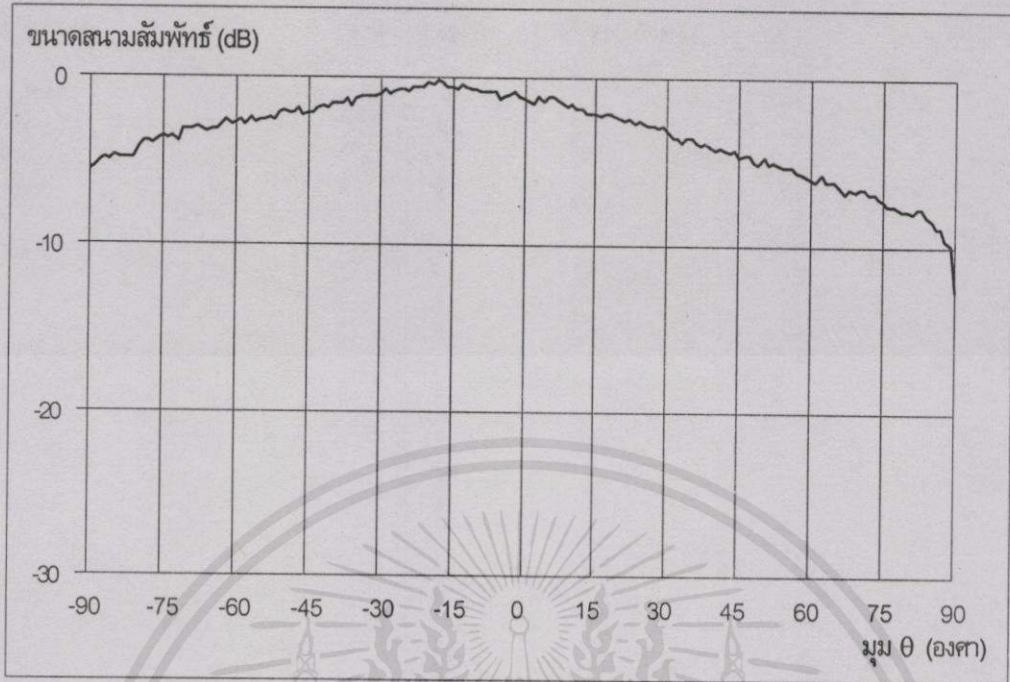


ภาพที่ 9.1ก แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบในระนาบ xz แบบโพลาร์

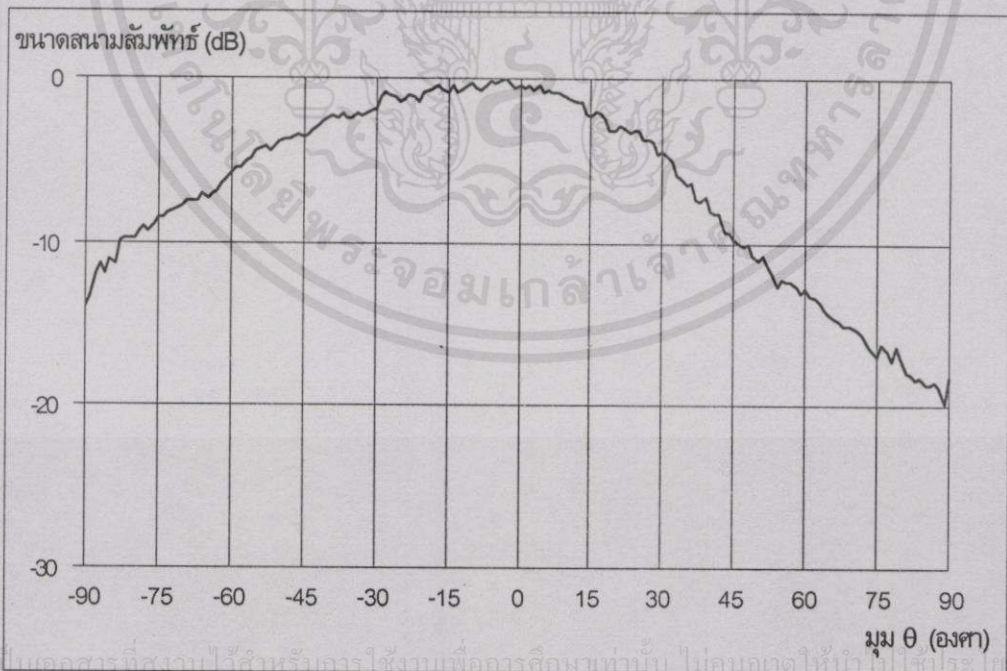


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 9.1ข แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบในระนาบ yz แบบโพลาร์



ภาพที่ 9.2ก แสดงส่วนของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ ที่นำไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz



ภาพที่ 9.2ข แสดงส่วนของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ ที่นำไปใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz

9.2.2 ผลการวัดของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง

ในการวัดสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบเพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ด้วยวิธีการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดสนามระยะไกลโดยตรง ดังนั้นจึงแบ่งผลการวัดออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ และผลการวัดสนามระยะไกล

9.2.2.1 ผลการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

จากข้อกำหนดในการทำการทดลองวัดสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ได้ทำการวัดที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบกับระนาบอะเปอร์เจอร์ เป็นระยะ $z = 2 \lambda$ ที่ความถี่ 11.9909 GHz ดังนั้นขนาดของการกวาดบนระนาบอะเปอร์เจอร์ $x y$

$$\begin{aligned} L &= D + 2z \tan \theta \\ &= 15.6 + 2(2 * 2.5) \tan 60 \\ &= 32.922 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned} \quad (9.1)$$

สามารถคำนวณหาจำนวนจุดของการกวาดในแนวแกน x และแนวแกน y ได้โดยนำค่าระยะห่างระหว่างจุดในการกวาด ($\lambda/2 = 1.25$ เซนติเมตร) ไปหารค่า L

จะได้ จำนวนจุดของการกวาดในแนวแกน x และแนวแกน y เท่ากับ 27 จุด ดังนั้นจำนวนจุดของการกวาดทั้งหมดเท่ากับ 729 จุด

ในการใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมการแปลงฟูริเยร์นั้น สามารถทดสอบผลของโปรแกรมในเบื้องต้นได้ โดยใช้ข้อมูลขนาด และเฟสแบบยูนิฟอร์มที่มีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง ซึ่งผลที่ได้ แสดงดังกราฟภาพที่ 9.3ก และ 9.3ข โดยแสดงผลการคำนวณทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

สำหรับผลของการวัดสนามระยะใกล้บนอะเปอร์เจอร์ของสายอากาศจำนวน 729 จุด สามารถแสดงข้อมูลที่วัดได้ ดังตารางที่ 9.1

ในส่วนของการวัดสนามระยะใกล้ที่ยังไม่ได้มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.4ก และ 9.4ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

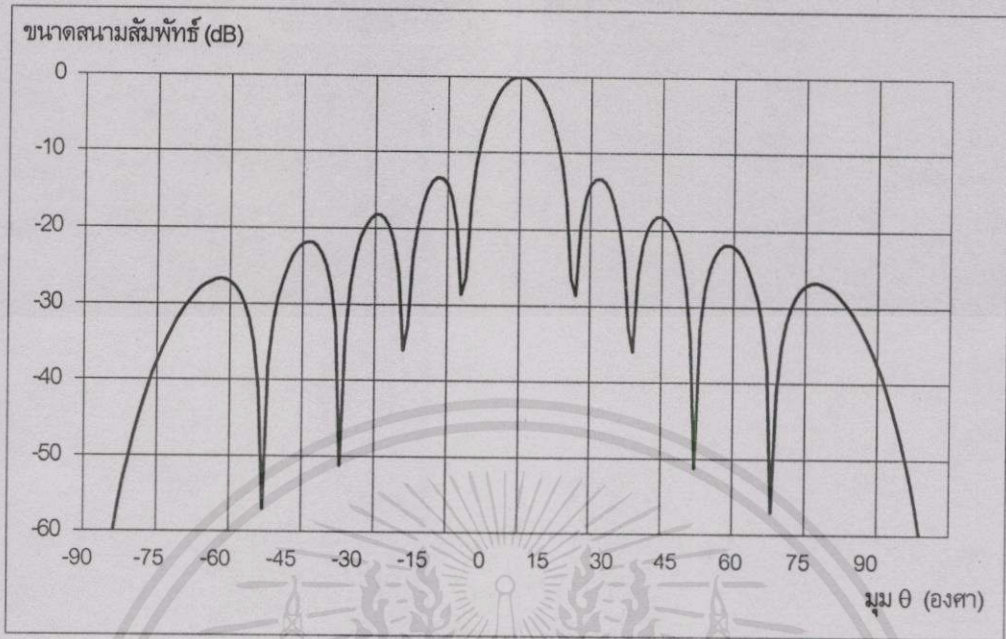
สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วัดได้จากการวัดสนามระยะใกล้ และ ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วนั้น แสดงได้ดังภาพที่ 9.5ก และ 9.5ข โดยแสดงผลการวัด ทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

เมื่อนำผลการวัดทั้งสองมาเปรียบเทียบกันในกรณีที่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับ กรณีที่ไม่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ แสดงได้ดังภาพที่ 9.6ก และ 9.6ข โดยแสดงผลการวัดทั้ง ในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

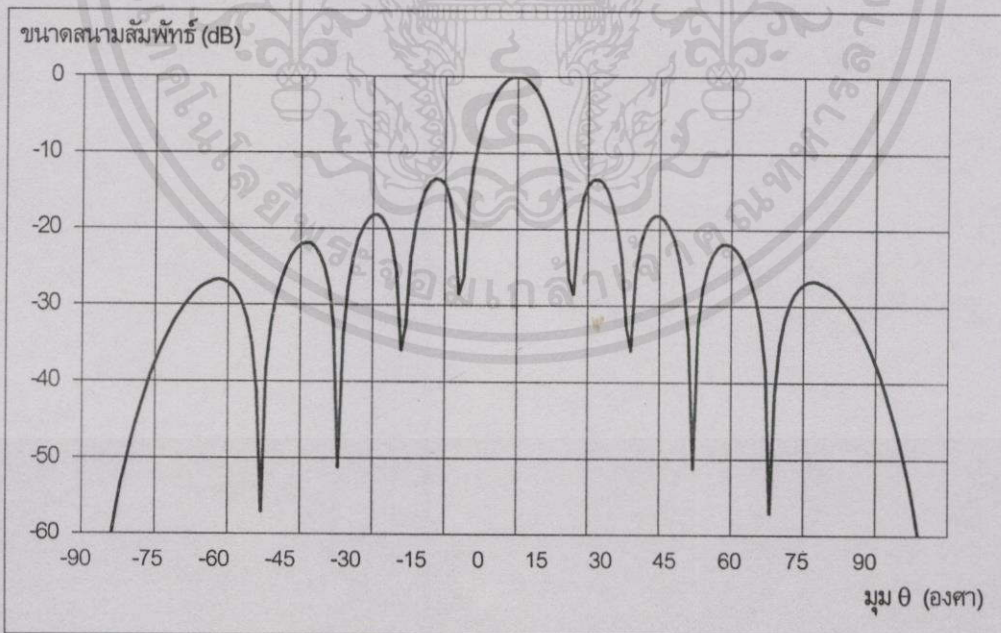
จากผลของการวัดที่ได้ในภาพที่ 9.5ก และ 9.5ข นี้ จึงได้ทำการทดสอบการวัดสนามระยะ ใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 2\lambda$ เพิ่มขึ้นอีก 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการ สนับสนุนผลการวัดที่ได้ทั้งหมดควรจะได้กราฟที่มีลักษณะเหมือนกัน หรือมีความใกล้เคียงกัน ซึ่ง ผลที่ได้จากการวัดทั้งหมดนี้ แสดงได้ ดังภาพที่ 9.7ก และ 9.7ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 9.3ก แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกตำดับแบบร่อง จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลแบบยูนิฟอร์มของสนามระยะใกล้ในระนาบ xz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ทำการตีพิมพ์ซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากสำนักพิมพ์และเจ้าของลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้
 ภาพที่ 9.3ข แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกตำดับแบบร่อง จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลแบบยูนิฟอร์มของสนามระยะใกล้ในระนาบ yz

ตารางที่ 9.1 แสดงข้อมูลสนามระยะใกล้ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่วัดได้ ที่ระยะ $z = 2 \lambda$

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 1 ในแกน y		แถวที่ 2 ในแกน y		แถวที่ 3 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00584173	18.5559	0.00827312	64.9471	0.00562715	28.6578
2	0.00470877	18.5559	0.00839949	64.9471	0.0103617	44.4328
3	0.00470877	-65.3728	0.00739813	16.989	0.0101147	58.2825
4	0.00852633	-65.3728	0.00785255	102.251	0.00240743	-203.74
5	0.00852633	-0.7402	0.00997972	102.251	0.0120716	-49.8505
6	0.0160074	-0.7402	0.0101724	63.9555	0.006042	112.872
7	0.0160074	-19.7411	0.0145879	63.9555	0.00886059	-130.935
8	0.00529528	-19.7411	0.00848866	5.34211	0.0181742	139.72
9	0.00529528	-191.739	0.00848866	-46.7303	0.0065372	-181.372
10	0.0084753	-191.739	0.0137858	-113.089	0.016283	-155.929
11	0.0257511	28.6331	0.011908	-115.421	0.016283	-88.9014
12	0.0259819	137.741	0.027401	-115.421	0.0214949	-88.9014
13	0.0300942	109.004	0.027401	-115.174	0.0237179	111.297
14	0.027791	96.6234	0.022892	-115.174	0.0212736	89.0607
15	0.0190792	96.6234	0.0215206	-109.55	0.0212736	57.6178
16	0.0255737	96.5547	0.0292597	-104.371	0.015099	57.6178
17	0.0255737	126.387	0.0263433	-104.371	0.0189133	86.0161
18	0.0222807	126.387	0.0195408	-118.342	0.0143271	86.0161
19	0.0213013	103.217	0.011683	145.69	0.0204296	49.6527
20	0.0116935	94.5978	0.0134306	145.69	0.016326	123.593
21	0.0116935	132.001	0.0134306	59.1957	0.00232243	123.176
22	0.0146546	132.001	0.00712395	-185.648	0.0103226	-173.459
23	0.0146546	69.1562	0.0121989	70.8934	0.0103226	-159.368
24	0.0104098	69.1562	0.0200043	70.8934	0.0155263	-159.368
25	0.0196152	83.6952	0.0200043	-1.15081	0.00782967	74.6136
26	0.00440288	27.621	0.00805569	125.696	0.0156102	-62.7855
27	0.00440288	-74.3623	0.00875187	-74.3623	0.0156102	144.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 4 ในแกน y		แถวที่ 5 ในแกน y		แถวที่ 6 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00511718	96.5025	0.00754476	123.008	0.00744986	59.7739
2	0.00214243	96.5025	0.00815392	123.008	0.00221169	68.0864
3	0.00214243	142.906	0.00815392	71.5567	0.00194955	126.689
4	0.00544691	29.4969	0.00199091	71.5567	0.00800419	-178.395
5	0.0124979	-100.728	0.00403643	144.9	0.00878763	-68.9007
6	0.0125718	-100.728	0.0127201	55.4617	0.00618553	60.5484
7	0.0125718	-30.5598	0.0127201	138.546	0.00612736	-176.663
8	0.0116239	14.5129	0.00532174	138.546	0.0163775	-27.5716
9	0.0255728	14.5129	0.019455	-59.388	0.01826	58.3772
10	0.0044055	-134.666	0.00685215	118.717	0.0163536	146.595
11	0.0104189	-134.666	0.00363588	-131.651	0.0382061	138.038
12	0.0217018	-149.712	0.0163412	-193.74	0.0326595	100.791
13	0.0219355	-152.579	0.0115995	53.8811	0.0412502	-197.055
14	0.0184298	-118.739	0.027875	3.78342	0.0303688	-197.055
15	0.0228863	-118.739	0.0196276	-27.9272	0.0303688	134.208
16	0.033041	-146.948	0.0259247	7.83051	0.0301762	-193.91
17	0.0193138	-114.554	0.0233612	-3.0281	0.0275211	-193.91
18	0.0229015	-114.554	0.018219	-3.0281	0.0251799	131.807
19	0.0252714	-184.813	0.0232115	0.861059	0.0251799	23.1633
20	0.0160914	93.3439	0.0145531	30.8084	0.00980806	-141.866
21	0.0078187	-101.065	0.0119796	-2.45269	0.0157232	-205.79
22	0.0110917	-201.742	0.0181904	-150.294	0.0238886	-205.79
23	0.0243931	81.6943	0.0215864	104.472	0.0189772	75.1712
24	0.0205956	-5.05096	0.0116901	21.2572	0.00450325	98.3537
25	0.0116248	-197.096	0.0133596	151.436	0.00701857	98.3537
26	0.00882101	85.2443	0.0164042	151.436	0.00165254	82.4359
27	0.0160179	144.31	0.00433612	108.5	0.0102496	2.44034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 7 ในแกน y		แถวที่ 8 ในแกน y		แถวที่ 9 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00744986	93.8438	0.0104594	-136.822	0.00498438	81.0956
2	0.0109038	93.8438	0.00613833	-205.811	0.00779939	93.6818
3	0.00495076	19.4746	0.00294435	91.8622	0.0031718	128.227
4	0.00137591	69.2125	0.00583219	91.8622	0.00606894	-106.496
5	0.00479674	76.9386	0.00583219	-181.847	0.0118642	128.131
6	0.00433135	76.9386	0.0205393	-181.847	0.00239813	-137.648
7	0.0224695	54.6625	0.040823	152.302	0.00239813	31.3605
8	0.028204	99.109	0.0162916	152.302	0.0177479	31.3605
9	0.028204	-170.635	0.0162916	-60.2985	0.0141058	-31.1133
10	0.012548	-170.635	0.0653496	-10.6636	0.0684776	-119.018
11	0.0478039	44.4026	0.100082	-37.2972	0.0684776	-15.4015
12	0.0737572	-146.798	0.0599899	-61.75	0.106522	54.5018
13	0.0564594	-113.637	0.0723495	-61.75	0.0670967	54.5018
14	0.0513783	-130.95	0.0511875	-32.2572	0.0747795	-2.16018
15	0.0523338	-146.433	0.0310459	-44.6869	0.0747795	-20.6323
16	0.0429096	-118.922	0.0263338	-44.6869	0.0306339	-20.6323
17	0.0429096	-113.637	0.0263338	-8.40866	0.0471916	-12.3788
18	0.0367413	-113.637	0.0277815	-8.40866	0.0354824	-27.0772
19	0.0348148	-114.6	0.0385647	149.128	0.0160456	-24.6519
20	0.0333462	-120.376	0.0354099	149.128	0.0223274	74.2785
21	0.0333462	-173.123	0.0354099	146.501	0.0375271	8.0214
22	0.0245409	-173.123	0.0107951	146.216	0.0237646	-118.728
23	0.0150724	79.8953	0.0267258	86.5736	0.0226841	-167.565
24	0.0186195	-182.611	0.0177031	-201.058	0.0353184	-126.807
25	0.011117	107.231	0.00633025	139.285	0.0267916	-163.268
26	0.0196495	110.866	0.0169239	54.8218	0.0094924	123.081
27	0.0188341	85.6769	0.017559	85.6769	0.0094924	-96.953

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 10 ในแกน y		แถวที่ 11 ในแกน y		แถวที่ 12 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00755119	76.5472	0.00187439	138.94	0.00672722	-68.5574
2	0.00458622	76.5472	0.00852394	84.1154	0.00758433	46.8416
3	0.00458622	-126.519	0.00852394	143.538	0.00481152	46.8416
4	0.00763965	102.128	0.00857782	143.538	0.0237865	3.55957
5	0.0130978	-77.1776	0.0215273	28.4409	0.0353375	-204.515
6	0.0337105	-77.1776	0.0186958	-107.967	0.0368176	-76.6461
7	0.0337105	-57.3006	0.0186958	33.7967	0.0798035	-9.54025
8	0.0726547	-57.3006	0.0486755	33.7967	0.133186	53.7149
9	0.131844	47.4005	0.171135	-100.268	0.355545	77.595
10	0.130386	47.4005	0.249649	-18.6095	0.454285	72.6141
11	0.130386	1.07529	0.249649	53.4924	0.660706	48.6365
12	0.271042	8.1189	0.38092	53.4924	0.660553	40.5684
13	0.197052	-16.0442	0.602997	73.2596	0.410706	29.2964
14	0.143761	-16.0442	0.471725	47.2577	0.322342	29.2964
15	0.143761	5.26245	0.302063	39.5	0.322342	32.7132
16	0.147682	10.5016	0.355316	45.3186	0.377853	41.4336
17	0.161125	-30.3841	0.364533	29.6988	0.33876	21.0512
18	0.0919151	-62.5974	0.326691	36.3812	0.23745	21.0512
19	0.0105834	-101.135	0.186821	39.9957	0.16713	17.3131
20	0.0317688	-160.247	0.082592	19.6422	0.0361519	124.438
21	0.0539646	-204.799	0.082592	0.47928	0.0262127	-72.0387
22	0.0275288	-121.227	0.0508957	0.47928	0.0113091	-72.0387
23	0.0230503	117.216	0.0359592	-105.561	0.0113091	-146.567
24	0.0152731	117.216	0.00644684	-171.075	0.0126367	-95.1196
25	0.0152731	-165.906	0.00644684	41.4967	0.0103135	-188.733
26	0.0149827	149.496	0.00861835	41.4967	0.0157433	-188.733
27	0.0290804	-96.953	0.014648	-146.397	0.0157433	-175.082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 13 ในแกน y		แถวที่ 14 ในแกน y		แถวที่ 15 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00672722	106.515	0.0145979	110.594	0.00605035	110.594
2	0.00695467	106.515	0.00775742	-148.557	0.014029	57.534
3	0.00804138	88.4605	0.0057137	-143.27	0.014029	115.425
4	0.00715089	-79.2897	0.0162592	-36.0612	0.00608945	115.425
5	0.00715089	121.932	0.0328198	-145.375	0.0265217	-81.524
6	0.0418949	121.932	0.0266495	-145.375	0.032959	-129.139
7	0.0396786	-36.6614	0.130997	-29.9226	0.0325413	-34.427
8	0.13517	-160.738	0.244774	19.1039	0.129128	-157.294
9	0.156136	-48.5499	0.244774	20.4524	0.193207	-56.6249
10	0.301224	-33.3916	0.293716	20.4524	0.35643	-56.6249
11	0.508423	31.5884	0.467773	0.00411987	0.35643	-8.29055
12	0.499161	32.5305	0.417404	0.00411987	0.544525	-8.29055
13	0.499161	41.4349	0.417404	20.8012	0.509827	16.2158
14	0.592499	41.4349	0.285385	0	0.4216	-3.69827
15	0.326523	9.07196	0.238998	13.277	0.270828	-4.4783
16	0.356903	12.6439	0.263718	13.277	0.336685	16.1389
17	0.430862	12.6439	0.31813	20.0844	0.366379	9.22577
18	0.369537	14.708	0.219696	-8.59817	0.335922	9.22577
19	0.246071	16.2735	0.123612	-167.075	0.335922	21.4645
20	0.195183	12.5189	0.04426	-167.075	0.156822	21.4645
21	0.0764961	-0.822599	0.04426	99.4043	0.0342312	-109.057
22	0.0606537	-69.7893	0.0283756	-37.1503	0.0377617	148.935
23	0.030653	-196.54	0.00462723	75.9704	0.00791359	148.935
24	0.0273552	34.5396	0.0156364	75.9704	0.00379062	77.2476
25	0.0254383	-68.8788	0.0156364	-177.256	0.00982046	11.4807
26	0.00621557	-3.12973	0.00828695	-191.302	0.00538015	-172.102
27	0.0184116	-3.12973	0.0119381	-104.849	0.0121636	-194.885

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 16 ในแกน y		แถวที่ 17 ในแกน y		แถวที่ 18 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.0082674	-157.526	0.00532031	96.2004	0.00612712	-137.183
2	0.00634408	-129.643	0.0124059	127.951	0.0017767	-146.468
3	0.00626779	-124.394	0.0092082	148.416	0.00711632	-96.8349
4	0.014101	-124.394	0.00662589	-133.823	0.0104556	-96.8349
5	0.019887	-108.645	0.00662589	-128.617	0.0120797	-187.244
6	0.100597	-108.645	0.0201273	-128.617	0.0306654	-63.5271
7	0.100597	-57.9144	0.0398121	-134.514	0.117947	-11.8652
8	0.156227	18.8223	0.0824203	-134.514	0.173119	-11.8652
9	0.515167	34.46	0.0824203	-85.247	0.173119	26.3837
10	0.652588	-34.46	0.142654	-85.247	0.211288	25.0694
11	0.652588	4.71177	0.369049	-3.37967	0.364548	4.96033
12	0.541321	4.79828	0.528137	39.3599	0.356247	4.96033
13	0.415756	8.70667	0.528137	43.5114	0.356247	8.66547
14	0.268723	-3.82599	0.447388	43.5114	0.289719	7.75223
15	0.271393	6.75797	0.29306	27.9932	0.273071	18.1096
16	0.37326	15.786	0.270248	32.5621	0.277771	18.1096
17	0.358643	-7.09991	0.380341	17.9613	0.277771	9.25049
18	0.187775	-7.09991	0.303131	28.7622	0.194221	4.24759
19	0.187775	-40.9392	0.20488	35.9102	0.173698	-37.9015
20	0.0842362	-199.624	0.193565	14.5075	0.0792618	-154.593
21	0.0343895	29.6947	0.0795593	-6.76757	0.0232191	66.7804
22	0.0203524	29.6947	0.0546818	-59.035	0.0182629	-52.0601
23	0.0203524	-113.508	0.0325355	87.2795	0.00783491	-24.9719
24	0.0175867	110.053	0.0185652	87.2795	0.00161391	-24.9719
25	0.0127683	-168.879	0.0230179	-174.496	0.00161391	-182.48
26	0.00578475	-195.208	0.0135002	115.049	0.0110564	149.469
27	0.00822735	-196.062	0.0151362	115.049	0.0130887	-169.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 19 ในแกน y		แถวที่ 20 ในแกน y		แถวที่ 21 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00429964	-195.888	0.00454617	-85.1523	0.010467	93.6323
2	0.00558972	148.42	0.0119739	-85.1523	0.00148219	-151.276
3	0.00781345	148.42	0.0119739	78.9134	0.00148219	89.29
4	0.00441241	-116.378	0.00157022	-139.846	0.00591302	89.29
5	0.0111098	-96.953	0.00794411	-137.359	0.00553823	-174.72
6	0.012537	-145.929	0.0323792	-137.359	0.006217	-107.122
7	0.012537	-56.9737	0.0323792	-59.0639	0.006217	-45.8816
8	0.0333538	-56.9737	0.0761375	19.0654	0.0378628	-45.8816
9	0.032032	-167.026	0.101875	46.0478	0.0843086	99.6776
10	0.0253468	-78.1059	0.0176001	46.0478	0.0848618	-152.297
11	0.0253468	32.26	0.0176001	-20.0459	0.0699196	-83.6087
12	0.100372	32.26	0.0540791	32.5072	0.0420895	-39.8529
13	0.16481	-22.6579	0.0330772	-43.0087	0.0812797	-73.6784
14	0.0976295	-31.5816	0.0566826	-43.0087	0.072216	-59.4745
15	0.0976295	-40.3157	0.0566826	-37.403	0.0528145	-59.4745
16	0.128517	-50.1924	0.0780525	-7.41577	0.0826531	-109.627
17	0.121689	-50.1924	0.0508614	-34.7621	0.0836906	-104.954
18	0.11956	-17.3062	0.0321732	-34.7621	0.0689964	-104.954
19	0.0858154	-17.3062	0.0321732	-14.6214	0.0725937	-98.7904
20	0.0502262	-30.4898	0.0043211	-12.8966	0.0377789	-119.557
21	0.0102067	-62.8816	0.00981283	22.2926	0.0377789	-146.317
22	0.0105877	-147.155	0.00705075	22.2926	0.00594974	-33.7074
23	0.0105877	106.747	0.00705075	-73.2294	0.0147247	-33.7074
24	0.0093627	106.747	0.0168304	137.663	0.0101695	-189.403
25	0.00520563	126.284	0.014986	38.8793	0.0101566	143.709
26	0.0261936	-50.9972	0.00466895	-100.096	0.0141902	-203.846
27	0.0122704	-177.753	0.00528407	119.66	0.0154853	135.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

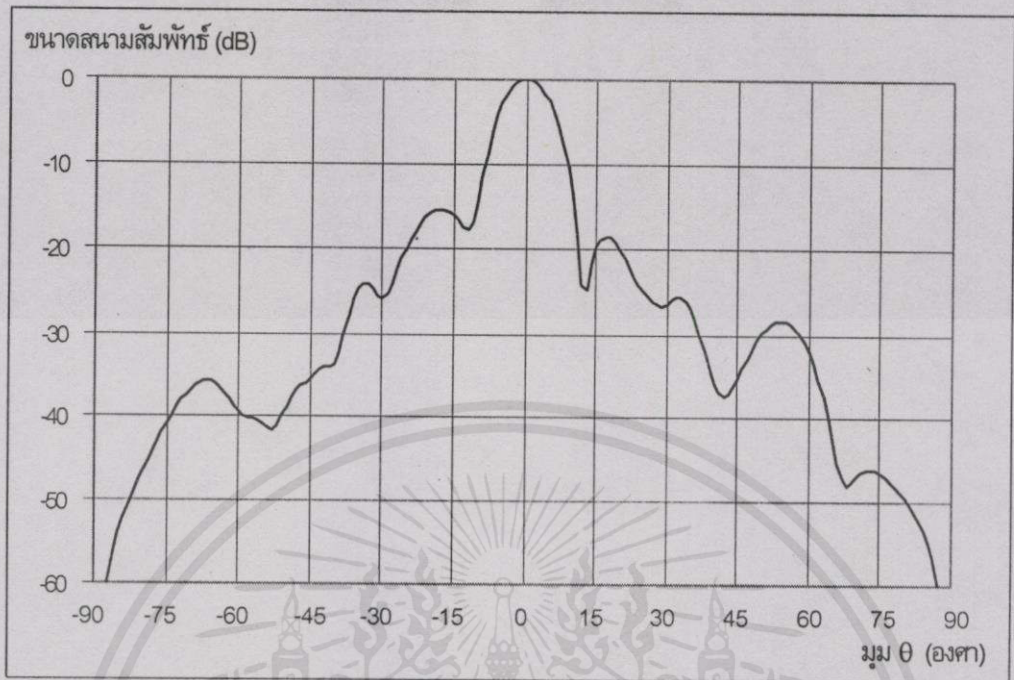
จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 22 ในแกน y		แถวที่ 23 ในแกน y		แถวที่ 24 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00617909	67.7293	0.00266314	127.849	0.00436592	6.22513
2	0.00110155	-80.1013	0.00470805	102.327	0.00463438	90.8789
3	0.00483584	-28.7801	0.00410271	102.327	0.00460601	-72.6073
4	0.00412273	-28.7801	0.00422049	-203.1	0.00615001	-72.6073
5	0.00639892	-90.4491	0.00422049	-117.462	0.00615001	17.8171
6	0.0142336	23.0026	0.0103607	-117.462	0.0141945	113.316
7	0.0577717	131.634	0.0287218	-3.87268	0.0291052	-123.919
8	0.0684204	131.634	0.0483322	151.474	0.0081501	-123.919
9	0.0684204	-148.151	0.0483322	-114.971	0.0081501	-14.2479
10	0.0583515	-131.089	0.0249729	-114.971	0.0415363	-4.78454
11	0.0314808	-173.228	0.0486202	4.32175	0.00532174	-95.5742
12	0.0454254	-176.49	0.0401154	108.832	0.0238304	-95.5742
13	0.0504742	-176.891	0.0401154	123.23	0.0238304	-115.746
14	0.0365353	146.577	0.0152178	123.23	0.0265455	-127.676
15	0.0635834	151.779	0.0207691	16.9629	0.0251999	-135.618
16	0.0506611	151.779	0.0392227	-8.63525	0.0126576	-3.14621
17	0.0355053	141.555	0.0325718	-7.96371	0.00773311	-84.9216
18	0.0446567	102.117	0.0045259	-3.57879	0.0191917	-173.789
19	0.0350876	102.117	0.0184307	72.6993	0.0149674	-23.3047
20	0.00956631	125.052	0.0251179	19.9965	0.0176001	-23.3047
21	0.0110798	38.8504	0.0251179	-73.1772	0.0176001	-114.85
22	0.0126901	-54.0651	0.0143509	-73.1772	0.0166426	48.7875
23	0.011919	-54.0651	0.0169678	147.379	0.0105181	-148.247
24	0.0062933	-190.639	0.0131512	-97.2414	0.0112557	-148.247
25	0.0148625	83.091	0.00504684	-183.381	0.0112557	121.7
26	0.0215397	83.091	0.00414801	48.2506	0.0203104	94.8312
27	0.0215397	110.601	0.014226	-185.608	0.0141497	112.228

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

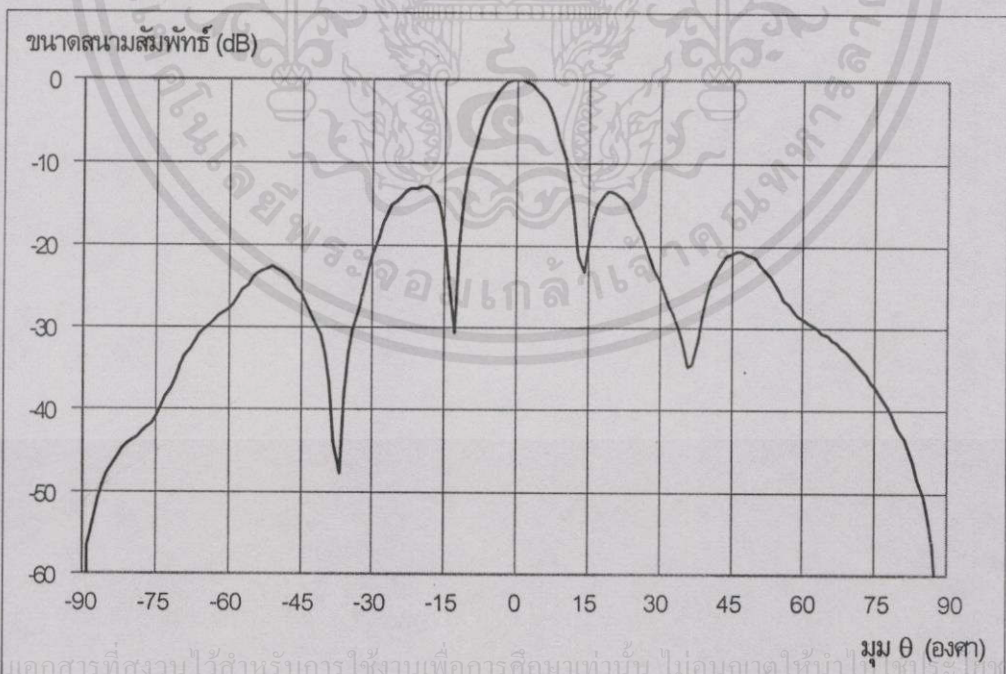
ตารางที่ 9.1 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 25 ในแกน y		แถวที่ 26 ในแกน y		แถวที่ 27 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00436592	111.362	0.00307298	91.4076	0.00466585	132.821
2	0.00406265	111.362	0.00673199	91.4076	0.00748372	66.7832
3	0.00576305	110.359	0.00673199	-156.642	0.00404262	93.208
4	0.00654984	-106.765	0.0109611	25.0255	0.0038321	-100.497
5	0.00740266	-64.6408	0.00724721	-95.4794	0.0036819	146.689
6	0.00610948	74.2497	0.0109525	-95.4794	0.00437832	146.689
7	0.00879431	74.2497	0.0109525	-33.5358	0.00437832	-205.38
8	0.029727	-177.859	0.010807	-33.5358	0.00889778	-205.38
9	0.0319576	-7.80029	0.0449886	72.1074	0.0170488	68.644
10	0.0256386	-91.9116	0.0390854	72.1074	0.0129876	-174.957
11	0.0256386	144.41	0.0390854	-18.8127	0.0243664	-114.98
12	0.0316582	-183.37	0.028286	-7.48581	0.0143518	-157.705
13	0.0117812	-183.37	0.0277901	-74.0602	0.0142593	-150.437
14	0.0225592	101.427	0.0240374	-64.5186	0.0136275	130.968
15	0.0225592	91.8114	0.022831	-75.2357	0.0310717	130.968
16	0.0184956	91.8114	0.00913525	52.8181	0.00864983	100.952
17	0.0175896	79.6509	0.0198078	-36.2878	0.0278416	100.952
18	0.00805044	18.4049	0.00934219	-122.975	0.0207081	75.108
19	0.00805044	-17.6866	0.0220022	-189.463	0.0142832	115.712
20	0.0202446	-17.6866	0.0147028	32.1391	0.0194092	-142.589
21	0.017375	-97.8662	0.0174208	-81.8069	0.0179787	102.822
22	0.00579977	-182.35	0.0117307	-81.8069	0.0354156	17.3653
23	0.00883579	-4.09103	0.022871	110.768	0.0318604	-80.468
24	0.0131893	-4.09103	0.0059545	110.768	0.0135489	-167.081
25	0.0175409	-66.5277	0.0059545	141.904	0.0234938	53.7602
26	0.0117235	-148.506	0.00762463	141.904	0.0318184	-85.6329
27	0.0117235	114.523	0.0124111	114.523	0.0200281	-179.464

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



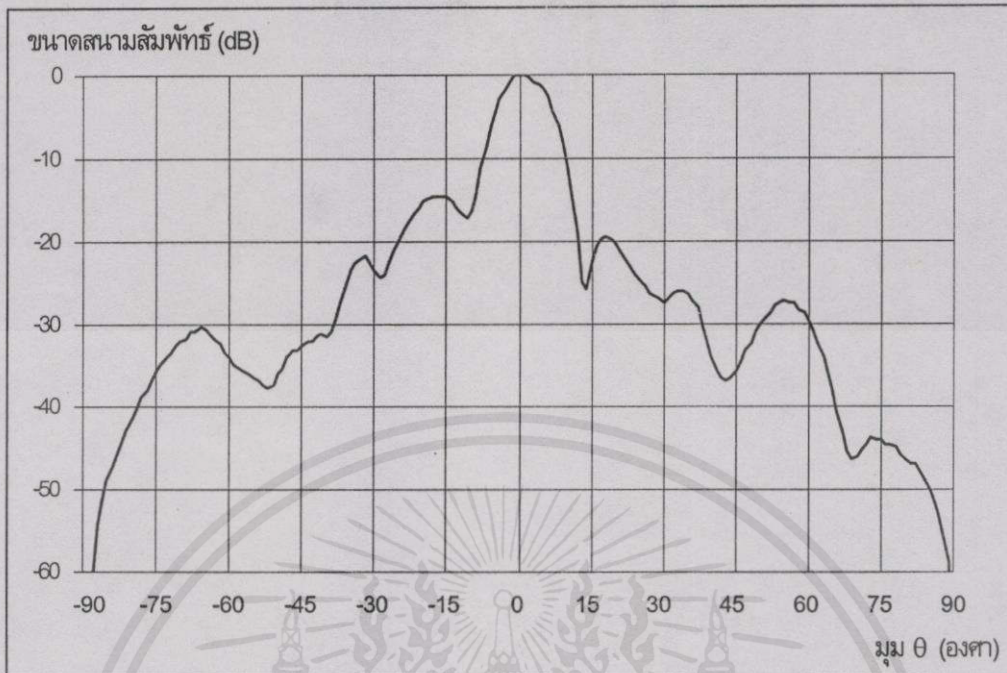
ภาพที่ 9.4ก แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวล์ลำดับแบบร่องจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz



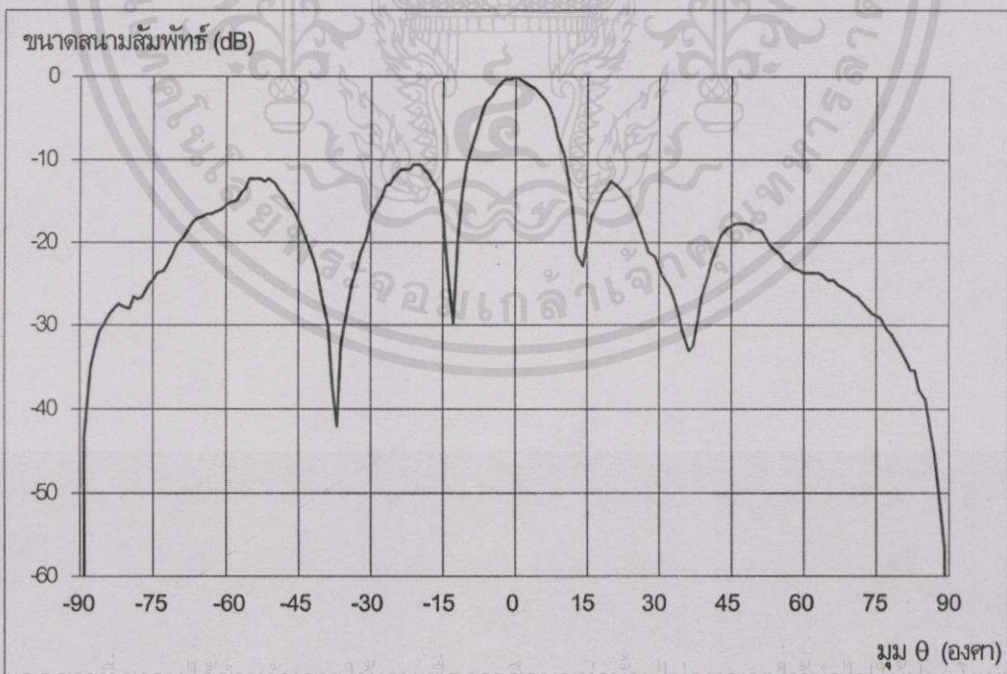
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

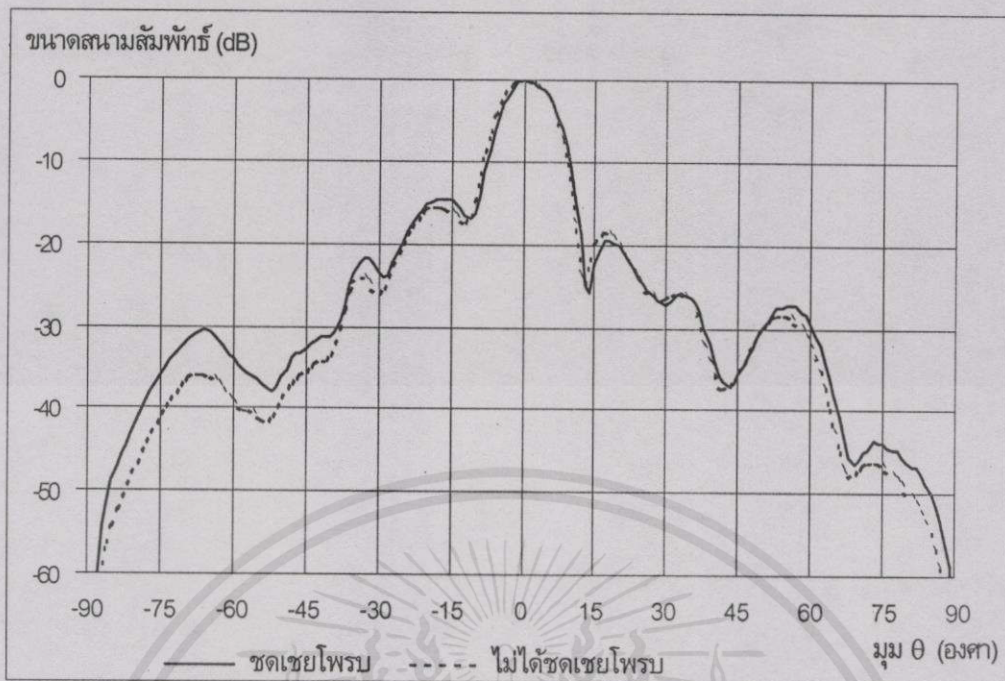
ภาพที่ 9.4ข แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวล์ลำดับแบบร่องจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz



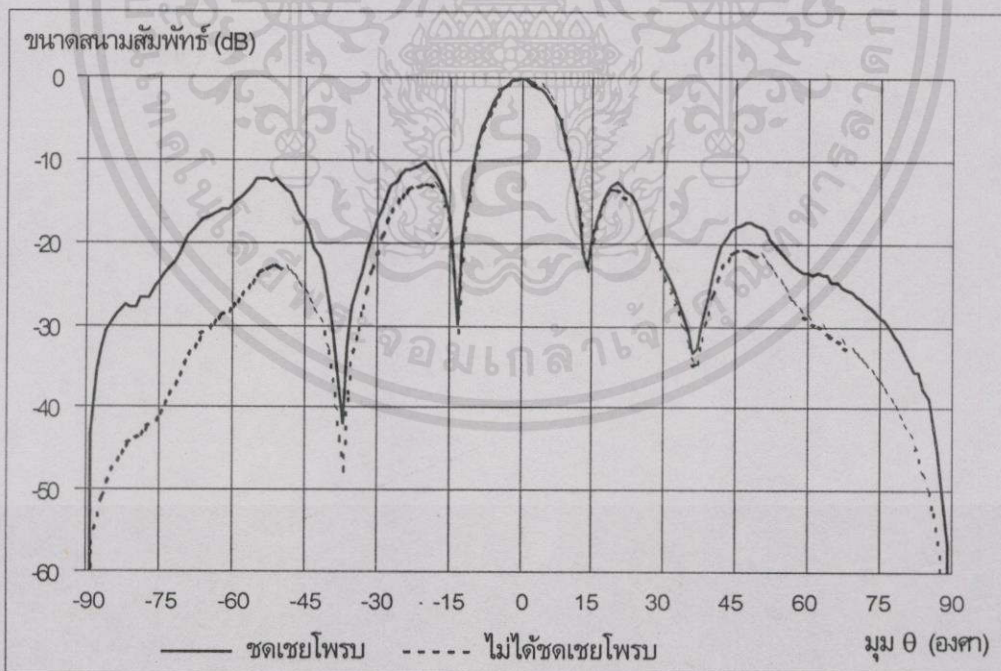
ภาพที่ 9.5ก แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกดำค้ำแบบร่องจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ xz



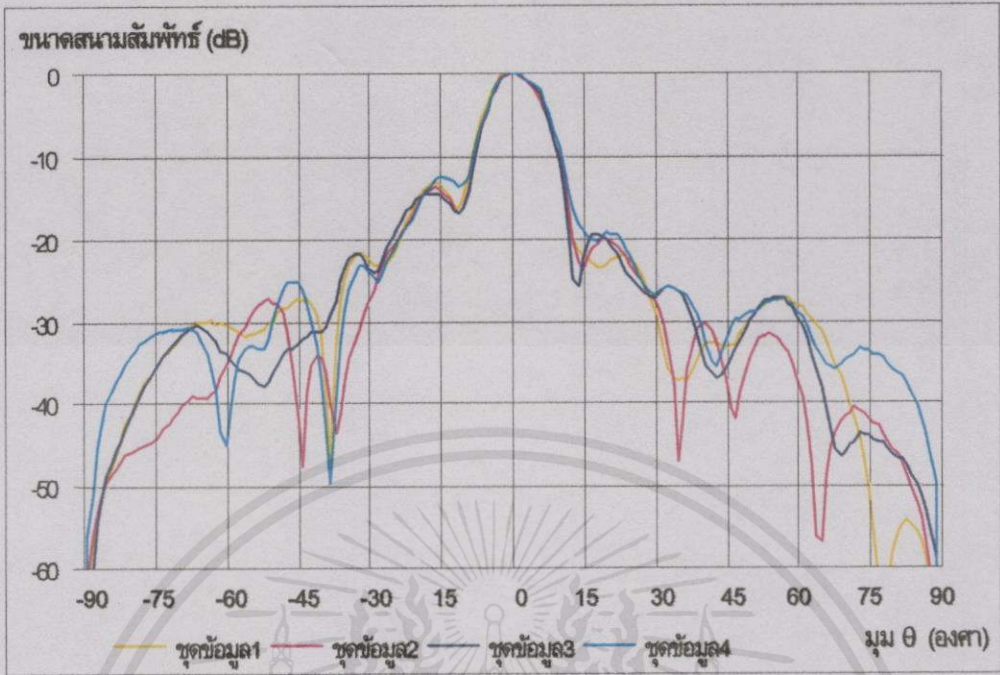
ภาพที่ 9.5ข แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกดำค้ำแบบร่องจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ yz



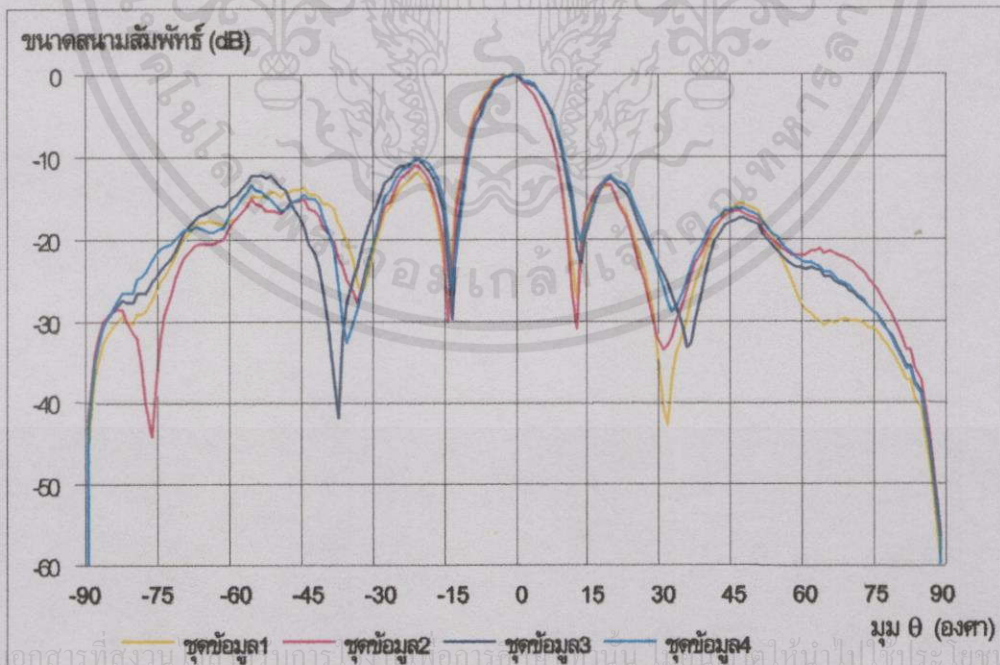
ภาพที่ 9.6ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ในสนามระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz



ภาพที่ 9.6ข แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ในสนามระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz



ภาพที่ 9.7ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ xz



ภาพที่ 9.7ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ออกพิมพ์ไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆที่เกิดจากการใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

9.2.2.2 ผลการวัดสนามระยะไกล

ในการวัดสนามระยะไกล (Far Field : R) ของสายอากาศเพื่อหาระยะทดสอบที่เหมาะสม ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นั้น สามารถหาได้ดังนี้

$$R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (9.2)$$

เมื่อ D คือ ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ เท่ากับ 15.6 เซนติเมตร

λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศที่ความถี่ 11.9909 GHz เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร

จะได้ว่า

$$R \geq 2 * \frac{(15.6)^2}{2.5}$$

$$R \geq 194.68 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้นระยะทดสอบของการวัดสนามระยะไกลของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (9.2) จะสามารถทำการวัดได้ตั้งแต่ระยะประมาณ 1.95 เมตรขึ้นไป ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะทำการวัดสนามระยะไกลที่ระยะ 2 เมตร

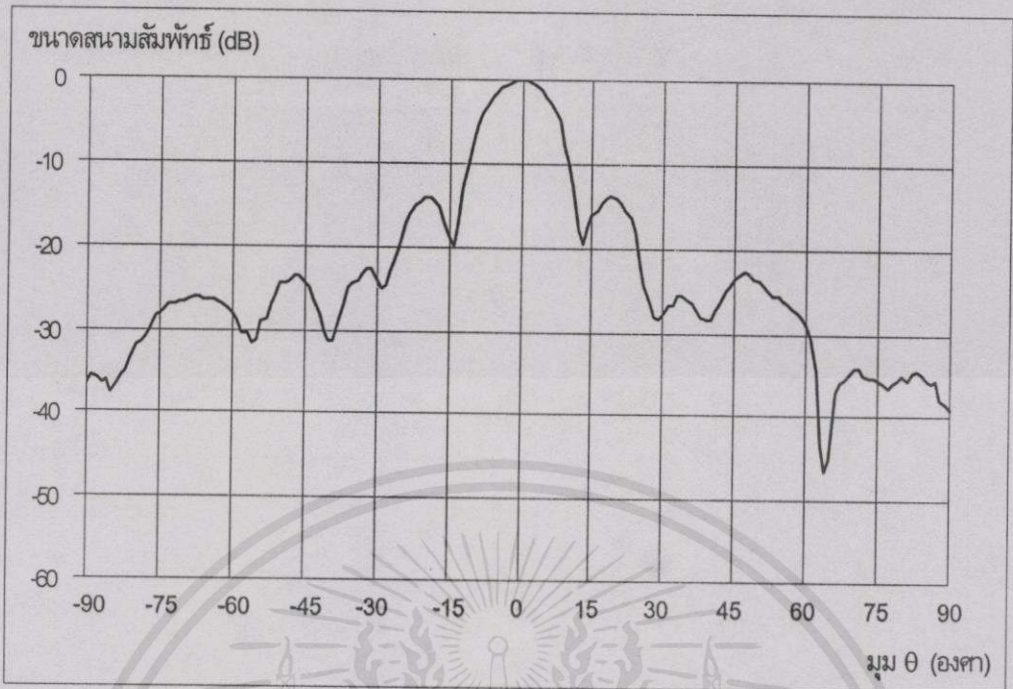
ผลการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ได้จากการวัดสนามระยะไกล สามารถแสดงได้ดังรูปกราฟ ภาพที่ 9.8ก และ 9.8ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

9.2.2.3 ผลการวัดสนามระยะใกล้เปรียบเทียบกับผลการวัดสนามระยะไกล

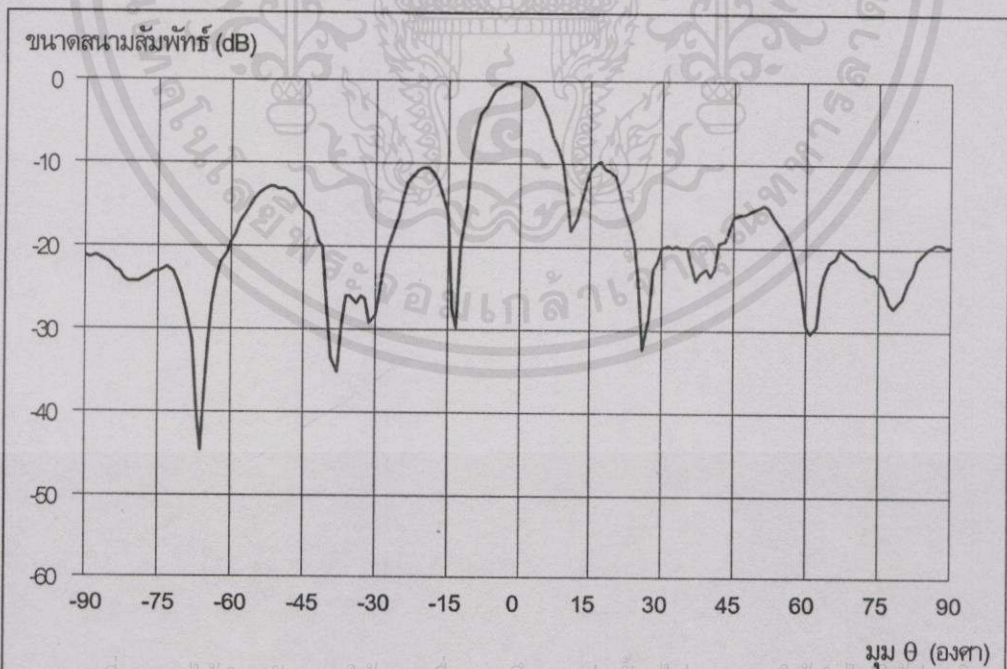
จากผลการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ได้จากการวัดสนามระยะใกล้ และสนามระยะไกลทั้ง 2 แบบนั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลการวัดดังกล่าวมีความใกล้เคียงหรือแตกต่างกันอย่างไร จึงนำผลการวัดที่ได้มาเปรียบเทียบร่วมกันกับผลการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบเดียวกัน โดยแสดงอยู่ในรูปของกราฟระนาบ xy และ กราฟโพลาร์ ดังนี้

กราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกล และการคำนวณทางทฤษฎี บนระนาบ xy แสดงดังภาพที่ 9.9ก และ 9.9ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

ส่วนกราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกล และการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาร์ แสดงดังภาพที่ 9.10ก และ 9.10ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ



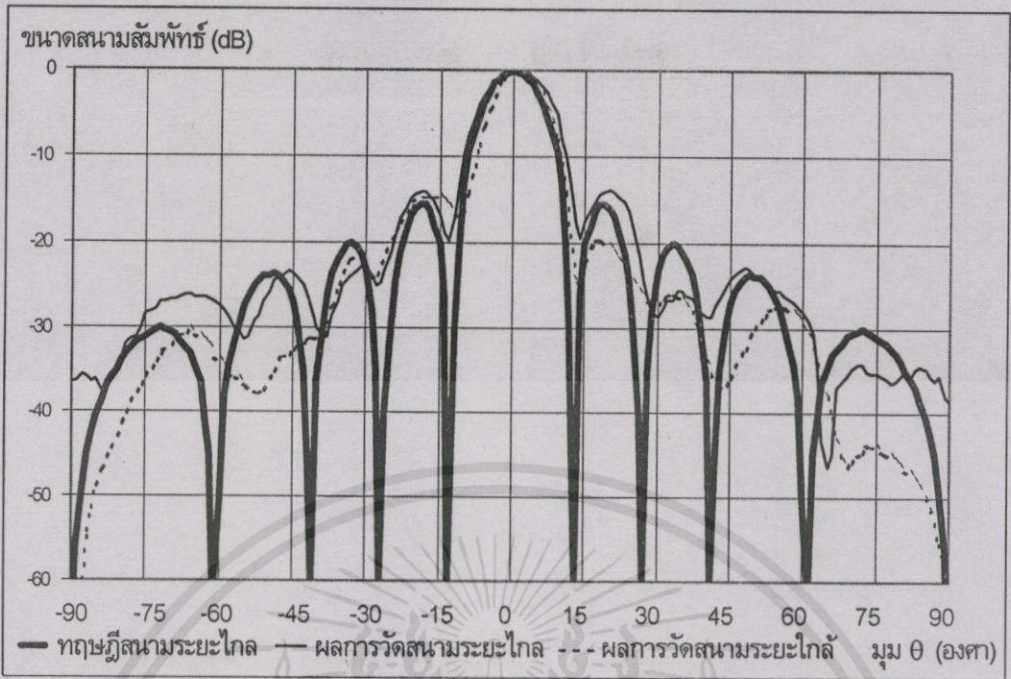
ภาพที่ 9.8ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องจากการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบในระนาบ xz



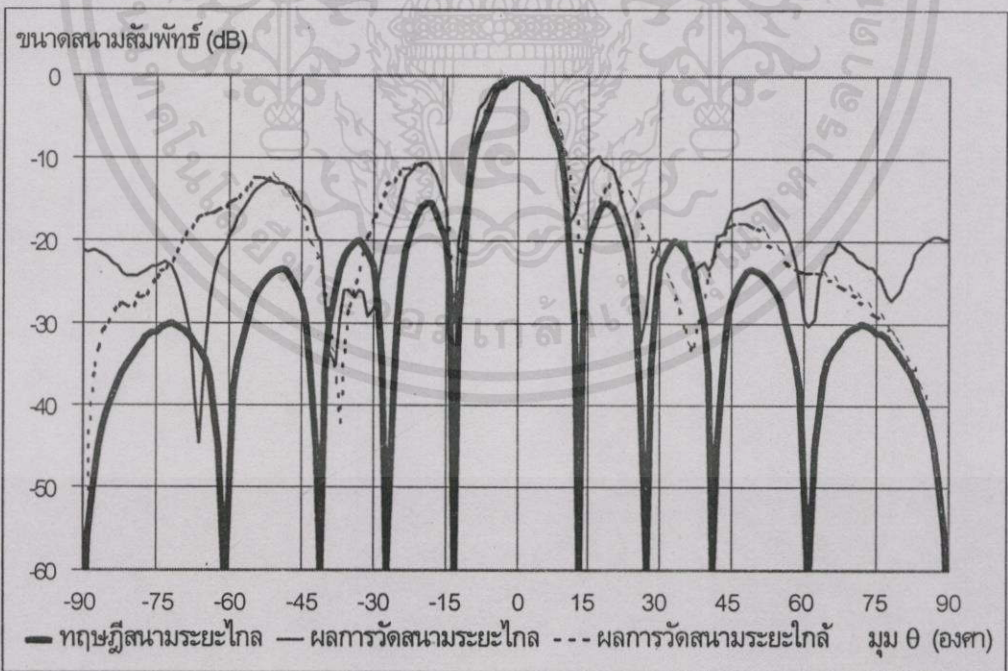
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

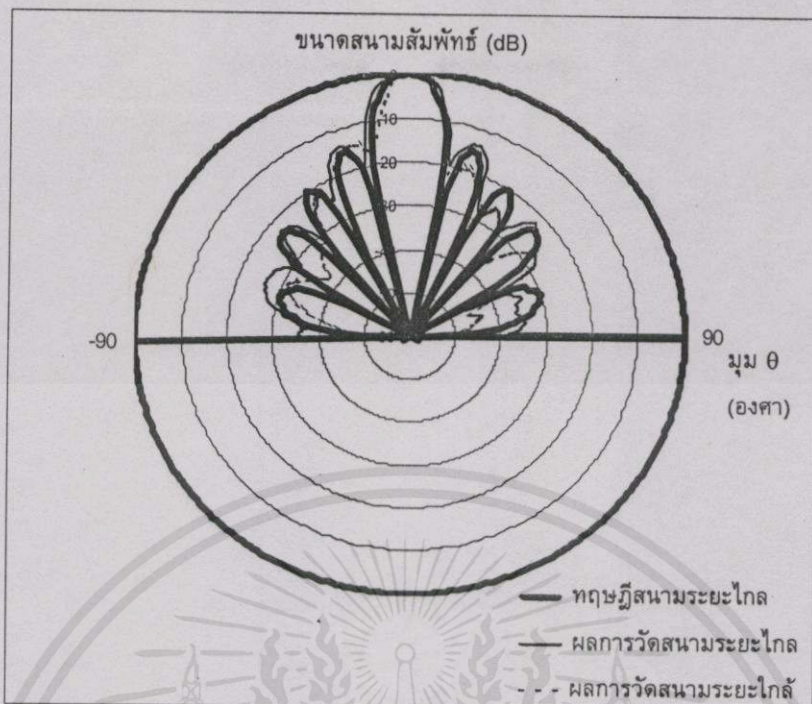
ภาพที่ 9.8ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องจากการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบในระนาบ yz



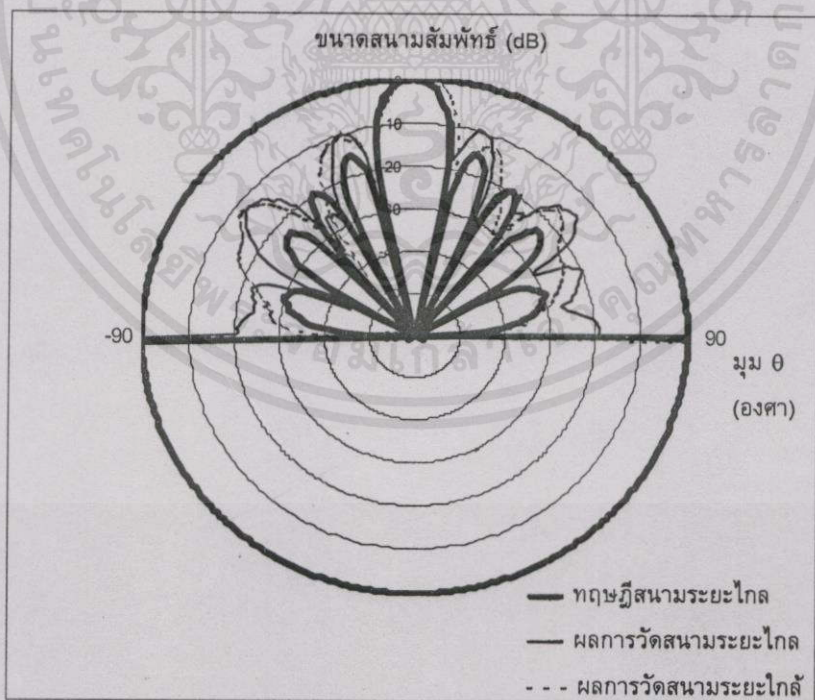
ภาพที่ 9.9ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ xz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพที่ 9.9ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ yz



ภาพที่ 9.10ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบ ร่องระหว่างการวัดสนามระยะไกล, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎี แบบโพลาไรในระนาบ xz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาพที่ 9.10ข แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบ ร่องระหว่างการวัดสนามระยะไกล, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎี แบบโพลาไรในระนาบ yz

9.2.2.4 ผลการวัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

สำหรับผลการวัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ได้ทำการวัดโดยใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่องเป็นสายอากาศทดสอบ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบกับระนาบอะเพอร์เจอร์ เป็นระยะ $z = 3\lambda$ ที่ความถี่ 11.9909 GHz

ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} L &= 15.6 + 2(3 * 2.5) \tan 60 \\ &= 41.582 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณหาจำนวนจุดของการกวาดในแนวแกน x และแนวแกน y ได้โดยนำค่าระยะห่างระหว่างจุดในการกวาด ($\lambda/2 = 1.25$ เซนติเมตร) ไปหารค่า L

จะได้ จำนวนจุดของการกวาดในแนวแกน x และแนวแกน y เท่ากับ 34 จุด

ดังนั้นจำนวนจุดของการกวาดทั้งหมดเท่ากับ 1156 จุด

เนื่องจากขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบที่ระยะ $z = 3\lambda$ จะมีขนาดจำนวนจุดของการกวาดเท่ากับ 34×34 จุด ซึ่งมีขนาดมากกว่าขนาดการกวาดสูงสุดของเครื่องกวาดโพรบที่ใช้วัด ดังนั้นจึงต้องทำการแบ่งพื้นที่อะเพอร์เจอร์ออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน คือ อะเพอร์เจอร์ "a", "b", "c" และ "d" โดยพื้นที่อะเพอร์เจอร์แต่ละส่วนมีขนาด 17×17 จุด หลังจากทำการวัดอะเพอร์เจอร์ทั้ง 4 ส่วนแล้ว จึงนำข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดมารวมกัน

จากข้อมูลที่ได้นี้ จึงเป็นผลของการวัดสนามระยะใกล้บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทั้ง 4 ส่วน รวมกัน เท่ากับจำนวน 1156 จุด ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลที่วัดได้ ดังตารางที่ 9.2

ในส่วนของสนามระยะใกล้ที่ยังไม่ได้มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.11ก และ 9.11ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วัดได้จากการวัดสนามระยะใกล้ที่ระยะ $z = 3\lambda$ ที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วแสดงดังภาพที่ 9.12ก และ 9.12ข ตามลำดับ และเมื่อนำผลการวัดทั้งสองมาเปรียบเทียบกันในกรณีที่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ แสดงได้ดังภาพที่ 9.13ก และ 9.13ข ตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้ว ยังแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกล และการคำนวณทางทฤษฎีบนระนาบ xy แสดงได้ดังภาพที่ 9.14ก และ 9.14ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

ส่วนกราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกล และการคำนวณทางทฤษฎี แบบโพลาไรซ์ แสดงได้ดังภาพที่ 9.15ก และ 9.15ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

ตารางที่ 9.2 แสดงข้อมูลสนามระยะใกล้ของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่วัดได้ ตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ที่ระยะ $z = 3 \lambda$

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 1 ในแกน y		แถวที่ 2 ในแกน y		แถวที่ 3 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00665236	10.6334	0.00437307	-118.792	0.00689506	68.2018
2	0.00844765	10.6334	0.00437307	46.9871	0.00384963	68.2018
3	0.00844765	3.40988	0.0100327	46.9871	0.00473619	109.473
4	0.00100881	3.40988	0.0100327	113.73	0.00246906	81.6353
5	0.00100881	-104.626	0.0094533	-79.1922	0.00246906	130.508
6	0.0079875	-104.626	0.00933838	-79.1922	0.00449967	130.508
7	0.0017423	172.518	0.00834274	98.4499	0.00160599	5.93674
8	0.00245249	53.3167	0.00761986	-166.63	0.00742006	178.973
9	0.0040009	53.3167	0.00745392	78.0235	0.00315595	-83.1981
10	0.0012505	129.672	0.00582242	148.265	0.00545406	25.7835
11	0.0047617	-87.1435	0.0103464	148.265	0.00345957	119.384
12	0.00249648	107.174	0.00441146	-139.25	0.00766635	119.384
13	0.0050075	107.174	0.00933552	-113.114	0.00469446	-82.4538
14	0.00757027	-147.148	0.0140786	-73.4065	0.00715876	-82.4538
15	0.00415969	176.109	0.0145044	-73.4065	0.00799274	34.7594
16	0.00859022	149.951	0.0205879	-63.6108	0.00660586	93.6461
17	0.0116167	141.378	0.0206661	-49.8779	0.0105786	53.9635
18	0.0235062	129.878	0.0115323	-98.9731	0.0206661	-56.4903
19	0.017725	129.878	0.0146651	-66.7035	0.0169163	-56.4903
20	0.017725	145.919	0.0122223	-95.8296	0.0113983	62.1057
21	0.0139923	145.919	0.00779486	-95.8296	0.0145922	107.751
22	0.0139923	146.372	0.0090766	-1.59439	0.0145922	126.372
23	0.0147324	146.372	0.0090766	-29.2841	0.00177884	126.372
24	0.0147324	155.649	0.00208473	-29.2841	0.00932598	116.693
25	0.0110545	139.373	0.00285184	-165.225	0.00215495	116.693
26	0.0133987	139.373	0.00227833	83.9012	0.0040853	60.9521
27	0.00266814	104.981	0.00227833	5.67719	0.0107522	74.6782
28	0.0076623	103.995	0.00788021	5.67719	0.0160599	135.199
29	0.00635958	103.995	0.00143152	-163.825	0.00935507	-31.208
30	0.00635958	84.6909	0.00493383	175.458	0.00836754	-31.208
31	0.00557446	84.6909	0.00493383	-177.047	0.0086894	-155.528
32	0.00557446	-138.472	0.00728464	-177.047	0.00632334	88.8176
33	0.00664544	61.4822	0.00200963	76.1352	0.00261641	17.7086
34	0.00258148	61.4822	0.00689506	-149.443	0.00265205	-45.9229

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 4 ในแกน y		แถวที่ 5 ในแกน y		แถวที่ 6 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00434542	43.7064	0.00270319	11.9765	0.00437236	83.2709
2	0.00205755	19.373	0.00289214	11.9765	0.0107894	7.99255
3	0.00663328	50.934	0.00159383	-170.725	0.0148025	7.99255
4	0.0122905	50.934	0.0035882	-170.725	0.0148025	58.8881
5	0.00821209	122.728	0.00116318	13.5214	0.00981093	58.8881
6	0.00821209	-53.4773	0.00341761	56.2061	0.00476336	81.2082
7	0.0107274	-53.4773	0.0079813	-70.5817	0.0158825	37.2272
8	0.00388813	52.961	0.00680447	67.7568	0.0153575	37.2272
9	0.0107074	174.109	0.00680447	94.8203	0.0085535	97.4954
10	0.00868797	-5.99716	0.00704884	94.8203	0.00621414	177.093
11	0.00793505	62	0.00769567	45.0659	0.0132136	-33.875
12	0.00928307	142.104	0.00679088	137.954	0.0124879	66.0663
13	0.00270891	-79.7758	0.00679088	-158.122	0.00872612	166.518
14	0.0087676	-79.7758	0.0028758	-158.122	0.0128665	150.715
15	0.0158968	-113.486	0.00806856	104.966	0.0211687	157.452
16	0.0131378	-80.5682	0.00587463	78.0702	0.0201416	-179.48
17	0.0080843	-88.4207	0.00587463	10.8531	0.0149093	-179.48
18	0.0142961	53.9635	0.0080843	-92.4637	0.0166016	10.8531
19	0.00868845	140.857	0.0155854	-92.4637	0.0173101	68.4023
20	0.00370991	-170.206	0.017436	49.6733	0.00799942	143.579
21	0.00187159	-100.591	0.019021	52.8703	0.00799942	148.46
22	0.00876713	159.594	0.00759435	69.5613	0.00697565	148.46
23	0.00876713	17.0357	0.00630641	69.5613	0.0161028	-176.361
24	0.00714946	17.0357	0.0100322	98.4567	0.00816345	42.3358
25	0.00546813	83.2599	0.00510025	55.746	0.00816345	-4.76395
26	0.00651646	33.3064	0.00510025	139.48	0.00359643	-4.76395
27	0.00651646	-35.0766	0.0187187	139.48	0.00695372	150.152
28	0.00743556	-35.0766	0.0120926	30.461	0.00254083	-29.0643
29	0.00551772	-4.6843	0.00164187	48.2808	0.00410104	-123.985
30	0.00660253	-113.136	0.00828314	92.8276	0.00545073	104.444
31	0.00660253	91.1673	0.0143657	92.8276	0.00199485	27.426
32	0.00772858	91.1673	0.00314403	-53.8783	0.00502038	37.2697
33	0.00466728	-41.0023	0.00283468	-53.8783	0.00175345	65.2698
34	0.00270319	132.944	0.00283468	83.2709	0.00601864	59.0597

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษารายงาน เป็นอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 7 ในแกน y		แถวที่ 8 ในแกน y		แถวที่ 9 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00495124	47.016	0.00483704	70.7121	0.000668079	96.4503
2	0.00442791	63.9267	0.0034678	70.7121	0.00469661	79.8418
3	0.00598455	19.7534	0.00529456	97.5764	0.00469661	101.466
4	0.00805855	20.8946	0.00529456	52.3306	0.00319135	101.466
5	0.00336731	61.8572	0.0107203	52.3306	0.00330269	-156.905
6	0.00645661	51.5108	0.00414753	118.651	0.00393748	-178.614
7	0.00186527	114.828	0.00334215	33.6415	0.00195295	-165.469
8	0.0137744	82.4057	0.00334215	158.784	0.00742817	-96.3185
9	0.0163431	59.2726	0.0133161	158.784	0.0140638	-117.548
10	0.00375986	142.903	0.0206318	81.3922	0.0172548	-15.5058
11	0.0064013	-19.3442	0.0193462	-149.391	0.0205088	107.672
12	0.0168581	-19.3442	0.0193462	-96.9104	0.0178814	-155.911
13	0.0168581	105.695	0.00521374	-96.9104	0.0178814	-32.0334
14	0.0131536	105.695	0.00881577	68.7291	0.0288858	-32.0334
15	0.00847864	-141.411	0.025013	70.8398	0.0312653	140.028
16	0.0165987	-47.3909	0.0294981	91.5779	0.0161533	165.763
17	0.0293636	-90.2898	0.023571	91.5779	0.0398045	165.763
18	0.0155253	147.009	0.0244093	-90.2898	0.0296326	-167.02
19	0.0117564	-116.885	0.0248413	-24.3361	0.0292463	-167.02
20	0.0149274	-29.6411	0.0191908	59.3797	0.0292463	-171.906
21	0.00845146	-75.9059	0.017458	59.3797	0.0420151	-171.906
22	0.00884008	-134.946	0.018096	89.4644	0.0267725	-177.465
23	0.00699472	167.469	0.021965	22.0606	0.0223446	172.23
24	0.0113139	-141.768	0.0194969	-65.4881	0.021883	172.23
25	0.022994	-141.768	0.0194969	-172.68	0.0181599	127.413
26	0.022994	160.705	0.0122414	-172.68	0.0123258	-86.9843
27	0.0129247	160.705	0.0159979	12.0822	0.0135531	-86.9843
28	0.0142145	70.9387	0.0118613	-123.676	0.00508905	-173.346
29	0.0241365	141.376	0.0059967	137.704	0.0122733	129.72
30	0.0241365	76.3989	0.00446176	38.8737	0.0127225	45.136
31	0.0112381	76.3989	0.00183243	112.938	0.00215578	45.136
32	0.0055542	74.5093	0.00419998	134.433	0.00967693	-10.3162
33	0.00572944	-34.7635	0.00387227	134.433	0.0090518	90.4436
34	0.00572944	115.356	0.00536871	65.4909	0.00593853	141.632

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับงานที่... 65.4909... 0.00593853... 141.632... ด้านการ...

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 10 ในแกน y		แถวที่ 11 ในแกน y		แถวที่ 12 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00656223	118.808	0.00487423	82.8506	0.00358748	79.4902
2	0.00325799	118.808	0.00132632	54.5567	0.00595021	79.4902
3	0.00665402	32.4632	0.00132632	6.88294	0.0104079	75.8249
4	0.00665402	88.19	0.0017038	6.88294	0.0126281	87.0955
5	0.0187149	88.19	0.00288939	-169.305	0.0119638	122.4
6	0.0183487	58.1767	0.00462341	87.5116	0.0110078	108.189
7	0.000546157	77.4811	0.00162506	-148.568	0.0156603	108.189
8	0.0101419	80.3938	0.0053401	-148.568	0.0120525	130.95
9	0.0110359	80.3938	0.00126278	72.2516	0.0175819	-107.64
10	0.0101161	172.341	0.0135937	-167.452	0.0340309	56.0413
11	0.0262623	64.4362	0.0254173	38.3656	0.025341	147.984
12	0.0262623	166.767	0.0198927	38.3656	0.015306	-155.837
13	0.0309343	166.767	0.0320244	126.098	0.0255985	-148.988
14	0.0288057	-93.5939	0.0431728	-72.3505	0.0337009	-148.988
15	0.036108	-93.5939	0.0401211	9.79706	0.0386257	-19.3153
16	0.0322075	-66.7625	0.0183525	67.8282	0.056839	-33.4026
17	0.0227795	-66.7625	0.0183525	-10.8572	0.0580158	-36.5584
18	0.0414906	174.683	0.00564289	17.1112	0.0134854	-24.814
19	0.0391254	-92.877	0.00150299	-178.864	0.0595341	-24.814
20	0.0282574	-84.9545	0.010047	-178.864	0.0389118	-20.0816
21	0.0282574	-51.1139	0.0254812	-6.28006	0.00511646	-25.7382
22	0.0463715	-51.1139	0.0100102	-6.34049	0.0285416	22.6634
23	0.0235434	-73.5878	0.0186062	-9.4249	0.0413113	22.6634
24	0.0133939	163.786	0.0186062	46.8402	0.016511	-19.2274
25	0.0133939	43.9412	0.0104599	46.8402	0.016511	-116.562
26	0.0192642	-129.295	0.0174932	48.2163	0.0203266	-116.562
27	0.00408363	-129.295	0.0115957	48.2163	0.00360882	78.7129
28	0.00493503	17.2348	0.0115957	-60.6706	0.00268459	126.996
29	0.00212324	17.2348	0.0188885	-60.6706	0.00724983	-179.387
30	0.00274467	151.23	0.00348091	89.6127	0.0071137	-179.387
31	0.00452328	-6.55335	0.00693703	118.442	0.00149548	112.047
32	0.00683761	155.477	0.00649858	55.481	0.00227106	145.405
33	0.00683761	67.0647	0.00534368	71.1736	0.0016197	145.405
34	0.00400734	67.0647	0.00385296	47.0421	0.00139451	79.7882

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการปฏิบัติงานเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจากรั้วมหาวิทยาลัยได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 13 ในแกน y		แถวที่ 14 ในแกน y		แถวที่ 15 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00422001	43.0815	0.0121636	57.3143	0.00715685	117.752
2	0.00486112	43.0815	0.00860262	57.3143	0.00621295	108.409
3	0.00363958	69.4308	0.00428629	96.4654	0.0050261	-20.1517
4	0.00496125	83.2942	0.0158262	88.97	0.0089035	-20.1517
5	0.00212169	68.9763	0.0146637	148.234	0.00312269	137.351
6	0.00980663	105.614	0.00776696	148.234	0.0142822	-46.3733
7	0.00876093	-178.319	0.00959063	-172.69	0.0142822	128.324
8	0.00668931	-178.319	0.0118828	102.903	0.0122743	128.324
9	0.00332618	-173.101	0.014039	158.031	0.0271149	-92.7383
10	0.0215778	78.3298	0.015018	-178.662	0.0448246	132.089
11	0.0215778	158.011	0.0164461	-160.178	0.0657463	-141.28
12	0.0380096	158.011	0.0118246	-132.767	0.113461	-38.7158
13	0.0749512	27.9657	0.052494	-61.2611	0.0976295	59.1504
14	0.0675278	27.9657	0.126762	28.2033	0.108994	83.735
15	0.0954399	47.59	0.150749	74.2456	0.158058	83.735
16	0.157066	35.7784	0.192558	71.0074	0.256409	91.5656
17	0.135338	38.036	0.207291	68.8705	0.223503	89.2461
18	0.124004	-36.5584	0.173348	30.5722	0.204224	68.8705
19	0.147507	28.9902	0.204948	64.2165	0.235939	76.9455
20	0.120506	31.826	0.197136	72.5853	0.218315	76.3687
21	0.108448	31.826	0.197136	80.9418	0.164238	76.3687
22	0.0823212	35.777	0.113598	88.0417	0.131958	72.9424
23	0.0240183	22.0372	0.0927086	88.0417	0.0610504	16.5015
24	0.0240183	-46.6356	0.0677452	57.0245	0.0411739	-65.7861
25	0.020524	-46.6356	0.0677452	-7.67807	0.0406246	-65.7861
26	0.0342865	-84.0344	0.036335	-149.388	0.0327358	-106.828
27	0.0207939	174.484	0.0178261	-149.388	0.0124125	26.0692
28	0.0207939	121.319	0.00654101	102.092	0.0129705	-107.669
29	0.00381112	121.319	0.00654101	-91.5202	0.0109668	-107.669
30	0.0107312	170.294	0.0102677	-91.5202	0.00669813	145.309
31	0.00739598	145.444	0.0035491	134.372	0.00655317	145.309
32	0.00739598	113.925	0.00622559	113.939	0.00655317	157.268
33	0.0117903	113.925	0.00211906	-35.2826	0.0118051	157.268
34	0.00998116	68.3789	0.00455308	-35.2826	0.00939751	111.955

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 16 ในแกน y		แถวที่ 17 ในแกน y		แถวที่ 18 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.0126343	88.2449	0.00299454	-172.91	0.00467825	-20.3645
2	0.0121107	134.323	0.00711703	69.1782	0.00649047	-20.3645
3	0.00917673	134.323	0.00605393	-174.537	0.00866508	45.8144
4	0.0127439	115.561	0.00738668	-52.3416	0.00371444	62.3309
5	0.00768924	148.907	0.0108881	165.634	0.000894606	-39.684
6	0.0117836	148.907	0.0112262	-51.2361	0.00337934	-39.684
7	0.0128336	137.344	0.0112262	86.6258	0.000151843	32.2641
8	0.0171032	-50.1416	0.00863314	86.6258	0.0194111	21.9534
9	0.0233116	40.0067	0.0168953	-138.242	0.0328846	-104.337
10	0.0405426	40.0067	0.0365486	162.245	0.0606918	-104.337
11	0.0461731	-74.2374	0.0137048	162.245	0.0901756	-36.6449
12	0.0573807	-4.75845	0.116634	-76.0309	0.131866	16.2007
13	0.0814476	-4.75845	0.169632	4.02374	0.166176	25.7382
14	0.17627	34.5465	0.262863	24.9568	0.195091	25.7382
15	0.204811	53.9539	0.301331	57.1468	0.246727	28.239
16	0.204811	55.1761	0.382874	41.9211	0.247986	22.3901
17	0.264206	55.1761	0.370117	28.9229	0.243271	19.0393
18	0.287796	72.9506	0.255264	59.7972	0.309753	-5.44647
19	0.336548	49.0649	0.287872	47.2632	0.263351	-5.44647
20	0.339615	57.5217	0.287872	46.8622	0.199799	-1.92535
21	0.339615	75.0078	0.227219	46.8622	0.199799	-23.8678
22	0.229225	75.0078	0.158386	45.0096	0.139084	-47.2755
23	0.229225	78.1197	0.0714111	8.10654	0.0357971	-47.2755
24	0.123981	78.1197	0.0410881	-34.7511	0.0416336	100.741
25	0.123981	32.9329	0.0415039	-34.7511	0.0416336	61.1925
26	0.0311842	-114.807	0.0234928	142.257	0.0188875	174.988
27	0.0252266	-114.807	0.024231	142.257	0.0194683	174.988
28	0.00383222	142.585	0.024231	51.6495	0.0169773	107.144
29	0.00383222	-48.1023	0.0115466	51.6495	0.00281334	151.187
30	0.0161762	-48.1023	0.000637263	-165.423	0.00422478	151.187
31	0.00529671	124.638	0.0105705	-161.242	0.009902	15.6816
32	0.00514579	-71.8781	0.0161638	134.246	0.00659823	48.5513
33	0.00211763	134.46	0.00830126	134.246	0.00659823	44.6635
34	0.00302184	-18.6864	0.00959492	156.704	0.00406885	44.6635

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานที่ออกจากรั้วเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้แค่แบบสั้นเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 19 ในแกน y		แถวที่ 20 ในแกน y		แถวที่ 21 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000942648	77.4976	0.0034188	74.4832	0.00246727	46.4062
2	0.00700617	-25.9854	0.00524473	110.332	0.00187343	17.9338
3	0.00511694	-34.8486	0.00600123	155.562	0.00435018	129.49
4	0.00510097	-34.8486	0.00879622	127.923	0.00282705	129.49
5	0.0109701	7.89505	0.0188208	-113.621	0.00185132	7.55035
6	0.0104094	169.846	0.0185022	-113.621	0.00584507	142.074
7	0.00845098	66.5346	0.0237789	-43.8684	0.00709677	102.453
8	0.0186033	99.8177	0.0383797	-156.842	0.00394463	102.453
9	0.0260525	99.8177	0.0422707	-156.842	0.0126939	150.532
10	0.0241385	-45.8913	0.0654984	-64.818	0.00915289	-50.4121
11	0.101887	-20.7806	0.0895882	-29.9789	0.0501328	-29.4406
12	0.188759	-20.7806	0.148102	35.4982	0.0901985	6.30066
13	0.185982	-3.3316	0.163582	35.4982	0.0827217	6.30066
14	0.257721	-0.0906372	0.158051	38.2036	0.149925	12.3816
15	0.308899	-0.0906372	0.187676	38.7968	0.155189	12.3816
16	0.313263	6.78268	0.188606	20.999	0.174461	15.3713
17	0.255798	-2.16019	0.249039	20.999	0.149849	13.2344
18	0.295517	28.0289	0.239182	3.97156	0.183159	23.9681
19	0.271744	44.5413	0.21257	3.97156	0.209198	41.5105
20	0.179184	33.7775	0.199264	21.5689	0.163002	23.2141
21	0.182915	33.7775	0.149574	-40.7167	0.115826	23.2141
22	0.15506	14.8933	0.139671	-63.696	0.0859108	5.34347
23	0.0872192	-103.942	0.0637131	-63.696	0.0544167	-99.1681
24	0.0532723	-103.942	0.0185394	-131.758	0.0483837	-99.1681
25	0.0243616	164.805	0.020812	69.1507	0.0405197	154.12
26	0.0259981	99.3343	0.00567603	69.1507	0.0353317	75.0531
27	0.00805902	64.612	0.013761	145.757	0.010314	10.9012
28	0.0102591	64.612	0.00395179	47.1959	0.0027889	83.0278
29	0.0188274	35.479	0.00441408	83.0827	0.00595903	25.0516
30	0.0164099	-6.23886	0.00500703	-50.2158	0.00220966	-31.6255
31	0.00687432	29.534	0.0025816	-50.2158	0.00970316	-34.9461
32	0.0108666	29.534	0.00313735	23.1262	0.00432086	-34.9461
33	0.00553989	0.432587	0.00494337	-105.252	0.00616241	123.265
34	0.00357378	65.2917	0.00233459	-105.252	0.0106597	82.4908

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าครณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 22 ในแกน y		แถวที่ 23 ในแกน y		แถวที่ 24 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00222051	75.737	0.00216412	136.759	0.00878286	64.5268
2	0.00929976	75.737	0.00256288	123.551	0.00972986	64.5268
3	0.010561	133.686	0.00347853	-99.3617	0.00175154	91.7111
4	0.00601053	38.3176	0.00272751	-99.3617	0.00602531	-170.214
5	0.0147257	129.959	0.00419807	14.7931	0.0030843	-170.214
6	0.0196476	129.959	0.00158179	-108.631	0.0144706	-4.39179
7	0.0236597	175.122	0.00857544	-12.8142	0.0242834	62.1291
8	0.00470805	175.882	0.0123982	-12.8142	0.0225182	158.012
9	0.0193853	175.882	0.0147386	46.9515	0.0116744	158.012
10	0.0411148	-117.028	0.0074408	-81.2947	0.0211134	121.593
11	0.0586166	-87.2768	0.0181704	-81.2947	0.0337219	164.998
12	0.0791321	-34.7456	0.0201607	-126.164	0.0147076	96.0397
13	0.0752525	-34.7456	0.0253334	-66.6293	0.0129137	96.0397
14	0.11158	-5.41763	0.0480595	-94.6815	0.0322723	-5.5069
15	0.14753	2.55157	0.0601978	-94.6815	0.0404816	-19.5364
16	0.16172	5.60989	0.0804291	-93.0061	0.0217228	-123.162
17	0.191185	5.60989	0.0818672	-85.3336	0.0391693	-123.162
18	0.158325	-2.16019	0.106399	-93.7079	0.025259	-174.619
19	0.118992	-2.16019	0.113686	-75.9952	0.0283012	158.908
20	0.134552	1.67954	0.0950775	-75.9952	0.0148182	134.902
21	0.0707283	-80.251	0.0388546	-94.4769	0.0217352	56.0509
22	0.0458622	-80.251	0.0352612	-77.5113	0.0125918	-17.4284
23	0.0344048	-48.7532	0.0342312	129.115	0.0296269	-92.4788
24	0.0209198	135.905	0.0239468	129.115	0.0169592	-158.527
25	0.0204973	66.2819	0.0207815	55.5208	0.0168047	-69.0601
26	0.0140328	66.2819	0.0137134	19.3634	0.0121164	-69.0601
27	0.00396514	49.3245	0.00962687	-118.468	0.0122619	31.2383
28	0.00364983	75.6972	0.0140943	-118.468	0.011107	144.778
29	0.00186449	101.269	0.0185337	148.578	0.00143355	25.4457
30	0.00509191	101.269	0.0171118	169.615	0.0068717	25.4457
31	0.00378263	33.3133	0.0065546	45.3447	0.00118446	138.369
32	0.00445962	-100.304	0.00931978	45.3447	0.00340593	-133.679
33	0.00258613	-27.8641	0.00995207	-13.9732	0.00297618	142.431
34	0.00201464	-27.8641	0.00441003	44.2529	0.000301272	142.431

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 25 ในแกน y		แถวที่ 26 ในแกน y		แถวที่ 27 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00651908	-45.9599	0.00529504	-37.4153	0.00542211	7.63
2	0.00315452	-81.8715	0.00882769	-37.4153	0.00182307	-42.0103
3	0.00741267	79.0892	0.0120535	8.11615	0.00740957	-42.0103
4	0.00789499	79.0892	0.0121512	56.1072	0.00410485	-1.17142
5	0.00351894	178.417	0.0137496	56.1072	0.00335908	-1.17142
6	0.00857353	3.23822	0.017539	120.199	0.0058949	150.878
7	0.00350738	3.23822	0.0207224	-163.382	0.0110054	-60.1378
8	0.00934887	-4.31213	0.0225115	-169.26	0.0170765	96.2457
9	0.00860834	53.7094	0.00620675	-169.26	0.0151701	148.878
10	0.009305	178.29	0.035656	-90.9448	0.0054853	-90.3296
11	0.0284967	178.29	0.0535202	-44.9588	0.0235176	-90.3296
12	0.0381546	-147.784	0.0423584	-10.5098	0.0358009	-52.3293
13	0.0343418	-91.2222	0.0057652	82.4867	0.0410366	85.7208
14	0.0188866	-102.053	0.0154638	136.079	0.00185621	-18.2194
15	0.0369892	-102.053	0.0241632	101.56	0.0244017	-18.2194
16	0.0392094	-80.4639	0.0326138	166.462	0.0404816	74.0176
17	0.0131373	-174.619	0.0416107	166.462	0.040966	144.417
18	0.0276518	-148.339	0.0105972	144.417	0.0720444	-17.986
19	0.0346317	156.628	0.0287275	-155.246	0.04076	-79.986
20	0.0537624	-175.906	0.0416889	169.482	0.0176229	-79.986
21	0.0394592	-175.906	0.0200281	119.193	0.0184231	38.5359
22	0.0342464	-154.703	0.0361843	119.193	0.0323162	22.6195
23	0.0184584	-139.059	0.0415897	60.9206	0.0271149	-108.713
24	0.0145011	-139.059	0.0280294	6.88156	0.013135	-108.713
25	0.00753498	-120.824	0.0098567	31.5033	0.00545454	144.873
26	0.0137205	131.333	0.00593209	31.5033	0.00672698	57.887
27	0.0235767	48.9358	0.00348353	-65.0624	0.0111423	23.6673
28	0.0249186	48.9358	0.0045352	57.8952	0.0118046	23.6673
29	0.0207644	-14.9551	0.00229025	4.00314	0.0117855	-0.501251
30	0.00595927	38.2571	0.00247371	4.00314	0.00961733	58.1245
31	0.0155988	-58.2248	0.000865549	-142.012	0.00597715	2.44995
32	0.0146852	-58.2248	0.00411487	-91.8951	0.0151472	2.44995
33	0.00192201	-139.642	0.0014016	-48.4154	0.0117574	-49.1089
34	0.00601435	30.7933	0.00424719	-48.4154	0.00300062	74.2195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 28 ในแกน y		แถวที่ 29 ในแกน y		แถวที่ 30 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.0105257	0.244446	0.000542074	-28.9943	0.0072453	68.1592
2	0.0162602	55.724	0.00268841	-28.9943	0.00114399	-51.8816
3	0.00636268	75.9389	0.005229	52.7495	0.0115027	26.3026
4	0.018342	116.238	0.00318682	-174.596	0.019434	-155.327
5	0.012804	116.238	0.00281644	-83.0717	0.00785255	-155.327
6	0.00737357	31.6489	0.00278592	-16.1884	0.0100112	22.2295
7	0.0170069	94.135	0.00981474	13.7	0.013824	157.115
8	0.0161724	-171.341	0.0093751	127.76	0.0129166	-52.9747
9	0.0166569	-71.5306	0.0170384	59.9112	0.0147848	41.7522
10	0.0177679	0.891266	0.0159826	59.9112	0.0256929	112.1
11	0.0445728	126.789	0.00948334	-57.6247	0.0360889	-149.805
12	0.0375748	126.789	0.0277853	20.5472	0.0192499	-149.805
13	0.0145154	-155.663	0.0333919	-105.612	0.0124531	-136.979
14	0.0157022	-111.676	0.0157347	50.4945	0.0209017	-179.768
15	0.012578	12.2539	0.0196381	50.4945	0.0403404	84.0138
16	0.0263195	12.2539	0.0407944	145.557	0.0487232	84.0138
17	0.0632324	-43.797	0.0293283	145.557	0.0607719	60.0732
18	0.0171614	-105.37	0.0676537	148.986	0.0116396	13.4555
19	0.0297794	-67.8488	0.0261335	-115.115	0.0312939	11.6908
20	0.0430374	135.699	0.0154023	-115.115	0.0294962	146.97
21	0.0043304	135.699	0.0086236	-164.025	0.0086174	146.97
22	0.0188093	-97.6891	0.0369911	98.7987	0.0128803	4.25034
23	0.0349712	162.751	0.0348511	98.7987	0.0246572	122.346
24	0.0241671	76.2767	0.0145221	69.5517	0.0175505	48.8809
25	0.00854588	-19.6642	0.0113287	40.6357	0.00289154	48.8809
26	0.00660276	107.397	0.00446725	64.8907	0.00636935	-3.1929
27	0.00246191	98.4691	0.00967693	64.8907	0.00368583	-164.894
28	0.00847578	7.0546	0.00794363	10.8806	0.00627208	51.8307
29	0.0046339	7.0546	0.0100913	86.5105	0.0078826	51.8307
30	0.00387037	166.587	0.023715	-59.8109	0.00588155	137.472
31	0.00475049	25.8398	0.00779533	-59.8109	0.00610757	169.739
32	0.00187826	32.282	0.0079608	92.6463	0.00511122	25.1463
33	0.00832129	32.282	0.0168571	34.9077	0.00823927	25.1463
34	0.00759649	-28.401	0.0111742	0.244446	0.00420499	50.9985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่สู่สาธารณะได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 31 ในแกน y		แถวที่ 32 ในแกน y		แถวที่ 33 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.00306928	-175.469	0.00387597	76.5157	0.00450659	61.3683
2	0.00233769	-175.469	0.00152683	-0.583649	0.00511169	53.1271
3	0.00704169	7.76459	0.0146041	156.695	0.00301933	53.1271
4	0.00378513	37.6076	0.00551677	156.695	0.00705624	-179.323
5	0.00621414	38.8834	0.0024966	95.9573	0.00750709	137.999
6	0.00168455	38.8834	0.0038687	131.627	0.010572	-116.763
7	0.00223839	52.4048	0.00682092	64.9402	0.00810432	-152.57
8	0.00716662	-13.7329	0.0171938	64.9402	0.00172907	-45.8267
9	0.0170631	119.285	0.0188608	118.47	0.00561047	103.035
10	0.0202522	119.285	0.0184307	133.421	0.00993586	103.035
11	0.00995493	-160.306	0.0268383	-147.475	0.01403	-112.58
12	0.0179224	179.556	0.0215874	-147.475	0.0118489	22.7293
13	0.0273704	179.556	0.0123873	-145.143	0.0279169	175.038
14	0.0194979	-126.759	0.00397515	117.102	0.0309191	-118.84
15	0.00744128	153.125	0.0170116	68.0891	0.0210619	-139.622
16	0.0176516	-136.704	0.0604439	68.0891	0.0324211	-65.9331
17	0.0106621	-136.704	0.063633	58.2825	0.0367699	-65.9331
18	0.061924	148.774	0.0105586	-2.34009	0.0412788	155.809
19	0.0378036	148.774	0.0228958	48.9592	0.0442066	155.809
20	0.00218022	126.937	0.00691772	133.377	0.0108223	128.225
21	0.0119648	-89.2598	0.0100017	133.377	0.0032624	-143.509
22	0.0405197	171.269	0.018775	-101.628	0.0183611	178.161
23	0.0367508	171.269	0.007128	85.1234	0.028594	178.161
24	0.0264101	133.949	0.00624895	85.1234	0.0256672	139.533
25	0.00843143	105.374	0.00824881	-71.4482	0.0188169	-41.884
26	0.0122938	59.5541	0.0119934	-25.1381	0.00762701	137.597
27	0.0148506	59.5541	0.0105963	-95.956	0.00600743	137.597
28	0.00144798	-52.9143	0.00613928	-95.956	0.0095892	71.1035
29	0.00772452	137.593	0.00219262	64.9086	0.0110536	142.464
30	0.015914	-22.4094	0.00341106	-171.491	0.0134349	21.4947
31	0.00939274	-22.4094	0.00246131	-161.963	0.015358	21.4947
32	0.0085063	-153.634	0.00386918	-161.963	0.013474	-65.3014
33	0.0126395	52.8085	0.00482345	63.2208	0.0143533	106.821
34	0.0102396	68.1592	0.00432277	61.9519	0.00568581	106.821

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า

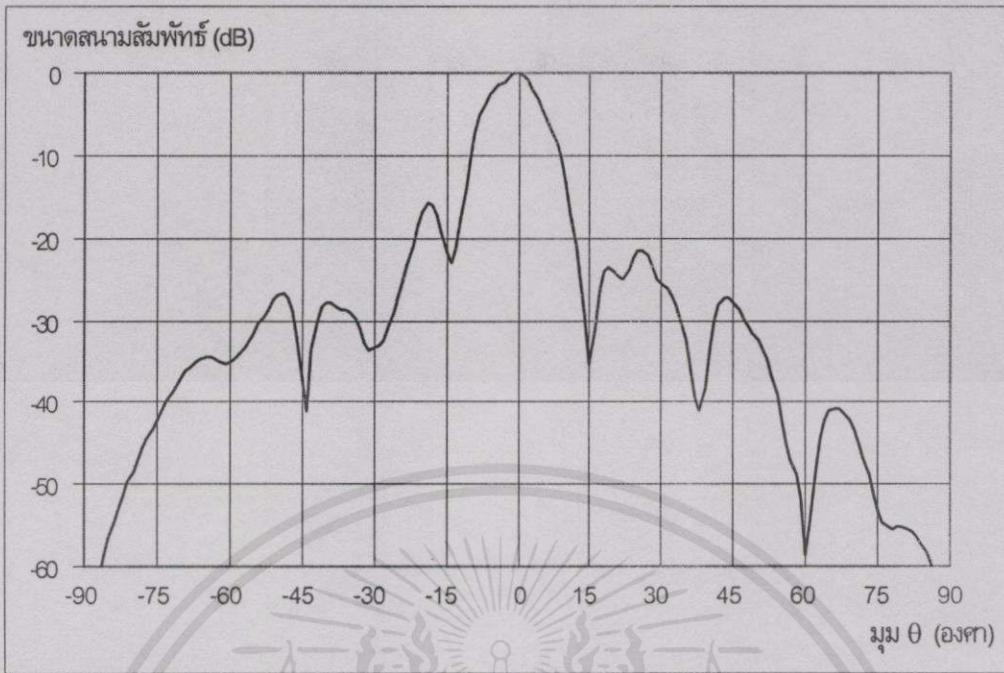
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

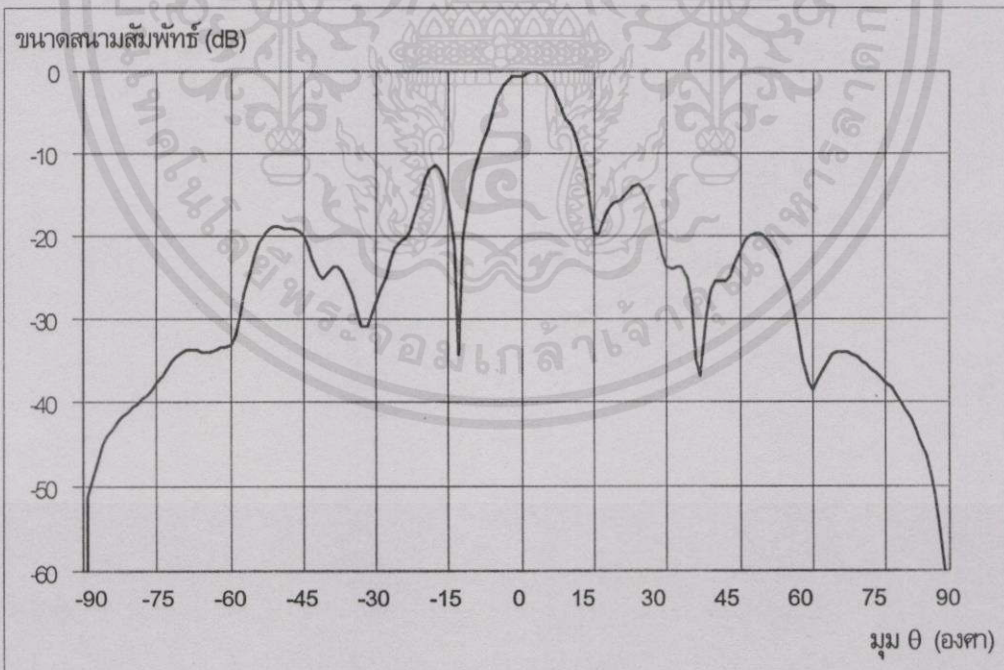
จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 34 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.0157385	90.0426
2	0.0134706	163.144
3	0.0106673	128.031
4	0.010571	128.031
5	0.0120826	-167.916
6	0.00893068	-53.6064
7	0.00891829	-33.073
8	0.00745487	-33.073
9	0.0149918	-8.39081
10	0.0215902	131.499
11	0.025382	131.499
12	0.0176201	169.358
13	0.00504327	153.375
14	0.0359077	81.0928
15	0.0674782	81.0928
16	0.0758896	59.2905
17	0.0562515	61.029
18	0.0368824	84.5631
19	0.0268097	38.4576
20	0.0265055	67.7266
21	0.0338135	67.7266
22	0.0309963	1.14532
23	0.0131054	36.8454
24	0.010787	-38.0374
25	0.00443339	-38.0374
26	0.00469875	118.011
27	0.00699043	23.6961
28	0.00697994	-112.961
29	0.00492811	-112.961
30	0.00468111	164.919
31	0.0085125	-112
32	0.00657558	-112
33	0.00299633	-40.074
34	0.00540686	-38.6732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

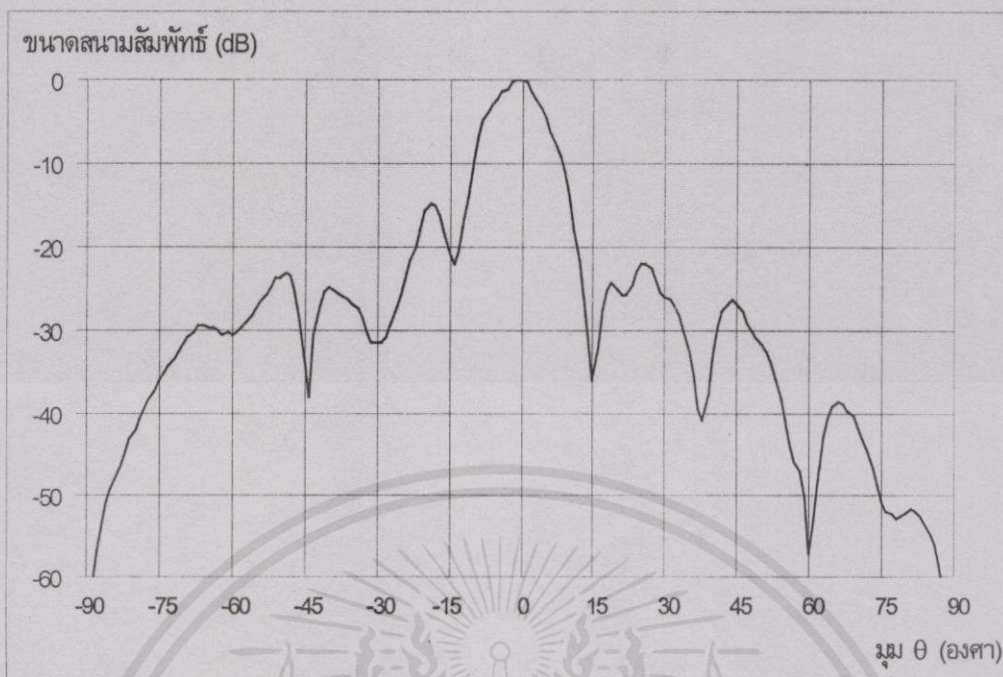
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



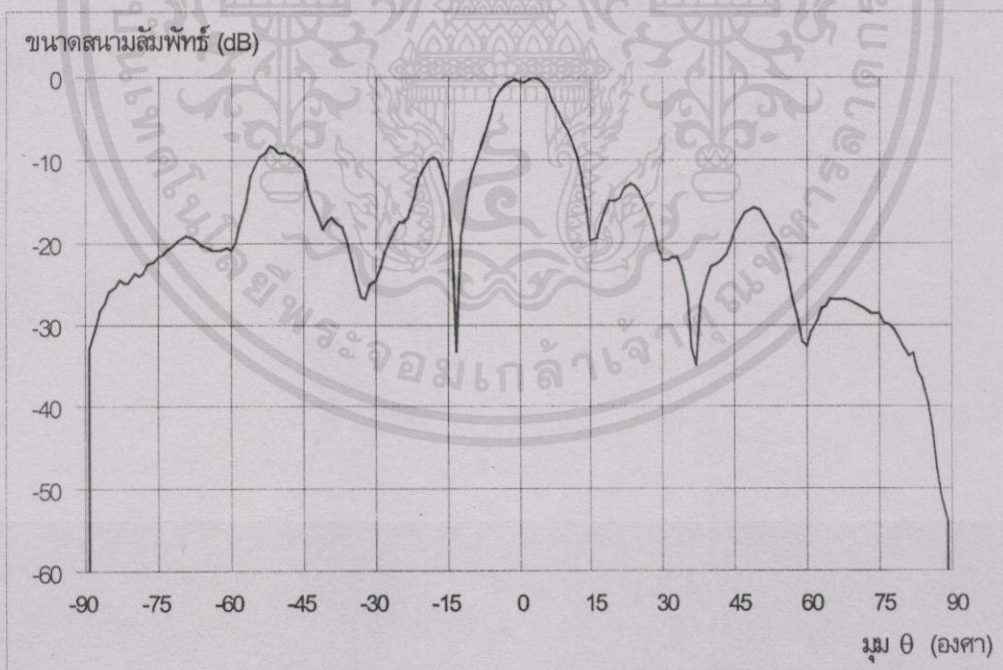
ภาพที่ 9.11ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกตัวแบบร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz



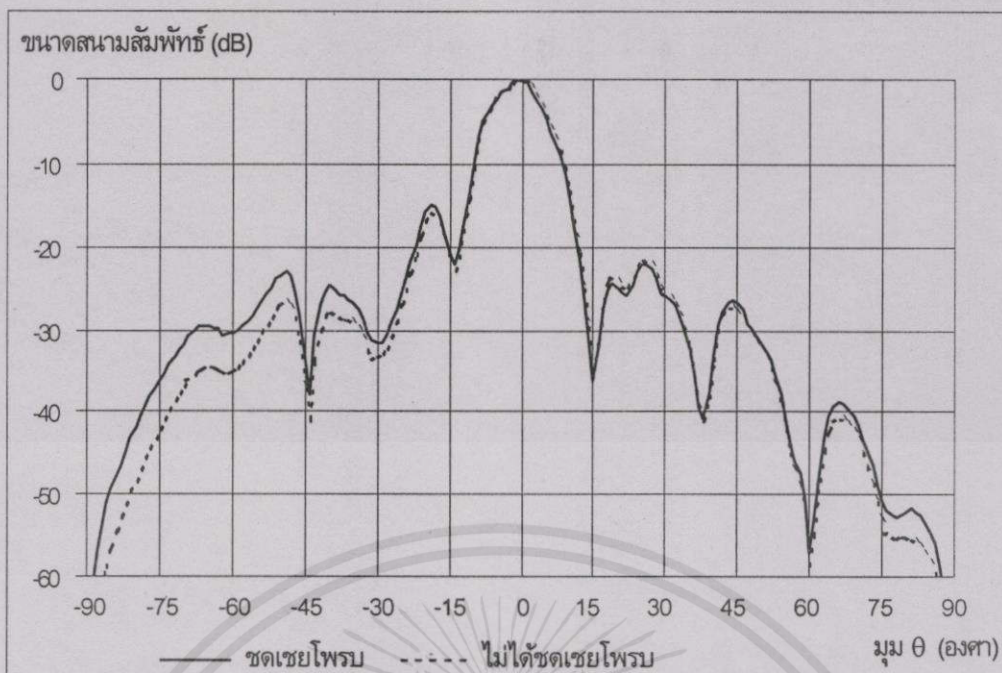
ภาพที่ 9.11ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกตัวแบบร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz



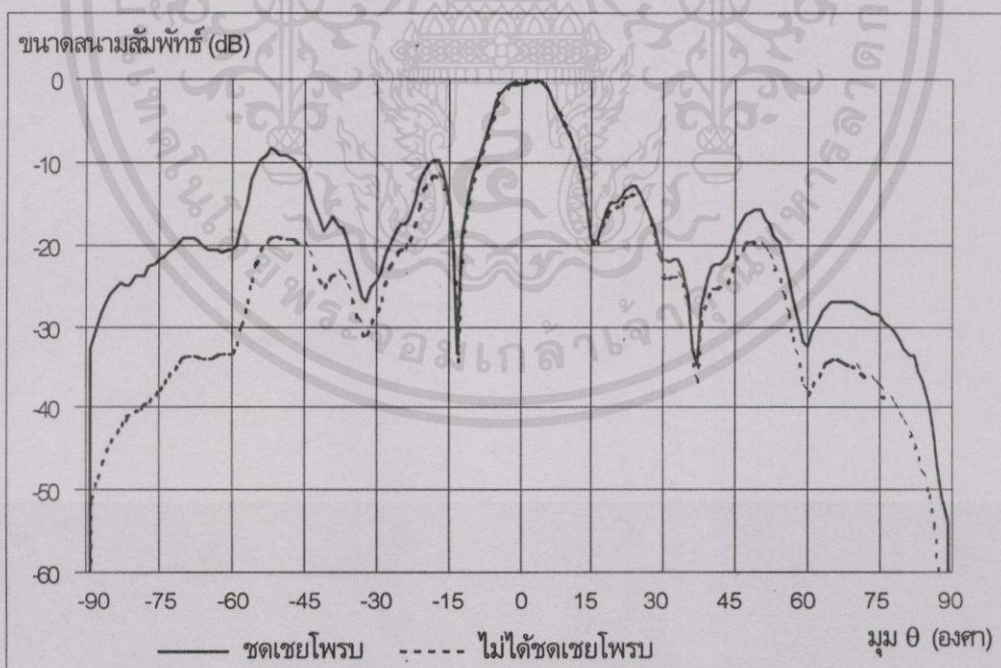
ภาพที่ 9.12ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกกำลังแบบร่อง ที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ xz



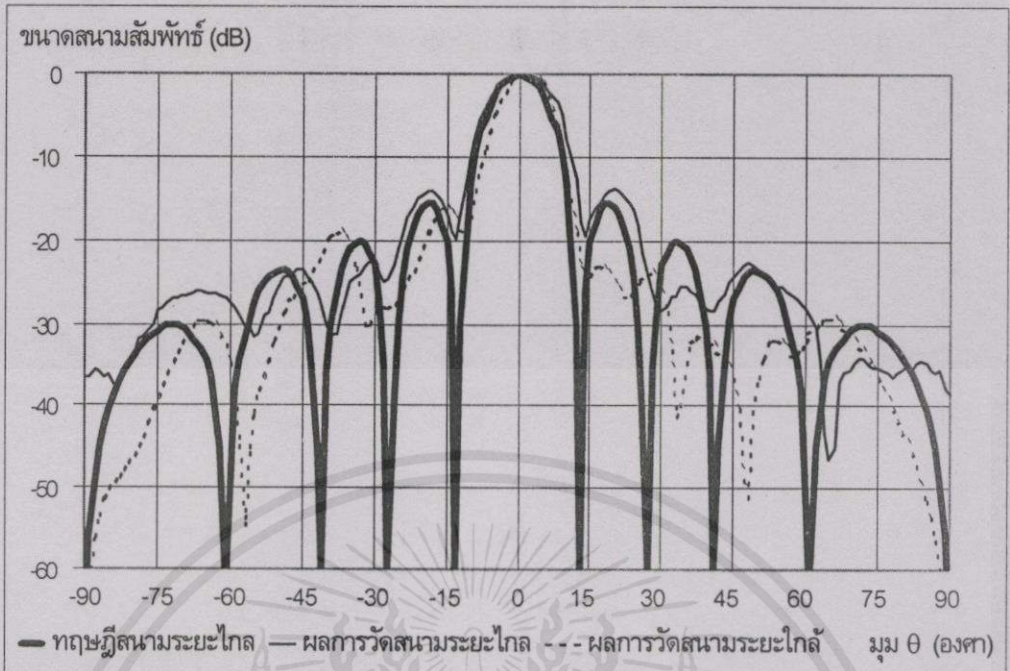
เอกสารภาพที่ 9.12ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกกำลังแบบร่อง ที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ yz



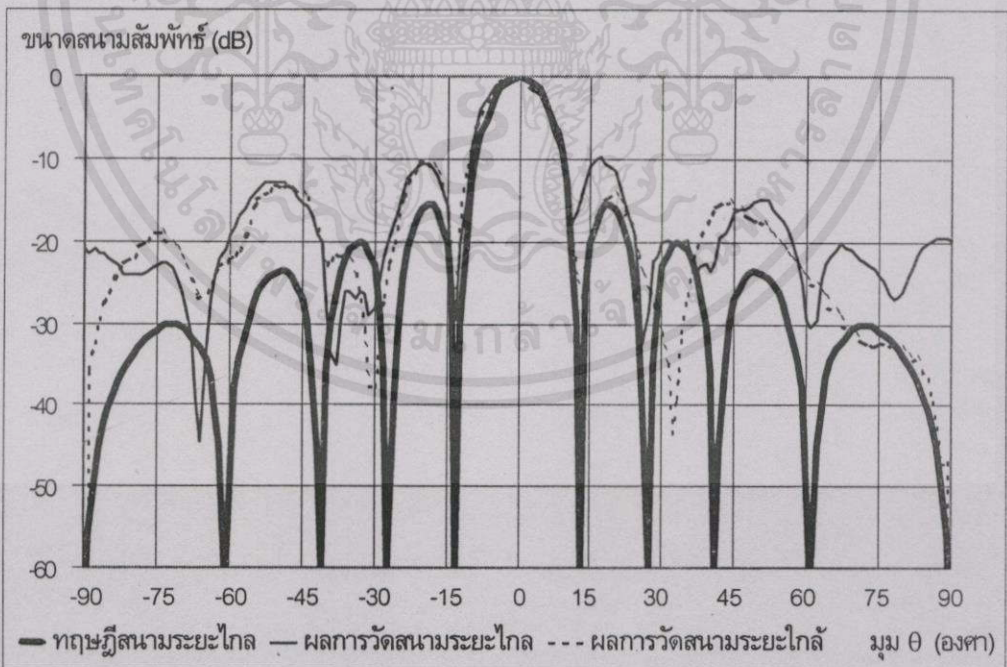
ภาพที่ 9.13ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบ ร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างกรณีที่ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz



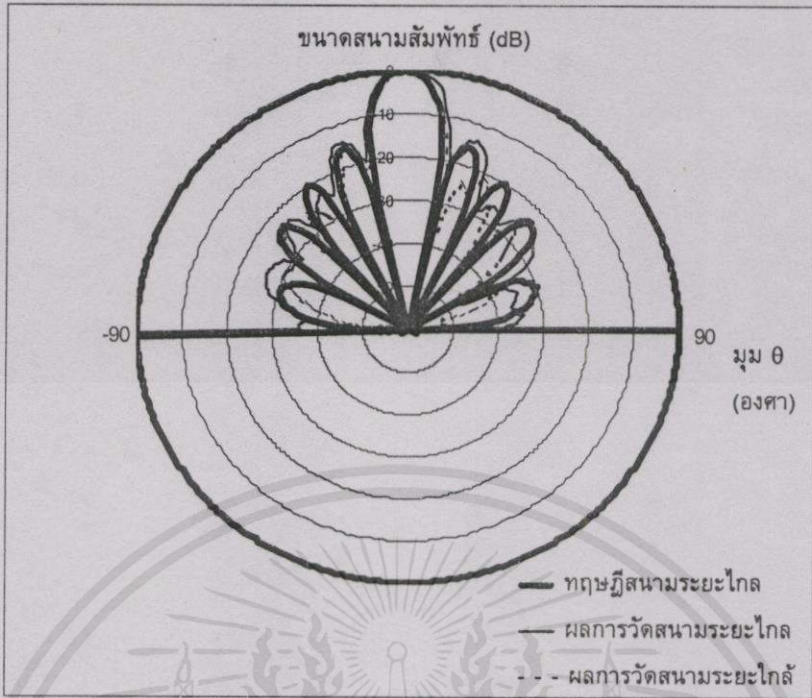
ภาพที่ 9.13ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบ ร่องที่วัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 3 \lambda$ ระหว่างกรณีที่ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz



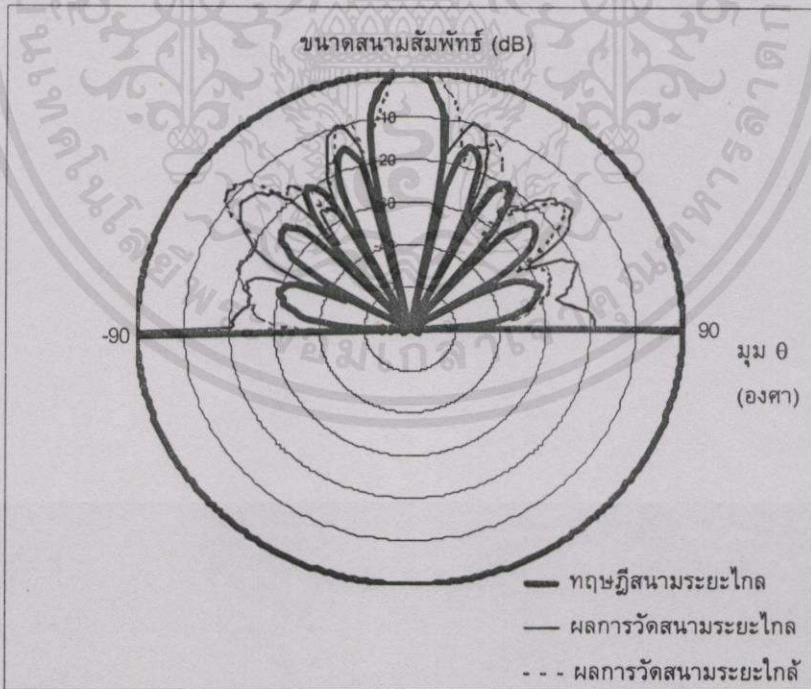
ภาพที่ 9.14ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกกำลังแบบ
ร่องที่ระยะ $z = 3\lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและ
การคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ xz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 9.14ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกกำลังแบบ
ไม่จำกัด โค้งทั้งเส้น ออกทุกมุม ให้คิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ร่องที่ระยะ $z = 3\lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและ
การคำนวณทางทฤษฎีในระนาบ yz



ภาพที่ 9.15ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ระยะ $z = 3\lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาไรในระนาบ xz



ภาพที่ 9.15ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องที่ระยะ $z = 3\lambda$ ระหว่างการวัดสนามระยะใกล้, การวัดสนามระยะไกลและการคำนวณทางทฤษฎีแบบโพลาไรในระนาบ yz

9.2.3 ผลการวัดของสายอากาศปากแตร

ในการวัดสายอากาศปากแตร ซึ่งเป็นสายอากาศที่ใช้ทดสอบ เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอีกชนิดหนึ่ง ด้วยวิธีการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดสนามระยะไกลโดยตรง ดังนั้นจึงแบ่งผลการวัดออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ และผลการวัดสนามระยะไกล

9.2.3.1 ผลการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

จากข้อกำหนดในการทำการทดลองวัดสายอากาศปากแตรได้ทำการวัดที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบกับระนาบอะเพอร์เจอร์ เป็นระยะ $z = 2\lambda$ ที่ความถี่ 12.5 GHz

ดังนั้นขนาดของการกวาดบนระนาบอะเพอร์เจอร์ x, y

$$\begin{aligned} L &= 6.2 + 2(2 * 2.4) \tan 60 \\ &= 22.816 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณหาจำนวนจุดของการกวาดในแนวแกน x และแนวแกน y ได้โดยนำค่าระยะห่างระหว่างจุดในการกวาด ($\lambda/2 = 1.2$ เซนติเมตร) ไปหารค่า L

จะได้ จำนวนจุดของการกวาดในแนวแกน x และแนวแกน y เท่ากับ 20 จุด

ดังนั้นจำนวนจุดของการกวาดทั้งหมดเท่ากับ 400 จุด

ผลของการวัดสนามระยะใกล้บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศจำนวน 400 จุด สามารถแสดงข้อมูลที่วัดได้ ดังตารางที่ 9.3

ในส่วนของการวัดสนามระยะใกล้ที่ยังไม่ได้มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.16ก และ 9.16ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วัดได้จากการวัดสนามระยะใกล้ ที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้ว แสดงได้ดังภาพที่ 9.17ก และ 9.17ข ตามลำดับ

และเมื่อนำผลการวัดทั้งสองมาเปรียบเทียบกันในกรณีที่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่ไม่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบ แสดงได้ดังภาพที่ 9.18ก และ 9.18ข ตามลำดับ

จากผลของการวัดที่ได้ในภาพที่ 9.17ก และ 9.17ข นี้ จึงได้ทำการทดสอบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ระยะ $z = 2\lambda$ เพิ่มขึ้นอีก 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการ

สนับสนุนผลการวัดที่ได้ทั้งหมดควรจะได้กราฟที่มีลักษณะเหมือนกัน หรือมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งการคำนวณค่า

ไม่ว่าการผลที่ได้จากการวัดทั้งหมดนี้ แสดงได้ ดังภาพที่ 9.19ก และ 9.19ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

ตารางที่ 9.3 แสดงข้อมูลสนามระยะใกล้ของสายอากาศปากแตรที่วัดได้ ที่ระยะ $z = 2 \lambda$

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 1 ในแกน y		แถวที่ 2 ในแกน y		แถวที่ 3 ในแกน y	
	ขนาด (โวลต์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลต์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลต์)	เฟส (องศา)
1	9.52E-05	-28.905	0.000212245	110.189	0.0002556	112.99
2	5.80E-05	-28.905	0.000272453	110.189	0.000201911	-51.2004
3	5.80E-05	15.0664	0.000484258	284.159	0.000201911	235.206
4	0.000387669	36.7177	0.000320837	28.5617	0.000189207	235.206
5	0.000300735	36.7177	0.000659585	85.7126	0.000537485	302.533
6	0.000438392	161.598	0.00060159	85.7126	0.000626355	61.4026
7	0.000438392	266.71	0.000343397	144.261	0.000777274	171.049
8	0.000567764	266.71	0.000130631	-39.8076	0.000760555	267.067
9	0.000567764	34.7731	0.000605673	303.445	0.000549585	-4.0567
10	0.000437006	34.7731	0.000544757	303.445	0.000525474	54.6982
11	9.41E-05	245.039	0.000544757	252.443	0.000491202	80.7784
12	0.000100642	146.157	0.000395879	252.443	0.000243627	126.438
13	0.000349209	146.157	0.00012134	136.366	0.000315845	107.173
14	0.000419453	177.429	7.49E-05	154.436	0.000541776	119.17
15	0.000419453	102.983	7.86E-05	43.9192	0.000482574	98.193
16	0.000178985	102.983	0.000101022	298.661	0.000355676	59.7299
17	0.000178985	8.1642	9.72E-05	267.766	0.000234455	10.8751
18	0.000120413	274.047	0.000254497	267.766	0.000309154	-19.4719
19	6.57E-05	189.786	0.00014399	152.643	0.000299573	19.9704
20	9.20E-05	189.786	9.20E-05	144.441	0.000337794	-38.1528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 4 ในแกน y		แถวที่ 5 ในแกน y		แถวที่ 6 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000244826	97.7865	0.000269979	97.7865	0.000188634	92.7727
2	0.00039202	90.78	0.000301048	140.416	0.000652879	188.219
3	0.000655651	291.653	0.000674605	49.0388	0.000851095	188.219
4	0.000756681	291.653	0.000766456	49.0388	0.00100928	104.414
5	0.000756681	-8.6105	0.000784457	111.32	0.00158769	149.977
6	0.000767469	-8.6105	0.0013004	288.475	0.00131291	149.977
7	0.000338271	232.272	0.000882059	102.037	3.16E-05	94.8203
8	0.000635535	232.272	0.000282556	102.037	0.0013777	111.732
9	0.000635535	267.892	0.000822484	178.128	0.00190067	121.435
10	0.000702381	265.927	0.00162834	-2.1149	0.00164485	121.435
11	0.00055021	209.695	0.00165772	27.2735	0.000992119	120.276
12	0.000172511	209.695	0.00138462	27.2735	0.000972271	60.2751
13	0.000172511	135.427	0.00109494	28.6702	0.000972271	267.575
14	0.000302419	44.1362	0.00107217	4.92599	0.000461966	267.575
15	0.000738412	-7.03541	0.000525862	-24.998	0.000461966	134.945
16	0.000786752	-7.03541	0.000126556	287.783	0.00037986	134.945
17	0.000256002	194.675	0.00031437	199.184	0.000348493	27.9808
18	7.48E-05	232.103	0.000269413	10.8586	0.000259101	116.805
19	0.000104509	211.775	0.000287548	298.853	0.000259101	53.5625
20	0.000337794	211.775	0.000409037	128.128	0.000259042	48.5747

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 7 ในแกน y		แถวที่ 8 ในแกน y		แถวที่ 9 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000440195	-31.8246	0.000653952	183.222	0.000653952	64.5213
2	0.000316933	-24.0793	0.000263587	29.8663	0.000932723	64.5213
3	0.000611842	63.9981	0.00094682	192.285	0.000578255	-52.7481
4	0.000885963	198.894	0.00199485	192.285	0.000779033	-52.7481
5	0.0019182	74.8924	0.00199485	226.831	0.00186866	34.5314
6	0.00207317	74.8924	0.000364795	156.849	0.00118703	160.377
7	0.000609577	148.114	0.00170296	213.687	0.00136507	275.665
8	0.00136983	224.205	0.00364089	239.418	0.00384712	217.912
9	0.00136983	137.391	0.00333881	239.418	0.0056746	217.912
10	0.0027318	137.391	0.00310361	256.288	0.00751472	250.663
11	0.00145614	183.498	0.00215816	-50.4025	0.0101204	-29.8032
12	0.000659704	208.412	0.0018875	291.208	0.00907707	14.0707
13	0.000845313	238.509	0.00163388	291.208	0.00648093	-13.726
14	0.000915915	193.545	0.00144738	108.401	0.00413513	-13.726
15	0.000604659	193.545	0.000898272	-13.8675	0.00223756	-36.2206
16	0.000563145	133.727	0.000327349	-13.8675	0.00178725	244.793
17	0.000563145	10.3766	0.000116013	214.676	0.00111675	147.162
18	0.000282347	155.792	0.000254393	292.018	0.000609905	35.9747
19	0.000279382	155.792	0.000210784	43.0815	0.000609905	-52.6176
20	0.000293955	35.8168	0.000293955	43.0815	0.000234723	-52.6176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 10 ในแกน y		แถวที่ 11 ในแกน y		แถวที่ 12 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000804007	301.549	0.000804007	97.093	0.00038667	75.086
2	0.000398502	93.5252	0.000459194	97.093	0.000490069	75.086
3	0.000991523	93.5252	0.000258774	-50.489	0.000490069	140.139
4	0.00126773	251.955	0.000785232	-50.489	0.000981629	274.421
5	0.00126773	224.044	0.00156051	79.644	0.000502944	-55.4741
6	0.0020901	238.3	0.000382215	187.041	0.00311279	-55.4741
7	0.00355351	238.3	0.00252938	268.077	0.00311279	13.5654
8	0.00940752	13.2083	0.00455832	268.077	0.0128975	60.0101
9	0.0137958	52.7302	0.0140786	269.337	0.0252886	60.0101
10	0.0211554	56.5466	0.0232811	0	0.0335484	62.2581
11	0.0235662	47.3456	0.0301771	51.7717	0.0335484	52.31
12	0.0167618	0.433998	0.0315418	63.81	0.0253325	-8.1079
13	0.00966024	295.779	0.0315418	59.4429	0.0114851	-54.4414
14	0.00419378	229.981	0.0154662	59.4429	0.00618243	-54.4414
15	0.00273943	119.177	0.0043242	23.8499	0.00288773	129.192
16	0.00138515	-36.5625	0.00291455	279.141	0.00179285	129.192
17	0.000430658	103.085	0.00291455	194.542	0.000944823	271.292
18	0.000371695	103.085	0.00110447	194.542	0.000483394	64.5529
19	0.000371695	24.2564	0.000227846	28.5466	0.000294849	51.7731
20	0.000319108	105.452	0.000372648	210.557	0.000372648	51.7731

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 13 ในแกน y		แถวที่ 14 ในแกน y		แถวที่ 15 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000359103	11.4862	0.00025107	154.663	0.000173002	110.023
2	0.000300184	11.4862	0.00062117	200.901	0.000421569	-21.5689
3	0.000300184	122.731	0.00018999	57.5038	0.000564218	147.994
4	0.000268504	122.731	0.000509977	193.696	0.000420973	184.478
5	0.000662088	-43.0142	0.000616431	295.203	0.000380441	184.478
6	0.000962079	136.695	0.000934273	-33.1375	0.00045228	-7.7646
7	0.00221395	256.087	0.00201953	9.6034	0.000886142	166.311
8	0.00356042	-49.5209	0.00567293	30.2344	0.00128961	285.559
9	0.00835466	19.5131	0.0080595	30.2344	0.00228345	-42.7094
10	0.0129738	19.5131	0.00952339	35.7825	0.00376916	-27.5523
11	0.0223312	32.5868	0.0097971	-32.4948	0.00518608	-11.4766
12	0.0222444	45.2197	0.00565338	-32.4948	0.0051229	-0.260902
13	0.0149488	13.119	0.00565338	267.05	0.00443101	-12.5848
14	0.0096488	13.119	0.00374508	152.203	0.00297821	-41.8263
15	0.00429559	-13.9348	0.00157303	9.4304	0.00147528	263.926
16	0.00238323	269.845	0.000484601	9.4304	0.000815243	198.511
17	0.00238323	186.301	0.000484601	251.492	0.00046134	123.349
18	0.000773102	186.301	0.000252783	127.316	0.00028564	34.2595
19	0.000414684	29.4282	0.000256404	52.7646	0.00028564	-27.047
20	0.000312805	198.625	0.000343978	85.1001	0.000372022	-27.047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

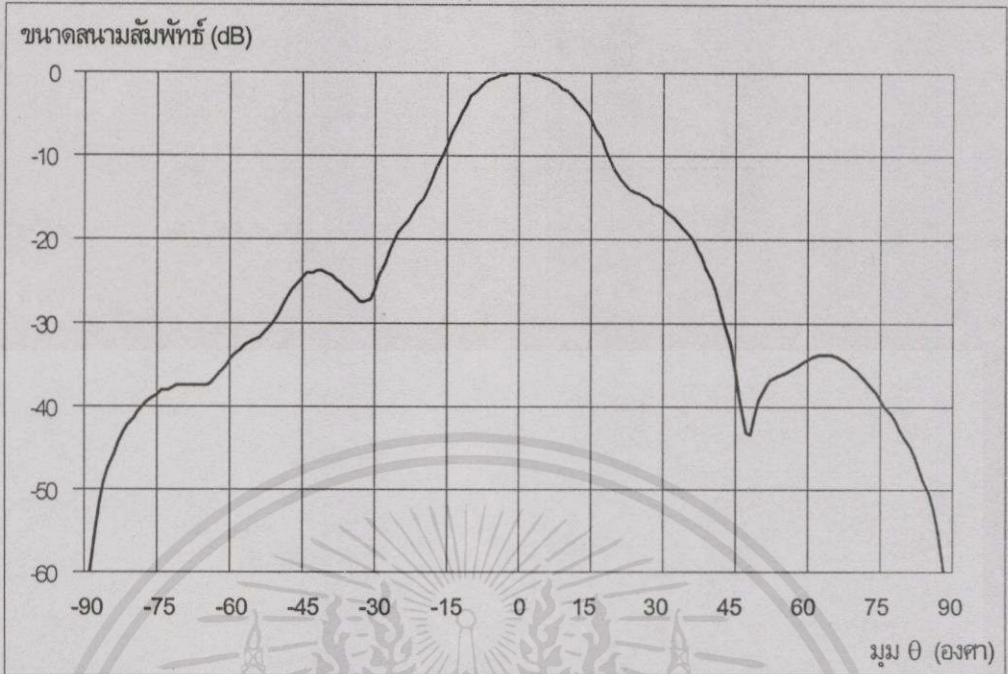
จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 16 ในแกน y		แถวที่ 17 ในแกน y		แถวที่ 18 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000218876	81.5776	0.000218876	134.455	0.000302836	112.957
2	0.000860542	193.417	0.000179112	134.455	0.000220008	35.0519
3	0.000228532	70.5157	0.000878304	85.3335	0.000823051	119.835
4	0.000491202	70.5157	0.000658154	44.4109	0.00086534	244.299
5	0.000491202	165.597	0.000658154	132.006	0.000955731	-50.0057
6	0.000243269	-47.3785	0.000782192	132.006	0.000582278	-50.0057
7	0.000893056	-5.831	0.000409484	-51.6234	0.000647813	181.909
8	0.000594526	-5.831	0.000641197	74.6054	0.00133508	239.418
9	0.00094831	-53.3414	0.000641197	240.252	0.000979185	266.646
10	0.00188935	-53.3414	0.00116992	240.252	0.000845879	266.646
11	0.0020014	298.676	0.00061667	-34.8225	0.00128669	224.426
12	0.00207579	234.669	0.000645578	-9.9468	0.00119686	183.293
13	0.0015443	177.616	0.000645578	-34.4009	0.00122708	131.499
14	0.000649333	145.298	0.000564039	-34.4009	0.000941157	131.499
15	0.000304222	166.182	0.000482321	176.067	0.000395402	290.649
16	0.000108741	166.182	0.000434399	176.067	0.000441849	174.339
17	0.000212461	72.1198	0.000434399	139.477	0.000569493	174.339
18	0.000321463	72.1198	0.000532001	139.477	0.000706613	120.799
19	0.000321463	142.034	0.000468954	146.426	0.000200726	266.001
20	0.000372022	142.034	0.000255227	75.8482	0.00024002	266.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

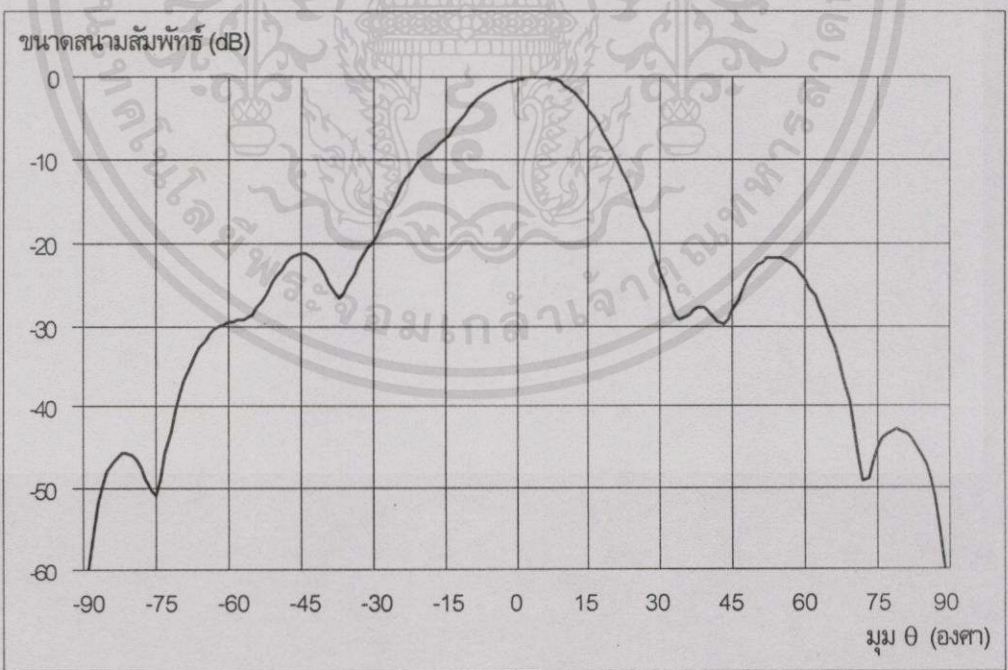
ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

จุดที่กวาด ในแกน x	แถวที่ 19 ในแกน y		แถวที่ 20 ในแกน y	
	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)	ขนาด (โวลท์)	เฟส (องศา)
1	0.000583708	112.957	0.000348806	53.5144
2	0.000140227	6.5726	0.000506073	153.708
3	0.000460476	88.65	0.000756621	278.436
4	0.000576377	238.733	0.000426337	11.2802
5	0.00110203	-32.7681	0.00103283	86.9581
6	0.00107503	142.497	0.00116616	167.298
7	0.00101572	142.497	0.00121003	250.871
8	0.00082308	192.523	0.000940681	287.691
9	0.000817478	-19.7438	0.00099349	-56.3942
10	0.000589848	87.6874	0.000751138	-43.2971
11	0.000760526	87.6874	0.000573844	-48.5074
12	0.00108373	136.777	0.000301629	291.898
13	0.000777215	133.694	0.00112361	246.618
14	0.00104368	118.707	0.00106204	246.618
15	0.000806123	60.6102	0.000878245	181.36
16	0.00060305	-21.7763	0.000460446	-3.0638
17	0.000455365	191.159	0.000176236	168.908
18	0.000413001	191.159	0.000409126	168.908
19	0.000413001	127.112	0.000409126	117.305
20	0.000307113	127.112	0.000346601	289.156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

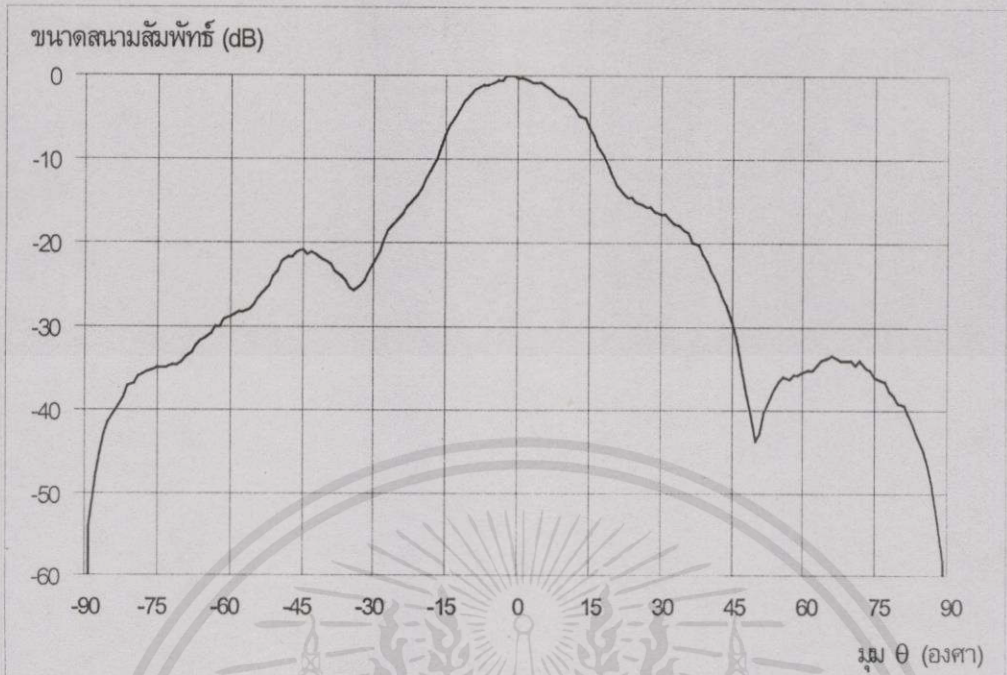


ภาพที่ 9.16 แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะไกลในระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz

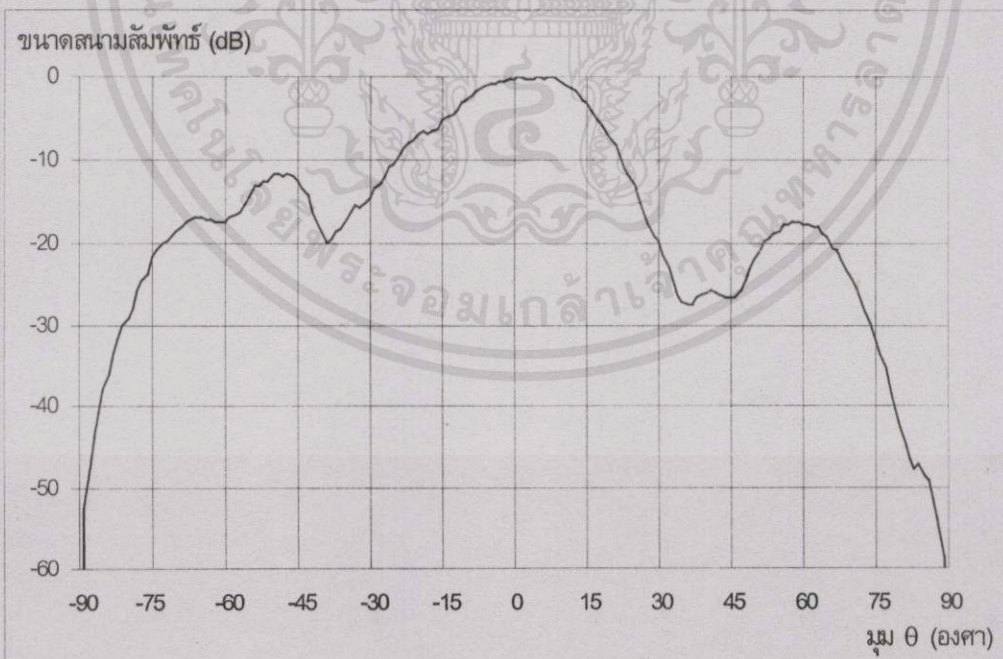


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาพที่ 9.16x แสดงกราฟรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะไกลในระนาบที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz



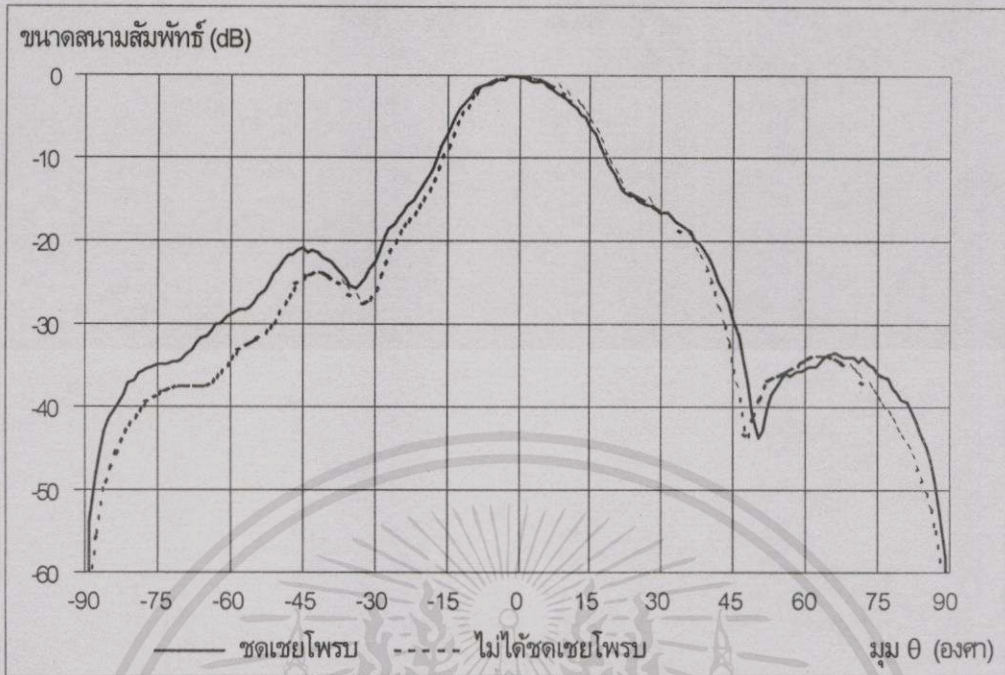
ภาพที่ 9.17ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ xz



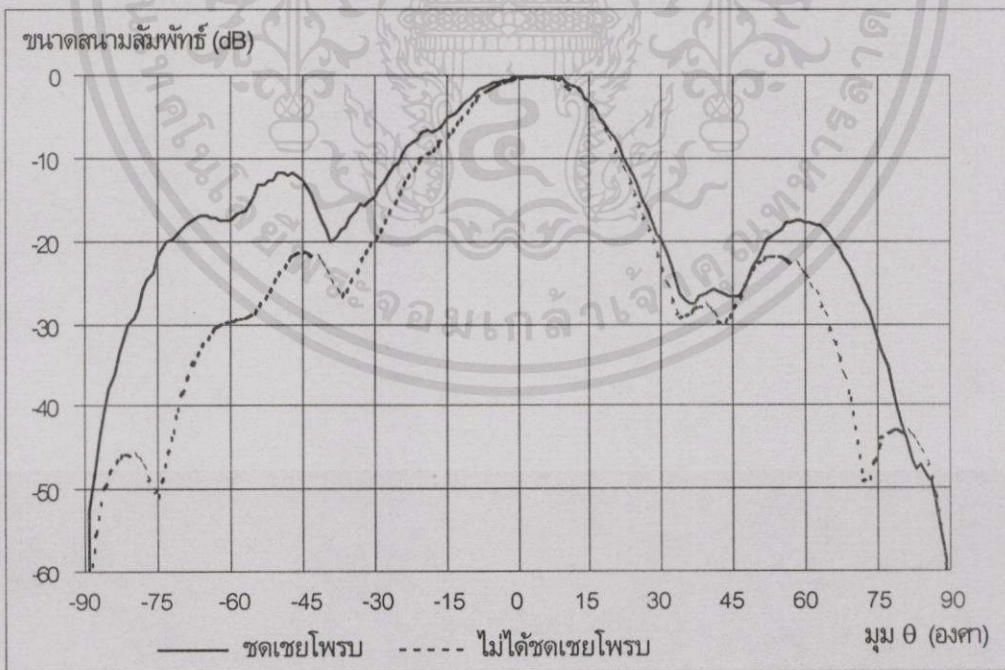
ภาพที่ 9.17ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้ทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแล้วในระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

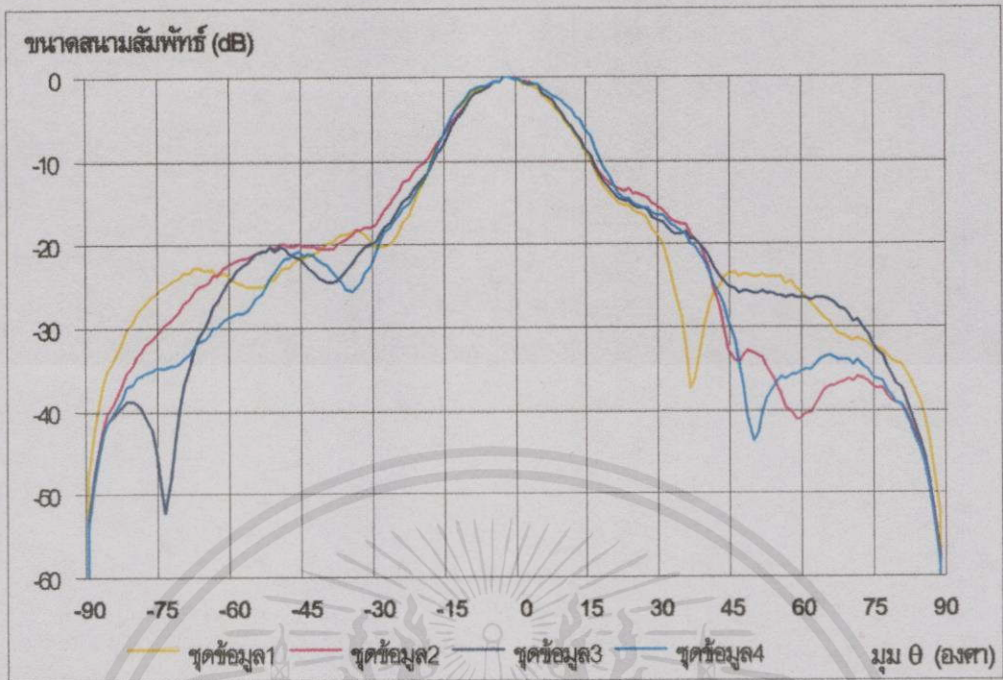


ภาพที่ 9.18 ก แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรในสนาม ระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำการชดเชยคุณสมบัติของ โพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชย คุณสมบัติของโพรบในระนาบ xz

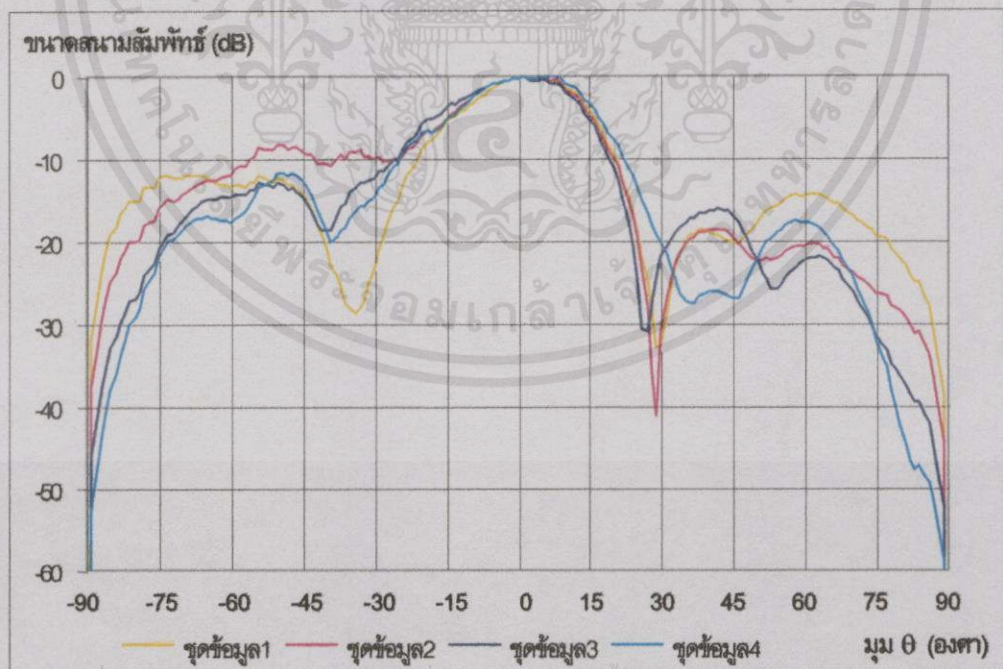


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า **ภาพที่ 9.18 ข** แสดงกราฟเปรียบเทียบ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรในสนาม ระยะใกล้ระหว่างกรณีที่ทำการชดเชยคุณสมบัติของ โพรบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชย คุณสมบัติของโพรบในระนาบ yz



ภาพที่ 9.19ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ xz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 9.19ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรจากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจำนวน 4 ครั้งในระนาบ yz

9.2.3.2 ผลการวัดสนามระยะไกล

ในการวัดสนามระยะไกล (Far Field : R) ของสายอากาศเพื่อหาระยะทดสอบที่เหมาะสม ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถหาได้จากสูตรตามสมการ (9.2) $R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}$

โดยที่ D คือ ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศเท่ากับ 6.2 เซนติเมตร

λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศที่ความถี่ 12.5 GHz เท่ากับ 2.4 เซนติเมตร

จะได้ว่า

$$R \geq 2 * \frac{(6.2)^2}{2.4}$$

$$R \geq 32.056 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้นระยะทดสอบของการวัดสนามระยะไกลของสายอากาศปากแตรที่ได้จากการคำนวณ จะสามารถทำการวัดได้ตั้งแต่ระยะประมาณ 35.056 เซนติเมตรขึ้นไป ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะทำการวัดสนามระยะไกลที่ระยะ 50 เซนติเมตร

ผลการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรที่ได้จากการวัดสนามระยะไกล สามารถแสดงได้ดังรูปกราฟ ภาพที่ 9.20ก และ 9.20ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และ ระนาบ yz ตามลำดับ

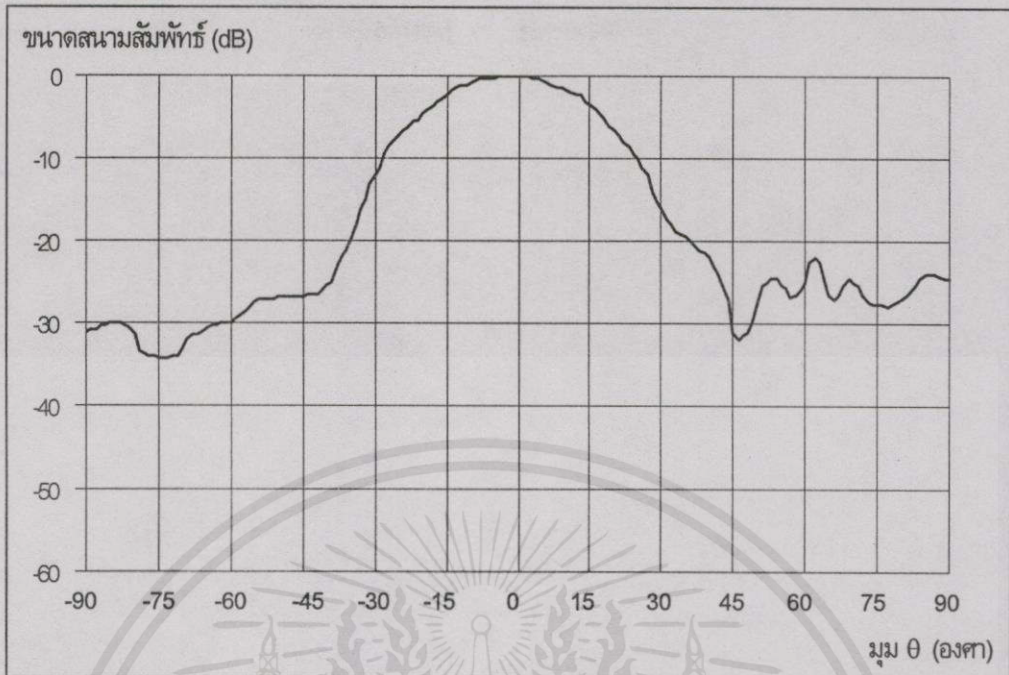
9.2.3.3 ผลการวัดสนามระยะไกลเปรียบเทียบกับผลการวัดสนามระยะไกล

จากผลการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรที่ได้จากการวัดสนามระยะไกล และสนามระยะไกลทั้ง 2 แบบนั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลการวัดดังกล่าวมีความใกล้เคียงหรือแตกต่างกันอย่างไร จึงนำผลการวัดที่ได้มาเปรียบเทียบในระนาบเดียวกัน โดยแสดงอยู่ในรูปของกราฟระนาบ xy และ กราฟโพลาร์ ดังนี้

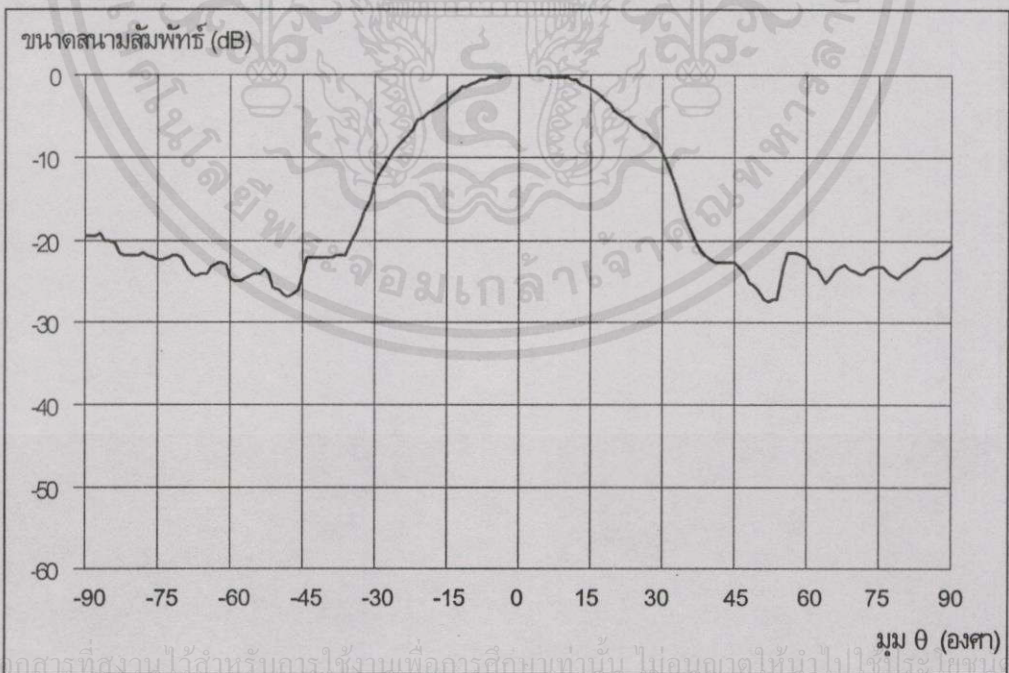
กราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างการวัดสนามระยะไกลกับการวัดสนามระยะไกลบนระนาบ xy แสดงดังภาพที่ 9.21ก และ 9.21ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

ส่วนกราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างการวัดสนามระยะไกลกับการวัดสนามระยะไกลแบบโพลาร์ แสดงดังภาพที่ 9.22ก และ 9.22ข โดยแสดงผลการวัดทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

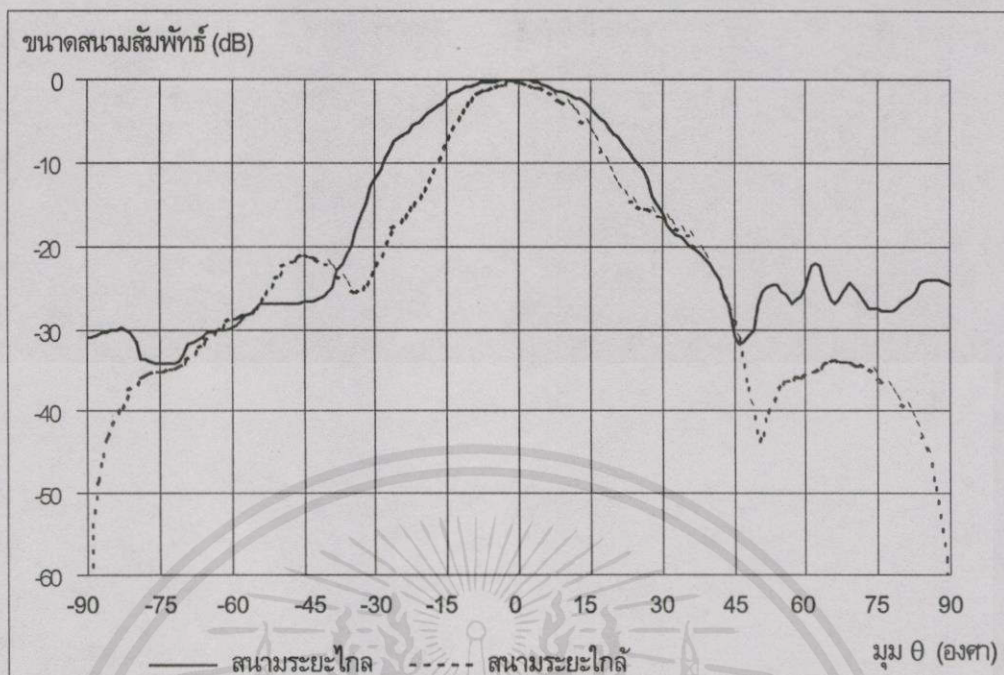
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



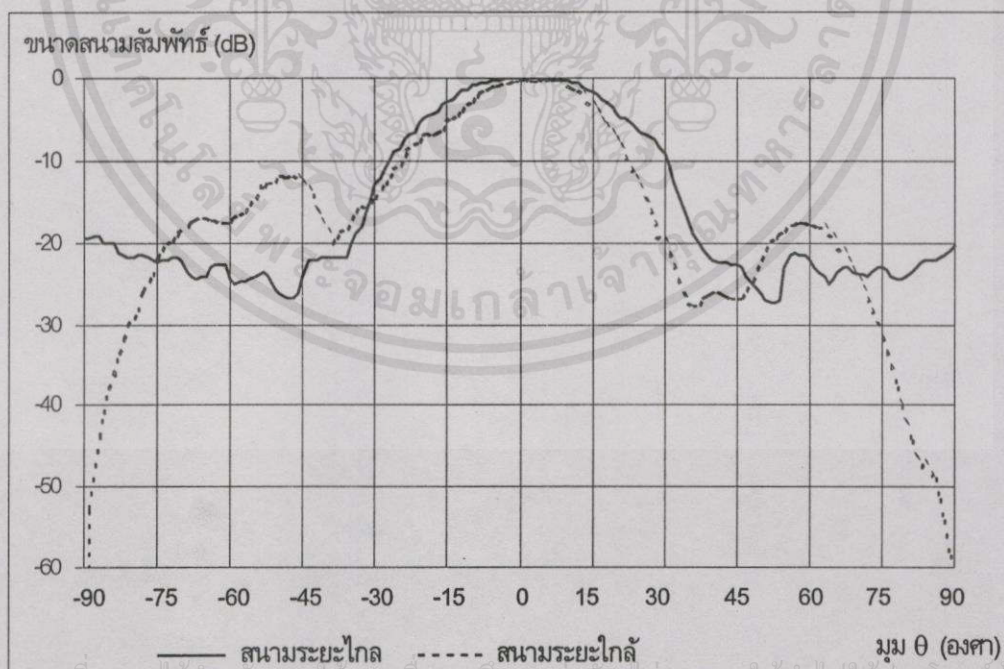
ภาพที่ 9.20ก แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนาม ระยะไกลในระนาบ xz



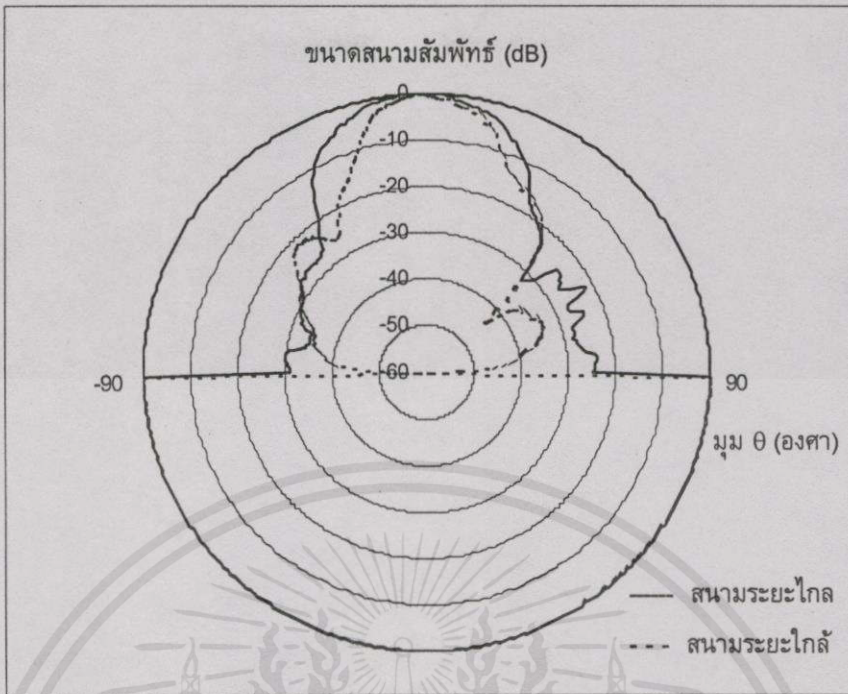
ภาพที่ 9.20ข แสดงกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร จากการวัดสนาม ระยะไกลในระนาบ yz



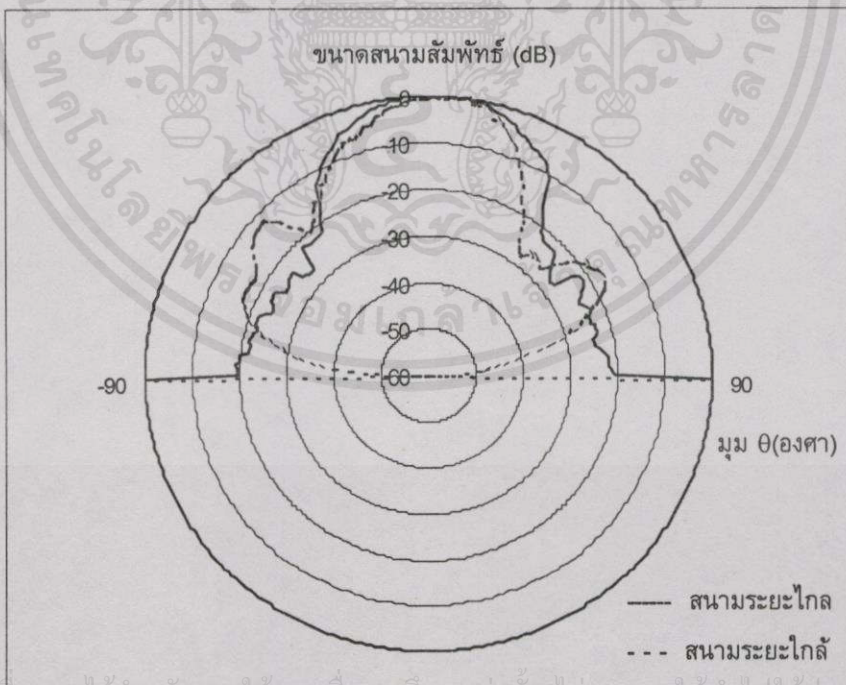
ภาพที่ 9.21ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างการวัดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลในระนาบ xz



ภาพที่ 9.21ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่างการวัดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลในระนาบ yz



ภาพที่ 9.22ก แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศปากแตรระหว่าง การวัดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลแบบโพลาร์ในระนาบ xz



ภาพที่ 9.22ข แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรระหว่าง การวัดสนามระยะใกล้กับการวัดสนามระยะไกลแบบโพลาร์ในระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแผ่นเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.3 สรุป

ในส่วนตอนต้นของบทนี้ได้แสดงให้เห็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของโพรบที่ใช้ในการวัดโดยได้จากการวัดสนามระยะไกล ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะนำไปทำการชดเชยคุณสมบัติของโพรบที่ใช้ในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบของสายอากาศทดสอบแต่ละชนิด

สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์นั้น สามารถทดสอบผลของโปรแกรมในเบื้องต้นได้ โดยใช้ข้อมูลขนาด และเฟสแบบยูนิฟอร์มที่มีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง ซึ่งผลของกราฟที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลของการคำนวณทางทฤษฎีของการวัดสนามระยะไกล

จากผลการทดลอง หารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ด้วยการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบของสายอากาศทดสอบทั้ง 2 ชนิด คือ สายอากาศแถวลำดับแบบร่องและสายอากาศปากแตร สามารถแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังกล่าว ได้ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสนามสัมพันธ์กับค่าของมุมต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์ ของข้อมูลที่ได้จากการวัดสนามระยะไกลในตำแหน่งต่างๆ (ซึ่งแสดงในรูปของตารางข้อมูล) บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบทั้งสองโดยแสดงอยู่ในรูปของกราฟบนระนาบ $x y$ อีกทั้งยังได้แสดงผลของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในกรณีที่ไม่ได้ชดเชยคุณสมบัติของโพรบกับกรณีที่มีการชดเชยคุณสมบัติของโพรบด้วย

จากกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบทั้งสองในสนามระยะใกล้นี้ ยังแสดงผลของการวัดหลาย ๆ ครั้ง เพื่อยืนยันผลการวัดที่ได้ ด้วยระบบการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบนี้ มีความแม่นยำ โดยพิจารณาจากผลการวัดที่ได้มีความใกล้เคียงกันทั้ง 4 ครั้งของการวัดสนามระยะใกล้

สำหรับผลการวัดสนามระยะไกลของสายอากาศทดสอบทั้งสองนี้ สามารถแสดงได้ดังกราฟบนระนาบ $x y$ เช่นกัน หลังจากได้ผลการวัด จากการวัดทั้งสองแบบแล้ว จึงนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกันพร้อมทั้งกราฟที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบแกนเดียวกันด้วย ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของกราฟทั้งบนระนาบ $x y$ และแบบโพลาร์

จากการเปรียบเทียบผลของการวัดดังกล่าว จะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันในบริเวณพหุคลื่นหลักของกราฟการแพร่กระจายคลื่นทั้งในการวัดสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล แต่ยังคงมีความแตกต่างเกิดขึ้นในบริเวณพหุข้างของกราฟการแพร่กระจายคลื่นในการวัดสนามทั้งสองแบบ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เกิดจากสัญญาณคลื่นรบกวนที่สะท้อนจากวัตถุรอบข้าง เช่น ปัญหาการสแกนเตอร์ริงจากอุปกรณ์ที่ติดกับโพรบ เนื่องจากในระบบการวัดสนามระยะไกลแบบระนาบของงานวิจัยนี้ไม่มีการใช้อุปกรณ์ดูดซับคลื่นร่วมในการทดสอบ จึงเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งมีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบที่ทำการวัด และในส่วนของ การชดเชยคุณสมบัติของโพรบนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเอารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ

สายอากาศโพรบจากสนามระยะไกลมาใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแทนข้อมูลจากสนามระยะใกล้ของโพรบ จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้แล้ว ในส่วนของผลการทดลองวัดตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ ที่ทำการแบ่งการวัดพื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศออกเป็น ส่วน ๆ นั้น สามารถแสดงผลการวัดได้เช่นกันโดย ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่องเป็นสายอากาศทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันแนวความคิดดังกล่าวสามารถนำมาปฏิบัติได้ และยังสามารถนำผลของการวัดที่ได้นี้ ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดสนามระยะไกลของอากาศแถวลำดับแบบร่องด้วย โดยแสดงอยู่ในรูปของกราฟลักษณะเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เพื่อหา รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ต้องการทดสอบ แทนการวัดจากสนามระยะไกลโดยตรง เนื่องจากระยะทางที่ใช้วัดในสนามระยะไกลจะขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศที่ต้องการวัด เมื่อสายอากาศทดสอบมีขนาดใหญ่ ระยะห่างของการวัดจะไกลมาก ซึ่งในทางปฏิบัติบางครั้งไม่สามารถทำการวัดได้ อีกทั้งยังมีปัญหาที่ไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อระบบได้ จึงได้มีความคิดที่จะทำการทดลองวัดในสนามระยะใกล้แทน ซึ่งสามารถทำการวัดได้ในบริเวณที่จำกัด เช่นในห้องทดลอง เป็นต้น

สำหรับการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนั้น ในเบื้องต้นต้องทราบถึงขอบเขตบริเวณสนามระยะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบให้เหมาะสม ในส่วนที่ต้องพิจารณาต่อไป คือ ปัจจัยหรือข้อกำหนดต่างๆ ในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เช่น รูปร่างอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ, ขนาดของการกวาด, คุณสมบัติของโพรบที่ใช้วัด, รูปแบบของการกวาด และระยะต่างๆ ที่ใช้ในการกวาดโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์แบบระนาบ ซึ่งหาได้จากสูตรการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบของวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย สายอากาศที่ต้องการวัด จะใช้สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ขนาด 6x6 ร่อง และสายอากาศปากแตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากฮอร์นยาว 6.2 เซนติเมตร เป็นสายอากาศทดสอบที่ต้องการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองชนิด, สายอากาศโพรบใช้สายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลาย ทำหน้าที่เป็นโพรบวัดข้อมูลสนามระยะใกล้บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ, เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรบ และประมวลผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมฟูรีเยร์, เครื่องกวาดโพรบ ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนสายอากาศโพรบไปตามตำแหน่งต่าง ๆ บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ และเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ทำหน้าที่ในการวัดขนาดและเฟสของสนามระยะใกล้ในแต่ละตำแหน่งที่เครื่องกวาดโพรบเคลื่อนที่ไป

ในส่วนของสมการที่ใช้ในการคำนวณหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนั้น เริ่มต้นพิจารณาจากสมการแมกซ์เวลล์ และสมการคลื่น ไปสู่รูปแบบสมการคลื่นสเปคตรัมแบบระนาบ ซึ่งสามารถนำเอาความสัมพันธ์ของสมการคลื่นสเปคตรัมแบบระนาบ ดังกล่าวนี้ออกมาเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการหาสนามระยะใกล้ต่อไป

10.1 ข้อจำกัดในการทดสอบ

ในระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ โดยใช้เครื่องกวาดโพรบ ทำหน้าที่ในการกวาดโพรบ ทั้งในแนวแกน x และแกน y ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในโครงการนี้ มีขนาดของการกวาดสูงสุดไม่เกิน 54×38 ตารางเซนติเมตรนั้น ถือเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทำให้พื้นที่อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ต้องการทดสอบ มีขนาดไม่เกิน 54×38 ตารางเซนติเมตรด้วยเช่นกัน แต่จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการแบ่งสนามบนอะเพอร์เจอร์ที่มีขนาดใหญ่ออกเป็นส่วน ๆ แล้วจึงทำการวัดข้อมูลของสนามระยะใกล้ในแต่ละส่วน หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดมารวมกัน เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต่อไป ตามแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทที่ 7

10.2 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จากการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ กับผลที่ได้จากการวัดสนามระยะไกลของสายอากาศทดสอบทั้ง 2 ชนิดนั้น จะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันในบริเวณพหุคลื่นหลักของกราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แต่มีความแตกต่างกันในบริเวณพหุข้างของกราฟการแพร่กระจายคลื่นในการวัดสนามทั้งสองแบบ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เกิดจากสัญญาณคลื่นรบกวนที่สะท้อนจากวัตถุรอบข้าง เช่นปัญหาการสแกนเตอร์รั้งจากอุปกรณ์ที่ติดกับโพรบ เนื่องจากในระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบของงานวิจัยนี้ไม่มีการใช้อุปกรณ์ดูดซับคลื่นร่วมในการทดสอบ ซึ่งในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่สมบูรณ์ ควรทำการทดสอบในห้องปิดที่มีอุปกรณ์ดูดซับคลื่น เพื่อป้องกันการสะท้อนคลื่นที่ไม่ต้องการ อันเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งมีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบที่ทำการวัด และในส่วนของ การชดเชยคุณสมบัติของโพรบนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเอารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบจากสนามระยะไกลมาใช้ในการชดเชยคุณสมบัติของโพรบแทนข้อมูลจากสนามระยะใกล้ของโพรบ จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

10.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากหัวข้อที่แล้ว ตามที่ได้กล่าวถึงข้อจำกัดในการทดสอบ และได้เสนอแนวทางการพัฒนาระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบไปแล้วนั้น ในอีกแนวทางหนึ่ง ที่อาจจะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงการขยายขนาดของโครงสร้างของเครื่องกวาดโพรบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ตามความเหมาะสมของสายอากาศที่ต้องการทดสอบ อีกทั้งควรทำการวัดภายในห้องปิดที่มีอุปกรณ์ดูดซับคลื่น เพื่อให้ผลการวัดที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ หรือแบบอื่น ๆ โดยนำหลักการที่ได้นำเสนอในที่นี้ไปประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Sons, 1982.
2. Richard C. Johnson, H. Allen Ecker and J. Searcy Hollis, "Determination of Far-Field Antenna Patterns from Near-Field Measurements", Proceedings of the IEEE, vol. 61, no. 12, pp. 1669-1693, Dec. 1973.
3. Arthur D. Yaghjian, "An Overview of Near-Field Antenna Measurements", IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol. AP-34, no. 1, pp. 30-44, Jan. 1986.
4. Johnson J. H. Wang, "An Examination of the Theory and Practices of Planar Near-Field Measurement," IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol. 36, no. 6, pp. 746-753, June 1988.
5. Gary E. Evans, Antenna Measurement Techniques, London : Artech House, Boston, 1990.
6. Dan Slater, Near-Field Antenna Measurements, London : Artech House, Boston, 1991.
7. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, วิศวกรรมสายอากาศ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
8. Robert E. Collin, Francis J. Zucker, Antenna Theory Part1, McGraw – Hill, 1969.
9. Erwin Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, Eighth Edition, John Wiley & Sons, 1999.
10. Robert E. Collin, Antennas and Radiowave Propagation, McGraw – Hill, 1985.
11. สุทธิพล สุทธิศิลป์, ศราชัย แสงนิยม และ โมไนย ไกรฤกษ์, "การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, ม. เทคโนโลยีมหา นคร, หน้า 328-333, พฤศจิกายน 2538.
12. วัฒนา พลพละ, "กราฟิกพล็อตเตอร์", เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 127, หน้า 2536, พฤษภาคม 2536.
13. Yoshiyuki Fujino and Cheuk-yu Edward Tong, "Analysis of an Open-Ended Waveguide as a Probe for Near Field Antenna Measurements by Using TLM Method", IEICE Trans. Commun., vol. E77-B, no. 8, pp. 1048-1055, Aug. 1994.
14. Glyn James, Advanced Modern Engineering Mathematics, Addison-Wesley, 1993.
15. Demetrius T. Paris, W. Marshall Leach, Jr. and Edward B. Joy, "Basic Theory of Probe-Compensated Near-Field Measurements", IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol. AP-26, no. 3, pp.373-379, May 1978.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

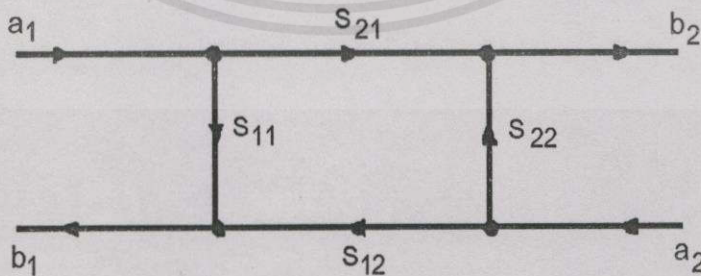
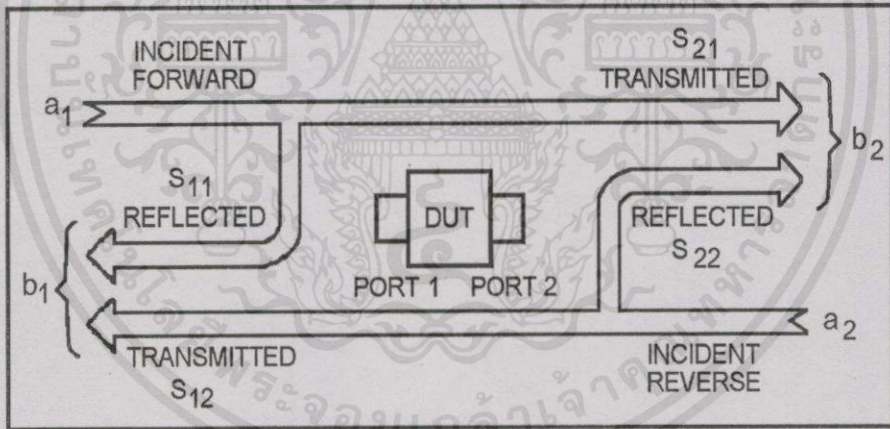
การใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

การใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายสำหรับการวัดแบบส่งผ่าน

S-พารามิเตอร์

S-พารามิเตอร์ เป็นข้อกำหนดที่ถูกใช้เป็นลักษณะเฉพาะตัวของอุปกรณ์เพื่ออธิบายการส่งสัญญาณ หรืออีกนัยหนึ่ง เป็นอัตราส่วนของปริมาณเชิงซ้อน 2 ตัว คือ แมกนิจูด (Magnitude) และ เฟส (Phase) ซึ่ง S-พารามิเตอร์ สามารถแสดงได้โดยใช้ตัวเลขประกอบ เช่น $S_{out\ in}$

ตัวเลขตัวแรก (out) หมายถึง ช่องสัญญาณที่สัญญาณออกมากจากอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ (Device Under Test : DUT) และตัวเลขตัวที่สอง (in) คือ ช่องสัญญาณที่สัญญาณเข้าสู่อุปกรณ์ ดังตัวอย่าง เช่น S-พารามิเตอร์เป็น S_{21} หมายถึงการวัดอัตราส่วนเชิงซ้อนของสัญญาณที่ออกมาจากช่องสัญญาณหมายเลข 2 ต่อสัญญาณทางช่องสัญญาณหมายเลข 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ลิขสิทธิ์ในสิ่งพิมพ์นี้ปรึมิให้อุปกรณ์ 2 ช่องสัญญาณ และแสดงภาพการส่งสัญญาณโดย "a"

หมายถึง สัญญาณทางด้านเข้า และ "b" หมายถึงสัญญาณทางด้านออก

สำหรับการวัดทางด้านฟอร์เวิร์ด (Forward:FWD) สัญญาณต้นกำเนิดจะออกมาทางช่อง สัญญาณหมายเลข 1 และสำหรับการวัดทางรีเวอร์ส (Reverse:REV) สัญญาณต้นกำเนิดจะออกมา ทางช่องสัญญาณหมายเลข 2 ดังตัวอย่างเช่น S_{21} จะมีค่าเท่ากับ $|S_{21}| \angle \theta_{21}$ โดย S_{21} จะมีค่าเท่ากับ $E_2 \angle \theta_2$ หากด้วย $E_1 \angle \theta_1$ โดยค่า S-พารามิเตอร์ต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 แสดง S-พารามิเตอร์ชนิดต่างๆ

Measurement	S-Parameter	Test Direction
Input reflection (port1)	S_{11}	FWD
Forward gain/loss (transmission)	S_{21}	FWD
Reverse gain/loss (transmission)	S_{12}	REV
Output reflection (port 2)	S_{22}	REV

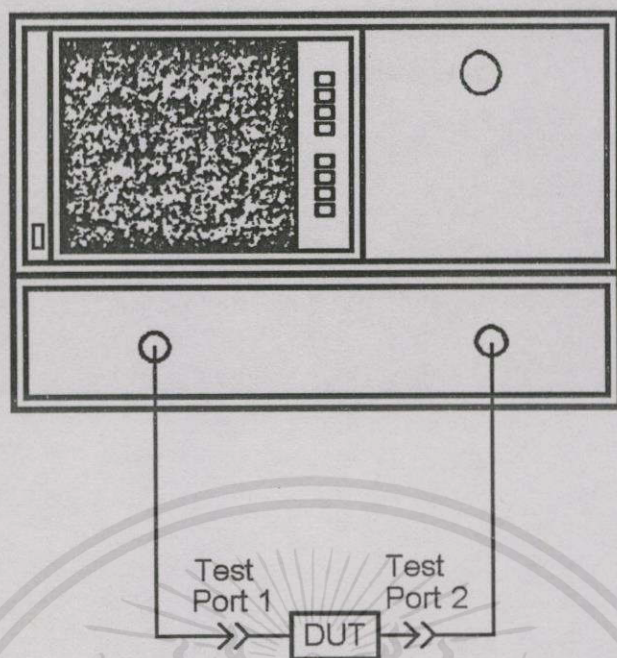
การวัดการส่งผ่านสัญญาณ (Transmission Measurements)

อัตราการสูญเสีย (Loss) และอัตราขยาย (Gain) เป็นอัตราส่วนล็อกการิทึมของแรงดันที่ ถูกส่งผ่านออกมากับแรงดันที่เข้าไป โดยผ่านอุปกรณ์ที่มี 2 ช่องสัญญาณ การวัดทั้งสองอย่าง จะทำ การกำหนดค่าเริ่มต้น (Setup) และปรับให้อยู่ตำแหน่งมาตรฐาน (Calibration) เหมือนๆ กัน โดย เลือกปุ่มกดดังนี้

Preset (factory) [USER PRESET]
 Setup
 Measurement : [MEAS] [Trans :FWD S_{21}]
 Format : [FORMAT] [REAL]
 Stimulus : [START] 11500 [M/ μ]
 [STOP] 12500 [M/ μ]

การเชื่อมต่อและการวัด

ในการปรับค่าเริ่มต้นต่างๆ ให้อยู่ในตำแหน่งมาตรฐาน ทำโดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่จะทดสอบ เข้าด้วยกัน แสดงดังภาพที่ ก.2 โดยเริ่มจากการกดปุ่ม [MEAS] หรือ [MEASURE RESTART] เพื่อปรับปรุงข้อมูลของ S-พารามิเตอร์ ทั้งทางด้านไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) หลังจากนั้นทำการปรับสเกลจอแสดงผลของการวัดแล้ว จึงเลือกตัวชี้ตำแหน่ง (Marker) ที่ตำแหน่ง ค่าตรงกลางของจอแสดงผล เพื่อวัดอัตราสูญเสีย (Loss) และค่าของตัวชี้ตำแหน่งจะแสดงที่มุมขวา บนของจอภาพ ซึ่งสามารถเลือกตัวชี้ตำแหน่งไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้



ภาพที่ ก.2 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบเข้าด้วยกัน

การวัดการตอบสนองของเฟส

ในการวัดการตอบสนองของเฟส ก่อนอื่นต้องทำการปรับตำแหน่งมาตรฐานอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงวิธีการ ได้ดังนี้

Recall Call	[RECALL] [RECALL REG1]
Adjust Setup	
Measurement	[CH]
	[MAS] [Trans : FWD S_{21}]
Format	[FORMAT] [PHASE]
Stimulus	[CAL] [FRQ SUBSET ON off]
	[START] 11500 [M/μ]
	[STOP] 12500 [M/μ]
Save	[SAVE] [SAVE REG2]

การปรับปรุงข้อมูล S-พารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การปรับปรุงทำโดยการกดปุ่ม ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏบนหน้าจอ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[MEAS]
[SCALE REF] [AUTO SCALE]

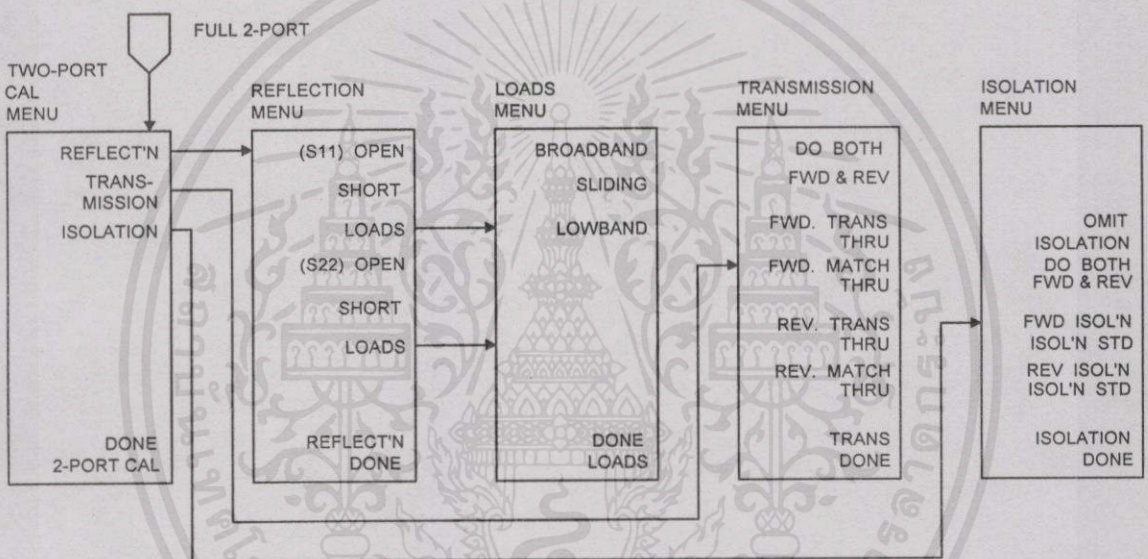
การเก็บค่าและการแสดงผลลัพธ์ : การพิมพ์

ทำการติดตั้งเครื่องพิมพ์ให้พร้อมใช้งาน เลือกปุ่ม [COPY] ตามด้วย {PRINT} เครื่องพิมพ์จะพิมพ์ข้อมูลทุกชนิดที่แสดงผลอยู่บนจอขยเว้น Softkey Menu

การแสดงผลแบบ 2 ช่อง

การแสดงผลแบบ 2 ช่องบนจอในเวลาเดียวกันกด [DISPLAY] แล้วเลือก [DUAL CHAN ON off] ก็จะได้ภาพแบบ 2 ช่องสัญญาณ

การปรับตำแหน่งมาตรฐานสำหรับการสะท้อนกลับและส่งผ่านทั้ง 2 ช่องสัญญาณ



ภาพที่ ก.3 แสดงขั้นตอนการปรับตำแหน่งมาตรฐานของการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

การปรับตำแหน่งมาตรฐาน (Calibration) แสดงดังภาพที่ ก.3 เป็นขั้นตอนการปรับตำแหน่งของการวัดแบบ 2 ช่องสัญญาณ มีขั้นตอนการปฏิบัติ ดังต่อไปนี้

1. ใช้ MEASURE RESTART ใน S-พารามิเตอร์ เมนู

2. เลือกชนิดของการปรับตำแหน่งมาตรฐานกดปุ่ม CALIBRATE MENU ตามด้วย FULL2-PORT ตามด้วย REFLECTION จากนั้นต่อ Open Circuit เข้ากับช่องสัญญาณ 1 กด (S11) OPEN ซึ่งหมายถึงข้อมูลของการเปิดวงจรจะถูกวัด

3. ถอด Open Circuit ออก แล้วต่อ Short Circuit เข้าแทนที่ แล้วทำการกด (S11) SHORT การวัดข้อมูลของ Short Circuit จะถูกวัดลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ถอด Short Circuit ออก แล้วต่อ Impedance-Match Load แล้วทำการกด (S11) LOAD ทำการเลือก BROADBAND

5. กดปุ่ม DONE LOADS หลังจากนั้น ทำการวัดแบบ Open Short-Load ตามที่กล่าวมาข้างต้น แต่ให้เปลี่ยนอุปกรณ์ไปเชื่อมต่อกับช่องสัญญาณ 2 และใช้ปุ่ม (S22) Softkey เมื่อทำเสร็จแล้ว ให้กด REFLECTION DONE

6. กดปุ่ม TRANSMISSION แล้วทำการเชื่อมต่อช่องสัญญาณ 1 กับช่องสัญญาณ 2 โดยใช้ อุปกรณ์ที่จะทดสอบอยู่ระหว่างช่องสัญญาณ 1 และช่องสัญญาณ 2 จากนั้นกดปุ่ม DO BOTH FWD & REV ตามด้วย TRANS : DONE ต่อจากนั้นลดการเชื่อมต่อออก เมื่อต้องการความถูกต้องของการแยกจากกัน (Isolation) กด AVG ตามด้วย AVERAGING ON แล้วจึงกด CAL ตามด้วย RESUME, CAL SEQUENCE, ISOLATION

7. ทำการต่อ Impedance-Math Loads เข้ากับช่องสัญญาณ 1 และ 2 แล้วกด DO BOTH FWD & REV เพื่อทำการวัดโดยแยกกันทั้งทาง Forward และทาง Reverse จากนั้นกดปุ่ม ISOLATION DONE กดปุ่ม AVG ตามด้วย AVERAGING OFF

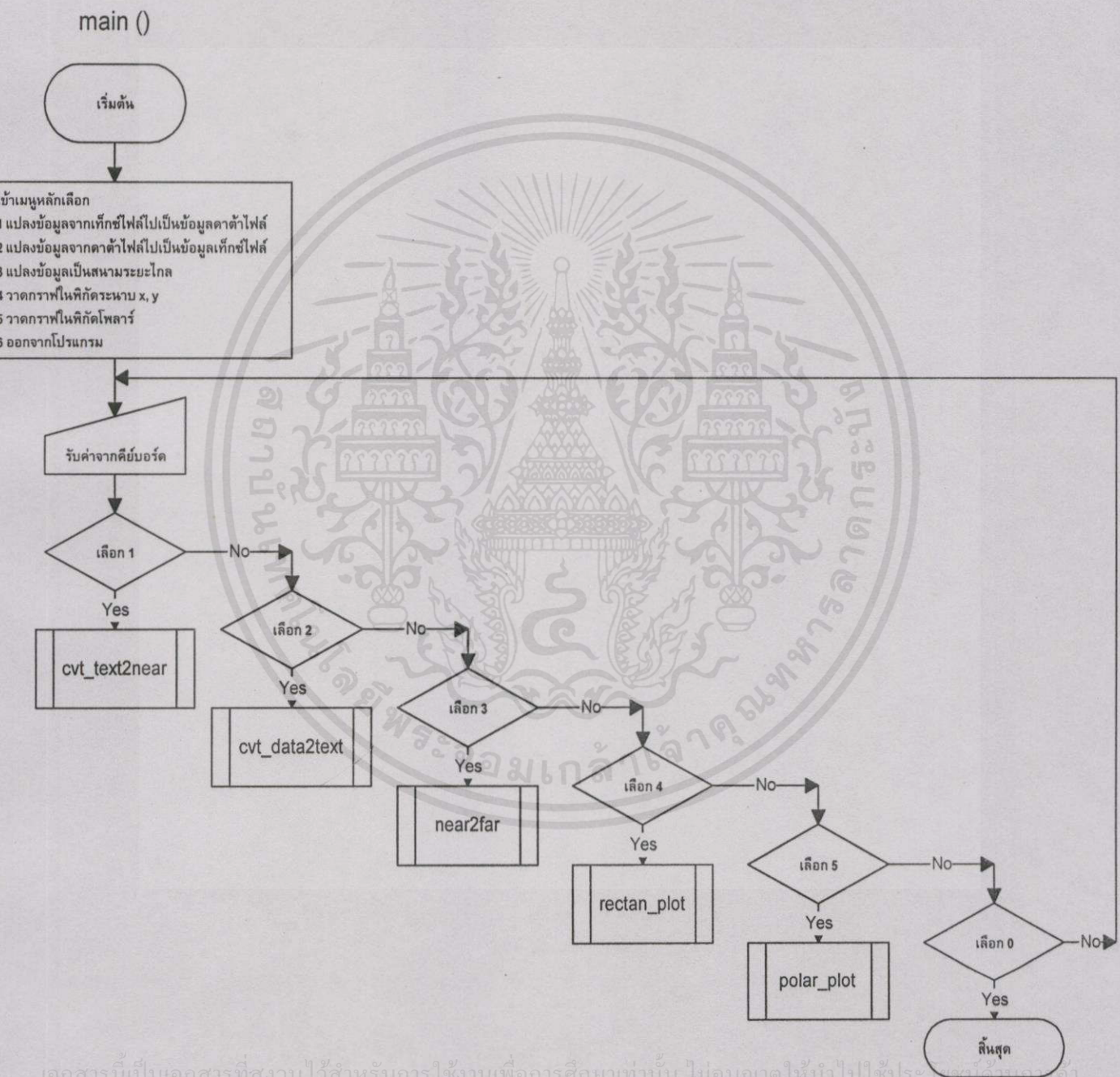
8. กดปุ่ม CAL ตามด้วย RESUME, CAL SEQUENCE กดปุ่ม DONE 2-PORT CAL (ถ้ากด DONE โดยไม่มีการวัดตามมาตรฐานที่ครบถ้วนตามต้องการ จอภาพจะแสดงข้อความ "CAUTION : ADDITIONAL STANDARDS NEED") ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตำแหน่งมาตรฐานจะถูกคำนวณและเก็บเอาไว้ และจอภาพจะแสดง "C2" ที่มุมซ้ายของจอแสดงว่า Error Correction ของ Two-Port แสดงค่า ON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

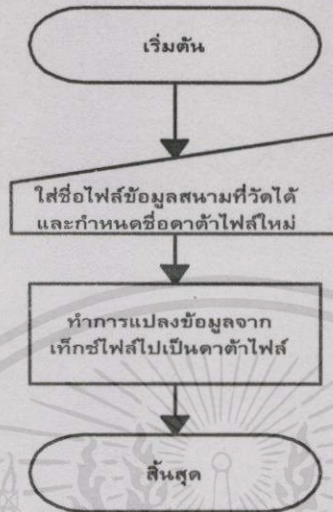
ผังภูมิและโปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์

ผังภูมิของโปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์

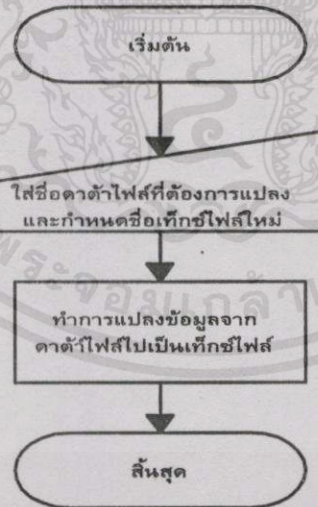


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cvt_text2near ()

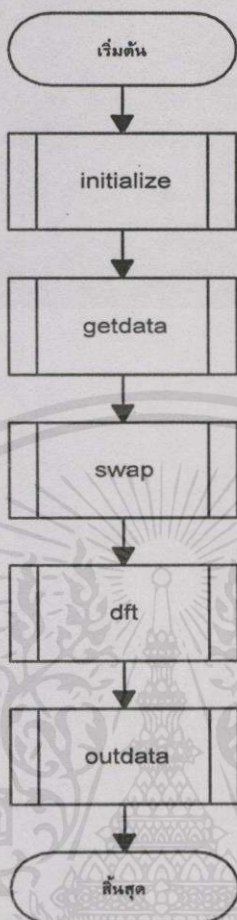


cvt_data2text ()

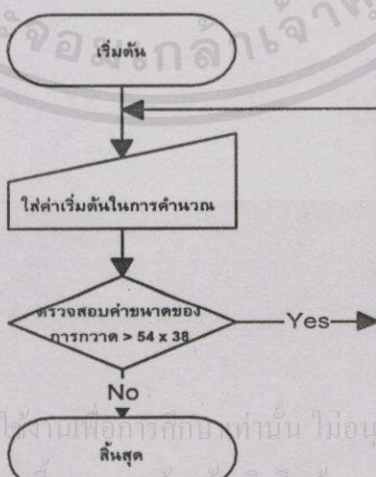


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

near2far ()

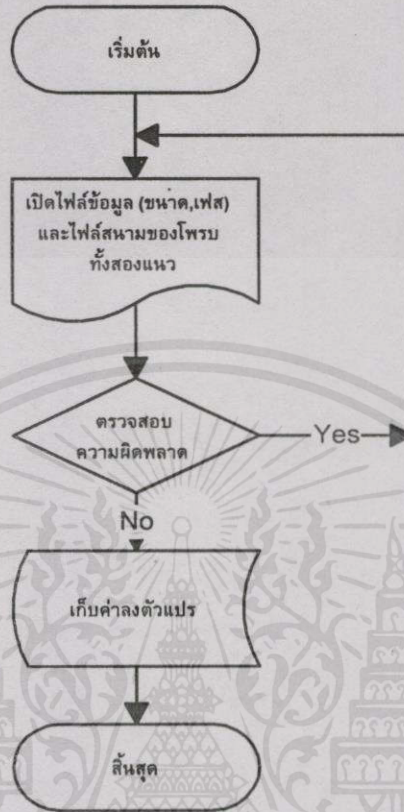


initialize ()

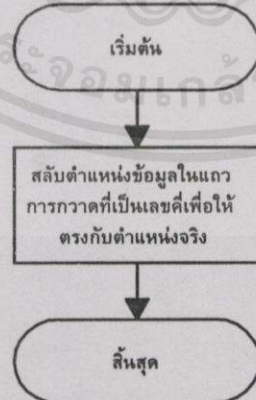


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

getdata ()

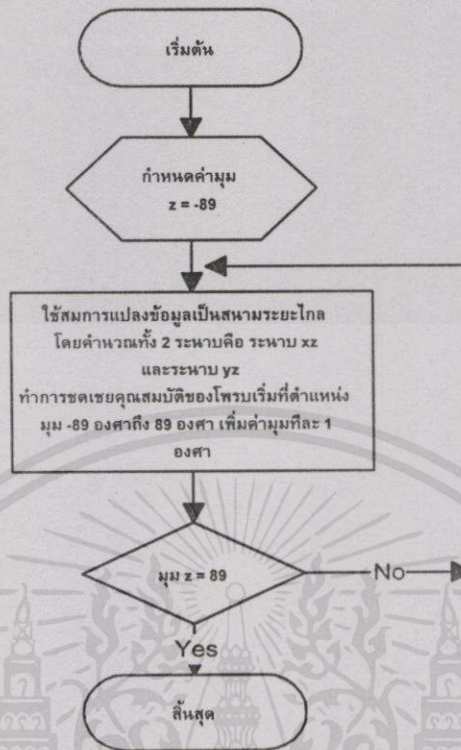


swap ()

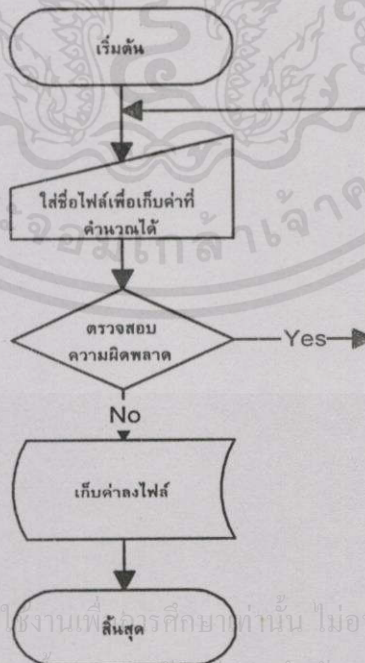


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dft ()

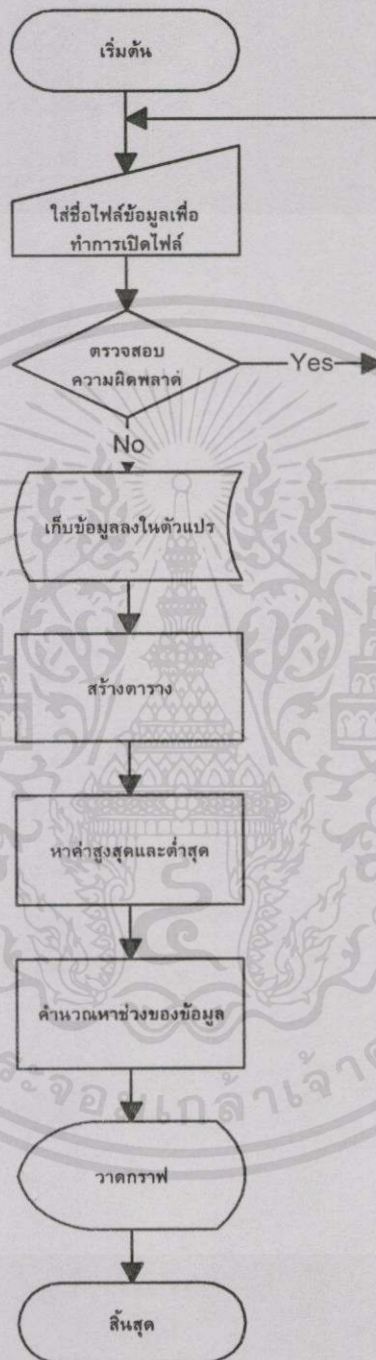


outdata ()



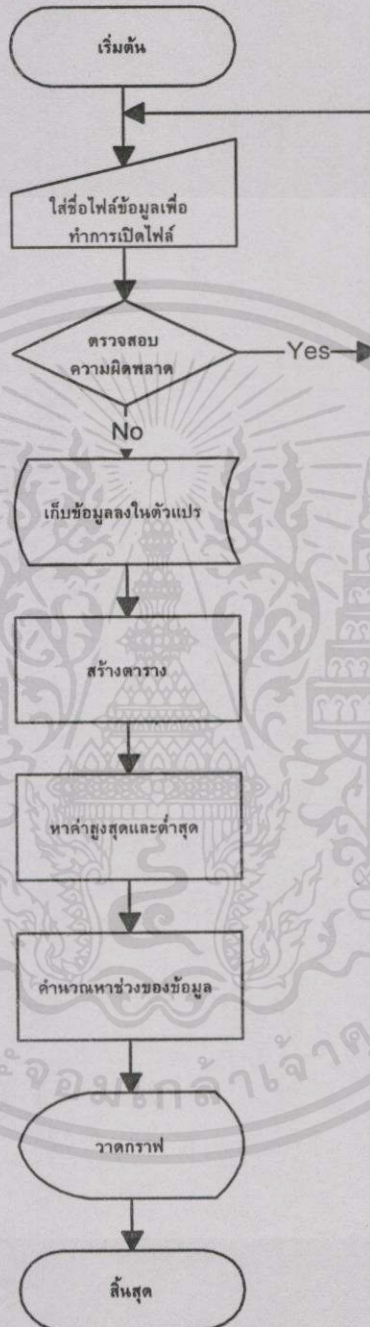
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่โรงเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rectan_plot ()



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

polar_plot ()



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์

```

//-----
// Far field management program: Convert near field to far field, plot rectan
// and polar form.
//-----
#define FALSE 0
#define TRUE (!FALSE)
// Debug parameters -----
#define DEBUGMODE FALSE
#define DEBUG_LOG "debug.log"
#define DEBUG_LOGMODE "a+"
#define DEBUG_TRACE FALSE
#define DEBUG_COMPLEX FALSE

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <bios.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>
#define MAXSCAN_X 54
#define MAXSCAN_Y 38
#define MAXSCANSIZE 2052
#define PI 3.14159265358979323846264
#define C 2997924581

typedef unsigned char BYTE;
typedef unsigned int WORD;
typedef unsigned long DWORD;

// Variables for Debugging tool -----
#if DEBUGMODE==TRUE
#include <time.h>

BOOL bDebug=TRUE; /*-- Debug code ON? --*/
FILE* hDebug; /*-- Debug file handle */
time_t debugStart,debugStop;
#endif

typedef float FTP; /*-- Floating-Point type definition --*/

typedef struct cmplx{
float r;
float i;
}complex;
float amp[MAXSCANSIZE],phi[MAXSCANSIZE],outv[181],outh[181],probeh
[181],probev[181];

```

```

float dx,dy,freq;
int dat,ptx,pty;

/*----- Functions Prototype -----*/
void getdata(void);
void swap(void);
void outdata(void);
void initial(void);
void cvt_text2near(void);
void cvt_data2text(void);
void near2far(void);
void dft(void);
void color_circle(int x,int y,int rad,int linecolor);
void color_line(int x1,int y1,int x2,int y2,int linecolor);
void color_line1(int x1,int y1,int x2,int y2,int linecolor);
void rectan_plot(void);
void polar_plot(void);

int main(void);
int ProgramExit(int exitcode);

/*----- Program codes session -----*/
int main(void) /* MAIN MENU */
{
    char choice;

#ifdef DEBUGMODE==TRUE
    if(bDebug)
    {
        debugStart = time(NULL);
        printf("Initializing debug mode...\n");
        if((hDebug=fopen(DEBUG_LOG,DEBUG_LOGMODE))==NULL)
        {
            printf("Error! Debug mode can not be initilized: Disk Full?\n");
            printf("Debug log file is redirected to console.\n");
            hDebug = stdout;
        }
    }
    else
    {
        fprintf(hDebug,"-----\n");
        fprintf(hDebug,"Start %s GMT:%s\n",asctime(localtime(&debugStart)),
            asctime(gmtime(&debugStart)));
    }
}
#endif

    clrscr();
    gotoxy(22,12);
    printf("NEAR FIELD TO FAR FIELD TRANSFORMATION\n");
    bioskey(0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ที่มีหน้าที่ดูแลเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

choice=0;
while(choice!='0')
{
    clrscr();
    gotoxy(24, 8); printf("1. CONVERT TEXT FILE FORMAT TO NEAR FIELD
FILE FORMAT");
    gotoxy(24,10); printf("2. CONVERT DATA FILE TO TEXT FILE FORMAT
FOR EXPORT");
    gotoxy(24,12); printf("3. TRANSFORM NEAR FIELD TO FAR FIELD");
    gotoxy(24,14); printf("4. PLOT RECTANGULAR GRAPH");
    gotoxy(24,16); printf("5. PLOT POLAR GRAPH");
    gotoxy(24,18); printf("0. EXIT PROGRAM");
    gotoxy(24,20); printf("CHOOSE 1 2 3 4 5 OR 0 ");

    choice=getche();
    switch(choice) {
    case '1':cvt_text2near(); break;
    case '2':cvt_data2text(); break;
    case '3':near2far(); break;
    case '4':rectan_plot(); break;
    case '5':polar_plot(); break;
    case '0':clrscr(); break;
    }
}

return ProgramExit(1);
}

//-----
int ProgramExit(int exitcode)
{
#ifdef DEBUGMODE==TRUE
if(bDebug)
{
    printf("Shutting down program...\n");
    debugStop = time(NULL);
    fprintf(hDebug,"Stop %s GMT: %s\n",asctime(localtime(debugStop)),
        asctime(gmtime(debugStop)));
    fprintf(hDebug,"Execution time = %.2Lf\n", difftime(debugStop,debugStart));

    if(hDebug!=stdout)
    {
        fclose(hDebug);
        printf("Debug log file is closed successfully.\n");
        printf("Execution time = %.2Lf\n", difftime(debugStop,debugStart));
    }
}
#endif
return exitcode;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งแก้ไข กรุณาแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//-----
void cvt_text2near(void)
{
    WORD _itemcount;
    FILE* _htext,*_hnear;
    float _fmp;
    char _stmp[256];

    clrscr();

    // Open input/output file -----
    printf("Enter text file name to conversion: "); gets(_stmp);
    if((_htext=fopen(_stmp,"rt"))==NULL)
    {
        printf("Can't open input file!\n"); bioskey(0);
        return;
    }
    printf("Enter output file (near file): "); gets(_stmp);
    if((_hnear=fopen(_stmp,"wb"))==NULL)
    {
        printf("Can't open output file!\n"); bioskey(0);
        fclose(_htext);
        return;
    }

    // convert string to floating-point -----
    _itemcount = 0;
    while(!feof(_htext))
    {
        *_stmp=0;
        fscanf(_htext,"%s",_stmp);
        if(*_stmp)
        {
            sscanf(_stmp,"%f",&_fmp);
            fwrite(&_fmp,sizeof(float),1,_hnear);
            _itemcount++;
        }
    }

    fclose(_hnear);
    fclose(_htext);
    printf("%u data items have been written.\n", _itemcount); bioskey(0);
}

```

```
//-----
void cvt_data2text(void)
{
    FILE *hInFile, *hOutFile;
    WORD wPicWidth, wCounter, wLineCounter;
    char szFileName[128];
    FTP fRead;

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clrscr();
printf("ENTER DATA FILE NAME   = "); scanf("%s", szFileName);
if((hInFile = fopen(szFileName,"rb"))==NULL)
{
    printf("error: opening input file %s\n", szFileName);
    return;
}
printf("ENTER TEXT FILE NAME TO EXPORT = "); scanf("%s",szFileName);
if((hOutFile = fopen(szFileName,"wt"))==NULL)
{
    printf("error: opening output file %s\n", szFileName);
    fclose(hInFile);
    return;
}

printf("NUMBER OF SCAN POINTS IN X = "); scanf("%u",&wPictWidth);
printf("Converting...\n");

wCounter = wLineCounter = 0;
fread(&fRead, 1, sizeof(FTP), hInFile);
while(!feof(hInFile))
{
    fprintf(hOutFile, " %g", fRead);
    if(++wCounter == wPictWidth)
    {
        fprintf(hOutFile, "\n");

        wLineCounter++;
        wCounter = 0;
    }
    fread(&fRead, 1, sizeof(FTP), hInFile);
}

if(wCounter)
{
    printf("warning: The last line is not filled completely, %u left\n", wPictWidth-
wCounter);
}
printf("finished... %u lines have been writed\n", wLineCounter);

fclose(hInFile); fclose(hOutFile);
bioskey(0);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

void near2far(void)

```

{
    initial();
    getdata();
    swap();
}

```

```

dft();
outdata();
}

//-----
void getdata(void) /* OPEN DATA FILES */
{
FILE *fil;
char   fname[50];
int    j;
float  maxv,maxh;
float  trf[360];

geta: printf("ENTER AMPLITUDE FILE NAME      : ");
scanf("%s",fname);
fil=fopen(fname,"rb");
if (fil == NULL)
{ printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
goto geta;
}
fread(amp,sizeof(float),dat,fil);
getp: printf("ENTER PHASE FILE NAME          : ");
scanf("%s",fname);
fil=fopen(fname,"rb");
if (fil == NULL)
{ printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
goto getp;
}
fread(phi,sizeof(float),dat,fil);
getprv: printf("ENTER PROBE VERTICAL FILE NAME  : ");
scanf("%s",fname);
fil=fopen(fname,"rb");
if (fil == NULL)
{ printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
goto getprv;
}
fread(trf,sizeof(float),360,fil);
maxv=trf[0];
for (j=1;j<360;j++) /*Find max*/
    if(trf[j]>maxv)
        maxv=trf[j];
for(j=0;j<360;j++) /* ANTILOG FROM dBm TO mV AND NORMALIZE*/
{ trf[j]=trf[j]-maxv;
trf[j]=pow(10,(trf[j]/20));
}
for(j=0;j<91;j++)
    probev[j]=trf[90-j];
for(j=0;j<90;j++)
    probev[j+91]=trf[359-j];

getprh: printf("ENTER PROBE HORIZONTAL FILE NAME  : ");

```

```

scanf("%s",filename);
fil=fopen(filename,"rb");
if (fil == NULL)
{ printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
  goto getprh;
}
fread(trf,sizeof(float),360,fil);
maxh=trf[0];
for (j=1;j<360;j++) /*Find max*/
    if(trf[j]>maxh)
        maxh=trf[j];
for(j=0;j<360;j++)
{ trf[j]=trf[j]-maxh;
  trf[j]=pow(10,(trf[j]/20));
}
for(j=0;j<91;j++)
    probeh[j]=trf[90-j];
for(j=0;j<90;j++)
    probeh[j+91]=trf[359-j];
}

//-----
void swap(void) /* SWAP DATA IN ODD ROW TO BE IN CORRECT
POSITION*/
{ float as[54],ps[54];
  int xx,x,y;

  for (y=1;y<=pty;y=y+2)
  { for (x=0;x<ptx;x++)
    { as[x]=amp[(y*ptx)+ptx-1-x];
      ps[x]=phi[(y*ptx)+ptx-1-x];
    }
    for (x=0;x<ptx;x++)
    { xx=y*ptx+x;
      amp[xx]=as[x];
      phi[xx]=ps[x];
    }
  }
}

//-----
void outdata(void) /*SAVE TRANSFORM DATA TO FILE*/
{
  FILE *fil;
  char filename[50];
  clrscr();
  outh: printf("ENTER HORIZONTAL FILE NAME : ");
  scanf("%s",filename);
  fil=fopen(filename,"wb");
  if (fil == NULL)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    { printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
      goto outh;
    }
    fwrite(outh,sizeof(float),181,fil);
outv: printf("ENTER VERTICAL FILE NAME      : ");
    scanf("%s",filename);
    fil=fopen(filename,"wb");
    if (fil == NULL)
    { printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
      goto outv;
    }
    fwrite(outv,sizeof(float),181,fil);
}

```

```

//-----
void initial(void) /*INITIAL DATA FOR CALCULATION*/
{
  clrscr();
  for(;;)
  {
    printf("ENTER FREQUENCY (MHz)      : "); scanf("%f",&freq);
    printf("NUMBER OF SCAN POINTS IN X AXIS : "); scanf("%d",&ptx);
    printf("NUMBER OF SCAN POINTS IN Y AXIS : "); scanf("%d",&pty);
    printf("SPACE OF SCANNING IN X AXIS (cm) : "); scanf("%f",&dx);
    printf("SPACE OF SCANNING IN Y AXIS (cm) : "); scanf("%f",&dy);
    dat=ptx*pty; /*CHECK DIMENSION OF SCANNING AREA*/
    if(dat > MAXSCANSIZE || ptx > MAXSCAN_X || pty > MAXSCAN_Y)
    {
      printf("\n\n TOO MANY NUMBER OF SCAN POINTS .\n");
      continue;
    }
    break;
  }
  printf("\n");
}

```

```

//-----
void dft(void) /*TRANSFORM TO FAR FIELD PATTERN*/
{
  complex xh,x1h,xv,x1v;
  int i,m,n,z,nn,m1,n1;
  float kz,k0,kyh,kxh,kyv,kxv,kkh,kkv;
  k0=2*PI*freq*1e6/C; /*WAVENUMBER*/
  printf("K0 = %f\n",k0);
  printf("PRESS ANY KEY");
  bioskey(0);
  dx=dx/100;
  dy=dy/100;
  clrscr();
  printf("      degree      HORIZONTAL (i=0°)      VERTICAL (i=90°)\n");
  window(1,3,80,25);

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ หากท่านมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งแก้ไข กรุณาแจ้งมายังสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่

```

for (i=0;i<181;i++)
{ outv[i]=-900;
  outh[i]=-900;
}
for(nn=0;nn<181;nn++)
{ amp[nn]=pow(amp[nn],2);
  phi[nn]=2*phi[nn];
}
for(z=-89;z<=89;z++) /*CALCULATE FROM -90 DEGREE TO 90 DEGREE*/
{
  kz=k0*cos(z*PI/180);
  kyh=0; /* kx,ky in HORIZONTAL*/
  kxh=k0*dx*sin(z*PI/180);
  kyv=k0*dy*sin(z*PI/180);
  kxv=0; /* kx,ky in VERTICAL*/

  x1h.r=0;
  x1h.i=0;
  x1v.r=0;
  x1v.i=0;
  for (m=0;m<pty;m++) /* INTEGRATE IN Y AXIS*/
  {
    xh.r=0;
    xh.i=0;
    xv.r=0;
    xv.i=0;
    m1=(pty/2)-m;
    for(n=0;n<ptx;n++) /* INTEGRATE IN X AXIS*/
    {
      nn=ptx*m+n;
      n1=(ptx/2)-n;
      kkh=n1*kxh+phi[nn]*PI/180;
      kkv=phi[nn]*PI/180;
      xh.r+=(amp[nn]*cos(kkh));
      xh.i+=(amp[nn]*sin(kkh));
      xv.r+=(amp[nn]*cos(kkv));
      xv.i+=(amp[nn]*sin(kkv));
    }

    x1h.r+=(xh.r*dx*dy);
    x1h.i+=(xh.i*dx*dy);
    x1v.r+=((xv.r*cos(m1*kyv)-xv.i*sin(m1*kyv))*dx*dy);
    x1v.i+=((xv.r*sin(m1*kyv)+xv.i*cos(m1*kyv))*dx*dy);
  }
  outh[90-z]=sqrt(pow(x1h.r,2)+pow(x1h.i,2)); /*OUTPUT IN HORIZONTAL*/
  outv[90-z]=sqrt(pow(x1v.r,2)+pow(x1v.i,2)); /*OUTPUT IN VERTICAL */
  outh[90-z]=outh[90-z]*cos(z*PI/180)/(probeh[90-z]); /*-- Probe correction --*/
  outv[90-z]=outv[90-z]*cos(z*PI/180)/(probev[90-z]); /*-- Probe correction --*/
  outh[90-z]=20*log10(outh[90-z]); /*-- Power Pattern --*/
  outv[90-z]=20*log10(outv[90-z]); /*-- Power Pattern --*/
  cprintf(" %3d",z);
  cprintf(" %11f",outh[90-z]);
  cprintf(" %11f\n\r",outv[90-z]);
}

```

```

}

window(1,1,80,25);
clreol();
printf("READY!");
printf("\007");
bioskey(0);
}

//-----
void color_circle(int x,int y,int rad,int linecolor)
{
    /*DRAW CIRCLE WITH COLOR */
    setcolor(linecolor);
    setlinestyle(SOLID_LINE,0,NORM_WIDTH);
    circle(x,y,rad);
}

//-----
void color_line(int x1,int y1,int x2,int y2,int linecolor)
{
    /* DRAW LINE WITH COLOR */
    setcolor(linecolor);
    setlinestyle(SOLID_LINE,0,NORM_WIDTH);
    line(x1,y1,x2,y2);
}

//-----
void color_line1(int x1,int y1,int x2,int y2,int linecolor)
{
    /* DRAW THICK LINE WITH COLOR*/
    setcolor(linecolor);
    setlinestyle(SOLID_LINE,0,THICK_WIDTH);
    line(x1,y1,x2,y2);
}

//-----
void rectan_plot(void) /* PLOT RECTANGULAR GRAPH */
{
    int i,j,k,c;
    float max,min,span;
    FILE *fil;
    char str[10],filename[50];
    float d[181];
    int polyarray[]={0,0,640,0,640,480,0,480};
    int gdriver = DETECT, gmode;
    c=3;
    clrscr();
    plotr: printf("ENTER FILE NAME TO PLOT RECTANGULAR GRAPH : ");
    scanf("%s",filename);
    fil=fopen(filename,"rb");
    if (fil == NULL)
        { printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
          goto plotr;
        }
}

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันพัฒนาบุคลากรแห่งชาติ (องค์การมหาชน) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด

```

    }
    fread(d,sizeof(float),181,fil);
    initgraph(&gdriver, &gmode, "c:\\tc\\bgi\\");
    fillpoly(4,polyarray);
    setttextjustify(1,2);
    color_line1(80,7,80,445,c);
    color_line1(80,445,620,445,c);
    j=-90; k=0;
    for (i=80;i<=620;i=i+15)
    {
        color_line(i,440,i,445,c);
        if (k%3 == 0)
        {
            sprintf(str,"%d",j);
            color_line(i,7,i,450,c);
            outtextxy(i,455,str);
            j=j+15;
        }
        k++;
    }
    j=0;
    for (i=7;i<=445;i=i+73)
    {
        color_line(75,i,620,i,c);
        sprintf(str,"%0.1d",j*-10);
        outtextxy(52,i-2,str);
        j++;
    }
    setcolor(2);
    setttextstyle(2,HORIZ_DIR,5);
    outtextxy(25,0,"dB");
    outtextxy(600,464,"Degree");

    min=max=d[0];
    for(j=0;j<181;j++) /*Find max*/
    {
        if(d[j]>max) max=d[j];
        if(d[j]<min) min=d[j]; /*Find min*/
    }
    span=60.0;
    setttextstyle(2,HORIZ_DIR,0); /* SET SPAN TO PLOT */
    for (i=0;i<181;i++)
    {
        d[i]=d[i]-max;
        if (d[i]<(0-span))
            d[i]=(0-span);
        d[i]=(d[i]+span)*438/span;
    }

    for (i= 1;i<180;i++)
        color_line(3*i+80,(int)(445-d[i]),

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        3*(i+1)+80,(int)(445-d[(i+1)]),c+1);
    bioskey(0);
    closegraph();
}

//-----
void polar_plot(void) /* PLOT POLAR GRAPH */
{
    float x,y,d[181];
    int j,e[181],f[181];
    float max,span,min,g;
    FILE *fil;
    char finame1[30];
    int gdriver = DETECT, gmode;
    int polyarray[]={0,0,640,0,640,480,0,480};

    clrscr();

    plotp: printf("ENTER FILE NAME TO PLOT POLAR GRAPH : ");
    scanf("%s",finame1);
    fil=fopen(finame1,"rb");
    if (fil == NULL)
        { printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
          goto plotp;
        }
    clrscr();
    initgraph(&gdriver, &gmode, "c:\\tc\\bgi\\");
    fillpoly(4,polyarray);
    color_circle(320,240,230,BLUE);
    color_circle(320,240,190,BLUE);
    color_circle(320,240,150,BLUE);
    color_circle(320,240,110,BLUE);
    color_circle(320,240,70,BLUE);
    color_circle(320,240,30,BLUE);
    color_line(320,10,320,470,GREEN);
    color_line(90,240,550,240,GREEN);
    color_line(483,403,157,77,GREEN);
    color_line(157,403,483,77,GREEN);

    fread(d,sizeof(float),181,fil);
    fclose(fil);
    max=d[1];
    min=d[1];
    for(j=1;j<180;j++) /*Find max*/
    {
        if(d[j]>max) max=d[j];
        if(d[j]<min) min=d[j];
    }
    span=max-min;

    if(span>60.0) /* SET SPAN RANGE */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        span=60.0 ;
        min=max-60.0;
    }

for (j=0;j<181;j++)
{
    if((max-d[j])>60)
        d[j]=max-60;
}

for (j=92;j<182;j++) /*PLOT GRAPH*/
{
    g=(d[(j-1)]-min)+(60.0-span);

    y=230*g/60.0*sin((j-1)*PI/180);
    x=230*g/60.0*cos((j-1)*PI/180);

    e[j]=320.0-(int)x;
    f[j]=240.0-(int)y;
    if(j==92)
        continue;
    else
        color_line(e[j-1],f[j-1],e[j],f[j],LIGHTRED);
}
color_line(e[181],f[181],320,240,LIGHTRED);
for (j=1;j<93;j++)
{
    g=(d[(j-1)]-min)+(60.0-span);

    y=230*g/60.0*sin((j-1)*PI/180);
    x=230*g/60.0*cos((j-1)*PI/180);

    e[j]=320-(int)x;
    f[j]=240-(int)y;
    if(j==1)
        continue;
    else
        color_line(e[j-1],f[j-1],e[j],f[j],LIGHTRED);
}
color_line(e[1],f[1],320,240,LIGHTRED);

```

```
setcolor(5);
```

```
settextstyle(0,HORIZ_DIR,0);
```

```
outtextxy(275,1,"dB RELATIVE");
```

```
outtextxy(323,13,"0");
```

```
outtextxy(323,53,"-10");
```

```
outtextxy(323,94,"-20");
```

```
outtextxy(323,135,"-30");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

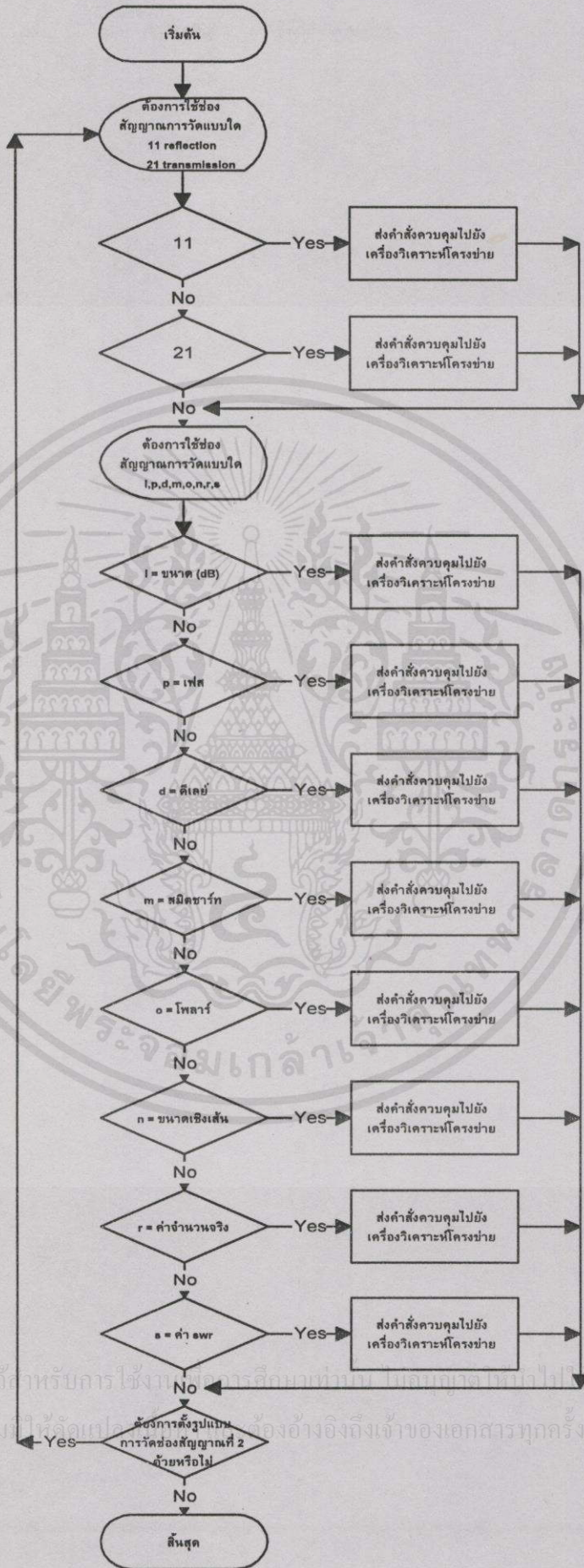
outtextxy(323,176,"-40");
outtextxy(323,204,"-50");
outtextxy(65,236,"-90");
outtextxy(552,236,"+90");
bioskey(0);
closegraph();
}

```



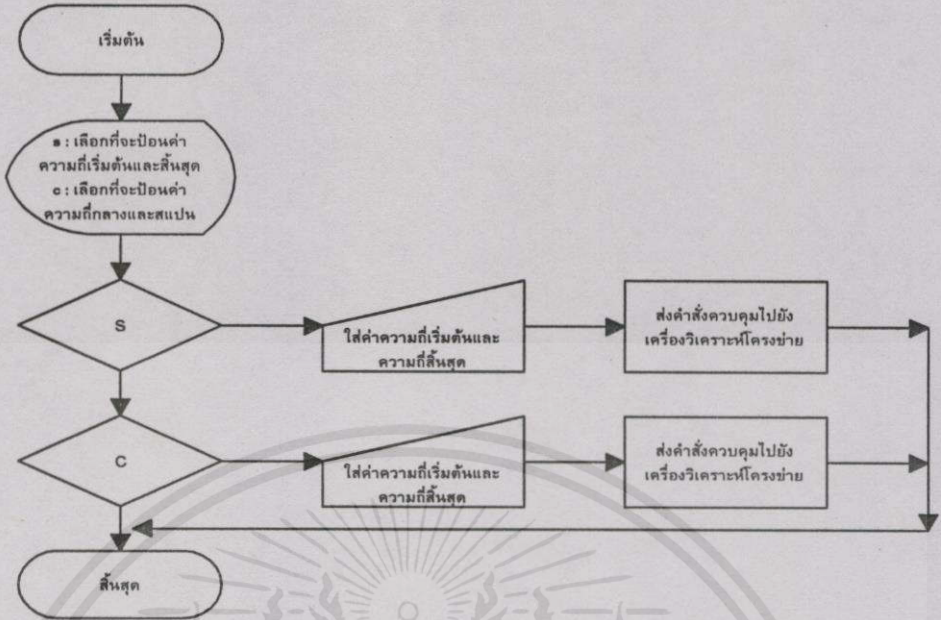
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

meas_setup ()

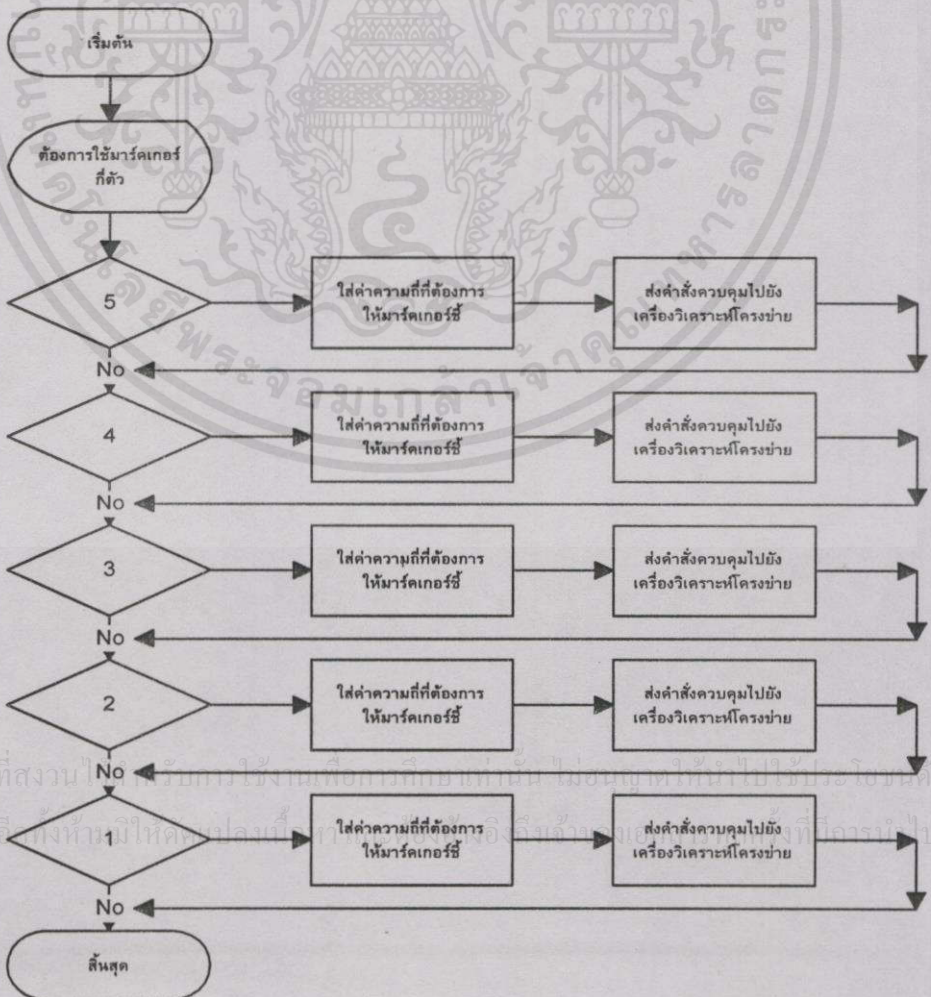


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในอาคารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไป ประโยชน์นี้ผ่านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลอกเอาไปใช้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

select_freq ()

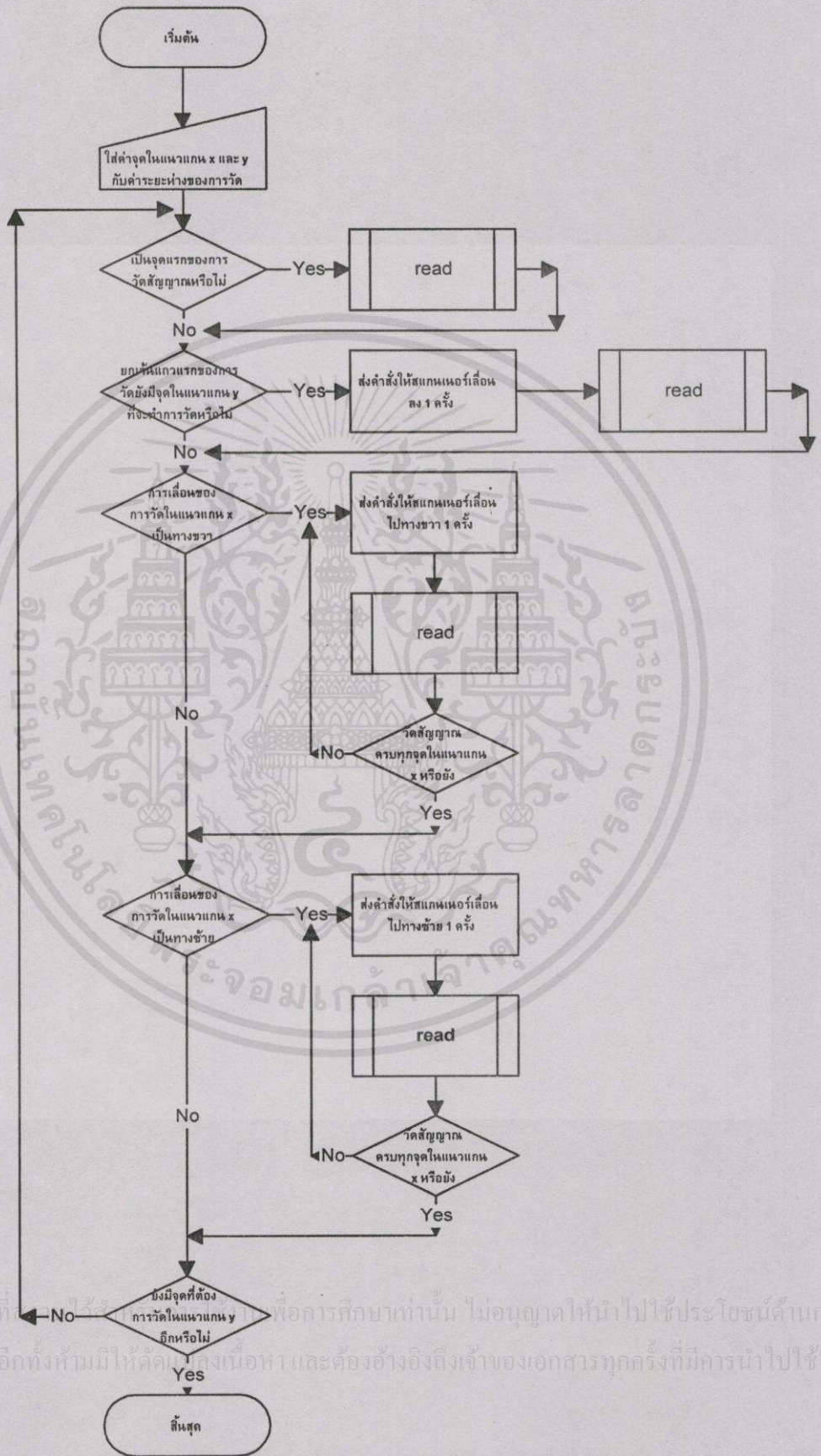


marker_freq ()



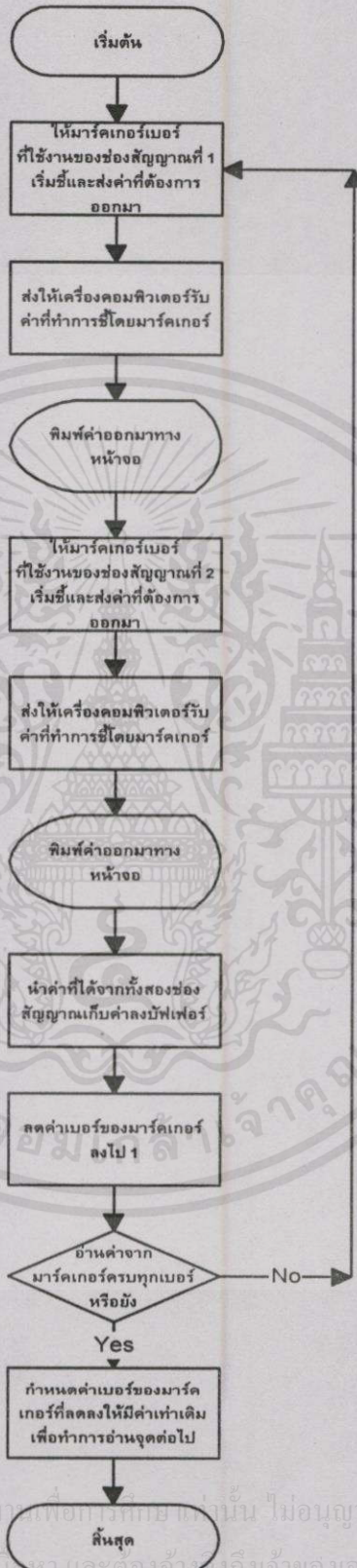
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ซึ่งหากมีให้สงวนลิขสิทธิ์ไว้แล้วจะแจ้งด้วยเอกสารที่ถือครองไว้

scanner ()



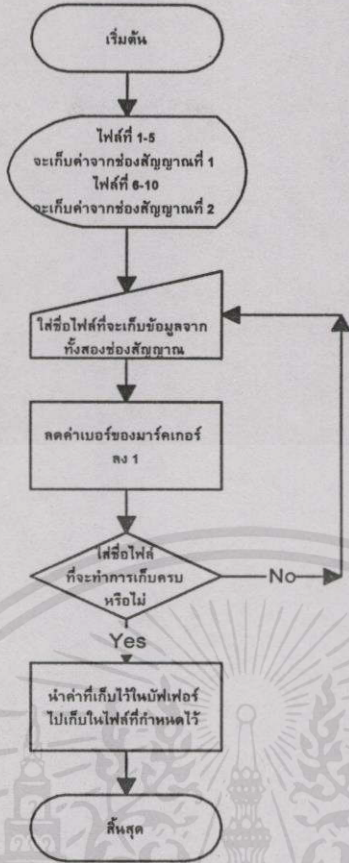
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

read ()

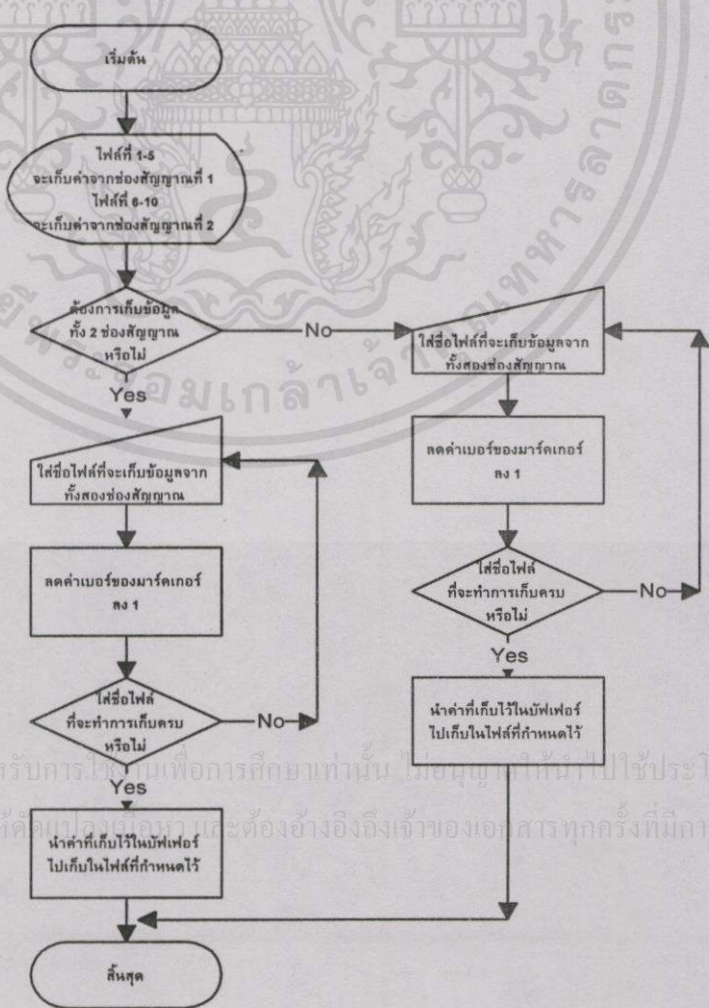


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกให้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

save ()

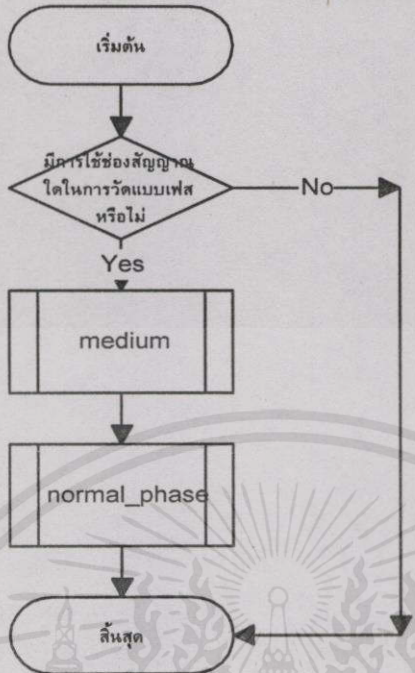


saves ()

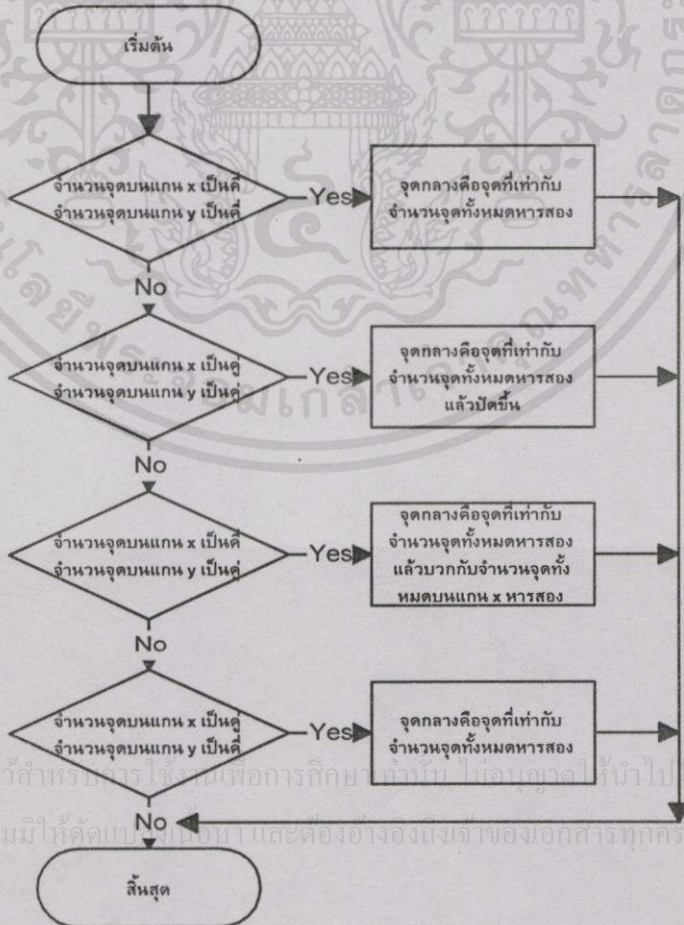


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

abb ()

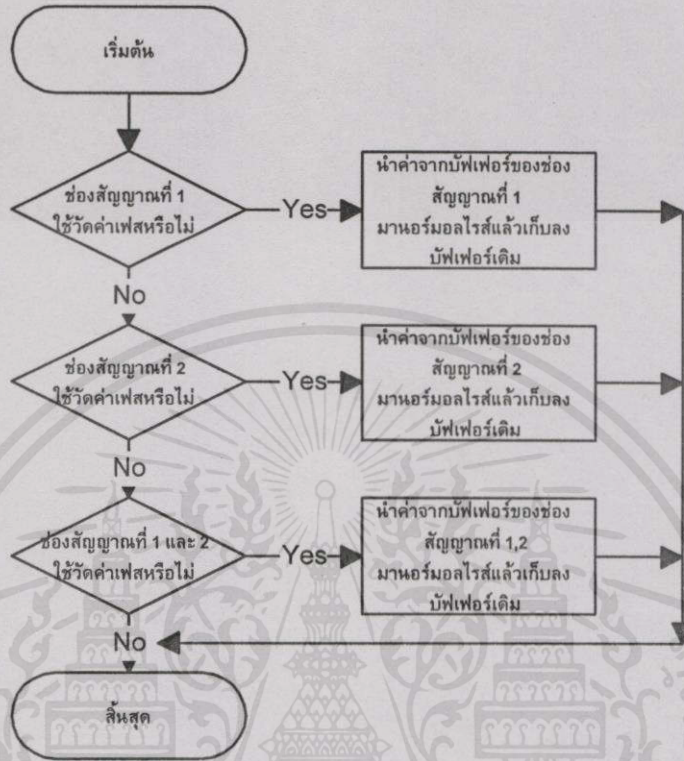


medium ()



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

normal phase ()



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมควบคุมการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

```

/* HP 8719C,8720C,8722A QuickC IPG */
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <print.h>
#include "cfunc.h"
#include "chpib.h"
#define isc 3L /*type of interface card(hpib)(long7)*/
#define instr 316L /*address of network analyzer(long16)*/

void error_handle (int, char *);
void output (char *);
void select_freq(void);
void initialize (void);
void opc(void);
void disp_promt(char *);
void meas_setup(void);
void marker_freq(void);
void calibrate(void);
void read(void);
void save(void);
void saves(void);
void normal_phas(void);
void medium(void);
void scanner(void);
void medium2(void);
void abb(void);
int mkr; /*use in marker_freq() and read()
*****/
int mk; /*use in read() and
save()*****/
int i; /*use in read() and scanner()
*****/
int point; /*use in save() and scanner()
*****/
int phas; /*use in meas_setup() ,scanner() and normal_phas
()*****/
int CntX,orgX,CntY,orgY; /*use in scanner() and medium
*****/
int nnor; /*use in main() and
medium()*****/
/*** if you want more point of scanning please add here
*****/
float buff[11][1020]; /*use in read() and
save()*****/

```

```

float medy;                               /*use in medium() and
normal_phase()******/

void error_handle (int error,char *routine)
{
    if (error != NOERR)
    {
        printf("HPIB error in call to %s: %d, %s\n",routine,error,errstr(error));
        exit(1);
    }
    return;
}

void output (char *sendstr)
{
    error_handle (IOOUTPUTS (instr,sendstr,strlen(sendstr)),"IOOUTPUTS");
}

void opc()
{
    int one =1;
    char reply;
    error_handle(IOENTERS (instr,&reply,&one),"IOENTERS");
}

void initialize ()
{
    error_handle (IOTIMEOUT (isc,45.0),"IOTIMEOUT");
    error_handle (IOABORT (isc),"IOABORT");
    error_handle (IOCLEAR (isc),"IOCLEAR");
    /*output ("PRES;CLES;");*/
}

void disp_promt( char *promt)
{
    printf("%s",promt);
    printf(", then press [RETURN] \n");
    getche();
    printf("\n");
}

void select_freq()
{
    char ansf,cmd[80];
    float f_start,f_stop;
    printf("CHOOSE THE FORMAT OF FREQUENCY\n");
    printf(" s : start and stop frequency\n");
    printf(" c : center and span frequency\n");
    printf("Enter character : ");
    ansf = getche();
    printf("\n");
    switch(ansf) {
        case 's' : printf("Enter start frequency (MHz);");
                    scanf("%f",&f_start);
                    printf("Enter stop frequency (MHz);");
                    scanf("%f",&f_stop);
    }
}

```

```

        sprintf(cmd,"STAR%fMHZ;STOP%fMHZ;",f_start,f_stop);
        output(cmd);
        break;
    case 'c' : printf("Enter center frequency (MHz);");
        scanf("%f",&f_start);
        printf("Enter span frequency (MHz);");
        scanf("%f",&f_stop);
        sprintf(cmd,"CENT%fMHZ;SPAN%fMHZ;",f_start,f_stop);
        output(cmd);
        break;
    default : printf("out of menu,do again..\n");
        select_freq();
        }
}
void marker_freq()
{
float mkf;
char cmd[80];
printf("HOW MANY MARKER (1-5)?");
scanf("%d",&mkr);
printf("\n");
switch(mkr)
{ case 5 : printf("<Enter marker5 frequency (MHz);>");
        scanf("%f",&mkf);
        sprintf(cmd,"MARK5%fMHZ;",mkf);
        output (cmd);
    case 4 : printf("<Enter marker4 frequency (MHz);>");
        scanf("%f",&mkf);
        sprintf(cmd,"MARK4%fMHZ;",mkf);
        output (cmd);
    case 3 : printf("<Enter marker3 frequency (MHz);>");
        scanf("%f",&mkf);
        sprintf(cmd,"MARK3%fMHZ;",mkf);
        output (cmd);
    case 2 : printf("<Enter marker2 frequency (MHz);>");
        scanf("%f",&mkf);
        sprintf(cmd,"MARK2%fMHZ;",mkf);
        output (cmd);
    case 1 : printf("<Enter marker1 frequency (MHz);>");
        scanf("%f",&mkf);
        sprintf(cmd,"MARK1%fMHZ;",mkf);
        output (cmd);
        break;
    default : printf("<out of menu ,choose again!!>\n");
        marker_freq();
}
}
void read(void)
{
int length;
char cmd[80];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ต้องแจ้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float val1[3],val2[3];
length = 3;
mk = mkr;
do
    {
    output("HOLD;");
    sprintf(cmd,"MARK%d",mkr);
    output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
    output(cmd);
    error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
    printf("[point_ %3d]_<..CHAN1 marker%d: %5.2f.mV.>_",i,mkr,val1
[0]*1000.0);
    output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
    output(cmd);
    error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
    printf("____<..CHAN2 marker%d: %5.2f.degree.>\n",mkr,val2[0]);

    buf[mkr][0] =0;
    buf[mkr][i] =val1[0];
    buf[mkr+5][i]=val2[0];
    mkr=mkr-1;
    output("CONT;");
    delay(100);
    /* getch() */
    }
while ( mkr > 0);
if (mkr==0) mkr=mk;
}
void medium()
{ float p1,p2,evod,odev;
int pp1,pp2;
pp1 = (CntX-orgX+1);
pp2 = (CntY-orgY+1);
p1=fmod(pp1,2);
p2=fmod(pp2,2);
/***** find medium (x = no.of column,y= no.of row) *****/
/** x = odd and y = odd ***/
    if( (p1==1) && (p2==1) )
        { medy = ceil(i/2.0);
        }
/** x = even and y = even ***/
else if( (p1==0) && (p2==0) )
    { medy = (i/2.0)+(pp1)/2.0;
    }
/** x = odd and y = even ***/
else if( (p1==1) && (p2==0) )
    { evod = ceil((pp1)/2.0);
    medy = (i/2.0)+evod;
    /* in case of x=1*/
    if ((pp1)==1)
        medy = i/2.0;

```

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    /*** x = even and y = odd ***/
    else if( (p1==0) && (p2==1) )
        { medy = i/2;
        }
    /**** in case of error programming ***/
    else { printf("error programming(medium)\n");
        exit(0);
        }
    printf("\007");
}
void medium2()
{ float p2;
  int pp1,pp2;
  pp1 = (CntX-orgX+1);
  pp2 = (CntY-orgY+1);
  p2=fmod(pp2,2);
  switch(nnor)
  {
  case 2 : printf("normalize by up left\n");
    medy=pp1;
    break;
  case 3 : printf("normalize by up right\n");
    medy=1;
    break;
  case 4 : printf("normalize by down left\n");
    if (p2==0) medy=i-pp1+1;
    if (p2==1) medy=i;
    break;
  case 5 : printf("normalize by down right\n");
    if (p2==0) medy=i;
    if (p2==1) medy=i-pp1+1;
    break;
  default: printf("error in programming(medium2)\n");
    exit(0);
  }
}
void normal_phas()
{ int yy,xx,yy1,xx1;
  float norm;
  if (phas==1)
  { printf("/*(ch.1) normalize loop */\n");
    /* (ch.1) normalize loop */
    for(xx=mk;xx>0;xx--)
    {
    for(yy=i;yy>0;yy--)
    { norm = buf[xx][medy];
      buf[xx][yy]= (buf[xx][yy]-buf[xx][medy]);
      if (buf[xx][yy]==0) buf[xx][medy]=norm;
    }
    buf[xx][medy] = 0;
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือลงโฆษณาใดๆทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}
else if (phas==2)
{ printf("*(ch.2) normalize loop *\n");
  /* (ch.2) normalize loop */
  for(xx1=mk+5;xx1>5;xx1--)
  {
    for(yy1=i;yy1>0;yy1--)
    { norm = buf[xx1][medy];
      buf[xx1][yy1]= (buf[xx1][yy1]-buf[xx1][medy]);
      if (buf[xx1][yy1]==0) buf[xx1][medy]=norm;
    }
    buf[xx1][medy] = 0;
  }
}
else if (phas==3)
{ printf("*(ch.1 and ch.2) normalize loop *\n");
  /* (ch.1 and ch.2) normalize loop */
  for(xx=mk;xx>0;xx--)
  {
    for(yy=i;yy>0;yy--)
    { norm = buf[xx][medy];
      buf[xx][yy]= (buf[xx][yy]-buf[xx][medy]);
      if (buf[xx][yy]==0) buf[xx][medy]=norm;
    }
    buf[xx][medy] = 0;
  }
  for(xx1=mk+5;xx1>5;xx1--)
  {
    for(yy1=i;yy1>0;yy1--)
    { norm = buf[xx1][medy];
      buf[xx1][yy1]= (buf[xx1][yy1]-buf[xx1][medy]);
      if (buf[xx1][yy1]==0) buf[xx1][medy]=norm;
    }
    buf[xx1][medy] = 0;
  }
}
/*****in case of error programming *****/
else
{ printf("error in programming(normal_phase)\n");
  exit(0);
}
}
void save()
{ FILE *data;
  FILE *data1;
  int k,h;
  char fname[10][30];
  printf("****packing data****\n\n");
  /*file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1
  file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุญาตให้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3
file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4
file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5*/
printf("file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1\n");
printf("file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2\n");
printf("file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3\n");
printf("file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4\n");
printf("file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5\n");
for(h=0;h<mk;h++)
{
    printf("Enter saved file%d name:=>",h+1);
    scanf("%s",&fname[h]);
    printf("Enter saved file%d name:=>",h+6);
    scanf("%s",&fname[h+5]);
}
k=0;
while(k<mk)
{
    /******channel 1******/
    printf("start saving file of marker%d ,channel 1....:\n",mk);
    if((data = fopen(fname[k],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
    fwrite(&buf[k+1][1],sizeof(float),point,data);
    fclose(data);
    /******channel 2******/
    printf("start saving file of marker%d ,channel 2....:\n",mk);
    if((data1 = fopen(fname[k+5],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
    fwrite(&buf[k+6][1],sizeof(float),point,data1);
    fclose(data1);
    k++;
}
}
void saves()
{ FILE *data;
  FILE *data1;
  int k,h;
  char fname[10][30];
  printf("****packing data****\n\n");
  /*file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1
  file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2
  file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3
  file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4
  file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5*/
  printf("file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1\n");
  printf("file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2\n");
  printf("file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3\n");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยศูนย์บริการวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

```

printf("file4 for ch1 marker4 , file9  for ch2 marker4\n");
printf("file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5\n");
for(h=0;h<mk;h++)
{
    if (phas==1)
    {
        printf("Enter saved file%d name:=>",h+1);
        scanf("%s",&fname[h]);
    }
    else if (phas==2)
    {
        printf("Enter saved file%d name:=>",h+6);
        scanf("%s",&fname[h+5]);
    }
    else if (phas==3)
    {
        printf("Enter saved file%d name:=>",h+1);
        scanf("%s",&fname[h]);
        printf("Enter saved file%d name:=>",h+6);
        scanf("%s",&fname[h+5]);
    }
    else
    {
        printf("error in saves\n");
        printf("\007");
        exit(0);
    }
}
k=0;
while(k<mk)
{
    if (phas==1)
    {
        /******channel 1******/
        printf("start saving file of marker%d ,channel 1.....)\n",mk);
        if ((data = fopen(fname[k],"wb")) == NULL)
            { printf("Error in open file\n");
              exit(0);
            }
        fwrite(&buf[k+1][1],sizeof(float),point,data);
        fclose(data);
        k++;
    }
    else if (phas==2)
    {
        /******channel 2******/
        printf("start saving file of marker%d ,channel 2.....)\n",mk);
        if ((data1 = fopen(fname[k+5],"wb")) == NULL)
            { printf("Error in open file\n");
              exit(0);
            }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามการนำออกไปใช้

```

        fwrite(&buf[k+6][1],sizeof(float),point,data1);
        fclose(data1);
        k++;
    }
    else if (phas==3)
    {
        /***** channel 1 *****/
        printf("start saving file of marker%d ,channel 1.....)\n",mk);
        if ((data = fopen(finame[k],"wb")) == NULL)
            { printf("Error in open file\n");
              exit(0);
            }
        fwrite(&buf[k+1][1],sizeof(float),point,data);
        fclose(data);
        /***** channel 2 *****/
        printf("start saving file of marker%d ,channel 2.....)\n",mk);
        if ((data1 = fopen(finame[k+5],"wb")) == NULL)
            { printf("Error in open file\n");
              exit(0);
            }
        fwrite(&buf[k+6][1],sizeof(float),point,data1);
        fclose(data1);
        k++;
    }
    else
    {
        printf("error in saves\n");
        printf("\007");
        exit(0);
    }
}
}
void meas_setup()
{
    int ans,ans3;
    char ans1,ans2,form1[30],form2[30],head1[70],head2[70],cmd[80],cmd1[80];
    phas = 0;
    printf("MEASUREMENT SETUP");
    getch();
    clrscr(); gotoxy(30,8);
    printf(" SETUP CHANNEL 1 (11 or 21) \n");
    printf(" 11: FOR REFLECTION \n");
    printf(" 21: FOR TRANSMISSION \n");
    scanf("%d",&ans);
    clrscr();
    if(ans==11)
        gotoxy(30,8);
        printf(" SETUP CHANNEL 1 FOR REFLECTION \n");
        strcpy(head1,"SETUP CHANNEL 1 FOR REFLECTION");
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นลิขสิทธิ์ของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if(ans==21)
{
    gotoxy(30,8);
    printf(" SETUP CHANNEL 1 FOR TRANSMISSION \n");
    strcpy(head1,"SETUP CHANNEL 1 FOR TRANSMISSION");
}
else
{
    printf("out of menu,do again\n");
    meas_setup();
}
clrscr();
printf(" SELECT FORMAT \n");
printf(" l : LOG MAGNITUDE\n");
printf(" p : PHASE\n");
printf("if you choose PHASE ,we will normalize phase automatically \n");
printf(" d : DELAY\n");
printf(" m : SMITH CHART\n");
printf(" o : POLAR\n");
printf(" n : LIN MAGNITUDE\n");
printf(" r : REAL\n");
printf(" s : SWR\n");

ans1=getch();
switch(ans1)
{
    case 'l' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;LOGM;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"LOG
MAGNITUDE");
                break;
    case 'p' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;PHAS;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"PHASE");
                /* normalize phase */
                phas=phas+1;
                break;
    case 'd' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;DELY;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"DELAY");
                break;
    case 'm' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;SMIC;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"SMITH CHART");
                break;
    case 'o' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;POLA;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"POLAR");
                break;
    case 'n' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;LINM;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"LIN
MAGNITUDE");
                break;
    case 'r' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;REAL;",ans);
                output (cmd);strcpy(form1,"REAL");
                break;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

case 's' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;SWR;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"SWR");
            break;
    }
    clrscr();
    gotoxy(30,8);
    printf(head1);printf("\n"); gotoxy(35,9);
    printf(form1);printf("\n");
    printf(" PRESS ANY KEY TO CONTINUE\n");
    getch();
    clrscr();
    printf("SETUP CHANNEL 2 ? (Y or N)\n");
    ans2=getch();
    clrscr();
    if (ans2=='y')
    {
        clrscr(); gotoxy(30,8);
        printf("  SETUP CHANNEL 2 (11 or 21) \n");
        printf("  11: FOR REFLECTION \n");
        printf("  21: FOR TRANSMISSION \n");
        scanf("%d",&ans3);
        clrscr();
        if(ans==11)
        {
            gotoxy(30,8);
            printf("  SETUP CHANNEL 2 FOR
REFLECTION \n");
            strcpy(head2,"SETUP CHANNEL 2 FOR
REFLECTION");
        }
        else if (ans==21)
        {
            gotoxy(30,8);
            printf("  SETUP CHANNEL 2 FOR
TRANSMISSION \n");
            strcpy(head2,"SETUP CHANNEL 2 FOR
TRANMISSION");
        }
        else
        {
            printf("out of menu,do again..");
            meas_setup();
        }
        clrscr();
        printf(" SELECT FORMAT \n");
        printf("  1 : LOG MAGNITUDE\n");
        printf("  p : PHASE\n");
        printf("if you choose PHASE,we will nomalize phase automatically
\n");
        printf("  d : DELAY\n");
        printf("  m : SMITH CHART\n");
    }

```

```

printf(" o : POLAR\n");
printf(" n : LIN MAGNITUDE\n");
printf(" r : REAL\n");
printf(" s : SWR\n");

ans1=getch();
switch(ans1)
{
case 'l' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;LOGM;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"LOG MAGNITUDE");
            break;
case 'p' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;PHAS;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"PHASE");
            /* normalize phase */
            phas = phas+2;
            break;
case 'd' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;DELY;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"DELAY");
            break;
case 'm' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;SMIC;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"SMITH CHART");
            break;
case 'o' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;POLA;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"POLAR");
            break;
case 'n' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;LINM;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"LIN MAGNITUDE");
            break;
case 'r' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;REAL;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"REAL");
            break;
case 's' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;SWR;",ans);
            output (cmd);strcpy(form2,"SWR");
            break;
}

clrscr();
gotoxy(30,8);
printf(head2);printf("\n"); gotoxy(35,9);
printf(form2);printf("\n");
printf(" PRESS ANY KEY TO CONTINUE\n");
}

clrscr();
gotoxy(30,6);
printf(head1);gotoxy(35,7);
printf(form1);gotoxy(30,8);
if(ans2=='y')
{
printf(head2);gotoxy(35,9);
printf(form2);gotoxy(30,20);
}
printf("PRESS ANY KEY TO CONTINUE\n");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร if(ans2=='y') หรือการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ข้อมูลใดๆของผู้อื่นอย่างผิดกฎหมายหรือแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    getch();
    output("DUACON;");
}
void calibrate()
{
    output ("CALK35MM;CLES;CALIFUL2;REFL;");
    disp_promt("Connect OPEN at port 1 ");
    output ("OPC?;CLASS11A;");
    opc();
    disp_promt("Connect SHORT at port 1 ");
    output ("OPC?;CLASS11B;");
    opc();
    disp_promt("Connect BROADBAND LOAD at port 1 ");
    output ("CLASS11C;OPC?;STANA;");
    opc();
    disp_promt("Connect OPEN at port 2");
    output ("OPC?;CLASS22A;");
    opc();
    disp_promt ("Connect SHORT at port 2 ");
    output ("OPC?;CLASS22B;");
    opc();
    disp_promt("Connect BROADBAND LOAD at port 2 ");
    output ("CLASS22C;OPC?;STANA;");
    opc();
    output ("REFD;");
    printf ("Computing reflection calibration coefficients :(\n");
    output ("TRAN;");
    disp_promt("Connect THRU [port1 to port 2]");
    printf ("Measuring forward transmission\n");
    output ("OPC?;FWDT;");
    opc();
    output ("OPC?;FWDM;");
    opc ();
    printf ("Measuring reverse transmission :(\n");
    output ("OPC?;REVT;");
    opc();
    output ("OPC?;REVM;");
    opc();
    output ("TRAD;");
    disp_promt("Isolate test ports");
    output ("AVERFACT16;AVERON;ISOL;");
    printf ("Measuring reverse isolation\n");
    output ("OPC?;REVI;");
    opc();
    printf ("Measuring forward isolation\n");
    output ("OPC?;FWDI;");
    opc();
    output ("ISOD;AVEROFF;");
    printf ("computing calibration coefficients :(\n");
    output ("OPC?;SAV2;");
    opc();
}

```

```

printf("DONE :)\n");
}
void scanner()
{
int endp;
int x,y;
int argv[4];
char com[10];
clrscr();
endp = 0;
printf("CntX=");
scanf("%d",&argv[1]);
printf("CntY=");
scanf("%d",&argv[2]);
printf("step=");
scanf("%d",&argv[3]);
    CntX = argv[1];
    CntY = argv[2];
point = (CntX+1)*(CntY+1);
    sprintf(com,"PA0,0;");
    fprintf(stdprn,"%s",com);
    for ( y = 0; y <= CntY; y++)
    {
        /*first point*/
        if ( y < 1)
        { delay(500);
          i=1;
          read();/*access*/
          printf("\007");
        }
        /*if y is not equal to last point of scanning and not in the first row*/
        if ( y != 0 )
        if (( CntY != 0 )||( y != CntY ))
        {
            sprintf(com,"PR0,%d;",argv[3]);
            fprintf(stdprn,"%s",com);
        }
        /*if y is in other row*/
        if ( y >= 1 )
        { delay(500);
          i++;
          read();/*access*/
          printf("\007");
        }
        /*scanning in x axis (right direction)*/
        if (endp)
        for ( x = CntX-1; x >= 0; x--)
        {
            sprintf(com,"PR-%d,0;",argv[3]);
            fprintf(stdprn,"%s",com);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร if (endp) ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อทางเจ้าหน้าที่ลูกค้าประจำศูนย์บริการ

```

        {
            sprintf(com,"PR-%d,0;",argv[3]);
            fprintf(stdprn,"%s",com);

```

```

        { delay(500);
          i++;
          read();/*access*/
          printf("\007");
        }
      }
      endp = 0;
    }
/*scanning in x axis(left direction)*/
else
{
  for ( x = 0; x <= CntX-1; x++)
  {
    sprintf(com,"PR%d,0;",argv[3]);
    fprintf(stdprn,"%s",com);
    { delay(500);
      i++;
      read();/*access*/
      printf("\007");
    }
  }
  endp = 1;
}
}
void abb()
{
  /******normalize phase*****/
  if (phas != 0)
  {
    printf("[choose one choice...]\n");
    printf("1.normalize by the value of medium point\n");
    printf("2.normalize by the value of up-left point\n");
    printf("3.normalize by the value of up-right point\n");
    printf("4.normalize by the value of down-left point\n");
    printf("5.normalize by the value of down-right point\n");
    scanf("%d",&nnor);
    if (nnor==1)
    {
      medium();
      normal_phas();
    }
    else if (nnor>1)
    {
      if (nnor>5) { printf("<out of menu>(..abb(..))\n");
        printf("\007");
        abb();
      }
      medium2();
      normal_phas();
    }
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
}
void main()
{
char cali,both;
initialize();
meas_setup();
select_freq();
/** select to calibrate or not ***/
printf("do you want to calibrate??(y=yes!/any key=no!)\n");
cali = getch();
if (cali=='y')
{ calibrate();
}
marker_freq();
scanner();
printf("\n\n\n");
/** if you choose phase you must *****/
/** saving before normalize phase.*/
if ( phas!=0 )
{ printf("[ save before normalize ]\n");
printf("\007");
printf("press [ENTER] to cont..\n");
getch();
printf("Do you want to save both of channel?..(y/n)..\n");
printf("y= save ch1 and ch2\n");
printf("n= save only ch. that use phase measurement\n");
both = getch();
if (both=='y') save();
else saves();
abb();
}
/** save after normalize and root2 ( if you choose phase) ***/
/** or save if you're not choose of phase) *****/
printf("\n\n\n");
printf("!! save data++ !!\n");
printf("\007");
printf("press [ENTER] to cont..\n");
getch();
save();

printf("end of program :} ");
sound(100);
delay(300);
nosound();
getch();
}

```

เอกสารนี้จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความเกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์

1. สุทธิพล สุทธิศิลป์, ศราชัย แสงนิมม และโมไนย ไกรฤกษ์, “การออกแบบระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18, ม.เทคโนโลยีมหานคร, หน้า 328-333, พฤศจิกายน 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

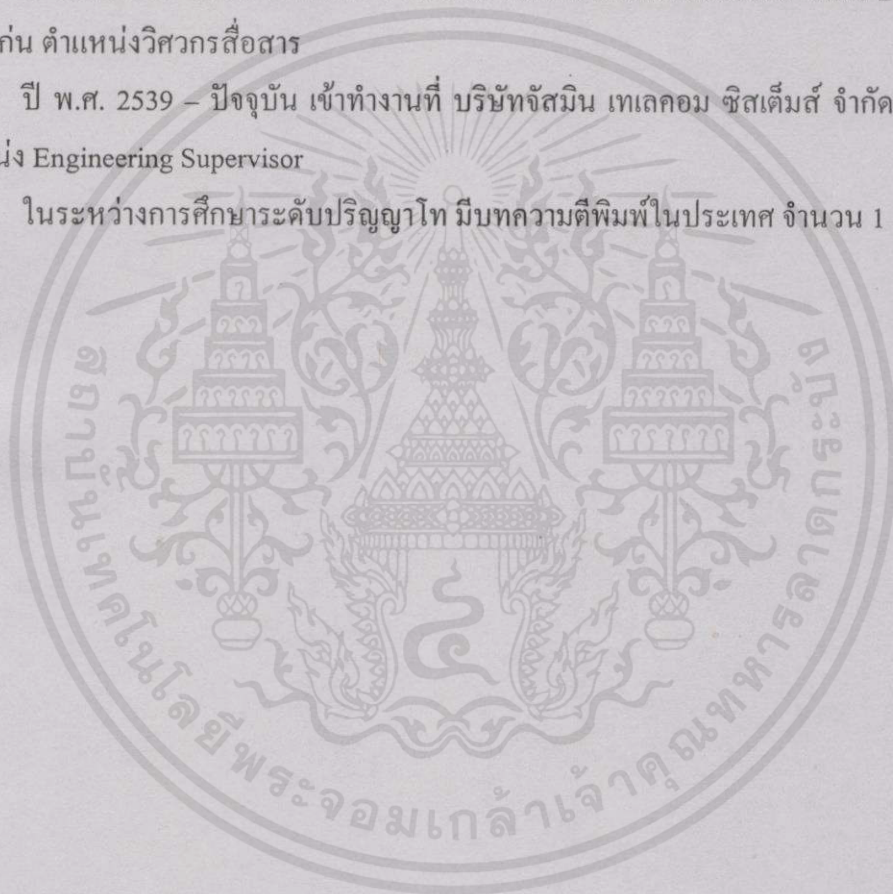
นายสุทธิพล สุทธิศิลป์ เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2534

เริ่มต้นทำงานในปี พ.ศ. 2534 ที่ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ตำแหน่งวิศวกรเทคโนโลยีซีเมนต์

ปี พ.ศ. 2535 - 2538 เข้าทำงานที่ บริษัทเอสเซล เอ็นจิเนียริง เซอร์วิส จำกัด ประจำที่จังหวัดขอนแก่น ตำแหน่งวิศวกรสื่อสาร

ปี พ.ศ. 2539 – ปัจจุบัน เข้าทำงานที่ บริษัทจัสมิน เทเลคอม ซิสเต็มส์ จำกัด ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง Engineering Supervisor

ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโท มีบทความตีพิมพ์ในประเทศ จำนวน 1 บทความ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้