

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศสะท้อนแบบมุม
CORNER REFLECTOR ANTENNA

โดย



T104365

นส.กนกกรัตน์ ชุมแสงวาปี 48012001

นส.วรรณรินทร์ ช่างเชื้อ 48012032

นายอรรถวุฒิ วานิช 48012046

7/35
2552

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...104365
วัน,เดือน,ปี... 2 พ.ศ. 2552

b. 1210226x
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม
ผ่านการตรวจรับแล้ว
ผู้ตรวจ
(ลงชื่อ).....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ปรากฏที่ไปใช้

สายอากาศสะท้อนแบบมุม
CORNER REFLECTOR ANTENNA

โดย

นส.กนกรัตน์ ชุมแวงวาปี 48012001

นส.วรรณรินทร์ ช้างเชื้อ 48012032

นายอรรถวุฒิ วานิช 48012046

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศสะท้อนแบบมุม

Corner Reflector Antenna

ผู้จัดทำ

- | | |
|-----------------------------|----------|
| 1: น.ส.กนกรัตน์ ชุมแวงวาปี | 48012001 |
| 2: น.ส.วรรณรินทร์ ช้างเชื้อ | 48012032 |
| 3: นายอรรถวุฒิ วานิช | 48012046 |



(รศ.ดร. สมพล โกศลวิตรี)



(ผศ.ดร. ชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสะท้อนแบบมุม

Corner Reflector Antenna

โดย นส.กนกรัตน์ ชุมแวงวาปี 48012001

นส.วรรณรินทร์ ช้างเชื้อ 48012032

นายอรรถวุฒิ วาณิช 48012046

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

ได้ทำการออกแบบ และสร้างสายอากาศ ชนิด การแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ในย่านความถี่ กว้างยิ่งยวด (3.1 GHz, 4.9 GHz, 6.8 GHz, 8.7 GHz, 10.6GHz) พร้อมทำการทดสอบ คุณสมบัติในด้าน การสูญเสียย้อนกลับ, อัตราขยาย, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เปรียบเทียบกับผลจำลองโดยใช้ โปรแกรม CST .

ABSTRACT

This project presents the design, fabrication of unidirectional antenna in UWB system (3.10 GHz,4.9 GHz,6.8 GHz,8.7 GHz,10.6GHz.). The experimental results of gain , radiation pattern and return loss and compared with CST program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญต่อ

2.4	สมการของสนามที่แพร่กระจายจากตัวสายอากาศ	18
2.4.1	สมการเวกเตอร์ของคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา	18
2.5	โครงสร้างของสายอากาศ	19
2.5.1	สายอากาศแบบสองทิศทาง	19
2.5.1.1	โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม	19
2.5.2	สายอากาศแบบทิศทางเดียว	21
2.5.2.1	โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม	21
2.6	ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	21
2.6.1	กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 180°	23
2.6.2	กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 90°	24
2.6.3	กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 60°	25
2.6.4	กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 45°	26
2.6.5	กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 30°	28
2.7	เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบน Ultrawideband (UWB)	30
2.7.1	ลักษณะเด่นของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์	31
2.7.1.1	ทนทานต่อปรากฏการณ์สัญญาณหลายเส้นทาง	31
2.7.1.2	มีโอกาสถูกรบกวนจับและดักสัญญาณต่ำ	31
2.7.1.3	มีความสามารถใช้แถบความถี่ซ้อนทับกับระบบอื่นได้	32
2.7.1.4	มีความสามารถในการวัดพิสัยที่มีความเที่ยงตรงสูง	32
2.7.1.5	มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร หรือ เอฟซีซี(FCC)	32
2.7.1.6	มีความซับซ้อนในการสร้างและต้นทุนในการผลิตต่ำ	32
2.7.1.7	มีความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ดี	32
2.7.2	การนำไปประยุกต์ใช้งานของระบบสื่อสาร	33
2.7.3	ข้อดีของ UWB	33
2.7.4	หลักการพื้นฐานของอัลตราไวด์แบนด์	34
2.7.5	โครงสร้างพื้นฐานเครื่องส่งและเครื่องรับอัลตราไวด์แบนด์	34
2.7.6	การประยุกต์เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบน	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญต่อ

บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
3.1 การคำนวณ	37
3.2 การสร้างสายอากาศมุมสะท้อน 90°	37
3.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	39
3.3 การสร้างสายอากาศแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบภายในแผ่นสี่เหลี่ยมแบบขนาน	39
3.4 การทดสอบแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ	47
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การวัดคุณสมบัติสายอากาศ	59
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	59
4.1.2 ขั้นตอนการวัด	59
4.2 ขั้นตอนการวัดระนาบของสนามที่มากกระทบของสายอากาศตัวรับ และตัวส่ง	60
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	60
4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง	61
4.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance)	63
4.4 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss)	64
4.5 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)	66
4.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)	69
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	72
5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินโครงการ	72
5.3 แนวทางการแก้ปัญหา	72
5.4 สรุปผล	73
กิตติกรรมประกาศ	
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication)	1
รูปที่ 1.2	การเปรียบเทียบแบนด์วิธของอุตสาหกรรมไร้สายกับคลื่นชนิดอื่น	2
รูปที่ 1.3	ขั้นตอนการทำปฏิญานิพนธ์	3
รูปที่ 2.1	นิยามการทำงานของสายอากาศ (ก) ในภาคส่ง (ข) ในภาครับ	4
รูปที่ 2.2	ระบบพิกัดค่าคงที่ขอบ	6
รูปที่ 2.3	ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	7
รูปที่ 2.4	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมนิไดเรกชันแนล)	8
รูปที่ 2.5(a)	โลบต่างและบีมิวิตซ์ของรูปแบบการแพร่กระจายสายอากาศ	9
รูปที่ 2.5(b)	รูปแบบการแพร่กระจายในแบบลิเนียร์	9
รูปที่ 2.6	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	10
รูปที่ 2.7	แสดงการผิดพลาดของหน้าคลื่นเมื่อทดสอบที่ระยะใกล้	11
รูปที่ 2.8(a)	มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกัน	15
รูปที่ 2.8(b)	มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกัน	15
รูปที่ 2.9	สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม	20
รูปที่ 2.10	โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม	21
รูปที่ 2.11	โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	22
รูปที่ 2.12	ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 180°	23
รูปที่ 2.13	ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°	24
รูปที่ 2.14	ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 60°	25
รูปที่ 2.15	ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 45°	26
รูปที่ 2.16	ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 30°	28
รูปที่ 2.17	แบบการสื่อสาร Ultrawideband	31
รูปที่ 3.1	แสดงบล็อกไดอะแกรมกระบวนการสร้างอุตสาหกรรมไร้สายแบนด์	36
รูปที่ 3.2	สายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ได้สร้างขึ้นจริง	38
รูปที่ 3.3	สายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ได้สร้างขึ้นจริงจากมุมมองด้านข้าง	38
รูปที่ 3.4	สายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ได้สร้างขึ้นจริง 2 ชั้น ที่มีลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกันทุกประการ	39
รูปที่ 3.5	การจำลองการสร้างสายอากาศโดยโปรแกรม CST	40
รูปที่ 3.6	การจำลองการสร้างสายอากาศ, มุมสะท้อน 90° องศาโดยโปรแกรม CST	40
รูปที่ 3.7	ค่าอัตราส่วนการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยโปรแกรม CST	41
รูปที่ 3.8	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพต่อ

รูปที่ 3.9 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz	42
รูปที่ 3.10 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 4.9 GHz	42
รูปที่ 3.11 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 6.85 GHz	43
รูปที่ 3.12 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 8.7 GHz	43
รูปที่ 3.13 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 10.6 GHz	44
รูปที่ 3.14 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 3.1 GHz	44
รูปที่ 3.15 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 4.9 GHz	45
รูปที่ 3.16 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 6.85 GHz	45
รูปที่ 3.17 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 8.7 GHz	46
รูปที่ 3.18 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 10.6 GHz	46
รูปที่ 3.19 ระนาบของสนามที่มอดกกระทบของสายอากาศตัวรับ	47
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	48
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	49
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	49
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	50
รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	50
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	51
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	51
รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	52
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	52
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	53
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	53

สารบัญรูปภาพต่อ

รูปที่ 3.31	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	54
รูปที่ 3.32	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	54
รูปที่ 3.33	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	55
รูปที่ 3.34	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	55
รูปที่ 3.35	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยกที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	56
รูปที่ 3.36	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยกที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	56
รูปที่ 3.37	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยกที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	57
รูปที่ 3.38	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยกที่ความถี่ 8.7GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	57
รูปที่ 3.39	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST	58
รูปที่ 3.40	เส้นทางการเดินของคลื่นจากสายอากาศตัวส่งมายังสายอากาศตัวรับ	58
รูปที่ 4.1	เครื่อง Network Analyzer	59
รูปที่ 4.2	แสดงวิธีการทดลองสายอากาศมุมสะท้อน 90° กับเครื่อง Network Analyzer	62
รูปที่ 4.3	แสดงการทดสอบสายอากาศ	61
รูปที่ 4.4	การทดสอบสายอากาศแบบแบบขนานมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาด ในย่านความถี่อุลตราไวด์แบนด์	62
รูปที่ 4.5	การทดสอบสายอากาศแบบแบบขนานมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยก ในย่านความถี่อุลตราไวด์แบนด์	62
รูปที่ 4.6	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 1	63
รูปที่ 4.7	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 2	64
รูปที่ 4.8	ค่าอัตราส่วนการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ตัวที่ 1	65
รูปที่ 4.9	ค่าอัตราส่วนการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ตัวที่ 2	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพต่อ

รูปที่ 4.10	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 1	67
รูปที่ 4.11	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 2	68
รูปที่ 4.12	กราฟที่ได้จากระนาบมุมกวาดจากการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz	69
รูปที่ 4.13	กราฟที่ได้จากระนาบมุมขยจากการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz	70
รูปที่ 4.14	กราฟการเปรียบเทียบระนาบมุมกวาดจากโปรแกรม CST กับการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1GHz	70
รูปที่ 4.15	กราฟการเปรียบเทียบระนาบมุมขยจากโปรแกรม CST กับการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz	71



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบของเทคโนโลยีไร้สาย	35
ตารางที่ 4.1 ตารางค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss) ตัวที่ 1	65
ตารางที่ 4.2 ตารางค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss) ตัวที่ 2	66
ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบ ตัวที่ 1	67
ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบ ตัวที่ 2	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

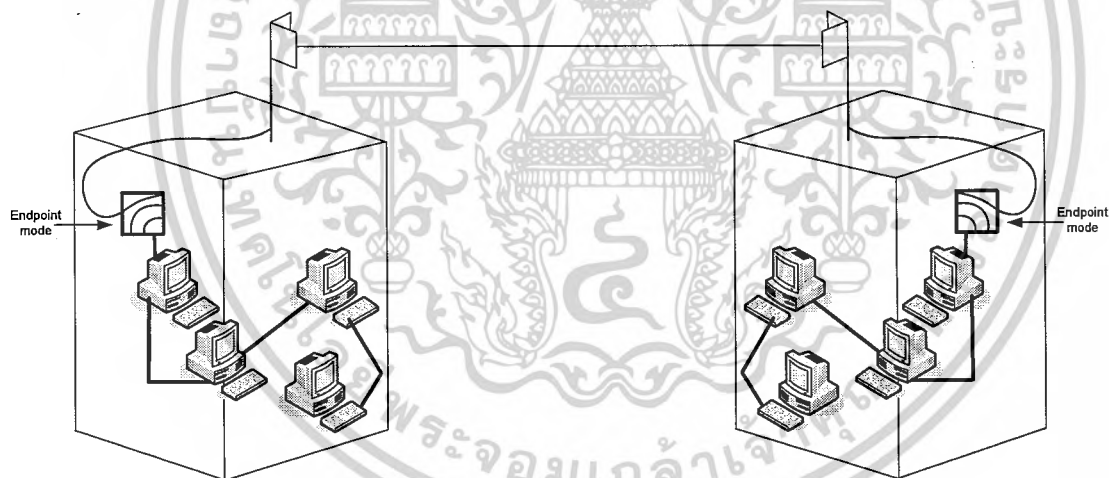
บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ

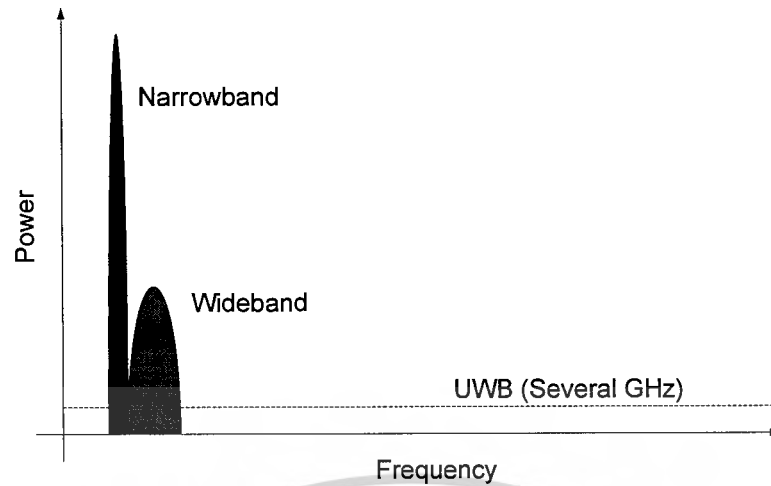
เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ความต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารของมนุษย์นั้นมีมาตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบันและยุคนี้มีการติดต่อสื่อสารยุคของการสื่อสารแบบไร้สายซึ่งเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบไร้สายนั้นมีหลายส่วนที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ส่วนของการรับสัญญาณ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยใช้การทำไดเวอร์ซิตี หรือ การเข้ารหัส เป็นต้น

ใน project นี้จะกล่าวถึง การเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนที่จะขาดเสียมิได้ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย คือ สายอากาศที่ทำหน้าที่แปลงข้อมูลจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งออกอากาศ และยังทำหน้าที่ในการแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นข้อมูลที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยทั่วไป การเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศจะต้องคำนึงถึงระบบที่จะนำสายอากาศนั้นไปใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสายอากาศที่น่าเสนอนี้จะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งมักจะถูกใช้เป็นสายอากาศของสถานีฐานสำหรับพื้นที่ ที่มีลักษณะเป็นทางตรง เช่น อุโมงค์ทางเดิน และสามารถนำไปใช้ในระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication) ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication)

สายอากาศ อนุตร้าไวด์แบนด์ (UWB) เป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นมาเพื่อรองรับการสื่อสารคลื่นอนุตร้าไวด์แบนด์ ซึ่งเป็นคลื่นที่ใช้ความหนาแน่นกำลังในการส่งต่ำแต่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากดังแสดงในรูปที่ 1.2 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คลื่นอนุตร้าไวด์แบนด์มีความจุในการรับส่งข้อมูลได้มากซึ่งทำให้เกิดการส่งข้อมูลได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบแบนด์วิดท์ของอัลตราไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น

และระดับสัญญาณของคลื่นอัลตราไวด์แบนด์ยังมีระดับสัญญาณที่ต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวน ดังนั้นสัญญาณของคลื่นอัลตราไวด์แบนด์จึงไม่ไปรบกวนกับการสื่อสารชนิดอื่น จึงสามารถใช้แถบความถี่ร่วมกับแถบความถี่ของระบบการสื่อสารชนิดอื่นได้ ด้วยคุณสมบัติของการสื่อสารโดยใช้คลื่นอัลตราไวด์แบนด์ จึงต้องใช้สายอากาศที่มีช่วงความถี่ในการทำงานกว้างมากเพื่อให้เหมาะสมกับคลื่นอัลตราไวด์แบนด์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ จึงได้ออกแบบและสร้างสายอากาศที่ความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz รวมทั้งทำการวัดหาคุณสมบัติของสายอากาศ เช่น พารามิเตอร์ S, VSWR, และรูปแบบของสายอากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

Project นี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ สร้าง ทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบอยู่ระหว่างสี่เหลี่ยมแบบขนานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารไร้สายที่ความถี่ 3.1 – 10.6 GHz ในระบบที่ต้องการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สายอากาศที่ต้องการมีค่าสภาพเงาเชิงทิศทางสูง และมีขนาดที่กะทัดรัด ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศจะพิจารณาจากผลการทดสอบค่าระยะบริการว่าได้มากน้อยเพียงใด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

Project นี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบโพรบ ในมาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สาย IEEE 802.15.3a ที่ความถี่ 3.1-10.6 GHz โดยทำการหาระยะทางสูงสุดที่เครื่องรับสามารถติดต่อกับเครื่องส่ง ซึ่งถูกเรียกว่าระยะบริการสูงสุด โดยใช้สายอากาศที่ออกแบบทำหน้าที่เป็นตัวส่งและรับ สายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบอยู่ระหว่างสี่เหลี่ยมแบบขนานที่ออกแบบจะกำหนดให้มุมของตัวสะท้อนเท่ากับ 90 องศา

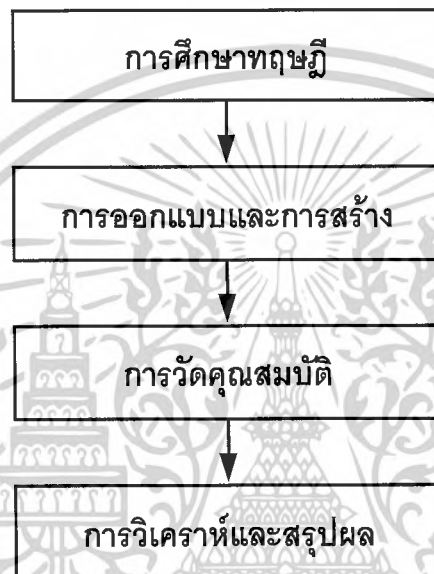
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 องค์ประกอบหลักของโครงการ

โครงการนี้ได้ออกแบบและสร้างสายอากาศเพื่อทำการวิเคราะห์หาถึงคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศ โดยจะศึกษาถึงทฤษฎีสายอากาศเพื่อหาโครงสร้างของสายอากาศที่เหมาะสมกับการสื่อสารคลื่นอุลตราไวด์แบนด์มากที่สุด

1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการศึกษาวางแผนและทำงานตามขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

การศึกษาทฤษฎีอยู่ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่ควรรู้และใช้ประกอบในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมสายอากาศความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีอุลตราไวด์แบนด์

การออกแบบและการสร้างจะอยู่ในบทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการทำสายอากาศ อุลตราไวด์แบนด์

การวัดคุณสมบัติจะอยู่ในบทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการวัดสายอากาศอุลตราไวด์แบนด์

วิเคราะห์และสรุปจะอยู่ในบทที่ 5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดและสรุปผลของการวัดสายอากาศในย่านอุลตราไวด์แบนด์

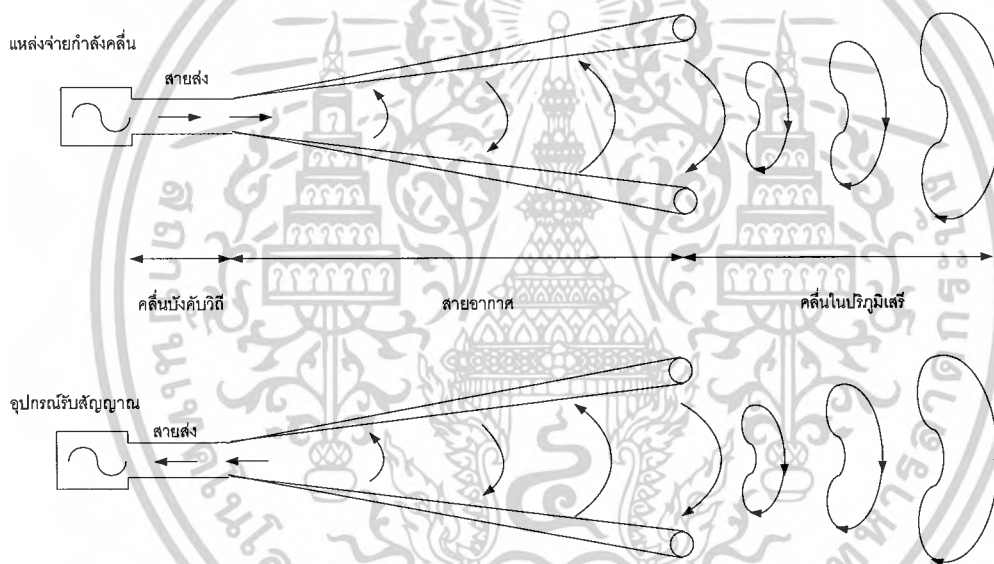
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีสายอากาศ

2.1 ทฤษฎีสายอากาศ

สายอากาศ คือ การแปลงรูปพลังงานกลับไปกลับมาระหว่างพลังงานในลักษณะคลื่นบังคับวิถีในสายส่ง และพลังงานคลื่นปริภูมิเสรี (free space) สายอากาศจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะคลื่นบังคับวิถีไปเป็นคลื่นบังคับวิถีไปเป็นคลื่นในปริภูมิเสรีที่แพร่กระจายไปในทิศทางที่ต้องการเมื่อปฏิบัติเป็นสายอากาศส่ง เมื่อเป็นสายอากาศรับ สายอากาศจะเปลี่ยนคลื่นในปริภูมิที่มาจากทิศทางของสถานีอันพึงประสงค์หรือหรือรวมทั้งบรรดาเครื่องรบกวนทั้งหลายของสายส่งและเข้าสู่ในเครื่องรับในที่สุด นอกจากนี้ยังกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า สายอากาศคือส่วนที่เป็นภาคเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทรอน (เครื่องบังคับวิถี) กับโฟตอน (คลื่นในปริภูมิเสรี)



รูปที่ 2.1 นิยามการทำงานของสายอากาศ (ก) ในภาคส่ง (ข) ในภาครับ

จุดเด่นของสายอากาศเป็นสายอากาศมิได้หยุดอยู่เพียงการมีความสามารถรับหรือแผ่พลังงานไฟฟ้า สายอากาศต้องสามารถเลือกรับหรือส่งพลังงานจากต้นกำเนิดหรือสู่ปลายทางที่กำหนดได้ด้วยเหตุนี้การออกแบบสายอากาศเพื่อปฏิบัติภารกิจที่กำหนดได้จึงมีความหมายมาก เมื่อนำไปวิเคราะห์ ก็จะทราบสมรรถนะของสายอากาศได้ว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนการวิเคราะห์ ก็จะทราบสมรรถนะของสายอากาศได้ว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถหาทางปรับเปลี่ยนการออกแบบ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า

อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะสามารถเริ่มต้นการวิเคราะห์สายอากาศใดๆ ก็ตามจำเป็นที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานบางประการเกี่ยวกับธรรมชาติของการทำงานในสายอากาศสายอากาศชนิดต่างๆความรู้พื้นฐานทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กไฟฟ้า ค่าคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรมสายอากาศ การจัดสายอากาศให้ทำงานเป็นกลุ่ม ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางสายอากาศมีสัมฤทธิ์ผลที่ดี อีกทั้งผู้ศึกษาสามารถวิเคราะห์ต่างๆ ได้เหมาะสมกับสถานการณ์ ในตอนต่อไปจะได้กล่าวถึงธรรมชาติการทำงานของสายอากาศก่อนเป็นอันดับแรกทำให้สามารถหาทางปรับเปลี่ยนการออกแบบ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า

2.2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่น

ในกรณีที่โครงสร้างของปัญหาขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นนั้นจะใช้วิธีการทางด้านความถี่สูงเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา ในปี 1844 ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometrical Optics หรือ GO) หรือเรียกกันว่าทศนศาสตร์เชิงลำคลื่น (Ray Optics) ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกสำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับการกระจายของคลื่นแสง แต่ไม่กล่าวถึงเกี่ยวกับเฟสการโพลาไรซ์และการเลี้ยวเบน โดยจะนำมาใช้เฉพาะกรณีที่ เป็นลักษณะเรขาคณิต หลังจากนั้นแสงได้ถูกแสดงโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสมการของแมกซ์เวลล์ และปัญหาของการเลี้ยวเบนก็ได้ศึกษาอย่างต่อเนื่องโดย Lord Rayleigh, Lord Kelvin, Sir George Stokes, Kirchoff, Helmholtz, Mei, Sommerfeld และนักฟิสิกส์ที่มีชื่อเสียง ซึ่งสามารถที่จะหาเฟส การโพลาไรซ์และปริมาณของสนาม วิธีทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้งานกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้เป็นการประมาณค่าของวิธีการทางด้านความถี่สูงจะเป็นการหาสนามที่เกิดจาก คลื่นที่ตกกระทบ คลื่นที่เกิดจากการสะท้อน และคลื่นที่เกิดจากการหักเห แต่ข้อบกพร่องสำหรับวิธีการนี้ก็คือจะไม่สามารถทำนายคลื่นบริเวณเงาได้อย่างถูกต้องเนื่องจากผลที่เกิดจากบริเวณขอบ การคิดผลของการเลี้ยวเบนบริเวณนี้ถูกขยายผลจากวิธีทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตโดย Joseph Keller

ในปี 1953 และทฤษฎีของ Keller เป็นที่รู้จักกันในนามของทฤษฎีเรขาคณิต (Geometrical Theory of Diffraction หรือ GTD) สามารถทำนายสนามที่เลี้ยวเบนบริเวณเงาได้แต่จะมีข้อเสียคือ บริเวณรอยต่อเงาไม่มีความต่อเนื่อง ในปี 1974 Kouyomajian และ Pathak ได้นำเสนอทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอ (Uniform Theory of Diffraction หรือ UTD) ถึงแม้ว่าจะมีข้อบกพร่องอยู่แต่ก็สามารถชดเชยได้อย่างเช่น กระแสสมมูล (Equivalent Current) ใช้ในการคำนวณหาสนามที่จุดตะแคง (Caustic) การเลี้ยวเบนแบบชัน (Slope Diffraction) ใช้เมื่อสนามตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือมีค่าเป็นศูนย์ และคิดผลรวมเนื่องจากการเลี้ยวเบนลำดับสูงเพื่อให้บริเวณรอยต่อเงามีความต่อเนื่อง

ลักษณะโดยทั่วไปการแบ่งบริเวณของสนามสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันคือ บริเวณแสงและบริเวณเงา และสามารถแบ่งย่อยออกเป็น สามบริเวณด้วยกัน คือ บริเวณแรกและบริเวณที่สองถูกแบ่งโดยบริเวณที่เรียกว่า บริเวณเงาสะท้อน (Reflected Shadow Boundary : RSB) ซึ่งบริเวณแรกจะมีผลที่เกิดจากสนามตกกระทบหรือ สนามแนวตรง (Incident หรือ Direct Field) สนามที่เกิดจากการสะท้อน (Reflected Field) และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน คลื่น (Diffracted Field) บริเวณที่สองนั้นสนามตกกระทบและสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนคลื่น จะมีผลต่อบริเวณนี้ ส่วนบริเวณที่สองและบริเวณที่สาม ถูกแบ่งโดยบริเวณที่เรียกว่า บริเวณเงาตกกระทบ (Incident Shadow Boundary : ISB) ซึ่งบริเวณที่สามนี้จะมีผลของสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้นในบริเวณนี้ การหาสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกตต่างๆก็จะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากขอบเขตที่เกิดขึ้น ซึ่งสนามไฟฟ้ารวมแสดงได้ดังนี้คือ

$$\overline{E}_T(r, \theta, \phi) = \overline{E}_T^i(r, \theta, \phi) + \overline{E}_T^r(r, \theta, \phi) + \overline{E}_T^d(r, \theta, \phi) \quad (2.1)$$

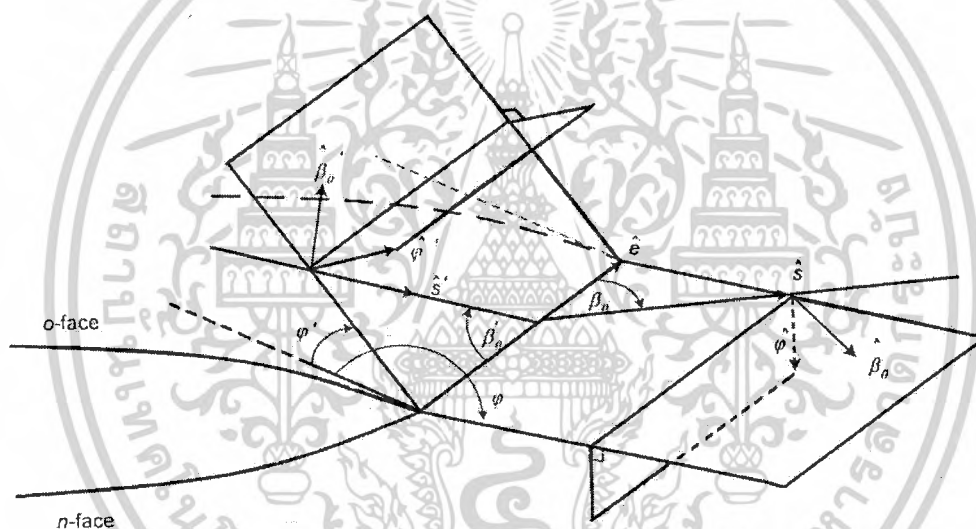
โดยที่

\overline{E}_T^i คือสนามไฟฟ้ารวมที่ตกกระทบ

\overline{E}_T^r คือสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากการสะท้อน

\overline{E}_T^d คือสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

การคำนวณสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน ต้องเริ่มจากการพิจารณาคลื่นที่มาตกกระทบที่ ขอบ (Edge coordinate system) เป็นตัวอย่างอิง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบพิกัดค่าที่ขอบ

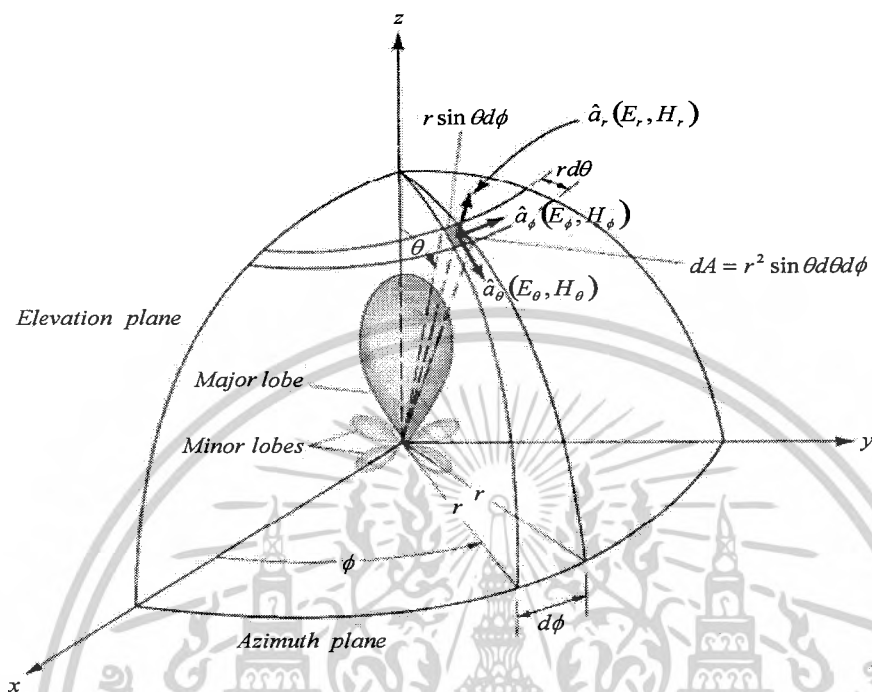
2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.3.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศ (Radian Pattern) หรือรูปแบบสายอากาศ มีความหมาย คือ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือแสดง โดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตาม ฟังก์ชันของ สเปซโคออดิเนต (Space Coordinates) ส่วนมากในกรณีของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนี้จะ กำหนดการคิดในบริเวณที่เป็น สนามระยะไกล (Far-Field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของ โคออดิเนต คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยกำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (flux) , ความเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field-Strength), เฟส (Phase), หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 2.3 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

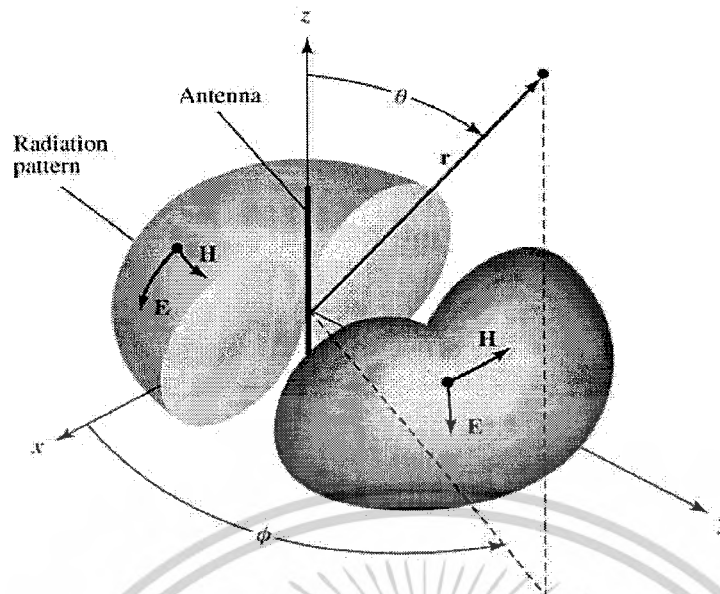
รูปที่ 2.3 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อ เรียกว่า รูปแบบกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่าสนามการแผ่กระจาย (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

2.3.1.1 รูปแบบการแผ่กระจายแบบไอโซโทรปิก ไดรอกซ์แนลและออมนิไดรอกซ์แนล

ตัวแผ่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก(Isotropic Radiation)คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นให้มีการแผ่กระจายคลื่นเท่าๆกันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะแค่แนวความคิดและไม่สามารถเป็นจริงได้ทางกายภาพ แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติแสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้นตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัตินี้คือ สายอากาศแบบออมนิไดรอกซ์แนล (Omnidirectional Antenna) มีคุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมินิไดเรกชันแนล)

ตามรูปจะเห็นได้ว่าแพทเทิร์นแบบนี้ไม่มีทิศทางในแบบอซิมูท (Azimuth Plane) $[f(\phi), (\theta) = \pi/2]$ แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation Plane) $(f(\phi), (\theta = \text{ค่าคงที่}))$ รูปแบบการแพร่กระจายชนิดนี้ออกแบบสำหรับออมินิไดเรกชันแนลเป็นกรณีพิเศษของรูปแบบการแพร่กระจายแบบชี้ทิศทาง

2.3.1.2 โลบของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.4 แสดงรูปการแพร่กระจายแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโอบแบบต่างๆดังนี้

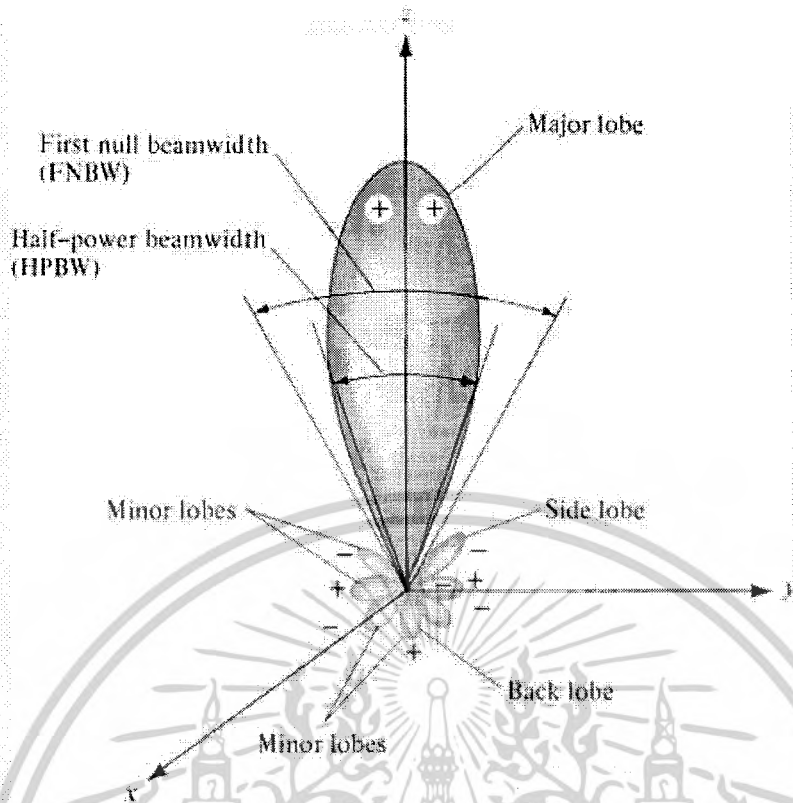
โอบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตาม รูปที่ 2.4 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแยกบีม (Split-beam Antenna)

โอบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ โอบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

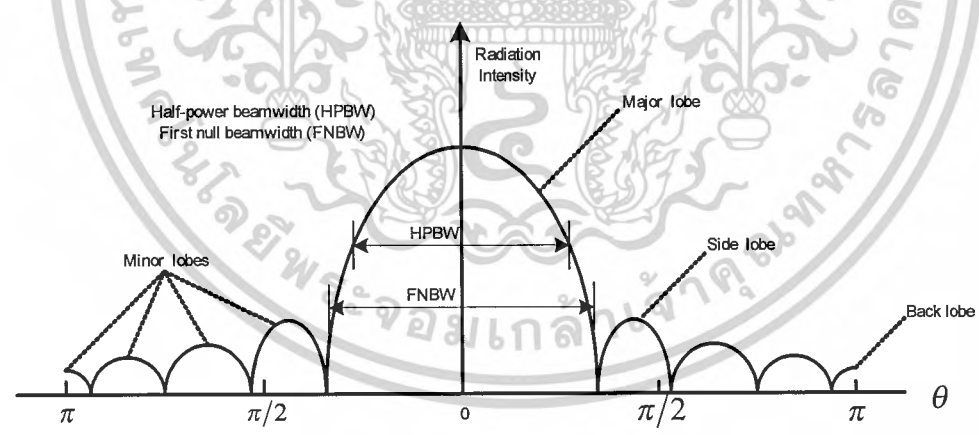
โอบข้างหรือไซด์โอบ (Side Lobe) เป็นโอบย่อยที่ติดอยู่กับโอบหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (Back Lobe) เป็น โอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลักปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโอบเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของโอบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงาน ในโอบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโอบหลัก ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนของไซด์โอบ (Side Lobe Level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้น มักจะต้อง การให้ระดับของไซด์โอบน้อยกว่า -20 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 (a) โลกต่างและบีมวิทท์ของรูปแบบการแพร่กระจายสายอากาศ

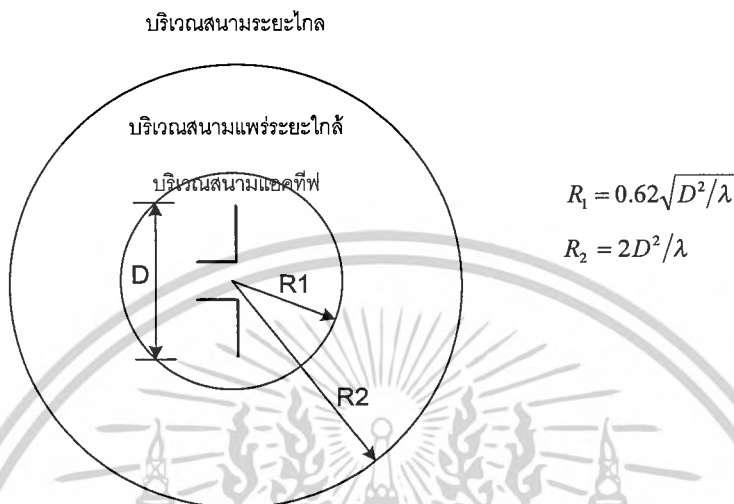


รูปที่ 2.5 (b) รูปแบบการแพร่กระจายในแบบดิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3 บริเวณต่างๆของสนามสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมสายอากาศออกเป็น3ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive – Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating – Near Field) และสนามระยะไกล (Far-Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชไนตรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

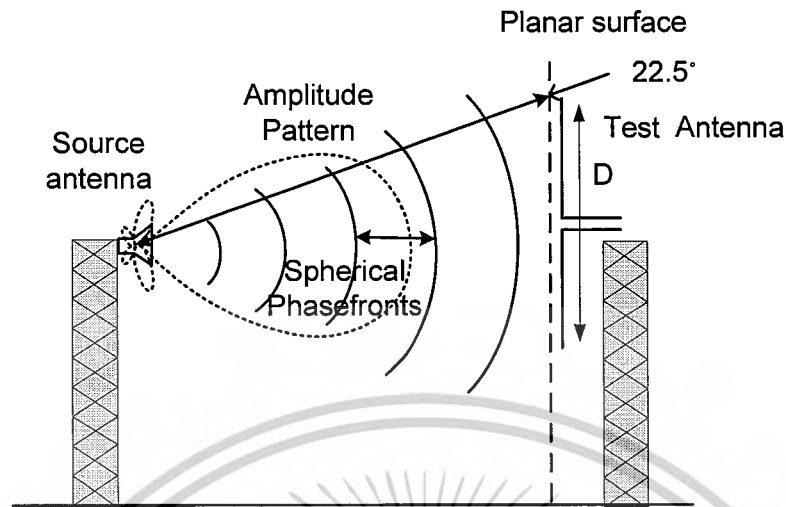
บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $2D^2/\lambda > R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งบริเวณการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

สำหรับการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศซึ่งการแพร่ของสายอากาศมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางของสายอากาศรับเป็น $r > 2D^2/\lambda$ คือ จะต้องอยู่บนสนามไฟฟ้าระยะไกล (Far Field Region) ค่าที่วัดได้จะไม่มีการผิดพลาด เพราะหน้าคลื่นเป็น Plane wave จะมี Phase เท่ากันทุกจุด

ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง(Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในของบริเวณดังกล่าว มีค่า R เท่ากับ $2D^2/\lambda$ และขอบนอกเป็นอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการผิดพลาดของหน้าคลื่นเมื่อทดสอบที่ระยะไกล

Radiation patterns จะประกอบด้วย Amplitude and phase , polarization , gain ของสายอากาศซึ่งค่าต่างๆวัดได้บนพื้นผิวทรงกลม ที่มีรัศมีคงที่ซึ่งตำแหน่งต่างๆจำแนกโดยใช้ Spherical coordinate system โดยทั่วไป Pattern ของสายอากาศจะมี 3 มิติแต่ในความเป็นจริง ไม่สามารถที่จะวัด Pattern ใน 3 มิติ ได้จริง เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเวลาและงบประมาณในการสร้างสูงเกินไป จึงทำการวัดในระนาบ 2 มิติแทนโดยการ ใช้หลักการของ Orthogonal Principle E และ H – plane Pattern ในการวัด pattern 2 มิติ ทำได้โดยการให้มุมใดมุมหนึ่งคงที่แล้วทำให้เปลี่ยนค่าอีกมุมหนึ่ง

2.3.1.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง(Half Power Beam width :

HPBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยของศา

2.3.1.5 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก(First Null Beam width :

FNBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในลำคลื่นหลัก มีค่าลดลงเป็นศูนย์โดยจะวัดในหน่วยขององศา

2.3.2 ความหนาแน่นการแพร่กระจายคลื่น

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น(Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$W = \text{พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น} \quad (\text{W/m}^2)$$

$$E = \text{ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น} \quad (\text{V/m})$$

$$H = \text{ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น} \quad (\text{A/m})$$

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$P = \oint \vec{W} \cdot \vec{ds} = \oint \vec{W} \cdot \vec{n} da \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$P = \text{กำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น} \quad (\text{W})$$

$$da = \text{พื้นที่จิวบนพื้นที่ปิด} \quad (\text{m}^2)$$

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลามักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้นตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลาซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิกในรูป $e^{j\omega t}$ เมื่อกำหนดสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อนแล้วหาความสัมพันธ์กับค่า ξ และ H ชั่วขณะเวลาใดๆได้

$$\xi(x, y, z; t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2.4)$$

$$\vec{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[\vec{H}(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2.5)$$

จาก (2.4), (2.5) และโดยอาศัย $\text{Re}[E e^{j\omega t}] = \frac{1}{2} [E e^{j\omega t} + E^* e^{-j\omega t}]$ สมการ (2.2) จะเขียนได้ให้เป็น

$$\vec{W} = \xi \times \vec{H} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H} e^{j\omega t}] \quad (2.6)$$

เทอมแรกของ (2.6) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา และเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\vec{W}_{av}(x, y, z) = [\vec{W}_{av}(x, y, z; t)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.7)$$

ตัวประกอบ $\frac{1}{2}$ ใน (2.6) และ (2.7) เกิดขึ้นเพราะสนาม E และ H เป็นค่าสูงสุดไม่ใช่ค่า rms จาก (2.5)

กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} Prad = Pav &= \oint_s \vec{W}_{rad} \cdot \vec{ds} \\ &= \oint_s \vec{W}_{av} \cdot \vec{ds} \\ &= \frac{1}{2} \iint_s \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot \vec{ds} \end{aligned} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ความเข้มการแผ่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศต่อมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นและผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.9)$$

เมื่อ

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m²)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศใน ระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{1}{2\eta} [|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2] \end{aligned} \quad (2.9a)$$

เมื่อ

\bar{E} = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นรูปแบบของการแผ่กระจายคลื่นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (2.9) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$Prad = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.10)$$

2.3.4 ไดรเรคทีวิตี

ไดเรคทีวิตีแกนในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นของการกระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิงซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงจะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic point Source)

ไดเรคทีวิตี คือ ค่าของไดเรคทีฟแกนในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือค่าไดเรคทีวิตีของต้นกำเนิดที่มาเป็นไอโซโทรปิกคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สเขียนเป็นสมการได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.12)$$

- D_g = ไคเรคตีวิตีเกน (ไม่มีหน่วย)
 D_0 = ไคเรคตีวิตี (ไม่มีหน่วย)
 U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)
 U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)
 U_0 = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส
 P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะทราบไคเรคตีวิตีเกนและไคเรคตีวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่งเพราะว่ามันมีการแผ่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทุกทางด้วยค่าที่เท่ากันคือ U , U_{max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากันแต่ต้นกำหนด(สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีไคเรคตีวิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ ($0 \leq D_g \leq D_0$)

สายอากาศที่มีโลบล้างแคบๆและมีเพียงโลบเดียว และมีโลบย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้มุมตันของบีมจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกัน

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega} = \frac{4\pi}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.14)$$

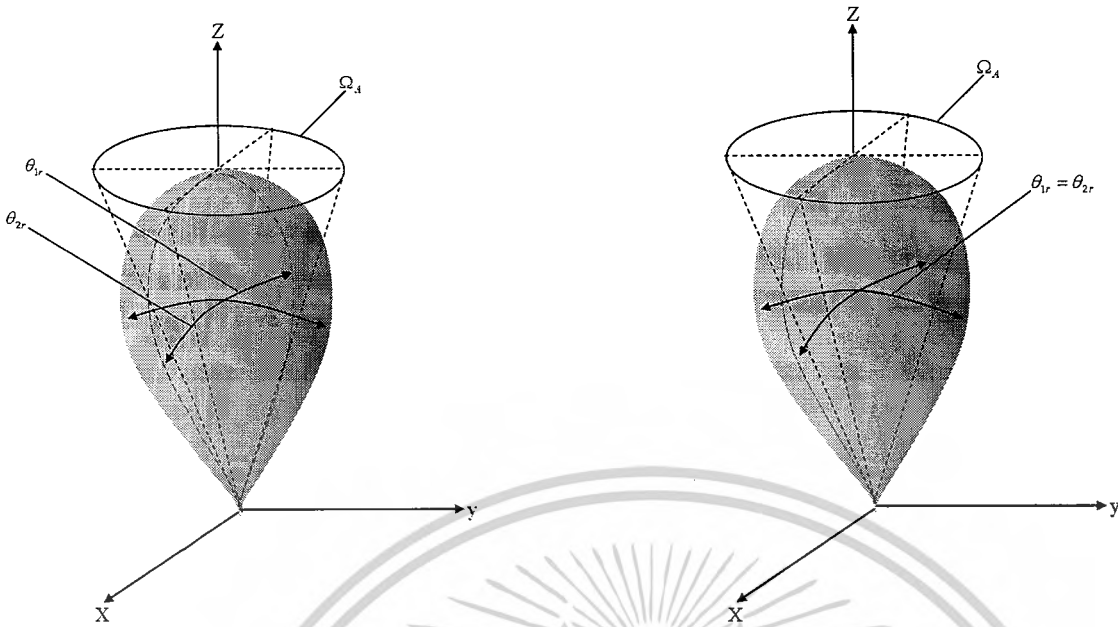
มุมตันของบีม Ω ประมาณได้จาก

$$\Omega = \Theta_{1r} \Theta_{2r} \quad (2.15)$$

- Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ (เรเดียน)
 Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

2.3.5 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional Patterns)

สายอากาศที่มีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียวและมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้มุมตันของคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกันดังแสดงในรูป 2.8(ก) สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หมุนแล้วสมมาตรกันโดยรอบ HPBW ในระนาบใดๆจะเท่ากันดังแสดงในรูป 2.8(ข)



(a) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นไม่สมมาตร

(b) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสมมาตร

รูปที่ 2.8 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและสมมาตรกัน

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\Theta_{1d}} \quad (2.16)$$

มุมตันของลำคลื่น Ω_A ประมาณได้จาก

$$\Omega_A \approx \Theta_{1r} \Theta_{2r} \quad (2.17)$$

Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

เมื่อความรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศา สมการ (2.16) จะสามารถดัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของคลื่นนั้น โดยตรงได้เป็น

$$D_0 \approx \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} = \frac{41253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.18)$$

2.3.6 อัตราขยาย

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากไดเรกทิวิตีโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ไดเรกทิวิตีอธิบายในคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่า เท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วคิดเพาเวอร์เกนที่มีทิศในการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราขยาย} = \frac{4 \pi (\text{ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น})}{(\text{กำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ})} \quad (2.19)$$

$$= 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.20)$$

โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบกับในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าที่สายอากาศที่ใช้เปรียบเมื่อในทิศทางนั้นเมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพลสายอากาศปากแตรแต่ส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็น ไอโซโทรปิกพอยท์เซอร์ที่มีการสูญเสียดังนี้

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไอโซโทรปิกที่ไม่มีการสูญเสีย}) \quad (2.21)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) ความสัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ P_{in} ดังนี้

$$P_{rad} = e_i P_{in} \quad (2.22)$$

เมื่อ e เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้จะได้

$$G_g(\theta, \phi) = e_i \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.23)$$

ซึ่งความสัมพันธ์กับไดเรกทิฟเกนดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_i D_g(\theta, \phi) \quad (2.24)$$

ในทำนองเดียวกันค่าสูงสุดของเกนจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตีโดย

$$G_0 = D_g(\theta, \phi) e_i D_g(\theta, \phi)_{max} \quad (2.25)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกนจะได้

$$G_0 = \frac{30000}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.26)$$

Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

2.3.7 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

กำลังที่ได้ที่ออกจากสายอากาศแพร่ออกสู่อากาศ โดยกำลังที่ส่งออกไปเป็นคลื่นเดินทางไปข้างหน้าและเมื่อคลื่นเดินทางหน้าชนกับคลื่นที่สะท้อนจะทำให้คลื่นเสริมกัน หรือหักล้างกันแล้วแต่ความต่างเฟสของคลื่นทั้งสอง ผลลัพธ์ของคลื่นที่ปรากฏเป็นคลื่นนิ่งก็คือ ผลที่เกิดจากคลื่นเดินทางหน้าและคลื่นที่สะท้อนกลับผสมกัน

2.3.7.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งคือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งอัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหดผิดไปจากสภาวะที่โหดแมตซ์กันมากที่สุดเพียงใดเรหาค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้จากสูตร

$$VSWR = \frac{|V|_{max}}{|V|_{min}} = \frac{1+|\Gamma_L|}{1-|\Gamma_L|} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Γ_L คือสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$\Gamma_L = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.28)$$

เมื่อ Z_1, Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น

2.3.8 S พารามิเตอร์ (S Paramiter)

เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับหาสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับเราสามารถเขียน S พารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$V_1^- = S_{11}V_2^+ + S_{12}V_2^+ \quad (2.29)$$

$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+ \quad (2.30)$$

เมื่อ V_1^+ แรงดันที่จ่ายที่พอร์ตที่ 1 และ V_1^- คือแรงดันสะท้อนกลับที่พอร์ต ที่ 1

เมื่อ V_2^+ แรงดันที่จ่ายที่พอร์ตที่ 2 และ V_2^- คือแรงดันสะท้อนกลับที่พอร์ต ที่ 2

โดยที่ความหมายของ S พารามิเตอร์แต่ละตัวคือ S_{11} และ S_{22} เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่วัดที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 สำหรับ S_{12} และ S_{21} ก็จะเป็นสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านจากพอร์ตที่ 2 มายังพอร์ตที่ 1 และจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 ตามลำดับเราสามารถหา S_{ij} ได้โดยการวัดคลื่นสะท้อนกลับมายังพอร์ตที่ 1 และจากที่ได้ดังกล่าวไปแล้วว่า S_{ij} ก็คือสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับและภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้ V_j^- จะเขียนได้ดังนี้

$$V_j^- = S_{ij}V_i^+ \quad (2.31)$$

หรือ

$$S_{ij} = \frac{V_j^-}{V_i^+} \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (2.33)$$

ในทำนองเดียวกันจะสามารถหาค่า S_{22} ได้ดังนี้

$$S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \quad (2.34)$$

และแทน S_{12} กับ S_{21} จะได้

$$S_{12} = S_{21} \frac{V_1^-}{V_2^+} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \quad (2.35)$$

104365

2.4 สมการของสนามที่แพร่กระจายจากตัวสายอากาศ

2.4.1 สมการเวกเตอร์ของคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา (Vector Wave Equations of Time – Varying Electromagnetic field)

จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ในรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \bar{E} = -\bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (2.36)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}_i + \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.37)$$

ทำการเคิร์ล (curl) ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.36) และ (2.37) โดยสมมติให้อยู่ในตัวกลางเดียวกันสามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \bar{E} &= -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \nabla \times \left(\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) \\ &= \nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial (\nabla \times \bar{H})}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \bar{H} &= \nabla \times \bar{J}_i + \sigma \nabla \times \bar{E} + \epsilon \nabla \times \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \right) \\ &= \nabla \times \bar{J}_i + \sigma \nabla \times \bar{E} + \epsilon \frac{\partial (\nabla \times \bar{E})}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.39)$$

แทนที่สมการ (2.38) ลงในด้านขวาของสมการที่ (2.39) และใช้คุณสมบัติลาปลาเซียนของเวกเตอร์ (Laplacian of vector) ที่แสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{F} = \nabla (\nabla \cdot \bar{F}) - \nabla^2 \bar{F} \quad (2.40)$$

$$\therefore \nabla \times \nabla \times \bar{F} = \nabla (\nabla \cdot \bar{F}) - \nabla^2 \bar{F} \quad (2.41)$$

แล้วสมการที่ (2.41) ลงในด้านซ้ายของสมการที่ (2.38) ได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla (\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} &= -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial}{\partial t} \left[\bar{J}_i + \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \right] \\ \nabla (\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} &= -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial t} - \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.42)$$

จากสมการแมกซ์เวลล์ที่แสดงในรูปของความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \bar{D} = \epsilon \nabla \cdot \bar{E} = q_{ev} \Rightarrow \nabla \cdot \bar{E} = \frac{q_{ev}}{\epsilon}$$

(2.43)

นำสมการที่ (2.43) แทนลงในสมการที่ (2.42) ได้ว่า

$$\nabla^2 \bar{E} = \nabla \times \bar{M}_i + \mu \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \nabla q_{ev} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค่าเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันแทนสมการที่ (2.36) ลงในด้านขวาของสมการที่ (2.39) และใช้คุณสมบัติลาปลาเซียนของเวกเตอร์ที่แสดงในสมการที่ (2.41) แทนลงในด้านซ้ายของสมการที่ (2.39) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\nabla(\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} &= \nabla \times \bar{J}_i + \sigma \left(-\bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-\bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) \\ \nabla(\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} &= \nabla \times \bar{J}_i + \sigma \bar{M}_i - \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (2.45)$$

จากสมการแมกซ์เวลล์ที่แสดงในรูปของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก(magnetic flux density) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \bar{B} = \mu \nabla \cdot \bar{H} = q_{mv} \Rightarrow \nabla \cdot \bar{H} = \frac{q_{ev}}{\mu} \quad (2.46)$$

นำสมการที่ 2.46 แทนลงในสมการที่ 2.45 จะได้ว่า

$$\nabla^2 \bar{H} = -\nabla \times \bar{J}_i + \sigma \bar{M}_i + \frac{1}{\mu} \nabla(q_{mv}) + \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.47)$$

จากสมการที่(2.44) และ (2.47) จะถูกเรียกว่า สมการเวกเตอร์ของคลื่นของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ

สำหรับสภาวะที่เป็นอิสระจากแหล่งจ่าย (source-free) และตัวกลางที่ไม่เกิดการสูญเสีย (lossless media) จะได้ว่า

$$\bar{J}_i = q_{ev} = \bar{M}_i = q_{mv} = 0, \sigma = 0$$

ดังนั้น รูปแบบของสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสมการที่(2.44) และ (2.47) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.48)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.49)$$

โดยทั่วไปแล้วสมการที่ (2.48) และ (2.49) จะเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับการหาเวกเตอร์ของคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

2.5 โครงสร้างของสายอากาศ

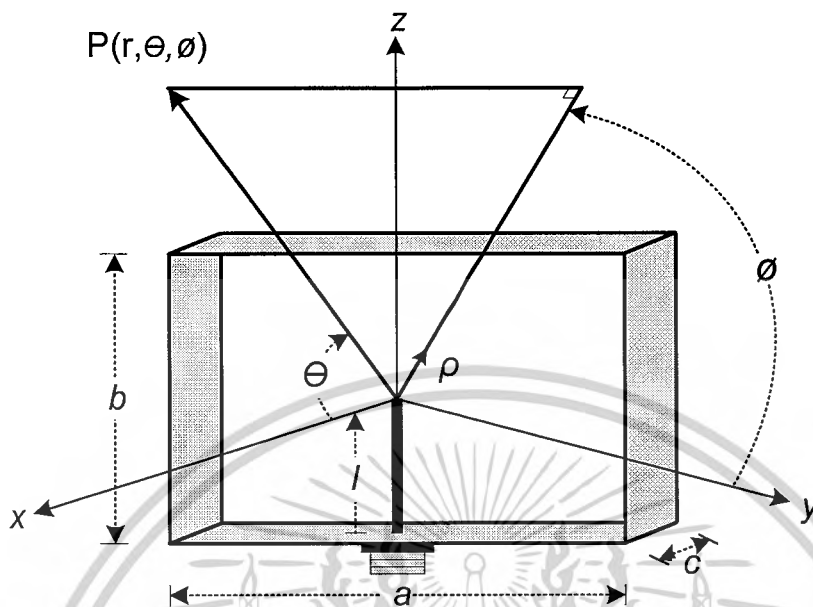
2.5.1 สายอากาศแบบสองทิศทาง

2.5.1.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม

สายอากาศที่วิเคราะห์ประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นความยาว 1 ที่ต่อกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial) โดยผ่านตัวต่อ (Connector) แบบ N - type และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนกรอบสี่เหลี่ยมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความกว้าง ความสูงและความยาวเป็น a b และ c ตามลำดับ ซึ่งโพรมจะวางตามแนวแกน z ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สายอากาศโพรมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม

ในการพิจารณาจะพบว่า วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายในทิศทาง x และ $-x$ และจะแพร่กระจายออกจากขอบของวงแหวนรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ช่องเปิดทั้งสองด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิดทั้งสองด้านนี้จะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่น (Mode) ต่างๆ มากมายที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นในการออกแบบต้องการให้เกิดคลื่นส่งผ่านเพียงโหมดเดียว ซึ่งในที่นี้คือโหมด TE_{10} เป็นโหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) โดยทั่วแล้วโหมดคลื่นอื่นๆ ที่ไม่ใช่โหมดหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหาย (Evanescent Wave) และโหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรมมีค่ามากขึ้นด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกระยะที่ห่างจากโพรมที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่นๆ มีค่าน้อยจนสามารถละเลยได้ เพื่อที่ว่าบริเวณขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้งสองด้านซึ่งเป็นจุดที่คลื่นจะเดินทางออกไปนั้นมีเฉพาะโหมดคลื่นที่ต้องการเพียงโหมดเดียวเท่านั้น ดังนั้นจะต้องกำหนดค่าความยาวของกรอบวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการกำหนดค่าความกว้างของวงแหวนจะต้องทำให้มีค่าความถี่ตัดออฟ (Cut off Frequency) ที่ต่ำสุดเพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักแพร่กระจายออกจากช่องเปิดทั้งสองด้านของกรอบวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าและโหมดคลื่นอื่นๆที่อยู่ติดกับโหมดคลื่นหลักจะต้องถูกตัดออกไป ดังนั้นค่าความกว้างของวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$0.5\lambda < a < \lambda \quad \text{และ} \quad a = 2b$$

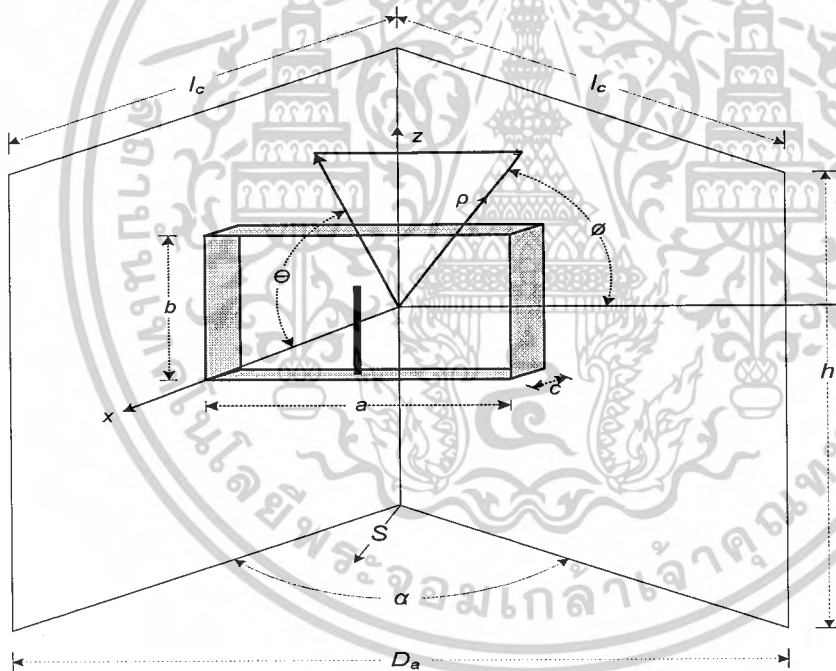
เมื่อ λ คือความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งานโดยค่าความถี่ที่ใช้งานคือ 3.1-10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Antenna)

2.5.2.1 โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม

ซึ่งในโครงการนี้ต้องการนำเสนอสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสามารถทำได้โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเกิดจากแผ่นสะท้อนสองแผ่นมีความยาว l_c ความสูง h ทำมุมกัน α ที่มีความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนเท่ากับ D_a ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนกับวงแหวนสี่เหลี่ยมเท่ากับ s ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งในโครงการนี้ในการคำนวณหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมและตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนจะพิจารณาให้ตัวสะท้อนมีขนาด l_c h และ D_a เป็นอนันต์ และทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวงแหวนเป็นค่าต่างๆ เพื่อหาระยะที่เหมาะสม ซึ่งสายอากาศจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมและนอกจากนี้ ยังได้ทำการพิจารณาในกรณีที่ตัวสะท้อนทำมุมขนาดต่างๆกันด้วยซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

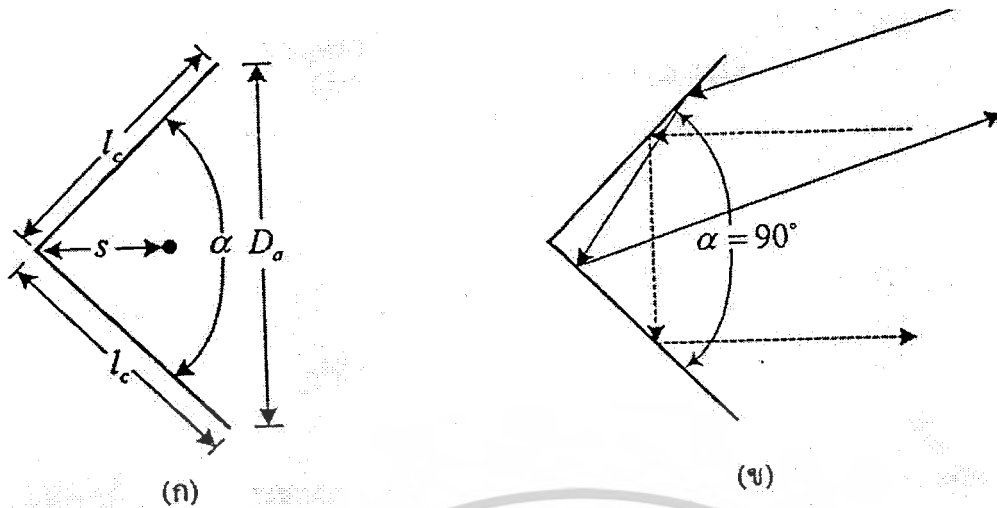


รูปที่ 2.10 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม

2.6 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Corner Reflector)

โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมจะประกอบด้วยแผ่นสะท้อน 2 แผ่นทำมุมกัน ดังรูปที่ 2.11(ก) ซึ่งโครงสร้างของตัวสะท้อนแบบมุมจะทำให้ง่ายซึ่งสัญญาณจะย้อนกลับในทิศทางเดิมที่รับเข้ามาดังแสดงได้ในรูปที่ 2.11 (ข) คือมุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



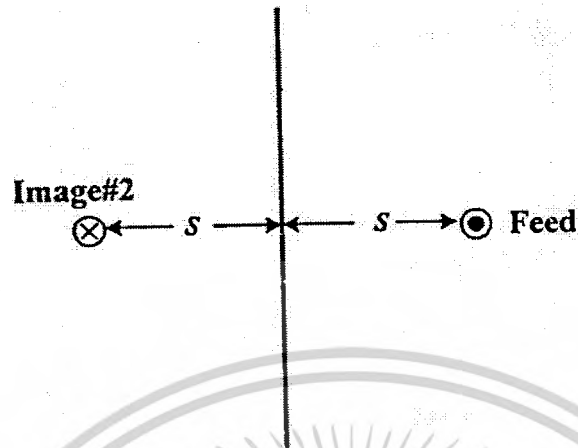
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

โดยในทางปฏิบัติตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่นิยมเลือกใช้ คือ แผ่นสะท้อน 2 แผ่น ทำมุมกัน 90° แต่ก็ยังมีบางงานที่ใช้มุมอื่นๆ โดยประสิทธิภาพของระบบที่ได้จะดูได้จาก ที่ระยะห่างระหว่างจุดยอดมุมกับตัวป้อนสัญญาณ โดยที่ระยะห่างจะเพิ่มขึ้นถ้ามุมของตัวสะท้อนลดลงสำหรับตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ อัตราขยาย (gain) จะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมระหว่างแผ่นระนาบลดลง อย่างไรก็ตามอาจจะไม่เป็นจริงหากขนาดของแผ่นเพลท (plate) มีขนาดจำกัด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายในการพิจารณาจะให้ให้แผ่นเพลท (plate) มีขนาดอนันต์ ($l_c = \infty$) แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าจำกัดความยาว (l_c) และความสูง (h)

โดยให้ขนาดความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนที่ทำมุม (D_a) จะมีค่าเท่ากับ $\lambda < D_a < 2\lambda$ และความยาวของตัวสะท้อนที่มีค่าที่ต่างกันขึ้นกับขนาดของมุมเช่น มุม 90° จะมีความยาวเท่ากับ $l_c = 2s$ ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับจุดยอดของมุม (s) ปกติจะใช้ค่าระหว่าง $\frac{\lambda}{3} < s < \frac{2\lambda}{3}$ และความสูงของตัวสะท้อนปกติจะใช้ประมาณ 1.2 - 1.5 เท่าของความยาวทั้งหมดของตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายจากด้านหลัง ในการทดลองหากเราเพิ่มขนาดของด้านข้างก็ไม่มีผลต่อความกว้างลำคลื่นและค่าสภาพเงาเชิงทิศทาง แต่มันจะเพิ่มแบนวิธ (Bandwidth) และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (radiation resistance) และจะเห็นว่าขนาดของลำคลื่นหลักจากการที่มีขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัดจะกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์

เมื่อทำการพิจารณาขนาดมุมของตัวสะท้อน ขนาดของมุมที่จะเกิดขึ้นได้จะมีค่าเท่ากับ $\alpha = \frac{180}{n}$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจึงพิจารณาที่มุม $\alpha = 180, 90, 60, 45, 30$ โดยพิจารณาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Characteristics) ได้ดังนี้

2.6.1 กรณีที่ตัวสะท้อนกลับทำมุมกัน 180° ($\alpha = 180^\circ$)



รูปที่ 2.12 ตัวสะท้อนกลับแบบมุม 180°

จากรูปที่ 2.12 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อนสัญญาณ (Feed) และสมการของภาพเสมือน (Image) ได้ดังนี้ คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มัลไลซ์ สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2}$$

$$E(r, \theta, \phi) = [e^{+jks \cos \psi_1} - e^{+jks \cos \psi_2}] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.50)$$

เมื่อ

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$$

โดย

$$\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$$

และ

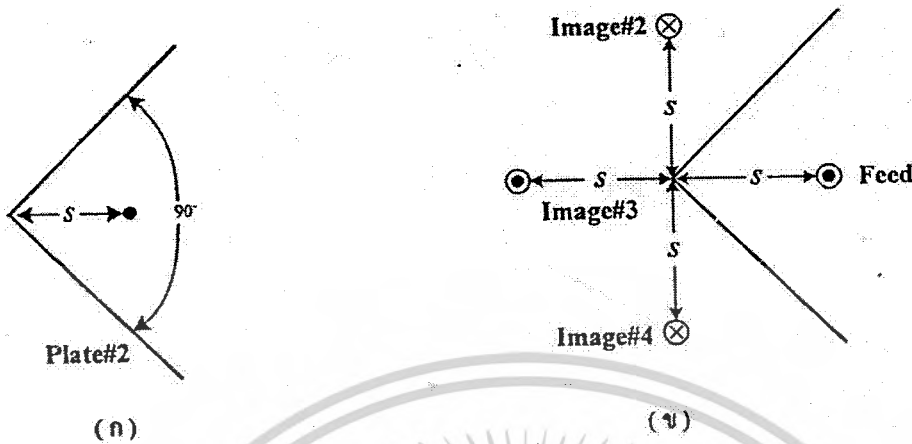
$$\cos \psi_2 = -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \cos \phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 2.50 จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 2j[\sin(ks \sin \theta \cos \phi)] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 90° ($\alpha = 90^\circ$)



รูปที่ 2.13 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°

จากรูปที่ 2.13 (ก) แสดงการสะท้อนไปยังที่ตัวสะท้อนและรูปที่ 2.13 (ข) แสดงภาพเสมือนของตัวป้อนสัญญาณ สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อนสัญญาณและสมการของภาพเสมือนได้ดังนี้ คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi) + E_4(r_4, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์แมลไลซ์สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4}$$

$$E(r, \theta, \phi) = \left[e^{+jks \cos \psi_1} - e^{-jks \cos \psi_2} + e^{+jks \cos \psi_3} - e^{+jks \cos \psi_4} \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.51)$$

เมื่อ

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$$

โดย

$$\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$$

$$\cos \psi_2 = \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_3 = -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \cos \phi$$

$$\cos \psi_4 = -\hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \sin \phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 2.51 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E(r, \theta, \phi) = 2[\cos(ks \sin \theta \cos \phi) - \cos(ks \sin \theta \sin \phi)] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

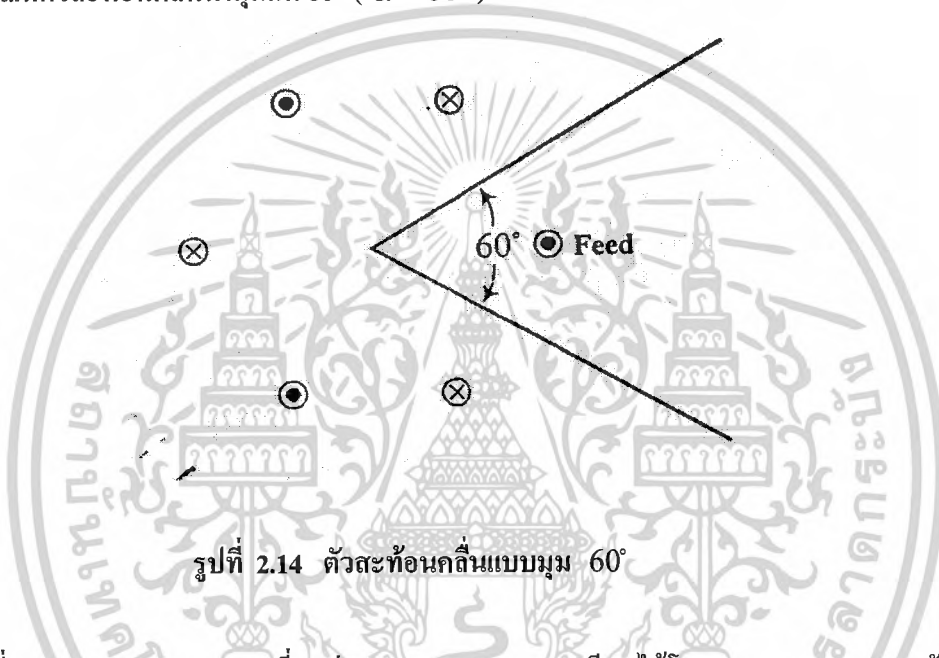
โดยในสนามอิสระที่มีการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2[\cos(ks \sin \theta \cos \phi) - \cos(ks \sin \theta \sin \phi)] \quad (2.52)$$

2.6.3 กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 60° ($\alpha = 60^\circ$)



รูปที่ 2.14 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 60°

จากรูปที่ 2.14 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อน สัญญาณ และสมการของภาพเสมือนได้ดังนี้ คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi) + E_4(r_4, \theta, \phi) + E_5(r_5, \theta, \phi) + E_6(r_6, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มัลไลซ์สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_6}}{r_6}$$

$$E(r, \theta, \phi) = [e^{+jks \cos \psi_1} - e^{+jks \cos \psi_2} + e^{+jks \cos \psi_3} - e^{+jks \cos \psi_4} + e^{+jks \cos \psi_5} - e^{+jks \cos \psi_6}] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.53)$$

เมื่อ $\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$

โดย $\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$

$$\cos \psi_2 = \left(\frac{1}{2} \hat{a}_x + \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cos\psi_3 = \left(-\frac{1}{2}\hat{a}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{a}_y\right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{2}\sin\theta\cos\phi + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta\sin\phi$$

$$\cos\psi_4 = -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin\theta\cos\phi$$

$$\cos\psi_5 = \left(-\frac{1}{2}\hat{a}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{a}_y\right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{2}\sin\theta\cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta\sin\phi$$

$$\cos\psi_6 = \left(\frac{1}{2}\hat{a}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{a}_y\right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{2}\sin\theta\cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta\sin\phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (2.53) จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 4j \sin\left(\frac{X}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{X}{2}\right) - \cos\left(\sqrt{3}\frac{Y}{2}\right) \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

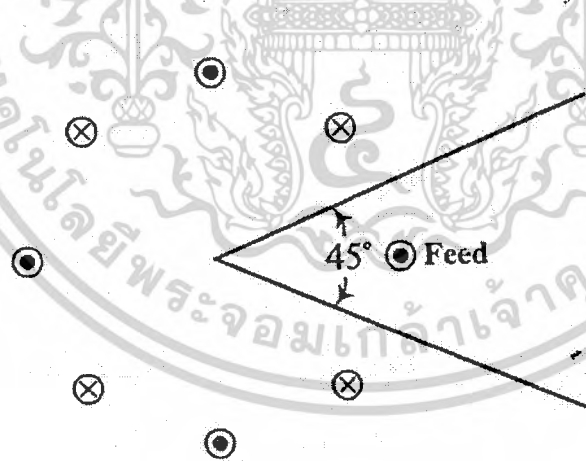
โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 4j \sin\left(\frac{X}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{X}{2}\right) - \cos\left(\sqrt{3}\frac{Y}{2}\right) \right]$$

2.6.4 กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 45° ($\alpha = 45^\circ$)



รูปที่ 2.15 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 45°

จากรูปที่ 2.15 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อน สัญญาณ และสมการของภาพเสมือนได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi) + E_4(r_4, \theta, \phi) + E_5(r_5, \theta, \phi) + E_6(r_6, \theta, \phi) \\ + E_7(r_7, \theta, \phi) + E_8(r_8, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มัลไลซ์สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_6}}{r_6} \\ + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_7}}{r_7} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_8}}{r_8} \\ E(r, \theta, \phi) = \left[\begin{array}{cccc} e^{+jks \cos \psi_1} & -e^{+jks \cos \psi_2} & +e^{+jks \cos \psi_3} & -e^{+jks \cos \psi_4} \\ e^{+jks \cos \psi_5} & -e^{+jks \cos \psi_6} & +e^{+jks \cos \psi_7} & -e^{+jks \cos \psi_8} \end{array} \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.54)$$

เมื่อ

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$$

โดย

$$\begin{aligned} \cos \psi_1 &= \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi \\ \cos \psi_2 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x + \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi \\ \cos \psi_3 &= \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \sin \phi \\ \cos \psi_4 &= \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x + \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi \\ \cos \psi_5 &= -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \cos \phi \\ \cos \psi_6 &= \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x - \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi \\ \cos \psi_7 &= -\hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \sin \phi \\ \cos \psi_8 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x - \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi \end{aligned}$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 2.54 จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 2 \left[\cos(X) + \cos(Y) - 2 \cos\left(\frac{X}{\sqrt{2}}\right) \cos\left(\frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่นคือ

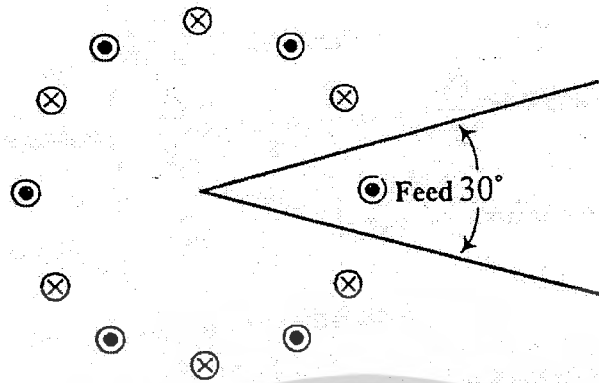
$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2 \left[\cos(X) + \cos(Y) - 2 \cos\left(\frac{X}{\sqrt{2}}\right) \cos\left(\frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 30° ($\alpha = 30^\circ$)



รูปที่ 2.16 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 30°

จากรูปที่ 2.16 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อน สัญญาณ และสมการของภาพเสมือนได้ดังนี้ คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi) + E_4(r_4, \theta, \phi) + E_5(r_5, \theta, \phi) + E_6(r_6, \theta, \phi) \\ + E_7(r_7, \theta, \phi) + E_8(r_8, \theta, \phi) + E_9(r_9, \theta, \phi) + E_{10}(r_{10}, \theta, \phi) + E_{11}(r_{11}, \theta, \phi) + E_{12}(r_{12}, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มัลไลซ์สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_6}}{r_6} \\ + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_7}}{r_7} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_8}}{r_8} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_9}}{r_9} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_{10}}}{r_{10}} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_{11}}}{r_{11}} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_{12}}}{r_{12}} \\ E(r, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} e^{+jks \cos \psi_1} - e^{+jks \cos \psi_2} + e^{+jks \cos \psi_3} - e^{+jks \cos \psi_4} \\ + e^{+jks \cos \psi_5} - e^{+jks \cos \psi_6} + e^{+jks \cos \psi_7} - e^{+jks \cos \psi_8} \\ + e^{+jks \cos \psi_9} - e^{+jks \cos \psi_{10}} + e^{+jks \cos \psi_{11}} - e^{+jks \cos \psi_{12}} \end{bmatrix} f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.56)$$

เมื่อ $\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$

โดย $\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$

$$\cos \psi_2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_x + \frac{1}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_3 = \left(\frac{1}{2} \hat{a}_x + \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cos \psi_4 = \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_5 = \left(-\frac{1}{2} \hat{a}_x + \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_6 = \left(-\frac{3}{\sqrt{2}} \hat{a}_x + \frac{1}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_7 = -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \cos \phi$$

$$\cos \psi_8 = \left(-\frac{3}{\sqrt{2}} \hat{a}_x - \frac{1}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_9 = \left(-\frac{1}{2} \hat{a}_x - \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_{10} = -\hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_{11} = \left(\frac{1}{2} \hat{a}_x - \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_{12} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{a}_x - \frac{1}{2} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 2.56 จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 2 \left[\cos(X) - 2 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} X\right) \cos\left(\frac{Y}{2}\right) - \cos(Y) + 2 \cos\left(\frac{X}{2}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} Y\right) \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่น คือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2 \left[\begin{array}{l} \cos(X) - 2 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} X\right) \cos\left(\frac{Y}{2}\right) \\ - \cos(Y) + 2 \cos\left(\frac{X}{2}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} Y\right) \end{array} \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.57)$$

โดยกำหนดให้ $AF(\theta, \phi)$ คือตัวประกอบแอมพลิจูด

$$X = ks \sin \theta \cos \phi$$

$$Y = ks \sin \theta \sin \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

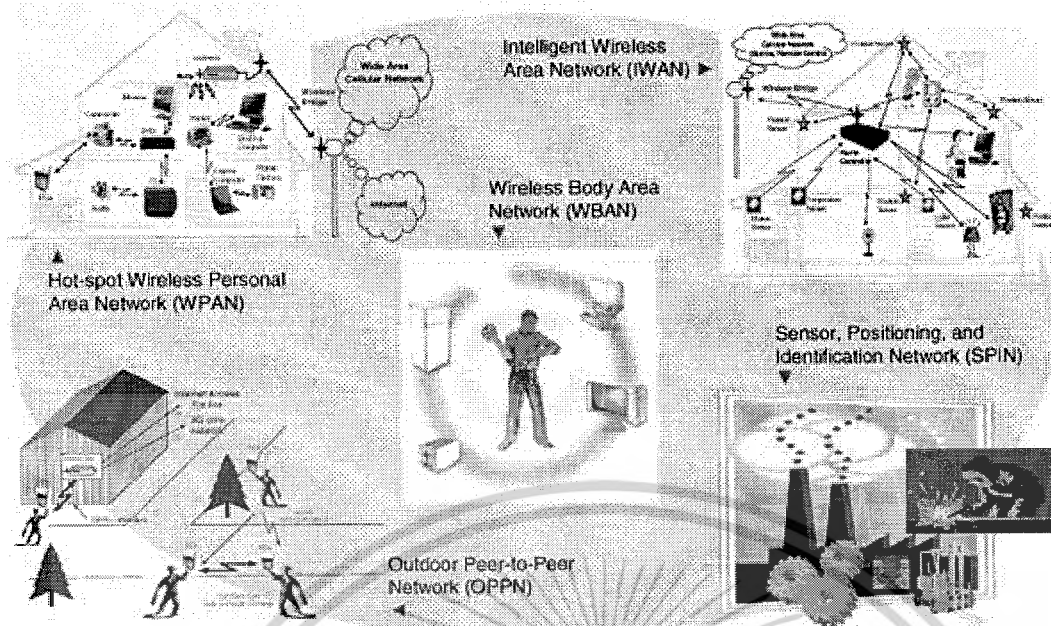
2.7 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ Ultrawideband (UWB)

Ultra Wideband (UWB) Radio เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างรวดเร็วในช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 เป็นต้นมา สืบเนื่องมาจากการอนุญาตการใช้งานแถบความถี่ขนาดใหญ่ถึง 7.5 GHz ในย่านความถี่ 3.1 - 10.6 GHz ของ Federal Communications Commission (FCC) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยระบบใหม่จะมีแถบความถี่กว้างมาก แต่จะมีพลังงานอยู่ในระดับของสัญญาณรบกวน (Noise Floor) คือประมาณ -41.3 dBm ในย่านความถี่เป้าหมาย (3.1 - 10.6 GHz) แถบความถี่ของระบบ UWB จะไปซ้อนทับกับระบบที่มีอยู่เดิม เช่น Wireless Local Area Network (Wireless LAN) เป็นต้น

UWB คือการส่งสัญญาณที่มีแถบความถี่ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 500 MHz หรือมี Fractional Bandwidth ไม่น้อยกว่า 20% ค่า Fractional Bandwidth คือ อัตราส่วนระหว่าง -10 dB Bandwidth กับค่าความถี่กลาง (Central Frequency) จากคำจำกัดความดังกล่าว ถ้าความถี่กลางมีค่ามากกว่า 2.5 GHz แล้ว ค่า Fractional Bandwidth จะมีค่ามากกว่า 500 MHz ระบบส่ง UWB มีพื้นฐานอยู่บนรูปคลื่นที่มีช่วงเวลาสั้นมาก (Ultra Short Waveform) ในระดับของ nanosecond ไม่จำเป็นต้องใช้คลื่นพาหุรูปไซน์ (Sine-Wave Carriers) ดังนั้นระบบ UWB จึงไม่ต้องการกระบวนการ IF และทำงานที่ Baseband โดยตรง

ระบบ UWB ส่วนมาก มุ่งเป้าหมายไปที่อัตราส่งข้อมูลระหว่าง 100 - 500 เมกกะบิตต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับความเร็วของ Wired Ethernet ถึง USB 2.0 มากกว่า Bluetooth ประมาณ 100 - 500 เท่า มากกว่า IEEE 802.11b ประมาณ 20 เท่า และมากกว่า IEEE 802.11a wireless LAN ประมาณ 10 เท่า อัตราส่งข้อมูลของ UWB กำลังถูกจัดมาตรฐานเป็น 3 รูปแบบคือ ความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะการสื่อสารอย่างต่ำ 10 เมตร ความเร็ว 200 Mbps ที่ระยะการสื่อสารอย่างต่ำ 4 เมตร และความเร็ว 480 Mbps ที่ระยะการสื่อสารน้อยกว่า 1 เมตร แนวคิดของมาตรฐานทั้ง 3 รูปแบบคือ ระยะ 10 เมตรจะครอบคลุมขอบเขตของห้องโดยทั่วไป และอาจจะเหมาะกับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ Home Theater ระยะ 4 เมตรจะครอบคลุมระยะห่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น Home Server และ โทรศัพท์ ระยะน้อยกว่า 1 เมตรจะครอบคลุมระยะห่างของอุปกรณ์รอบ ๆ คอมพิวเตอร์

ปัจจุบัน ความต้องการในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานเริ่มมีสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน หรือการเชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อความบันเทิงภายในแหล่งที่พักอาศัย โดยมีเทคโนโลยีไร้สายที่นิยมใช้เพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย ไวไฟ, บลูทูธ และเทคโนโลยีคลื่นสั้น (Short-length) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันได้เกิดกระแสความสนใจในวงกว้างเกี่ยวกับเทคโนโลยี Ultrawideband (UWB) ซึ่งคาดว่าจะเข้ามาเปลี่ยนแปลงระบบการสื่อสารข้อมูลครั้งใหญ่ ด้วยความสามารถที่เหนือกว่าเทคโนโลยีเดิมอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2.17 แบบการสื่อสาร ultrawideband

2.7.1 ลักษณะเด่นของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์

2.7.1.1 ทนทานต่อปรากฏการณ์สัญญาณหลายเส้นทาง (Multipath phenomenon)

เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการสื่อสารไร้สายที่คลื่นสามารถแพร่กระจายไปได้ทุกทิศทาง เป็นผลให้สัญญาณ โดยเฉพาะแบบแถบความถี่แคบมักจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การเดินทางของคลื่นหลายเส้นทาง (Multipath radio propagation) ซึ่งสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณจะเกิดเป็นสัญญาณหลายชุดเดินทางผ่านช่องสัญญาณด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันก่อนที่จะไปถึงเครื่องรับ และเมื่อถึงเครื่องรับ เฟสและระดับความแรงของสัญญาณบางชุดมักมีการเปลี่ยนแปลง โดยอาจเกิดการเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณในเส้นทางอื่น ทำให้การตรวจจับสัญญาณที่เครื่องรับเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก

2.7.1.2 มีโอกาสถูกตรวจจับและตัดสัญญาณต่ำ

สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์นั้นยากต่อการตรวจจับและดักฟังหากไม่ทราบพารามิเตอร์สัญญาณพัลส์ นั้นมาปรากฏที่เครื่องรับในช่วงเวลาใด คล้ายคลึงกันกับสัญญาณการแผ่สเปกตรัมที่ใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ หากไม่ทราบรหัสแผ่ที่ใช้ในการกระจายคลื่นก็จะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้ และเนื่องจากมีการกระจายสัญญาณในช่วงของความถี่ที่กว้าง การทำการแจมมิง (Jamming) สัญญาณในแถบความถี่ที่กว้างมากนั้นกระทำได้ยาก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการสร้างระบบสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยต่อการถูกรบกวนหรือแจมมิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.3 มีความสามารถให้แถบความถี่ซ้อนทับกับระบบอื่นได้

เนื่องด้วยระดับความหนาแน่นของระดับความแรงต่อความถี่ของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีค่าต่ำ (Low power spectral density) ทำให้ระบบสื่อสารที่ใช้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์สามารถทำงานซ้อนทับกับระบบสื่อสารแบบอื่นที่ใช้ความกว้างแถบความถี่แคบที่กำลังใช้อยู่ได้ เนื่องจากสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีการรบกวนต่อสัญญาณระบบอื่นต่ำ

2.7.1.4 มีความสามารถในการวัดพิสัยที่มีความเที่ยงตรงสูง

ด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากในระดับที่ต่ำกว่านาโนวินาที ทำให้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีความละเอียดที่สูงมาก (very high resolution) เท่าที่จะสามารถทำได้สำหรับค่าความถี่กลางหนึ่ง ๆ ซึ่งความละเอียดดังกล่าวเป็นคุณสมบัติที่นำมาใช้ในการวัดความแตกต่างของระยะทางได้เช่นเดียวกับในระบบเรดาร์ โดยเมื่อสัญญาณลูกคลื่นพัลส์ของอัลตราไวด์แบนด์สะท้อนกลับมายังเครื่องรับก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางโดยประมาณที่สัญญาณพัลส์ใช้เวลาในการเดินทางได้อย่างเที่ยงตรงมาก

2.7.1.5 มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร หรือเอฟซีซี (FCC)

จากข้อกำหนดของกำลังส่งที่อนุญาตให้ใช้ได้ของ FCC ระบบอัลตราไวด์แบนด์จึงมีการใช้พลังงานที่ต่ำมาก ทั้งนี้เพื่อไม่ให้รบกวนระบบสื่อสารอื่น โดยระดับความแรงของสัญญาณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ระดับต่ำกว่า -40 เดซิเบล มิลลิวัตต์ต่อหนึ่งเมกกะเฮิรตซ์

2.7.1.6 มีความซับซ้อนในการสร้างและต้นทุนในการผลิตต่ำ

ระบบ UWB สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับคำว่า (All-Digital) โดยต้องการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่าน RF และ Microwave น้อยมาก เครื่องส่ง UWB อย่างง่ายที่สุดคือตัวกำเนิดพัลส์ วงจรกำหนดเวลา (Timing Circuit) และเสาอากาศ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการผสมสัญญาณด้วยการใช้สัญญาณคลื่นพาห้ ทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับมีความซับซ้อนต่ำและมีราคาต่ำ คือขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีขนาดเล็กพอที่จะใส่ลงไปใน Memory Stick หรือ SD Card ชิปที่มีจำหน่าย มีขนาดเล็กพอที่จะใส่ลงไปใน Compact Flash ได้ สิ่งที่ทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับ UWB มีขนาดเล็กเป็นผลมาจากการลดชิ้นส่วน

2.7.1.7 มีความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ดี

โดยการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่ำในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมากของอัลตราไวด์แบนด์จะทำให้สัญญาณสามารถทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่างๆ เช่น วัสดุที่ใช้ในการสร้างอาคาร หรือพื้นดินได้ดีกว่าการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่ใช้คลื่นเฉพาะช่วงความถี่สูงเท่านั้นเป็นสัญญาณที่ส่งออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การนำไปประยุกต์ใช้งานของระบบสื่อสาร

เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ เป็นการส่งผ่านข้อมูลแบบพัลส์ (Pulse) สั้นๆ ผ่านคลื่นวิทยุความถี่กว้าง ทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมากได้ในระยะทางสั้นๆ แต่กลับใช้พลังงานในระดับต่ำเพียง 0.0001 มิลลิวัตต์ต่อเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งทำให้สัญญาณที่ส่งมีความกว้างของแถบสัญญาณ (Bandwidth) กว้างมาก ส่งผลให้มีความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก และทนทานต่อการถูกสัญญาณกวนหรือแจมมิง (Jamming) จะแตกต่างจากเทคโนโลยีไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น Wi-Fi หรือ Bluetooth ที่เป็นการส่งผ่านคลื่นวิทยุความถี่แคบ

Ultrawideband มีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดย Federal Communications Commission (FCC) อยู่ที่ 3.1 - 10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับการสื่อสารผ่านดาวเทียม ทั้งนี้ การกำหนดความถี่ในย่านดังกล่าวจะช่วยป้องกันปัญหาการรบกวนของสัญญาณวิทยุกับเทคโนโลยีสื่อสารภาคพื้นอื่นๆ

นอกจากนี้ ภายในระยะทาง 10 เมตร Ultrawideband ยังสนับสนุนการสร้างพื้นที่โครงข่ายส่วนบุคคลที่เรียกว่า Personal Area Network (PAN) ซึ่งช่วยให้เราสามารถจัดการข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ที่เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างหลากหลาย

อุลตราไวด์แบนเป็นเทคนิคที่ทำให้แบนด์วิธที่กว้างที่นำแบนด์วิธที่ใช้นามาเปรียบเทียบกับความถี่ต่ำโดยจะทำให้มันลดลง เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในอาคารเป็นสำคัญของอุลตราไวด์แบนสำหรับที่ทำให้คลื่นมีขนาดที่เล็กลงแต่มีแบนด์วิธที่สูง โดยใช้พลังงานต่ำในส่วนของ การสูญเสียก็จะทำให้น้อยที่สุดและต้องการแพร่กำลังงาน

อุลตราไวด์แบนสามารถทำงานในระดับที่มีการขยาย คุณสมบัติของการแพร่กระจายกำลังงานต่ำและแบนด์วิธที่กว้างเป็นผลทำให้เกิดการหนาแน่นของกำลังงานต่ำของสัญญาณอุลตราไวด์แบนด์ ด้วยวิธีนี้คลื่นวิทยุอุลตราไวด์แบนจึงสามารถทำงานในสเปกตรัมเดียวกับคลื่นวิทยุแเนโรแบนด์ได้โดยไม่รบกวนกัน

ทำการจำกัดหรือลดโลบที่ไม่ต้องการในส่วนของความห่างของอากาศเมื่อใช้กับการส่งแบบแเนโรแบนด์และรวมไปกับรูปคลื่น (wave form) ของอุลตราไวด์แบนด้วยเหตุนี้จึงใช้สเปกตรัมให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดเหมือนกับการนำสเปกตรัมกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง

2.7.3 ข้อดีของ UWB

1. ระบบ UWB มีช่วงเวลาของรูปคลื่นแบบพัลส์ที่สั้นมาก จนกระทั่งสั้นกว่าระยะห่างระหว่างแต่ละ Multipath Components ส่งผลให้มันมี Fine Time Resolution กล่าวคือไม่เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นเนื่องจากการซ้อนทับกันของแต่ละ Multipath Components จึงสามารถนำ Multipath Propagation มาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากสามารถ Resolve Multipath ได้ดี

2. ย่านความถี่ต่ำของรูปคลื่น UWB สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น อิฐ ซีเมนต์ ได้เป็นอย่างดี

3. ระบบ UWB มีแถบความถี่กว้างมาก ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงมากได้ (High Data Rate)

4. เครื่องส่ง และเครื่องรับของระบบ UWB ไม่ต้องมีส่วนประกอบขนาดใหญ่ และราคาแพง เช่น

Modulator, Demodulator และส่วนประมวลผล IF ทำให้ระบบ UWB มีราคา ขนาด น้ำหนัก และใช้พลังงาน น้อยกว่าระบบสื่อสารแถบความถี่แคบทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 หลักการพื้นฐานของอุตสาหกรรมไร้สาย

ระบบเครือข่ายเฉพาะที่ไร้สายหรือแลนไร้สาย (Wireless LAN: WLAN) นั้นใช้เทคนิคการผสมสัญญาณของรูปคลื่นสัญญาณวิทยุที่มีความต่อเนื่อง ทางเวลากับสัญญาณคลื่นพาห่ที่มีความถี่ที่กำหนดเพื่อใช้ในการส่งและรับสัญญาณ ทำให้พลังงานของสัญญาณถูกรวมอยู่ในช่วงแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์แคบๆ ซึ่งสามารถถูกรบกวนและถูกรวบรวมสัญญาณได้ง่าย สำหรับอุตสาหกรรมไร้สายซึ่งเป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง (Wide band communication) นั้นจะใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก โดยอยู่ในระดับนาโนวินาที (nano second: ns) หรือที่ระดับพิโกวินาที (pico second: ps) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse signal) โดยระบบอุตสาหกรรมไร้สายในการส่งและรับสัญญาณนั้นไม่ใช้คลื่นพาห่ (Carrierless) ในการผสมสัญญาณเหมือนในกรณีของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ แต่จะเป็นการส่งสัญญาณที่มีรูปคลื่นของพัลส์ที่มีรูปคลื่นซึ่งไม่ต่อเนื่องในทางเวลาด้วยอัตราการส่งพัลส์ในระดับจำนวนหลายร้อยล้านพัลส์ต่อหนึ่งวินาทีในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก

2.7.5 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องส่งและเครื่องรับอุตสาหกรรมไร้สาย

ระบบสื่อสารแบบแถบความถี่แคบซึ่งเป็นระบบสื่อสารที่ใช้คลื่นพาห่นั้นสัญญาณข้อมูลจะถูกผสมสัญญาณ (Modulation) กับสัญญาณคลื่นพาห่ที่มีรูปคลื่นต่อเนื่องทางเวลาเพื่อเลื่อนความถี่ของสัญญาณจากความถี่ฐาน(Baseband) ไปยังความถี่ที่สูงขึ้นที่แถบความถี่ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสำหรับอุตสาหกรรมไร้สายนั้นเป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห่ (Carrierless) โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกผสมกับสัญญาณพัลส์ของอุตสาหกรรมไร้สายที่ถูกสร้างขึ้นและส่งผ่านสายอากาศโดยไม่ผ่านวงจรผสมสัญญาณ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อกำเนิดสัญญาณคลื่นพาห่และมิกเซอร์ มีจำนวนอุปกรณ์ที่น้อยกว่าระบบสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ ซึ่งส่งผลให้เครื่องรับส่งแบบอุตสาหกรรมไร้สายมีราคาถูกลง อย่างไรก็ตามการออกแบบวงจรเครื่องส่งและเครื่องรับจะมีความยุ่งยากเนื่องจากการสื่อสารด้วยการใช้สัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาสั้นมากในระดับนาโนวินาทีหรือต่ำกว่านั้น ซึ่งจะมีผลทำให้ระยะเวลาในการรับข้อมูล (Acquisition time) นานมากขึ้น และจำเป็นต้องใช้เครื่องรับแบบคอร์ริเลเตอร์ (Correlator) ซึ่งเป็นวงจรที่เทียบความคล้ายคลึงของสัญญาณแม่แบบกับสัญญาณที่ได้รับเพื่อทำการตรวจจับพลังงานของสัญญาณพัลส์

2.7.6 การประยุกต์เทคโนโลยีอุตสาหกรรมไร้สาย

ระบบเครือข่ายไร้สายภายในบ้าน

เทคโนโลยี UltraWideBand หรือที่เรียกย่อๆว่า UWB กำลังจะเป็นคู่แข่งตัวสำคัญของ Wi-Fi เพราะมีความสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 100 เมกะบิตต่อวินาที ในขณะที่เทคโนโลยีไร้สายชนิดอื่นเช่น Wi-Fi สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 10 เมกะบิตต่อวินาที 802.11b สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 6 เมกะบิตต่อวินาที อย่างไรก็ตาม UWB ก็ยังมีข้อเสียคือระยะทางในการส่งข้อมูลนั้นแค่ระยะทาง 30 – 60 ฟุต หรือ 10 เมตร ในขณะที่ Wi-Fi สามารถทำได้ถึง 100 – 200 ฟุต แม้ระยะทางจะไม่ไกล แต่ UWB อาจสามารถนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ เช่น นำมาแทน สาย USB หรือในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆนอกจากนั้น UWB ก็สามารถนำมาใช้ในการส่งเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณภาพและเสียงจากเครื่องเล่นDVDไปยังTVหรือจากPCไปยังเครื่องเสียงStereoในห้องข้างๆได้อีกด้วย
การใช้งานภายนอกบ้าน

UWB ก็ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น หมอ และ พยาบาลที่จะดึงประวัติคนไข้และผล Xray ระบบไมโครโฟนไร้สายสำหรับใช้ในห้องประชุมที่จะใช้คลื่นวิทยุ ultra-wideband (UWB) แทนการใช้คลื่นวิทยุ FM ซึ่งเทคโนโลยี UWB นั้นจะมีข้อดีกว่าตรงที่มีการรับส่งสัญญาณในความแรงที่ต่ำมากทำให้ยากที่จะมีการดักจับสัญญาณ รวมถึงไม่ได้เป็นการส่งสัญญาณเสียงผ่านสัญญาณวิทยุโดยตรงเหมือนกับระบบ FM นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการเข้ารหัสแบบ 128 บิต เพื่อที่จะลดความเสี่ยงในการดักฟังได้มากขึ้นอีกด้วย และ นอกจากนี้ระบบ SpectralPulse นั้นจะยังรองรับการใช้งานไมโครโฟนพร้อมกันได้สูงสุด 14ชุดโดยไม่มีกรรบกวนกัน

เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายในแบบต่างๆ					
เทคโนโลยี	มาตรฐาน	เครือข่าย	อัตราความเร็ว	ระยะทาง	ความถี่
Wi-Fi	IEEE 802.11a	WLAN	สูงสุด 54Mbps	100 เมตร	5GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11b	WLAN	สูงสุด 11Mbps	100 เมตร	2.4GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11g	WLAN	สูงสุด 54Mbps	100 เมตร	2.4GHz
WiMax	IEEE 802.16d	WMAN	สูงสุด 75Mbps (20MHz BW)	ปกติ 6.4 - 10 กิโลเมตร	Sub 11GHz
WiMax	IEEE 802.16e	Mobile WMAN	สูงสุด 30Mbps (10MHz BW)	ปกติ 1.6 - 5 กิโลเมตร	2 - 6 GHz
WCDMA /UMTS	3G	WWAN	สูงสุด 2Mbps/10Mbps (HSDPA)	ปกติ 1.6 - 8 กิโลเมตร	1800, 1900, 2100MHz
CDMA2000	1x EV-DO 3G	WWAN	สูงสุด 2.4Mbps	ปกติ 1.6 - 8 กิโลเมตร	400, 800, 900, 1700, 1800, 1900, 2100MHz
EDGE	2.5G	WWAN	สูงสุด 348Kbps	ปกติ 1.6 - 8 กิโลเมตร	1900MHz
UWB	IEEE 802.15.3a	WPAN	110 - 480Mbps	10 เมตร	7.5GHz

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบของเทคโนโลยีไร้สาย

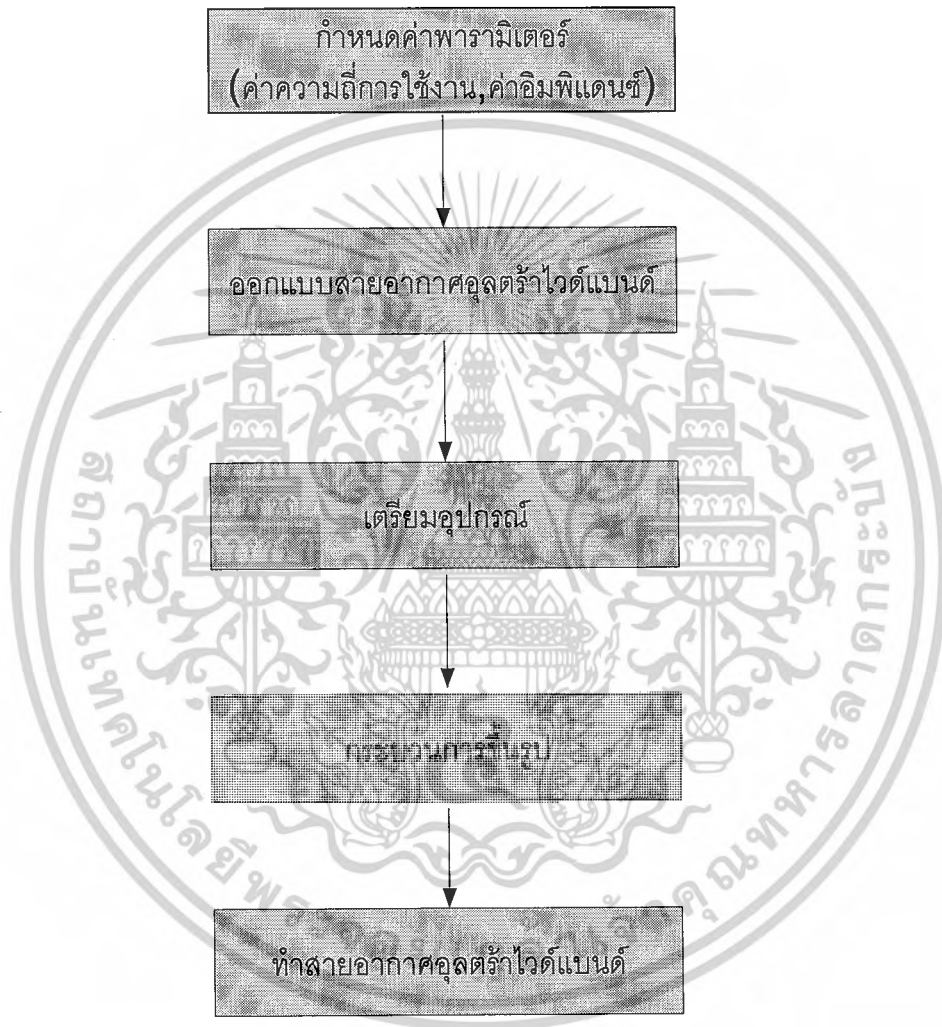
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

บทนำ

ในการสร้างสายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ ประกอบไปด้วยสองส่วน คือการออกแบบสายอากาศและการสร้างสายอากาศ และกระบวนการสร้าง โดยจะมีขั้นตอนการปฏิบัติงานดังนี้



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการสร้างอุลตราไวด์แบนด์

จากบทที่ 2 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศมุมสะท้อน 90° ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณว่ามีความแม่นยำและถูกต้องมากน้อยเพียงใด ซึ่งการทดสอบสายอากาศได้ออกแบบสร้างที่ความถี่ 3.1- 10.6 GHz

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้นจะสนใจในส่วนของ ค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ค่าความกว้าง ความสูง และความยาวของตัวป้อนสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม ค่ารัศมีของสายอากาศ โดยค่าดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสายอากาศ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรกสิ่งต่อไปนี้จะต้องพิจารณาคือ ความยาวของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศ โดยจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของคลื่นที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ

3.1 การคำนวณ

หาค่า Gain จากการคำนวณโดย

$$\begin{aligned} PR \text{ (dBi)} &= PR \text{ (dBm)} + GT \text{ (dBi)} - LT \text{ (dB)} - 32.4 - 20 \log f \text{ (MHz)} - 20 \log d \text{ (Km)} \\ &\quad + GR \text{ (dBi)} - LR \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

ส่วนค่า Dir (Directivity) ที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CST มีค่าดังนี้

ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 3.10 GHz มีค่า Dir เท่ากับ 12.68 dBi

ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 4.90 GHz มีค่า Dir เท่ากับ 8.948 dBi

ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 6.85 GHz มีค่า Dir เท่ากับ 14.30 dBi

ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 8.70 GHz มีค่า Dir เท่ากับ 8.801 dBi

ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 10.60 GHz มีค่า Dir เท่ากับ 11.01 dBi

สามารถหาค่านี้ค่า (η) ได้จากสมการ

$$G = \eta D \quad (3.2)$$

$$10 \log G = 10 \log \eta + 10 \log D \quad (3.3)$$

* (ค่า η สามารถมีค่าได้ ตั้งแต่ 0 ถึง 1)

3.2 การสร้างสายอากาศมุมสะท้อน 90°

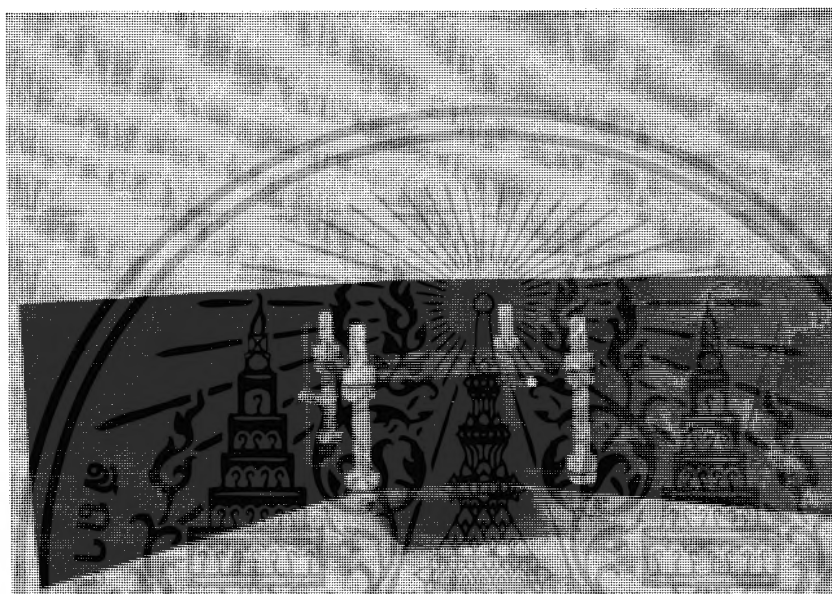
จัดเตรียมอุปกรณ์

1. แผ่นทองแดงขนาดกว้าง 9 ซม. ยาว 9 ซม.หนา 0.1 ซม. 4 แผ่น
2. แผ่นทองแดงขนาดกว้าง 10 ซม. ยาว 20 ซม.หนา 0.1 ซม. 2 แผ่น
3. น็อตตัวผู้ 4 ตัว น็อตตัวเมีย 12 ตัว
4. โพรบวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง ขนาด 2.6 ซม.
5. ตะกั่ว สำหรับบัดกรี และ น้ำยาประสาน
6. ตะไบและกระดาษทรายสำหรับการตัดแต่งสายอากาศ
7. หัวแร้งที่มีกำลังร้อนสูง
8. คอนเนคเตอร์ 2 ชั้น

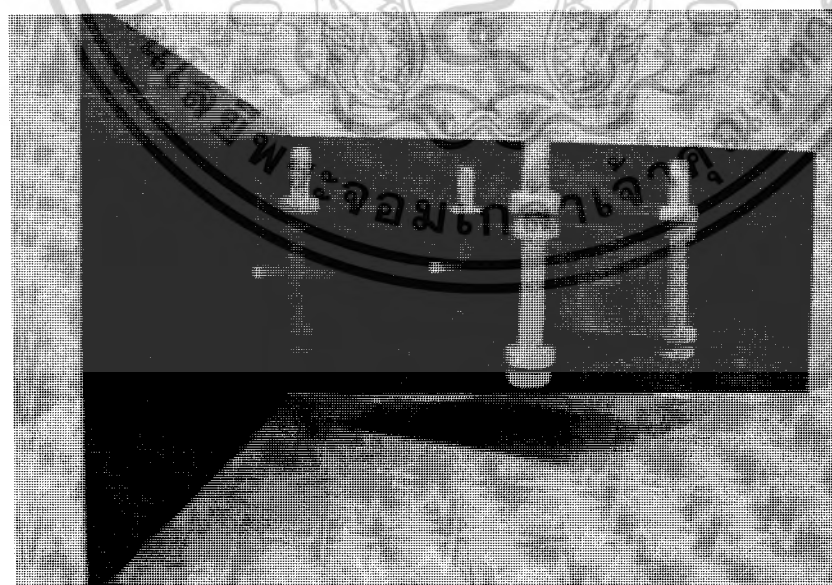
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณได้เลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือ ใช้ความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมเท่ากับ 9 ซม. ความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมเท่ากับ 9 ซม. ความหนาของแผ่นเท่ากับ 0.1 ซม. และหาความยาวโพรบเท่ากับ 2.6 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางโพรบ 2.6 ซม. สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นจริงได้แสดงดังรูปที่ 3.2 และดังรูปที่ 3.3

นอกจากนี้ ได้มีการสร้างสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่สร้างขึ้นจริงเป็นจำนวน 2 ชิ้น ที่มีคุณลักษณะทางกายภาพเหมือนกันทุกประการ ดังรูปที่ 3.3 เพื่อวัดความแม่นยำของชิ้นงาน และเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ทั้งสองว่ามีความเป็นมาตรฐานที่เหมือนกันหรือไม่



รูปที่ 3.2 สายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ได้สร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.3 สายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ได้สร้างขึ้นจริงจากมุมมองด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 สายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ได้สร้างขึ้นจริง 2 ชั้น ที่มีลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกันทุกประการ

3.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง ซึ่งทดสอบที่สนามระยะไกล หรือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิด (สายอากาศส่ง) และสายอากาศรับต้องห่างกันมากกว่า $2D^2 / \lambda$ เมื่อ

D = มิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (เซนติเมตร)

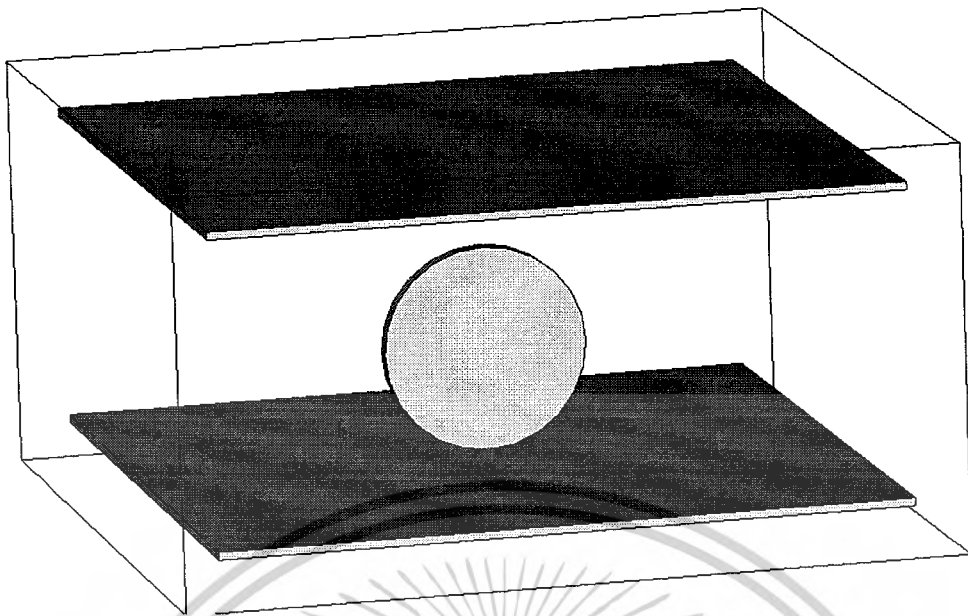
R = ระยะระหว่างสายอากาศ

ซึ่งที่สนามระยะไกลนี้การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง

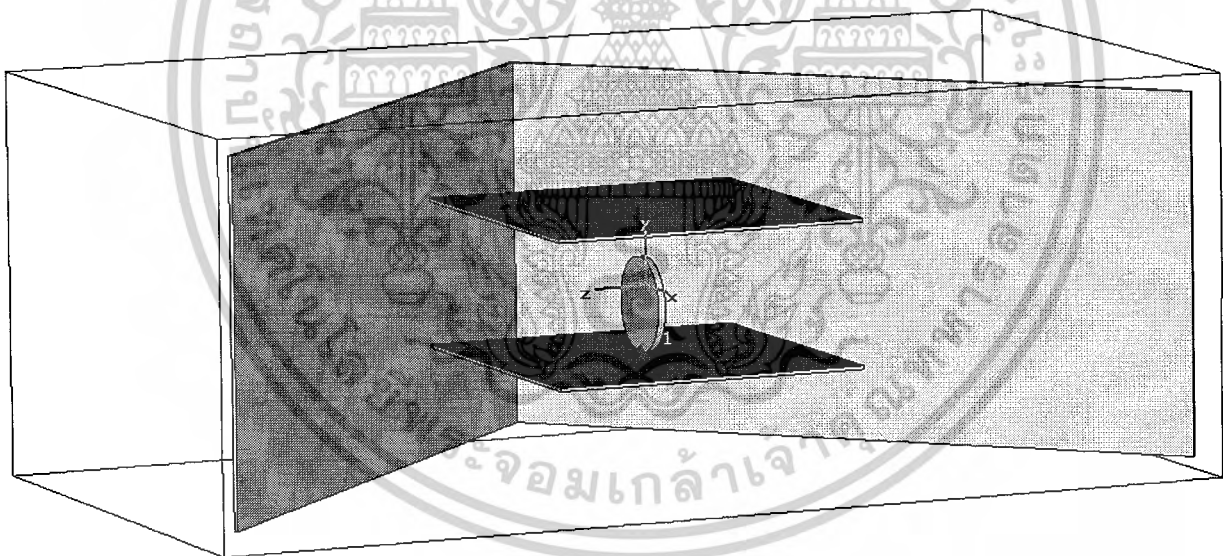
3.3 การสร้างสายอากาศแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบภายในแผ่นสี่เหลี่ยมแบบขนาน

ในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียว กล่าวคือค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาดจะต้องชี้ที่ 0 พร้อมกัน สายอากาศที่ออกแบบมีค่ามุมตัวสะท้อน 90 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมแบบขนานกับตัวสะท้อนเท่ากับ 0.5 ซม. ความสูงและความกว้างของตัวสะท้อนทั้งสองข้างยาวเท่ากับ 10 ซม. และ 20 ซม. ตามลำดับ ส่วนความหนาของแผ่นสะท้อนเท่ากับ 0.1 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

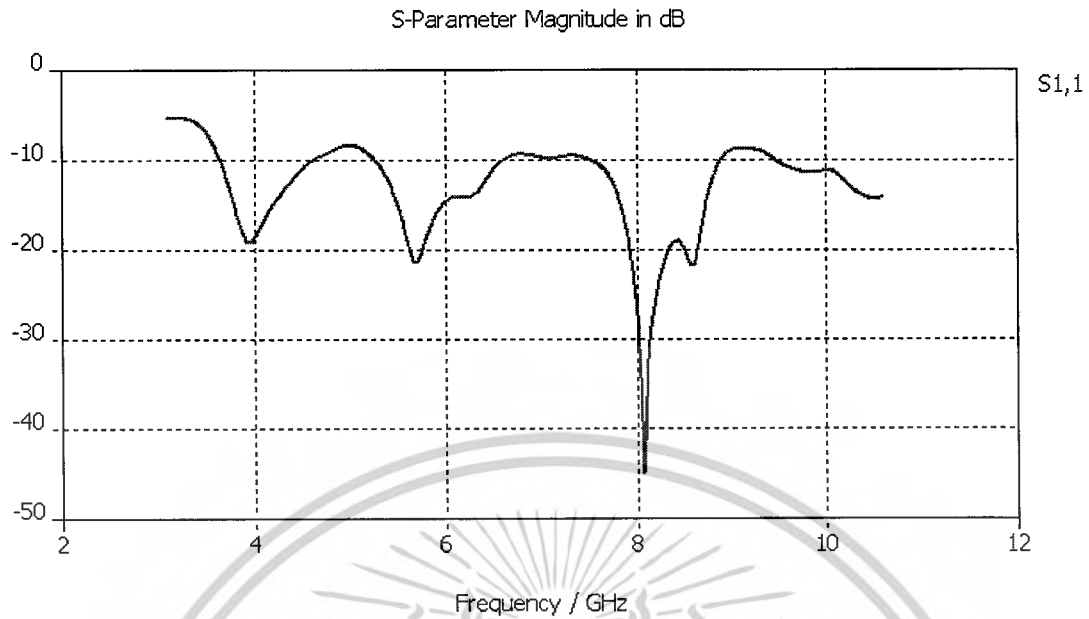


รูปที่ 3.5 การจำลองการสร้างสายอากาศโดยโปรแกรม CST

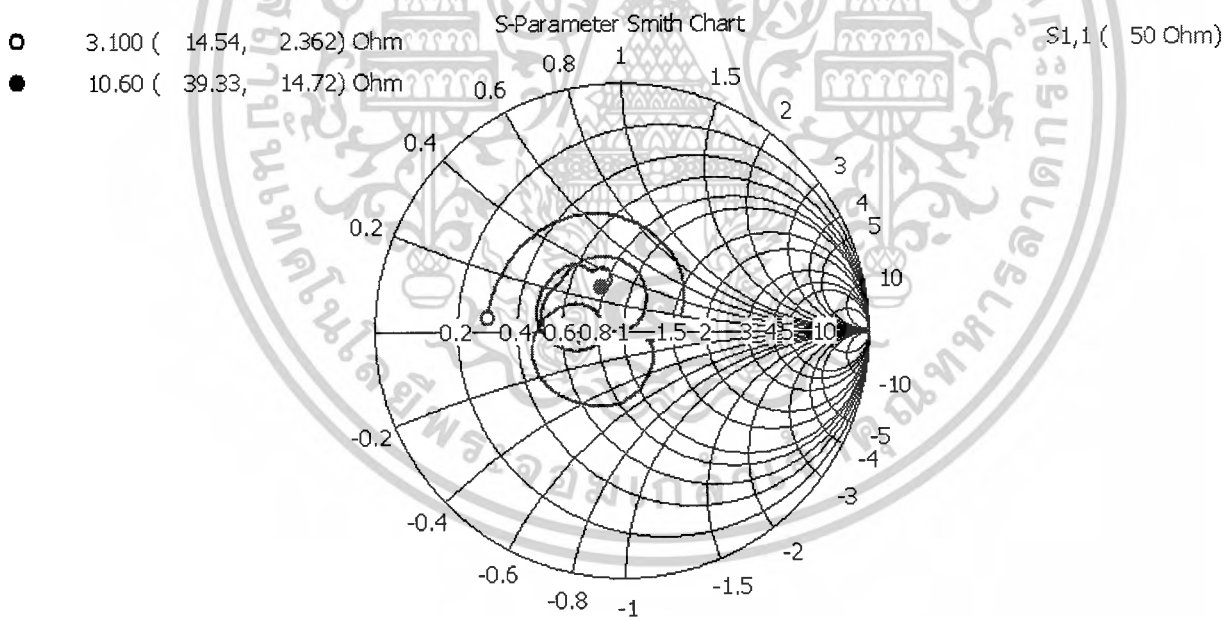


รูปที่ 3.6 การจำลองการสร้างสายอากาศ,มุมสะท้อน 90 องศาโดยโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

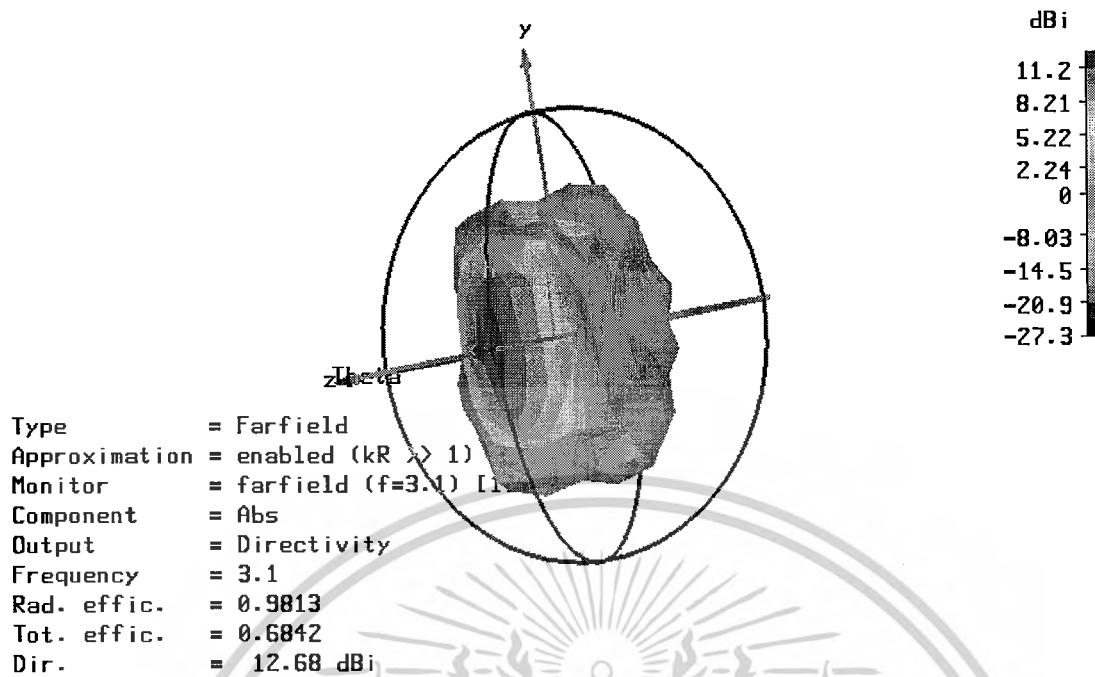


รูปที่ 3.7 ค่าอัตราส่วนการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยโปรแกรม CST

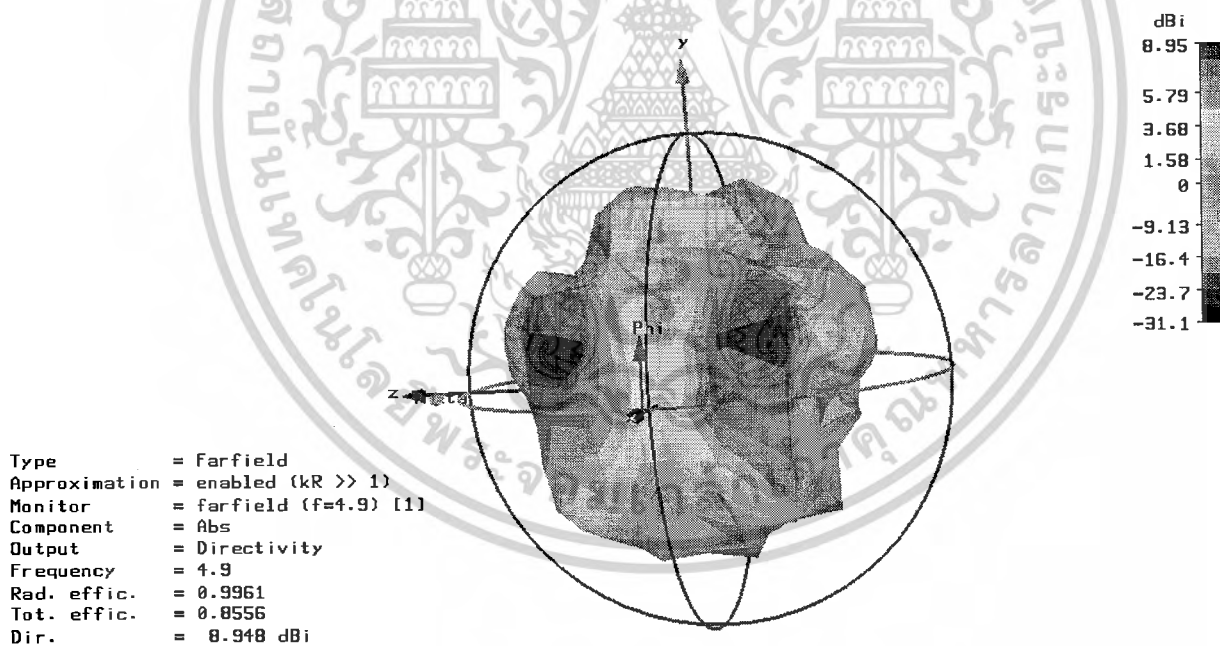


รูปที่ 3.8 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

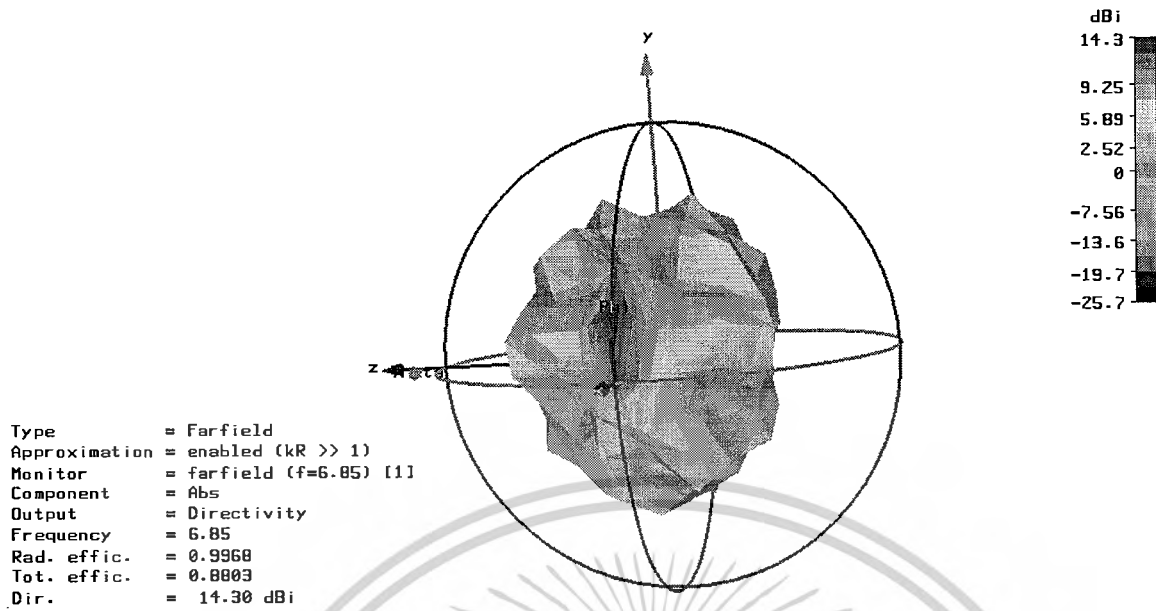


รูปที่ 3.9 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 3.1 GHz

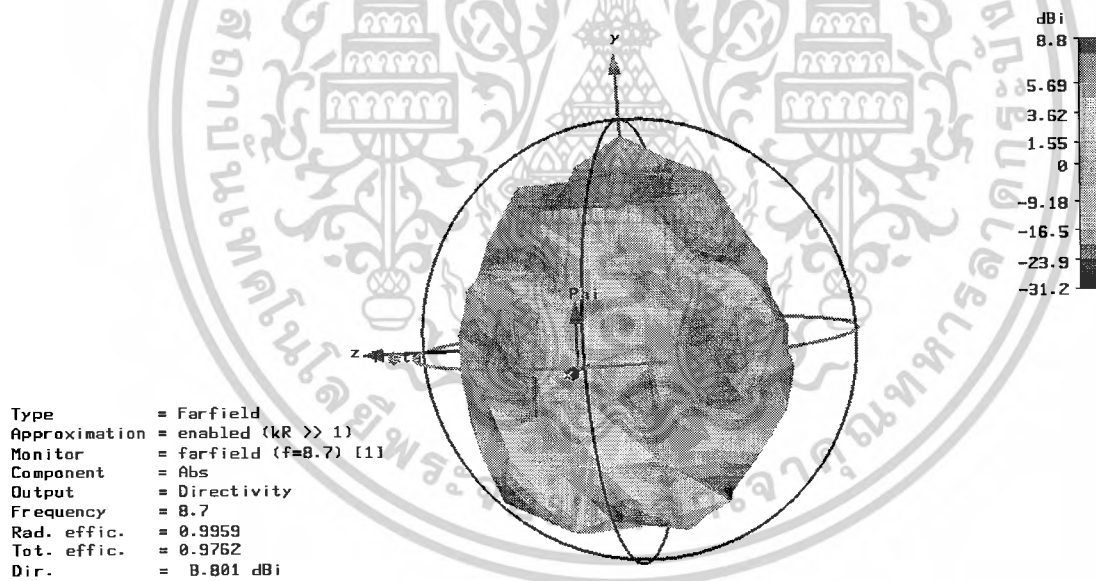


รูปที่ 3.10 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 4.9 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

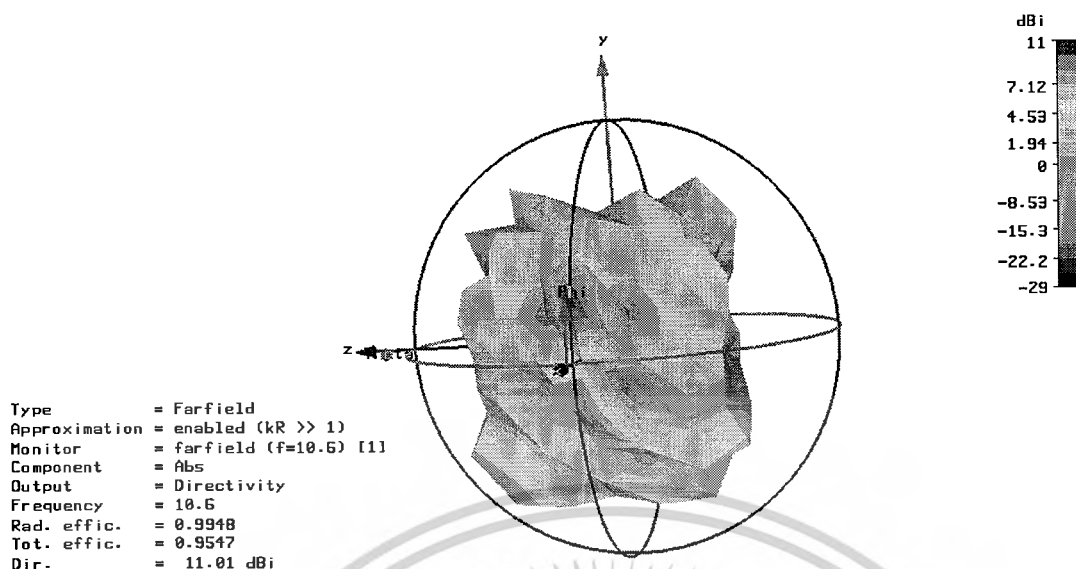


รูปที่ 3.11 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 6.85 GHz



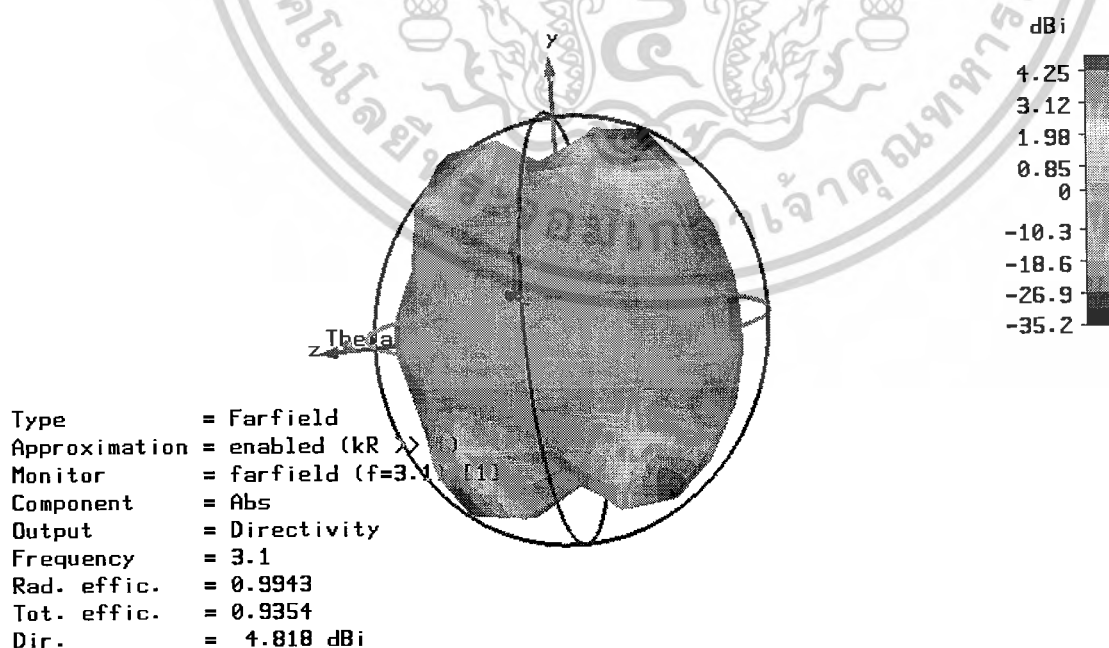
รูปที่ 3.12 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 8.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



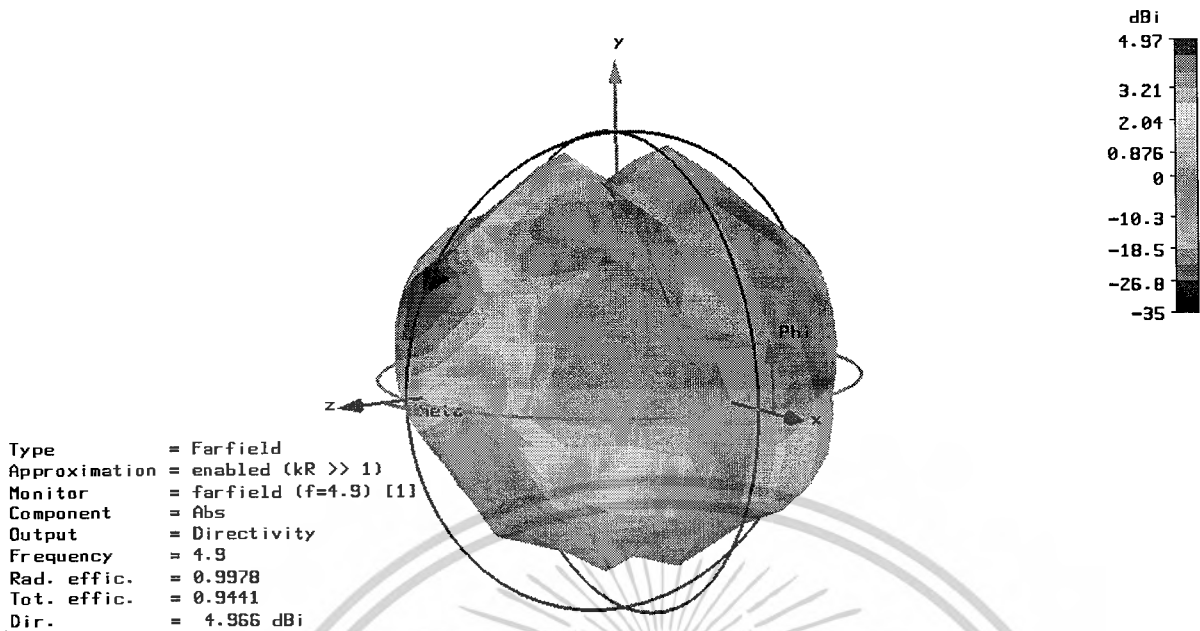
รูปที่ 3.13 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ที่ความถี่ 10.6 GHz

จากรูปที่ 3.9 , 3.10 , 3.11 , 3.12 , 3.13 เมื่อทำการพิจารณาที่สนามระยะไกลที่ความถี่ 3.1 GHz , 4.9 GHz , 6.85 GHz , 8.7 GHz และ 10.6 GHz จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการออกแบบจะเป็นแบบรูปที่มีการมีทิศทาง (Directional Pattern) คือ สายอากาศจะมีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียวและจากการพิจารณาจะพบว่าสายอากาศจะเป็นการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งและสามารถทำงานได้ในทิศทางที่ต้องการ โดยจะมีค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity) = 12.68 dBi , 8.948 dBi , 14.30 dBi, 8.801 dBi และ 11.01 dBi ซึ่งหมายถึงสายอากาศที่ทำการออกแบบได้เมื่อนำมาวัดค่าการชี้ทิศทางเมื่อเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิกมีค่า 12.68 dBi , 8.948 dBi , 14.30 dBi, 8.801 dBi และ 11.01 dBi ตามลำดับ

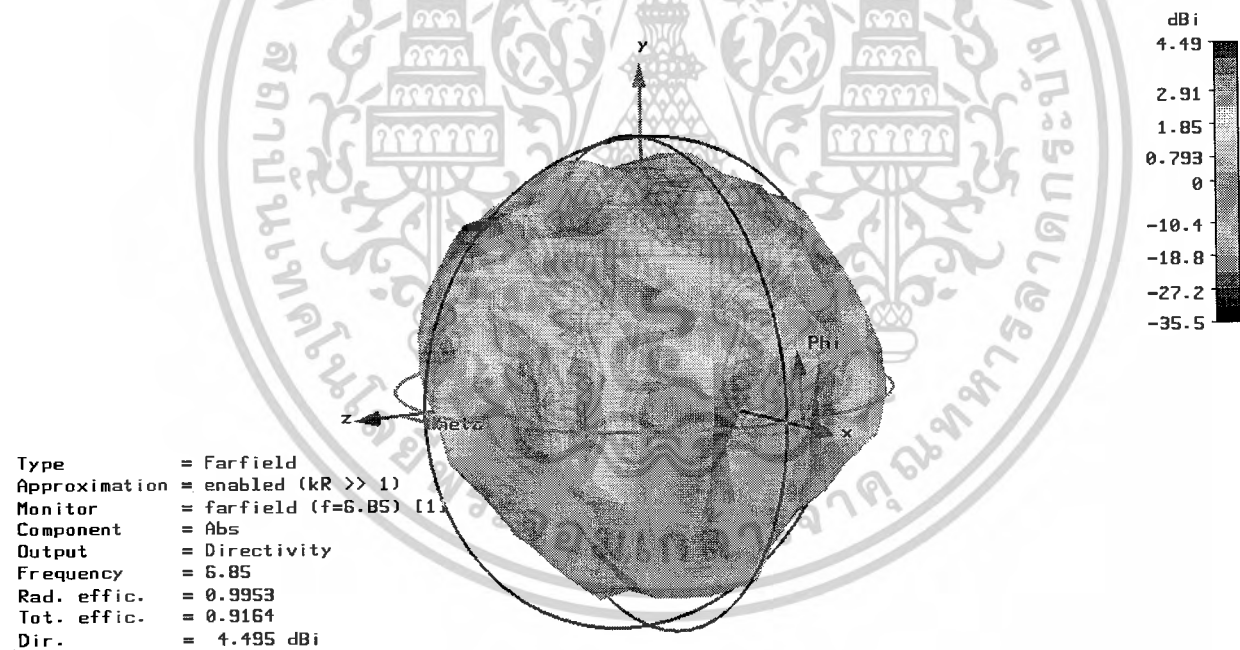


รูปที่ 3.14 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

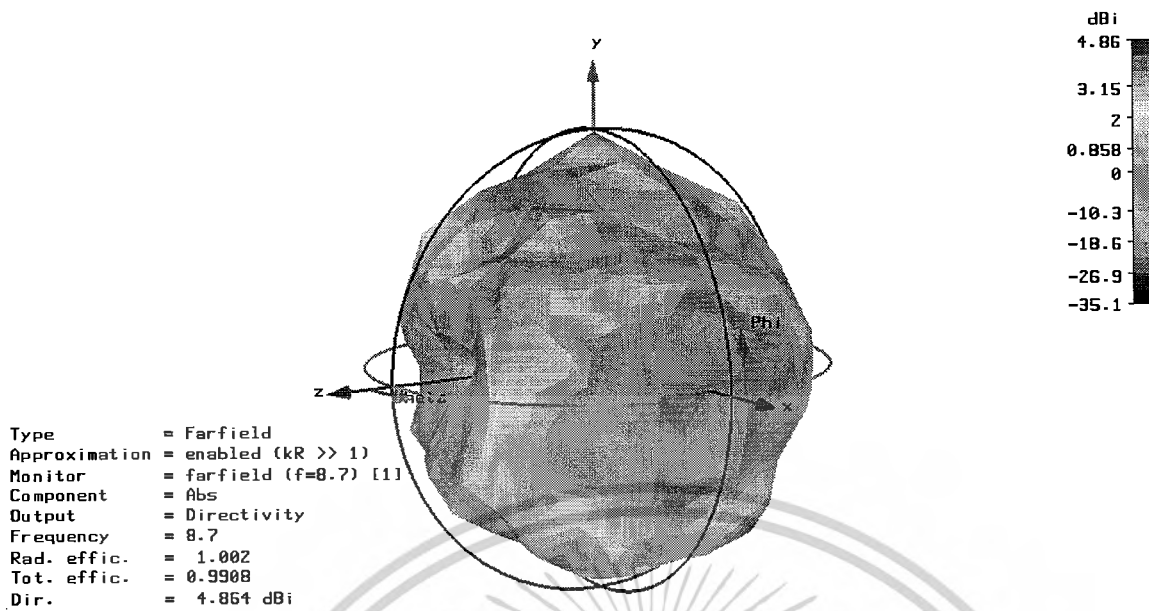


รูปที่ 3.15 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 4.9 GHz

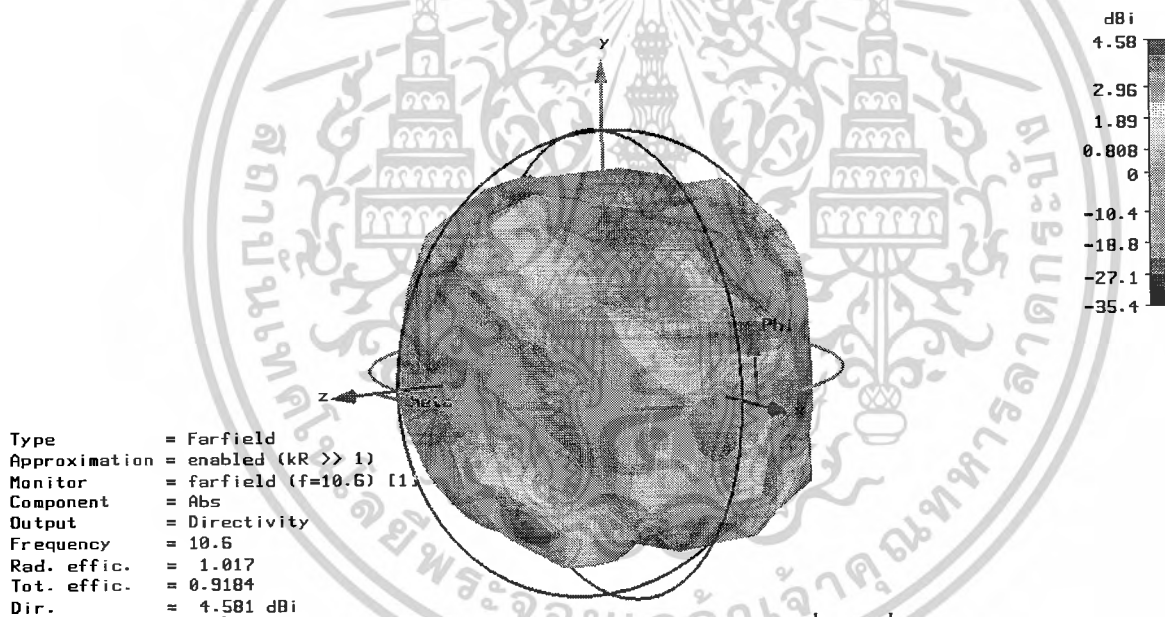


รูปที่ 3.16 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 6.85 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 8.7 GHz

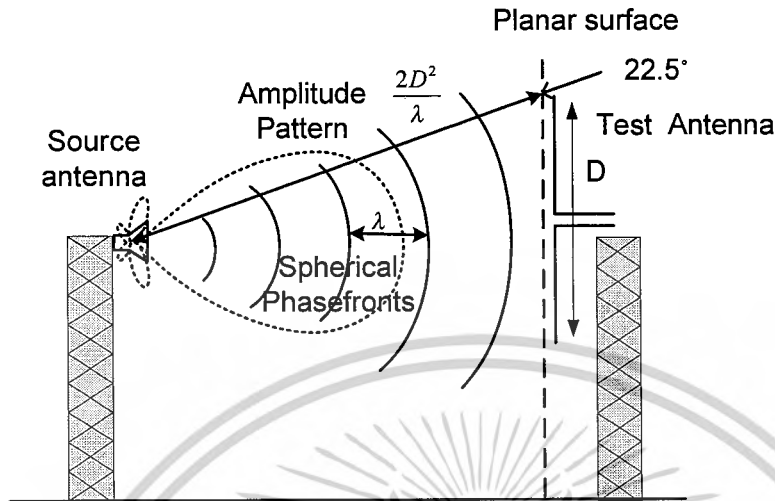


รูปที่ 3.18 ผลจากการใช้โปรแกรม CST ทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 10.6 GHz

จากรูปที่ 3.14 , 3.15 , 3.16 , 3.16 , 3.18 เมื่อทำการพิจารณาที่สนามระยะไกลที่ความถี่ 3.1 GHz , 4.9 GHz , 6.85 GHz , 8.7 GHz และ 10.6 GHz จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการออกแบบจะเป็นแบบรูปที่มีการมีทิศทาง (Directional Pattern) คือ สายอากาศจะมีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียวและจากการพิจารณาจะพบว่าสายอากาศจะเป็นการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และสามารถทำงานได้ในทิศทางที่ต้องการ โดยจะมีค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity) = 4.818 dBi , 4.966 dBi , 4.495 dBi, 5.864 dBi และ 4.581 dBi ซึ่งหมายถึงสายอากาศที่ทำการออกแบบได้เมื่อนำมาวัดค่าการชี้ทิศทางเมื่อเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิกมีค่า 4.818 dBi , 4.966 dBi , 4.495 dBi, 4.864 dBi และ 4.581 dBi ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 3.19 ระนาบของสนามที่มอดกกระทบของสายอากาศตัวรับ

ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะทำการทดสอบที่ระยะสนามระยะไกล (Far Field Region)

โดยที่สายอากาศนั้นจะต้องห่างจากสายอากาศส่งเป็นระยะ

$$R > 2D^2 / \lambda$$

D คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

R = ระยะระหว่างสายอากาศ

แต่ถ้าในกรณีที่พิจารณาการทดสอบสายอากาศส่งและรับพร้อมกัน

$$D = D_T + D_R \quad (3.4)$$

โดยที่ D_T คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศตัวส่ง

D_R คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศตัวรับ

คำนวณค่า สนามระยะไกล (Far Field region)

ที่ความถี่ 3.1 GHz

$$\lambda = 0.0968 \text{ m}$$

$$; R = \frac{2(29.5)^2}{9.68} = 180 \text{ cm}$$

ที่ความถี่ 4.9 GHz

$$\lambda = 0.0612 \text{ m}$$

$$; R = \frac{2(29.5)^2}{6.12} = 284 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 6.85 GHz

$$\lambda = 0.0438 \text{ m}$$

$$; R = \frac{2(29.5)^2}{4.38} = 397 \text{ cm}$$

ที่ความถี่ 8.7 GHz

$$\lambda = 0.0344 \text{ m}$$

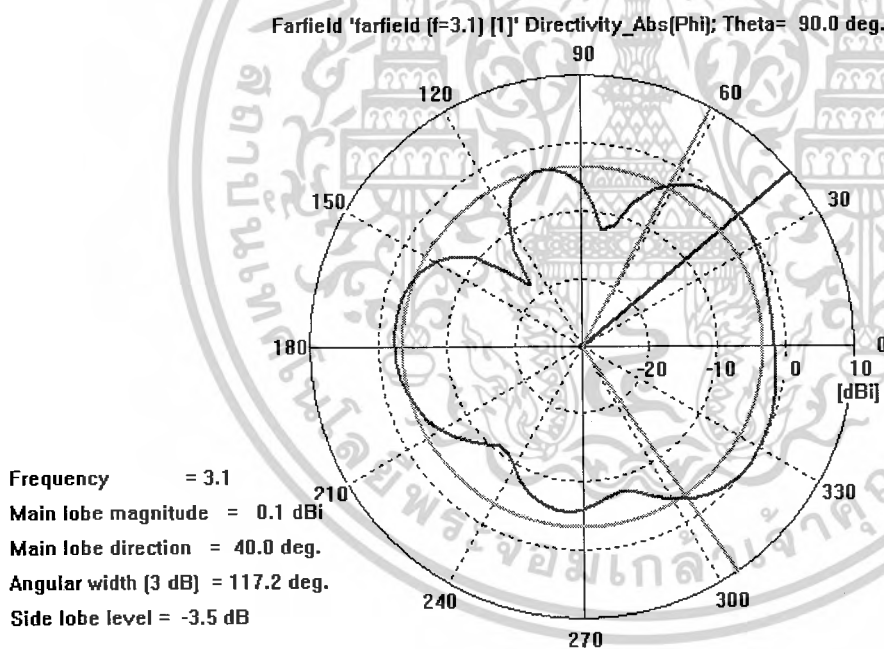
$$; R = \frac{2(29.5)^2}{3.44} = 506 \text{ cm}$$

ที่ความถี่ 10.6 GHz

$$\lambda = 0.0283 \text{ m}$$

$$; R = \frac{2(29.5)^2}{2.83} = 615 \text{ cm}$$

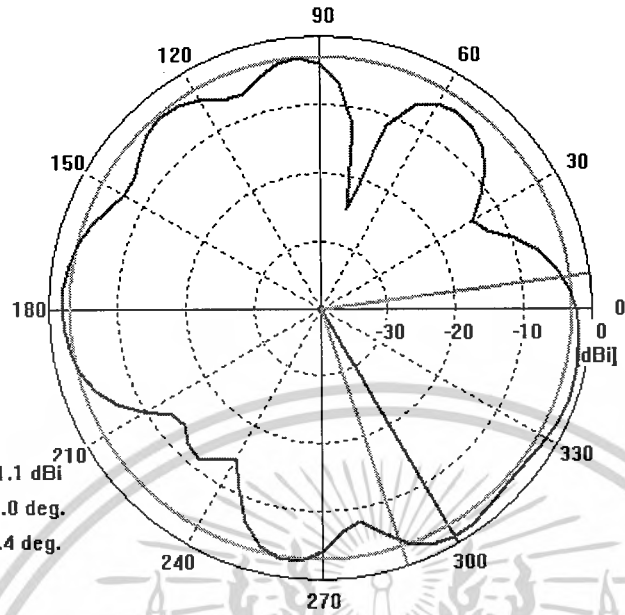
จากโปรแกรม CST ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาดทั้ง 5 ความถี่ ดังนี้



รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด
ที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

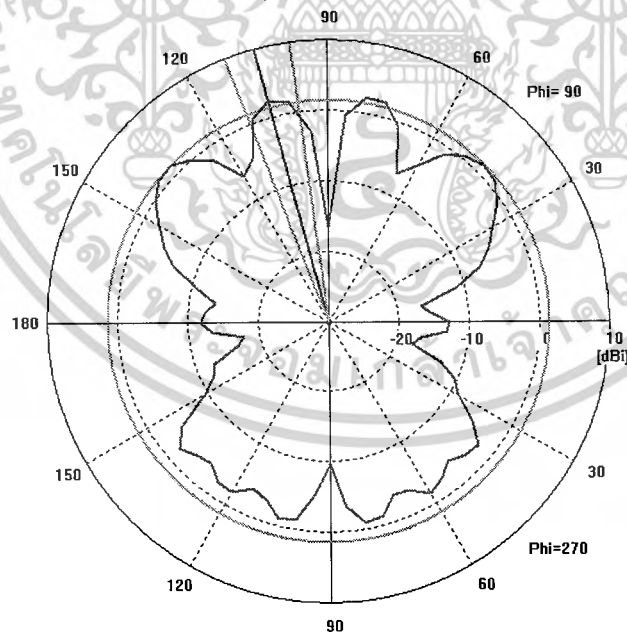
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Farfield 'farfield (f=4.9) [1]' Directivity_Abs(Phi); Theta= 90.0 deg.



รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด
 ที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

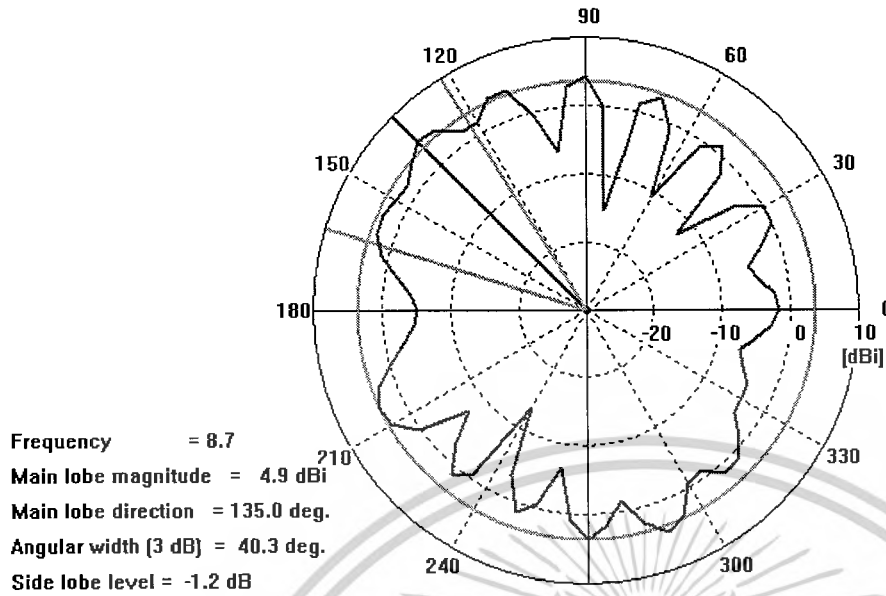
Farfield 'farfield (f=6.85) [1]' Directivity_Abs(Theta)



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด
 ที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

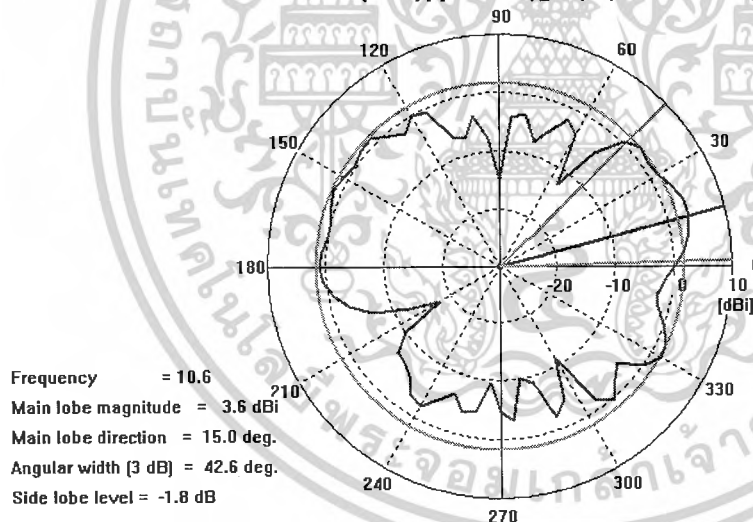
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Farfield 'farfield [f=8.7] [1]' Directivity_Abs(Phi); Theta= 90.0 deg.



รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด ที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

Farfield 'farfield [f=10.6] [1]' Directivity_Abs(Phi); Theta= 90.0 deg.

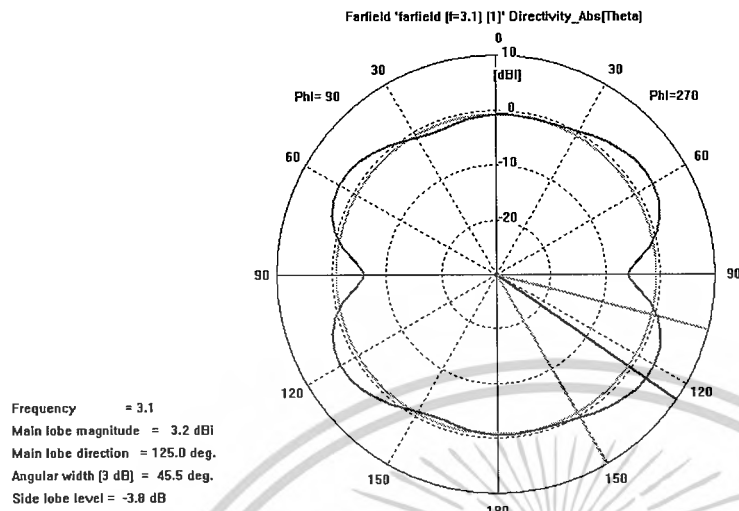


รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด ที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

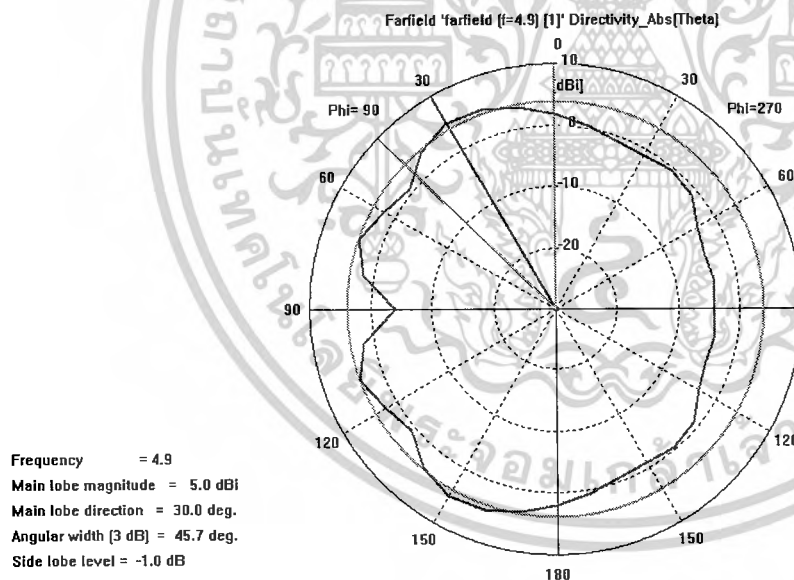
จากรูปที่ 3.20 , 3.21 , 3.22 , 3.23 , 3.24 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางการแพร่กระจายในทิศที่แรงที่สุด เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ในระนาบ E ที่ได้จะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth: HPBW) = 117.2 องศา , 79.4 องศา, 13.7 องศา , 40.3 องศาและ 42.648.0 องศา , 20.9 องศา, 32.5 องศา , 15.4 องศา และ 18.3 องศาตามลำดับ และจากรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ E จะเห็นได้ว่าการออกแบบสามารถทำให้ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E ที่มีทิศทางแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโปรแกรม CST ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกทั้ง 5 ความถี่ ดังนี้

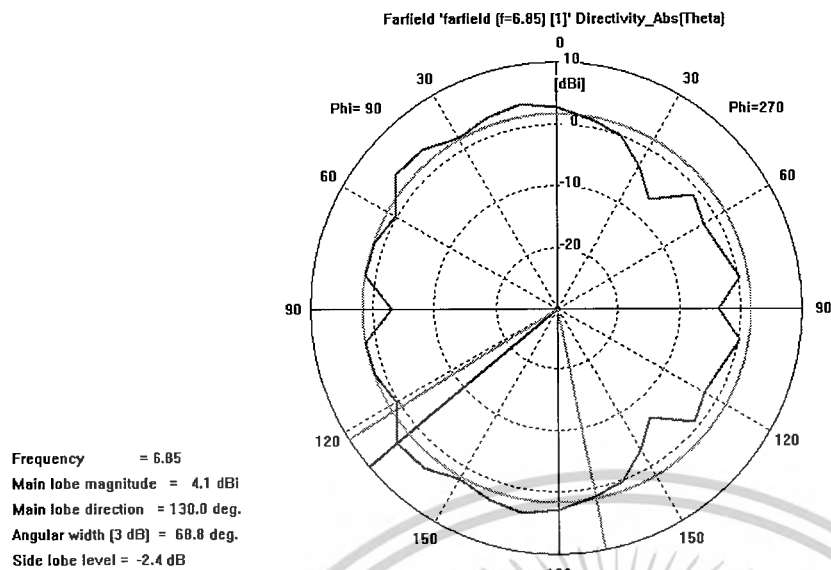


รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

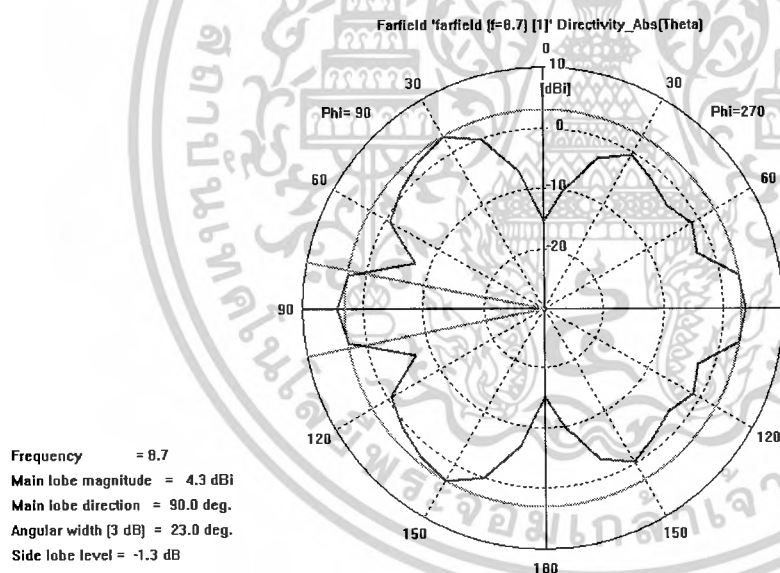


รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

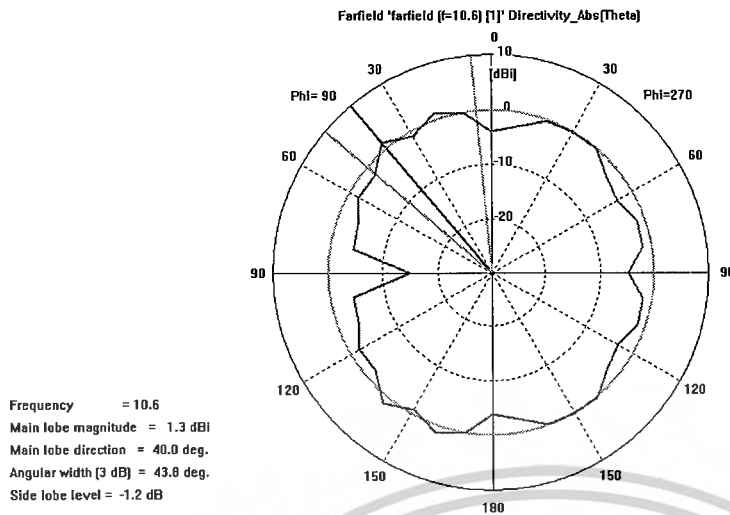


รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST



รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

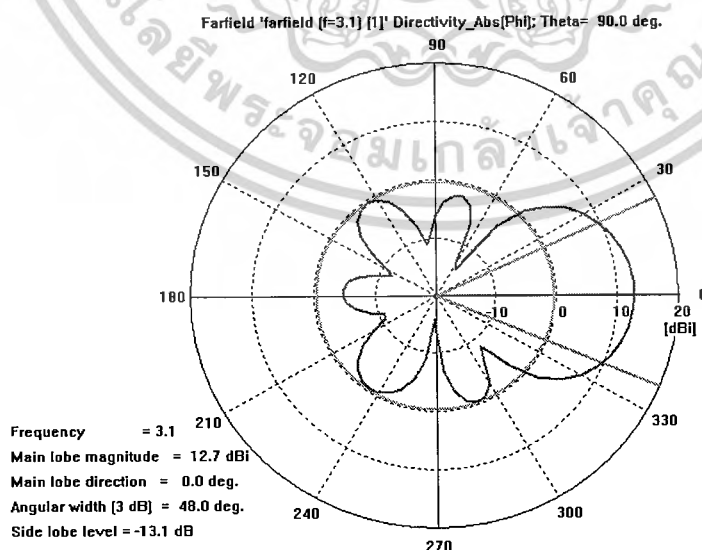
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

จากรูปที่ 3.25 , 3.26 , 3.27 , 3.28 , 3.29 เมื่อทำการพิจารณาที่สนามระยะไกลที่ความถี่ 3.1 GHz , 4.9 GHz , 6.8 GHz, 8.7 GHz , 10.6 GHz จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางการแพร่กระจายในทิศทางที่แรงที่สุด เมื่อพิจารณาในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H ที่ได้จะมีระดับของลำคลื่นย่อย = -3.8 dB , -1.0 dB , -2.4 dB , -1.3 dB , -1.2 dB โดยจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดครึ่งหนึ่ง (Half Power BeamWidth : HPBW) = 45.5 องศา , 45.7 องศา , 68.8 องศา , 23.0 องศาและ 43.8 องศา

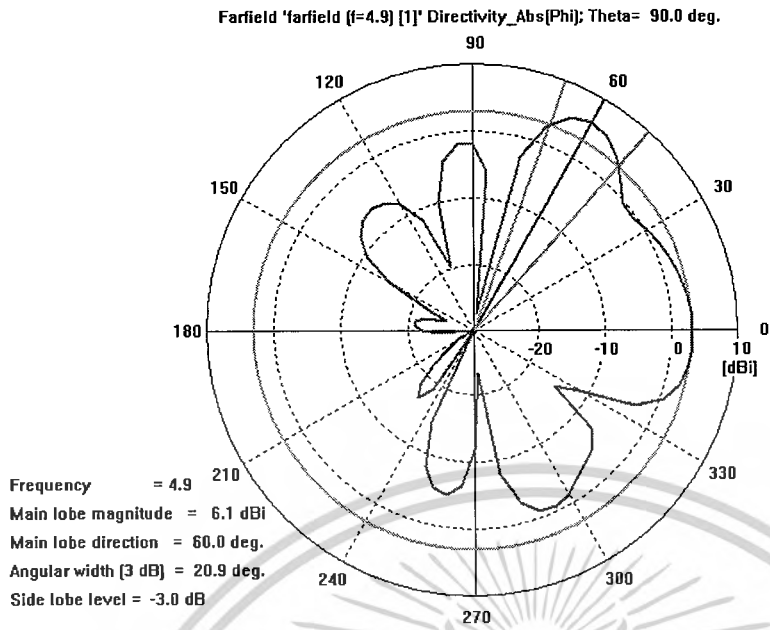
จากโปรแกรม CST ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศา ในระนาบมุมกวาด ทั้ง 5 ความถี่ ดังนี้



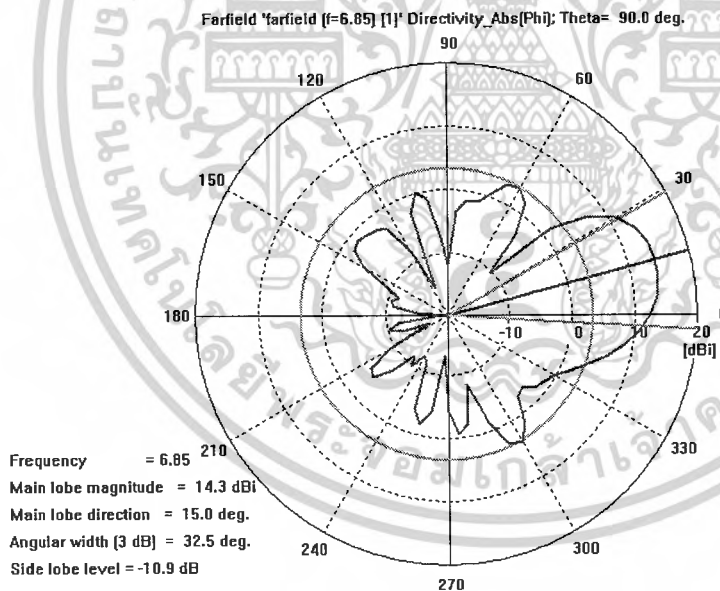
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาด

ที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

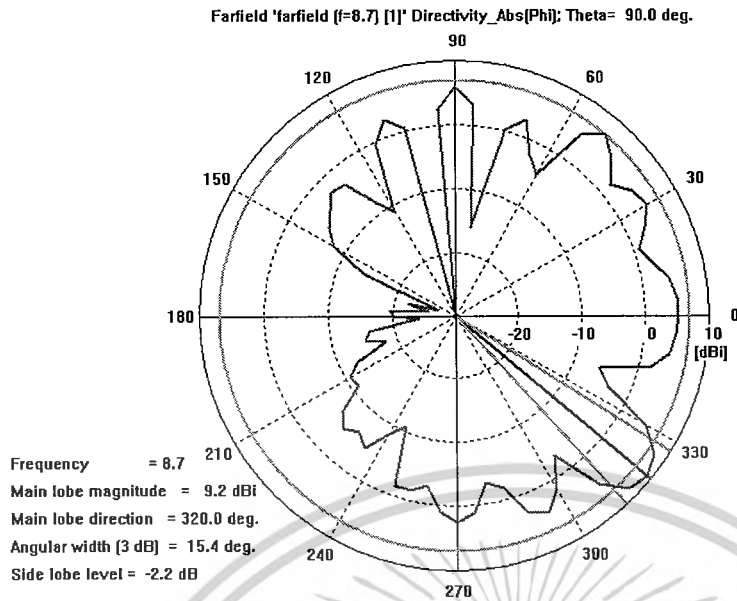


รูปที่ 3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาด ที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

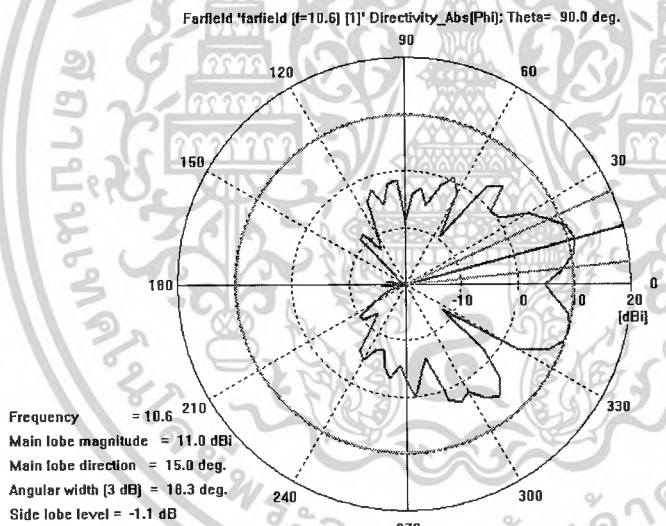


รูปที่ 3.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาด ที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาด ที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

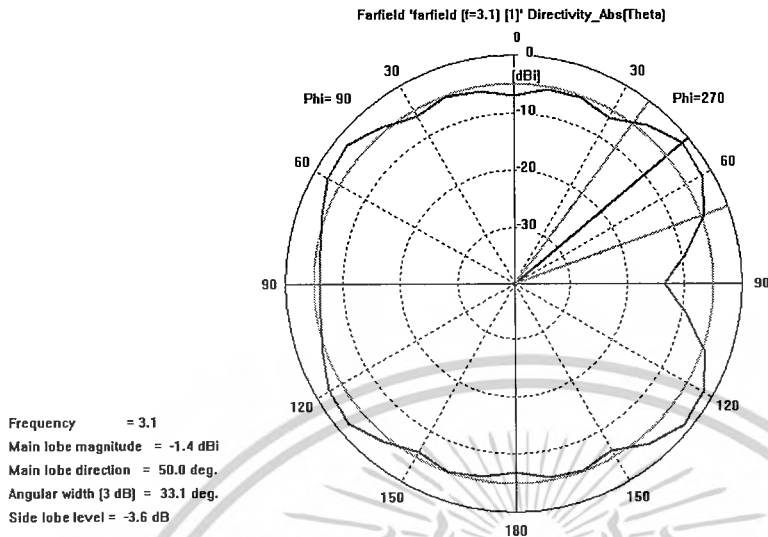


รูปที่ 3.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาด ที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

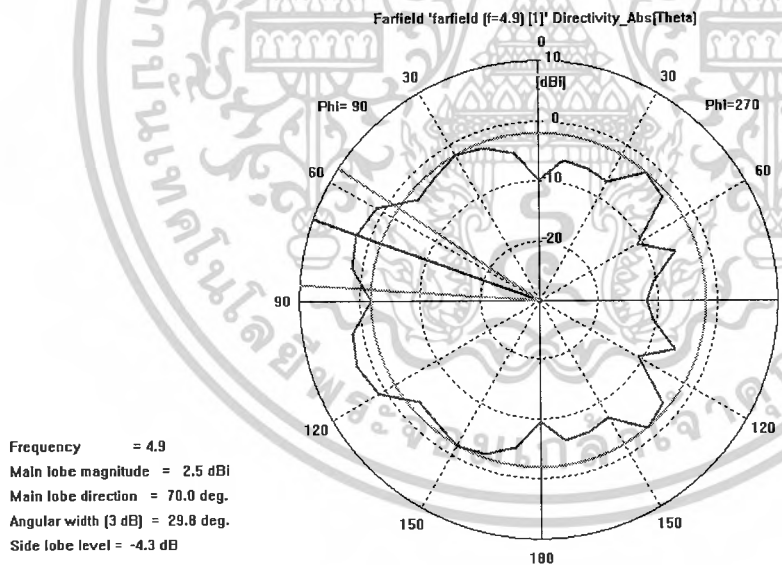
จากรูปที่ 3.30 , 3.31 , 3.32 , 3.33 , 3.34 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุมุมเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางการแพร่กระจายในทิศที่แรงที่สุด เมื่อพิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ในระนาบ E ที่ได้จะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth: HPBW) = 48.0 องศา, 20.9 องศา, 32.5 องศา, 15.4 องศา และ 18.3 องศาตามลำดับ และจากรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ E จะเห็นได้ว่าการออกแบบสามารถทำให้ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E ที่มีทิศทางแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโปรแกรม CST ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศา ในระนาบมุมยกทั้ง 5 ความถี่ ดังนี้

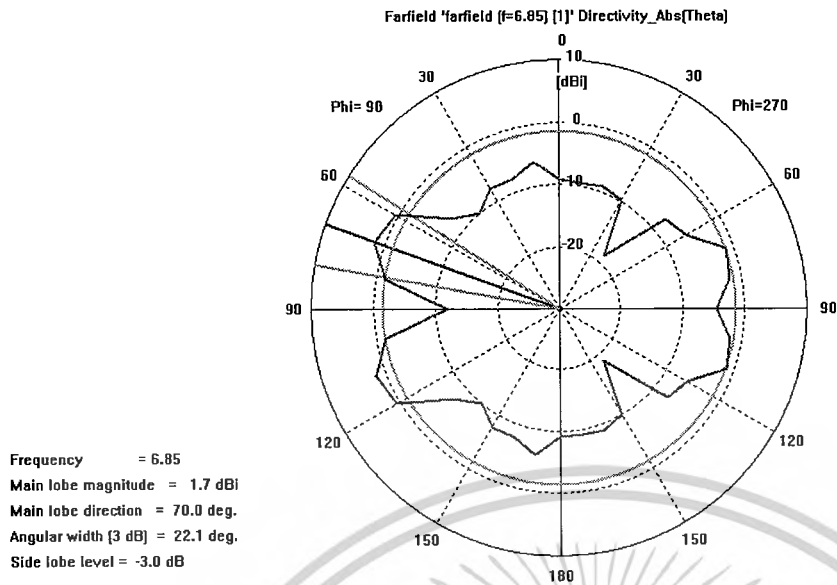


รูปที่ 3.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยก ที่ความถี่ 3.1 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

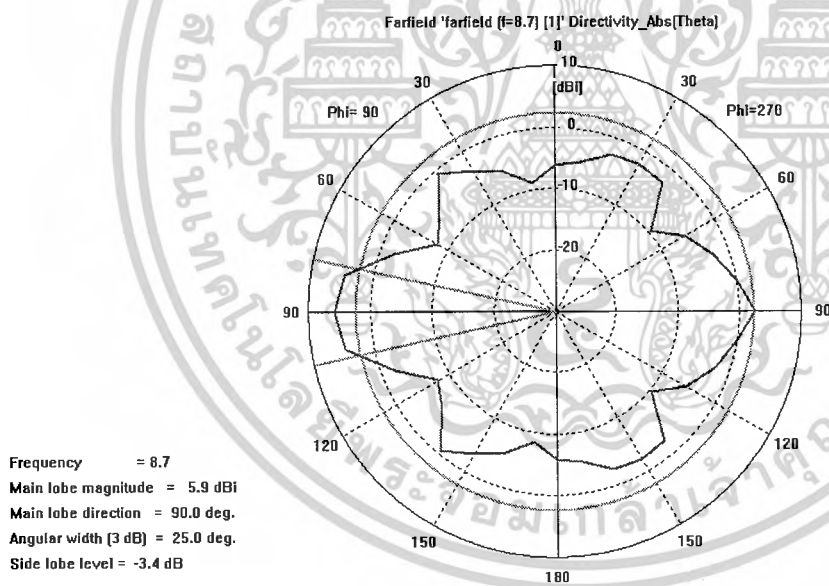


รูปที่ 3.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยก ที่ความถี่ 4.9 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

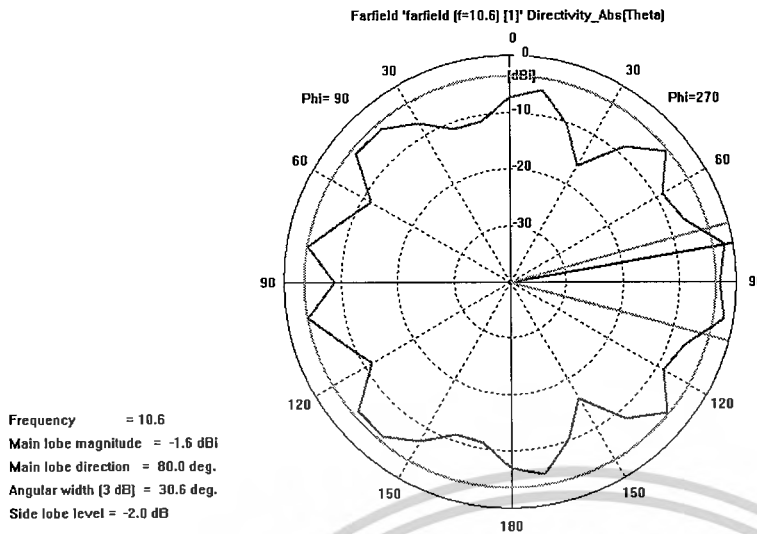


รูปที่ 3.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยก ที่ความถี่ 6.85 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST



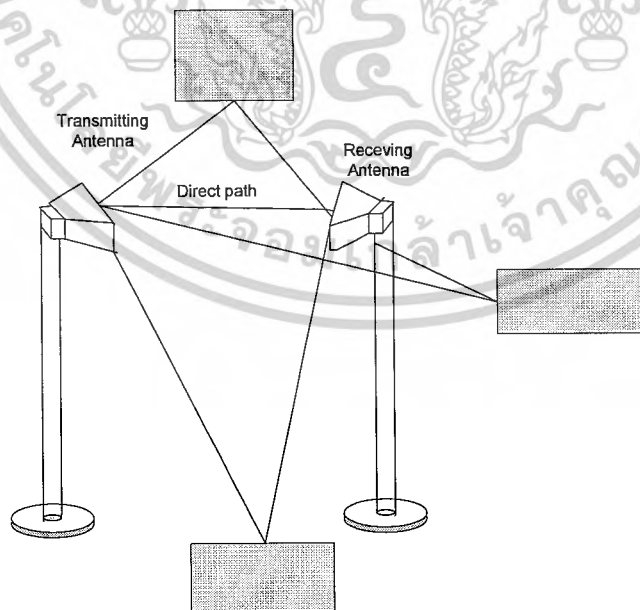
รูปที่ 3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยก ที่ความถี่ 8.7 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมยก ที่ความถี่ 10.6 GHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

จากรูปที่ 3.35, 3.36, 3.37, 3.38, 3.39 เมื่อทำการพิจารณาที่สนามระยะไกลที่ความถี่ 3.1 GHz, 4.9 GHz, 6.8 GHz, 8.7 GHz, 10.6 GHz จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางการแพร่กระจายในทิศทางที่แรงที่สุด เมื่อพิจารณาในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H ที่ได้จะมีระดับของค่าคลื่นย่อย = -3.6 dB, -4.3 dB, -3.0 dB, -3.4 dB, -2.0 dB โดยจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดครึ่งหนึ่ง (Half Power BeamWidth : HPBW) = 33.1 องศา, 29.0 องศา, 22.1 องศา, 25.0 องศา และ 30.6 องศา



รูปที่ 3.40 เส้นทางเดินของคลื่นจากสายอากาศตัวส่งมายังสายอากาศตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

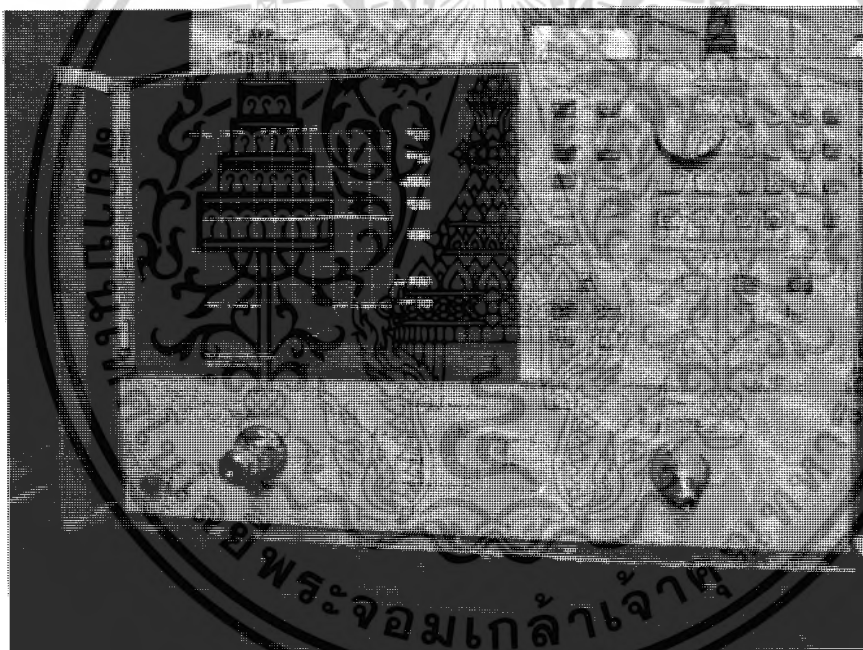
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การวัดคุณสมบัติสายอากาศ

ชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศสามารถวัด S-parameter เพื่อหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss₁₁(dB) วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่อแรงดัน (SWR) ของสายอากาศว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 2 และวัดเฟส (phase) ของสายอากาศ

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Network Analyzer
2. ชุดปรับเทียบค่า (Calibration kit)
3. สายอากาศที่ต้องวัด

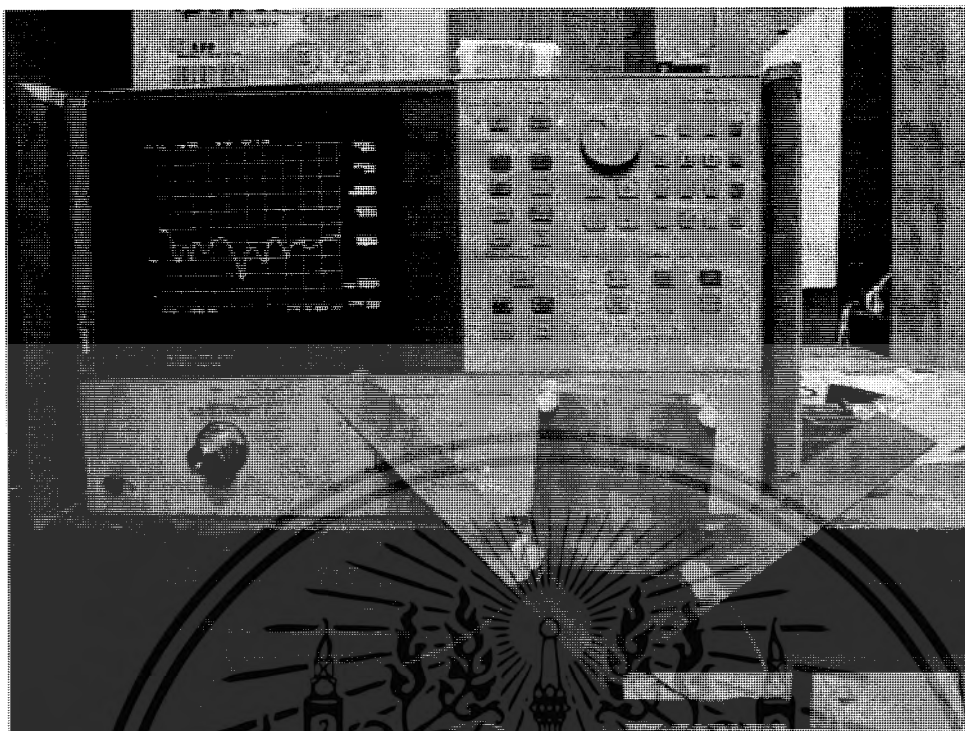


รูปที่ 4.1 เครื่อง Network Analyzer

4.1.2 ขั้นตอนการวัด

1. ทำการปรับเทียบค่าเครื่องด้วยชุดปรับเทียบค่าซึ่งประกอบไปด้วยตัวลัดวงจร (short circuit), ตัวเปิดวงจร (open circuit) และ โหลดบรอดแบนด์ (load broadband)
2. ต่อสายอากาศที่ต้องการวัดเข้ากับชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศ
3. เลือกเมนู (menu) วัดค่าเอส-พารามิเตอร์, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่อแรงดันและค่าเฟส
4. พิมพ์ค่าที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



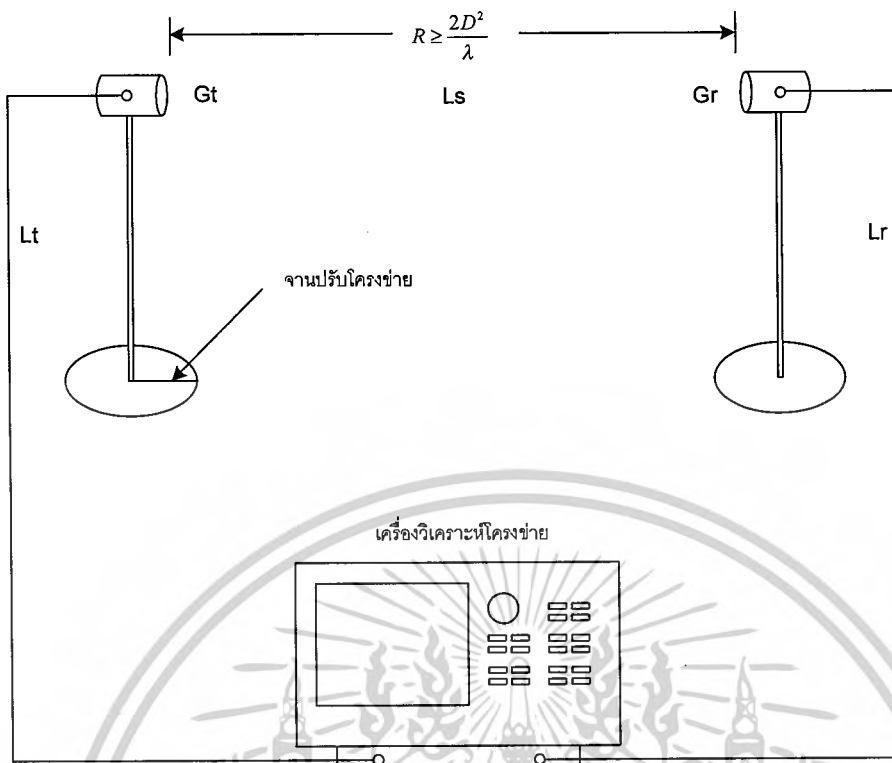
รูปที่ 4.2 วิธีการทดลองสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศา กับเครื่อง Network Analyzer

4.2 ขั้นตอนการวัดระนาบของสนามที่ภาคกระทบของสายอากาศตัวรับ และตัวส่ง

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Network Analyzer
2. สายนำสัญญาณ
3. สายโคแอกเซียล มีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 50 โอห์ม
4. สายอากาศแบบขนานมุมสะท้อน 90 องศา
5. เครื่องปรับโครงข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

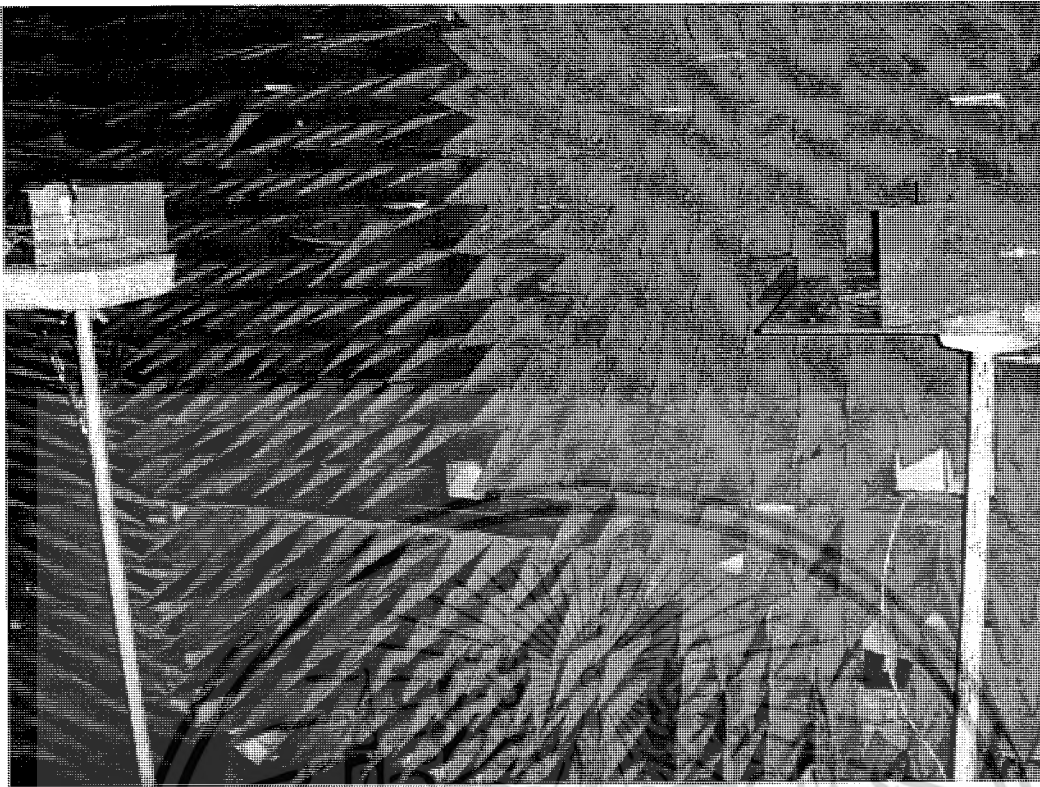


รูปที่ 4.3 แสดงการทดสอบสายอากาศ

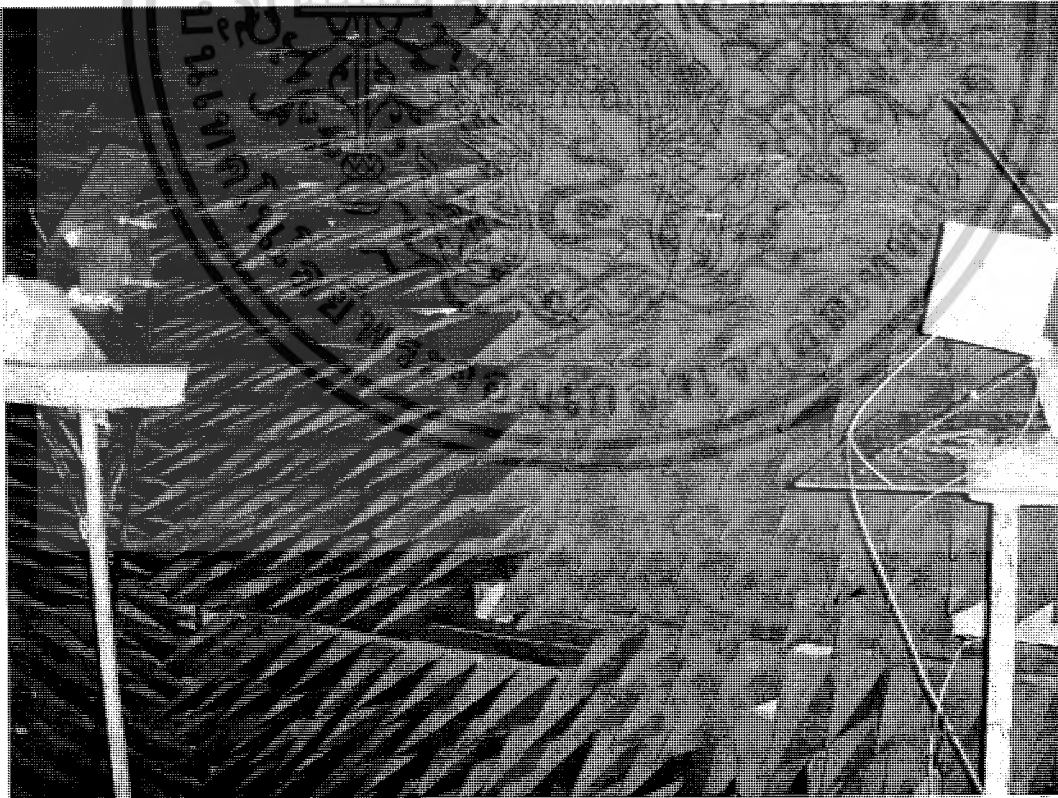
4.2.2 ขั้นตอนการทดลองมุมกวาด

1. ทำการปรับเทียบค่าเครื่องด้วยชุดปรับเทียบค่าซึ่งประกอบไปด้วยตัวลัดวงจร (short circuit), ตัวเปิดวงจร (open circuit) และโหลดบรอดแบนด์ (load broadband)
2. ต่อสายอากาศที่ต้องการวัดเข้ากับชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศ
3. เลือกเมนูที่ S_{12} ตัวส่งเป็น ตัวช่องที่ 2 และตัวรับเป็นช่องที่ 1
4. นำค่าที่ได้จากการคำนวณหาการแพร่กระจายคลื่นในบทที่ 3 มาวัดระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่ง
5. ทำการวัดตั้งแต่ 0-360 องศาครั้งละ องศาเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดที่ปรากฏบนหน้าจอเพื่อเป็นมุมเริ่มต้น
6. ทำการวัดที่มุมเริ่มต้นแล้วบันทึกค่าตั้งแต่ค่าที่ 0-360 องศา ครั้งละ 10 องศา
7. ทำตามขั้นตอนที่ 1-5 ทั้งมุมกวาดและมุมยก
8. นำค่าที่ได้ไปพล็อตเป็นกราฟวงกลมเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟวงกลมที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม cst

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



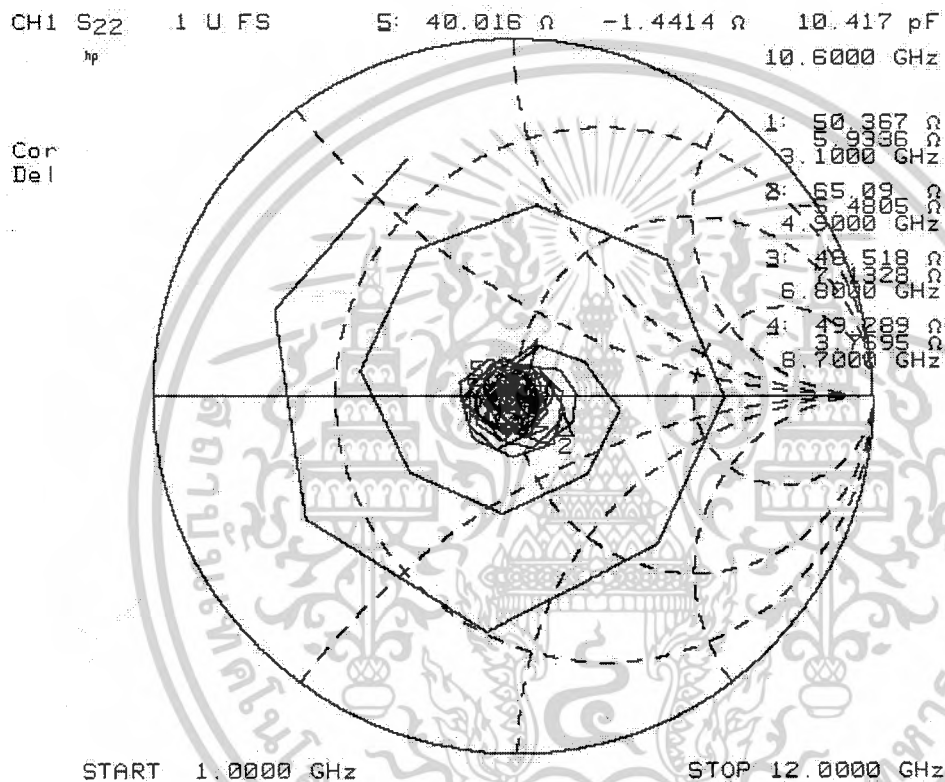
รูปที่ 4.4 การทดสอบสายอากาศแบบขนานมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์



รูปที่ 4.5 การทดสอบสายอากาศแบบขนานมุมสะท้อน 90 องศาในระนาบมุมกวาดย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

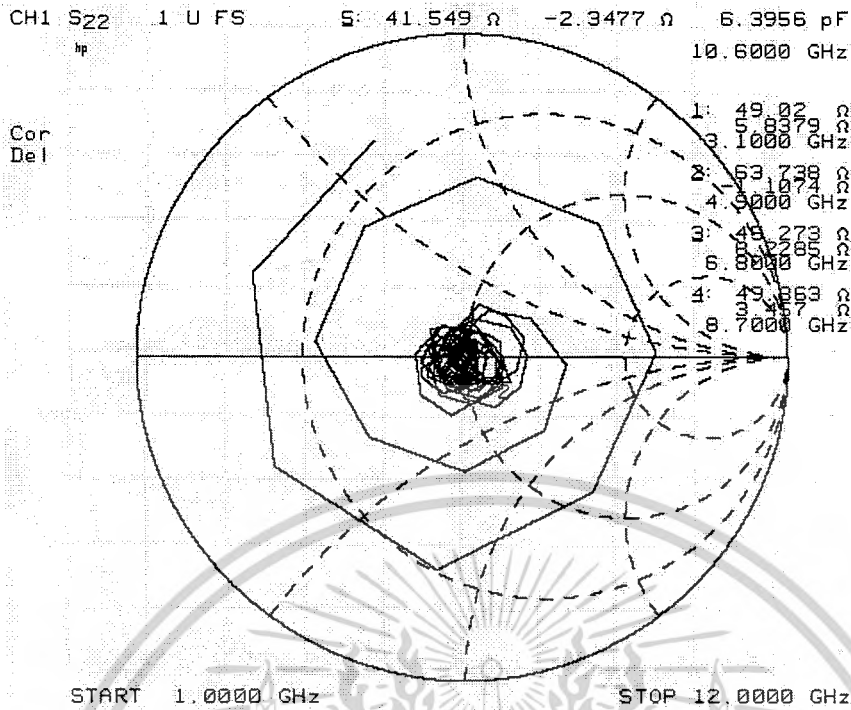
4.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance)

สำหรับการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เพื่อนำมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ให้สามารถเข้ากันได้กับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งในการทดสอบนั้นควรที่จะให้ผลที่วัดออกมาได้มีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม โดยทำการทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network analyzer) พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีค่าได้เท่ากับ 43.478 โดยที่ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ได้ทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 1

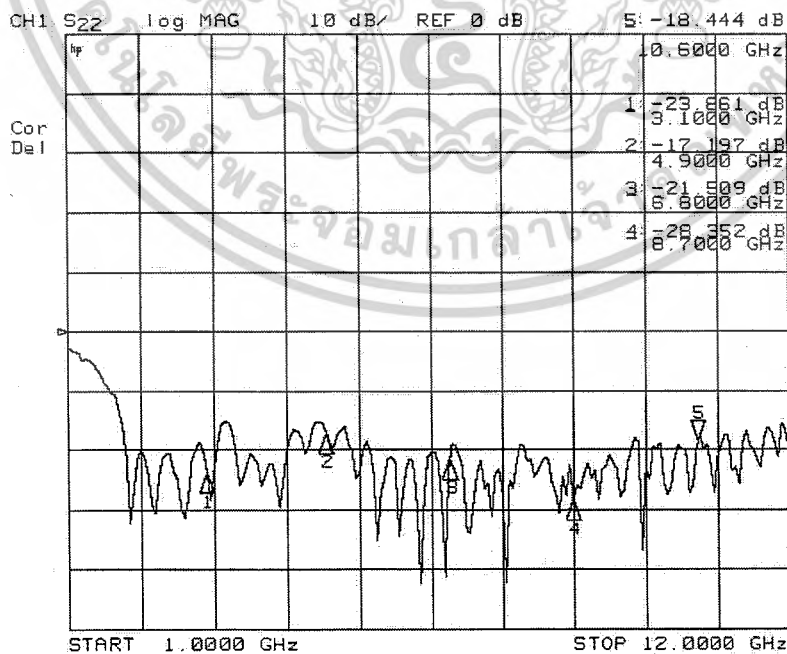
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 2

4.4 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss)

กำลังงานที่คลื่นแพร่กระจายออกไปนั้นจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับโดยจะคิดเป็นหน่วย dB ในทางปฏิบัตินั้นต้องการให้หีสัญญาณย้อนกลับต่ำ โดยทั่วไป ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ที่ยอมรับได้ ควรมีค่าที่น้อยกว่า -10 dB



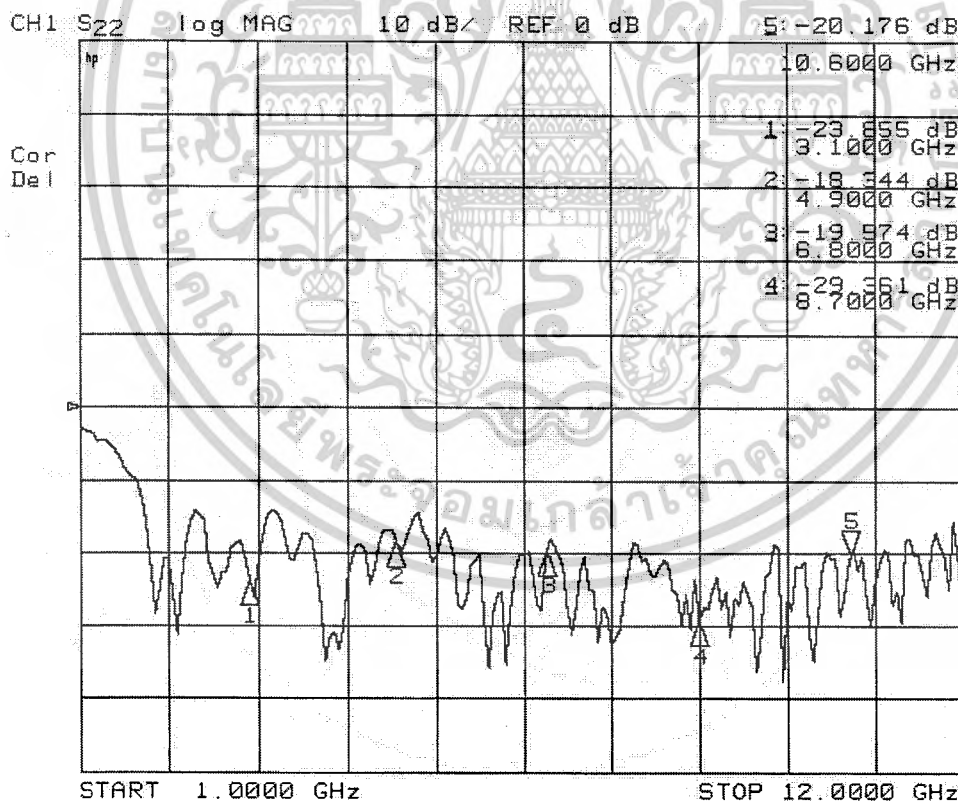
รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะเห็นได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วง 3.1-10.6 GHz จากช่วงความถี่ที่ทำงานได้ดังกล่าวจะพบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่เท่ากับ 3.1 GHz , 4.9GHz, 6.8GHz , 8.7 และ 10.6GHz สายอากาศจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) = -23.855 dB , -18.344 dB , -19.574 dB , -29.361 dB และ -20.176 dBตามลำดับ จากผลการทดสอบจะพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

ความถี่ (GHz)	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
3.1	23.855
4.9	-18.344
6.8	-19.574
8.7	-29.361
10.6	-20.176

ตารางที่ 4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss) ตัวที่ 1



รูปที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ (GHz)	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
3.1	23.855
4.9	-18.344
6.8	-19.574
8.7	-29.361
10.6	-20.176

ตารางที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss) ตัวที่ 2

จากผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะเห็นได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วง 3.1-10.6 GHz จากช่วงความถี่ที่ทำงานได้ดังกล่าวจะพบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่เท่ากับ 3.1 GHz, 4.9GHz, 6.8GHz, 8.7 และ 10.6GHz สายอากาศจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) = -23.861 dB, -17.197 dB, -21.509 dB, -28.352 dB และ -18.444 dB ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

โดยสามารถคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ Bandwidth ดังนี้

$$\Delta f = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\%$$

$$f_0 = \frac{10.6 + 3.1}{2}$$

โดยค่า

$$= 6.85 \text{ GHz}$$

$$\Delta f = \frac{10.6 - 3.1}{6.85} \times 100\%$$

$$= 109.48\%$$

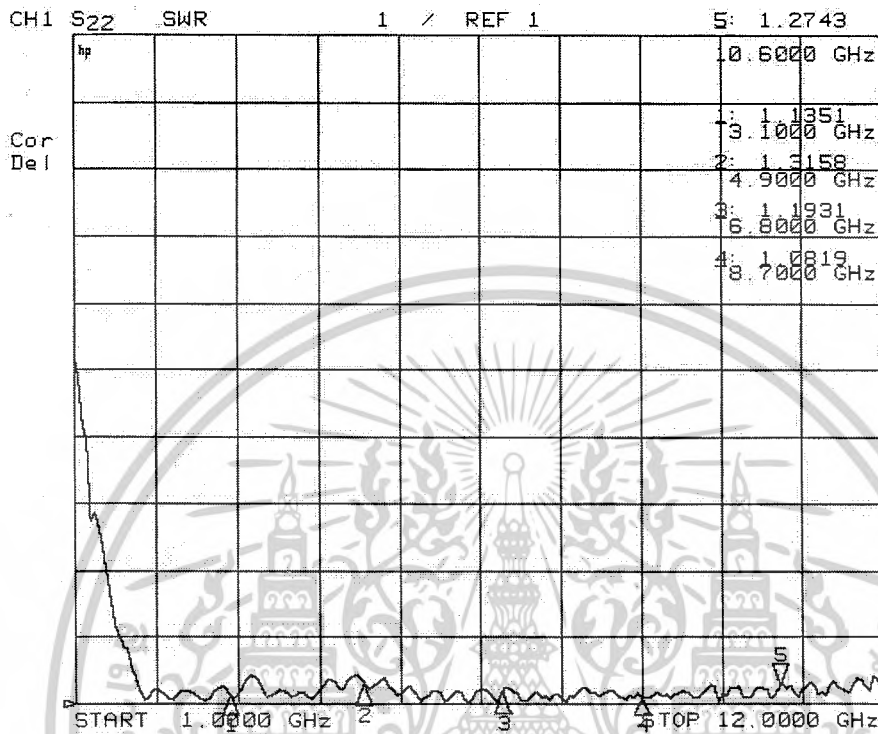
ดังนั้นค่า เปอร์เซ็นต์ Bandwidth จะมีค่าเท่ากับ = 109.48%

4.5 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)

ในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศที่ทำการออกแบบไม่สามารถที่จะปรับให้มีค่าอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากขั้วของสายอากาศ) ให้มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลก็จะทำให้มีกำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุทของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้ที่นำสายอากาศไปใช้งาน ว่าสายอากาศตัวนี้ถ้าหากนำไปใช้งานแล้วจะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่จะต้องนำมาใช้งานตามมาตรฐานจะต้องมีค่าไม่เกิน 2:1 แต่ถ้านำไปใช้งานจริงๆควรมีค่าไม่เกิน 1.5:1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศควรมีค่าใกล้เคียง 50Ω ซึ่งค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ดีที่สุดก็คือ 1:1



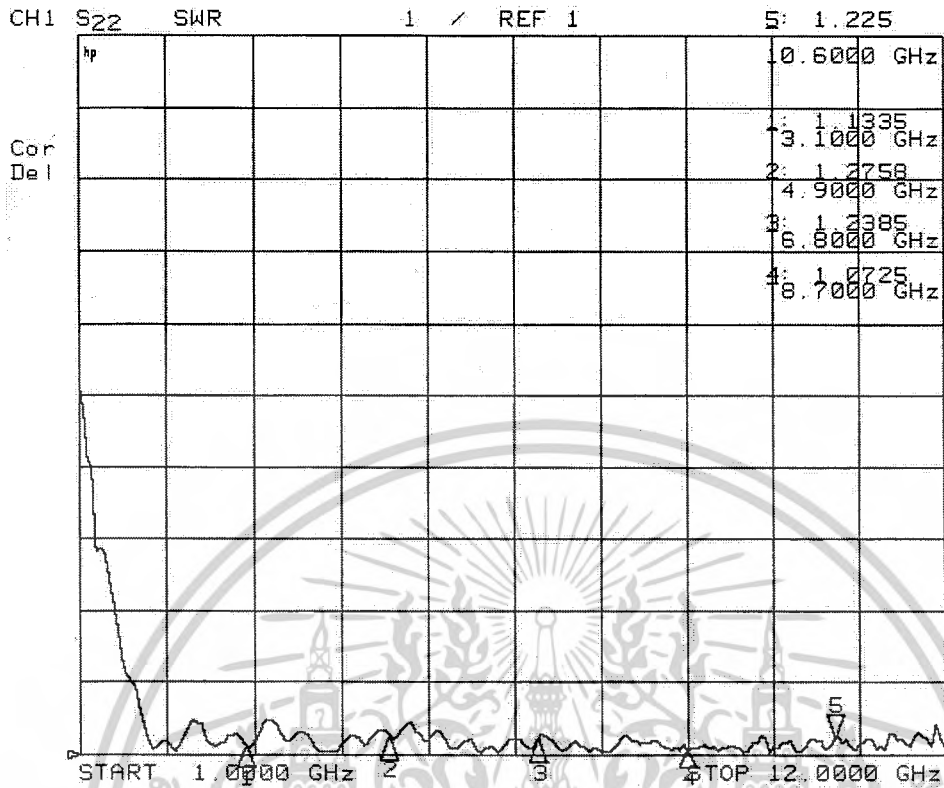
รูปที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 1

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าสายอากาศเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 3.1 GHz , 4.9GHz , 6.8GHz 8.7 และ 10.6GHz จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 1.1351:1 , 1.3158:1 , 1.1931:1 , 1.0819:1 และ 1.2743:1 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นไปตามมาตรฐานโดยจะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1 จากรูปค่า SWR ที่ได้ในช่วงที่ต้องการใช้งานจะมีค่าที่ไม่เกิน 2:1 แสดงดังภาพที่ 4.8 ดังนี้

ความถี่ (GHz)	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
3.1	1.1351:1
4.9	1.3158:1
6.8	1.1931:1
8.7	1.0819:1
10.6	1.2743:1

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบ ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมุมสะท้อน 90° ตัวที่ 2

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าสายอากาศเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 3.1 GHz , 4.9GHz , 6.8GHz 8.7 และ 10.6GHz จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 1.335:1 , 1.2758:1 , 1.2385:1 , 1.0725:1 และ 1.225:1 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นไปตามมาตรฐานโดยจะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1 จากรูปค่า SWR ที่ได้ในช่วงที่ต้องการใช้งานจะมีค่าที่ไม่เกิน 2:1 แสดงดังภาพที่ 4.8 ดังนี้

ความถี่ (GHz)	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
3.1	1.335:1
4.9	1.2758:1
6.8	1.2385:1
8.7	1.0725:1
10.6	1.2250:1

ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบ ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ เป็นสิ่งบอกลักษณะที่สำคัญของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งทดสอบ โดยการวางสายอากาศทั้ง ทางรับ และทางส่ง ห่างกันในระยะที่มากกว่าสนามระยะไกล ซึ่งได้ คำนวณไว้บนบทที่ 3 คือมีค่าเท่ากับ 180 เซนติเมตร โดยทำการวัดโดยใช้สายอากาศชนิดเดียวกันทั้งด้านรับและ ด้านส่ง

โดยสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศ Gain ได้จากสูตร

$$P_R(\text{dBm}) = P_t(\text{GBm}) + G_t(\text{dBi}) - L_T(\text{dB}) - 32.4 - 20\log f(\text{MHz}) - 20\log d(\text{Km}) + G_R(\text{dBi}) - L_R(\text{dB})$$

$$P_R(\text{dBm}) = G_t(\text{dBi}) - 32.4 - 20\log f(\text{MHz}) - 20\log G(\text{Km}) + G_R(\text{dBi})$$

$$-37.06 = 2G - 32.4 - (20\log 3100) - (20\log 180 \times 10^{-5})$$

$$-37.06 = 2G - 32.4 - 69.83 + 54.89$$

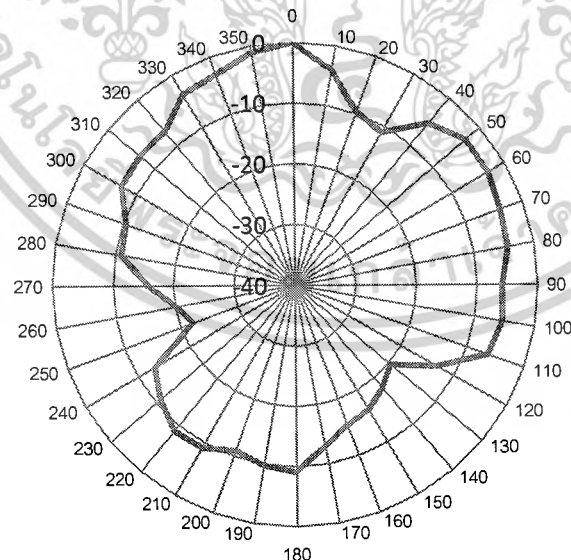
$$10.28 = 2G$$

$$G = \frac{10.28}{2} = 5.14 \text{ dBi}$$

ดังนั้น ค่า Gain ที่ได้เท่ากับ 5.14 dBi

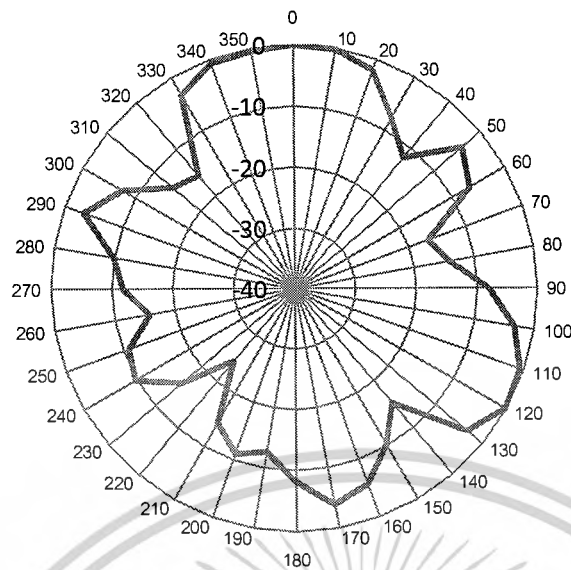
เมื่อได้ค่าของระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยกที่ได้จากการทดลองจริงแล้วนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่

4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



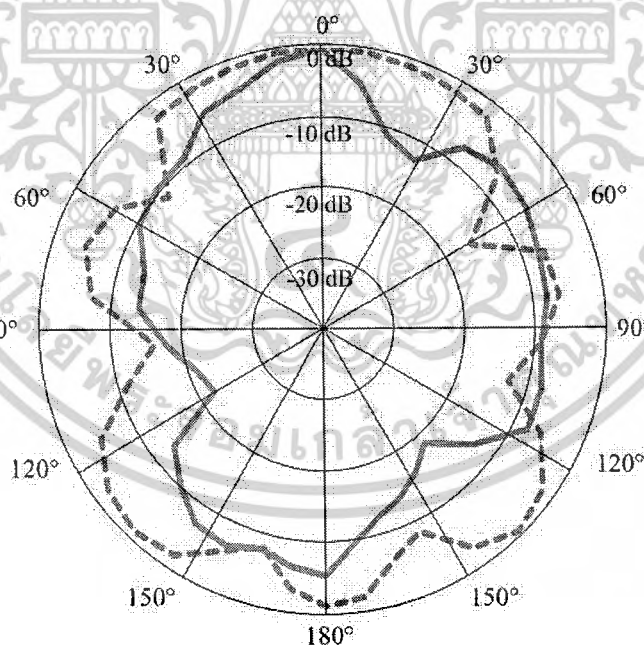
รูปที่ 4.12 กราฟที่ได้จากระนาบมุมกวาดจากการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟที่ได้จากระนาบมุมยกจากการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz

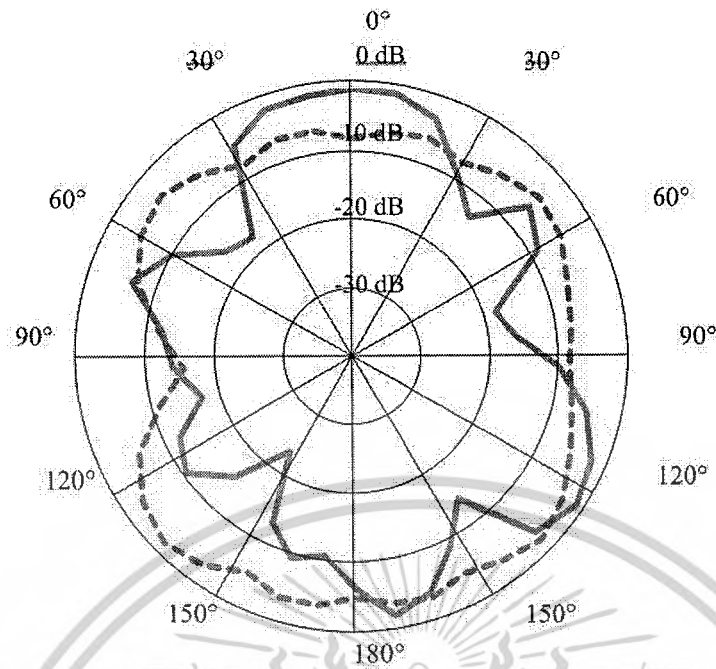
นำกราฟของระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยกที่ได้จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST มาพล็อต
เปรียบเทียบกับผลของระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยกที่ได้จากการทดลองจริง



รูปที่ 4.14 กราฟการเปรียบเทียบระนาบมุมกวาดจากโปรแกรม CST กับ การทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz

จากผลการทดสอบจะพบว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่ได้
จากการทดสอบและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบ
โดยโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟการเปรียบเทียบระนาบมุมยกจากโปรแกรม CST กับการทดลองจริงที่ความถี่ 3.1 GHz

จากผลการทดสอบจะพบว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรม CST จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยจะมีลักษณะที่มีการชี้ทิศทาง

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงการนี้ได้เสนอการสร้างสายอากาศที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างเพื่อที่จะตอบสนองการใช้งานในการสื่อสารระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่ต้องการใช้แบนด์วิดท์ในการทำงานกว้างมากคือใช้ในแถบความถี่ที่ 3.1GHz-10.6GHzแล้วทำการสร้างและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบของสนามไฟฟ้า

เนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอเกิดขึ้นจากสายอากาศมุมสะท้อน 90 องศาในการวิเคราะห์จึงทำการที่ใช้วิธี Simulate ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลการคำนวณแบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากทฤษฎีและได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด เพื่อยืนยันผลการคำนวณจึงได้ทดสอบสายอากาศ พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบมีค่าใกล้เคียงและแม่นยำกับการคำนวณ

ในส่วนของสายอากาศชนิดใหม่ที่น่าสนใจหรือสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมสะท้อน 90 องศา ได้แสดงทฤษฎีและหลักการที่สำคัญสำหรับการคำนวณคุณลักษณะของสายอากาศ วิธีการหาผลเฉลยของสนามโดยวิธีทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมออย่างละเอียดและทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยได้มุมของตัวสะท้อนเท่ากับ 90 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมขนานกับตัวสะท้อน ความสูงและความกว้างของตัวสะท้อนการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวที่มีค่าความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลัง พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของผลการคำนวณกับผลการทดสอบ มีความสอดคล้องกัน

5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินโครงการ

1. ขั้นตอนการจำลองสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม CST มีการใช้เวลานานมากในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองในโปรแกรม
2. ในขั้นตอนการสร้างชิ้นงานไม่สามารถควบคุมชิ้นงานให้เป็นอย่างที่ออกแบบได้ทั้งหมดเนื่องจากอาจมีการคลาดเคลื่อนในการสร้างเล็กน้อย
3. ไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ได้ทั้งหมด
4. การบัดกรีหัวต่อมีผลต่อผลการทดลองที่ได้ คือ ตะกั่วที่มีผลอย่างมากที่ใช้ในการบัดกรีอาจทำให้คุณลักษณะของไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้เนื่องสายอากาศชนิดนี้ทำงานที่ย่านความถี่สูง

5.3 แนวทางการแก้ปัญหา

1. ค้นหาโปรแกรม CST ที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิม และทำการรันโปรแกรม CST หลายๆเวอร์ชันเพื่อที่จะได้รัน โปรแกรมได้เร็วและมีประสิทธิภาพตามที่ต้องการมากที่สุด
2. ต้องทำการออกแบบสายอากาศให้ละเอียดมากที่สุดโดยสามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์ตามวัสดุที่ใช้ได้
3. ในขั้นตอนการสร้างชิ้นงานจะต้องใช้ความรอบคอบให้มากที่สุดเพราะจะมีผลต่อการตอบสนอง

ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพิ่มความละเอียดอ่อนในการต่อคอนเน็คเตอร์ เนื่องจากตะกั่วมีผลทางไฟฟ้าที่ด้านความถี่สูง

5.4 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ได้เสนอการออกแบบและการสร้างของสายอากาศอุตสาหกรรมไร้ไวด์แบนด์ซึ่งสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบนี้มีมุมสะท้อน 90 องศา และเป็นสายอากาศที่ย่านความถี่กว้างเพื่อแก้ไขรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจึงทำให้สายอากาศมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงขึ้นเพื่อนำไปใช้ส่งผ่านข้อมูลได้สำหรับระยะทางไกล โดยได้ออกแบบสายอากาศที่ทำงานตั้งแต่ความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ที่สามารถนำไปใช้ได้กับเทคโนโลยีการสื่อสารอุตสาหกรรมไร้ไวด์แบนด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร ซึ่งให้คำปรึกษาคำแนะนำ และความช่วยเหลือในโครงการนี้มาโดยตลอดนอกจากนี้ ยังได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ในด้านอุปกรณ์และให้ความกรุณาห้องเพื่อดำเนินการทดลองอย่างเป็นผลสำเร็จโดยที่สุด

ขอขอบคุณ คุณ กิตติศักดิ์ แพบัว ในการแนะนำเทคนิคและวิธีการใช้โปรแกรม CST เพื่อใช้ในการคำนวณค่าต่างๆและสมาชิกโครงการสายอากาศทุกท่านให้คำปรึกษาและข้อคิดที่ดีในการทำโครงการนี้ พร้อมทั้งยังให้ความช่วยเหลือในการทดสอบชิ้นงานนอกจากนี้ ทุกคนที่ยังไม่ได้กล่าวถึงในห้องปฏิบัติการไร้สายที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือในโครงการนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดีเสมอมา

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความรัก ความห่วงใย กำลังใจที่ดี รวมทั้งกำลังทรัพย์และให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. C.A.Balanis "Antenna Theory Analysis and Design," 2nd ed. Jhon Wiley & Sons, Inc., 1997
2. C.A.Balanis "Advanced Engineering Electromagnetics, " Jhon Wiley & Sons, Inc., 1998
3. Jame D. Taylor , "Introduction to Untar-Wideband Rader System", CRC Press, Retired, U.S. AIR Force
4. ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ และ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์, "ทฤษฎีสายอากาศ", ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กทม.
5. ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์นากร. (2547). การวิเคราะห์สายอากาศ. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้