

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ ชนิด ทีอีเอ็ม-ฮอร์น

Ultra Wide Band Antenna TEM-HORN



T104336

โดย

นายปรีชา

เครือศรี

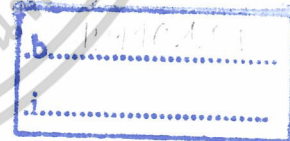
นายสรวิชัย

ศรีไพศาล

นายอนุวัฒน์

รักเป็นธรรม

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....104336
วัน,เดือน,ปี..... 2 พ.ย. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ ชนิด ทีอีเอ็ม-ฮอร์น

Ultra Wide Band Antenna TEM-HORN



โดย

นายปรีชา	เครื่องศรี	49015017
นายสรวิชัย	ศรีไพศาล	49015032
นายอนุวัฒน์	รักเป็นธรรม	49015037

อาจารย์ที่ปรึกษา
พศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ด้วย

ผ่านการตรวจรูปแบบแล้ว
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ ชนิด ทีอีเอ็ม-ฮอร์น

Ultra Wide Band Antenna TEM-HORN Type

ผู้จัดทำ

1. นายปรีชา เกรือศรี 49015017
2. นายสรวิชัย ศรีไพศาล 49015032
3. นายอนุวัฒน์ รักเป็นธรรม 49015037

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ แบบ ทีอีเอ็ม-ฮอร์น
ULTRA WIDE BAND ANTENNA TEM-HORN TYPE

โดย นายปรีชา เกรือศรี 49015017
นายสรวิชัย ศรีไพศาล 49015032
นายอนุวัฒน์ รักเป็นธรรม 49015037

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร
ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการออกแบบและสร้างสายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ ที่ใช้งานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 กิกะเฮิร์ต โดยสายอากาศชนิดนี้เป็นแบบ ทีอีเอ็ม-ฮอร์น เพื่อทำการวัดหาคุณสมบัติของสายอากาศ เช่น เอส-พารามิเตอร์ ค่าความต้านทานสายอากาศ อัตราการขยาย และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะนำไปเปรียบเทียบกับโปรแกรม ซีเอสที

Abstract

This project presents design and fabrication of UWB antenna (3.1-10.6 GHz). The measured antenna characteristics including s-parameter, Impedance, Gain and the radiation pattern are measured and compared with CST. Program.

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 แนวคิดและที่มาของปริญญาโท	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท	3
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญาโท	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน	
2.1 ความเป็นมาของการสื่อสาร UWB	6
2.2 ลักษณะและข้อกำหนดเกี่ยวกับ UWB	7
2.2.1 ข้อกำหนดของ FCC	7
2.2.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Density)	8
2.2.3 ขบวนการสัญญาณพัลส์	9
2.2.4 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม (Spatial and Spectral Capacities)	12
2.2.5 ความเร็วของการส่งข้อมูล	13
2.2.6 ราคา (Cost)	14
2.2.7 ขนาด (Size)	14
2.2.8 การสูญเสียพลังงาน	14
2.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศ	15
2.3.1 แพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	15
2.3.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half-power Beamwidth : HPBW)	19
2.3.3 ความหนาแน่นของพลังงานที่แผ่กระจาย	20
2.3.4 ความเข้มการแผ่กระจายของคลื่น (Radiation Intensity)	21
2.3.5 ไคเรคตีวิตี (Directivity)	22
2.3.6 อัตราขยาย (Gain)	24
2.3.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	25
2.3.8 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)	27
2.3.9 แบนด์วิดท์ (Band Width)	30
2.3.10 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)	31
2.3.11 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)	31
2.3.12 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S-Parameter)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	
3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศชนิด TEM HORN	33
3.2 การออกแบบสายอากาศชนิด TEM HORN	33
3.3 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ TEM HORN ด้วยโปรแกรม CST	36
3.4 การออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN เพื่อใช้งานจริง	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 วัตถุประสงค์การทดลอง	40
4.2 การวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ	40
4.3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ	42
4.3.1 ใช้โปรแกรม CST	42
4.3.2 ใช้เครื่อง Network Analyzer	45
4.4 การวัดและผลการทดลอง	48
4.4.1 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	48
4.4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	51
4.4.3 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ	54
4.4.4 แพทเทิร์นของสายอากาศ	59
4.4.5 อัตราขยายของสายอากาศ	67
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	69
5.1.1 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า	69
5.1.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า	69
5.1.3 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	69
5.1.4 แพทเทิร์นสายอากาศ	69
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำโครงการ	70
5.3 แนวทางการแก้ปัญหา	70
กิตติกรรมประกาศ	72
บรรณานุกรม	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ	9
ตารางที่ 2.2	การเปรียบเทียบความจุตามตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายนอกอาคารแบบต่างๆ	13
ตารางที่ 2.3	การเปรียบเทียบอัตราบิตของ UWB กับมาตรฐานของระบบไร้สายและไร้สายระบบอื่น ๆ	13
ตารางที่ 2.4	การสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB และชิพเซตสื่อสารเคลื่อนที่แบบต่างๆ	14
ตารางที่ 3.1	คุณลักษณะของสายอากาศที่คำนวณได้	34
ตารางที่ 4.1	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศโดยระบุทุกช่วงความถี่	49
ตารางที่ 4.2	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศโดยระบุทุกช่วงความถี่	52
ตารางที่ 4.3	ค่าอิมพีแดนซ์ในรูปจำนวนเชิงซ้อนโดยระบุทุกช่วงความถี่	55
ตารางที่ 4.4	ค่าอิมพีแดนซ์ในรูปจำนวนจริง	56
ตารางที่ 4.5	ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 3.1GHz ในระนาบ H-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์	60
ตารางที่ 4.6	ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 3.1GHz ในระนาบ E-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์	61
ตารางที่ 4.7	ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 6.85GHz ในระนาบ H-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์	62
ตารางที่ 4.8	ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 6.85GHz ในระนาบ E-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์	63
ตารางที่ 4.9	ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 10.6GHz ในระนาบ H-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์	65
ตารางที่ 4.10	ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 10.6GHz ในระนาบ E-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์	66
ตารางที่ 4.11	ค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยระบุทุกช่วงความถี่	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	ส่วนประกอบหลักของระบบการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1
รูปที่ 1.2	เปรียบเทียบแบนด์วิดท์ของอัลตราไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น	2
รูปที่ 1.3	ขั้นตอนการทำปฏิญาณพันธ	4
รูปที่ 2.1	ระบบความหนาแน่นพลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูง	9
รูปที่ 2.2	รายละเอียดของสัญญาณที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป	10
รูปที่ 2.3	(ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ UWB (ข) สเปกตรัมของขบวนสัญญาณพัลส์	11
รูปที่ 2.4	สเปกตรัมของขบวนพัลส์ได้รับการคิเทอร์โดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม	12
รูปที่ 2.5	ระนาบโคออดิเนทสำหรับวิเคราะห์สายอากาศ	16
รูปที่ 2.6	แพทเทอร์นของสายอากาศชี้ทิศทาง	16
รูปที่ 2.7	แพทเทอร์นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	17
รูปที่ 2.8	(a) โลบต่าง ๆ และบีมวิดธ์ของสายอากาศ (b) แพทเทอร์นในแบบลิเนียร์	17
รูปที่ 2.9	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	19
รูปที่ 2.10	มุมตันของบีมซึ่งมีแพทเทอร์นของการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตร	24
รูปที่ 2.11	ข้ออ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ	26
รูปที่ 2.12	สายอากาศและวงจรสมมูลย์	28
รูปที่ 3.1	สายอากาศชนิด TEM HORN แบบเอ็ก โปเนนเชียล	35
รูปที่ 3.2	สายอากาศชนิด TEM HORN แบบเชิงเส้น	35
รูปที่ 3.3	สายอากาศชนิด TEM HORN แบบเอ็ก โปเนนเชียลที่มีกราวด์เพลน	35
รูปที่ 3.4	การสร้างวงแหวนทรงกลม	36
รูปที่ 3.5	การตัดวงแหวนทรงกลม	36
รูปที่ 3.6	การตัดวงแหวนทรงกลมเป็น $\frac{1}{4}$ ส่วน	37
รูปที่ 3.7	การตัดส่วนเกินด้านข้างทางขวา	37
รูปที่ 3.8	การตัดส่วนเกินด้านข้างทางซ้าย	38
รูปที่ 3.9	การสร้างกราวด์เพลน	38
รูปที่ 3.10	การกำหนดตำแหน่ง port	38
รูปที่ 3.11	สายอากาศชนิด TEM HORN ที่มีกราวด์เพลน ที่ประกอบเสร็จแล้ว	39
รูปที่ 4.1	ระบบพิกัดทรงกลม	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2	การเปลี่ยนแปลงค่ามุม θ และ φ ในระบบพิกัดทรงกลม	41
รูปที่ 4.3	เขตค่าต่างในโปรแกรมของสายอากาศ	42
รูปที่ 4.4	การเขตความถี่ที่ใช้งาน	42
รูปที่ 4.5	เขตขอบเขตการแผ่กระจายคลื่น	43
รูปที่ 4.6	เขตมอนิเตอร์	43
รูปที่ 4.7	เลือกพารามิเตอร์ออกมาใช้	44
รูปที่ 4.8	ทำการประมวลผล	44
รูปที่ 4.9	ชุดควบคุมการวัด VSWR ,S – PARAMETER และ Smith Chart	45
รูปที่ 4.10	ทำการวัดพารามิเตอร์ ด้วย เครื่อง Network Analyzer	45
รูปที่ 4.11	ชุดควบคุมการวัดแพทเทอร์น	46
รูปที่ 4.12	สัญญาณ RF	46
รูปที่ 4.13	สายอากาศตัวส่ง	47
รูปที่ 4.14	ลักษณะการวางสายอากาศ	47
รูปที่ 4.15	สายอากาศ รับและสายอากาศส่งให้ห้องปฏิบัติการ	47
รูปที่ 4.16	ค่า S – Parameter ที่วัดด้วยโปรแกรม CST	48
รูปที่ 4.17	ค่า S – Parameter ที่วัดจาก Network Analyzer	48
รูปที่ 4.18	ค่า VSWR ที่วัดด้วยโปรแกรม CST	51
รูปที่ 4.19	ค่า VSWR ที่วัดจาก Network Analyzer	51
รูปที่ 4.20	ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศ ที่วัดด้วยโปรแกรม CST	54
รูปที่ 4.21	ค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดจาก Network Analyzer	54
รูปที่ 4.22	การเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST กับผลการทดลอง	56
รูปที่ 4.23	(a),(b)การวัดการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ E-plane	58
รูปที่ 4.24	(a),(b)การวัดการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ H-plane	58
รูปที่ 4.25	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 3.1 GHz ใน 3 มิติ	59
รูปที่ 4.26	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 3.1 GHz ในระนาบ H-plane	59
รูปที่ 4.27	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 3.1 GHz ในระนาบ E-plane	60
รูปที่ 4.28	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 6.85 GHz ใน 3 มิติ	61
รูปที่ 4.29	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 6.85 GHz ในระนาบ H-plane	62
รูปที่ 4.30	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 6.85 GHz ในระนาบ E-plane	63
รูปที่ 4.31	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 10.6 GHz ใน 3 มิติ	64
รูปที่ 4.32	แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 10.6 GHz ในระนาบ H-plane	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33	แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 10.6 GHz ในระนาบ E-plane	65
รูปที่ 4.34	กราฟอัตราขยายความถี่ตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปริญญานิพนธ์

ในระบบการสื่อสารแบบที่ใช้การกระจายคลื่นนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องส่ง สายนำสัญญาณ สายอากาศและเครื่องรับดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 สายนำสัญญาณจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศ หรือสายอากาศมายังเครื่องรับ สายอากาศนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้า จากเครื่องส่งให้เป็นกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมี



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบการสื่อสาร โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันสายอากาศรับก็จะทำหน้าที่รับกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วส่งเข้าสายนำสัญญาณในรูปของกำลังไฟฟ้า เพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องรับต่อไป อันที่จริงแล้วกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณนั้น ถ้าพิจารณากันอย่างลึกซึ้งแล้วก็จะเป็นการส่งผ่านของกำลังในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกัน เพียงแต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นถูกบังคับให้ส่งผ่านไปตาม โครงสร้างของสายนำสัญญาณเท่านั้น ตัวอย่างของสายนำสัญญาณที่เห็นได้ชัดว่าส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือ ท่อนำคลื่นซึ่งทำด้วยโลหะตัวนำไฟฟ้าเพียงชั้นเดียว ในท่อนำคลื่นนั้นนิยามเกี่ยวกับ กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าจะไม่มี ความหมายที่ชัดเจนอะไร

สายอากาศจัดว่า เป็นอุปกรณ์สำคัญที่สุดอันหนึ่งในระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่น เพราะสายอากาศที่ดี และมีประสิทธิภาพสูงจะทำให้สามารถประหยัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องส่ง และทำให้สามารถติดต่อกันในระยะ ที่ไกลขึ้น สายอากาศจึงได้รับการคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ดังจะเห็นได้ว่า สายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบด้วยกัน

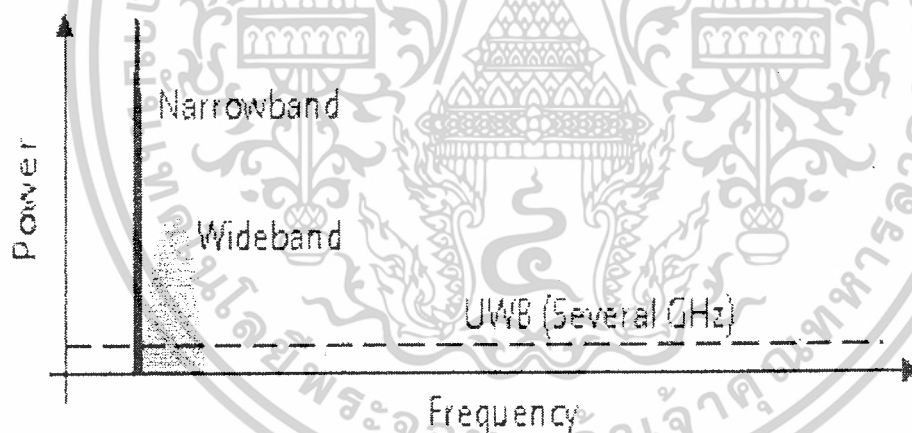
เมื่อพิจารณากันอย่างกว้าง ๆ แล้วสายอากาศอาจจะมีโครงสร้างได้มากมายหลายรูปแบบจนเกือบนับ ไม่ถ้วน เพราะถ้าเราสามารถทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลบน โลหะอย่างเหมาะสมแล้ว ก็จะมีคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านออกไป อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานนั้นนอกจากจะต้องมี ประสิทธิภาพสูงมีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการแล้วยังต้องมีรูปร่างที่สะดวกต่อการสร้าง มีความ แข็งแรงและมีราคาถูกด้วย ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจึงมีจำนวน รูปแบบที่จำกัด และใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนนี้จะมีสายอากาศที่เป็นพื้นฐานที่มีโครงสร้างง่าย ๆ และมีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น สายอากาศไดโพล เป็นต้น สายอากาศที่เป็นพื้นฐานเหล่านี้มักจะได้รับการพิจารณาในการใช้งานเสมอ

ถึงแม้สายอากาศจะได้รับการคิดค้นและพัฒนากันมาหลายสิบปีแล้วก็ตาม ในปัจจุบันนี้ก็ยังมีกรวิจัยและพัฒนาสายอากาศรูปแบบใหม่ ๆ ขึ้นเสมอ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความต้องการของการสื่อสารที่ใช้คลื่นนั้นได้แผ่กว้างออกไป และได้มีความต้องการในลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เกิด ขึ้นเสมอ ยกตัวอย่าง เช่น ในระบบสื่อสารดาวเทียมภายในประเทศ (Domestic satellite communication system) สายอากาศ บนดาวเทียมจะต้องส่งคลื่นลงมาตรงบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยไม่ล้ำเข้าเขตของประเทศที่ไม่ต้องการคลื่นนั้น ในลักษณะเช่นนี้สายอากาศบนดาวเทียมก็จำเป็นต้องได้รับการออกแบบพิเศษให้มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการนั้น

สายอากาศอุลตราไวด์แบนด์ (UWB) เป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นมาเพื่อรองรับกับการสื่อสารคลื่นอุลตราไวด์แบนด์ซึ่งเป็นคลื่นที่ใช้ความหนาแน่นกำลังในการส่งต่ำแต่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากดังแสดงในรูปที่ 1.2 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คลื่นอุลตราไวด์แบนด์มีความจุในการรับส่งข้อมูลได้มากซึ่งทำให้เกิดการส่งข้อมูลได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบแบนด์วิดท์ของอุลตราไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น

และระดับสัญญาณของคลื่นอุลตราไวด์แบนด์ยังมีระดับสัญญาณที่ต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวน ดังนั้นสัญญาณของคลื่นอุลตราไวด์แบนด์จึงไม่ไปรบกวนกับระบบการสื่อสารชนิดอื่น จึงสามารถใช้แถบความถี่ร่วมกับแถบความถี่ของระบบการสื่อสารชนิดอื่นได้ ด้วยคุณสมบัติของการสื่อสารโดยใช้ คลื่นอุลตราไวด์แบนด์ จึงต้องใช้สายอากาศที่มีช่วงความถี่ในการทำงานกว้างมาก เพื่อให้เหมาะสมกับคลื่นอุลตราไวด์แบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าสายอากาศจะมีคุณสมบัติที่อยู่หลายประการก็ตามแต่ก็มีข้อเสียซึ่งต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นโดยหลักการส่วนใหญ่เราจำเป็นต้องทราบและเข้าใจคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้ศึกษาได้ศึกษาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศดังนี้ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) อัตราขยาย (Gain) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และคุณสมบัติอื่น ๆ ของสายอากาศ และนำข้อมูลที่ได้มาเพื่อศึกษาและออกแบบสายอากาศ จากนั้นทำการออกแบบจำลองการสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรมการจำลองสายอากาศ (CST) โดยทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้สายอากาศ TEM HORN ที่มีย่านการใช้งานอยู่ในช่วงอุลตราไวด์แบนด์ (UWB) เพื่อศึกษา วิเคราะห์คุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศ ทฤษฎีของการออกแบบสายอากาศ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาการสร้างและออกแบบสายอากาศให้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์การใช้งาน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารอื่นๆ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ TEM HORN

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศได้แก่

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) อัตราขยาย (Gain) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และประสิทธิภาพของสายอากาศ (Efficiency) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN ที่มีการใช้งานย่าน อุลตราไวด์แบนด์

1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการกำหนดค่าที่เหมาะสมของคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศเพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN

1.2.4 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาสมการสนามไฟฟ้ารวม เพื่อกำหนดรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ TEM HORN

1.2.5 เพื่อศึกษาเทคโนโลยีและหลักการส่งข้อมูลของ อุลตราไวด์แบนด์ (UWB)

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ TEM HORN เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติและคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ นำข้อมูลที่ได้มาออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN

1.3.2 ศึกษาวิธีการออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN ที่มีการใช้งานย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านการใช้งานของเทคโนโลยีอุลตราไวด์แบนด์

1.3.3 ออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN จากแผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร ที่มีกราวด์เพลนและใช้งานในย่านอุลตราไวด์แบนด์

1.3.4 ทดลองวัดคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ TEM HORN ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ในระนาบสนามไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(E-Plane) และในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) อัตราขยาย (Gain) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และ ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Efficiency)

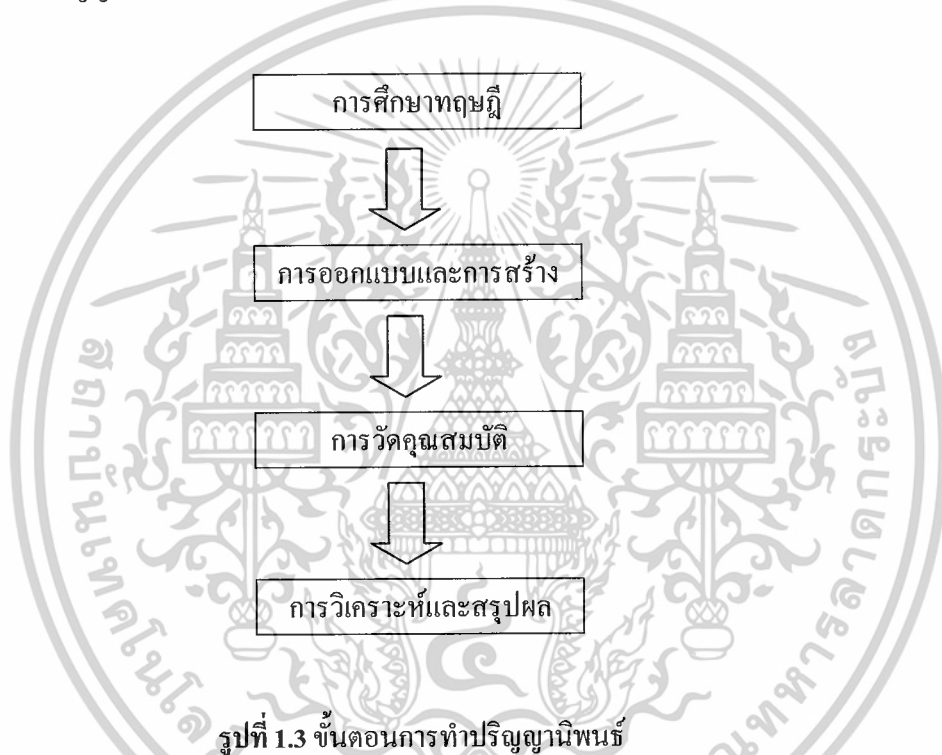
1.3.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างของความถี่ในช่วงต่าง ๆ ของสายอากาศ TEM HORN ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อวัดผลในทางปฏิบัติ

1.3.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบการวัดสายอากาศกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST เพื่อเปรียบเทียบ ความแตกต่าง

1.3.7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการศึกษาวางแผนและทำงานตามขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

การศึกษาทฤษฎีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศจะอยู่ในบทที่ 2 ซึ่งจะประกอบด้วยทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมสายอากาศ พารามิเตอร์ต่าง ๆ อีกทั้งพื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศชนิด TEM HORN

การออกแบบและการสร้างสายอากาศชนิด TEM HORN จะอยู่ในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยการคำนวณ การออกแบบสายอากาศ ขั้นตอนการสร้าง และการจำลองการสร้างด้วยโปรแกรม CST ในคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์คุณสมบัติจะอยู่ในบทที่ 4 จะเป็นเรื่องเกี่ยวกับการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะกล่าวถึงวิธีการวัดและผลการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ ที่อ้างอิงจากการวัดจริง และในส่วนของ โปรแกรม CST

การวิเคราะห์และสรุปผลจะอยู่ในบทที่ 5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดและสรุปผลของการวัด ปัญหาที่เกิดขึ้น วิธีการแก้ปัญหา และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญาโท

1.5.1 ทำให้ทราบถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ TEM HORN

1.5.2 ทำให้ทราบคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ TEM HORN ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า ความสูญเสียเนื่องจากย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงาน ในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก อัตราขยาย สภาพเจาะจงทิศทางและประสิทธิภาพของสายอากาศ

1.5.3 ทำให้สามารถวิเคราะห์วิธีการคำนวณหาคุณลักษณะต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างและออกแบบสายอากาศ TEM HORN

1.5.4 ทำให้ทราบวิธีคำนวณหาสนามไฟฟ้ารวมถึงกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

1.5.5 ทำให้ทราบผลต่าง ๆ ด้านคุณสมบัติของสายอากาศ TEM HORN

1.5.6 ทำให้ทราบเทคโนโลยีอุตสาหกรรมไวต์แบนด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความเป็นมาของการสื่อสาร UWB

การสื่อสาร UWB นั้นได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางเมื่อประมาณปี ค.ศ.2000 ได้รับการขนานนามจากนิตยสารต่าง ๆ ว่าจะเป็นหนึ่งในหลายเทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนโฉมหน้าของโลกเรา แต่ในความเป็นจริงแล้วต้นกำเนิดของ UWB นั้นมีมากกว่าร้อยปีแล้วหรืออาจกล่าวได้ว่าการสื่อสารทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือการสราฟลส์สั้นๆ ขึ้นมาโดยใช้แหล่งกำเนิดแบบ Spark-gap ตัวอย่างเช่น ข้อมูลที่ส่งในการทดลองของ Herz ด้วยเหตุนี้ทำให้ระบบ UWB ที่นำมาใช้ครั้งแรกเกิดขึ้นเมื่อกว่าร้อยปีที่แล้ว และยังมีนักทฤษฎีได้ทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของพัลส์ที่เกิดจากแผ่นระนาบ (Half-Plane) ซึ่งได้เป็นหลักการพื้นฐานของการแผ่กระจายคลื่นของ UWB

อย่างไรก็ตามในปีค.ศ. 1910 เป็นต้นมาความสนใจส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปทางการพัฒนาการสื่อสารช่วงความถี่แคบ (Narrowband) เนื่องจากการสื่อสารช่วงความถี่กว้างจะให้ประสิทธิภาพสเปกตรัม (Spectrum Efficiency) ของสัญญาณที่เกิดจากตัวส่งแบบ Spark-gap นั้นต่ำและยังมีอัตราบิต (Bitrate) ที่ต่ำอีกด้วยหรืออาจกล่าวได้ว่าสัญญาณเหล่านี้มีตัวประกอบการแผ่กระจายออกที่กว้าง ซึ่งในเวลานั้นยังไม่มีใครรู้วิธีการแผ่พลังงานออกมาใช้งานเท่าไรทำให้ดูเหมือนว่าจะไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในทางกลับกันการสื่อสารในช่วงความถี่แคบยังได้นำมาใช้ในเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (FDM) ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นเรื่องง่ายที่จะส่งสัญญาณพร้อมๆกันในช่วงความถี่ที่อยู่จำกัด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตอนนั้นการศึกษาค้นคว้า UWB ไม่มีการก้าวหน้านัก

จากนั้นในปีค.ศ. 1960 ได้มีการศึกษาวิจัย UWB อย่างจริงจังอีกครั้งโดยนำมาใช้สำหรับเรดาร์ทางการทหารซึ่งในครั้งนี้ประเด็นสำคัญไม่ได้อยู่ที่ประสิทธิภาพของสเปกตรัมแต่จะมุ่งเน้นการพัฒนาความละเอียดทางด้านตำแหน่ง (Spatial resolution) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าต้องการเพิ่มความแม่นยำของเวลาที่ใช้งานสำหรับการส่งสัญญาณจากเรดาร์ตัวส่งไปยังวัตถุที่ระบุและส่งกลับมายังตัวรับ ในการศึกษาครั้งนี้จะต้องเริ่มจากการพิจารณาองค์ประกอบสำคัญทางฟูเรียร์พบว่าต้องส่งสัญญาณเรดาร์แบบพัลส์ที่สั้นกว่าเดิมส่วนประกอบสำคัญของระบบเรดาร์ UWB คือการออกแบบกำลังสูงและเครื่องกำเนิดพัลส์สั้น

การสื่อสารแบบ UWB เริ่มได้รับความสนใจอีกครั้งในปีค.ศ.1970 เวลานั้นจะเรียกว่าการสื่อสารแบบช่วงความถี่ฐาน (Baseband) หรือแบบคลื่นพาห่ออิสระ (Carrier-Free) และประมาณปีค.ศ. 1973 ได้มีการยอมรับกันว่าสัญญาณแบบพัลส์สั้นที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างขวางนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แคบและไม่ได้แทรกสอดสัญญาณช่วงความถี่แคบเหล่านั้นด้วยทำให้ในปีค.ศ 1970 -1980 การสื่อสาร UWB ยังคงได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องในส่วนด้านการทหาร และในปีค.ศ. 1990 ปัญหาเรื่อง MAI ก็ได้รับการแก้ไข โดยหลักการเริ่มต้นของหลักการวิทยุอิมพัลส์แบบ time-hopping โดย Win และ Scholtz ที่แสดงให้เห็นว่าสัญญาณวิทยุอิมพัลส์สามารถรองรับได้จำนวนมาก โดยใช้ที่การกำหนดเวลาการส่งผ่านแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pseudorandom ไปยังอิมพัลส์จากผู้ที่ใช้ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาดังกล่าวบวกร่วมกับความก้าวหน้าในการออกแบบ ชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความสนใจที่จะนำ UWB มาใช้ในเชิงพาณิชย์

อุปสรรคที่สำคัญสำหรับการนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ก็คือความถี่ที่อยู่ในธรรมชาติ ที่จัดสรรให้ใช้กันอยู่ทั่วโลกนั้นจะกำหนดให้เป็นแบบช่วงความถี่แคบสำหรับการใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ระบบ UWB ได้ฝ่าฝืนข้อกำหนดดังกล่าวเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่กว้างอาจจะครอบคลุมช่วงความถี่ที่มีการกำหนดใช้งานอย่างอื่นด้วย ดังนั้นจึงมีการขออนุญาตใช้งาน UWB ได้โดยการใช้งานไม่ให้ไปแทรกสอดกับการใช้งานอย่างอื่นจนในที่สุดปี ค.ศ. 2002 ทาง FCC (Federal Communication Commission) ได้อนุญาตให้ใช้ UWB สามารถให้ใช้ได้ที่มีความถี่ระหว่าง 3.1–10.6 GHz นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ของชั้นกายภาพสำหรับการสื่อสารไร้สายที่มีค่า throughput สูงบนพื้นฐานของ UWB ขึ้นมารวมทั้งมาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับการพัฒนาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่ใช้ร่วมกันสำหรับอุปกรณ์ UWB

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมางานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสาร UWB ได้มีจำนวนมากขึ้นซึ่งมีหัวข้อที่ทำการวิจัยแตกต่างกันออกไป เช่น การประเมินช่องสัญญาณและการเข้ากันได้ (synchronization) การติดตั้งเพื่อการไปใช้งานจริงของระบบวิทยุอิมพัลส์และการติดตั้งอื่นที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน UWB ร่วมกับ MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) นอกจากนี้งานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงกับความต้องการของผู้ใช้

2.2 สัญญาณและข้อกำหนดเกี่ยวกับ UWB

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานของสัญญาณ UWB อย่างแรกคือ รูปร่างของสัญญาณพัลส์ในระบบ UWB ในโดเมนเวลาและสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์ด้วย โดยทั่วไปแล้วสัญญาณพัลส์นี้สั้นมากๆซึ่งเวลาของสัญญาณพัลส์ขึ้นและลงอย่างรวดเร็วจะมีสเปกตรัมที่กว้างและมีพลังงานต่ำมาก จะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ UWB ที่สั้นมากๆจะสามารถถูกรองไว้และยังพร้อมที่จะแยกออกจากการสะท้อนสัญญาณหลายเส้นทางที่ไม่ต้องการได้เพราะว่าความละเอียดทางเวลาที่ดียิ่งจะนำไปสู่คุณลักษณะของการไม่ถูกรบกวนสัญญาณหลายเส้นทาง ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณพัลส์ UWB ทำให้การแผ่กระจายคลื่นผ่านวัสดุอย่างเช่นปูนซีเมนต์หรืออิฐได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาคส่งและภาครับของ UWB ไม่ต้องการส่วนประกอบที่ใหญ่และมีราคาแพง ทำให้สามารถลดต้นทุน ขนาด น้ำหนัก และการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบ UWB เมื่อเปรียบเทียบกับ การสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบอื่น ๆ

2.2.1 ข้อกำหนดของ FCC

ในปี ค.ศ.2002 FCC ได้ตีพิมพ์กฎของ UWB สำหรับนำไปใช้ในงานสื่อสารข้อมูลและเรดาร์รวมถึง อุปกรณ์รักษาความปลอดภัยโดย FCC จะเป็นตัวกำหนดพื้นฐานสำหรับกฎมาตรฐานสำหรับ UWB ดังนี้

- แบนวิคท์ของ UWB แถบความถี่จะกำหนดขอบเขตโดยให้มีค่าเท่ากับ 10 dB ลงมาจากค่าที่มากที่สุดของพลังงานการแผ่กระจายคลื่น

- ความถี่กลางถูกกำหนดให้คือ $f_c = (f_H + f_L)/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบนวิดท์จะถูกกำหนดให้ $BW = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L)$ โดยแบนวิดท์ของ UWB มีค่ามากหรือเท่ากับ 500 MHz

- EIRP : Equivalent Isotropics Radiation Power เป็นตัวกำเนิดพลังงานไปยังสายอากาศและอัตราขยายของสายอากาศที่มีทิศทางจะมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไอโซโทรปิก

- สำหรับระบบภายในอาคารและระบบเคลื่อนที่แบนวิดท์ของระบบ UWB ต้องอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz และต้องมีค่า EIRP เท่ากับ -43 dBm

2.2.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Dencity)

โดยทั่วไปความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบ UWB จะพิจารณาให้มีค่าต่ำมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางการสื่อสาร ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังกำหนดให้เป็น

$$PSD = \frac{P}{B} \quad (2.1)$$

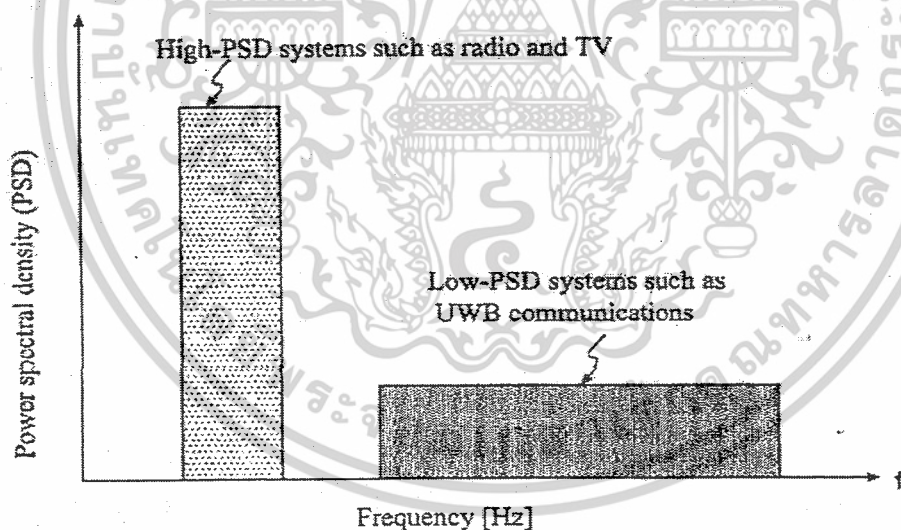
โดยที่ P คือกำลังส่ง มีหน่วยเป็น วัตต์ และ B เป็น แบนวิดท์ของสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์และความหนาแน่นสเปกตรัมมีหน่วยเป็นวัตต์/เฮิรตซ์

ตามประวัติที่ผ่านมาพบว่าการสื่อสารไร้สายจะมีใช้เฉพาะช่วงความถี่แคบซึ่งจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่สูงหรืออาจจะกล่าวได้ว่าเนื่องจากเรารู้ว่าความถี่และเวลาจะเป็นสัดส่วนที่ตรงกันข้ามระบบสัญญาณจะใช้นาฬิกาจะมี B แคบและระยะเวลา (t) นาน สำหรับระบบ UWB จะมีพัลส์สัญญาณ t สั้น และช่วงความถี่ B ที่กว้างมาก เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบต่างๆ นั้นตารางที่ 2.1 จะแสดงค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ จะเห็น ได้ว่ากำลังงานที่ใช้ไปในการส่งในระบบสื่อสารไร้สายจะน้อยมากๆ โดยทั่วไปควรจะทำเท่าที่จะทำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ถ้าจำกัดปริมาณพลังงานได้ ก็จะสามารถส่งความหนาแน่นพลังงานที่สูงมากตลอดช่วงความถี่แคบหรือไม่ก็ส่งความหนาแน่นพลังงานต่ำที่ช่วงความถี่สูงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบทั้งสองจะแสดงในรูปที่ 2.1 ปริมาณกำลังงานทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความถี่และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ

ระบบ	กำลังส่ง (W)	แบนวิทช์ (Hz)	ความหนาแน่นกำลังงาน (W/Hz)	ประเภทของช่องความถี่
วิทยุ	50KW	75KHz	666600	ช่วงแคบ
โทรทัศน์	100KW	6MHz	16700	ช่วงแคบ
เซลลูลาร์ 2G	10mW	8.33KHz	1.2	ช่วงแคบ
802.11a	1W	20MHz	0.05	ช่วงกว้าง
UWB	1mW	7.5GHz	0.013	ช่วงกว้างยิ่งยวด

สำหรับระบบ UWB โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นกำลังงานสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำมาก ๆ ประโยชน์ของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำ คือความน่าจะเป็นในการตรวจจับได้ต่ำ ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในทางทหาร ยกตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนแปลงด้านการสื่อสารและเรดาร์ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการประยุกต์การใช้งานไร้สายที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูลสูง

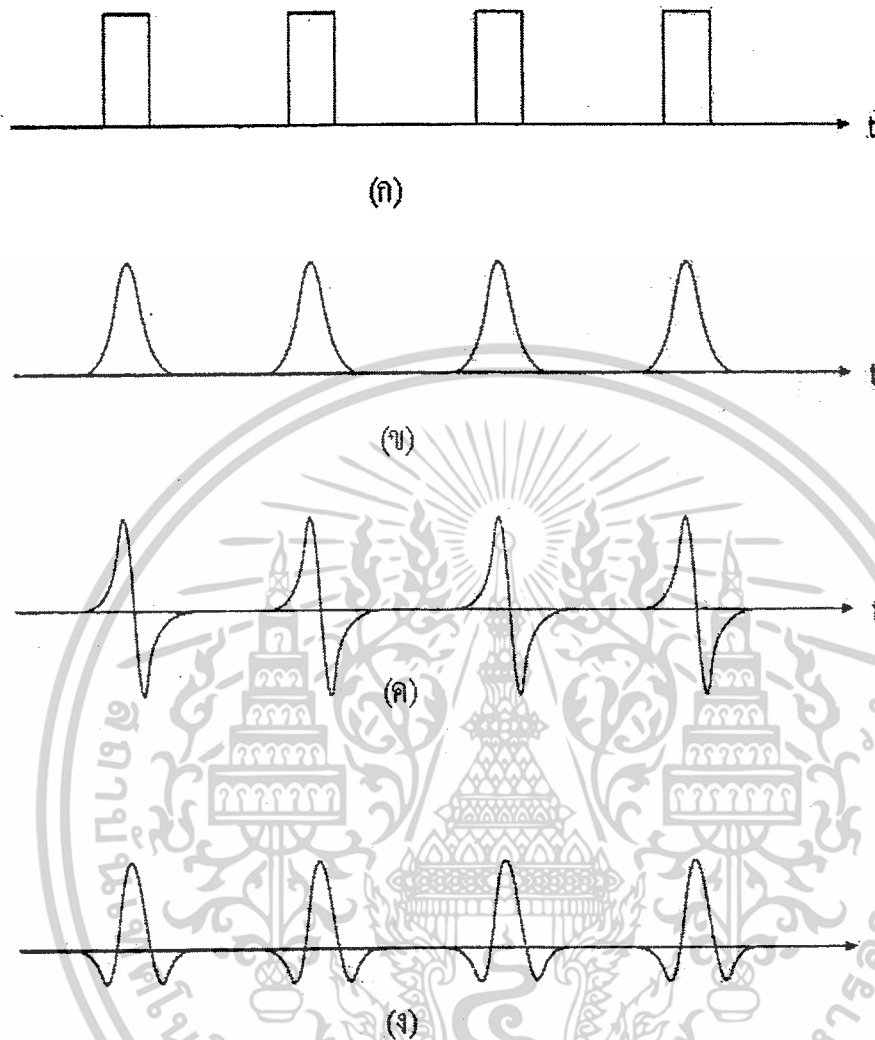


รูปที่ 2.1 ระบบความหนาแน่นพลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูง

2.2.3 ขบวนสัญญาณพัลส์

สัญญาณพัลส์อันเดียวกัน ไม่สามารถจะสื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ ดังนั้นข้อมูลจึงจำเป็นที่จะผ่านการมอดูเลตกับลำดับของสัญญาณพัลส์ที่เรียกกันว่า ขบวนพัลส์ (Pulse Train)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

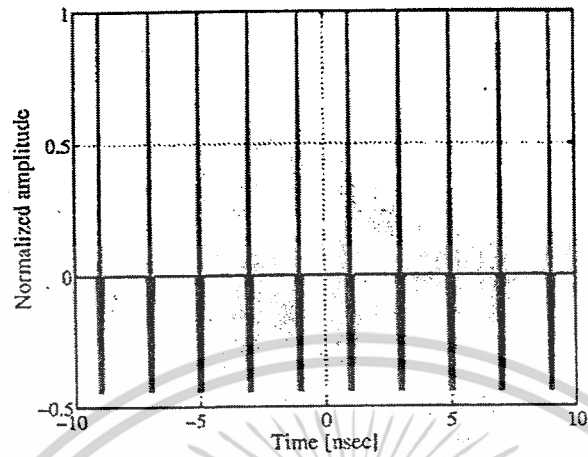


รูปที่ 2.2 รายละเอียดของสัญญาณที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป

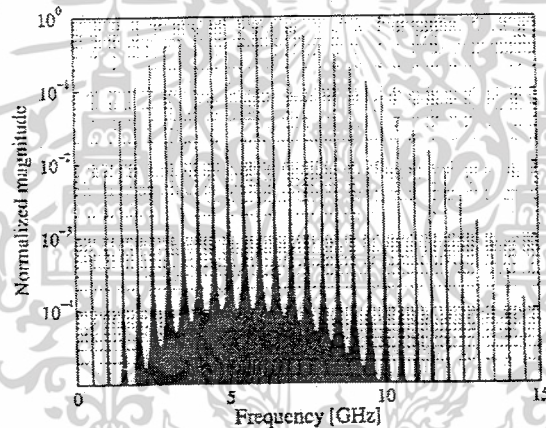
- (ก) ขบวนสัญญาณพัลส์
- (ข) ขบวนสัญญาณพัลส์แบบเหมือน
- (ค) สัญญาณพัลส์อนุพันธ์ครั้งที่ 1
- (ง) Gaussian Doublet ที่ได้รับ

เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ไปจะมีช่องว่างเวลาระหว่างส่งสัญญาณที่มีเป็นระยะทางบางที่เรียกว่าอัตราการส่งพัลส์ซ้ำหรือรอบการทำงานซึ่งจะทำให้สเปกตรัมของสัญญาณประกอบไปด้วยยอดสูงสุดของกำลังงานที่ความถี่ที่แน่นอน ความถี่เหล่านี้จะเป็นส่วนกลับของอัตราการส่งพัลส์ซ้ำและเส้นยอดสุดของกำลังงานเหล่านี้จะเรียกว่า ซีหวี (Comblines) เนื่องจากมีลักษณะเหมือนกับหวีดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



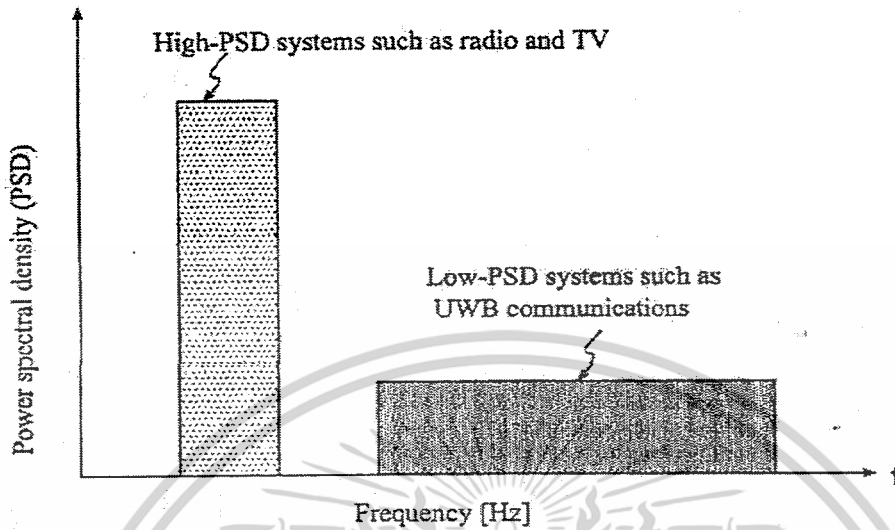
(ข)

รูปที่ 2.3 (ก) ขบวนการสัญญาณพัลส์ UWB

(ข) สเปกตรัมของขบวนการสัญญาณพัลส์

ยอดสูงสุดเหล่านี้จะจำกัดกำลังรวมทั้งหมดที่ไม่ต้องการได้ วิธีหนึ่งก็คือการดีเทอร์ (Dither) สัญญาณ โดยการเพิ่มตำแหน่ง offset สั้น ๆ แบบสุ่มไปในสัญญาณพัลส์แต่ละสัญญาณ สเปกตรัมที่เป็นผลมาจาก offset แบบสุ่มจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของขบวนพัลส์ได้รับการตีความโดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม

2.2.4 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม (Spatial and Spectral Capacities)

คุณสมบัติพื้นฐานของระบบ UWB อีกหนึ่งก็คือมีความจุทางตำแหน่งที่สูงมีหน่วยเป็น บิตต่อวินาทีต่อตารางเมตร (bps/m^2) ความจุทางตำแหน่งสามารถคำนวณได้เป็นอัตราบิตข้อมูลที่สูงสุด (Maximum data rate) ของระบบทหารด้วยพื้นที่ที่ครอบคลุมการส่งของระบบพื้นที่ในการส่งข้อมูลสามารถคำนวณจากพื้นที่วงกลมที่สมมติให้ตัวส่งอยู่ในตำแหน่งกลาง โดยความจุทางตำแหน่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความจุทางตำแหน่ง}(\text{bps}/\text{m}^2) = \text{อัตราข้อมูลมากที่สุด/พื้นที่ในการส่ง} \\ \text{พื้นที่ในการส่ง}(\text{m}^2) = \pi * (\text{ระยะในการส่ง Transmission Distant})^2 \quad (2.2)$$

สำหรับระบบช่วงความถี่แคบการวัดความจุที่นิยมมากที่สุดก็คือ ความจุทางสเปกตรัมมีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ (bps/Hz) ก็เพราะสเปกตรัมเป็นแหล่งทรัพยากรที่ถูกจำกัดมากที่สุด โดยทั่วไปกำลังจะถูกจำกัดโดยเหตุผลทางความปลอดภัยและในเชิงพาณิชย์อย่างเช่นอายุของแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่

สำหรับระบบ UWB ที่ทำงานในสเปกตรัมของระบบอื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกำลังงานต่ำมาก ๆ เป็นการชดเชยสำหรับการใช้งานที่มีช่วงความถี่กว้าง ตามปกติแล้วระบบ UWB จะมีความจุทางสเปกตรัมที่ต่ำเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆแต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆถือว่า UWB ดีที่สุดดังแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่

2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบความจุตามตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายนอกอาคารแบบต่าง ๆ

ระบบ	อัตราข้อมูลมากที่สุด (Mbps)	ระยะในการส่ง (m)	ความจุทางตำแหน่ง (kbpa/m ²)	ความจุทางสเปกตรัม (bps/Hz)
UWB	100	10	318.3	0.013
IEEE802.11	54	50	6.9	2.7
Bluetooth	1	10	3.2	0.012
IEEE802.11b	11	100	0.35	0.1317

2.2.5 ความเร็วของการส่งข้อมูล

ข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งของการส่ง UWB สำหรับการสื่อสารก็คือ อัตราข้อมูลที่สูงการประยุกต์ใช้งานในทางการสื่อสาร UWB มีเป้าหมายความเร็วอยู่ในช่วง 100 Mbps ถึง 500 Mbps ซึ่งจะมากกว่าความเร็วระบบ Bluetooth 100 ถึง 500 เท่า และประมาณ 50 เท่าเมื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE802.11b หรือ 10 เท่าของมาตรฐาน IEEE802.11a WLAN

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าอัตราข้อมูลสำหรับการส่ง UWB ไร้สายภายในอาคารจะอยู่ระหว่าง 110 Mbps และ 480 Mbps และเปรียบเทียบกับมาตรฐานแบบใช้สายและไร้สายในปัจจุบันในความจริงแล้วความเร็วของการส่งจะถูกกำหนดมาตรฐานไว้ที่ 3 ความเร็วดังนี้

- 110 Mbps สำหรับระยะการส่งที่น้อยที่สุดเท่ากับ 10 m
- 200 Mbps สำหรับระยะการส่งที่น้อยที่สุดเท่ากับ 4 m
- 480 Mbps สำหรับระยะการส่งไม่จำกัดระยะน้อยที่สุด

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบอัตราบิตของ UWB กับมาตรฐานของระบบใช้สายและไร้สายในระบบอื่น ๆ

ความเร็ว (Mbps)	มาตรฐาน
480	UWB และ USB 2.0
200	UWB (ระยะที่น้อยที่สุด 4 เมตร) และ 1394a(4.5m)
110	UWB (ระยะที่น้อยที่สุด 10 เมตร)
90	อีเทอร์เน็ตความเร็วสูง (Fast Ethernet)
54	802.11a
20	802.11g
11	802.11b
10	อีเทอร์เน็ต
1	Bluetooth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ราคา (Cost)

ข้อดีอย่างหนึ่งของเทคโนโลยี UWB ก็คือการที่ระบบไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่ต่ำเนื่องจากระบบ UWB สามารถสร้างขึ้นจากส่วนประกอบที่เป็นแบบดิจิทัลเกือบทั้งหมด โดยมีส่วนประกอบทางด้านความถี่วิทยุ หรือชิ้นส่วนที่เป็นไมโครเวฟน้อยที่สุดส่วนประกอบของระบบที่น้อยจะนำไปสู่การลดลงของต้นทุนภาคส่ง UWB ที่ง่ายที่สุดประกอบด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์ วงจรทางเวลาและตัวสายอากาศ

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการอัตราข้อมูลที่สูงกว่า ก็จำเป็นที่จะใช้วงจรทางเวลาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้หลายรูปแบบจึงจำเป็นต้องเพิ่มส่วนนี้เข้าไป ซึ่งทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นด้วย ยิ่งไปกว่านั้นราคาของชิพเซต ก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของการผลิตอย่างมาก

2.2.7 ขนาด (Size)

ขนาดที่เล็กของภาคส่ง UWB เป็นความต้องการที่จะเข้าร่วมไปเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้กันในปัจจุบัน ในกลุ่มมาตรฐาน IEEE 802.15 บริษัทอิเล็กทรอนิกส์ได้กำหนดเป้าหมายของขนาดวงจรไร้สายให้มีขนาดเล็กพอที่จะนำไปบรรจุในตัวเก็บข้อมูลแบบ SD

เหตุผลหลักที่ต้องการให้ภาคส่งและรับของ UWB มีขนาดเล็กเนื่องจากการลดลงของขนาดส่วนประกอบแบบพาสซีฟ (Passive) อย่างไรก็ตามขนาดและรูปร่างของสายอากาศก็เป็นตัวประกอบที่จำเป็นต้องพิจารณาเช่นเดียวกัน

2.2.8 การสูญเสียพลังงาน

ด้วยการออกแบบทางวิศวกรรมที่เหมาะสมทำให้สายอากาศ UWB มีค่าที่ต่ำเลยทีเดียวไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีอย่างไรก็ตามตวงก็คาดหวังว่าการสูญเสียกำลังงานที่ลดลงและมีวงจรที่มีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถประมวลผลสัญญาณ ได้มากขึ้นบนชิพเซตขนาดเล็กที่ใช้แรงดันต่ำ

ในปัจจุบันได้ตั้งเป้าหมายสำหรับการสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB ให้น้อยกว่า 100mW ส่วนตารางที่ 2.4 จะแสดงค่าการสูญเสียกำลังงานของชิพเซตที่ไม่เท่ากัน

ตารางที่ 2.4 การสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB และชิพเซตสื่อสารเคลื่อนที่แบบต่างๆ

ชิพเซตตามการประยุกต์ใช้งาน	การสูญเสียกำลังงาน (mW)
802.11a	1500-2000
400Mbps 1394 LSI	700
โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบRISC 32-bit MPU	200
ตัวแปลง A/D ของกล้องดิจิทัล 12-bit	150
UWB (เป้าหมาย)	100
โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบหน้าจอสี TFT	75
ตัวถอดรหัส MPEG - 4LSI	50
โทรศัพท์เคลื่อนที่เข้ารหัสเสียง LSI	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

2.3.1 แพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันสเปซโคออดิเนต (space coordinate) ส่วนใหญ่แพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น คุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.5 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นกำลังงาน (power pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นสนาม (Field pattern) ของสายอากาศนั้น

2.3.1.1 แพทเทิร์นแบบไอโซโทรปิก ไคเรชันแนล และออมนิไดเรชันแนล

ตัวแผ่คลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทางยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

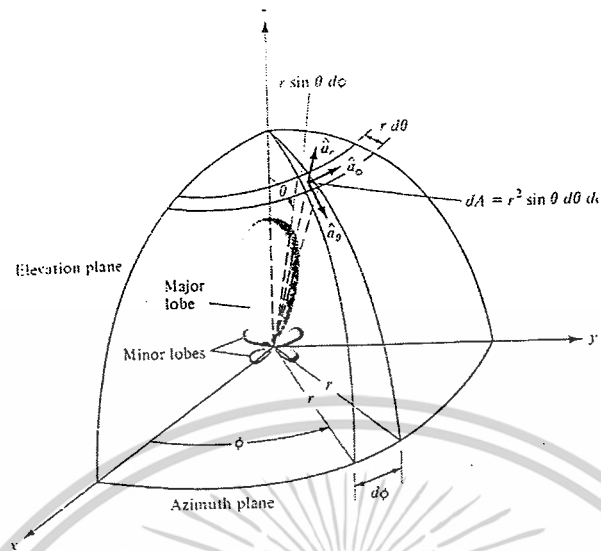
สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ Omnidirectional Antenna คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.6

จากรูปจะเห็นว่าแพทเทิร์นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth Plane) [$f(\phi)$ θ = ค่าคงที่] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation plane) [$g(\theta)$ ϕ = ค่าคงที่] แพทเทิร์นแบบออมนิไดเรชันแนลเป็นกรณีพิเศษของแพทเทิร์นแบบชี้ทิศทาง

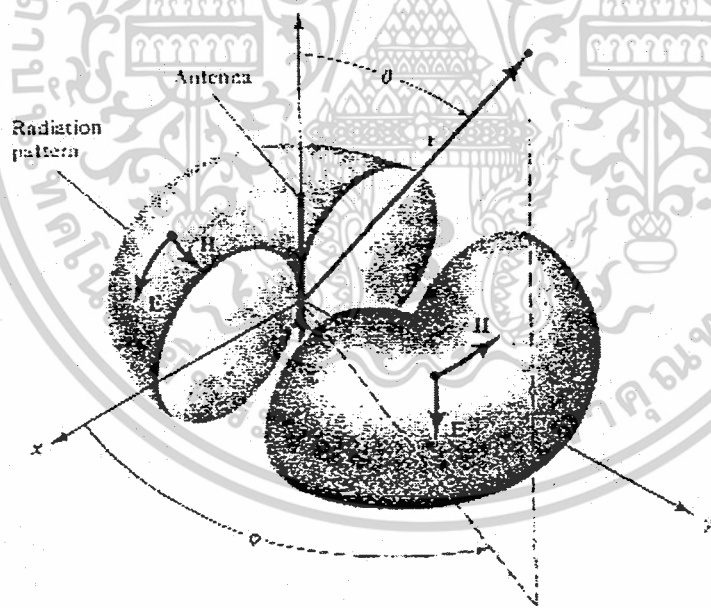
2.3.1.2 แพทเทิร์นหลัก (principle pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติอากาศในทอมแพทเทิร์นหลัก (principle pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศลิเนียร์โพลาริเซชัน (Linearly polarization) แพทเทิร์นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการกระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแพทเทิร์นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุสนามแม่เหล็ก และทิศทางของการกระจายคลื่นที่แรงที่สุดตัวอย่างการแสดงแพทเทิร์นหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน; $\theta = 0$) เป็นระนาบ E หลัก และมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

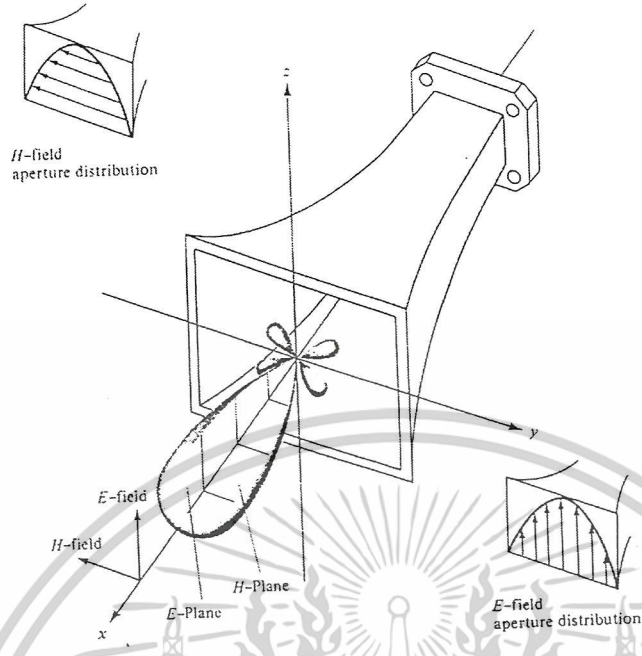


รูปที่ 2.5 ระนาบโคออดิเนตสำหรับวิเคราะห์สายอากาศ

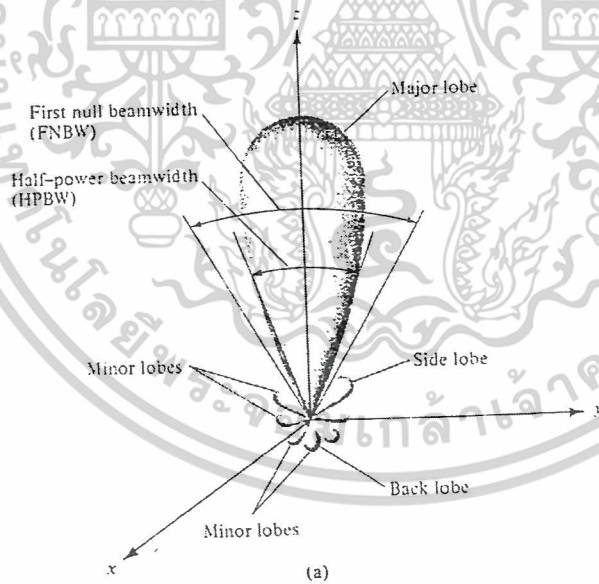


รูปที่ 2.6 แพทเทิร์นของสายอากาศชี้ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

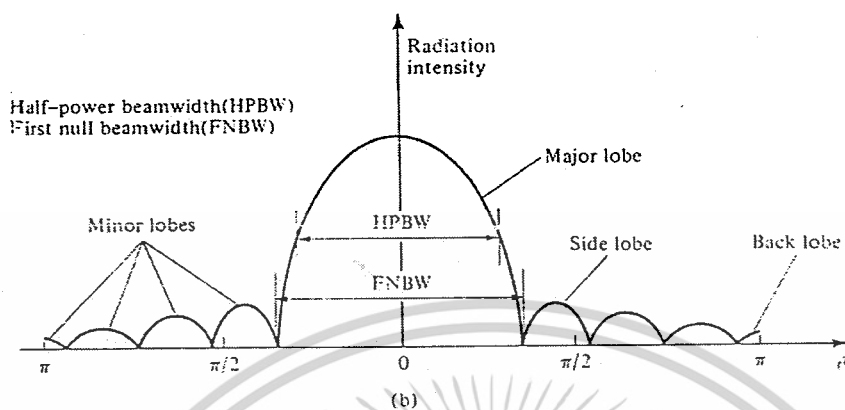


รูปที่ 2.7 แพทเทิร์นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร



รูปที่ 2.8 (a) โลบต่าง ๆ และมีมิติของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 (b) แพทเทอรันในแบบลิเนียร์

2.3.1.3 โลบลึกแพทเทอรันการกระจายคลื่น

โอบของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแพทเทอรันการกระจายคลื่นที่เป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของที่มีความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.8 แสดงโพลารแพทเทอรัน (polar pattern) แบบสามมิติ ซึ่งเป็นโอบรูปต่างๆ ดังนี้

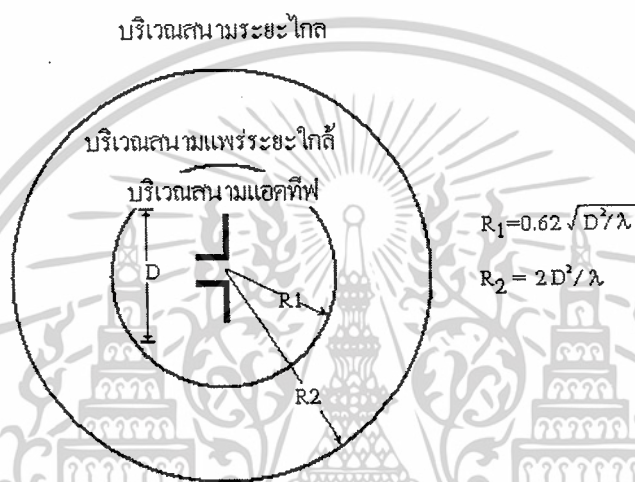
โอบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโอบของการแผ่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่การแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.8 มีโอบหลักอยู่ในทิศทางที่ $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจจะมีโอบมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแยกปีม (split Beam Antenna)

โอบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ โอบอื่นๆนอกเหนือไปจากโอบหลัก โอบข้างหรือไซด์โอบ (side Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (Back Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลัก ปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโอบเหล่านี้ให้น้อยที่สุดระดับของโอบย่อยแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโอบที่กำลังติดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโอบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนไซด์โอบ (side Lobe Ratio) หรือระดับพลังงานของไซด์โอบ (side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักต้องการ ให้ระดับของไซด์โอบน้อยกว่า -20dB

2.3.1.4 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) และสนามกระจายระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่สนามล้อมรอบอากาศมากที่สุด และเป็นสนามชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ



รูปที่ 2.9 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งอยู่ระหว่างสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับสนามระยะไกล โดยมีสนามกระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะห่างจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้อาจมีระยะทาง $0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D / \lambda$ บริเวณสนามระยะไกล เป็นสนามของสายอากาศซึ่งการแผ่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่เท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > 2D^2 / \lambda$ จากสายอากาศในบริเวณนี้มีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแผ่กระจายตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า $R = 2D^2 / \lambda$ จากสายอากาศ

2.3.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half-power Beamwidth :HPBW)

เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่มีความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เพื่อความสะดวกต่อไปจะใช้คำย่อ HPBW แทน

2.3.3 ความหนาแน่นของพลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้าโดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous paynting vector) ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.3)$$

เมื่อ \vec{W} = พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (W/m²)

\vec{E} = ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น (V/m)

\vec{H} = ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น (A/m)

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นที่ผิวปิดจะสามารถหาได้โดย อินทิเกรทส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นที่ผิวทั้งหมดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$j = \oint_S \vec{W} \cdot d\vec{s} = \oint_S \vec{W} \cdot \vec{n} da \quad (2.4)$$

เมื่อ j = กำลังงานทั้งหมดชั่วขณะเวลานั้น (W)

da = พื้นที่จวบจนพื้นที่ปิด (m²)

ในกรณีของสนามที่แปรผันตามเวลา มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานโดยการอินทิเกรทค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ตลอดหนึ่งคาบแล้วหารด้วยคาบเวลานั้น สำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิก ในรูป $e^{j\omega t}$ เมื่อกำหนด \vec{E} และ \vec{H} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อนแล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า \vec{E} และ \vec{H} ชั่วขณะเวลาใดๆได้จาก

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

$$\vec{H}(x,y,z,t) = \text{Re}(\vec{H}(x,y,z) e^{j\omega t}) \quad (2.6)$$

จาก (2.5) ,(2.6) และโดยอาศัย $\text{Re}[\vec{E} e^{j\omega t}] = \frac{1}{2} [\vec{E} e^{j\omega t} + \vec{E}^* e^{-j\omega t}]$ (2.3) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H} e^{2j\omega t}] \quad (2.7)$$

เทอมแรกของ (2.7) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา และเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของเวลาที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์ จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\vec{W}_{av}(x,y,z) = [\vec{W}(x,y,z,t)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (2.8)$$

ตัวประกอบ 1/2 ใน (2.7) และ (2.8) เกิดขึ้นเพราะสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็นค่าสูงสุดไม่ใช่ค่า rms จาก (2.8) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$\text{Prad} = \text{Pav} = \oint_S \vec{W} \cdot \vec{n} da$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{2} \iint_s \operatorname{Re}[\vec{E} \times \vec{H}] \cdot d\vec{s} \quad (2.9)$$

2.3.4 ความเข้มการแผ่กระจายของคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่า การแผ่กระจายของคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่กระจายจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นและผลกำลังสองของระยะทางซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.10)$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (\bar{W} / หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m^2)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |\vec{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \\ &= \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta(r, \theta)|^2 + |E_\phi(r, \theta)|^2 \right] \end{aligned} \quad (2.10a)$$

เมื่อ \vec{E} = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทรินสิคิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแพทเทิร์นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกันกำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยการอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตาม (2.12) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.11)$$

ในกรณีของพอยท์ซอร์ส U จะไม่ขึ้นอยู่กับค่ามุม θ และ ϕ ดังนั้น

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U_0 d\Omega = U_0 \iint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_0 \quad (2.12)$$

เมื่อหาความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของพอยท์ซอร์ส

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ไคเรคติวิตี (Directivity)

เพื่อให้เข้าใจถึงไคเรคติวิตี (Directivity) เราจำเป็นต้องรู้จักไคเรคติฟเกน (Directive Gain) ไว้ก่อน ไคเรคติฟเกนในทิศทางที่กำหนดคืออัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศที่ใช้สำหรับอ้างอิงนี้จะใช้ ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic point source)

ไคเรคติวิตี คือค่าของไคเรคติฟเกน ในทิศทางที่มากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่า ไคเรคติวิตีของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คืออัตราส่วนความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.14)$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.15)$$

เมื่อ D_g = ไคเรคติฟเกน (ไม่มีหน่วย)
 D_0 = ไคเรคติวิตี (ไม่มีหน่วย)
 U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (\bar{W} /หน่วยมุมตัน)
 U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (\bar{W} /หน่วยมุมตัน)
 U_0 = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (\bar{W} /หน่วยมุมตัน)
 P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (\bar{W})

จาก (2.14) และ (2.15) เราจะพบว่าไคเรคติฟเกนและไคเรคติวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่งทั้งนี้เพราะว่า U, U_{max}, U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน

ไคเรคติวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแผ่กำลังงานออกไปในทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีไคเรคติวิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของไคเรคติฟเกนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับไคเรคติวิตี ($0 \leq D_g \leq D_0$)

โดยทั่วไปสูตรของไคเรคติฟเกนและไคเรคติวิตี อาจเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ, ϕ ด้วย (ที่แล้วมาแสดงเฉพาะฟังก์ชันของมุม θ เท่านั้น)

ต่อไปลองสมมติให้ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้คือ

$$U = B_0 F(\theta, \phi) \cong \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] / 2\eta \quad (2.16)$$

เมื่อ B_0 เป็นค่าคงที่ และ E_θ และ E_ϕ เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ค่าสูงสุดของ (2.16) หาได้คือ

$$U_{max} B_0 F(\theta, \phi) \Big|_{max} = B_0 F_{max}(\theta, \phi) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานทั้งหมดที่แผ่กระจายทั้งหมดหาได้จาก

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) d\theta = B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_{\theta}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.18)$$

ดังนั้นจะได้สูตรทั่วไปของไดเรกทิฟเนสและไดเรกทิวิตีเป็นดังนี้คือ

$$D_g(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.19)$$

$$D_0(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi) |_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.20)$$

หรือเขียน (2.20) ใหม่ได้เป็น

$$D_0 = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \frac{F(\theta, \phi) |_{\max}}{F(\theta, \phi) |_{\max}} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.21)$$

เมื่อ Ω_A เป็นมุมตันของบีม (Beam) ซึ่งหาได้จาก

$$\Omega_A = \frac{1}{F(\theta, \phi) |_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.22)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi) |_{\max}} \quad (2.23)$$

$F(\theta, \phi) |_{\max}$ นำมาหารใน (2.23) เพื่อ normalize ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น $F(\theta, \phi)$ ให้มีค่าสูงสุดเป็น 1 มุมตันของบีม Ω_A มีค่าจำกัดความว่าเป็นมุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศจะไหลผ่านเมื่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นคงที่และมีค่าสูงสุดเท่ากับค่าของ U ที่ทุกมุมภายใน Ω_A

สายอากาศซึ่งมีโบลหลักแคบ ๆ เพียงโบลเดียวและมีโบลย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้มุมตันของบีมจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ในสองระนาบซึ่งตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10a สำหรับแพทเทอร์นของสายอากาศที่หมุนแล้วสมมาตรกันโดยรอบ HPBW ในระนาบใด ๆ จะเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.10b โดยอาศัยการประมาณนี้ (2.23) จะเขียนได้ใหม่ดังต่อไปนี้

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} \cong \frac{4\pi}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.24)$$

เมื่อ Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใด ๆ

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

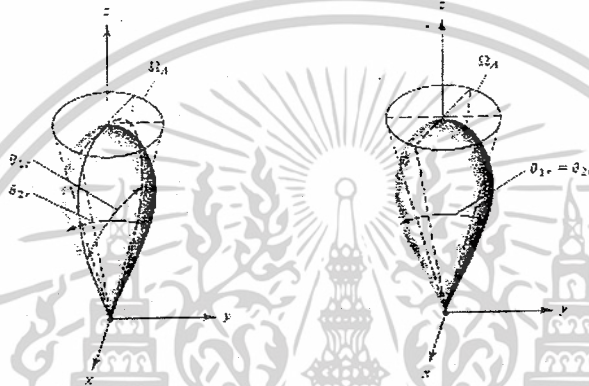
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรู้บีมวิศกต์เป็นองศา (2.24) จะตัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าบีมวิศกต์นั้น โดยตรงได้เป็น

$$D_0 \cong \frac{4\pi \left[\frac{180}{\pi} \right]^2}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} = \frac{41253}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.25)$$

เมื่อ Θ_{1d} = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2d} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)



รูปที่ 2.10 มุมตันของบีมซึ่งมีแพทเทอรันของการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตร สำหรับ planar array จะประมาณ (2.25) ได้เป็นดังนี้คือ

$$D_0 = \frac{32400}{\Omega^2 A} = \frac{32400}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.25a)$$

(2.24) และ (2.25) จะใช้ได้ผลดี เมื่อแพทเทอรันมีโลบลักเพียงโลบลึกเดียวและโลบล้อยจะต้องมีขนาดเล็กมากเท่านั้น สำหรับแพทเทอรันที่มี 2 โลบลักที่เหมือนกันค่าไดเรคตีวิตี้ที่หาได้จาก (2.24) และ (2.25) จะเป็น 2 เท่าของค่าจริงส่วนแพทเทอรันที่มีโลบล้อยที่ระดับสูง การหาไดเรคตีวิตี้โดยใช้ (2.24) และ (2.25) ซึ่งตัดโลบล้อยทิ้งจะมีค่าสูงเกินจริง

โดยปกติเรามักจะแสดงไดเรคทีวิตีกนและไดเรคตีวิตี้เป็นเดซิเบล (dB)

$$D_g \text{ (dB)} = 10 \log_{10} [D_g \text{ (ไม่มีหน่วย)}] \quad (2.26)$$

$$D_0 \text{ (dB)} = 10 \log_{10} [D_0 \text{ (ไม่มีหน่วย)}] \quad (2.27)$$

2.3.6 อัตราขยาย (เกน)

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากไดเรคตีวิตี้ โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรคตีวิตี้ อธิบายคุณสมบัติ ในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้นเพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีมุมเท่ากับ 4π คุณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้ โดยเฉพาะทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยาย} &= 4\pi \text{ (ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น/กำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ)} \\ &= 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \text{ (ไม่มีหน่วย)} \end{aligned} \quad (2.28)$$

โดยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงเกนสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นซึ่งคำนวณ เกน ได้ง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = 4\pi U(\theta, \phi) / P_{in} \text{ (ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย)} \quad (2.29)$$

จากรูป 2.7a เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพัทธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ด้วย

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.30)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้ (2.30) จะทำให้ (2.29) มีความสัมพันธ์ง่ายเข้าเป็น

$$G_g(\theta, \phi) = e_r \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.31)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตีใน (2.19) คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.32)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของเกนจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี โดย

$$G_0 = G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} = e_r D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} = e_r D_0 \quad (2.33)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกนจะเป็น

$$G_0 \cong \frac{30000}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.33a)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงเกนมักจะหมายถึง เพาเวอร์เกนที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงใน (2.33)

$$G_0(dB) = 10 \log_{10}[e_r D_0 \text{ (ไม่มีหน่วย)}] \quad (2.34)$$

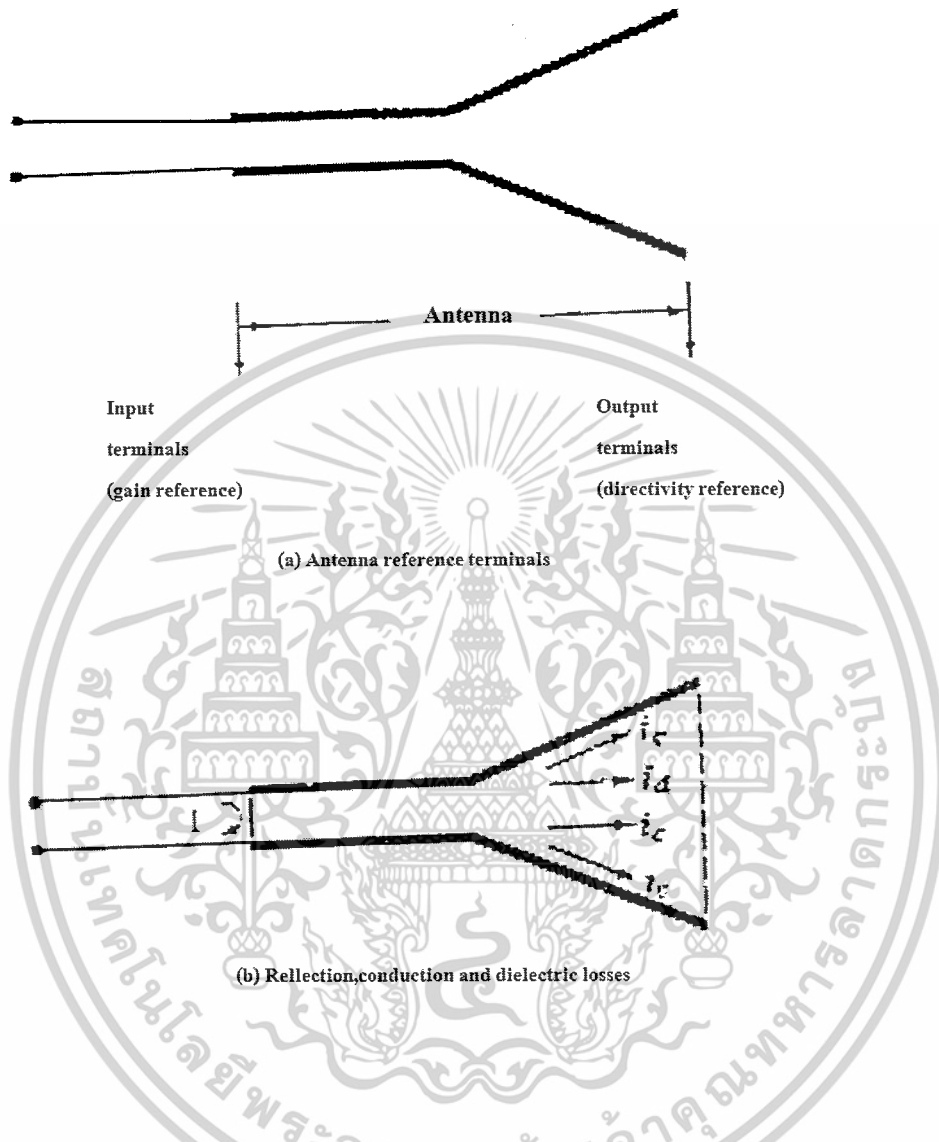
2.3.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ e_r จะใช้เมื่อคำนวณการสูญเสียต่างๆที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆเมื่ออ้างอิงตามรูป 2.11b อาจเนื่องมาจาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่สมพจน์ (Mismatch) กันระหว่างสายส่ง (Transmission Line)

กับสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ

2. การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน ($I^2 R$) โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.35)$$

- เมื่อ
- e_t = ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)
 - e_r = ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ $= (1 - |\Gamma|^2)$ (ไม่มีหน่วย)
 - e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)
 - e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)
 - Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_{out}}{Z_{in} + Z_{out}}$$

เมื่อ Z_{in} = อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

Z_{out} = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c และ e_d ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวกมักจะเขียน (2.35) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.36)$$

$e_{cd} = e_c e_d$ = ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.3.8 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศใด ๆ จะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น ๆ อาจเป็นอัตราส่วนของศักย์ไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ ในรูป 2.12a a-b เป็นขั้วของสายอากาศอัตราส่วนของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วนี้เมื่อไม่ได้ต่อโหลด (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.37)$$

เมื่อ Z_A = อินพุทอิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

R_A = ความต้านทานที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

X_A = รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

โดยทั่วไปค่าความต้านทานใน (2.37) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.38)$$

เมื่อ R_r = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

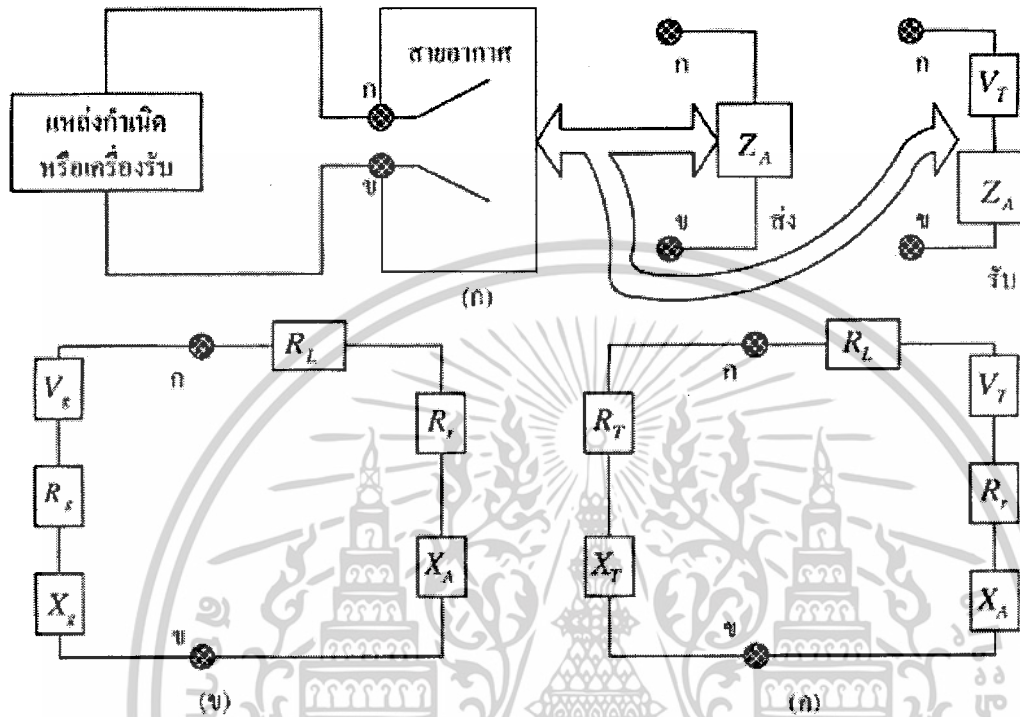
R_L = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าสมมติว่าสายอากาศถูกต้องเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ภายในเป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (2.39)$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

X_g = รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)



รูปที่ 2.12 สายอากาศและวงจรสมมูลย์

สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นสายส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูป 2.12b ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นเพื่อแผ่กระจายออก กับกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย R_L ที่กลายเป็นความร้อน ($I^2 R_L / 2$) นั้น เราจะหากระแสที่ไหลผ่านใน Loop ได้ว่ามีค่าดังนี้

$$I_g = \frac{V_g}{Z_i} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} = \frac{V_s}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \quad (A) \quad (2.40)$$

และขนาดกระแสมีค่าดังนี้ คือ

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{[(R_r + R_L + R_g) + (X_A + X_g)]^{1/2}} \quad (2.40a)$$

เมื่อ V_g เป็นศักย์ค่าไฟฟ้าค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศเพื่อแผ่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 P_r &= \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r \\
 &= \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (W) \quad (2.41)
 \end{aligned}$$

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อนจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_L &= \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L \\
 &= \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (W) \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

กำลังงานส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในตัวต้านทานที่ขั้ว R_g ของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งมีค่า

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (W) \quad (2.43)$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิด conjugate Match นั่นคือจะเกิดเมื่อใน

$$R_r + R_L = R_g \quad (2.44)$$

$$X_A = -X_g \quad (2.45)$$

กรณีนี้ (2.41),(2.42),(2.43) จะกลายเป็นดังต่อไปนี้

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{4(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.46)$$

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}
 P_g &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l)^2} \right] \\
 &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{1}{R_r + R_L} \right] = \frac{|V_g|^2}{8R_g} \quad (2.48)
 \end{aligned}$$

จาก (2.46) ถึง (2.48) พบว่า

$$\begin{aligned}
 P_g &= P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l)^2} \right] \\
 &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r + R_L}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.49)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์จะมีค่าดังนี้

$$P_s = \frac{1}{2} V_g I_g = \frac{1}{2} V_g \left[\frac{V_g}{2(R_r + R_L)} \right]$$

$$= \frac{|V_g|^2}{4} \left[\frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (\text{W}) \quad (2.50)$$

ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียความร้อนภายในความต้านทานภายใน (R_g) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศ ซึ่งจะเกิดเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่ออกมายังสายอากาศ ส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกลไกที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะเสียเป็นความร้อน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e_{cd} = 1$) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศและสายส่ง ($e_r = 1$) ถ้าไม่มีการสูญเสียเนื่องจากไม่แมทซ์แล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง ในรูปที่ 2.12a แสดงวงจรสมมูลย์นอร์ตันของสายอากาศกับต้นกำเนิดเมื่อสายอากาศเป็นสายอากาศส่งสำหรับการใช้สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12a ถ้ามีคลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศจะเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ค่าไฟฟ้า V ซึ่งเทียบได้กับ V_g ในโหมคของการส่งได้แสดงวงจรสมมูลย์เทวินินไว้ในรูป 2.12b ส่วนวงจรสมมูลย์นอร์ตันมีแสดงในรูปที่ 2.12c ปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะสมพียงกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆอีกได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะพบว่า ส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

2.3.9 แบนด์วิดท์ (Band Width)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศกำหนดให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์แพทเทอร์น บีมวิดท์ โพลาริเซชัน ระดับของไซด์โลบ เกน ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือไม่ต่างจากที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐานสำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนที่ใช้งาน ได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งาน ได้ด้านต่ำ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่สูงลบด้วยความถี่ต่ำ) หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศไม่เปลี่ยนตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมดดังนั้นไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งแต่เพียงอย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์แต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของ แพทเทอร์นกับอิมพีแดนซ์ แบนด์วิดท์ จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ นอกจากนั้นแบนด์วิดท์ของเกน ระดับของไซด์โลบ บีมวิดท์ โพลาริเซชัน จะมีแบนด์วิดท์เดียวกับแพทเทอร์นแบนด์วิดท์ในขณะที่แบนด์วิดท์ของอินพุทอิมพีแดนซ์และประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าเดียวกับอิมพีแดนซ์ของแบนด์วิดท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.10 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

กำลังที่ได้ที่ออกจากสายอากาศเพื่อออกสู่อากาศโดยกำลังที่ส่งออกไปอาจจะมีกำลังส่วนหนึ่งที่มีการสะท้อนกลับเข้าสู่สายอากาศส่วนหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นที่ส่งออกไปเป็นคลื่นเดินทางไปข้างหน้าและเมื่อคลื่นเดินทางชนกับคลื่นที่สะท้อนกลับจะเสริมกันหรือหักล้างกันแล้วแต่ความแตกต่างจากเฟสของคลื่นทั้งสอง ผลลัพธ์ของคลื่นทั้งสองจะปรากฏเป็นคลื่นนิ่ง สรุปแล้วคลื่นนิ่งก็คือผลที่เกิดจากการเดินทางและคลื่นสะท้อนกลับมาผสมกัน

2.3.11 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งคือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่ง อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหดผิดไปจากสภาวะที่โหดแมทซ์กันมากน้อยเพียงใด เราหาค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้จากสูตร

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (2.51)$$

เมื่อ Γ_L คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$\Gamma_L = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.52)$$

เมื่อ Z_1, Z_2 คืออิมพีแดนซ์ของคลื่น (โอห์ม)

2.3.12 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S-Parameter)

เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับหาสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ เราสามารถเขียน S-Parameter ได้ดังนี้

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+ \quad (2.53a)$$

$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+ \quad (2.53b)$$

เมื่อ V_1^+ คือ แรงดันที่จ่ายที่พอร์ตที่ 1 (โวลต์)

V_1^- คือ แรงดันที่สะท้อนกลับที่พอร์ตที่ 1 (โวลต์)

V_2^+ คือ แรงดันที่จ่ายที่พอร์ตที่ 2 (โวลต์)

V_2^- คือ แรงดันที่สะท้อนกลับที่พอร์ตที่ 2 (โวลต์)

โดยที่ความหมายของ S-Parameter แต่ละตัวคือ S_{11} และ S_{22} เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่ วัดที่ พอร์ต 1 และ พอร์ต 2 สำหรับ S_{12} และ S_{21} เป็นสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านจากพอร์ตที่ 2 มายัง พอร์ตที่ 1 และ จากพอร์ตที่ 1 มายัง พอร์ตที่ 2 ตามลำดับ เราจะสามารถหาค่า S_{ij} ได้โดยการวัดคลื่นที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตที่ 1 และจากที่กล่าวไปแล้วว่า S_{ij} ก็คือสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับและภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้ V_j^i จะเขียนได้ ดังนี้

$$V_j^i = S_{ij}V_1^+ \quad (2.54a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \quad (2.54b)$$

ดังนั้น

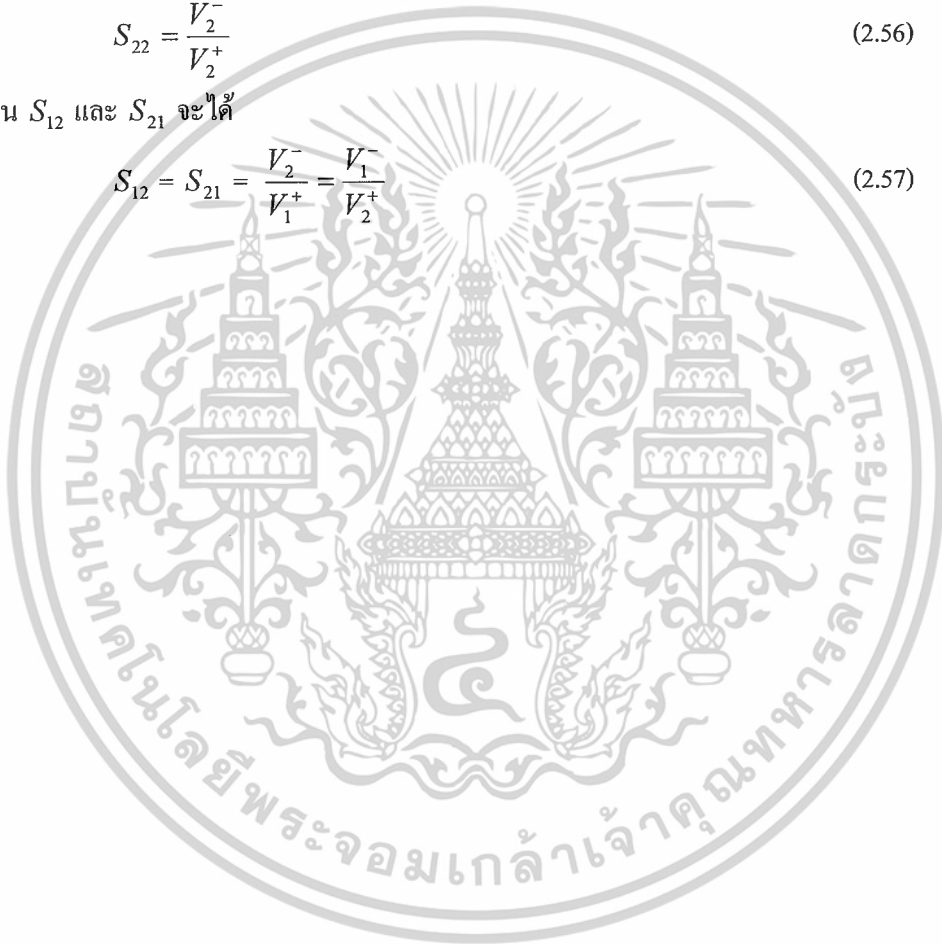
$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (2.55)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \quad (2.56)$$

และแทน S_{12} และ S_{21} จะได้

$$S_{12} = S_{21} = \frac{V_2^-}{V_1^+} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \quad (2.57)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศชนิด TEM HORN

สายอากาศ TEM HORN ถูกนำมาใช้ในสายอากาศย่านความถี่กว้าง เพื่อการประยุกต์ที่หลากหลาย ชนิดของ Application เหล่านี้ประกอบด้วย EMC experiments (การทดสอบ) Ground Penetrating Radar (GPR) และการป้อนสัญญาณสำหรับตัวสะท้อนสัญญาณ

สายอากาศเหล่านี้ มีข้อได้เปรียบของย่านกว้างไม่มีการแยกกระจายและง่ายต่อการสร้าง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียเปรียบของสายอากาศชนิดนี้คือขนาดรูปร่างที่ใหญ่ วิธีการต่าง ๆ ได้ถูกสร้างขึ้น เพื่อมีการแก้ไขและพัฒนาสายอากาศให้มีความสามารถ อีกทั้งยังลดขนาดของสายอากาศได้อีกด้วย

TEM HORN ส่วนมากถูกนำมาใช้ในเรื่องการวัดของสายอากาศฝั่งรับ เพื่อสร้างเครื่องมือวัดโดยตรงของภาวะชั่วขณะ (Transient) ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า สายอากาศ TEM HORN เป็นพื้นฐานของสายส่งสัญญาณคู่ขนานแบบปลายเปิดและปิด

นักวิจัยบางกลุ่มได้พยายามลดขนาดของสายอากาศด้วยการเพิ่มความต้านทานและการกระทำได้กล่าวยังสามารถทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย สิ่งหนึ่งที่นักวิจัยสนใจ คือ การปรับขนาดรูปร่างของแผ่น

3.2 การออกแบบสายอากาศชนิด TEM HORN

สายอากาศชนิด TEM HORN ประกอบด้วย วัสดุแผ่นเรียบ 2 แผ่น เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) หรือแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) สายอากาศแบบเชิงเส้นสามารถสร้างได้ง่ายตรงกันข้ามกับสายอากาศแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ที่สร้างได้ยากกว่า อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลมีจุดเด่นตรงที่การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่ราบเรียบกว่า

สายอากาศชนิดนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกันระหว่างสายส่งสัญญาณ (Transmission Line) กับช่องว่างอิสระ (Free Space)

อนึ่งสายอากาศชนิด TEM HORN สามารถคำนวณค่าความต้านทานได้หลายระดับตาม การเพิ่มขึ้นของแถบความถี่ ($VSWR < 2$) ตัวเลขดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้นดังนั้นค่าความต้านทานที่ราบเรียบสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง เป็นอีกวิธีหนึ่งในการเลือกออกแบบสายส่งสัญญาณ โดยเราสามารถคำนวณค่าความต้านทานเพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศได้จาก

$$\ln \bar{Z} = \left(\frac{\rho}{2\pi} + \frac{1}{2} - \frac{\rho}{2\pi \cosh \pi \mu_0} \right) \ln \bar{Z}_L + \frac{\ln \bar{Z}_L}{\pi \cosh \pi \mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \pi \sqrt{n^2 - \mu_0^2} - \cos n\pi}{n} \sin n\rho \quad (3.1)$$

เมื่อ \bar{Z} คือ ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงแต่ละจุด

\bar{Z}_L คือ ความต้านทานของโหลด ในที่นี้ใช้ 100Ω

$$\pi \mu_0 = \beta_0 L$$

$$\pi \mu = \beta L$$

$$\rho = 2\pi \frac{x - L/2}{L} \quad ; \quad -\pi < \rho < \pi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L คือ ความยาวของแผ่น (เซนติเมตร)

ถ้าเราต้องการนำสายอากาศชนิด TEM HORN มาเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น (Wave Guide) เราจะได้สมการ $w(x)$

$$w(x) = \frac{\eta d(x)}{Z(x)} \quad (\text{เซนติเมตร}) \quad (3.2)$$

เมื่อ $d(x)$ คือ ชั้นส่วนเล็กๆของแผ่นเพลท

$w(x)$ คือ ความกว้างของแผ่นเพลท

η คือ ค่าความต้านทานตั้งต้นในช่องว่างอิสระ (Free space)

นำ $d(x)$ มาเข้าสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลจะได้

$$d(x) = \alpha e^{(\beta x)} \quad (3.3)$$

เมื่อ α และ β คือ ค่าคงที่ที่กำหนดคุณลักษณะของสายอากาศ

เราสามารถออกแบบและสร้างสายอากาศชนิด TEM HORN โดยคำนวณจากสมการ (3.1) (3.2) และ (3.3)

เมื่อเราคำนวณแล้วจะได้ค่าดังตาราง

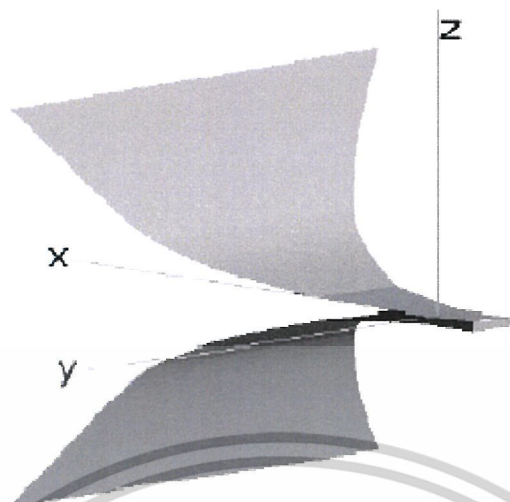
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของสายอากาศที่คำนวณได้

X[cm]	Z[Ω]	d [cm]	W [cm]
0	100	1	3.7
5	103.05	1.36	4.9
10	110.05	2.06	6.84
15	123.49	3.1	9.18
20	145.68	4.68	11.82
25	178.25	7.06	14.8
30	220.62	10.64	18.38
35	313.72	16.04	23.12
40	348.41	24.2	29.98
45	368.79	36.5	40.52
50	377	50	50

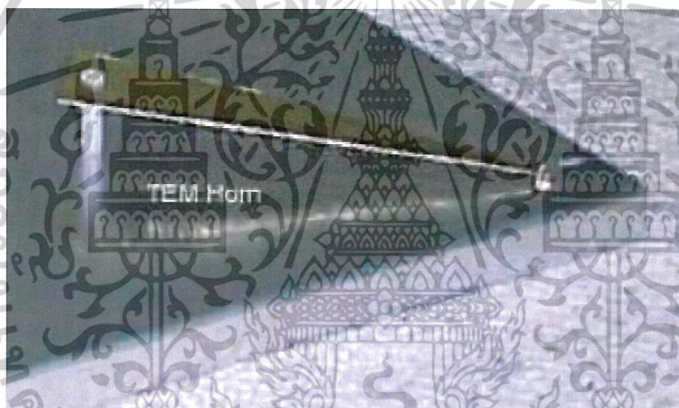
ส่วนที่แยกออกจากแผ่นเพลททั้งสองจะแสดงอยู่ในรูปของเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังรูป พื้นที่บริเวณจุดป้อนจะสูญเสียเฉพาะช่องว่างที่ปล่อยสัญญาณ โดยส่วนนี้จะสามารถแทนที่ระหว่างระนาบของแผ่นเพลท 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สายอากาศชนิด TEM HORN แบบเอ็กซ์ โปเนนเซียล



รูปที่ 3.2 สายอากาศชนิด TEM HORN แบบเชิงเส้น



รูปที่ 3.3 สายอากาศชนิด TEM HORN แบบเอ็กซ์ โปเนนเซียลที่มีกรวด์เพลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

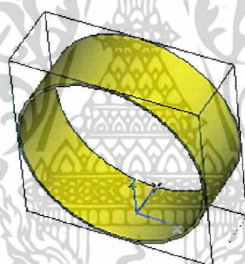
3.3 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ TEM-HORN ด้วยโปรแกรม CST

3.3.1 เปิดโปรแกรม CST เลือกที่ CST MICROWAVE STUDIO จะปรากฏตารางให้เราเลือกชนิดสายอากาศที่เราออกแบบ เช่น Antenna with sub-state Antenna with groundplane เป็นต้น เลือก Antenna with groundplane

3.3.2 กำหนดหน่วยวัดในการออกแบบโดยเลือกที่ unit จะให้กำหนด ขนาด ความถี่ และเวลาของการออกแบบโดยเราจะเลือกขนาดเป็น มิลลิเมตร ความถี่เป็น GHz และเวลาเป็น nS

3.3.3 เลือกรูปร่างของสายอากาศโดยจะมีรูปทรงเลขาคณิต เช่น ทรงสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกลม ทรงกรวย ซึ่งสายอากาศที่จะออกแบบเราไม่สามารถใช้รูปทรงพื้นฐานเหล่านี้ได้โดยตรง แต่สามารถนำมาช่วยได้

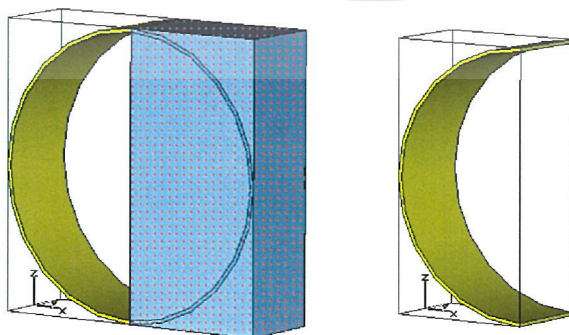
3.3.4 ออกแบบ plate โดยเลือกทรงกระบอก (cylinder) กำหนดขนาดรัศมีวงในเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และรัศมีวงนอกเท่ากับ 39 มิลลิเมตรซึ่งจะได้ความหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร กำหนดความกว้างเท่ากับ 30 มิลลิเมตร สุดท้ายกำหนดชนิดของวัสดุที่จะใช้ในการทำสายอากาศ เลือกเป็นทองแดง (copper) เราจะได้เป็นวงแหวนรัศมีตามที่เรากำหนดดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสร้างวงแหวนทรงกลม

3.3.5 สร้างกล่องสี่เหลี่ยมวางทับเพื่อตัดส่วนที่เราไม่ต้องการออก โดยส่วนแรกเราจะตัดครึ่งวงแหวนก่อนโดยเลือก cut away highlighted shape ส่วนที่ทับกับกล่องสี่ฟ้าจะหายไป เราจะได้ครึ่งวงแหวน ดังรูปที่

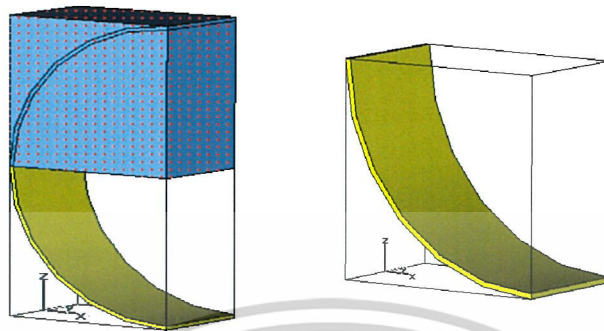
3.5



รูปที่ 3.5 การตัดวงแหวนทรงกลม

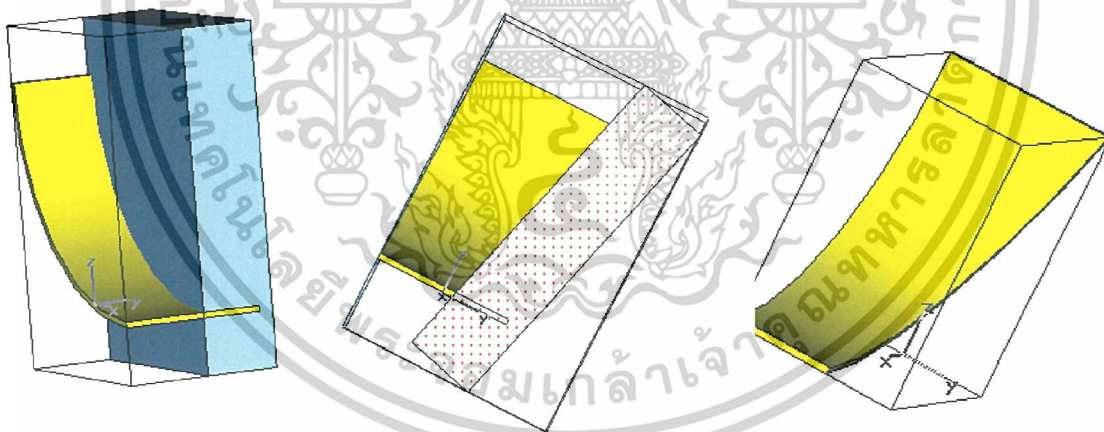
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 สร้างกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อตัดส่วนบนเลือก cut away highlighted shape ส่วนที่ทับกับกล่องสี่ฟ้าจะหายไป จะได้ขนาดplateเป็น $\frac{1}{4}$ ของวงแหวน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การตัดวงแหวนทรงกลมเป็น $\frac{1}{4}$ ส่วน

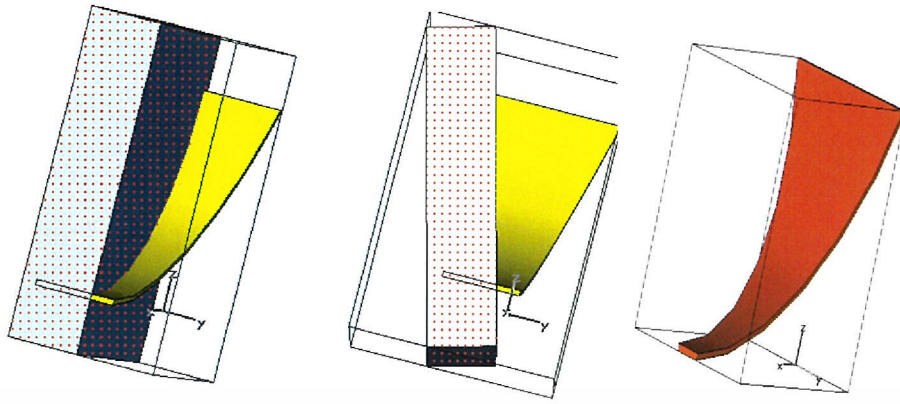
3.3.7 สร้างกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อตัดด้านข้างขวาออก ตามรูปร่างของสายอากาศที่เราจะออกแบบ โดยส่วนนี้ต้องใช้หลายเทคนิคเข้าช่วย ฟังก์ชันที่ช่วยได้คือ Transform ฟังก์ชันนี้จะทำการเปลี่ยนรูปร่างของรูปทรงที่เราเลือก โดยเราจะใช้การหมุน (Rotate) เมื่อได้มุมที่ต้องการแล้ว เลือก cut away highlighted shape ส่วนที่ทับกับกล่องสี่ฟ้าจะหายไปดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การตัดส่วนเกินด้านข้างทางขวา

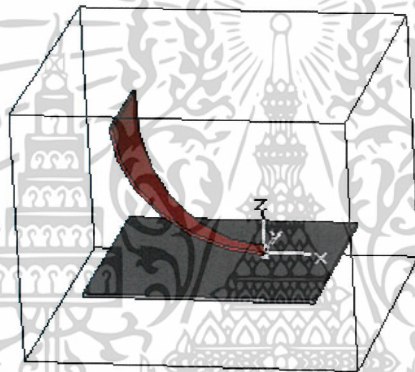
3.3.8 สร้างกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อตัดด้านข้างซ้ายออก ตามรูปร่างของสายอากาศที่เราจะออกแบบ โดยส่วนนี้ต้องใช้หลายเทคนิคเข้าช่วย ฟังก์ชันที่ช่วยได้คือ Transform ฟังก์ชันนี้จะทำการเปลี่ยนรูปร่างของรูปทรงที่เราเลือก โดยเราจะใช้การหมุน เมื่อได้มุมที่ต้องการแล้ว เลือก cut away highlighted shape ส่วนที่ทับกับกล่องสี่ฟ้าจะหายไปดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



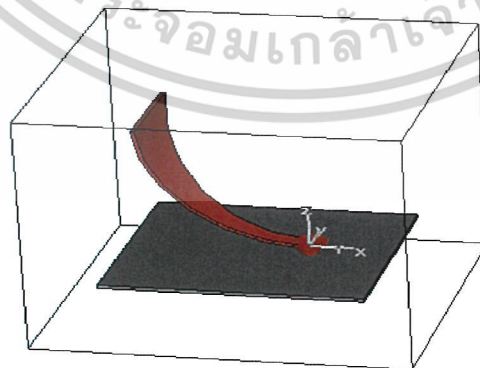
รูปที่ 3.8 การตัดส่วนเกินด้านข้างทางซ้าย

3.3.9 สร้างกราวด์เพลน (Ground plane) ตามขนาดที่เราต้องการ เลือกวัสดุที่จะใช้ ในที่นี้ใช้เราจะใช้ เป็นอะลูมิเนียม (Aluminum) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การสร้างกราวด์เพลน

3.3.10 สร้าง port เพื่อรับสัญญาณ เลือกที่ฟังก์ชัน Discrete port กำหนดจุดที่วางพอร์ตและขนาด ตามที่เราต้องการ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย ในการออกแบบตัวสายอากาศ ก่อนจะนำไปประมวลผลต่อไป



รูปที่ 3.10 การกำหนดตำแหน่ง port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและสร้างสายอากาศ TEM HORN เพื่อใช้งานจริง

3.4.1 เตรียมอุปกรณ์ต่างๆที่จะใช้ให้พร้อม ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- แผ่นทองทองความหนา 1 มิลลิเมตร
- แผ่นอะลูมิเนียมความหนา 1 มิลลิเมตร
- ส่วนไฟฟ้า
- เลื่อย
- เวอร์เนียคาลิเปอร์ ตลับเมตร อุปกรณ์การวัดอื่น ๆ
- หัวแร้งและตะกั่วบัดกรี
- connector ชนิด SMA

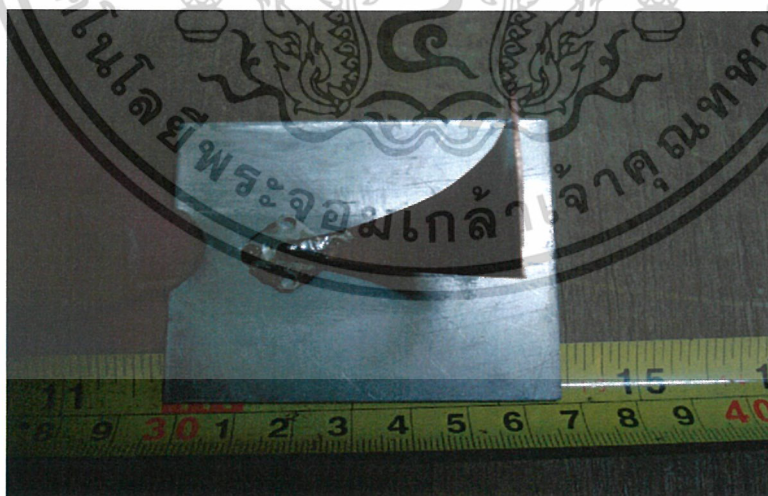
3.4.2 ตัดแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 60×65 มิลลิเมตร เป็นส่วนของกราวด์เพลน (Ground plane)

3.4.3 ตัดแผ่นทองแดงขนาด $\frac{1}{4}$ ของเส้นรอบวงของวงแหวนรัศมี 4 เซนติเมตร (เส้นรอบวงกลม = $2\pi r$) ได้ขนาดเป็น 62.8 มิลลิเมตร เป็นส่วนของความยาว ความกว้างส่วนหัว 4 มิลลิเมตร ส่วนปลายอีกด้านกว้าง 30 มิลลิเมตร นำมาตัดกับวงแหวนกระดาษกลมรัศมี 40 มิลลิเมตร (ถ้ามีวัสดุอื่นที่ดีกว่าสามารถนำมาใช้ได้ เพื่อช่วยให้การตัดง่ายขึ้น) เราก็จะได้ชิ้นงานในส่วนของ plate

3.4.4 นำกราวด์เพลนมาวัดกำหนดจุดที่จะใส่คอนเนคเตอร์

3.4.5 นำกราวด์เพลนที่วัดจุดแล้ว มาเจาะด้วยส่วน ไซ้ดอกส่วนที่พอเหมาะก็บรูคอนเนคเตอร์และ น็อตยึด

3.4.6 นำคอนเนคเตอร์ประกอบเข้า และนำ plate มาบัดกรีกับคอนเนคเตอร์ โดยต้องเว้นระยะ gap ให้พอเหมาะ (ยึดตามที่ออกแบบในโปรแกรม CST ก่อน) ได้เป็นสายอากาศ TEM HORN ตามที่เราออกแบบไว้ ดังรูป



รูปที่ 3.11 สายอากาศชนิด TEM HORN ที่มีกราวด์เพลน ที่ประกอบเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

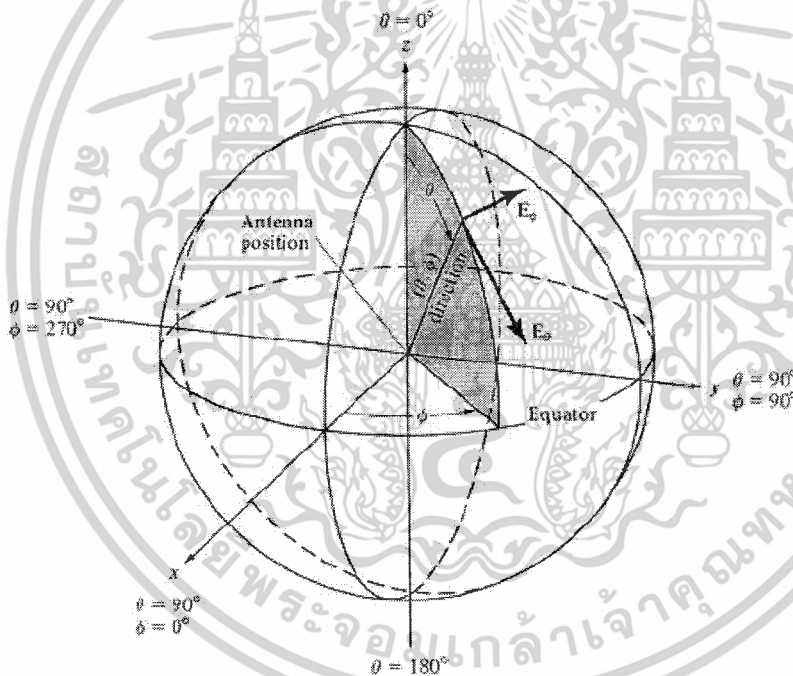
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

- 4.1.1 เพื่อทดสอบหาลักษณะรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศ
- 4.1.2 เพื่อหาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S-Parameter) ของสายอากาศ
- 4.1.3 เพื่อหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ของสายอากาศ
- 4.1.4 เพื่อหาอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศ ด้วย Smith Chart
- 4.1.5 เพื่อหาค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ

4.2 การวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

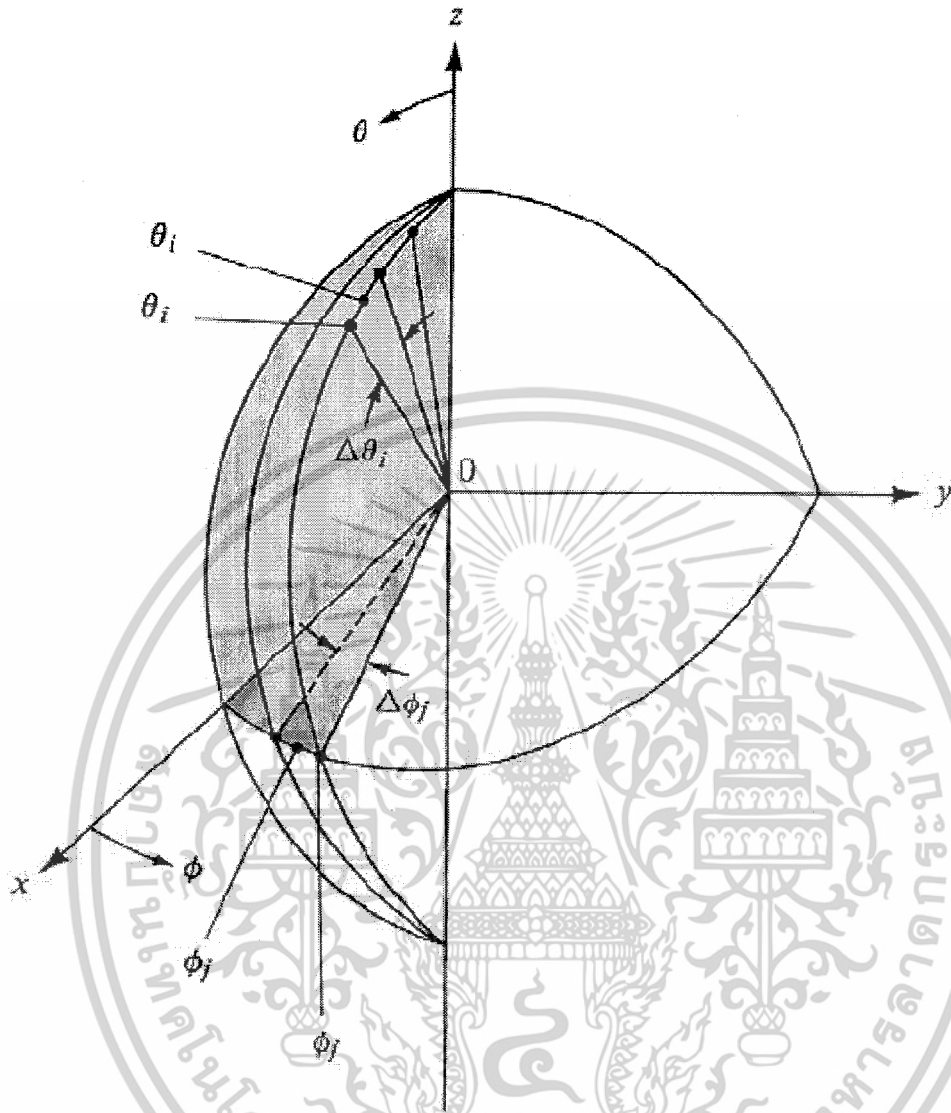
โดยทั่วไปการวัดรูปแบบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งของสายอากาศ รูปแบบที่สมบูรณ์จะมีลักษณะ 3 มิติ ในการพิจารณาสายอากาศที่นำมาวัดอยู่ที่จุดกำเนิดของระนาบระบบแกน 3 มิติ ในระบบพิกัดทรงกลม แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบพิกัดทรงกลม

แกน z เป็นแกนแนวตั้ง ตัวแปรประกอบด้วย θ และ φ ของสนามไฟฟ้า จะถูกวัดในทิศทางของ φ เท่านั้นโดยจะให้ θ คงที่ไว้ค่าหนึ่ง φ จะเป็นมุมอะซิมุท (Azimuth) และซินิกซ์ (Zenith) ดังนั้นรูปแบบสนามไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยการหมุนสายอากาศไปรอบแกน z จากรูปที่ 4.1 จะกำหนดให้ φ คงที่ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) และเปลี่ยนแปลงค่ามุม θ ($0 \leq \theta \leq 180$) อีกกรณีหนึ่งคือกำหนดให้ θ คงที่ ($0 \leq \theta \leq \pi$) และเปลี่ยนแปลงค่าของมุม φ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่ามุม θ และ ϕ ในระบบพิกัดทรงกลม

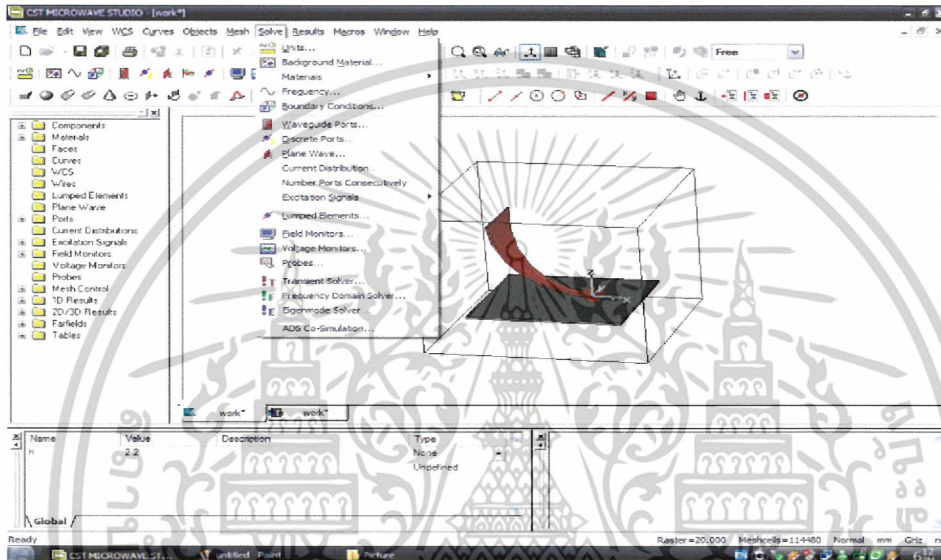
การวัดรูปแบบสนามไฟฟ้า สายอากาศทดสอบจะใช้เป็นสายอากาศส่งในสถานะที่มีการส่งคลื่นจากสายอากาศส่งซึ่งต่ออยู่กับตัวกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ส่วนสายอากาศรับจะอยู่กับที่ ซึ่งใช้สายอากาศแบบรายคาบล็อก (Log-Periodic Antenna: LPDA) ต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ซึ่งจะรับค่าที่ได้จากสายอากาศส่งมาเปรียบเทียบกับการหมุนแต่ละองศา สายอากาศทดสอบจะหมุนรอบแกน z ที่ต่ออยู่กับเพลลาของมอเตอร์ซึ่งต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

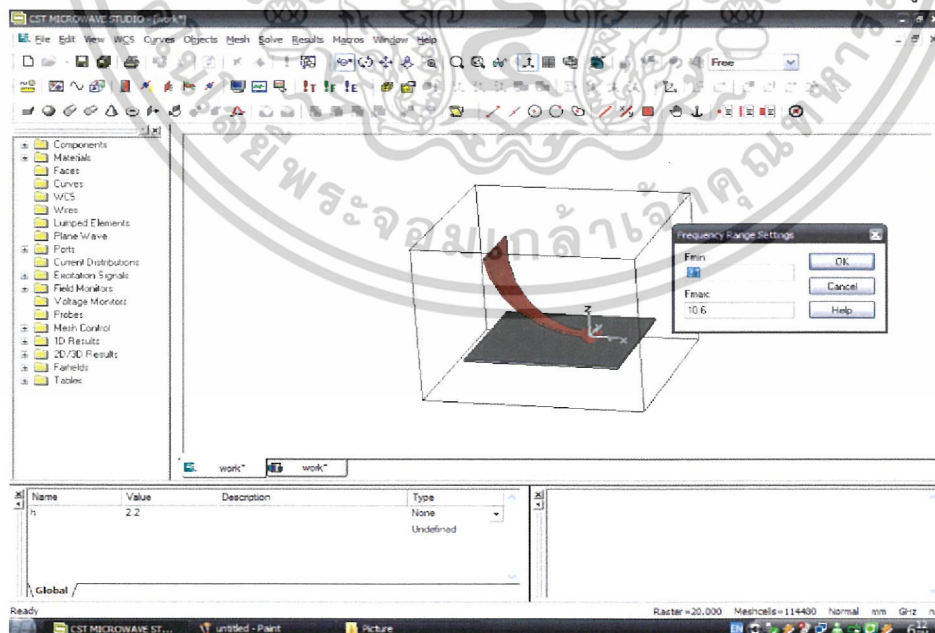
4.3.1 ใช้โปรแกรมซีเอสที (Computer Simulation Technology) ในการวัดค่า

4.3.1.1 เมื่อเราสร้างสายอากาศชนิด ทึ่อีเอ็ม ฮอว์นเสร็จแล้วในส่วนของตัวโปรแกรมเราต้องเข้าไปเซตค่าต่างๆดังนี้ ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เซตค่าต่างในโปรแกรมของสายอากาศ

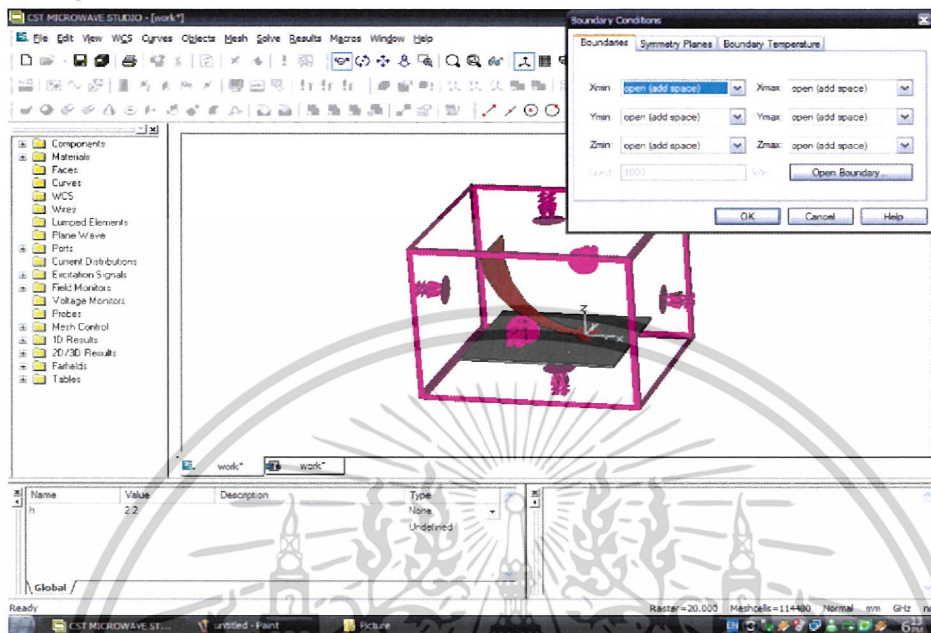
4.3.1.1 เซตความถี่ ในที่นี้เราจะเซตความถี่ที่ 3.1-10.6 GHz ตามย่านUWB ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเซตความถี่ที่ใช้งาน

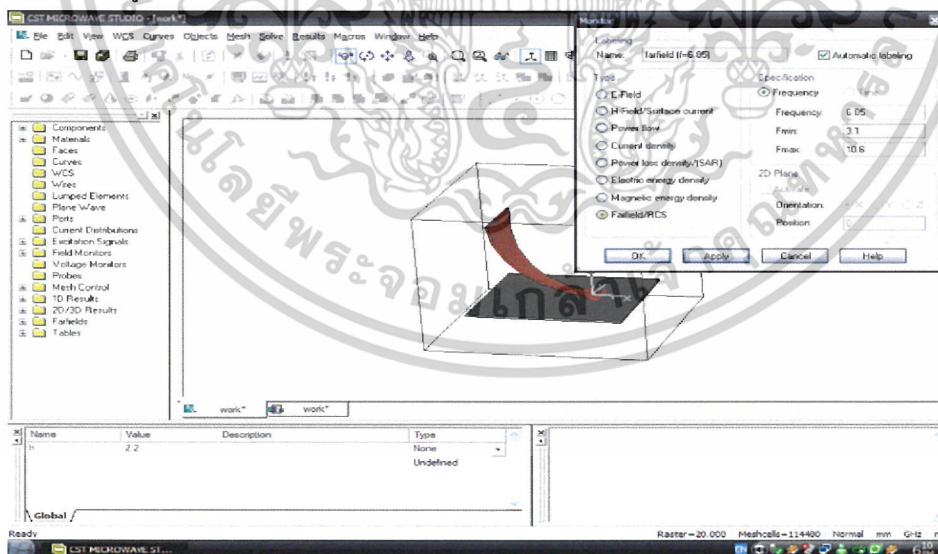
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 เซตขอบเขตการแพร่กระจายคลื่น เป็นการเซตเพื่อให้แพทเทอร์นแสดงออกมาเต็มรูป โดยเซตค่า Z_{min} เป็น open (add space) ถ้าไม่ทำการปรับค่าดังกล่าว แพทเทอร์นจะแสดงออกมาแค่ครึ่งเดียว เซ็ตค่าตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เซตขอบเขตการแพร่กระจายคลื่น

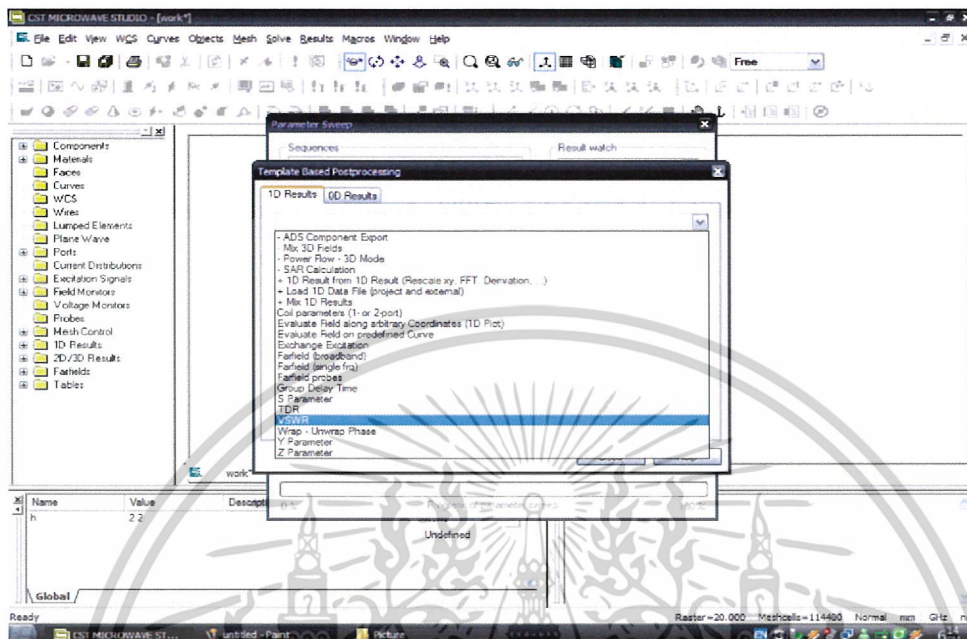
4.3.1.3 เซตมอนิเตอร์ มอนิเตอร์นี้จะทำการเลือกชนิดการวัดที่เราต้องการเช่น วัดบนสนามไฟฟ้า วัดบนสนามแม่เหล็ก เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถเลือกช่วงความถี่ที่ต้องการได้ด้วย ในที่นี้เราเลือกใช้ Far Field ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เซตมอนิเตอร์

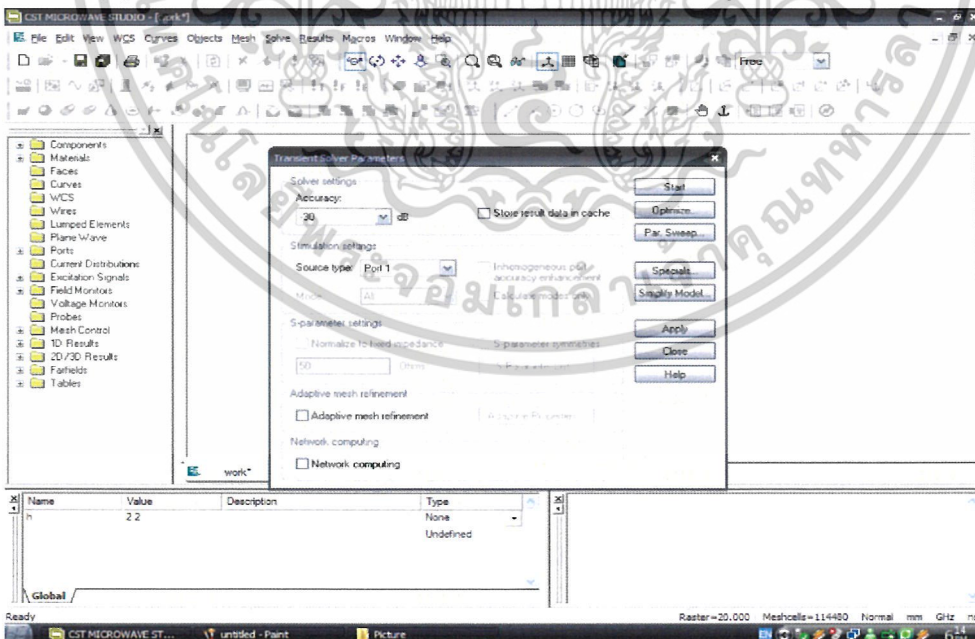
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 เลือกค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ เป็นการเลือก พารามิเตอร์ที่เราต้องการศึกษา มาตรวจสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่เราออกแบบมาในที่นี้เราจะเลือกค่า VSWRและS-Parameter ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เลือกพารามิเตอร์ออกมาใช้

4.3.1.5 ทำการประมวลผล เมื่อเราเซตค่าต่างๆของโปรแกรม ซีเอสที แล้ว เราจะทำการประมวลผลเพื่อเราจะทราบค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการออกโดยเราจะเลือกที่ Transient Analysis เราจะเลือกใช้ระดับสัญญาณที่ -30 dB และทำการประมวลผล ที่ตำแหน่ง Start ดังรูปที่ 4.8



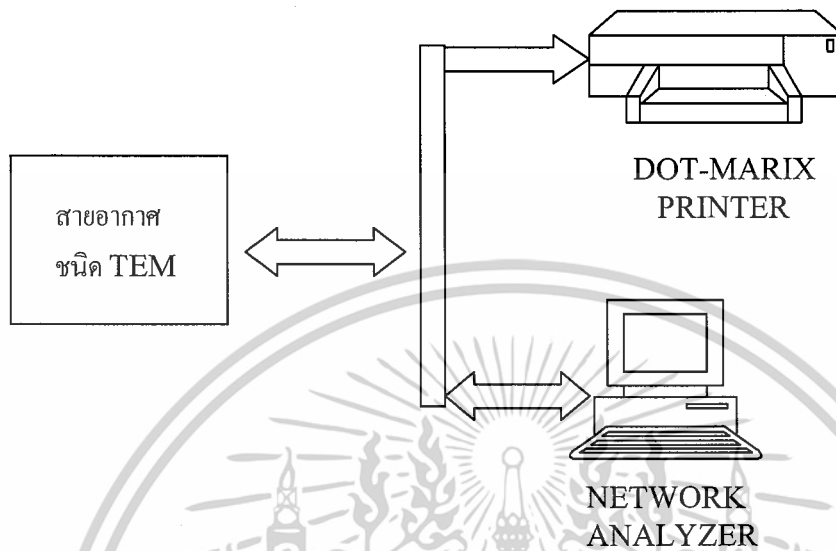
รูปที่ 4.8 ทำการประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ใช้เครื่อง Network Analyzer ในการวัดค่า

4.3.2.1 วัดค่า VSWR S-Parameter

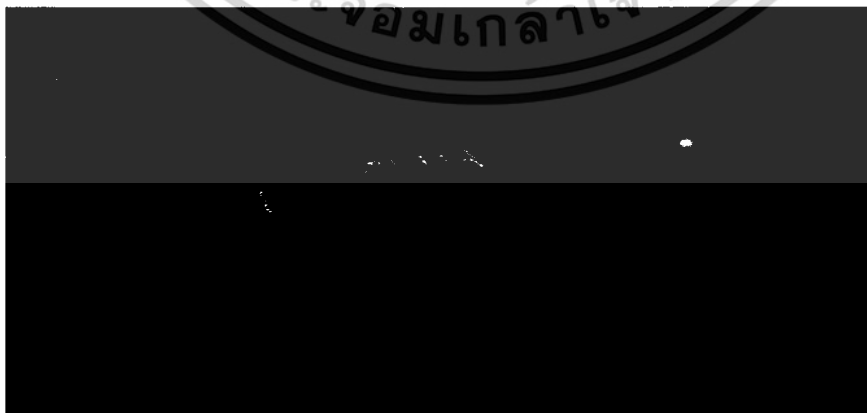
4.3.2.1.1 ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 4.9 ชุดควบคุมการวัด VSWR S-PARAMETER และ Smith Chart

4.3.2.1.2 เซตค่าต่างๆ ของเครื่อง NETWORK ANALYZER

- 1). เปิด power ของเครื่อง NETWORK ANALYZER ให้ ON
- 2). ให้ความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 3.1–10.6 GHz
- 3). ทำการ Calibrate เพื่อให้ค่าที่หน้าจอเป็น 0 dB ก่อนที่จะทำการวัด
- 4). ปรับค่าอื่นๆ ที่จำเป็นในการวัด
- 5). เลือกค่าที่ใช้มา print

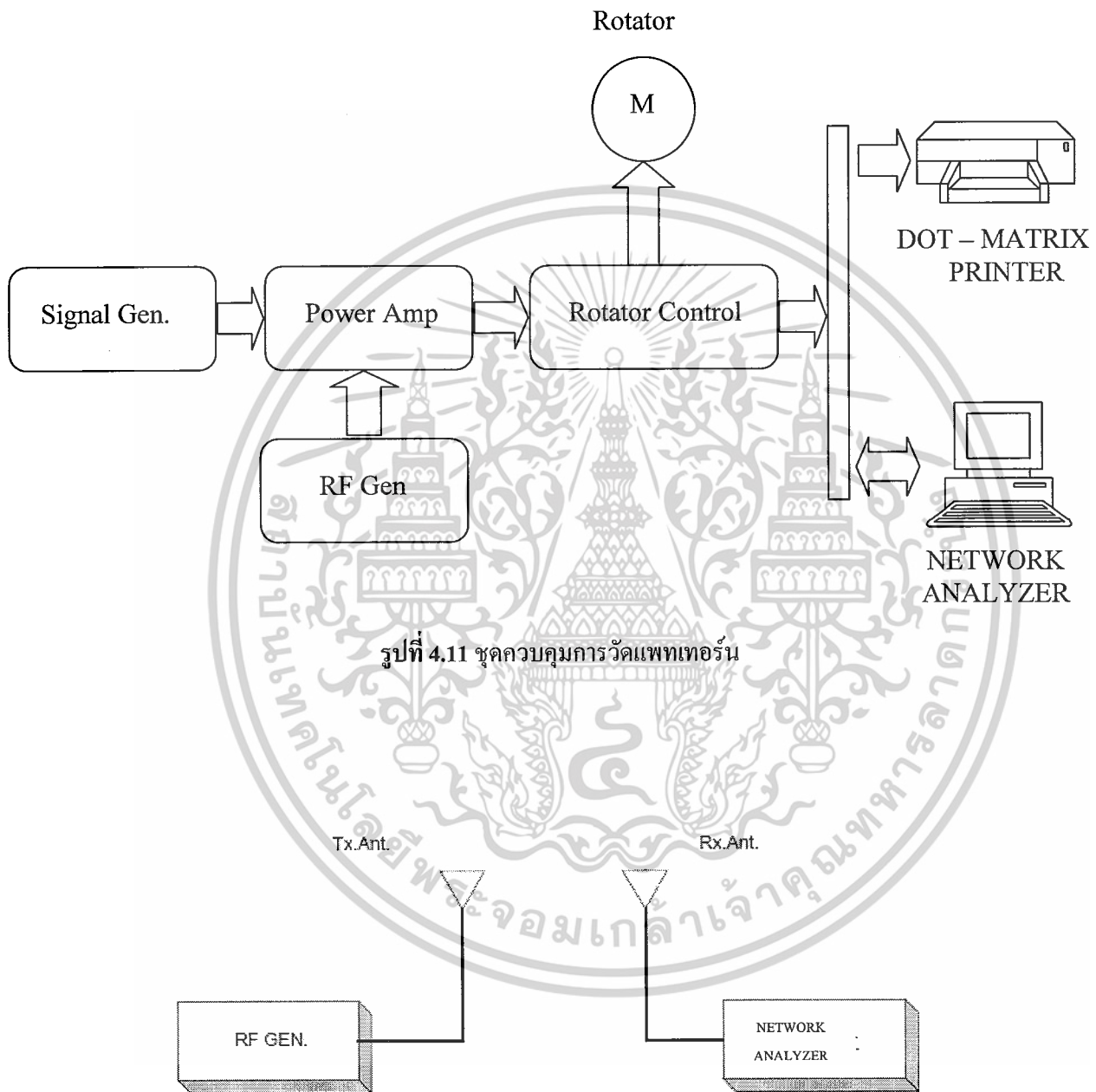


รูปที่ 4.10 ทำการวัดพารามิเตอร์ ด้วย เครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 วัดค่า แพทเทอรัน ของสายอากาศ

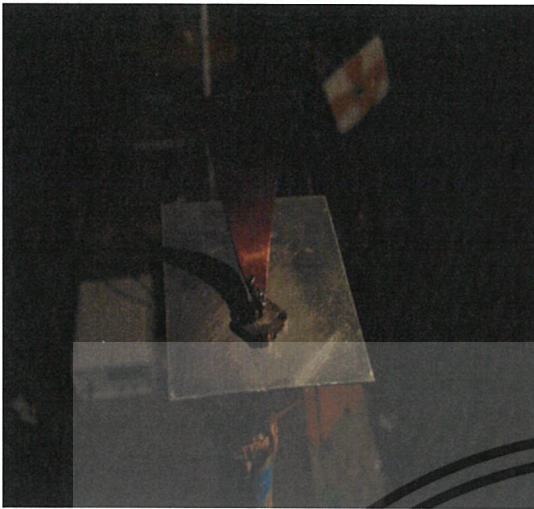
4.3.2.2.1 ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 4.11 ชุดควบคุมการวัดแพทเทอรัน

รูปที่ 4.12 สัญญาณ RF

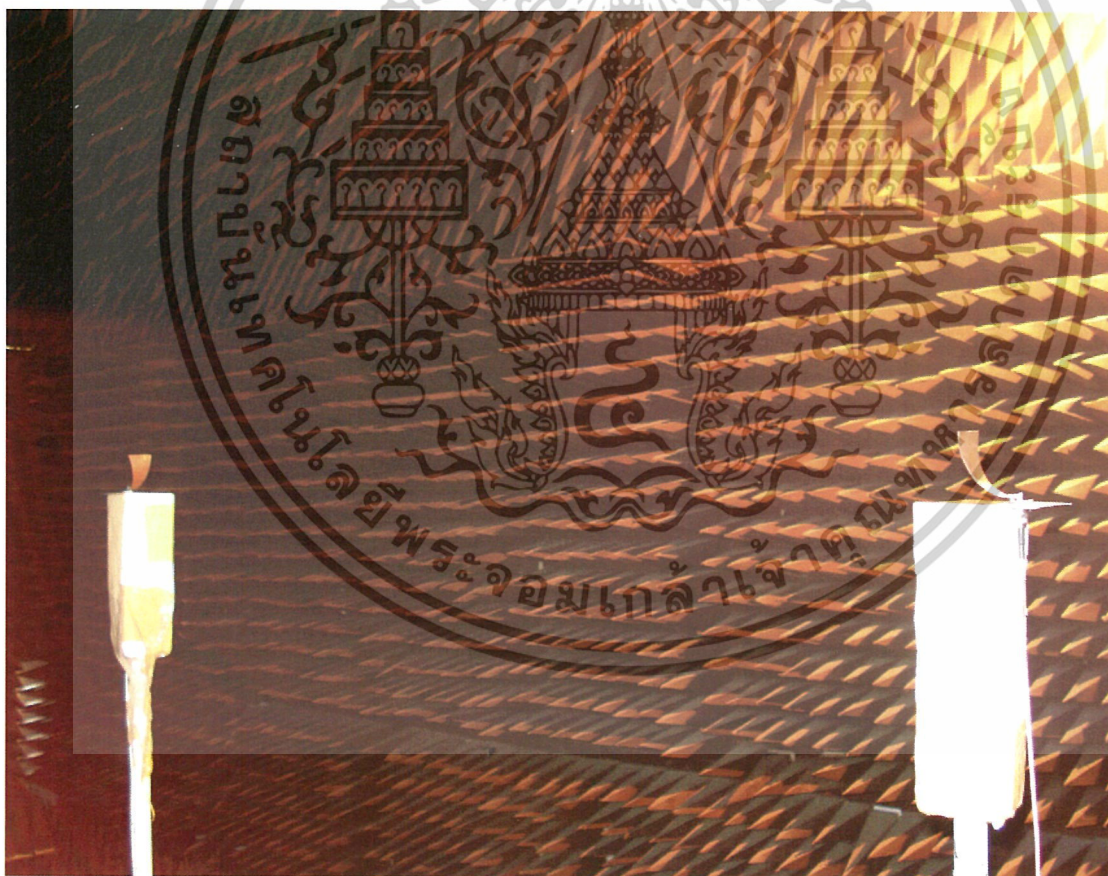
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สายอากาศตัวตั้ง



รูปที่ 4.14 ลักษณะการวางสายอากาศ



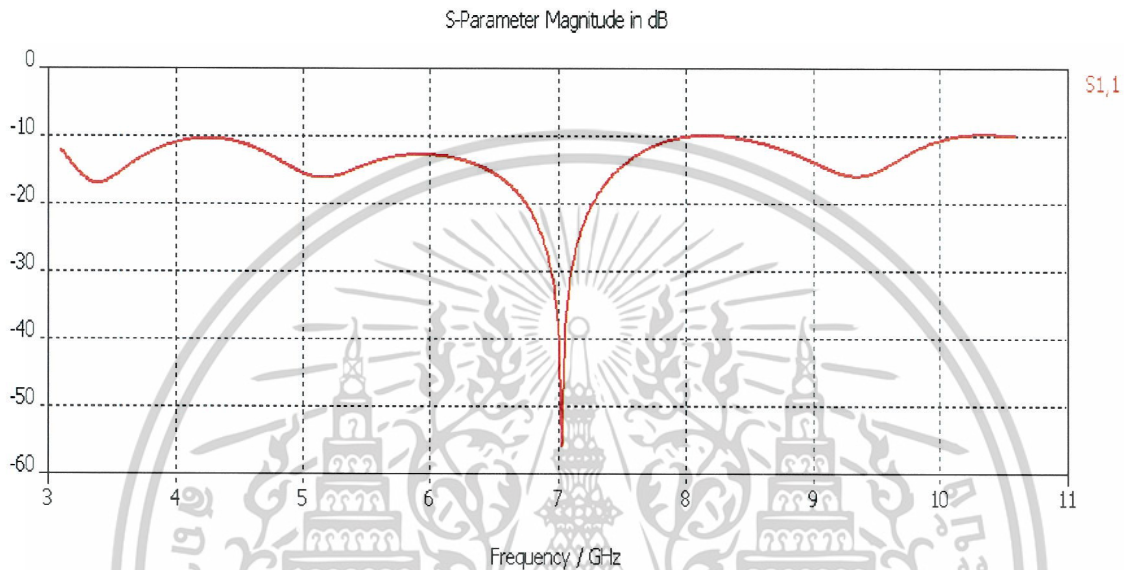
รูปที่ 4.15 สายอากาศ รับและสายอากาศส่งให้ห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

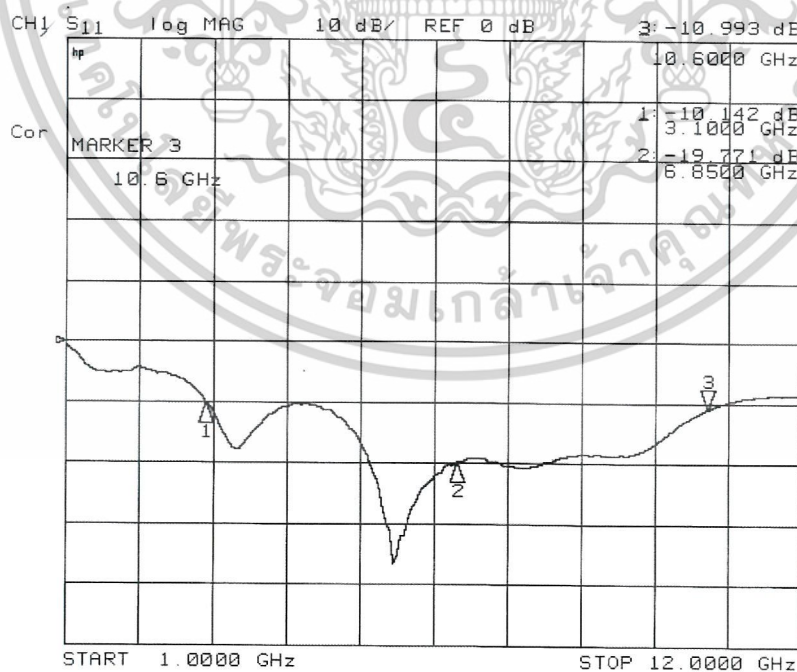
4.4 การวัดและผลการทดลอง

จากหัวข้อ 4.3.1 ได้ลำดับขั้นตอนของการประมวลผลด้วยโปรแกรม CST ไว้แล้ว เมื่อเราจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST แล้วเราต้องวัดเพื่อคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการดังนี้

4.4.1. ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ



รูปที่ 4.16 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่วัดด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 4.17 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่วัดจาก Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศโดยระบุทุกช่วงความถี่

Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude
3.090	-10.130	5.015	-12.040	6.940	-19.566	8.865	-18.623
3.145	-10.606	5.070	-12.429	6.995	-19.400	8.920	-18.481
3.200	-11.533	5.125	-12.534	7.050	-19.207	8.975	-18.610
3.255	-12.956	5.180	-13.281	7.105	-19.231	9.030	-18.783
3.310	-14.390	5.235	-14.250	7.160	-19.345	9.085	-18.523
3.365	-15.022	5.290	-14.639	7.215	-19.121	9.140	-18.677
3.420	-16.177	5.345	-15.418	7.270	-19.422	9.195	-18.657
3.475	-17.448	5.400	-16.732	7.325	-19.754	9.250	-18.719
3.530	-17.627	5.455	-17.716	7.380	-19.700	9.305	-18.644
3.585	-17.757	5.510	-18.919	7.435	-19.675	9.360	-18.661
3.640	-16.988	5.565	-20.820	7.490	-20.102	9.415	-18.619
3.695	-16.080	5.620	-22.317	7.545	-20.354	9.470	-18.528
3.750	-15.486	5.675	-23.634	7.600	-20.199	9.525	-18.301
3.805	-14.793	5.730	-27.315	7.655	-20.438	9.580	-18.135
3.860	-14.171	5.785	-29.664	7.710	-20.640	9.635	-17.880
3.915	-13.450	5.840	-30.937	7.765	-20.668	9.690	-17.437
3.970	-12.492	5.895	-37.217	7.820	-20.661	9.745	-17.177
4.025	-12.340	5.950	-34.682	7.875	-20.560	9.800	-16.695
4.080	-11.864	6.005	-31.824	7.930	-20.623	9.855	-16.238
4.135	-11.494	6.060	-32.372	7.985	-20.326	9.910	-15.829
4.190	-11.097	6.115	-28.942	8.040	-20.321	9.965	-15.344
4.245	-10.756	6.170	-27.430	8.095	-20.145	10.020	-14.696
4.300	-10.889	6.225	-26.759	8.150	-19.796	10.075	-14.425
4.355	-10.534	6.280	-25.439	8.205	-19.662	10.130	-13.972
4.410	-10.228	6.335	-24.197	8.260	-19.532	10.185	-13.408
4.465	-10.475	6.390	-23.307	8.315	-19.268	10.240	-13.077
4.520	-10.428	6.445	-22.843	8.370	-19.148	10.295	-12.759
4.575	-10.398	6.500	-22.128	8.425	-18.933	10.350	-12.276
4.630	-10.412	6.555	-21.649	8.480	-18.918	10.405	-11.971
4.685	-10.570	6.610	-21.525	8.535	-18.833	10.460	-11.717
4.740	-10.576	6.665	-20.470	8.590	-18.678	10.515	-11.354
4.795	-10.829	6.720	-20.256	8.645	-18.565	10.570	-11.102
4.850	-11.114	6.775	-20.332	8.700	-18.514	10.625	-10.927
4.905	-11.162	6.830	-19.898	8.755	-18.614		
4.960	-11.333	6.885	-19.581	8.810	-18.529		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดจากเครื่อง Network Analyzer เนื่องจากสายอากาศของเราใช้งานในย่านความถี่ 3.1 GHz – 10.6 GHz เราจึงทำการกำหนดความถี่ที่เราสนใจเป็น 3 ความถี่ คือ 3.1 GHz 6.85 GHz 10.6 GHz คุณลักษณะของค่า Return Loss ที่ดีของสายอากาศต้องมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งสายอากาศเราใช้งานในย่านความถี่ UWB ที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้ความถี่ในช่วงดังกล่าว ต้องมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่าน

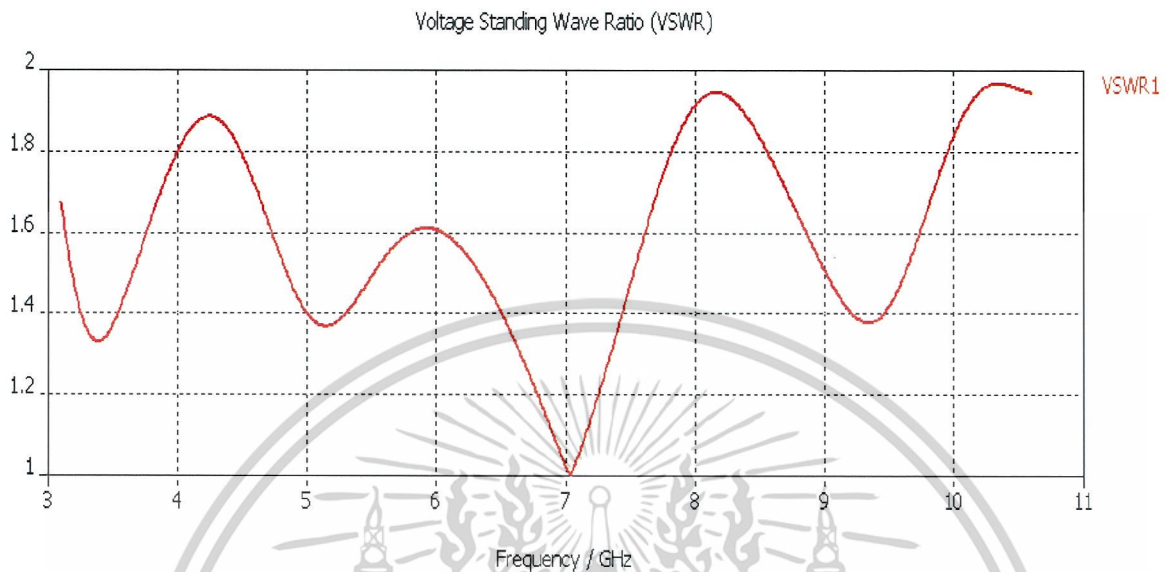
จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 4.17 ได้ผลตามที่ตั้งไว้คือ ต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ ผลตอบสนองที่ดีที่สุดอยู่ที่ความถี่ 5.895 GHz มีค่าเท่ากับ -37.217 dB ส่วนในช่วงอื่น ๆ ค่าสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 3.145 GHz มีค่า -10.606 dB แสดงในตาราง 4.1

ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลที่ได้จากโปรแกรม CST มีค่าคลาดเคลื่อนกันเนื่องจากในโปรแกรมใช้ตัวป้อนสัญญาณเป็นพอร์ตจำลอง ส่วนในการสร้างจริงนั้นใช้คอนเนคเตอร์ SMA ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์และช่องว่างระหว่างเพลทกับกราวด์เพลนที่ต่างกัน เพราะระยะช่องว่างในโปรแกรมจะกำหนดเป็น มิลลิเมตร จึงส่งผลต่อค่า Return Loss ที่ได้ แต่ยังคงเห็นเค้าโครงเดิมอยู่และได้ตามที่ต้องการ

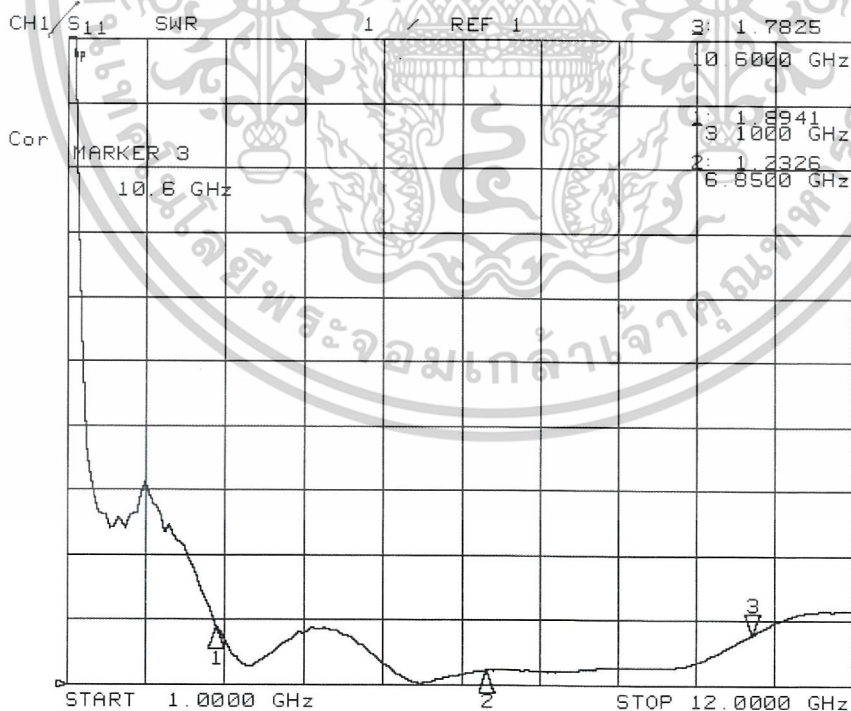


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ



รูปที่ 4.18 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่วัดด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 4.19 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่วัดจาก Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศโดยระบุทุกช่วงความถี่

Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude	Frequency	Magnitude
3.090	1.928:1	5.015	1.669:1	6.940	1.232:1	8.865	1.267:1
3.145	1.843:1	5.070	1.631:1	6.995	1.237:1	8.920	1.271:1
3.200	1.724:1	5.125	1.625:1	7.050	1.244:1	8.975	1.266:1
3.255	1.585:1	5.180	1.551:1	7.105	1.246:1	9.030	1.259:1
3.310	1.478:1	5.235	1.477:1	7.160	1.240:1	9.085	1.270:1
3.365	1.419:1	5.290	1.461:1	7.215	1.246:1	9.140	1.265:1
3.420	1.356:1	5.345	1.410:1	7.270	1.239:1	9.195	1.261:1
3.475	1.312:1	5.400	1.341:1	7.325	1.228:1	9.250	1.262:1
3.530	1.295:1	5.455	1.297:1	7.380	1.231:1	9.305	1.265:1
3.585	1.298:1	5.510	1.256:1	7.435	1.230:1	9.360	1.264:1
3.640	1.323:1	5.565	1.200:1	7.490	1.220:1	9.415	1.263:1
3.695	1.366:1	5.620	1.170:1	7.545	1.211:1	9.470	1.270:1
3.750	1.408:1	5.675	1.138:1	7.600	1.214:1	9.525	1.279:1
3.805	1.449:1	5.730	1.087:1	7.655	1.209:1	9.580	1.283:1
3.860	1.494:1	5.785	1.069:1	7.710	1.203:1	9.635	1.291:1
3.915	1.547:1	5.840	1.058:1	7.765	1.204:1	9.690	1.309:1
3.970	1.611:1	5.895	1.030:1	7.820	1.203:1	9.745	1.322:1
4.025	1.649:1	5.950	1.038:1	7.875	1.206:1	9.800	1.342:1
4.080	1.673:1	6.005	1.051:1	7.930	1.207:1	9.855	1.364:1
4.135	1.715:1	6.060	1.048:1	7.985	1.213:1	9.910	1.385:1
4.190	1.770:1	6.115	1.070:1	8.040	1.213:1	9.965	1.412:1
4.245	1.815:1	6.170	1.090:1	8.095	1.216:1	10.020	1.451:1
4.300	1.812:1	6.225	1.099:1	8.150	1.229:1	10.075	1.469:1
4.355	1.848:1	6.280	1.112:1	8.205	1.232:1	10.130	1.499:1
4.410	1.881:1	6.335	1.134:1	8.260	1.236:1	10.185	1.541:1
4.465	1.868:1	6.390	1.145:1	8.315	1.245:1	10.240	1.570:1
4.520	1.851:1	6.445	1.158:1	8.370	1.246:1	10.295	1.599:1
4.575	1.882:1	6.500	1.168:1	8.425	1.252:1	10.350	1.640:1
4.630	1.853:1	6.555	1.174:1	8.480	1.255:1	10.405	1.674:1
4.685	1.845:1	6.610	1.183:1	8.535	1.259:1	10.460	1.703:1
4.740	1.830:1	6.665	1.212:1	8.590	1.263:1	10.515	1.740:1
4.795	1.810:1	6.720	1.212:1	8.645	1.267:1	10.570	1.768:1
4.850	1.772:1	6.775	1.210:1	8.700	1.269:1	10.625	1.798:1
4.905	1.760:1	6.830	1.227:1	8.755	1.264:1		
4.960	1.742:1	6.885	1.237:1	8.810	1.270:1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดจากเครื่อง Network Analyzer เนื่องจากสายอากาศของเราใช้งานในย่านความถี่ 3.1 GHz – 10.6 GHz เราจึงทำการกำหนดความถี่ที่เราสนใจเป็น 3 ความถี่ คือ 3.1 GHz 6.85 GHz 10.6 GHz คุณลักษณะของค่า Voltage Standing Wave Ratio ที่ดีของสายอากาศต้องมีค่าต่ำกว่า 2:1 ซึ่งสายอากาศเราใช้งานในย่านความถี่ UWB ที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้ความถี่ในช่วงดังกล่าว ต้องมีค่าต่ำกว่า 2:1 ตลอดย่าน

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 4.17 ได้ผลตามที่ตั้งไว้คือ ต่ำกว่า 2:1 ตลอดย่านความถี่ ผลตอบสนองที่ดีที่สุดอยู่ที่ความถี่ 6 GHz มีค่าเท่ากับ 1.038:1 ค่าสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่า 1.928:1 โดยอัตราส่วนคลื่นนิ่ง มีค่ายิ่งต่ำยิ่งดีโดยที่ค่าต่ำสุดอยู่ที่ 1:1 ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของสายอากาศ

ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลที่ได้จากโปรแกรม CST มีค่าคลาดเคลื่อนกันเนื่องจากในโปรแกรมใช้ตัวป้อนสัญญาณเป็นพอร์ตจำลอง ส่วนในการสร้างจริงนั้นใช้คอนเนคเตอร์ SMA ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์และช่องว่างระหว่างเพลทกับกราวด์เพลทที่แตกต่างกัน เพราะระยะช่องว่างในโปรแกรมจะกำหนดเป็น มิลลิเมตร จึงส่งผลต่อค่า Voltage Standing Wave Ratio ที่ได้ แต่ยังคงเห็นค่าโครงเดิมอยู่และได้ตามที่ต้องการ

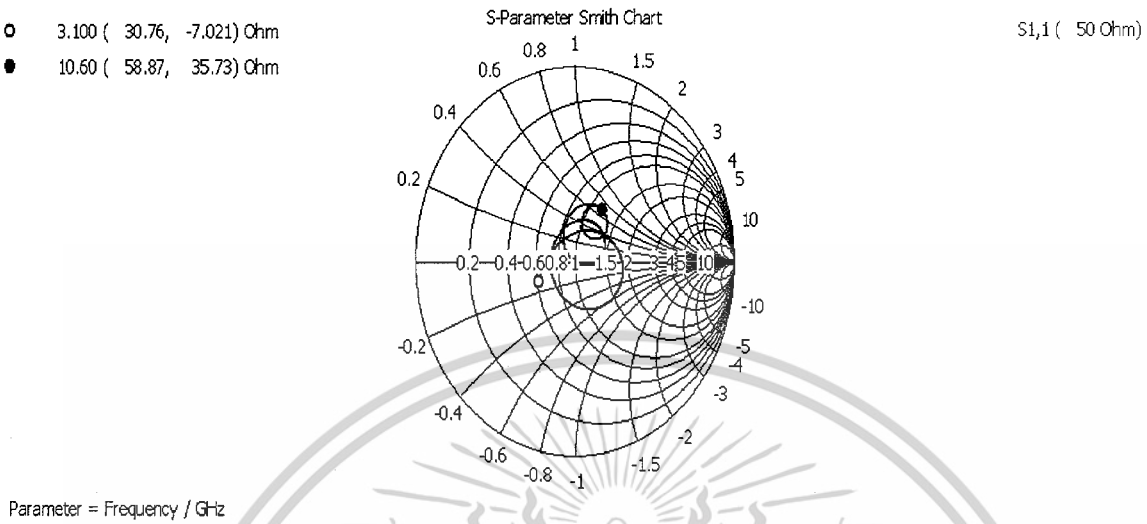


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 อิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศ

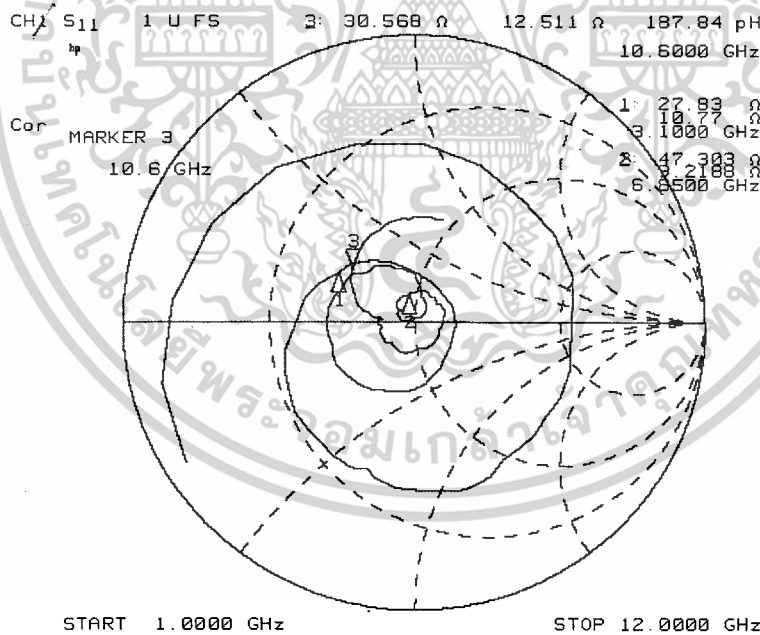
- 3.100 (30.76, -7.021) Ohm
- 10.60 (58.87, 35.73) Ohm

S1,1 (50 Ohm)



Parameter = Frequency / GHz

รูปที่ 4.20 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศ ที่วัดด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 4.21 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศ ที่วัดจาก Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

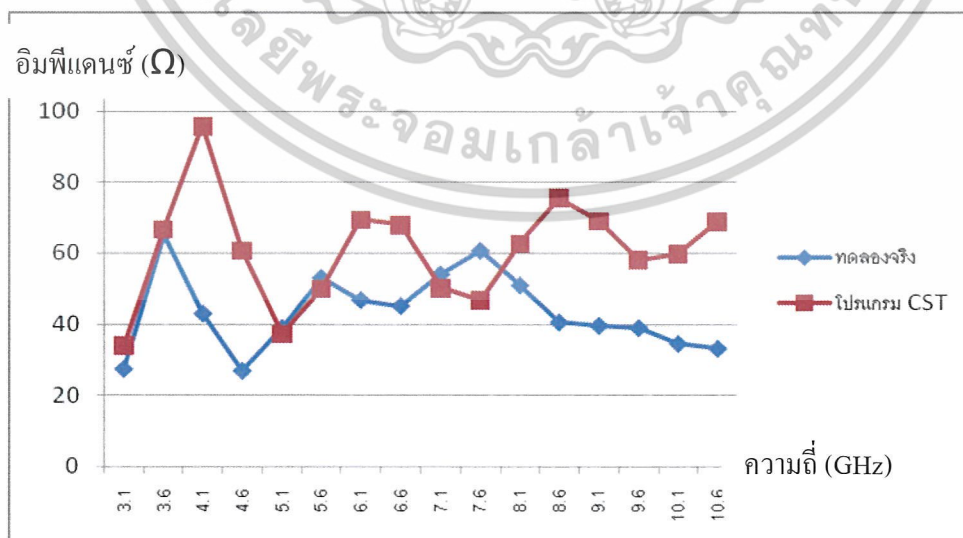
ตาราง 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อน โดยระบุทุกช่วงความถี่

ความถี่	อิมพีแดนซ์ ด้านเข้า	ความถี่	อิมพีแดนซ์ ด้านเข้า	ความถี่	อิมพีแดนซ์ ด้านเข้า	ความถี่	อิมพีแดนซ์ ด้านเข้า
3.090	27.496+j10.216	5.015	33.107+j12.477	6.940	48.957+j10.459	8.865	39.627-j2.0270
3.145	29.953+j12.926	5.070	34.531+j13.232	6.995	50.000+j10.693	8.920	39.416-j1.4250
3.200	33.834+j15.848	5.125	35.943+j15.072	7.050	51.355+j10.969	8.975	39.461-j0.9160
3.255	39.365+j17.279	5.180	38.947+j16.232	7.105	53.021+j10.943	9.030	39.666-j0.4490
3.310	43.809+j17.279	5.235	41.471+j15.988	7.160	54.328+j10.443	9.085	39.459-j0.1910
3.365	48.992+j17.463	5.290	43.152+j16.348	7.215	56.109+j10.059	9.140	39.496+j0.250
3.420	55.279+j15.625	5.345	46.439+j16.195	7.270	57.488+j8.6810	9.195	39.615+j0.673
3.475	60.721+j10.580	5.400	48.818+j14.340	7.325	58.408+j7.3770	9.250	39.613+j0.726
3.530	63.531+j5.7380	5.455	50.031+j13.055	7.380	59.658+j6.2320	9.305	39.518+j1.003
3.585	64.953-j0.3550	5.510	52.100+j11.523	7.435	60.689+j4.2320	9.360	39.572+j1.162
3.640	64.957-j5.5230	5.565	52.686+j8.9410	7.490	60.684+j2.2140	9.415	39.582+j1.255
3.695	63.449-j12.420	5.620	52.508+j7.5370	7.545	60.621+j0.6730	9.470	39.456+j1.261
3.750	59.268-j15.775	5.675	53.053+j5.9330	7.600	60.672-j1.1600	9.525	39.203+j1.367
3.805	56.061-j19.076	5.730	52.271+j3.7850	7.655	59.965-j3.2220	9.580	39.008+j1.419
3.860	51.754-j20.219	5.785	51.051+j3.1560	7.710	59.018-j4.5580	9.635	38.699+j1.423
3.915	48.904-j21.393	5.840	50.939+j2.6130	7.765	58.133-j5.9780	9.690	38.285+j1.509
3.970	44.463-j22.123	5.895	50.135+j1.4640	7.820	56.867-j7.1010	9.745	37.922+j1.607
4.025	40.930-j20.906	5.950	48.689+j1.2630	7.875	55.660-j8.1500	9.800	37.322+j1.640
4.080	38.217-j19.766	6.005	48.178+j1.5800	7.930	54.145-j8.8710	9.855	36.684+j2.033
4.135	36.168-j18.771	6.060	47.910+j1.1930	7.985	52.799-j9.5430	9.910	36.264+j2.392
4.190	33.531-j17.457	6.115	46.857+j1.1870	8.040	51.139-j9.7050	9.965	35.623+j2.584
4.245	31.272-j14.993	6.170	46.311+j1.6380	8.095	50.031-j9.8140	10.020	34.734+j3.164
4.300	30.547-j12.606	6.225	45.990+j1.7790	8.150	48.559-j10.168	10.075	34.385+j3.847
4.355	29.384-j11.619	6.280	45.207+j2.1870	8.205	46.969-j9.6990	10.130	33.756+j4.306
4.410	27.683-j9.2040	6.335	44.820+j2.9290	8.260	45.930-j9.2770	10.185	33.601+j5.072
4.465	27.368-j6.6220	6.390	44.766+j3.5030	8.315	44.750-j8.9350	10.240	32.684+j6.127
4.520	27.417-j4.8410	6.445	44.535+j3.9450	8.370	43.756-j8.2830	10.295	32.215+j6.750
4.575	26.923-j2.9540	6.500	44.260+j4.8080	8.425	42.789-j7.6300	10.350	31.595+j7.650
4.630	26.956-j0.7720	6.555	44.803+j5.8220	8.480	42.006-j6.8340	10.405	31.296+j8.878
4.685	26.937+j1.171	6.610	44.766+j5.9600	8.535	41.518-j6.1540	10.460	31.161+j9.794
4.740	27.241+j3.152	6.665	44.570+j7.1250	8.590	40.906-j5.4370	10.515	30.803+j10.720
4.795	28.123+j5.240	6.720	45.545+j8.2090	8.645	40.342-j4.7460	10.570	30.626+j11.887
4.850	29.088+j6.906	6.775	46.377+j8.5500	8.700	40.070-j3.9290	10.625	30.629+j12.863
4.905	29.616+j8.669	6.830	46.750+j9.2610	8.755	39.955-j3.1910		
4.960	30.765+j11.027	6.885	47.771+j10.156	8.810	39.771-j2.5560		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.4 ค่าอิมพีแดนซ์ในรูปจำนวนจริง

ความถี่ (GHz)	จากการทดลองจริง (Ω)	จากโปรแกรม CST (Ω)
3.1	27.497	33.802
3.6	65.191	66.652
4.1	43.026	95.769
4.6	26.967	60.632
5.1	38.975	37.038
5.6	53.046	49.9
6.1	46.872	69.246
6.6	45.161	67.823
7.1	54.039	50.084
7.6	60.683	46.594
8.1	50.984	62.647
8.6	40.62	75.498
9.1	39.679	68.96
9.6	39.033	58.047
10.1	34.599	59.699
10.6	33.217	68.734



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST กับผลการทดลอง

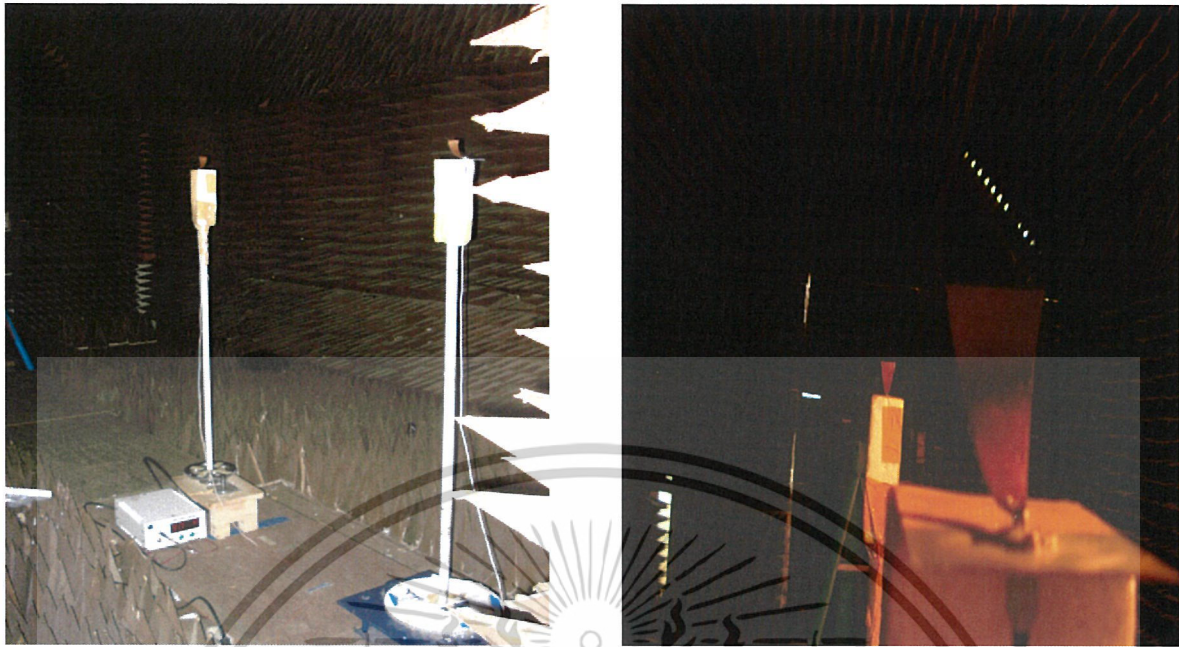
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศจากการวัดด้วย Network Analyzer โดยแนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าจะมีค่าโค้งไปตามค่า Return Loss กับค่า Voltage Standing Wave Ratio ซึ่งจะมีค่าประมาณ 50Ω ที่ความถี่ในช่วงความถี่กลางจะตอบสนองความถี่ได้ดี ในช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงอิมพีแดนซ์ขาเข้าจะต่ำ จากกราฟค่าที่ใกล้เคียง 50Ω จะอยู่ที่ความถี่ตั้งแต่ 5 GHz ถึง 7 GHz ส่วนค่าอื่น ๆ ดูได้จากตาราง 4.4

ทำการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากโปรแกรม CST จะเห็นว่าช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz – 6 GHz ค่าที่ได้จากการทดลองกับโปรแกรม CST มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เป็นเพราะค่า Return Loss กับค่า Voltage Standing Wave Ratio ตอบสนองในย่านความถี่ดังกล่าวแต่ความถี่ 6.1 GHz – 10.6 GHz ผลการทดลองจริงจะแตกต่างกับโปรแกรม CST เป็นอย่างมากเนื่องจากในโปรแกรมใช้ตัวป้อนสัญญาณเป็นพอร์ตจำลอง ส่วนในการสร้างจริงนั้นใช้คอนเนคเตอร์ SMA ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์และช่องว่างระหว่างเพลทกับกรวด์เพลทที่แตกต่างกัน เพราะระยะช่องว่างในโปรแกรมจะกำหนดเป็น มิลลิเมตร แต่อิมพีแดนซ์ทางขาเข้ายังสามารถใช้งานในช่วงความถี่ดังกล่าวได้



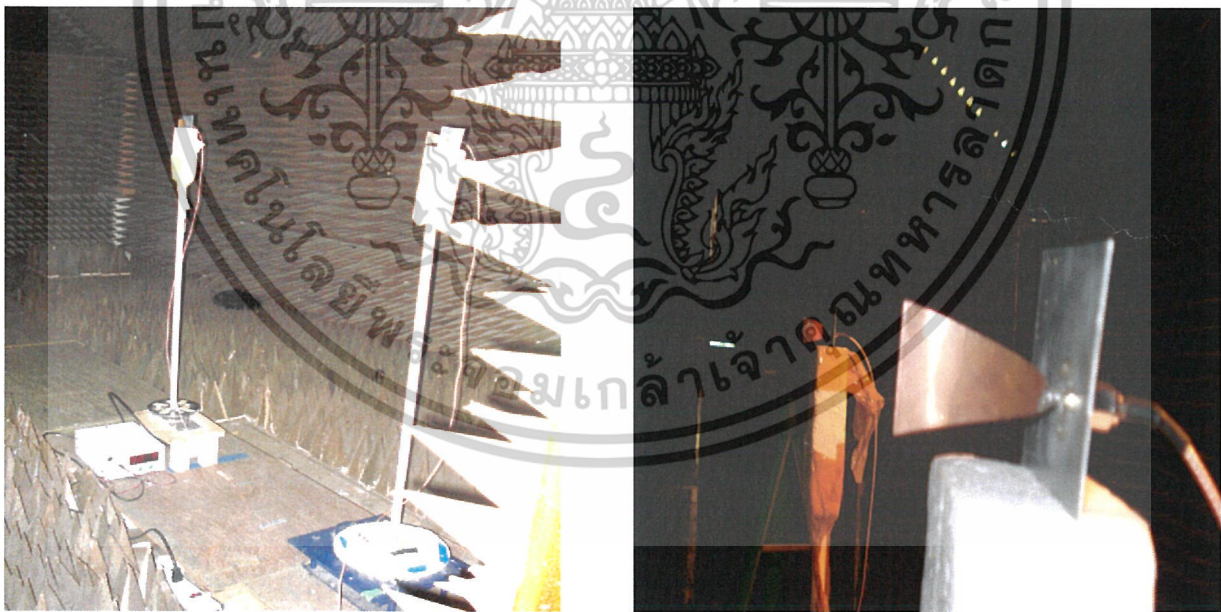
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 4.23 (a),(b) การวัดการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ E



(a)

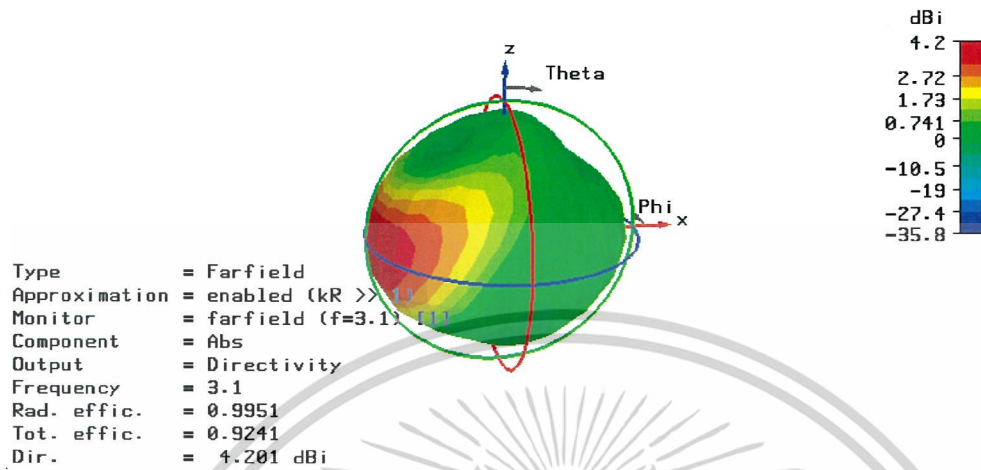
(b)

รูปที่ 4.24 (a),(b) การวัดการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

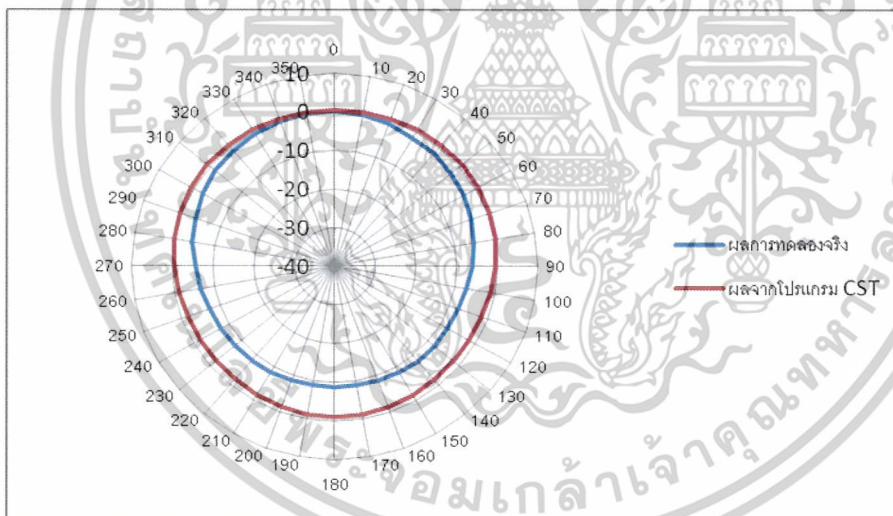
4.4.4 แพทเทอร์นของสายอากาศ

1 พิจารณาที่ความถี่ 3.1 GHz



รูปที่ 4.25 แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 3.1 GHz ใน 3 มิติ

1.1 การเปรียบเทียบแพทเทอร์นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.1 GHz



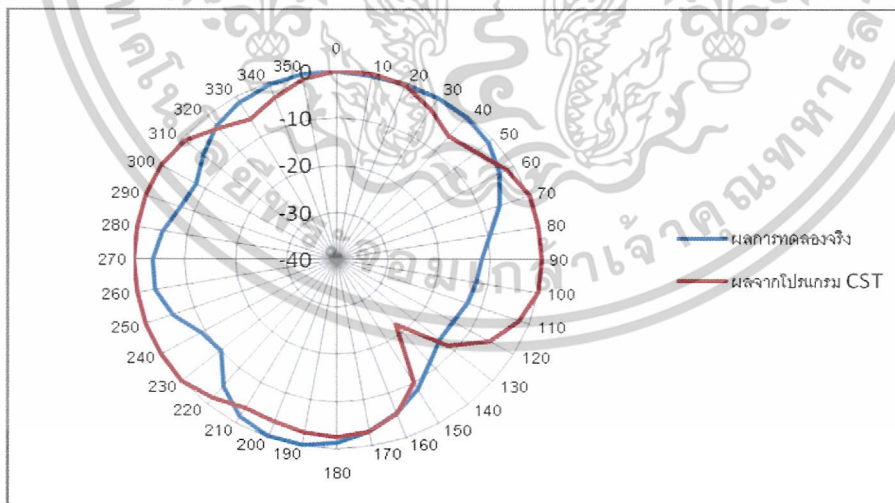
รูปที่ 4.26 แพทเทอร์นของสายอากาศความถี่ 3.1 GHz ระนาบ H-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 "ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

ตารางที่ 4.5 ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 3.1 GHz ระนาบ H-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์

มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized
0	-48.311	0	120	-56.214	-7.903	240	-56.123	-7.812
10	-48.634	-0.323	130	-56.317	-8.006	250	-55.89	-7.579
20	-49.125	-0.814	140	-56.402	-8.091	260	-54.82	-6.509
30	-50.086	-1.775	150	-56.802	-8.491	270	-54.053	-5.742
40	-50.421	-2.11	160	-57.096	-8.785	280	-52.822	-4.511
50	-51.176	-2.865	170	-57.136	-8.825	290	-51.836	-3.525
60	-51.522	-3.211	180	-57.188	-8.877	300	-50.87	-2.559
70	-52.636	-4.325	190	-57.313	-9.002	310	-50.012	-1.701
80	-53.664	-5.353	200	-57.023	-8.712	320	-49.357	-1.046
90	-54.354	-6.043	210	-56.821	-8.51	330	-48.907	-0.596
100	-55.407	-7.096	220	-56.59	-8.279	340	-48.504	-0.193
110	-56.057	-7.746	230	-56.42	-8.109	350	-48.318	-0.007

1.2 การเปรียบเทียบแพทเทิร์นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.1 GHz



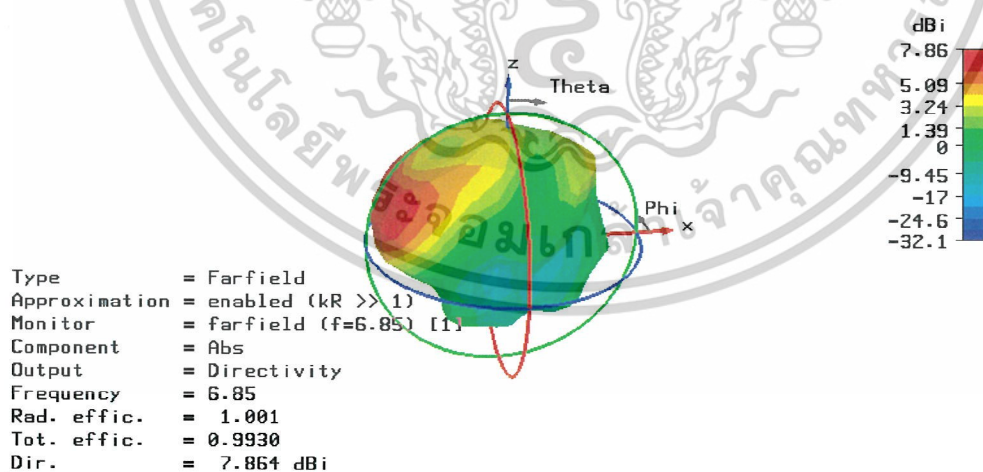
รูปที่ 4.27 แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 3.1 GHz ระนาบ E-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 3.1 GHz ระนาบ E-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์

มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized
0	-49.253	-0.092	120	-63.109	-13.948	240	-58.343	-9.182
10	-49.580	-0.419	130	-62.931	-13.770	250	-54.702	-5.541
20	-49.712	-0.551	140	-60.905	-11.744	260	-52.915	-3.754
30	-49.709	-0.548	150	-57.704	-8.543	270	-52.884	-3.723
40	-49.825	-0.664	160	-54.958	-5.797	280	-54.335	-5.174
50	-50.461	-1.300	170	-52.446	-3.285	290	-56.293	-7.132
60	-52.432	-3.271	180	-50.483	-1.322	300	-57.151	-7.990
70	-55.344	-6.183	190	-49.505	-0.344	310	-54.741	-5.580
80	-58.702	-9.541	200	-49.491	-0.330	320	-52.229	-3.068
90	-60.898	-11.737	210	-50.983	-1.822	330	-50.590	-1.429
100	-61.731	-12.570	220	-54.181	-5.020	340	-49.588	-0.427
110	-62.201	-13.040	230	-59.271	-10.110	350	-49.161	0

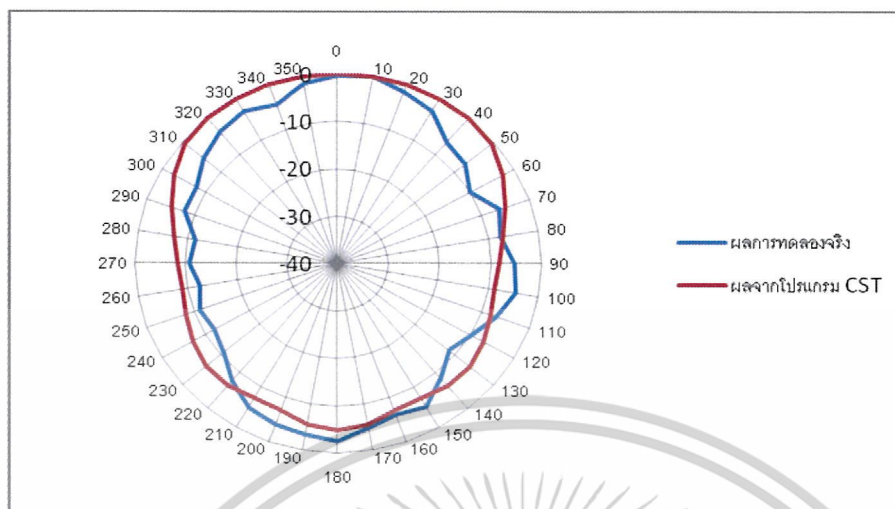
2) พิจารณาที่ความถี่ 6.85 GHz



รูปที่ 4.28 แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 6.85 GHz ใน 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 การเปรียบเทียบแพทเทิร์นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 6.85 GHz



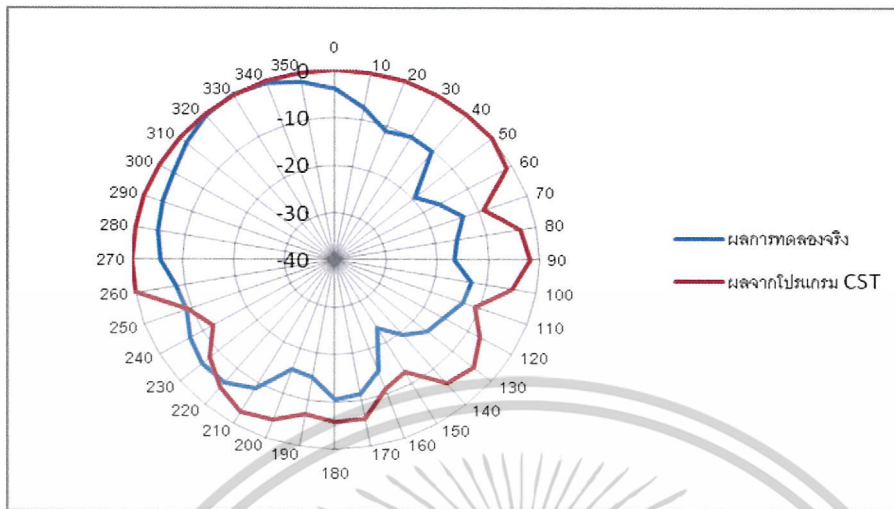
รูปที่ 4.29 แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 6.85 GHz ระนาบ H-plane

ตารางที่ 4.7 ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 6.85 GHz ระนาบ H-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์

มุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (dB)	Normalized
0	-70.437	-0.433	120	-79.775	-9.771	240	-81.913	-11.909
10	-70.004	0	130	-81.575	-11.571	250	-81.144	-11.14
20	-71.659	-1.655	140	-78.509	-8.505	260	-82.43	-12.426
30	-73.099	-3.095	150	-75.027	-5.023	270	-80.751	-10.747
40	-76.853	-6.849	160	-76.194	-6.19	280	-81.491	-11.487
50	-77.402	-7.398	170	-74.752	-4.748	290	-77.834	-7.83
60	-80.088	-10.084	180	-72.505	-2.501	300	-77.782	-7.778
70	-76.34	-6.336	190	-73.414	-3.41	310	-75.461	-5.457
80	-77.734	-7.73	200	-73.865	-3.861	320	-73.842	-3.838
90	-75.453	-5.449	210	-74.764	-4.76	330	-73.125	-3.121
100	-74.648	-4.644	220	-77.717	-7.713	340	-74.495	-4.491
110	-77.09	-7.086	230	-80.625	-10.621	350	-71.586	-1.582

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเปรียบเทียบแพทเทอรันในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 6.85 GHz



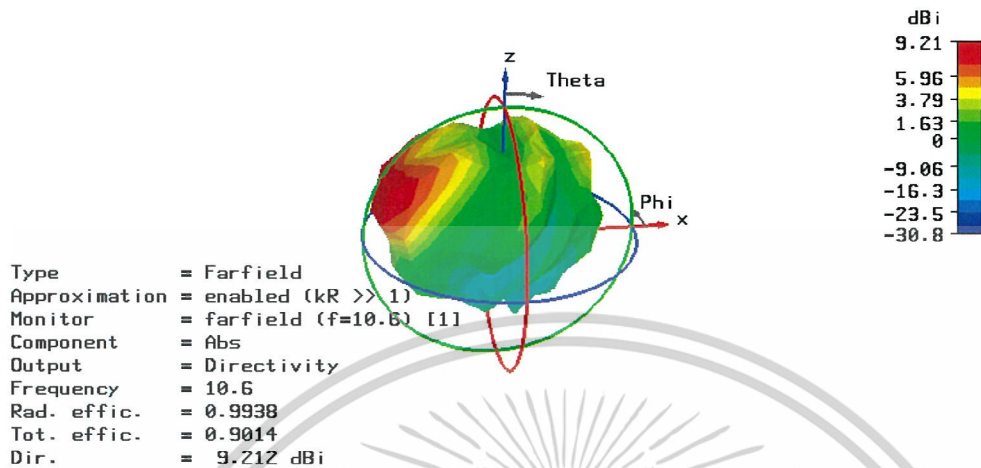
รูปที่ 4.30 แพทเทอรันของสายอากาศความถี่ 6.85 GHz ระนาบ E-plane

ตารางที่ 4.8 ค่าแพทเทอรันของสายอากาศ ความถี่ 6.85 GHz ระนาบ E-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์

มุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (dB)	Normalized
0	-66.167	-3.954	120	-77.585	-15.372	240	-69.249	-7.036
10	-69.685	-7.472	130	-78.704	-16.491	250	-71.067	-8.854
20	-73.426	-11.213	140	-81.440	-19.227	260	-70.259	-8.046
30	-72.422	-10.209	150	-85.634	-23.421	270	-67.791	-5.578
40	-72.622	-10.409	160	-77.316	-15.103	280	-66.753	-4.540
50	-81.942	-19.729	170	-73.519	-11.306	290	-66.051	-3.838
60	-78.701	-16.488	180	-72.712	-10.499	300	-65.538	-3.325
70	-75.632	-13.419	190	-77.076	-14.863	310	-63.992	-1.779
80	-77.950	-15.737	200	-77.566	-15.353	320	-62.735	-0.522
90	-78.727	-16.514	210	-70.966	-8.753	330	-62.213	0
100	-75.107	-12.894	220	-68.340	-6.127	340	-62.661	-0.448
110	-75.588	-13.375	230	-68.156	-5.943	350	-64.292	-2.079

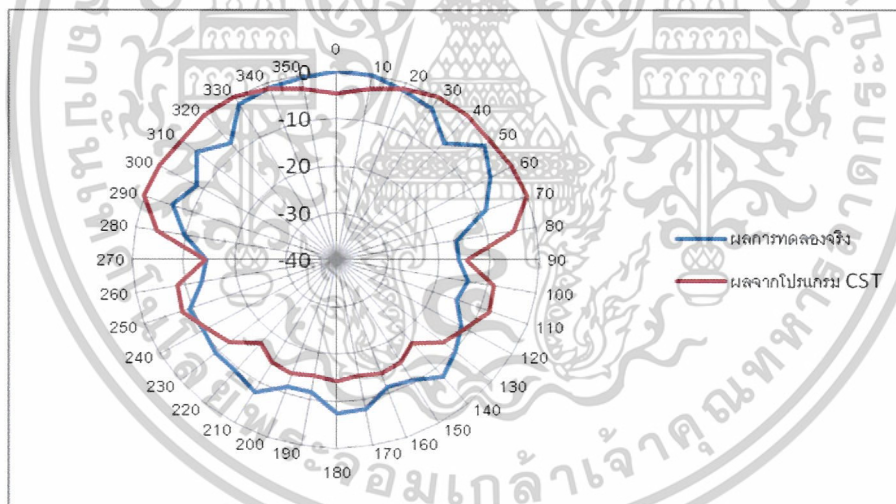
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) พิจารณาที่ความถี่ 10.6 GHz



รูปที่ 4.31 แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 10.6 GHz ใน 3 มิติ

3.1 การเปรียบเทียบแพทเทิร์นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 10.6 GHz



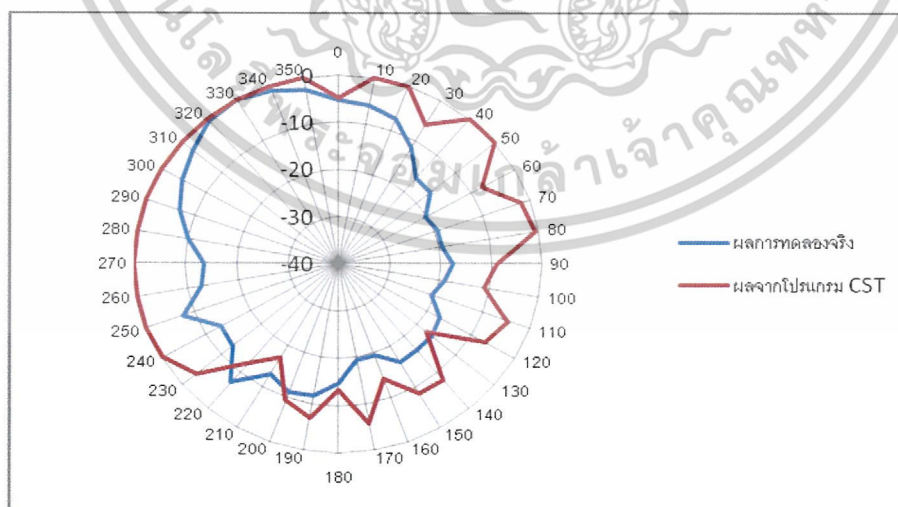
รูปที่ 4.32 แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 10.6 GHz ระนาบ H-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 10.6 GHz ระนาบ H-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์

มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized
0	-73.879	0	120	-85.988	-12.109	240	-83.819	-9.94
10	-74.187	-0.308	130	-83.984	-10.105	250	-83.313	-9.434
20	-75.712	-1.833	140	-81.681	-7.802	260	-86.942	-13.063
30	-76.959	-3.08	150	-84.616	-10.737	270	-88.359	-14.48
40	-81.511	-7.632	160	-85.393	-11.514	280	-83.567	-9.688
50	-76.313	-2.434	170	-81.934	-8.055	290	-79.689	-5.81
60	-79.171	-5.292	180	-81.467	-7.588	300	-82.179	-8.3
70	-82.943	-9.064	190	-85.427	-11.548	310	-78.186	-4.307
80	-90.38	-16.501	200	-85.43	-11.551	320	-81.658	-7.779
90	-90.126	-16.247	210	-81.477	-7.598	330	-75.762	-1.883
100	-87.79	-13.911	220	-83.092	-9.213	340	-75.022	-1.143
110	-89.174	-15.295	230	-83.043	-9.164	350	-74.578	-0.699

3.2 การเปรียบเทียบแพทเทิร์นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 10.6 GHz



รูปที่ 4.33 แพทเทิร์นของสายอากาศความถี่ 10.6 GHz ระนาบ E-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าแพทเทิร์นของสายอากาศ ความถี่ 10.6 GHz ระนาบ E-plane ที่ทำการนอมอลไลซ์

มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized	มุม (องศา)	ค่าที่ วัดได้ (dB)	Normalized
0	-72.885	-5.299	120	-84.688	-17.102	240	-80.969	-13.383
10	-73.698	-6.112	130	-83.826	-16.240	250	-75.241	-7.655
20	-75.052	-7.466	140	-83.881	-16.295	260	-80.314	-12.728
30	-79.177	-11.591	150	-83.516	-15.930	270	-81.303	-13.717
40	-84.062	-16.476	160	-86.889	-19.303	280	-77.772	-10.186
50	-84.188	-16.602	170	-87.081	-19.495	290	-74.533	-6.947
60	-87.969	-20.383	180	-82.407	-14.821	300	-72.368	-4.782
70	-87.017	-19.431	190	-79.303	-11.717	310	-70.291	-2.705
80	-87.100	-19.514	200	-78.744	-11.158	320	-68.086	-0.500
90	-85.225	-17.639	210	-80.533	-12.947	330	-67.586	0
100	-86.605	-19.019	220	-74.782	-7.196	340	-68.611	-1.025
110	-88.324	-20.738	230	-80.484	-12.898	350	-70.271	-2.685

จากการวัดสายอากาศ เปรียบเทียบกับ โปรแกรม CST จะเห็นได้ว่าทิศทางของลำคลื่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ Main Lobe ซึ่งไปในทิศทางเดียว ดูได้จากระนาบ H-plane โดยที่ความถี่ 3.1 GHz จะเห็นว่า Main Lobe และ Side lobe มีขนาดกว้างส่งผลให้แกนของสายอากาศมีค่าต่ำ

ความถี่ 6.85 GHz จะเห็นได้ว่า Main Lobe และ Side Lobe มีขนาดแตกต่างกันโดยลำคลื่นมีลักษณะแคบส่งผลให้แกนของสายอากาศมีค่าสูงกว่าที่ความถี่ 3.1 GHz

ความถี่ 10.6 GHz แพทเทิร์นของสายอากาศที่ได้จากการวัดจริงและที่ได้จาก โปรแกรม CST มีความแตกต่างกันเป็นผลมาจากค่า Return Loss กับค่า Voltage Standing Wave Ratio ที่ตอบสนองไม่ดีในช่วงความถี่สูงส่งผลให้แพทเทิร์นแตกต่างกันแต่ก็ยังคงเห็นเค้าโครงเดิมอยู่โดยลำบีมที่ได้จากการวัดจริงจะแคบมากส่งผลทำให้ค่าแกนของสายอากาศสูงมากขึ้นไปด้วย

4.4.5 อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศเป็นความสามารถในการส่งหรือรับคลื่นของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน แต่ในการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถหาสายอากาศมาตรฐานในการทดลองได้ จึงใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกันในการทดลองผลของอัตราขยายที่สามารถคำนวณได้จะเป็นอัตราขยายของสายอากาศทั้งส่งและรับ ดังนั้นอัตราขยายจริงของสายอากาศจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราขยายของสายอากาศที่คำนวณได้ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$G_R (dBi) = \frac{P_R (dBm) - P_T (dBm) + L_{JT} (dB) + L_S (dB) + L_{JR} (dB)}{2} \quad (4.1)$$

โดย $G_R (dBi)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศ

$P_R (dBm)$ คือ กำลังงานที่เครื่องได้รับ

$P_T (dBm)$ คือ กำลังงานที่เครื่องส่ง

$L_{JT} (dB)$ คือ กำลังงานที่สูญเสียในสายส่งด้านฝั่งส่ง

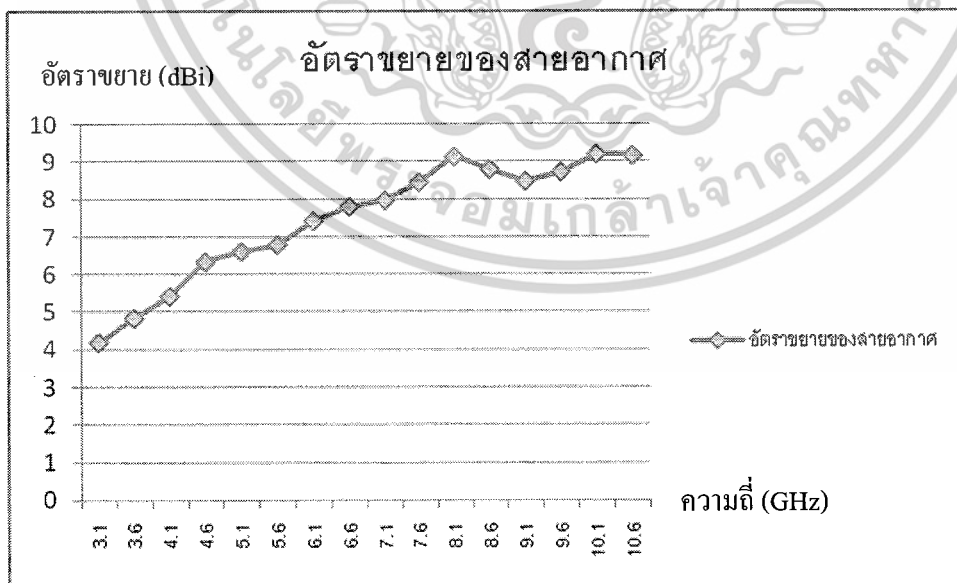
$L_{JR} (dB)$ คือ กำลังงานที่สูญเสียในสายส่งด้านฝั่งรับ

$L_S (dB)$ คือ กำลังงานที่สูญเสียในอากาศ (Free Space Loss)

โดยที่ $L_S (dB)$ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$L_S (dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (4.2)$$

ค่าอัตราขยายที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.34 กราฟอัตราขยาย ความถี่ตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยระบุทุกช่วงความถี่

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)	ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)
3.1	4.180	7.1	7.980
3.6	4.831	7.6	8.461
4.1	5.424	8.1	9.149
4.6	6.348	8.6	8.793
5.1	6.620	9.1	8.486
5.6	6.770	9.6	8.711
6.1	7.412	10.1	9.197
6.6	7.789	10.6	9.185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์หลักของโครงการปริญญาโทเพื่อต้องการศึกษาการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบ TEM HORN ตรวจสอบพารามิเตอร์และขนาดที่วัดได้ในทางปฏิบัติมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ของสายอากาศ เนื่องจากสายอากาศใช้งานช่วงความถี่กว้างตั้งแต่ 3.1-10.6GHz ทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีหลายค่าตามย่านความถี่ดังในตารางที่ 4.3 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะต้องทำการวัดในสภาวะที่สายอากาศเป็นโหลดของวงจรส่งซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ 50 โอห์ม ในช่วงความถี่ 5 GHz ถึง 7 GHz จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม CST มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) ของสายอากาศในอุดมคตินั้นเมื่ออิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศและสายนำสัญญาณเท่ากันจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 จากผลการทดลองอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศ TEM HORN มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 1.030 : 1 ที่ความถี่ 5.895 GHz และสูงสุดอยู่ที่ 1.882 : 1 ที่ความถี่ 4.575 GHz เป็นค่าที่ยอมรับได้ตลอดทั้งช่วงความถี่กว้าง เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม CST มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่สะท้อนกลับต่อกำลังงานที่ตกกระทบ ถ้าค่าความสูญเสียของการสะท้อนมีค่าน้อยแสดงว่าสายอากาศสามารถรับกำลังงานไว้ได้หมดและไม่มีคลื่นสะท้อนกลับ จากผลการทดลองความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ TEM HORN สูงสุดมีค่าเท่ากับ -37.217 dB ที่ความถี่ 5.895 GHz และต่ำสุดอยู่ที่ -10.398 dB ที่ความถี่ 4.575 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม CST มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) จะเห็นได้ว่าทิศทางของลำคลื่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ Main Lobe ซึ่งไปในทิศทางเดียว ดูได้จากระนาบ H-plane โดยที่ความถี่ 3.1 GHz จะเห็นได้ว่า Main Lobe และ Side lobe มีขนาดกว้างส่งผลให้เกนของสายอากาศมีค่าต่ำ ความถี่ 6.85 GHz จะเห็นได้ว่า Main Lobe และ Side Lobe มีขนาดแตกต่างกันโดยลำคลื่นมีลักษณะแคบส่งผลให้เกนของสายอากาศมีค่าสูงกว่าที่ความถี่ 3.1 GHz ความถี่ 10.6 GHz แพทเทิร์นของสายอากาศที่ได้จากการวัดจริงและที่ได้จากโปรแกรม CST มีความแตกต่างกันเป็นผลมาจากค่า Return Loss กับค่า Voltage Standing Wave Ratio ที่ตอบสนองไม่ดีในช่วงความถี่สูงส่งผลให้แพทเทิร์นแตกต่างกันแต่ก็ยังคงเห็นเค้าโครงเดิมอยู่โดยลำบีมที่ได้จากการวัดจริงจะแคบมากส่งผลทำให้ค่าเกนของสายอากาศสูงมากขึ้นไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาที่พบ

สำหรับปัญหาที่พบในทางปฏิบัตินั้นเกิดขึ้นหลายประการได้แก่

5.2.1 สายอากาศชนิด TEM HORN ที่สร้างขึ้นเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลลักษณะการทำรูปทรงให้เหมือนกับในโปรแกรมทำได้ยากในส่วนของกริดขึ้นแบบต้องทำอย่างประณีตเพราะรูปทรงของสายอากาศที่ผิดเพี้ยน จะทำให้เกิดผลต่อค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

5.2.2 ในการคำนวณในส่วนของโปรแกรมจะยึดหลักแกน โคออดิเนต (x,y,z) เป็นหลักแต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถทราบได้ว่าแกนที่โปรแกรมยึดเป็นหลักอยู่ที่ใด จุดพิดในโปรแกรมจะกำหนดที่จุดออริจินแต่ในทางปฏิบัติเราจะกำหนดจุดพิด บริเวณระยะห่างจากขอบของกราวด์เพลน

5.2.3 คุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรมจะเป็นคุณสมบัติที่มีค่าตายตัวค่าใดค่าหนึ่งแล้วแต่ชนิดของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่ใช้จริงค่าไม่เท่ากับค่าในโปรแกรม อันเนื่องมาจากการเก็บรักษาและสภาพของวัสดุ เช่น วัสดุเป็นสนิมเล็กน้อยมีการบวมยุบ มีการโค้งงอ เป็นต้น

5.2.4 ในการวัดหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ สภาพแวดล้อมมีผลต่อค่าที่ได้ในการทดลอง เช่นขณะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ และ VSWR ได้ติดตั้งอุปกรณ์ภายนอกห้องปรับอากาศค่าที่ได้ไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดเวลา ทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่เที่ยงตรง

5.2.5 ในการศึกษาโปรแกรม CST ต้องทำความเข้าใจในส่วนของโปรแกรม ฟังก์ชันต่างรวมไปถึงการสร้างแบบต้องใช้เวลา

5.2.6 ในส่วนของการวัดกับเครื่อง Network Analyzer สายที่ใช้นำสัญญาณเป็นไฟเบอร์ออฟติก การหักงอของสายทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณ

5.3 แนวทางแก้ไข

จากปัญหาที่พบดังกล่าวผู้ศึกษาได้ศึกษาทฤษฎีและทดลองออกแบบสายอากาศ TEM HORN และมีแนวทางแก้ไขปัญหาที่พบดังนี้

5.3.1 ศึกษาโปรแกรม CST ให้เข้าใจอย่างลึกซึ้งเพื่อลดความผิดพลาดในการออกแบบและประมวลผลผ่านโปรแกรม

5.3.2 สายอากาศที่ออกแบบจากโปรแกรม ผลที่ได้จากการออกแบบนั้นเป็นเพียงแนวโน้มของคุณสมบัติสายอากาศที่จะเป็นไปได้ ในทางปฏิบัติค่าต่างๆที่คำนวณนั้นอาจจะตรงหรือไม่ตรงตามคุณสมบัติก็ได้เราอาจมีการปรับแต่งสายอากาศเพิ่มเติมเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

5.3.3 สายอากาศที่สร้างขึ้นมานั้นอาจจะต้องมีวัสดุรองรับเพื่อให้สายอากาศมีความคงทนแข็งแรงไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างตามการเคลื่อนที่ วัสดุดังกล่าวอาจเป็นโฟม หรือ วัสดุที่เป็นฉนวน

5.3.4 การพิจารณาเลือกชนิดของโลหะที่ใช้ทำสายอากาศ โลหะที่ใช้ควรมีความต้านทานต่ำเมื่อเทียบกับความต้านทานการแผ่คลื่นของสายอากาศ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าถูกใช้ในการแผ่คลื่นมากที่สุดมีการสูญเสียในตัวสายอากาศน้อยที่สุด ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะซึ่งเห็นว่าเงินมีความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด (นำไฟฟ้าดีที่สุด) และอะลูมิเนียมชุบมีความต้านทานอยู่ระหว่างทองแดงและทองเหลือง ที่ความถี่สูงขึ้นจากศูนย์จะเกิดปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect) ซึ่งทำให้แทนที่กระแจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของโลหะอย่างในกรณีไฟตรง กลับมาอยู่ที่บริเวณผิวมากขึ้น

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอยู่ที่บริเวณแกนของท่อน้อยลง เสมือนว่าพื้นที่หน้าตัดที่กระแสไหลผ่านได้ลดลง ค่าความต้านทานของโลหะจึงสูงขึ้นกว่าไฟตรงมากการเลือกโลหะในทางปฏิบัติ โลหะที่ได้รับความนิยมนำมาทำสายอากาศได้แก่ทองแดงอะลูมิเนียม และทองเหลือง อะลูมิเนียมนิยมมากที่สุด เพราะมีราคาถูก น้ำหนักเบา ทนทานต่อการเกิดสนิม และทนทานการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานได้ทั่วไป ถ้าไม่คำนึงถึงน้ำหนักทองเหลืองและทองแดงก็ใช้กันมาก เนื่องจากสามารถบัดกรีได้ แต่เนื่องจากทองแดงและทองเหลืองเมื่อโดนแดด ฝนนานๆ จะหมองคล้ำ และเกิดสนิมเขียว

5.3.5 การเลือกสายนำสัญญาณเพื่อใช้ร่วมกับสายอากาศ จะต้องพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณและสายอากาศ รวมทั้งอิมพีแดนซ์ของระบบอุปกรณ์ต่อรวม ความถี่ที่ใช้เนื่องจากสายแต่ละเบอร์ตอบสนองความถี่ได้ต่างกัน อัตราการสูญเสีย ความสามารถของสายความสามารถในการรับกำลังไฟฟ้า ความสามารถในการโค้งงอ อายุการใช้งาน

5.3.6 ควรหลีกเลี่ยงการใช้ขั้วต่อสาย (connector) ตอนการวัดผลเพราะจะทำให้เกิดการสูญเสีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับการอนุเคราะห์อย่างสูง
ยิ่งจาก ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ รศ.ดร. สมผล โกศลวิจิตร ที่ได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำ
แนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนความรู้ความเข้าใจในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้
ในทางด้านโทรคมนาคม ให้ทางคณะผู้จัดทำมีแนวทางในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณเพื่อนภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่ได้ช่วยเหลือให้การทำโครงการนี้สำเร็จ
ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพระคุณพ่อคุณแม่ ที่ให้ความรัก ความห่วงใย กำลังใจ กำลังทรัพย์ และทุกสิ่ง
ทุกอย่างกับทางคณะผู้จัดทำ

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] C.A Balanis, "Antenna Theory Analysis And Design," Second Edition, Johnwiley and Sons, New York, 1997.
- [2] J.D.Taylor, "Introduction to ultra Wide Band Rudar Systems,"CRC Press, Retired, U.S Airforce
- [3] J.D.Kraus, "Antenna" second Edition.
- [4] ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ และ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ "ทฤษฎีสายอากาศ" ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม.
- [5] Y.Suo J.Qiu and W.Li, "Design and Simulation of TEM Horn Antennas for Ultra Wideband System," School of Electronics and Information Technology, pp 82-85, July 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้