



T104193

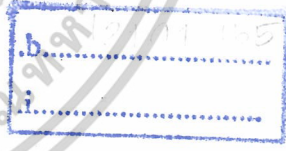
สายอากาศไมโครสตริปย่าน UWB
Ultra-wideband Microstrip Antenna



โดย

นายชัชชัย กล้ายบัณฑิตย์
นายพรเทพ มีสุวรรณ
นายพิษณุ รอดยั้ง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104193
วัน,เดือน,ปี 3 0 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ **ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว** ค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ปรากฏใน (ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

สายอากาศไมโครสตริปย่าน UWB
Ultra-wideband Microstrip Antenna

โดย

นายชัชชัย กล้ายบัณฑิตย์ รหัส 49015051

นายพรเทพ มีสุวรรณ รหัส 49015063

นายพิษณุ รอดยัง รหัส 49015064

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สมพล โกศลวิตร

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

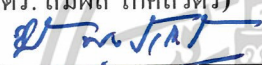
เรื่อง สายอากาศไมโครสตริปย่าน UWB

Ultra-wideband Microstrip Antenna

ผู้จัดทำ

1. นายชัชชัย คล้ายบัณฑิตย์ 49015051
2. นายพรเทพ มีสุวรรณ 49015063
3. นายพิษณุ รอดยัง 49015064



(รศ.ดร. สมพล โกศลวิตร)


(ผศ.ดร. ชுவค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปย่าน UWB
Ultra-wideband Microstrip Antenna

โดย นายชัชชัย กล้ายบัณเจติย์ 49015051
นายพรเทพ มีสุวรรณ 49015063
นายพิชญ รอดยัง 49015064

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

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการสื่อสารเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งมีความถี่ใช้งานตั้งแต่ (3.1-10.6) GHz โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบเช่น Return loss, Radiation pattern, Gain และ Impedance เป็นต้น ในการออกแบบเราจะทำการออกแบบสายอากาศที่มีการ โพลาริที่เป็นเชิงเส้น โดยการวิเคราะห์และออกแบบโดยใช้โปรแกรมคำนวณสายอากาศ (CST) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ABSTRACT

This project presents the design and fabrication of the micro strip antenna in UWB (Ultra-wide band) The frequency range is used from 3.1 to 10.6 GHz. the measured return loss, radiation pattern, gain and impedance were compared with the theoretical prediction by CST .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริมาณนิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริมาณนิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริมาณนิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริมาณนิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ความเป็นมาของการสื่อสาร UWB	4
2.2 ระบบและสัญญาณ UWB	5
2.2.1 The FCC Report and Order	6
2.2.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Density)	6
2.2.3 รูปร่างสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape)	8
2.2.4 ขบวนการสัญญาณพัลส์	10
2.2.5 กรอบสเปกตรัม (Spectral Masks)	13
2.2.6 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม (Spatial and Spectral Capacities)	14
2.2.7 ความเร็วของการส่งข้อมูล	15
2.2.8 ราคา (Cost)	16
2.2.9 ขนาด (Size)	16
2.2.10 การสูญเสียกำลังงาน (Power Consumption)	17
2.3 สายอากาศ UWB	17
2.3.1 หลักการของสายอากาศ	17
2.3.2 ปัญหาในการออกแบบสายอากาศUWB	20
2.4 สายอากาศไมโครสตริป	20
2.5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	21
2.5.1 แผ่นแผ่พลังงานหรือไมโครสตริป	22
2.5.2 วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก	22
2.5.3 ระบายสร้างเงา	22
2.6 รูปแบบของไมโครสตริป	22
2.7 รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป	22
2.7.1 การป้อนสัญญาณ โดยใช้สายส่งไมโครสตริป	23
2.7.2 การป้อนสัญญาณ โดยใช้สายส่งแกนร่วม	23
2.7.3 การป้อนสัญญาณ โดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด	24
2.7.4 การป้อนสัญญาณ โดยการเชื่อมต่อ โกลล์แผ่นไมโครสตริป	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 สายอากาศไมโครสตริปรีปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแกนร่วม	26
2.8.1 สภาพยอมประสิทธิผล (Effective Permittivity)	27
2.8.2 สภาพยอมพลวัต (Dynamic Permittivity)	27
2.8.3 ความยาวประสิทธิผล (Effective Length)	29
2.8.4 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency)	30
2.8.5. ตัวประกอบคุณภาพรวม (Total Quality)	31
2.8.6 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)	31
2.8.7 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	32
2.8.8 ประสิทธิภาพ (Efficiency)	33
2.8.9 อัตราขยาย (Gain)	34
2.8.10 โพลาริเซชัน (Polarization)	34
2.8.11 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)	35
สรุป	36
บทที่ 3 การออกแบบและจำลองการทำงานสายอากาศ	
3.1 โปรแกรมสายอากาศ	42
3.2 การออกแบบ	42
3.2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรีปแบบสี่เหลี่ยม	43
3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ	45
3.2.3 ขนาดของแพทช์สายอากาศไมโครสตริป	46
3.3 การปรับอิมพีแดนซ์	47
3.4 การออกแบบคำนวณสายอากาศไมโครสตริป ที่รองรับการใช้งานในช่วงความถี่ของอัลตราไวด์แบนด์	49
3.4.1 การออกแบบความกว้างยาวของสายส่งไมโครสตริป	49
3.4.2 การออกแบบช่องเปิดที่รองรับความถี่ 3.1 – 10.6 GHz	50
3.4.3 การปรับแต่งสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ	51
3.5 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป	53
3.6 การวางแผนและการตั้งเป้าหมายในการปฏิบัติงาน	53
สรุปผลการออกแบบและการคำนวณ	54
บทที่ 4 การจำลองและผลการทดสอบ	
4.1 การจำลอง	55
4.1.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Impedance)	55
4.1.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)	56
4.1.4 พิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากโปรแกรม CST	58
4.2 การปรับปรุงคุณลักษณะสายอากาศ	59
4.2.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)	59
4.2.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	60
4.2.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)	60
4.2.4 พิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่ได้ปรับปรุงจากโปรแกรม CST	62
4.3 การทดสอบ	64
4.3.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	65
4.3.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)	66
4.3.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	67
4.3.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)	69
4.4 การทดสอบการปรับปรุงสายอากาศ	74
4.4.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	74
4.4.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)	75
4.4.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	76
4.5 อัตราขยายของสายอากาศ	82
สรุป	85
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	
สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง	87
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบความหนาแน่นพลังต่ำและความหนาแน่นพลังงานสูง	8
รูปที่ 2.2 (ก) รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้เชิงอุดมคติ (W_{rx}) และ (ข) สเปกตรัมเชิงอุดมคติของสัญญาณพัลส์ UWB เดียวที่รับได้	9
รูปที่ 2.3 แบบจำลองวงจรในโปรแกรม MATLAB อย่างง่ายเพื่อจะสร้าง Gaussian doublet	10
รูปที่ 2.4 รายละเอียดของสัญญาณที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป	11
รูปที่ 2.5 (ก) ขบวนการสัญญาณพัลส์ UWB (ข) สเปกตรัมของขบวนการสัญญาณพัลส์ UWB	12
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของขบวนการพัลส์ได้รับการดิเทอร์โดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ ไปข้างหน้าและไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม	13
รูปที่ 2.7 กรอบสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC 15.517 (b,c) สำหรับระบบ UWB ภายในอาคาร	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	21
รูปที่ 2.9 สายอากาศไมโครสตริปที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต	22
รูปที่ 2.10 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป	23
รูปที่ 2.11 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วม	24
รูปที่ 2.12 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด	25
รูปที่ 2.13 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริป	26
รูปที่ 2.14 ความจุพลวัตหลักและความจุบริเวณขอบของแผ่นไมโครสตริป	28
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้สตริปเป็น โหลดแบบแถบความถี่กว้าง	37
รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและ ใช้สตริปเป็นโหลดแบบแถบความถี่กว้าง กำหนดค่าความยาวของ $l_2 = 24.5\text{mm}$	38
รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่มีสลับจูนสี่เหลี่ยม แบบแถบความถี่กว้าง	39
รูปที่ 3.4 การทดสอบค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า S โดยกำหนดค่า $L = 44\text{ mm}$, $l = 22.5\text{ mm}$, $w = 32\text{ mm}$, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6\text{ mm}$, $W_f = 6.37\text{ mm}$ และ $g = 0.5\text{ mm}$	40
รูปที่ 3.5 การทดสอบค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนแปลงจูนสลับ w โดยกำหนดค่า $S = 0.5\text{ mm}$, $l = 22.5\text{ mm}$, $L = 44\text{ mm}$, $G = 72\text{ mm}$, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6\text{ mm}$, $W_f = 6.37\text{ mm}$	41
รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	44
รูปที่ 3.7 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	45
รูปที่ 3.8 แสดงแผ่นระนาบเงา	48
รูปที่ 3.9 แสดงความหนาของอีพ็อกซี	48

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.10 แสดงแพทช์การแพร่กระจายคลื่น	49
รูปที่ 3.11 แสดงกราฟการเปลี่ยนพารามิเตอร์ความกว้างความยาวของช่องเปิด	51
รูปที่ 3.12 แสดงระนาบเงาของสายอากาศที่ปรับปรุง	52
รูปที่ 3.13 แสดงด้านข้างของสายอากาศที่ปรับปรุง	52
รูปที่ 3.14 แสดงแพทช์สายอากาศไมโครสตริปที่ปรับปรุง	53
รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้จาก โปรแกรม CST	55
รูปที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้จาก โปรแกรม CST	56
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จาก โปรแกรม CST	57
รูปที่ 4.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก	59
รูปที่ 4.5 สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการทดสอบ	60
รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ	60
รูปที่ 4.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากการทดสอบ	62
รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้จากการทดสอบ	63
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	64
รูปที่ 4.10 การจัดวางสายอากาศภายในห้องเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	65
รูปที่ 4.11 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ	66
รูปที่ 4.12 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz	67
รูปที่ 4.13 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.85 GHz	68
รูปที่ 4.14 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6 GHz	69
รูปที่ 4.15 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ	70
รูปที่ 4.16 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz	71
รูปที่ 4.17 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.85 GHz	72
รูปที่ 4.18 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6 GHz	73
รูปที่ 4.19 สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการทดสอบ	74
รูปที่ 4.20 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ	74
รูปที่ 4.21 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากการทดสอบ	75
รูปที่ 4.22 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้จากการทดสอบ	76
รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้มีการปรับปรุง	77
รูปที่ 4.24 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ	78
รูปที่ 4.25 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz	79
รูปที่ 4.26 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.85 GHz	80
รูปที่ 4.27 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6 GHz	81

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของ ระบบการสื่อสารแบบไร้สายแบบต่างๆ	7
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและ สเปกตรัมของระบบ ไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ	15
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบของอัตราบิตของ UWB กับมาตรฐานของระบบไร้สายและ ไร้สายอื่น	16
ตารางที่ 2.4 การสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB และชิพเซตการสื่อสารแบบเคลื่อนที่แบบต่างๆ	17
ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป	61
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป	62
ตารางที่ 4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริป	63
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	70
ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป	71
ตารางที่ 4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป	72
ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราขยายกรณีไม่มีสล็อต	77
ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราขยายกรณีมีสล็อต	79
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่า Gain ระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม	80
ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบ	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญาณิพนธ์

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคม ระบบการสื่อสาร รวมทั้งระบบรับส่งข้อมูลข่าวสารล้วนแล้วแต่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในชีวิตประจำวัน เนื่องจากประชาชนจะได้รับประโยชน์ในด้านการรับรู้ข่าวสารได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งในระบบการสื่อสารนั้น ส่วนที่มีความสำคัญก็คือ ตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งมีทั้งตัวกลางที่เป็นสายส่ง และตัวกลางที่เป็นอวกาศว่าง (ตัวกลางแบบไร้สาย) ในอดีตได้มีการส่งผ่านข้อมูลข่าวสารแบบผ่านสายส่งจึงทำให้เกิดปัญหาและข้อจำกัดเกิดขึ้นอย่างมากมาย ได้แก่ มีความยุ่งยากและลำบากในการวางสายส่ง โดยเฉพาะในถิ่นทุรกันดาร การขยายและการซ่อมบำรุงค่อนข้างเป็นไปได้ยากในขณะที่การสื่อสารแบบไร้สายไม่มีข้อจำกัดดังกล่าว การสื่อสารแบบไร้สายจึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและตัวกลางสำคัญเพื่อทำหน้าที่ รับหรือส่งข้อมูลข่าวสาร หรือทั้งรับและส่งข้อมูลข่าวสาร คือ สายอากาศ

สายอากาศ (Antenna) คือ วัสดุที่เป็นโลหะซึ่งมีหน้าที่ในการใช้ส่งหรือรับ หรือทั้งส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศที่มีการพัฒนาและมีการประยุกต์กัน ใช้งานอย่างกว้างขวางในย่านความถี่ไมโครเวฟ คือ สายอากาศไมโครสตริปเนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีขนาดเล็ก ราคาถูก น้ำหนักเบา และเป็นแผ่นแบนเรียบซึ่งสามารถตัด ไค้งงอ ไปตามวัตถุต่างๆ ได้แก่ อากาศยานและอวกาศยานได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปเพื่อให้ได้ตามที่ต้องการ โดยสามารถทำได้โดยการนำเอาวงจรหรืออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรขยาย และวงจรเลื่อนเฟสหรือเฟสหรือไดโอดประกอบเข้ากับแผ่นสายอากาศไมโครสตริป เป็นต้น

แม้ว่าสายอากาศไมโครสตริปจะมีคุณสมบัติที่ดีอยู่หลายประการก็ตามแต่ก็มีข้อเสียซึ่งต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาให้ดีขึ้นคือสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบแคบ อัตราขยายต่ำแบบรูปสนามไฟฟ้าถูกรบกวนง่ายเมื่อโครงสร้างของสายอากาศมีขนาดของระนาบสร้างเงาตกลงการแพร่กระจายคลื่นโดยส่วนส่วนใหญ่จะเป็นแบบทิศทางเดียว ซึ่งในการปรับปรุงและพัฒนาสายอากาศจำเป็นต้องทราบและเข้าใจคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้ศึกษาได้ศึกษาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศดังนี้ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) ความสูญเสียเนื่องจากย้อนกลับ (Return Loss) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) อัตราขยาย (Gain) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และคุณสมบัติอื่นๆ ของสายอากาศและนำข้อมูลที่ได้นำมาเพื่อการศึกษาและออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีโครงสร้างและลักษณะของการออกแบบเป็นไปตามหลักการของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งอาศัยการคำนวณตามหลักการของสายอากาศไมโครสตริป จากนั้นจะทำการออกแบบจำลองการสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรมจำลองสายอากาศ (CST) โดยทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อให้ได้สายอากาศไมโครสตริปที่มีย่านการใช้งานใช้งานอยู่ในช่วง (UWB) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ ทฤษฎีของการออกแบบสายอากาศ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาการสร้างและออกแบบ

สายอากาศให้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์การใช้งาน หรือการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารหรือระบบอื่นๆ ได้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ไม่มากนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริป

1.2.2 เพื่อศึกษาการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปในรูปแบบต่างๆ

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป ได้แก่

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) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริป ที่มีการใช้งานในย่าน อัลตราไวด์แบนด์

1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศเพื่อให้ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริป

1.2.5 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาสมการสนามไฟฟ้ารวม เพื่อกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริป

1.2.6 เพื่อศึกษาเทคโนโลยีและหลักการส่งข้อมูลของ (UWB)

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริป เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติและคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ และจะนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบและสร้างเป็นสายอากาศไมโครสตริป

1.3.2 ศึกษาวิธีการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งจะใช้การป้อนแบบใช้สายส่งแกนร่วม (Coaxial Feed) โดยทำการป้อนสัญญาณที่องค์ประกอบตัวแพร่กระจายคลื่น

1.3.3 ศึกษาวิธีการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริป ที่มีย่านการใช้งานตั้งแต่ความถี่ (3.1-10.6) GHz ซึ่งเป็นย่านการใช้งานของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

1.3.4 ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริป จากแผ่นวัสดุชนิด Fr-4 มีสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) $\epsilon_r = 4.4$ ความหนา 0.8 มิลลิเมตร ที่ใช้ในย่านความถี่ที่อยู่ในช่วงการใช้งานของอัลตราไวด์แบนด์คือ (3.1-10.6) GHz

1.3.5 ทดลองวัดคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก อัตราขยาย สภาพเจาะจงทิศทาง และประสิทธิภาพของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างของความถี่ในช่วงต่างๆของสายอากาศไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อวัดผลในทางปฏิบัติ

1.3.7 วิเคราะห์และเปรียบเทียบการวัดสายอากาศไมโครสตริป กับการจิมมูล์ชั้นจากโปรแกรม (CST) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

1.3.8 วิจัยและสรุปผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญาโท

1.4.1 ทำให้ทราบถึงทำทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริป

1.4.2 ทำให้ทราบรูปแบบและวิธีการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป

1.4.3 ทำให้ทราบคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริป ได้แก่ อิมพีแดนซ์ขาเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก อัตราขยาย สภาพเจาะจงทิศทาง และประสิทธิภาพของสายอากาศ

1.4.4 ทำให้สามารถวิเคราะห์วิธีการคำนวณหาคุณลักษณะต่างๆ เพื่อใช้ในการสร้างและออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

1.4.5 ทำให้ทราบวิธีคำนวณหาสนามไฟฟ้ารวมถึงกำหนดรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริป

1.4.5 ทำให้ทราบผลต่างด้านคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

1.4.6 เพื่อเรียนรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยี (UWB)

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด

ทฤษฎีและหลักการการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดหรือที่เรียกกันว่า UWB (Ultra Wideband) โดยจะเริ่มที่ความเป็นมา รวมทั้งระบบและสัญญาณ UWB ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดมา ซึ่งกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของ UWB ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน รวมทั้งลักษณะรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ทำให้เกิดเป็นระบบ UWB และคุณสมบัติอื่นๆที่ทำให้ UWB ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

2.1 ความเป็นมาของการสื่อสาร UWB

การสื่อสาร UWB นั้นได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง เมื่อประมาณปี ค.ศ. 2000 ได้รับการขนานนามจากนิตยสารต่างๆว่าเป็นหนึ่งในหลายเทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนโฉมหน้าโลกของเรา แต่ในความเป็นจริงแล้วต้นกำเนิดของ UWB มีมาตั้งแต่เมื่อกว่าร้อยปีมาแล้วหรือกล่าวได้ว่าการสื่อสารทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือการสร้างพัลส์สั้นๆ (Short pulse) ขึ้นมา โดยการใช้แหล่งกำเนิดแบบ Spark-gap ตัวอย่างเช่นข้อมูลที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าครั้งแรกการทดลองของ Hertz รวมทั้งการทดลองของ Marconi ด้วยเหตุนี้เองทำให้ระบบ UWB ที่นำมาใช้งานจริงครั้งแรกเกิดขึ้นเมื่อ 100 ปีมาแล้ว และยังมีนักทฤษฎีที่สำคัญคนหนึ่งชื่อว่า Sommerfield ได้ทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของพัลส์ที่เกิดจากแผ่นระนาบ (Half-plane) ซึ่งได้มาเป็นหลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นของ UWB

อย่างไรก็ตามหลังจากปี ค.ศ. 1910 เป็นต้นมาความสนใจส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปยังการพัฒนาการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบ (Narrowband) เนื่องจากการสื่อสารช่วงความถี่กว้างจะให้ประสิทธิภาพสเปกตรัม (Spectral efficiency) ของสัญญาณที่เกิดจากตัวส่งแบบ Spark-gap นั้นต่ำและยังมีอัตราบิต (Bit rate) ที่ต่ำอีกด้วยหรืออาจจะกล่าวได้ว่าสัญญาณเหล่านี้มีตัวประกอบการแผ่กระจายออก (Spreading factor) ที่กว้าง ซึ่งในเวลานั้นยังไม่มีใครวิธีที่จะนำการแผ่กระจายออกของสัญญาณมาใช้งานอย่างไร ทำให้ดูเหมือนว่าจะไม่พอเพียงพอสำหรับการใช้งาน ในทางกลับกันการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบซึ่งได้นำมาใช้ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplex) ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นเรื่องง่ายที่จะส่งสัญญาณพร้อมกันในช่วงความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ในตอนนั้นการศึกษาค้นคว้า UWB ไม่มีความก้าวหน้ามากนัก

จากนั้นในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการศึกษาวิจัย UWB อย่างจริงจังอีกครั้งโดยได้นำมาใช้สำหรับเรดาร์ทางการทหารซึ่งในครั้งนี้ประเด็นสำคัญไม่ได้อยู่ที่ประสิทธิภาพสเปกตรัมแต่จะมุ่งเน้นพัฒนาความละเอียดทางด้านตำแหน่ง (Spatial resolution) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าการเพิ่มความแม่นยำของเวลาที่ใช้งาน (Runtime) สำหรับการส่งสัญญาณจากเรดาร์ตัวส่งไปยังวัตถุที่ระบุและส่งกลับมายังตัวรับ ในการศึกษาอันนั้นจะเริ่มจากการพิจารณาองค์ประกอบสำคัญทางฟูเรียร์ (Elementary Fourier) พบว่าต้องส่งสัญญาณเรดาร์แบบพัลส์ที่สั้นกว่าเดิม ส่วนประกอบสำคัญของระบบเรดาร์แบบ UWB คือการออกแบบกำลังสูง (High power) และเครื่องกำเนิดพัลส์สั้น (Short pulse Generator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารแบบ UWB เริ่มได้รับความสนใจอีกครั้งในปี ค.ศ. 1970 เวลานั้นจะเรียกว่าการสื่อสารแบบช่วงความถี่ฐาน (Baseband) หรือแบบคลื่นพาห่ออิสระ (Carrier-free) และประมาณปี ค.ศ. 1973 ได้มีการยอมรับกันว่า สัญญาณแบบพัลส์สั้นที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แคบและไม่ได้แทรกสอดสัญญาณช่วงความถี่แคบเหล่านั้นด้วย แต่มีปัญหาในเรื่องการแทรกสอดแบบ Multiple-access (Multiple-Access Interference (MAI)) ของการไม่เข้ากัน (Unsynchronized) ของผู้ใช้ ทำให้ในปี ค.ศ. 1970 ถึง 1980 การสื่อสาร UWB ยังคงได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องในสวนทางด้านทหาร และในปี ค.ศ. 1990 ปัญหาเรื่อง MAI ก็ได้รับการแก้ไข โดยการริเริ่มของหลักการวิทยุอิมพัลส์แบบ Time-Hopping (Time-Hopping Impulse Radio (TH-IR)) โดย Win และ Scholtz ที่แสดงให้เห็นว่าสัญญาณวิทยุอิมพัลส์สามารถยังคงรองรับจำนวนมากไว้ได้โดยใช้การกำหนดเวลาการส่งผ่านแบบ pseudorandom ไปยังพัลส์จากผู้ใช้ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาดังกล่าวบวกกับความก้าวหน้าในการออกแบบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความสนใจที่จะนำ UWB มาใช้ในเชิงพาณิชย์

อุปสรรคที่สำคัญสำหรับการนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ก็คือความถี่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ที่จัดสรรให้ใช้อยู่ทั่วโลกนั้นจะกำหนดให้เป็นแบบช่วงความถี่แคบสำหรับการใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ระบบ UWB ได้ฝ่าฝืนข้อกำหนดดังกล่าวเนื่องจากมีการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่กว้างอาจจะครอบคลุมช่วงความถี่ที่มีการกำหนดใช้งานอย่างอื่นด้วย ดังนั้นจึงมีการขออนุญาตให้ใช้งาน UWB ได้โดยการใช้งาน UWB ไม่ไปแทรกสอดกับการใช้งานอย่างอื่นจนในที่สุด ในปี ค.ศ. 2002 ทาง FCC (Federal Communication Commission) ได้อนุญาตให้การใช้ UWB สามารถใช้ได้ที่ย่านความถี่ระหว่าง 3.1 ถึง 10.6 GHz นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ของชั้นกายภาพสำหรับการสื่อสารสายที่มีค่า throughput สูงบนพื้นฐานของ UWB ขึ้นมา รวมทั้งมาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับการพัฒนาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่ใช้ร่วมกันสำหรับอุปกรณ์ UWB

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา งานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสาร UWB ได้มีจำนวนมากขึ้นซึ่งมีหัวข้อที่ทำการวิจัยที่แตกต่างกันออกไป เช่น การประเมินช่องสัญญาณและการเข้ากันได้ (synchronization) การติดตั้งเพื่อนำไปใช้งานจริงของระบบวิทยุอิมพัลส์และการติดตั้งอื่นที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน UWB ร่วมกับ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) นอกจากนี้งานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน

2.2 ระบบและสัญญาณ UWB

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานของระบบและสัญญาณ UWB อย่างแรกที่จะพูดถึงจะเป็นรูปร่างพื้นฐานของสัญญาณพัลส์ในระบบ UWB ในโดเมนทางเวลาและสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์ด้วย โดยทั่วไปแล้ว สัญญาณพัลส์ที่สั้นมากๆ ซึ่งเวลาของสัญญาณขึ้นและลงอย่างรวดเร็วจะมีสเปกตรัมกว้างและมีพลังงานต่ำมาก จะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ UWB ที่สั้นมากๆ จะสามารถถูกรองไว้ และยังพร้อมที่จะถูกแยกออกจากการสะท้อนของสัญญาณหลายเส้นทางที่ไม่ต้องการได้เพราะว่าความละเอียดทางเวลาที่ดี (Fine Time Resolution) ซึ่งจะนำไปสู่คุณลักษณะของการไม่ถูกรบกวนสัญญาณหลาย

เส้นทาง ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณพัลส์ UWB ทำให้สัญญาณแพร่กระจายคลื่นผ่านวัสดุอย่างเช่น อิฐหรือปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาคส่งและภาครับของ UWB ไม่ต้องการส่วนประกอบที่ใหญ่และมีราคาแพง ทำให้สามารถลดต้นทุน ขนาด น้ำหนัก และการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบ UWB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบโดยทั่วไป

2.2.1 The FCC Report and Order

ในปี 2002 FCC (Federal Communication Commission) ได้ตีพิมพ์กฎของ UWB สำหรับนำไปใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเรดาร์รวมทั้งอุปกรณ์รักษาความปลอดภัย โดย The FCC Report and Order จะเป็นตัวกำหนดพื้นฐานสำหรับกฎตามมาตรฐานของทาง FCC ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ดังนี้

- แบนวิคท์ของ UWB : แถบความถี่จะกำหนดขอบเขตโดยให้มีค่าเท่ากับ 10 dB ลงมาจากค่าที่มากที่สุดของพลังงานการแพร่กระจายคลื่นความถี่กลางจะถูกกำหนดให้ $f_c - (f_H + f_L)/2$
- แบนวิคท์จะถูกกำหนดให้ $BW = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L)$ โดยแบนวิคท์ของ UWB จะต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz (UWB bandwidth \geq 500 MHz)
- EIRP : Equivalent Isotropically Radiated Power เป็นตัวกำเนิดพลังงานไปยังสายอากาศและอัตราการขยายของสายอากาศที่มีทิศทางจะมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไอโซทรอปิก
- สำหรับระบบภายในอาคารและระบบเคลื่อนที่ (ตัวอย่างเช่น Laptop Computer หรือ PDA) แบนวิคท์ของระบบ UWB ต้องอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz - 10.6 GHz และต้องมีค่า EIRP เท่ากับ -43 dBm

2.2.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Density)

โดยทั่วไปความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบ UWB จะพิจารณาให้มีค่าต่ำมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางด้าน การสื่อสาร ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (PSD) กำหนดให้เป็น

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

โดยที่ P เป็นกำลังส่งมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) และ B เป็นแบนวิคท์ของสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ (Hz) ส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานจะมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ (W/Hz)

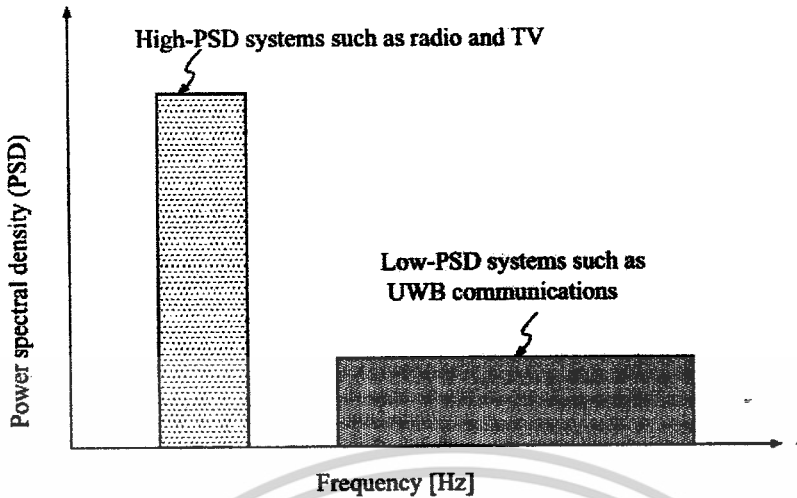
ตามประวัติศาสตร์ที่ผ่านพบว่าการสื่อสารไร้สายจะมีใช้เฉพาะช่วงความถี่แคบซึ่งจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่สูงหรือจะกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเนื่องจากเรารู้ว่าความถี่และเวลาจะเป็นสัดส่วนที่ตรงข้ามกัน (Inversely proportional) ระบบสัญญาณไซนูซอยด์จะมี B แคบและระยะเวลา (t) นาน สำหรับระบบ UWB แล้วสัญญาณพัลส์จะมีเวลา t สั้น และช่วงความถี่ B ที่กว้างมาก เพื่อให้เห็น

ความแตกต่างของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบแบบต่างๆดังนั้นตารางที่ (2.1) จะแสดงค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารไร้สายต่างๆ จะเห็นได้ว่ากำลังงานที่ใช้ไปในการส่งสัญญาณในระบบไร้สายจะใช้กำลังงานน้อยมาก โดยทั่วไปควรจะต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันในทุกวันนี้ ถ้าจำกัดปริมาณพลังงานได้ ก็จะสามารถส่งความหนาแน่นพลังงานที่สูงมากตลอดช่วงความถี่แคบหรือไม่กี่ส่งความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำตลอดช่วงความถี่สูง การเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบทั้งสองจะแสดงในรูปที่ 2.1 ปริมาณกำลังงานทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความถี่และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารแบบ ไร้สายแบบต่างๆ

ระบบ	กำลังส่ง (W)	แบนวิทท์ (Hz)	ความหนาแน่นกำลังงาน (W/Hz)	ประเภทของช่องความถี่
วิทยุ	50kW	75kHz	666,600	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 โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นกำลังงานสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำมากๆ ประโยชน์ของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำ คือความน่าจะเป็นในการตรวจจับได้ต่ำ (low probability of detection) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจการประยุกต์ใช้ในการทางทหาร ยกตัวอย่างเช่น การแปลงทางด้านการสื่อสารและเรดาร์ นอกจากนี้ยังจะเกี่ยวข้องกับการประยุกต์การใช้งานในระบบไร้สายที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูลสูง



รูปที่ 2.1 ระบบความหนาแน่นพลังต่ำและความหนาแน่นพลังงานสูง

2.2.3 รูปร่างสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape)

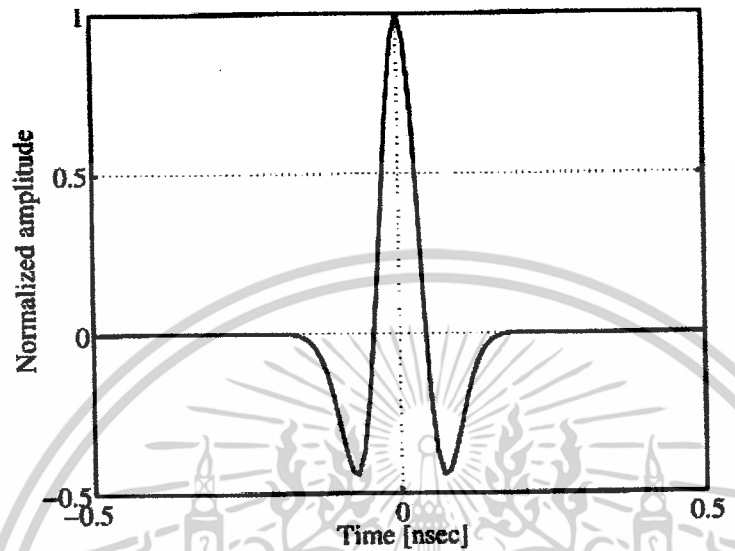
รูปร่างสัญญาณพัลส์ (UWB) ที่รับได้โดยทั่วไปบางทีอาจจะเรียกว่า Gaussian doublet แสดงได้ดังรูปที่ (2.2) สัญญาณพัลส์ดังกล่าวมักจะนำมาใช้ในระบบ UWB เพราะว่ามีรูปร่างที่ง่ายต่อการสร้าง โดยจะสร้างเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส จากเวลาสัญญาณพัลส์ขึ้นและลงที่จำกัดและผลของการกรองสัญญาณของสายอากาศส่งและรับจึงทำให้รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้จึงเป็นสัญญาณในรูปที่ (2.2) สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถสร้างขึ้นอย่างง่าย โดยการสวิตช์การเปิดปิดตัวทรานซิสเตอร์อย่างรวดเร็ว

รูปแบบการสร้างสัญญาณอย่างง่าย ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ (2.3) และ (2.4) ซึ่งทำให้เห็นถึงการเกิด Gaussian doublet ที่ภาคส่งผลกระทบของสายอากาศ และ ภาครับจากรูปที่ 2.4 (ก) สัญญาณพัลส์ UWB จะอยู่ในระดับนาโนวินาทีหรือพิโควินาที การสวิตช์เปิดปิดอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ไม่ได้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมๆที่ถูกทำให้ราบลง รูปร่างสัญญาณพัลส์จะมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งของฟังก์ชันแบบเกาส์ สำหรับฟังก์ชันแบบเกาส์ $G(x)$ สามารถเขียนได้ดังสมการ

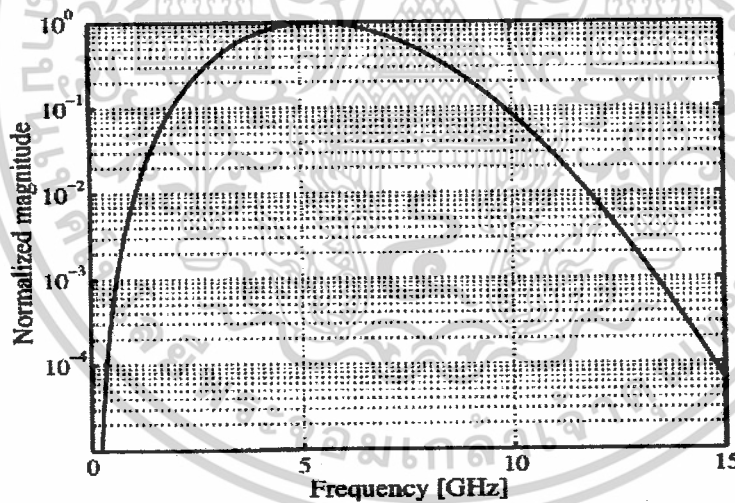
$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-x^2/\sqrt{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

โดยที่สมการที่ 2.2 จะสมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยศูนย์ (zero-mean) จึงเป็นที่มาของคำว่า สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian pulse) วงเดี่ยว (Monocycle) หรือ Doublet วงจรอย่างง่ายสำหรับการสร้าง Gaussian doublet สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 การส่งสัญญาณพัลส์โดยตรงไปยังสายอากาศ ทำให้สัญญาณพัลส์ถูกกรองเนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศนั่นเอง การกรองนี้จะสามารถจำลองโดยการหาอนุพันธ์จะมีการ

กรอแบบเดียวกันนี้ที่สายอากาศรับด้วย ในที่นี้จะจำลองช่องสัญญาณให้ถูกเลื่อนออกไปและสมมติให้สัญญาณพัลส์ถูกขยายที่ภาครับ



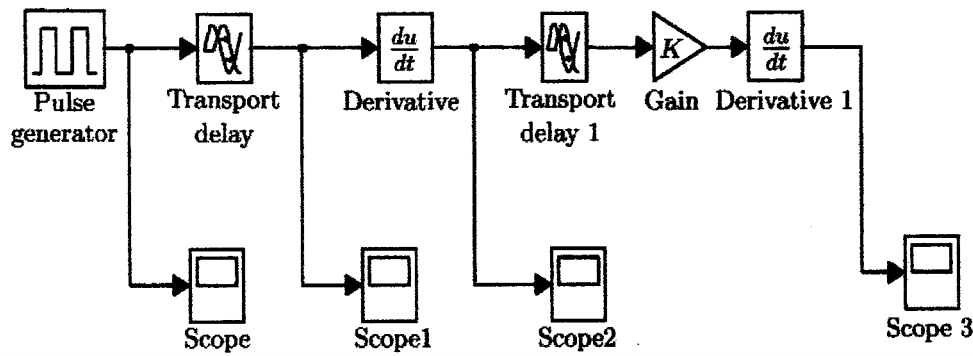
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้เชิงอุดมคติ (W_{rx}) และ
(ข) สเปกตรัมเชิงอุดมคติของสัญญาณพัลส์ UWB เดียวที่รับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองวงจรใน โปรแกรม MATLAB อย่างง่ายเพื่อจะสร้าง Gaussian doublet

รูปร่างสัญญาณที่รับได้ในเชิงอุดมคติ (p_{rx}) สามารถเขียนได้เป็น

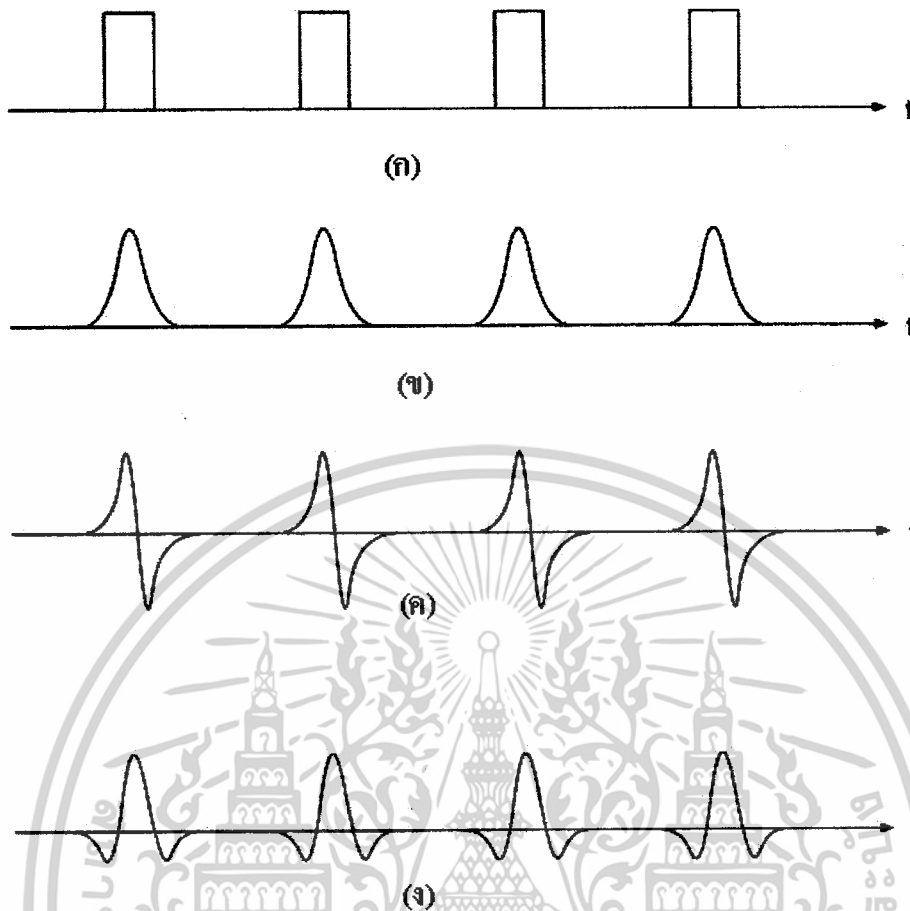
$$P_{rx} = \left[1 - 4\pi \left(\frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] e^{-2\pi (v\tau_m)^2} \quad (2.3)$$

ซึ่งเป็นสมการที่นำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 2.2 (ก) ในที่นี้ τ_m จะสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.15 นาจะกล่าวได้ว่า τ_m เป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวของสมการที่ 2.3 และสามารถกำหนดคุณลักษณะทางเวลาและความถี่ของ Gaussian doublet ให้มีรูปแบบไม่ซ้ำกัน

สเปกตรัมของ Gaussian doublet สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 (ข) ความถี่กลาง (Center frequency) สามารถประมาณจากรูปได้อยู่ที่ 5 GHz และมีช่วงความถี่ 3 GHz ครอบคลุมความถี่หลาย GHz เมื่อเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบหรือแม้แต่ช่วงความถี่กว้างเองก็ตามจะเห็นได้ว่าระบบ UWB จะมีช่วงความถี่ที่กว้างมากจึงเป็นที่มาของชื่อ UWB

2.2.4 ขบวนการสัญญาณพัลส์

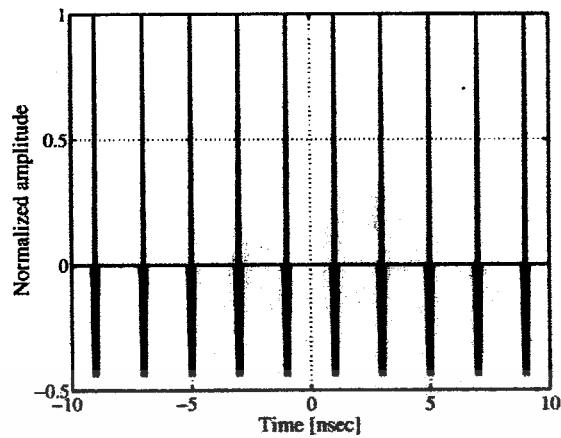
สัญญาณพัลส์อันเดียวนั้นไม่สามารถจะสื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ ดังนั้นข้อมูลจึงจำเป็นต้องจะผ่านการ มอดูเลตกับลำดับของสัญญาณพัลส์ที่เรียกว่าขบวนการสัญญาณพัลส์ (Pulse train)



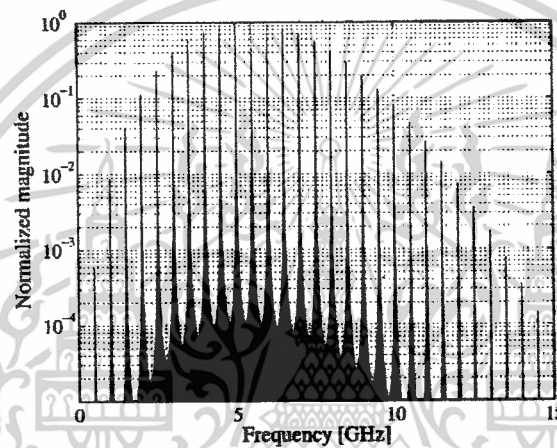
รูปที่ 2.4 รายละเอียดของสัญญาณที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป

- (ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse train)
- (ข) สัญญาณพัลส์แบบเหมือน Gaussian (Gaussian-like pulse)
- (ค) สัญญาณพัลส์อนุพันธ์ครั้งที่ 1 (First-derivative pulses)
- (ง) Gaussian Doublet ที่รับได้

เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ไปจะมีช่องว่างเวลาระหว่างสัญญาณที่มีเป็นระยะ บางทีจะเรียกว่าอัตราการส่งสัญญาณพัลส์ซ้ำ (Pulse repetition) หรือรอบการทำงาน (Duty Cycle) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมของสัญญาณประกอบไปด้วยยอดสูงสุดของกำลังงานที่ความถี่ที่แน่นอน ความถี่เหล่านี้จะเป็นส่วนกลับของอัตราการส่งสัญญาณพัลส์ซ้ำ และเส้นยอดสูงสุดของกำลังงานเหล่านี้จะเรียกว่าซีหวี (Comblines) เนื่องจากมีลักษณะเหมือนกับหวี ดังแสดงในรูปที่ 2.5



(ก)

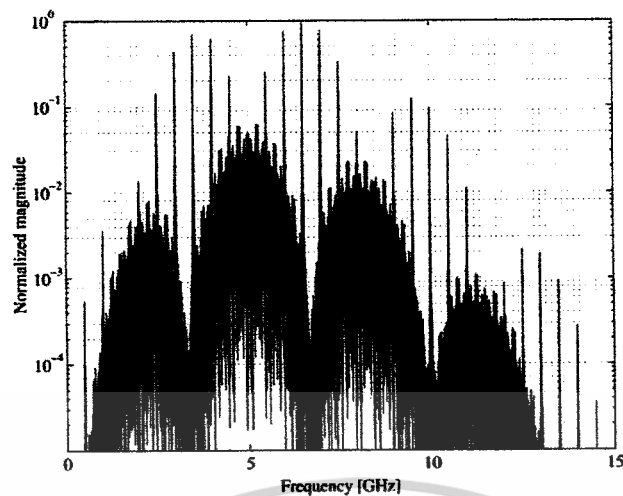


(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) ขบวนการสัญญาณพัลส์ UWB

(ข) สเปกตรัมของขบวนการสัญญาณพัลส์ UWB

ยอดสูงสุดเหล่านี้จะจำกัดกำลังรวมทั้งหมดที่ไม่ต้องการได้ วิธีหนึ่งก็คือการดิเทอร์ (dither) สัญญาณ โดยการเพิ่มตำแหน่ง Offset สั้นๆแบบสุ่มไปในสัญญาณพัลส์แต่ละสัญญาณสเปกตรัมที่เป็นผลมาจาก Offset แบบสุ่มจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



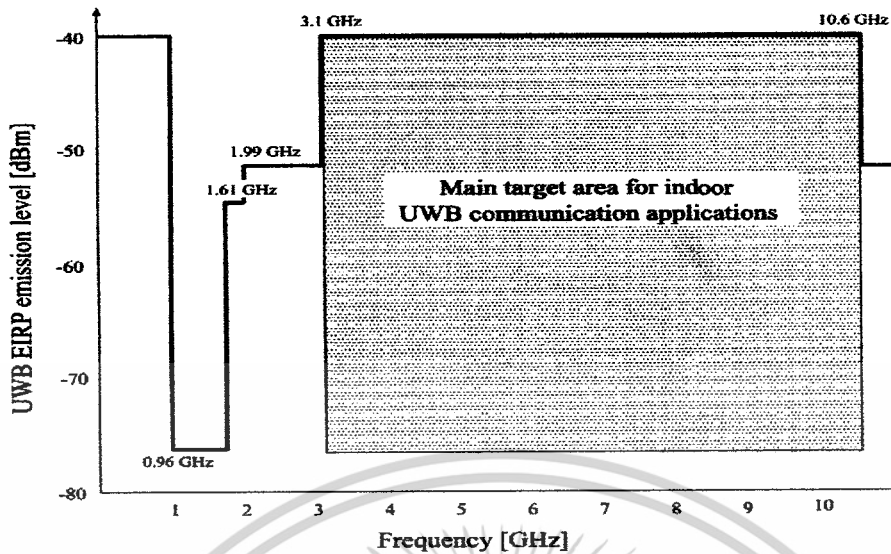
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของขบวนพัลส์ได้รับการดิเทอร์โมโดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม

2.2.5 กรอบสเปกตรัม (Spectral Masks)

สเปกตรัมของสัญญาณ UWB เป็นหนึ่งในประเด็นหลักที่ต้องผ่านการพิจารณาทั้งทางด้านภาคอุตสาหกรรมและรัฐบาลเพื่อให้สามารถนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเรื่องสเปกตรัมถือว่าเป็นหัวใจหลักของเทคโนโลยี UWB

การสื่อสารทางวิทยุทั้งหมดจะอยู่ภายใต้กฎหมายที่แตกต่างกัน และข้อกำหนดเกี่ยวกับเอาต์พุตของกำลังงานในช่วงความถี่ใดช่วงความถี่หนึ่ง เพื่อป้องกันการแทรกสอดไปยังผู้ใช้อื่นที่ใช้ช่วงความถี่ใกล้เคียงกันหรือความถี่เดียวกัน

ระบบ UWB จะครอบคลุมสเปกตรัมที่กว้างมากและสามารถแทรกสอดกับผู้ใช้ที่มีอยู่แล้วเพื่อให้การแทรกสอดเหล่านั้นมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นทาง FCC และองค์กรต่างๆจึงจำเป็นต้องระบุกรอบของสเปกตรัม สำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆซึ่งจะแสดงเอาต์พุตกำลังงานที่อนุญาตให้ใช้สำหรับความถี่ที่ได้ระบุไว้



รูปที่ 2.7 กรอบสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC 15.517 (b,c) สำหรับระบบ UWB ภายในอาคาร

จากรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างของกรอบสเปกตรัมที่ FCC กำหนดไว้สำหรับระบบ UWB ภายในอาคารซึ่งกำหนดให้ใช้งานในช่วงความถี่กว้าง 7.5GHz จะเริ่มต้นที่ 3.1GHz ไปจนถึง 10.6GHz โดยที่จำเป็นต้องมีเอาต์พุตกำลังที่มากที่สุดเท่ากับ -41.3 dBm/MHz

เหตุผลหลักสำหรับเอาต์พุตกำลังงานที่อนุญาตในช่วงความถี่ 0.96 GHz ถึง 1.61GHz มีค่าที่ต่ำที่สุดเนื่องจากแรงกดดันจากกลุ่มที่เป็นตัวแทนของผู้ให้บริการที่มีอยู่แล้ว อย่างเช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System (GPS)) และกลุ่มที่ใช้งานทางการทหาร

2.2.6 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม (Spatial and Spectral Capacities)

คุณสมบัติพื้นฐานของระบบ UWB อีกอย่างก็คือมีความจุทางตำแหน่งที่สูง (Spatial Capacity) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อตารางเมตร (bps/m^2) ความจุทางตำแหน่งสามารถคำนวณได้เป็นอัตราข้อมูลที่สูงสุด (Maximum data rate) ของระบบหารด้วยพื้นที่ที่ครอบคลุมการส่งของระบบพื้นที่ในการส่ง (Transmission area) สามารถคำนวณจากพื้นที่วงกลมที่สมมติให้ตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง โดยความจุทางตำแหน่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความจุทางตำแหน่ง} (\text{bps/m}^2) = \text{อัตราข้อมูลมากที่สุด} (\text{bps}) / \text{พื้นที่ในการส่ง} (\text{m}^2) \quad (2.4)$$

$$\text{พื้นที่ในการส่ง} (\text{m}^2) = \pi \times (\text{ระยะในการส่ง Transmission distance})^2 \quad (2.5)$$

สำหรับระบบช่วงความถี่แคบการวัดความจุที่นิยมมากที่สุดก็คือ ความจุทางสเปกตรัม (Spectral Capacity) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ (bps/Hz) ก็เพราะสเปกตรัมเป็นแหล่งทรัพยากรที่ถูกจำกัด

มากที่สุด โดยทั่วไปกำลังจะถูกจำกัด โดยเหตุผลทางความปลอดภัยและในเชิงพาณิชย์ อย่างเช่น อายุของแบตเตอรี่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ ความจุทางสเปกตรัมสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{ความจุทางสเปกตรัม (bps/Hz)} = \text{อัตราข้อมูลมากที่สุด (bps)/แบนวิคท์ (Hz)} \quad (2.6)$$

สำหรับระบบ UWB ที่ทำงานในสเปกตรัมของระบบอื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกำลังงานที่ต่ำมากเป็นการชดเชยสำหรับการใช้งานที่มีช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด ตามปกติแล้ว ระบบ UWB จะมีความจุทางสเปกตรัมที่ต่ำเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความจุทางตำแหน่งกันแล้ว ระบบ UWB จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ที่แสดงการเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ

ระบบ	อัตราข้อมูลมากที่สุด (Mbps)	ระยะในการส่ง (m)	ความจุทางตำแหน่ง (kbp/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

2.2.7 ความเร็วของการส่งข้อมูล

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของการส่ง UWB สำหรับการสื่อสารก็คือ อัตราข้อมูลที่สูง การประยุกต์ใช้งานในทางการสื่อสาร UWB มีเป้าหมายความเร็วการส่งข้อมูลอยู่ในช่วง 100Mbps ถึง 500Mbps ซึ่งจะมากกว่าความเร็วการส่งข้อมูลในระบบ Bluetooth 100ถึง500เท่าและประมาณ 50 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของการส่งข้อมูลของมาตรฐาน 802.11b หรือ 10เท่าของมาตรฐาน 802.11a WLAN (Wireless Local area Network)

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าอัตราข้อมูลสำหรับการส่ง UWB ไร้สายภายในอาคารจะอยู่ระหว่าง 110Mbpsและ 480Mbps และเปรียบเทียบกับมาตรฐานแบบ ไร้สายและ ไร้สายในปัจจุบันในความจริงแล้วความเร็วของการส่งจะถูกกำหนดมาตรฐานไว้ที่ 3 ความเร็ว ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบของอัตราบิตของ UWB กับมาตรฐานของระบบไร้สายและไร้สายอื่น

ความเร็ว(Mbps)	มาตรฐาน
480	UWBและUSB 2.0
200	UWB (ระยะที่น้อยที่สุด 4 เมตร)และ 1394a(4.5m)
110	UWB (ระยะที่น้อยที่สุด10 เมตร)
90	อีเทอร์เน็ตความเร็วสูง (Fast Ethernet)
54	802.11a
20	802.11g
11	802.11b
10	อีเทอร์เน็ต
1	Bluetooth

2.2.8 ราคา (Cost)

ข้อดีอย่างหนึ่งของเทคโนโลยี UWB ก็คือเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่ต่ำเนื่องจากระบบ UWB สามารถสร้างชิ้นประกอบที่เป็นแบบดิจิทัลเกือบทั้งหมด โดยมีส่วนประกอบทางด้านความถี่วิทยุ (RF) หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไมโครเวฟที่น้อยที่สุดส่วนประกอบของระบบที่น้อยจะนำไปสู่การลดลงของต้นทุน ภาคส่ง UWB ที่ง่ายที่สุดจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์ วงจรทางเวลา และตัวสายอากาศ

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการอัตราข้อมูลที่สูงกว่า ก็จำเป็นที่จะใช้วงจรทางเวลาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้สามารถเข้าถึงได้หลายรูปแบบจึงจำเป็นต้องเพิ่มในส่วนนี้เข้าไป ซึ่งก็ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นไปด้วย ยิ่งไปกว่านั้นราคาของชิพเซ็คก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของการผลิตอย่างมาก

2.2.9 ขนาด (Size)

ขนาดที่เล็กของภาคส่ง UWB เป็นความต้องการที่จะรวมเข้าไปกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้กันในปัจจุบัน ในกลุ่มทำงานของมาตรฐาน 802.15 บริษัทอิเล็กทรอนิกส์ได้กำหนดเป้าหมายขนาดของวงจรรีเลย์ให้มีขนาดเล็กพอที่จะนำไปบรรจุในตัวเก็บข้อมูลแบบ SD

เหตุผลหลักที่ต้องการให้ภาคส่งและรับของ UWB มีขนาดเล็กเนื่องจากการลดลงของส่วนประกอบแบบพาสซีฟ (passive) อย่างไรก็ตาม ขนาดและรูปร่างของสายอากาศก็เป็นตัวประกอบที่จำเป็นต้องพิจารณาเช่นเดียวกัน

2.2.10 การสูญเสียกำลังงาน (Power Consumption)

ด้วยการออกแบบทางวิศวกรรมที่เหมาะสมทำให้การสูญเสียกำลังงานของ UWB มีค่าที่ต่ำลงที่เดียว ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีใดก็ตาม ต่างก็คาดหวังว่าการสูญเสียกำลังงานที่ลดลงและมีวงจรที่มีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถประมวลผลสัญญาณได้มากขึ้นบนชิพขนาดเล็กที่ใช้แรงดันในการทำงานต่ำ

ในปัจจุบันได้ตั้งเป้าหมายสำหรับการสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB ให้น้อยกว่า 100mW ส่วนตารางที่ (2.4) จะแสดงค่าการสูญเสียกำลังงานของชิพเซตที่มีใช้กันในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.4 การสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB และชิพเซตการสื่อสารแบบเคลื่อนที่แบบต่างๆ

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

2.3 สายอากาศ UWB

การใช้งานจริงในปัจจุบันเทคโนโลยีสัญญาณพัลส์สั้นในระบบ UWB จะถูกพิจารณาเพียงการนำไปประยุกต์ใช้งานในกำลังงานที่ต่ำและระยะที่สั้นเนื่องจากข้อจำกัดของวงจรสร้างพัลส์ (pulse-forming) การสร้างระบบการสื่อสาร UWB ต้องการทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการคำนวณ และการประเมินพารามิเตอร์ของการออกแบบสายอากาศซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสายอากาศโดยจะกำหนดประสิทธิภาพของความถูกต้องแม่นยำในหัวข้อนี้อาจกล่าวถึงสายอากาศ UWB ซึ่งจะถูกรออกแบบสำหรับสัญญาณพัลส์ที่มีระยะเวลาที่สั้นทั้งทางด้านส่งและรับ การออกแบบสายอากาศ UWB ยังคงเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญหลักในความก้าวหน้าของเทคโนโลยี UWB

2.3.1 หลักการของสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการสื่อสารซึ่งใช้ในการรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในหัวข้อนี้อาจกล่าวถึงหลักการพื้นฐานต่างๆของสายอากาศตัวอย่างเช่น ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เบนวิทซ์ของสายอากาศ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ และอัตราการขยายของสายอากาศ

2.3.1.1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน (SWR and reflected power)

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio :SWR) เป็นตัวบ่งบอกว่าการแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีแค่ไหนและเป็นตัวบ่งบอกว่าสัญญาณจะถูกสะท้อนกลับก่อนที่จะแพร่กระจายคลื่น โดยสายอากาศมากแค่ไหน ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อนมีแนวทางในการวัดที่ต่างกันค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่า 2:1 หรือน้อยกว่าจะถูกพิจารณาว่าคืออย่างไรก็ตามสายอากาศในทางการค้าส่วนใหญ่จะถูกกำหนดให้มีอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ 1.5:1 หรือน้อยกว่าในบางแบบวัดที่สมมุติว่าพลังงาน 100 วัตต์ค่าอัตราส่วนนิ่งที่มีค่า 1.5:1 จะมีพลังงานที่สามารถส่งผ่านได้เท่ากับ 96 วัตต์และพลังงานที่ถูกสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ หรือมีพลังงานที่ถูกสะท้อนกลับเท่ากับ 4.2% ของพลังงานที่สามารถส่งผ่านได้

2.3.1.2 แบนวิคท์ของสายอากาศ (Antenna bandwidth)

โดยทั่วไป แบนวิคท์ของสายอากาศจะถูกกำหนดอยู่ในเทอมของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและบ่อยครั้งที่แบนวิคท์จะถูกแสดงอยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์หรือ Fractional Bandwidth (FB) ซึ่ง FB ของสัญญาณเป็นอัตราส่วนของแบนวิคท์กับความถี่กลาง แสดงได้ดังนี้

$$FB = \frac{f_h - f_l}{(f_h + f_l)/2} \times 100\% \quad (2.7)$$

เมื่อ f_h และ f_l เป็นองค์ประกอบของความถี่ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดของสัญญาณ สำหรับสายอากาศ UWB แบนวิคท์ของสายอากาศจะอยู่ในช่วงที่มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 สำหรับช่วงความถี่กว้างจะถูกออกแบบให้ FB มีค่ามากกว่า 25% สำหรับ UWB ต้องถูกออกแบบให้ FB มีค่า 25% ถึง 200%

2.3.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอัตราขยาย (Directivity and gain)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นการอธิบายความสามารถของสายอากาศในทิศทางที่เจาะจงอัตราขยายของสายอากาศมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทางกันอย่างใกล้ชิด สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Gain = \eta \times Directivity \quad (2.8)$$

เมื่อ η เป็นค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเราสามารถเห็นพฤติกรรมของค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เพิ่มขึ้นโดยการเปรียบเทียบแสงของหลอดไฟกับแสงสปอตไลท์ โดยแสงสปอตไลท์ 100 วัตต์ซึ่งสามารถพลุคได้ว่าแสงสปอตไลท์ที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากกว่าแสงของหลอดไฟ สำหรับอัตราขยายของสายอากาศจะถูกอ้างอิงกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศที่ถูกอ้างอิงคือสายอากาศไอโซทรอปิกและสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นรีโซแนนซ์ โดยสายอากาศไอโซทรอปิกจะมีการแพร่กระจาย

คลื่นทุกทิศทางเท่ากันหมด สายอากาศไอโซทรอปิกเป็นสายอากาศในทางอุดมคติซึ่งไม่มีอยู่จริง แต่มีประโยชน์ในการนำมาเปรียบเทียบหรืออ้างอิงกับสายอากาศที่มีอยู่จริง สมมติว่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 2 หรือ 3 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิกจะสามารถเขียนได้เป็น 3 dBi สำหรับสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นแร่โซแนลซ์มีประโยชน์สำหรับนำมาเปรียบเทียบกับสายอื่นๆ ที่มีความถี่เดียวหรือมีแถบของความถี่ที่แคบมากๆ สมมติว่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลจะสามารถเขียนได้เป็น 0 dB

2.3.1.4 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Impedance, Z_0)

วิธีการป้อนสัญญาณแบบเส้น ไมโครสตริป มีสมการในการออกแบบซึ่งจะต้องให้มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ ตามที่ต้องการ สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

เมื่อหาค่า W และ H จาก

$$W = w + \frac{t}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{t} \right) + 1 \right] \quad (2.9)$$

$$H = h - 2t \quad (2.10)$$

เมื่อ $\frac{W}{H} \leq 1$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}}} + 0.4 \left(1 - \frac{W}{H} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8H}{W} + \frac{W}{4H} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ $\frac{W}{H} \geq 1$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}}} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left\{ \frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{H} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2.14)$$

2.3.2 ปัญหาในการออกแบบสายอากาศ UWB

ในระบบ UWB สายอากาศที่เป็นตัวกรองการจัดการรูปพัลส์ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในโดเมนเชิงความถี่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปพัลส์ที่ส่งไป ดังนั้นจึงทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนของการตรวจจับเชิงกลที่เครื่องรับ สายอากาศ UWB ต้องการจุดศูนย์กลางเฟสและอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่คงที่ครอบคลุมแบนด์วิดท์ทั้งหมดที่ปฏิบัติการ การเปลี่ยน ในจุดศูนย์กลางเฟสอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพัลส์ที่ส่งไป และสมรรถนะที่ต่ำลงของเครื่องรับ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ UWB คือหนึ่งในความท้าทายสำหรับระบบ UWB โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องมีราคาถูก โครงสร้างกะทัดรัดและประสิทธิภาพสูงจะเป็นที่ต้องการสำหรับผู้ใช้โดยทั่วไปในเรื่องเกี่ยวกับการสื่อสาร

สายอากาศดั้งเดิมจะถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้ในช่วงความถี่แคบๆ ของความถี่ที่ถูกใช้งานในระบบช่วงความถี่แคบดั้งเดิมเท่านั้นและสายอากาศเรโซแนนซ์ไม่เหมาะสำหรับระบบ UWB เนื่องจากมันสามารถแพร่กระจายคลื่นกระจายคลื่นรูปไซน์ที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ในด้านอื่นๆ การทำสายอากาศไม่เรโซแนนซ์ให้มีประสิทธิภาพนั้นไม่่ง่ายเลย วิธีการหนึ่งคือการทำสายอากาศ UWB ให้มีความถี่การเรโซแนนซ์ของสายอากาศที่เหนือกว่าแถบความถี่ UWB อย่างไรก็ตามขนาดที่ลดลงของสายอากาศจะทำให้สายอากาศสูญเสียความมีประสิทธิภาพไปอีกวิธีการหนึ่งคือ การสร้างสายอากาศโดยให้มีตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ที่ต่ำลงซึ่งจะทำให้ช่วงความถี่กว้างขึ้นแต่ประสิทธิภาพจะลดลง

2.4 สายอากาศไมโครสตริป

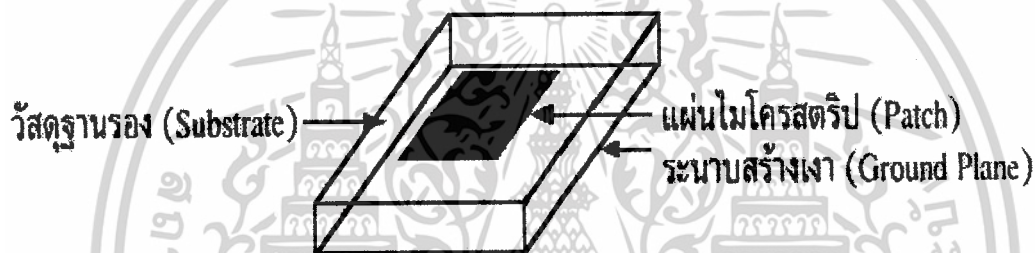
สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับการพัฒนาออกแบบให้มีโครงสร้างที่ง่าย สะดวกในการสร้าง และการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งสายอากาศซึ่งสายอากาศไมโครสตริปสร้างขึ้นมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ ชนิด 2 หน้า ด้านบนทำหน้าที่เป็นระนาบแผ่พลังงานซึ่งสามารถออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นรูปเรขาคณิตต่างๆ ได้ ส่วนแผ่นตัวนำอีกด้านหนึ่งเรียกว่าระนาบสร้างเงา ระหว่างระนาบทั้งสองจะมีวัสดุฉนวนรองที่ทำจากสาร ไดอิเล็กตริก และสายอากาศไมโครสตริปนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบยานอวกาศ รถยนต์ พาหนะต่างๆ ได้ดี รวมทั้งยังเหมาะกับงานทางด้านวงจรรวมทางไมโครเวฟและสามารถพัฒนาเป็นสายอากาศแถวลำดับได้เช่นกัน

แนวความคิดในการใช้สายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็กได้เผยแพร่เป็นครั้งแรก เมื่อ ปี ค.ศ. 1953 โดยชาวอเมริกันชื่อนายเดสแชมพ์ (Deschamp) โดยเสนอหลักการแพร่กระจายคลื่นของแผ่นไมโครสตริป ซึ่งในช่วงนั้นนิยมใช้ไมโครสตริปในการทำสายส่งอย่างเดียว ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 นายโฮเวลล์ (Howell) และนายมันสัน (Munson) จึงได้สร้างสายอากาศไมโครสตริปขึ้นมาในรูปแบบของทฤษฎีที่ดีขึ้น และมีเทคนิคในการทำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ทองแดงและวัสดุ ไดอิเล็กตริกที่ดีกว่าเดิมคือมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) หลายค่าและมีค่าความสูญเสียต่ำ และหลังจากนั้นเป็นต้นมาได้มี

การวิจัยและพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปอย่างกว้างขวาง ซึ่งนำไปสู่การนำสายอากาศไมโครสตริปไปประยุกต์ใช้งานกันแพร่หลายยิ่งขึ้นและยังคงมีจำนวนมากอยู่ต่อไปในอนาคต

2.5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไปสร้างขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit) ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยแผ่นโลหะตัวนำอยู่ 2 แผ่นวางขนานกันอยู่ โดยมีแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนจะทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นเรียกว่า แผ่นไมโครสตริป (Patch) โดยทั่วไปมักเป็นแผ่นทองแดง ส่วนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างมีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำทั้งแผ่น ซึ่งในอุดมคติจะต้องใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นมากเรียกว่า ระนาบสร้างเงา (Ground Plane) และถูกกันไว้ด้วยสารตัวกลางที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งมีความบางมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเรียกว่า วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) ส่วนประกอบของสายอากาศไมโครสตริปมีดังนี้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าเราสามารถสร้างสายอากาศไมโครสตริปจากแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้า โดยด้านบนใช้กรัดกัดแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปต่างๆ และวงจรป้อนสัญญาณได้ตามต้องการและตัวนำด้านล่างใช้เป็นระนาบสร้างเงา

2.5.1 แผ่นแผ่พลังงานหรือไมโครสตริป

แผ่นแผ่พลังงานหรือไมโครสตริป เป็นแผ่นโลหะบางๆ ทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นและสามารถออกแบบให้มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปได้หลายรูปแบบ จะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานหรือจุดประสงค์ของการสร้าง เช่น รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม รูปวงกลม เป็นต้น ในปริยญาณพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น

2.5.2 วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก

วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก เป็นสารที่คั่นระหว่างไมโครสตริปกับระนาบสร้างเงามีขนาดบางมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่ใช้งานในวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (λ_0) โดยทั่วไปความหนาวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกจะอยู่ช่วง $0.003\lambda_0 - 0.005\lambda_0$

2.5.3 ระนาบสร้างเงา

ระนาบสร้างเงา เป็นแผ่นนำไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นระนาบสร้างเงาให้กับแผ่นไมโครสตริป ซึ่งในทางอุดมคตินั้นจะมีขนาดใหญ่มากเป็นอนันต์

2.6 รูปแบบของไมโครสตริป

รูปร่างของแผ่นไมโครสตริปมีอยู่มากมายหลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปทรงเรขาคณิต ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า ห้าเหลี่ยม สามเหลี่ยม วงกลม วงรี วงแหวนและรูปครึ่งวงกลม โดยแต่ละแบบมีข้อดีแตกต่างกันไปในด้านอัตราขยาย (Gain) ความกว้างแถบ (Bandwidth) และการเดินทางของคลื่น (Polarization)



รูปที่ 2.9 สายอากาศไมโครสตริปที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต

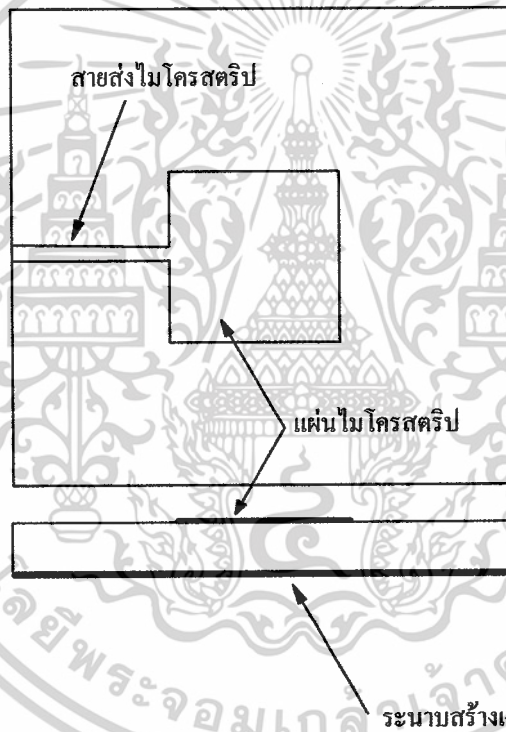
2.7 รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริป จะมีองค์ประกอบการทำงานอยู่ที่ด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก และอีกด้านหนึ่งนั้นจะเป็นระนาบสร้างเงา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถป้อนได้หลายวิธีแต่มี 4 วิธีที่ใช้กันทั่วไป คือ

2.7.1 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป (Micro strip Transmission Line Feed)

การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปเป็นการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป การป้อนสัญญาณแบบนี้เป็นแบบที่สร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย โดยทำการป้อนสัญญาณเข้าไปยังขอบของแผ่นแผ่นพลังงาน สายส่งไมโครสตริปที่ใช้ป้อนสัญญาณ ทำจากแผ่นนำไฟฟ้าเดียวกันกับแผ่นไมโครสตริป สามารถสร้างไปพร้อมๆกันกับขั้นตอนการสร้างแผ่นไมโครสตริปได้ สายส่งไมโครสตริปจะมีความกว้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นไมโครสตริป การป้อนสัญญาณแบบนี้จะทำให้การสร้างและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) ได้ง่าย โดยการควบคุมการวางตำแหน่งของการป้อนสัญญาณ อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกิดคลื่นผิว (Surface Wave) และการแผ่พลังงานปลอมเทียม (Spurious Radiation) เพิ่มขึ้น ซึ่งการออกแบบในทางปฏิบัติจะจำกัดความกว้างปลอมแถบ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 2-3

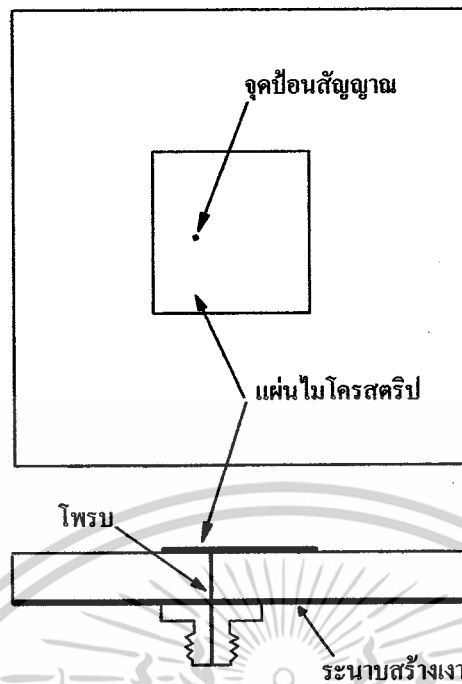
เนื่องจากการป้อนสัญญาณแบบนี้สามารถสร้างพร้อมกับแผ่นไมโครสตริปจึงทำให้ได้รับความนิยมนจนถึงการสูญเสียต่อความยาวคลื่นสั้น



รูปที่ 2.10 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป

2.7.2 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วม (Coaxial Feed)

การป้อนสัญญาณโดยสายส่งแกนร่วมเป็นการป้อนสัญญาณโดยใช้สายโคแอกเซียล (Coaxial) หรือหัวต่อ (Connector) สอดทะลุจากด้านหลังมายังแผ่นไมโครสตริป หรือบางครั้งเรียกว่าการป้อนสัญญาณผ่านโพรบ (Probe Feed)

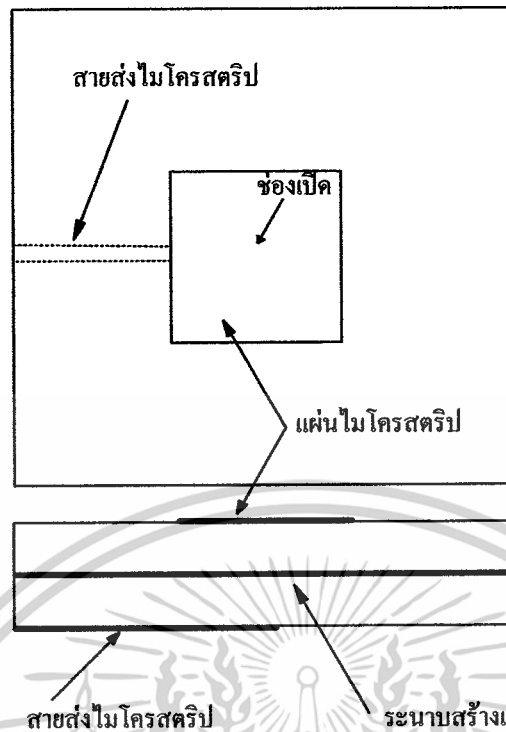


รูปที่ 2.11 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วม

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศนั้นจะใช้ตัวนำภายในของสายส่งแกนร่วมต่อกับแผ่นไมโครสตริป และตัวนำภายนอกของสายส่งแกนร่วมต่อกับระนาบสร้างเงา (Ground Plane) การป้อนสัญญาณแบบนี้มีการสร้างและการแมตช์อิมพีแดนซ์ได้ง่ายโดยการเลือกตำแหน่งของการป้อนสัญญาณที่เหมาะสม แต่ยังมีข้อเสียอยู่ที่การวิเคราะห์ทำได้ยากในกรณีที่ความหนาของวัสดุฐานรอง (Substrate) มาก ($h > 0.02\lambda_0$)

2.7.3 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด (Aperture Coupling Feed)

การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิดเป็นการป้อนสัญญาณที่ไม่ต้องสัมผัสกับแผ่นไมโครสตริป โดยใช้ช่องเปิดเป็นตัวเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีแผ่นไมโครสตริปอยู่ด้านบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกและมีระนาบสร้างเงาอยู่ด้านล่าง และที่ระนาบสร้างเงาจะมีช่องเปิด (Slot) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ด้วยทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างแผ่นไมโครสตริปกับสายส่งไมโครสตริป ช่องเปิดดังกล่าวนี้จะวางตัวอยู่ที่กึ่งกลางของแผ่นไมโครสตริป ส่วนสายส่งไมโครสตริปจะอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองอีกอันหนึ่งซึ่งจะไม่มีระนาบสร้างเงา ส่วนขนาดของช่องเปิดนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าแผ่นไมโครสตริปเพื่อไม่ให้ช่องเปิดเลื่อนไปเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่ต้องการ

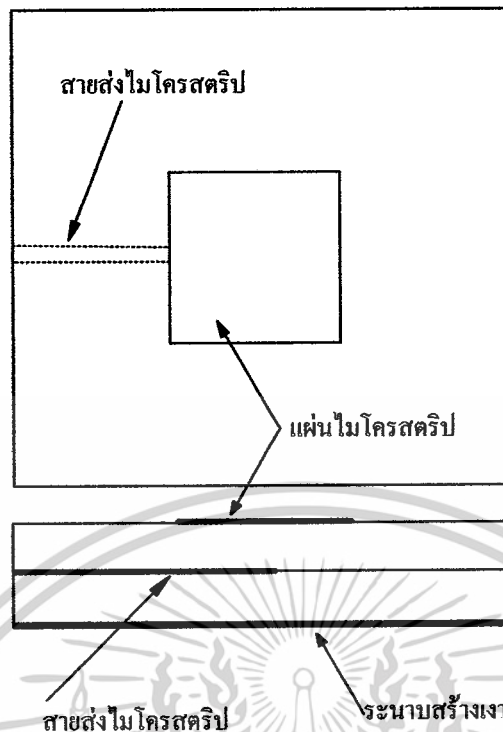


รูปที่ 2.12 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด

การป้อนสัญญาณแบบนี้จะแบ่งวงจรป้อนสัญญาณให้อยู่กับวัสดุฐานรองแผ่นล่างซึ่งทำให้ไม่มีการรบกวนรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและยังทำให้มีพื้นที่ที่มากขึ้นในการออกแบบวงจรการป้อนสัญญาณสำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองแผ่นล่างจะมีค่าสูงและความหนาที่น้อย ส่วนแผ่นไมโครสตริปนั้นจะอยู่กับวัสดุฐานรองส่วนบนซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำและมีความหนาที่มาก ซึ่งการวิเคราะห์และจัดสร้างจะทำได้ยากกว่าการป้อนสัญญาณอื่น

2.7.4 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริป (Proximity Coupling Feed)

การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริปเป็นการป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปวางระหว่างวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกสองตัวโดยวัสดุฐานรองส่วนบนมีแผ่นไมโครสตริปติดอยู่และมีระนาบสร้างเงาอยู่ด้านล่าง การป้อนสัญญาณแบบนี้มีข้อดีที่ทำให้ความกว้างมากขึ้นซึ่งการป้อนสัญญาณแบบนี้โดยทั่วไปจะมีความกว้างแถบสูงถึงประมาณร้อยละ 13 อย่างไรก็ตามการสร้างการป้อนสัญญาณแบบนี้ทำได้โดยการปรับความยาวของสายท่อนสั้น (Stub) ของการป้อนและอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแผ่นไมโครสตริป



รูปที่ 2.13 การป้องกันสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริป

เมื่อใช้สายส่งไมโครสตริปเป็นตัวป้องกันสัญญาณ ซึ่งวิธีการป้องกันสัญญาณในลักษณะนี้สายส่งไมโครสตริปจะอยู่บนพื้นผิวตัวนำเดียวกันกับแผ่นไมโครสตริปและต่อสัมผัสกันโดยตรงในด้านใดด้านหนึ่งซึ่งไม่ควรต่อโดยตรงกับแผ่นไมโครสตริป ถ้าสายส่งไมโครสตริปอยู่บนพื้นผิวตัวนำเดียวกันกับแผ่นไมโครสตริปก็ควรนำสายส่งไปไว้ใกล้แผ่นไมโครสตริป ทำให้เป็นช่องว่างเล็กๆระหว่างปลายทางของสายส่งไมโครสตริปกับแผ่นไมโครสตริป ความจุไฟฟ้าของช่องว่างอากาศทำหน้าที่เชื่อมต่อกับสายอากาศโดยทั่วไปแล้วการเชื่อมต่อจะน้อยและให้ผลไม่ต่างอะไรกับการต่อเข้าสัมผัสกันโดยตรง

2.8 สายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีการป้องกันสัญญาณด้วยสายส่งแกนร่วม

สายอากาศแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่ายเพราะมีลักษณะของแผ่นไมโครสตริปเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ และการสร้างซึ่งตัวสำหรับออกแบบสายอากาศแบบนี้สิ่งที่เราต้องการคือ เราจะต้องคำนวณหาความกว้าง (w) ความยาว (l) ของแผ่นไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้เลือกสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกและความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์และคุณลักษณะอื่นๆของสายอากาศที่เราต้องการ นอกจากนั้นยังต้องการทราบถึงตำแหน่งจุดป้องกันสัญญาณเพื่อทำให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเราได้ออกแบบไว้เท่ากับ 50 โอห์ม เพื่อให้สายอากาศอิมพีแดนซ์แมตช์กับอิมพีแดนซ์สายส่งและเครื่องกำเนิดสัญญาณมากที่สุด

2.8.1 สภาพยอมประสิทธิผล (Effective Permittivity)

การนำแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้ามาทำสายอากาศไมโครสตริปนั้นต้องทำการตัดแผ่นวงจรพิมพ์ให้ได้ตามขนาดตามที่ทำการออกแบบไว้ทำให้สภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเปลี่ยนแปลงตามโครงสร้างไปเป็นสภาพยอมประสิทธิผล (ϵ_r) โดยที่สภาพยอมประสิทธิผลสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\epsilon_r(w) = 0.5 \left[(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1) \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-0.5} \right] \quad (2.15)$$

$$\epsilon_r(l) = 0.5 \left[(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1) \left(1 + \frac{10h}{l} \right)^{-0.5} \right] \quad (2.16)$$

2.8.2 สภาพยอมพลวัต (Dynamic Permittivity)

สภาพยอมพลวัต เกิดขึ้นเมื่อสายอากาศทำงานที่ความถี่สูงจะทำให้สภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) เปลี่ยนแปลงการกระจายตามความถี่ (Dispersion) เมื่อพิจารณาให้สายอากาศที่โหมดใดๆ TM_{mno} จะได้

$$\epsilon_{dyn} = \frac{C_{dyn}(\epsilon_0 \epsilon_r)}{C_{dyn}(\epsilon_0)} \quad (2.17)$$

โดยที่ $C_{dyn}(\epsilon_0 \epsilon_r)$ และ $C_{dyn}(\epsilon_0)$ เป็นความจุพลวัตรวม (Total Dynamic Capacitance) ของแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริกและบนอวกาศว่าง ตามลำดับ ซึ่งความจุพลวัตรวมที่โหมด TM_{mno} คือ

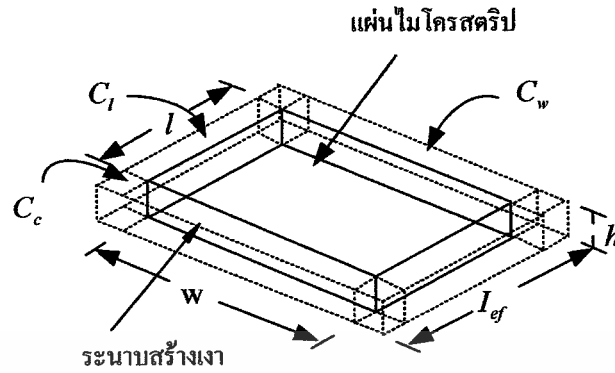
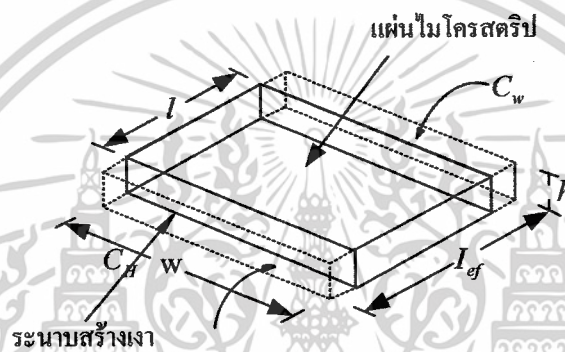
$$C_{dyn}(\epsilon_0)(\epsilon_0 \epsilon_r) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{h \gamma \delta} + 2(C_l + C_w) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\gamma = \begin{cases} 1 & ; m = 0 \\ 2 & ; m \neq 0 \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & ; n = 0 \\ 2 & ; n \neq 0 \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) โหมด TM_{mn0} (ข) โหมด TM_{010}

รูปที่ 2.14 ความจุพลวัตหลักและความจุบริเวณขอบของแผ่นไมโครสตริป

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{h \gamma \delta}$$

คือความจุพลวัตหลักของแผ่นไมโครสตริป

$$C_l \text{ กับ } C_w$$

คือความจุบริเวณของขอบแผ่นไมโครสตริปที่ด้าน l และ w ตามลำดับคือ

$$C_l = \frac{1}{2\delta} \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{ef}(w)}}{3 \times 10^8 Z_0(w)} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w}{h} \right) l \quad (2.19)$$

$$C_w = \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{ef}(l)}}{3 \times 10^8 Z_0(l)} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \gamma w}{h} \right) w \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $Z_0(w)$ คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของแผ่นไมโครสตริปนี้ ซึ่งสามารถหาได้จากแบบจำลองสายส่ง สำหรับกรณีที่มี $w/h > 1$

$\epsilon_{ef}(w)$ คือสภาพยอมประสิทธิผลตามโครงสร้างของสายอากาศ

ซึ่ง $Z_0(w)$ $\epsilon_{ef}(w)$ จะได้จากการแทนความกว้าง (w) ด้วยความยาว (l) เข้าไปในสมการทั้งสองและ $C_{dyn}(\epsilon_0)$ จะสามารถหาได้โดยการแทน $\epsilon_r=1$ ในสมการที่ (2.12) จะได้

$$C_{dyn}(\epsilon_0) = \frac{\epsilon_0 w l}{h y \delta} + 2(C_l + C_w) \quad (2.21)$$

ซึ่งสำหรับกรณีสายอากาศที่ใหม่จะสามารถคำนวณความจุพลวัตรวมทั้งสองได้ดังนี้

$$C_{dyn}(\epsilon_0 \epsilon_r) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{2h} + 2(C_w) \quad (2.22)$$

$$C_{dyn}(\epsilon_0) = \frac{\epsilon_0 w l}{2h} + 2(C_w) \quad (2.23)$$

2.8.3 ความยาวประสิทธิผล (Effective Length)

สามารถทำการวิเคราะห์หาความยาวประสิทธิผลจากสภาพยอมพลวัต เมื่อกำหนดให้สายอากาศทำงานที่โหมด TM_{010} ได้ดังนี้ ขั้นแรกจะทำการกำหนดให้ความจุพลวัตหลักของแผ่นไมโครสตริปเป็นความจุพลวัตที่ได้อรวมผลของความยาวประสิทธิผลเข้าไปแล้วด้วย โดยไม่รวมกับความจุพลวัตบริเวณขอบ C_l กับ C_w อีกจะได้

$$C_{dyn}(\epsilon_0 \epsilon_r) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l_{ef}}{2h} \quad (2.24)$$

เมื่อนำความจุพลวัตรวมจากสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.18) มาเปรียบเทียบกับกันและพิจารณาที่โหมด TM_{010} จึงทำให้มีความจุพลวัตบริเวณขอบ C_w จะได้

$$\begin{aligned} C_{dyn}(\epsilon_0 \epsilon_r) &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l_{ef}}{2h} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{2h} + 2(C_w) \\ &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l_{ef}}{2h} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{2h} + \left(\frac{w \sqrt{\epsilon_{ef}(l)}}{3 \times 10^8 Z_0(l)} - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 w l}{h} \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.19) จะเห็นได้ว่าความยาวประสิทธิผล (l_{ef}) ในรูปแบบที่คำนึงถึงความจุลวัต บริเวณขอบ (C_w) ของแผ่นไมโครสตริปที่โหมด TM_{010} คือ

$$l_{ef} = \frac{2h\sqrt{\epsilon_{ef}(l)}}{3 \times 10^8 \epsilon_0 \epsilon_r Z_0(l)} - l \quad (2.26)$$

2.8.4 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency)

ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ คือ ความถี่ที่ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศนี้จะไม่มีส่วนของรีแอกแตนซ์ ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเป็นคุณลักษณะที่สำคัญตัวหนึ่ง ซึ่งสายอากาศแบบไมโครสตริป โดยทั่วไปจะมีความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกจะน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น และความหนาของแผ่นไมโครสตริปน้อยมาก ดังนั้นเมื่อป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศตรงแผ่นไมโครสตริปด้วยโพรบแล้วสวนามไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบในแนวแกน z และเป็นไปตามสมการคลื่น

$$(\nabla^2 + k^2)E_z = 0 \quad (2.27)$$

ซึ่ง

$$k_{mn}^2 = \omega^2 \epsilon \mu = k_m^2 + k_n^2 = \left(\frac{m\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \quad (2.28)$$

$$f_{r(mn)} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_{ef}}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \quad (2.29)$$

สำหรับสายอากาศแบบไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงในรูปที่ 2.8 ที่โหมด TM_{010} ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริปนี้จะเป็นฟังก์ชันของความยาว (l) ของแผ่นสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งจะได้ความถี่เรโซแนนซ์

$$f_{r(01)} = \frac{15}{l_{ef}\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (2.30)$$

เมื่อแทน ϵ_{dyn} และ l_{dyn} ลงไปในตารางสมการความถี่เรโซแนนซ์จะได้

$$f_{r(01)} = \frac{15}{l_{ef}\sqrt{\epsilon_{dyn}}} \quad (2.31)$$

2.8.5. ตัวประกอบคุณภาพรวม (Total Quality)

หากไม่พิจารณาถึงการสูญเสียของคลื่นผิว การสูญเสียหลักภายในแผ่นสายอากาศไมโครสตริปของทองแดง วัสดุฐาน ไดอิเล็กตริกและการแผ่และการแผ่พลังงานของสายอากาศ ดังนั้นการสูญเสียเหล่านี้สามารถแสดงในรูปของตัวประกอบคุณภาพรวม Q_1 ซึ่ง

$$Q_1 = \left(\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r} \right)^{-1} \quad (2.32)$$

โดยที่ $Q_c = h\sqrt{\pi f\mu\delta} \quad (2.33)$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.34)$$

$$Q_r = \frac{c\sqrt{\epsilon_{ef}(w)}}{4f_r h} \quad (2.35)$$

เมื่อ	Q_c	คือตัวประกอบคุณภาพของการสูญเสียของทองแดง
	Q_d	คือตัวประกอบคุณภาพของการสูญเสียของไดอิเล็กตริก
	Q_r	คือตัวประกอบคุณภาพของการแผ่พลังงาน
	σ	คือสภาพนำ (Conductivity) ของตัวนำไฟฟ้าที่เป็นแผ่น ไมโครสตริป
	$\tan \delta$	คือแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก

2.8.6 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ คือ อิมพีแดนซ์ที่ได้แสดงโดยสายอากาศที่ขั้วต่อสายอากาศที่ขั้วต่อสายอากาศหรืออัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วของสายอากาศนั้นต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วของสายอากาศหรืออัตราส่วนของสายอากาศหรืออัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ

โดยทั่วไปแล้วอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง ได้แก่ ความถี่ใช้งาน รูปร่างหรือโครงสร้างของสายอากาศ วิธีป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่อยู่ใกล้ชิดกับสายอากาศ เนื่องจากโครงสร้างที่มีความซับซ้อนของสายอากาศ และการอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแกนร่วม สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_{in} = Z + jX_i \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Z_a คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป เมื่อยังไม่ได้ต่อโพรบป้อนสัญญาณ ซึ่งหาได้หลังจากทำการคัลแปลง และทำการเขียนแบบจะได้

$$Z_a = \frac{4 \times 10^5 j \pi f_r h \cos^2 \left(\frac{\pi y_0}{l_f} \right)}{8.85 w l_f \epsilon_{dyn} \left((2\pi f)^2 \left(1 + \frac{j}{Q_l} \right) - (2\pi f)^2 \right)} \quad (2.37)$$

เมื่อ y_0 คือ ระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณจากขอบของสายอากาศ

f_r คือ ความถี่ที่ต้องการให้สายอากาศทำงาน

X_l คือ ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของสภาพการเหนี่ยวนำของโพรบที่ใช้ป้อนสัญญาณให้กับแผ่นไมโครสตริป ซึ่งรีแอกแตนซ์สภาพการเหนี่ยวนำของโพรบ จะหาได้จาก

$$X_l = \frac{377 f h_d}{c_0} \ln \left(\frac{c_0}{\pi f d \sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (เมตร)

h_d คือ ความยาวของโพรบที่ใช้ป้อนสัญญาณให้กับแผ่นไมโครสตริป ซึ่งประมาณเท่ากับความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (เมตร)

c_0 คือ ความเร็วแสงในอากาศ ($c_0 \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

2.8.7 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนด) คือ อัตราส่วนของความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดจากสายอากาศต่อความเข้มการแผ่พลังงานเฉลี่ยทุกทิศทาง ซึ่งความเข้มการแผ่พลังงานเฉลี่ยจะเท่ากับกำลังงานรวมที่ได้แผ่ออกจากสายอากาศหารด้วย 4π และถ้าทิศทางไม่ได้ถูกกำหนดไว้ก็จะหมายถึงทิศทางที่มีความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุด

$$D = \frac{U}{U_n} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.39)$$

$$D_{\max} = D_u = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

 D คือ สภาพเจาะจงทิศทาง (ไม่มีหน่วย) D_0 คือ สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย) U คือ ความเข้มการแผ่พลังงาน (วัตต์/หน่วยมุมตัน) U_{\max} คือ ความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุด (วัตต์/หน่วยมุมตัน) U_0 คือ ความเข้มการแผ่พลังงานของกำเนิดแบบไอโซทรอปิก (วัตต์/หน่วยมุมตัน) P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกทั้งหมด (วัตต์)

$$D = \frac{\frac{1}{2} \text{Re}(E_\theta H_\phi^* - E_\phi H_\theta^*)}{P_{\text{rad}} / 4\pi r^2} \quad (2.41)$$

$$D = \frac{4w^2 \pi^2}{h\lambda_0^2} \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$I_t = \int_0^\pi \sin^2 \left(\frac{k_0 w \cos \theta}{2} \right) \tan^2 \theta \sin^2 \theta d\theta$$

2.8.8 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นตัวบอกประสิทธิภาพของกำลังงานที่แพร่กระจายออกต่อกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความต้านทานสมมูลของสายอากาศได้ดังนี้

$$\eta = \frac{R_r}{R_c + R_d + R_r} \quad (2.43)$$

โดยที่

$$R_c = 2.7 \times 10^{-4} \sqrt{f} \frac{l_{ef} Q_r^2}{w} \quad (2.44)$$

$$R_d = \frac{30 \tan \delta \lambda_d Q_r^2}{\epsilon_{dyn} w l_{ef}} \quad (2.45)$$

$$R_r = \frac{10^{-7} Q_r}{\pi f \epsilon_{dyn} \epsilon_0 w l_{ef}} \left[\cos^2 \left(\frac{\pi y_0}{l} \right) \right] \quad (2.46)$$

เมื่อ R_c คือ ความต้านทานสมมูลของการสูญเสียทองแดง (Copper Loss Equivalent Resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_d คือ ความต้านทานสมมูลของการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss Equivalent Resistance)

R_r คือ ความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation Resistance)

2.8.9 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนด) คืออัตราส่วนของความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดต่อความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดต่อความเข้มการแผ่พลังงานที่ควรจะได้ถ้ากำลังงานที่ได้รับโดยสายอากาศนี้ถูกแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก

ความเข้มการแผ่พลังงานจะสัมพันธ์กับกำลังงานที่แพร่กระจายแบบไอโซทรอปิกเท่ากับกำลังงานที่ได้รับโดยสายอากาศหารด้วย 4π

หากทิศทางไม่ได้ถูกกำหนดไว้ก็จะหมายถึงทิศทางที่มีความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุดถ้าสายอากาศนี้ปราศจากการสูญเสีย อัตราขยายของสายอากาศนี้จะเท่ากับสภาพเจาะจงทิศทางในทุกๆ ทิศทาง

$$G = \eta D \quad (2.47)$$

เพราะฉะนั้น สำหรับสายอากาศแบบไมโครดริปรูบี่สี่เหลี่ยมผืนผ้า เสมือนเป็นร่องแผ่พลังงานสองร่อง ดังนั้นสภาพเจาะจงทิศทางจะได้โดยการคูณตัวประกอบแถวลำดับแบบสององค์ประกอบเข้าไป ดังนั้นอัตราขยายเป็น

$$G = \eta \frac{8\omega^2 \pi^2}{h\lambda_0^2} \quad (2.48)$$

2.8.10 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายเป็นรูปซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปในทิศทาง และขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลาสำหรับโพลาริเดชันของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศส่ง หรือถ้าเป็นสายอากาศทางด้วนรับจะมีโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นมาแทน ในทิศทางที่สายอากาศมีอัตราการขยายมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่แตกต่างกัน ก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย

ในการแบ่งชนิดของโพลาริเซชันอาจแบ่งตามลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นแบบ

1. โพลาริเดชันแบบเชิงแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศเป็นเส้นตรงเสมอเช่น โพลาริเดชันแบบเวอร์ติคัล (Vertical) และฮอริซฮอนทอล (Horizontal)

2. โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization) มีแวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศหมุนเป็นรูปวงกลม
3. โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) มีแวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศหมุนเป็นรูปแบบวงรี

2.8.11 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังทั้งสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 w_{rad} \quad (2.49)$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (w/หน่วยมุมตัน)

w_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (w/m²)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} \times \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.50)$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานที่ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยการอินทิเกรต ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตาม(2.41) และ (2.42) ตลอดมุมตัน

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.51)$$

สรุป

ในบทนี้จะทำการแบ่งทฤษฎีเป็น 2 ส่วนย่อยส่วนแรกเป็นการอธิบายเกี่ยวกับเทคโนโลยี (UWB) ส่วนที่สองเป็นการอธิบายรูปแบบและโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป โดยส่วนแรกได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของ UWB โดยจะเริ่มที่ประวัติความเป็นมาและถัดมาได้กล่าวถึงระบบและสัญญาณ UWB ซึ่งกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของ UWB ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานรวมทั้งลักษณะรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ทำให้เกิดเป็นระบบ UWB และคุณสมบัติอื่นๆที่ทำให้ระบบ UWB ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

การสื่อสาร UWB นั้นได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง เมื่อประมาณ ปี ค.ศ. 2000 แต่ในความเป็นจริงแล้วต้นกำเนิดของ UWB มีมาตั้งแต่เมื่อกว่าร้อยปีมาแล้ว โดยปลาย คริสศตวรรษที่ 18 วิธีที่ง่ายที่สุดสำหรับการสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือการสร้างพัลส์สั้นๆ (short pulse) ขึ้นมาโดยการใช้แหล่งกำเนิดแบบ Spark-gap ในช่วงแรกๆการศึกษา UWB ไม่ค่อยมีความก้าวหน้ามากนัก แต่การสื่อสารแบบ UWB เริ่มได้รับความสนใจอีกครั้งในช่วงปี 1970-1973 เนื่องจากมีการยอมรับกันว่า สัญญาณแบบพัลส์ที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างนั้น ไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แคบและไม่ได้แทรกสอดสัญญาณช่วงความถี่แคบเหล่านั้นด้วย จนปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการสื่อสาร UWB ได้มีจำนวนมากขึ้นซึ่งมีหัวข้อที่ทำการวิจัยที่แตกต่างกันออกไป รวมทั้งงานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นกันเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คุณสมบัติพื้นฐานของระบบและสัญญาณ UWB อย่างแรกที่ได้พูดถึงจะเป็นรูปร่างพื้นฐานของสัญญาณพัลส์ในระบบ UWB ในโดเมนทางเวลาและสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์ด้วย โดยทั่วไปแล้วสัญญาณพัลส์ที่สั้นมากๆซึ่งเวลาของสัญญาณขึ้นและลงอย่างรวดเร็วจะมีสเปกตรัมกว้างและมีพลังงานที่ต่ำมากนอกจากนี้ภาคส่งและภาครับของ UWB ไม่ต้องการส่วนประกอบที่ใหญ่และมีราคาแพงทำให้สามารถลดต้นทุน ขนาด น้ำหนักและการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบ UWB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบ โดยทั่วไป

ส่วนที่สองเป็นการอธิบายถึงสมการและองค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศโดยสายอากาศไมโครสตริปเป็นที่นิยมในการออกแบบเนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และสามารถปรับแต่งให้เข้ากับรูปแบบการติดตั้งเช่น การติดตั้งโค้ง เป็นต้น โดยส่วนแรกจะอธิบายถึงลักษณะโครงสร้างรูปแบบ การป้อนสัญญาณรูปแบบต่างๆ ส่วนที่สองจะเป็นคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศโดยทั่วไป เช่น อิมพีแดนซ์ การโพลาไรซ์ สภาพเจาะจงทิศทาง ค่าประสิทธิภาพ เป็นต้น

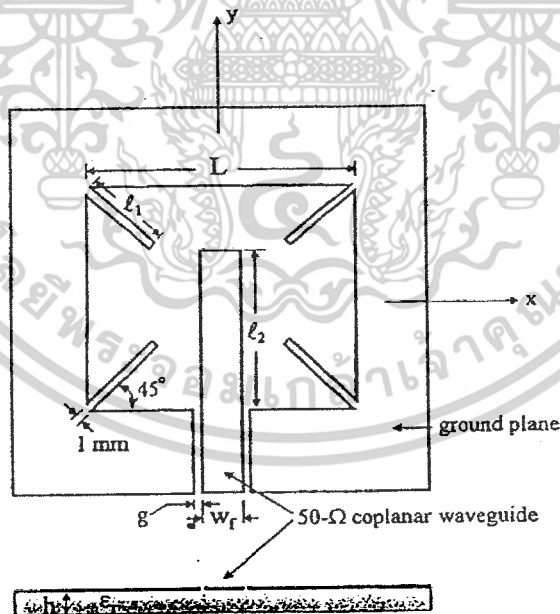
บทที่ 3

การออกแบบและจำลองการทำงานสายอากาศ

ในการออกแบบและการจำลองสายอากาศคณะผู้จัดทำขอเสนอการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและคำนวณการสร้างสายอากาศไมโครสตริป ของนักวิจัยชาวไต้หวันที่ได้วิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มช่วงความถี่ ความถี่ด้วยการใช้ช่องเปิด งานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 ถึงปี ค.ศ. 2006 ที่นำมาเป็นแนวทางในการศึกษา และออกแบบเพื่อสร้างสายอากาศที่มีการรองรับการใช้งานในช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด

กลุ่มแรกเป็นกลุ่มวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป คือนักวิจัยชาว Taiwan คือ J. Y. Chiou, J.Y.Sze และ K.L. Wong ในปี ค.ศ. 2003 งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมที่มีร่องจตุรัสแบบแถบความถี่กว้างที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม และใช้สตริปเป็นโหลด ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ ได้แก่ ความถี่ของสายนำสัญญาณ ระยะห่างของช่องว่าง ระหว่างสายป้อนสัญญาณและระยะนาบกรวดซ์ของระนาบร่วม เป็นการกระตุ้นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างช่องว่างเพื่อให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) และปรับค่าแบนด์วิดท์ มีการใช้สตริปเป็นโหลดต่อภายในมุมทั้งสี่ของสายอากาศเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นแสดงดังรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้สตริปเป็นโหลดแบบแถบความถี่กว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

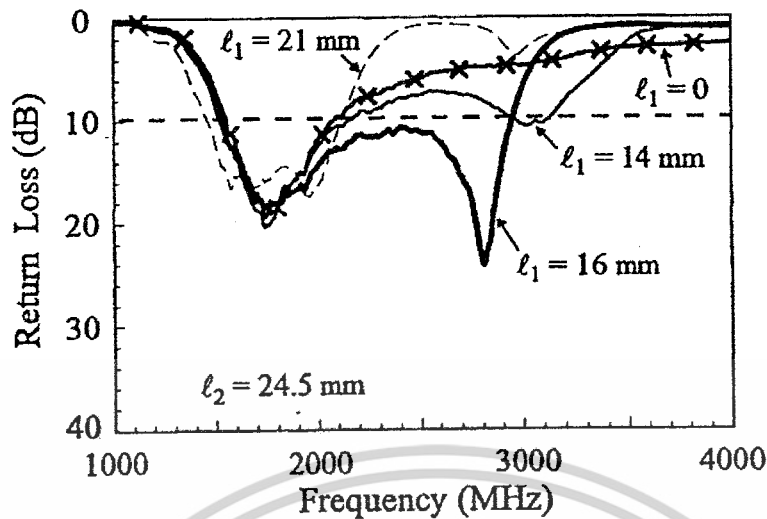
จากรูปที่ 3.1 เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมที่มีร่องจัดรัสแบบแถบความถี่กว้างที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้สตริปเป็น โหลด ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบได้แก่ ความกว้างของสายนำสัญญาณ W_s , ระยะห่างของช่องว่าง g ระหว่างสายป้อนสัญญาณและระนาบกราวด์ของระนาบร่วม เป็นการกระตุ้นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างช่องว่างเพื่อให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) โดยการใช้สตริป l_2 ทำหน้าที่ปรับค่าแบนด์วิดท์ให้ได้ค่ามากและเหมาะสมค่าหนึ่ง จากนั้นจึงนำสตริป l_1 ต่อภายในมุมเป็นโหลดทั้งสี่ของสายอากาศเป็นการขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างขึ้น จากงานวิจัยพบว่าเมื่อกำหนดค่า l_2 เท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร และทำการเปลี่ยนค่า l_1 คุณสมบัติสูงสุดได้เมื่ออยู่ในช่วงอัตราส่วนของค่า l_1/l_2 จาก 0.6 ถึง 0.8 ซึ่งค่าอัตราส่วน 0.65 ทำให้สายอากาศได้ค่าแบนด์วิดท์กว้างที่สุดเท่ากับ 1.41 กิกะเฮิรตซ์หรือ 62% ได้ความถี่กลางประมาณ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อกำหนดค่าความยาวของ $l_2 = 24.5 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4.4$,

$h = 1.6 \text{ mm}$, $L = 40 \text{ mm}$, ระนาบกราวด์ $= 70 \times 70 \text{ mm}^2$

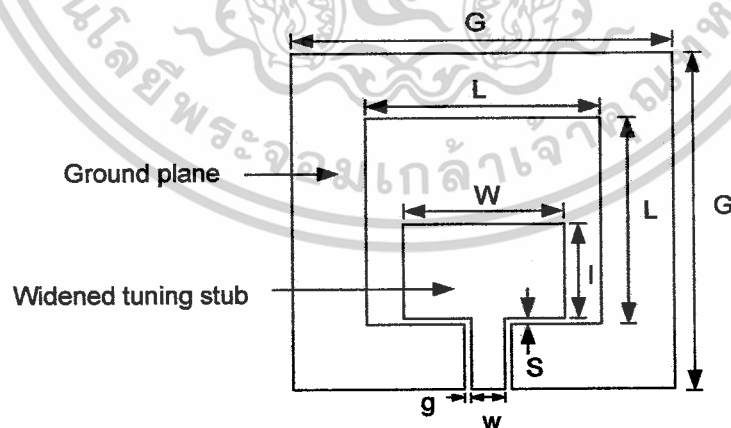
$l_1 \text{ mm}$	$l_2 \text{ mm}$	l_1 / l_2	$f_c \text{ (MHz)}$	Bandwidth(MHz)
0	24.5	0	1857	527,28.4
14	24.5	0.57	1849	618,33.4
16	24.5	0.65	2241	1410,62.9
18	24.5	0.73	2050	1101,53.7
19	24.5	0.78	1960	952,48.6
21	24.5	0.86	1801	641,35.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้ สตรีปเป็นโหลดแบบแถบความถี่กว้าง กำหนดค่าความยาวของ $l_2 = 24.5$ mm

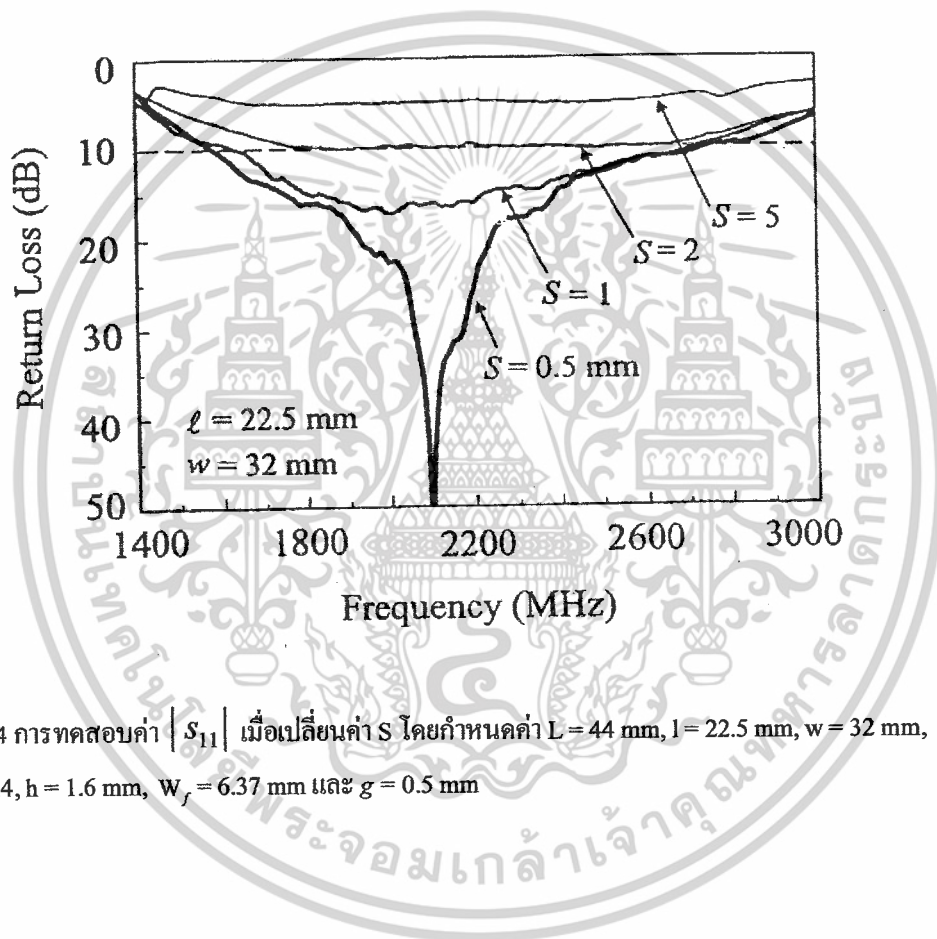
ผู้วิจัยกลุ่มที่สองศึกษาเกี่ยวกับการขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศไมโครสตริปคือ นักวิจัยชาว Taiwan คือ H.D. Chen ในปี ค.ศ. 2003 งานวิจัยนี้ใช้การป้อนสายนำสัญญาณด้วยโครงสร้างระนาบร่วม (CPW-Fed) และจูน สตัมป์ (Widened Tuning Stub) ร่วมกัน ซึ่งได้สายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำ สัญญาณระนาบร่วม (CPW-Fed Square Slot Antenna) สำหรับให้ทำงานในย่านความถี่กว้าง (Broadband) สายอากาศมีขนาด 72×72 ตารางมิลลิเมตร โดยเทคนิคการปรับการแมตซ์ค่าแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ ขึ้นอยู่กับขนาดของความถี่และความยาวของตัวจูนสตัมป์ในร่องเปิดสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.2



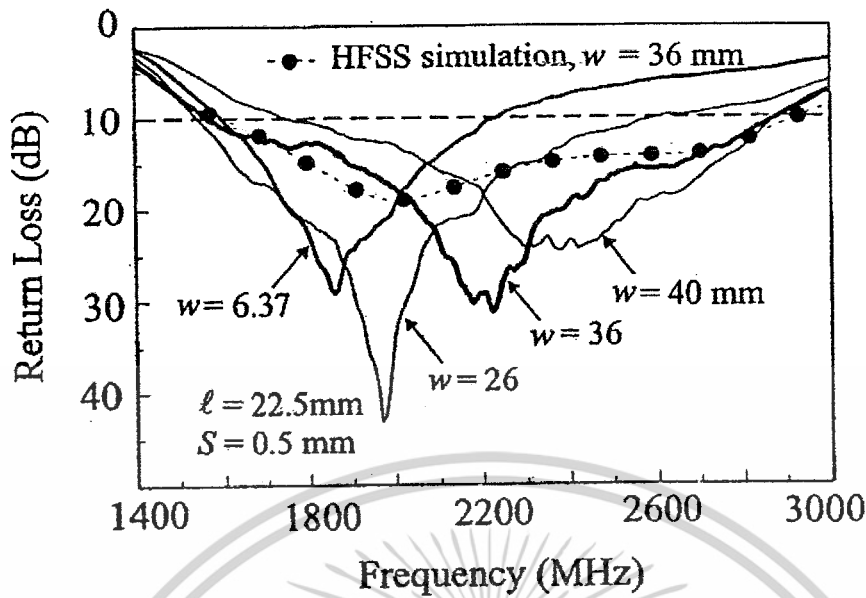
รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่มีสตัมป์สี่เหลี่ยมแบบ แถบความถี่กว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 งานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนสายนำสัญญาณด้วยโครงสร้างระนาบร่วมและจูนสตั๊ปร่วมกัน ซึ่งได้สายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม สำหรับให้ทำงานในย่านความถี่กว้างสายอากาศมีขนาด 72×72 ตารางมิลลิเมตร โดยเทคนิคการปรับค่าการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ของสายอากาศขึ้นอยู่กับระยะห่างของ S ในหารจูนสตั๊ปในช่องสี่เหลี่ยมแสดงในรูป 3.3 และการเพิ่มค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของ w และ l ในการจูนสตั๊ปแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าสายอากาศจะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อค่า $l = 0.5l$ (22.5 mm) และ $w = 0.81l$ (36 mm) ซึ่งทำให้สายอากาศสามารถทำงานในย่านความถี่ประมาณ 1.6 – 2.8 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะได้อัตราการแผ่รังสีประมาณ 60% ดังแสดงในตาราง 3.2



รูปที่ 3.4 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า S โดยกำหนดค่า $L = 44$ mm, $l = 22.5$ mm, $w = 32$ mm, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6$ mm, $W_f = 6.37$ mm และ $g = 0.5$ mm



รูปที่ 3.5 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนแปลงจูนสตัป w โดยกำหนดค่า $S = 0.5$ mm, $l = 22.5$ mm,

$L = 44$ mm, $G = 72$ mm, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6$ mm, $W_f = 6.37$ mm, $g = 0.5$ mm

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าจูนสตัป เมื่อกำหนดค่า $S = 0.5$ mm, $l = 22.5$ mm,

$L = 44$ mm, $G = 72$ mm, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6$ mm, $W_f = 6.37$ mm, $g = 0.5$ mm

	w(mm)	S(mm)	f(MHz)	BW(%,MHz)
Reference	6.37	-	1895	32,1589-2200
Antenna1	26	0.5	2070	51,1540-2600
Antenna2	32	0.5	2163	54,1580-2747
Antenna3	36	0.5	2220	60,1560-2880
Antenna4	40	0.5	2299	50,1725-2873

ผลจากการวิจัยทั้งสองนี้เป็นการออกแบบสายอากาศโดยใช้การป้อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่น
ระนาบร่วม สามารถเพิ่มแบนวิธได้โดยการปรับร่องเปิดสี่เหลี่ยมและมีเทคนิคการปรับอิมพีแดนซ์ที่
ขึ้นอยู่กับระยะห่างของร่องเปิดสี่เหลี่ยมกับแผ่นสตัป ข้อดีของการวิจัยนี้คือการออกแบบโดยใช้
แผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียว แต่ข้อเสียของโครงสร้างของสายอากาศแบบนี้จะได้สายอากาศที่มีขนาดใหญ่
เพราะต้องใช้การเหนี่ยวนำบนพื้นที่เดียวกัน จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ซึ่งจะทำให้การแมตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์มีความยากและซับซ้อนของโครงสร้าง และการใช้แผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียวไม่สามารถทำสายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional beam) ได้เพราะไม่มีระนาบกราวด์

จากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมาทั้งหมดก็จะเห็นได้ว่ามีเทคนิคการเพิ่มค่าแบนด์วิดท์ที่น่าสนใจแต่ยังไม่สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้รองรับความถี่ในช่วง 3.1 -10.6 GHz ได้ ดังนั้นสายอากาศที่คณะผู้จัดทำได้นำเสนอนี้เป็นสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ข้อดีคือสามารถแยกการออกแบบได้สองส่วนคือส่วนของสายนำสัญญาณและส่วนของระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ซึ่งสายอากาศนี้ให้แบนด์วิดท์ที่กว้างและสามารถใช้งานสำหรับความถี่ 3.1- 10.6 GHz ได้ โครงสร้างสายอากาศไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย นำหนักเบา สามารถออกแบบให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้หลายรูปแบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในช่วงต่อไป

3.1 โปรแกรมสายอากาศ

โปรแกรมสายอากาศเป็น โปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สายอากาศที่เราได้ทำการคำนวณและออกแบบไว้ เพื่อการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ก่อนที่เราจะสร้างชิ้นงานขึ้นจริง ทำให้สามารถประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้างสายอากาศขึ้นมาเพื่อใช้งานจริง โปรแกรมสร้างสายอากาศนี้สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆออกมาตามที่ต้องการเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Return loss) ค่าสภาพเจาะงทศทาง (Directivity) ค่า อิมพีแดนซ์ (Impedance) และค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) เป็นต้น นอกจากนี้แล้วโปรแกรมยังสามารถสร้างกราฟ สมิทซ์ชาร์ต (Smith Chart Graph) ภาพการแพร่กระจายของคลื่นในระนาบ “E-plane” และ “H-plane” ได้อีกด้วย

3.2 การออกแบบ

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป เพื่อทดสอบหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio) ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Radiation Pattern) อัตราขยาย (Gain) สภาพเจาะงทศทาง (Directivity) และประสิทธิภาพ (Efficiency) ของสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit) ชนิด 2 หน้า ซึ่งเป็นวัสดุ (Epoxy) ซึ่งมีสามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูก มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) (ϵ_r) = 4.4 แทนเจนต์การสูญเสีย $\tan \delta = 0.025$ ความหนา $h = 0.8$ มิลลิเมตร โดยมีความกว้างเท่ากับ W ความยาวเท่ากับ L ซึ่งในการออกแบบจะทำการออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ทั้งสองด้าน โดยแผ่นวงจรพิมพ์ด้านหนึ่งใช้สำหรับโครงสร้าง สายอากาศและสายนำสัญญาณ ส่วนอีกด้านหนึ่งใช้สำหรับการออกแบบเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยการใช้อุปกรณ์สี่เหลี่ยม โดยจะทำการออกแบบให้มีการรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ 3.1-10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้กับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

ส่วนของโครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริป สี่เหลี่ยม ที่มีการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปตรงกลางมีค่าความกว้างเท่ากับ w , และความยาวเท่ากับ L , โดยใช้หลักการออกแบบตามทฤษฎีการจำลองแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยม ในส่วนระนาบกราวด์

ออกแบบเป็นร่องกว้างสี่เหลี่ยมซึ่งมีความกว้างเท่ากับ w , และความยาว L , และมีระยะห่างระหว่างร่องกว้างสี่เหลี่ยมกับสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมเท่ากับ h_1

3.2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะคำนวณหาความกว้าง (w) และความยาว (L) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งแสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ (3.6) โดยสิ่งสำคัญในการออกแบบคือ

- ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r)
- ความหนาของสารตัวกลาง (h)

คำนวณหาความกว้างจะอาศัยสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\lambda_0 = \frac{C_0}{f_0} \quad (3.1)$$

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ใช้งาน (เซนติเมตร)
 C_0 คือ ความเร็วคลื่นในสุญญากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)
 f_0 คือ ความถี่คลื่นที่ใช้งาน (GHz)

แทนค่า λ_0 ลงสมการที่ 3.2

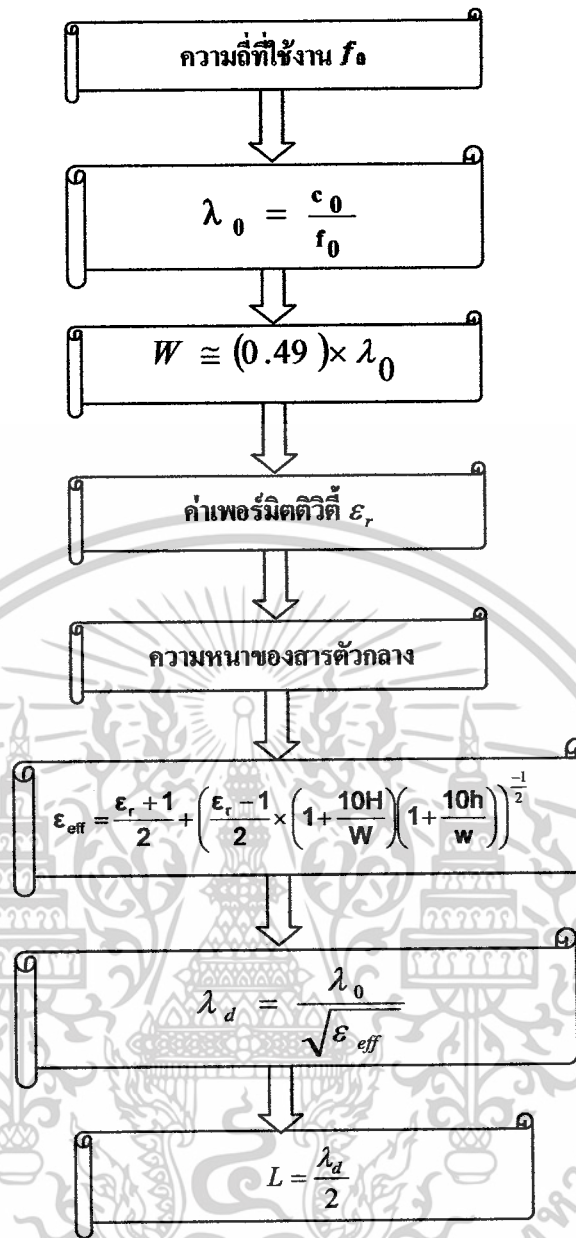
$$W = \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.2)$$

เมื่อ W คือ ความกว้างของส่วนการแพร่กระจายคลื่น (เซนติเมตร)
 λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ใช้งาน (เซนติเมตร)

แต่ในการออกแบบจริงๆ ค่าของ W จะเท่ากับ

$$W \cong 0.49 \times \lambda_0 \quad (3.3)$$

เมื่อทราบค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) และความหนาของสารตัวกลาง (h) นำมาหาค่าความยาวของแผ่นการแพร่กระจายคลื่น (L) โดยอาศัยสมการที่ 3.4 ถึง 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{10H}{W} \right) \right)^{-1/2} \quad (3.4)$$

- เมื่อ ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ตัวประสิทธิภาพผล
 ϵ_r คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง
 h คือ ความหนาของสารตัวกลาง (เซนติเมตร)
 W คือ ความกว้างของส่วนการแพร่กระจายคลื่น (มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า ϵ_{eff} ลงในสมการที่ 3.5

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ λ_d คือ ความยาวคลื่นของสารที่เป็นตัวกลาง (เซนติเมตร)

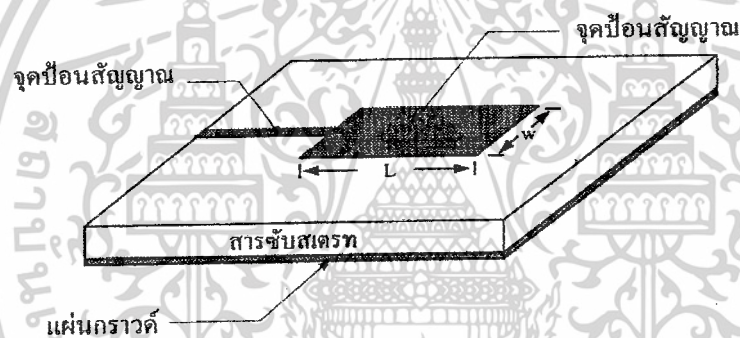
ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ตัวประสิทธิภาพ

แทนค่า λ_d ลงในสมการที่ 3.5

$$L = \frac{\lambda_d}{2} \quad (3.6)$$

เมื่อ L คือ ความยาวแพทช์ของสายอากาศ (เซนติเมตร)

ซึ่งลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะเป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นวงจรพิมพ์ (Epoxy) มีดังนี้

ความถี่รีโซแนนซ์ $f_r = 6.85 \text{ GHz}$

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ $\epsilon_r = 4.4$

ค่าความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.8$ มิลลิเมตร

ค่าอินทริสติกอิมพีแดนซ์ของอากาศ $\eta = 120\pi$

ค่าคงที่เฟส $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ขนาดของแพทช์สายอากาศไมโครสตริป

จากหนังสือ Modern Antenna Design ของ ไซมัส เอ มิลลิแกน (Thomas A. Milligan) สามารถหาความกว้างความยาวของแผ่นไมโครสตริปได้ดังนี้

ความกว้างของแผ่นไมโครสตริป สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.7)$$

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถหาความกว้างของแพทช์สายอากาศได้ดังนี้

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times (6.85 \times 10^9) \times \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}}} = 13.326 \text{ mm.}$$

ดังนั้นจะได้ความกว้างของแผ่นไมโครสตริป $W = 10.44$ มิลลิเมตร (Milligan, 1985)

ความยาวของแผ่นไมโครสตริป สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta \quad (3.8)$$

$$\Delta = 0.412h \frac{\left((\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right) \right)}{\left((\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right) \right)} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{w} \right)^{-1/2} \quad (3.10)$$

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถหาความยาวของแพทช์สายอากาศได้ดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left(1 + \left(\frac{10 \times 0.8}{10.44} \right) \right)^{-1/2} = 3.97891$$

$$\Delta = 0.412 \times (0.8 \times 10^{-3}) \frac{\left((3.98 + 0.3) \left(\frac{10.44}{0.8} + 0.264 \right) \right)}{\left((3.98 - 0.258) \left(\frac{10.44}{0.8} + 0.8 \right) \right)} = 3.64345 \times 10^{-4}$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times (6.85 \times 10^9) \times \sqrt{3.97981}} - (2 \times (3.64345 \times 10^{-4})) = 10.24 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ความยาวของแผ่นไมโครสตริป $L = 10.24 \text{ mm}$ และความกว้าง $W = 13.268 \text{ mm}$

3.3 การปรับอิมพีแดนซ์

ก่อนจะทำการปรับอิมพีแดนซ์ ต้องหาค่าเริ่มต้นของสายอากาศเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งจะต้องคำนวณหาความกว้างยาวของแผ่นไมโครสตริป และคุณลักษณะเฉพาะของเส้นไมโครสตริปจากทฤษฎีในบทที่ 2 เนื่องจากสายอากาศนี้ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบ เส้นไมโครสตริป ดังนั้นจึงต้อง คำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ ซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์จากสมการที่ (ดูจากบทที่ 2) ซึ่งไม่คิดความหนาของตัวนำ (t) ซึ่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยมากทำให้ได้สมการที่ (2.5) และ (2.6) มีสมการดังนี้

$$W = w + \frac{t}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{t} \right) + 1 \right] \quad (3.11)$$

$$H = h - 2t \quad (3.12)$$

เมื่อไม่คิดค่าความหนา t ทำให้ได้

$$W = w$$

$$H = h = h_s$$

ดังนั้นเมื่อต้องการอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ $Z_0 = 50$ โอห์ม โดยมีความสูงของวัสดุฐานรอง $H = h_s = 0.8$ มิลลิเมตร และมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง $\epsilon_r = 4.4$ แทนค่าลงในสมการที่ 3.13 และ 3.14 แล้วทำการเปลี่ยนความกว้างของเส้นไมโครสตริป w_f ซึ่งค่า $w_f = W$ เท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่า $Z_0 = 50$ ดังนี้

เมื่อทำการแทนค่า $w_f = W = 1.4$ มิลลิเมตรจะได้ $\frac{w}{h} = \frac{1.4}{0.8} = 1.75 \geq 1$ ซึ่งต้องเลือกใช้สมการที่

(2.3) และ (2.4) ในการคำนวณดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{w}{h} \geq 1 \quad Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left\{ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (3.13)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{h}{w}}} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

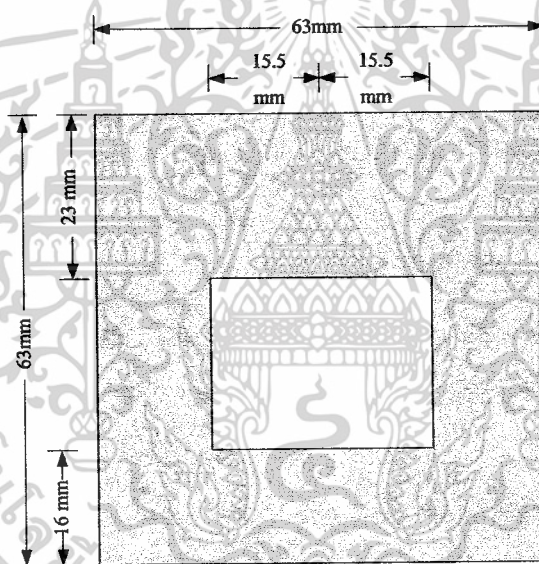
คำนวณหาค่า ϵ_{eff} โดยการแทนค่า $\epsilon_r = 4.4$, $h = h_s = 0.8$ มิลลิเมตร และ $W_f = w = 1.4$ มิลลิเมตร ในสมการที่ (3.14)

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4+1}{2} + \frac{4.4-1}{2\sqrt{1+12\frac{0.8}{1.4}}} = 3.306$$

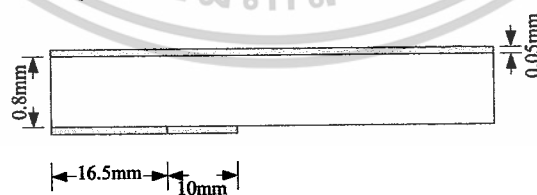
นำค่า $\epsilon_{eff} = 3.98$, $H = h_s = 0.8$ มิลลิเมตร และ $W_f = w = 1.4$ มิลลิเมตร แทนลงในสมการที่ (3.13) ดังนี้

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{3.306}} \left\{ \frac{1.4}{0.8} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{1.4}{0.8} + 1.444 \right) \right\}^{-1} = 52.925 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นค่าของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปโดยมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ความกว้างที่ 10.24 มิลลิเมตรและความยาวที่ 13.268 มิลลิเมตร และความกว้างของเส้นไมโครสตริป (W_f) เท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร ความสูงของซับสเตรท (h_s) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ดังแสดงได้ดังรูป 3.8, 3.9 และ 3.10

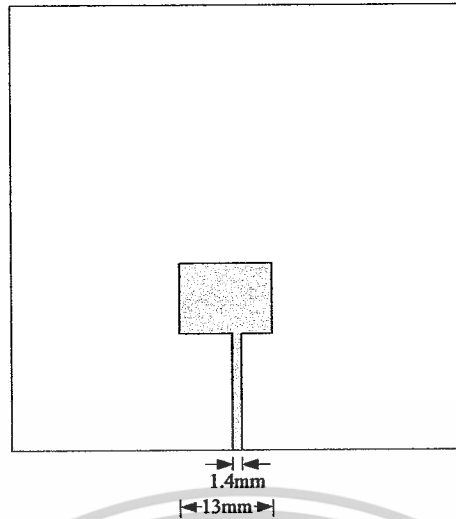


รูปที่ 3.8 แสดงแผ่นรูประนาบเงา



รูปที่ 3.9 แสดงด้านข้างความหนาของอีพ็อกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงแพทช์การแพร่กระจายคลื่น

3.4 การออกแบบคำนวณความยาวเส้นสตริปที่รองรับการใช้งานในช่วงความถี่ของอัลตราไวต์แบนด์
 ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่สามารถใช้งานในช่วงความถี่ของอัลตราไวต์แบนด์ โดยจะทำการออกแบบเพื่อให้สายอากาศมีการทำงานในช่วง 3.1 GHz - 10.6 GHz

3.4.1 การออกแบบความกว้างยาวของสายส่งไมโครสตริป

การคำนวณหาความกว้างและความยาวของสายส่ง (Strip line) จากสมการ (3.10) นำไปแทนสมการ (3.13) จะได้ค่า $Z_0 = 52.925$ โอห์ม และ $h = 0.8$ มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าของความกว้าง $w = 1.4$ มิลลิเมตร

การคำนวณหาความยาวสายส่ง (Strip line)

$$L_0 = \frac{\lambda_g}{2} \quad (3.15)$$

ซึ่ง λ_g สามารถหาค่าได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.16)$$

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ทำการหาค่า λ_g ที่ความถี่ 3.1 GHz

$$\lambda_{g(3.1\text{GHz})} = \frac{0.0968}{\sqrt{3.306}} = 53.22 \text{ มิลลิเมตร}$$

-นำค่า λ_g ไปแทนค่าลงในสมการ (3.15) เพื่อหาค่า L_0

$$L_{0(3.1\text{GHz})} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{53.22}{2} = 26.61 \text{ มิลลิเมตร}$$

-ทำการหาค่า λ_g ที่ความถี่ 10.6 GHz

$$\lambda_{g(10.6\text{GHz})} = \frac{0.0283}{\sqrt{3.306}} = 15.56 \text{ มิลลิเมตร}$$

-นำค่า λ_g ไปแทนค่าลงในสมการ (3.16) เพื่อหาค่า L_0

$$L_{0(10.6\text{GHz})} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{15.564}{2} = 7.782 \text{ มิลลิเมตร}$$

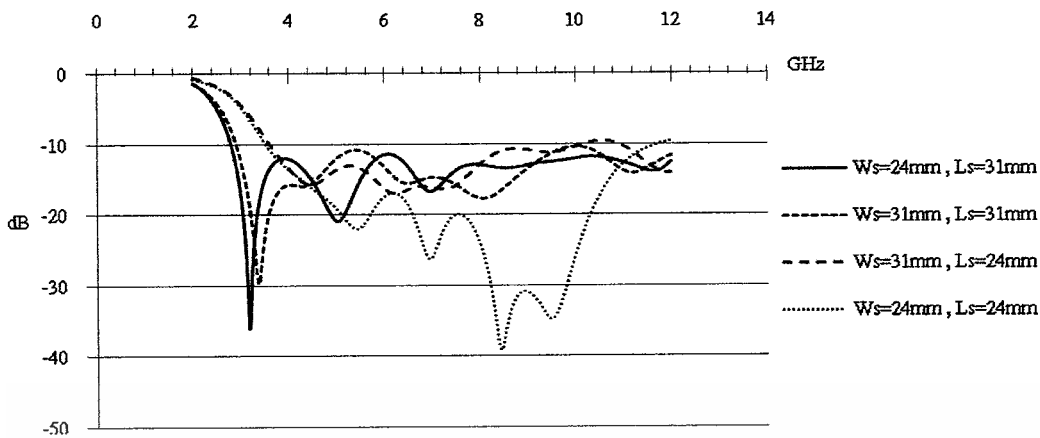
ทำการหาค่าประมาณความยาวสายส่ง (Strip Line) ทั้งสองโดยจะได้

$$L_0 = \frac{L_{0(3.1\text{GHz})} + L_{0(10.6\text{GHz})}}{2} = \frac{26.61 + 7.782}{2} = 17.196 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจะได้ความยาวสายส่งมีค่า 17.196 มิลลิเมตร

3.4.2 การออกแบบช่องเปิดที่รองรับความถี่ 3.1 – 10.6 GHz

การออกแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมนี้เราจะทำการกำหนดค่าความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยมเพื่อดูผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์และแบนด์วิดท์ โดยความกว้างเส้นไมโครสตริปเท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร ความยาวเส้นสตริป 17.1 มิลลิเมตร ความยาวของแพทช์ทำคำนวณได้ 10.24 มิลลิเมตร ความกว้างแพทช์ 13.326 มิลลิเมตร โดยเราจะทำการกำหนดให้ช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีความกว้างเท่ากับ w_s ความยาวเท่ากับ L_s



รูปที่ 3.11 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความกว้างความยาวของช่องเปิด

จากกราฟที่เราทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ช่องเปิดเราพบว่าที่ช่องเปิด $W_s = 31\text{mm}$ และ $L_s = 24\text{mm}$ จะสามารถให้ค่าแบนด์วิดท์ที่ดีที่สุด โดยรองรับในช่วงการใช้งานของคลื่นที่ 3.1-10.6 GHz การคำนวณหาขนาดของสายอากาศ

เมื่อจากการคำนวณเราจะได้อ่า

1. ความหนาของวัสดุ (epoxy) = 0.8 มิลลิเมตร
2. ความกว้างของสายส่ง = 1.4 มิลลิเมตร
3. ความยาวของสายส่ง = 17.196 มิลลิเมตร
4. ความกว้างของแพทช์ = 10.44 มิลลิเมตร
5. ความยาวของแพทช์ = 13.268 มิลลิเมตร
6. ค่าอิมพีแดนซ์ = 52.925 โอห์ม
7. ค่าความกว้างช่องเปิด = 31 มิลลิเมตร
8. ค่าความยาวช่องเปิด = 24 มิลลิเมตร

3.4.3 การปรับแต่งสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

การปรับแต่งสายอากาศทำได้โดยทำการเจาะสล๊อตเป็นช่องเปิดที่เหลี่ยมให้มีขนาดกว้างยาวที่เหมาะสมเพื่อให้ค่า Return loss และค่าช่วงความกว้างของความถี่ขึ้น โดยการใช้การทำนายค่าจากโปรแกรมคำนวณสายอากาศ CST เพื่อให้สายอากาศมีค่าที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นขนาดซึ่งขนาดของสล๊อตกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 8 มิลลิเมตร และหาค่าความถี่ โชนานซ์ที่สล๊อตของสายอากาศที่ทำการปรับแต่ง

$$\frac{\lambda}{2} = 8\text{mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = 16 \text{ mm}$$

$$\lambda_d = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

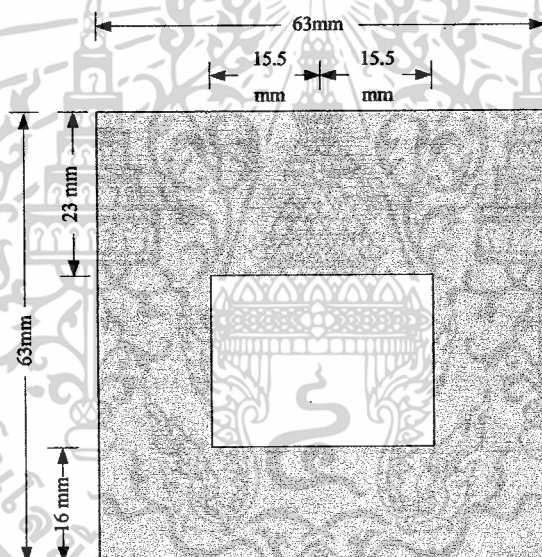
$$\lambda = (16 \times 10^{-3}) \times \sqrt{4.4}$$

$$\lambda = 33.56 \times 10^{-3}$$

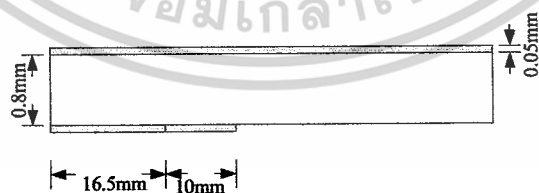
จาก $v = f\lambda$

$$f_r = \frac{c}{\lambda} \quad f_r = \frac{3 \times 10^8}{33.56 \times 10^{-3}}$$

$$f_r = 8.939 \text{ GHz}$$

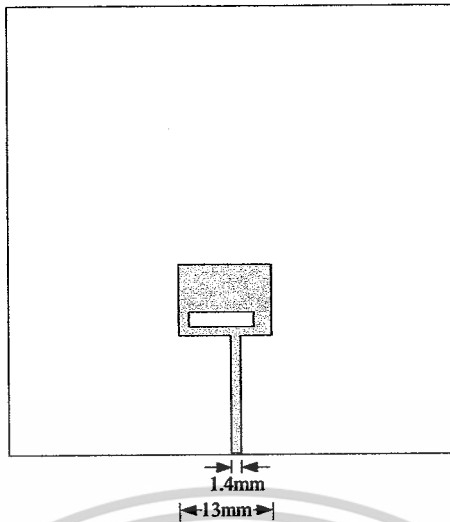


รูปที่ 3.12 แสดงระนาบเงาของสายอากาศที่ปรับปรุง



รูปที่ 3.13 แสดงด้านข้างของสายอากาศที่ปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงแพทช์สายอากาศไมโครสตริปที่ปรับปรุง

ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เราได้นั้นจะทำให้ช่วงความกว้างของความถี่ขึ้น และช่วยในเรื่องของแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ

3.5 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป

การสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบรูปร่างและขนาดแล้วทำการ Simulation เพื่อให้ได้ความถี่ที่เราต้องการที่เป็นย่านความถี่ใช้งานของอัลตราไวด์แบนด์คือช่วง (3.1-10.6) GHz ซึ่งเราจะต้องปรับแต่งรูปร่างและขนาดให้มีค่าที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงมากที่สุด จากนั้นเราก็นำขนาดจริงไปวางลงบนโปรแกรม visio เพื่อทำการวาดขนาดจริงและนำไปสร้างชิ้นงานเพื่อวัดคุณสมบัติเพื่อใช้งาน โดยค่าที่เรากำหนดคือ

1. Return loss = -15 dB
2. Impedance = 50 โอห์ม
3. VSWR = 2:1
4. Gain = 3 dBi

3.6 การวางแผนและการตั้งเป้าหมายในการปฏิบัติงาน

การวางแผนและการตั้งเป้าหมายในการสร้างชิ้นงานเป็นส่วนสำคัญในการปฏิบัติงานเพื่อที่เราจะสามารถเปรียบเทียบสายอากาศที่เราสร้างจริงกับสายอากาศที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป โดยสายอากาศที่เราสร้างนี้เราจะกำหนดคุณลักษณะโดยทั่วไปของสายอากาศโดยพิจารณาจากค่าพื้นฐานของสายอากาศโดยเราจะกำหนดค่าพื้นฐานเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ

1. Return loss = -15 dB
2. Impedance = 50 โอห์ม
3. VSWR = 2:1
4. Gain = 3 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการออกแบบและการคำนวณ

ในบทนี้มีสามส่วนใหญ่ๆ โดยส่วนแรกจะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการการออกแบบในการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์สายอากาศโดยโปรแกรม (CST) เพื่อจำลองการสร้างสายอากาศ และส่วนที่สองเป็นการออกแบบโดยการใช้การคำนวณตามทฤษฎีการสร้างสายอากาศไมโครสตริปโดยในตัวแปรแรกเราจะทำการกำหนดความหนาของแผ่น (Epoxy) ให้มีความหนาที่พอเหมาะ และตัวแปรอีกตัวคือขนาดเราจะทำการกำหนดขนาดความกว้างยาวของสายอากาศ ส่วนต่อมาก็คือเราจะทำการหาค่าความถี่กลางซึ่งเป็นความถี่รีโซแนนซ์ โดยในการหาจะได้ค่าความถี่กลางออกมาและส่วนต่อมาก็คือเราจะทำการคำนวณหาค่าขนาดความกว้างยาวของแพทช์ โดยการใช้การคำนวณตามหลักของสายอากาศไมโครสตริป และส่วนต่อมาก็คือเราจะทำการคำนวณหาความยาวของเส้นไมโครสตริปโดยใช้องค์ประกอบของตัวแปรก่อนหน้า และทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และทำการหาความถี่ของช่องเปิด โดยการคำนวณหาความยาวที่เหมาะสมกับค่าความถี่ที่เราต้องการในการใช้งานในเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ และส่วนที่สามเป็นการปรับแต่งสายอากาศโดยทำการเจาะสล็อตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ และในท้ายบทเป็นการอธิบายขั้นตอนการทำงานและการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศที่เราทำการออกแบบเพื่อสร้างและเปรียบเทียบกับสายอากาศโดยทั่วไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

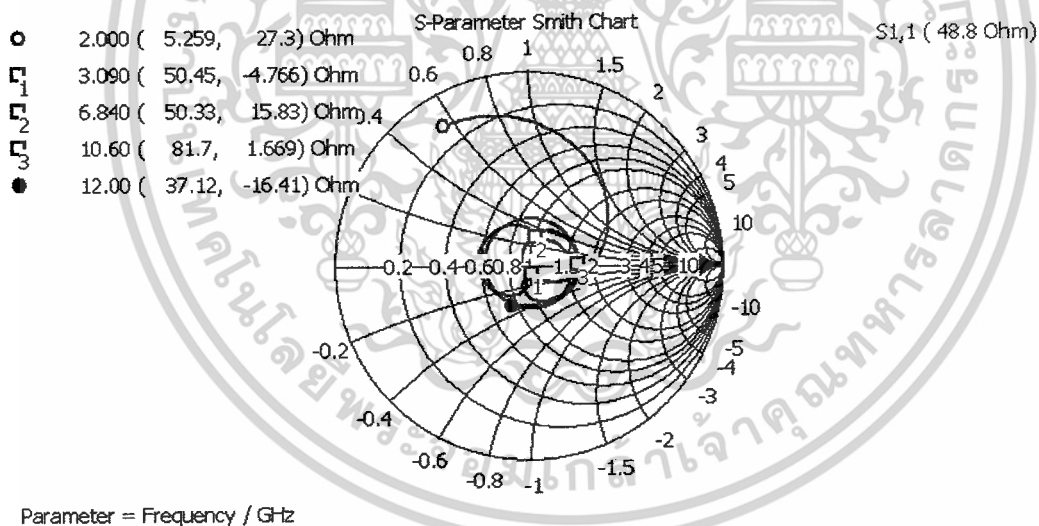
การจำลองและผลการทดสอบ

4.1 การจำลอง

ในการวิเคราะห์รูปแบบสายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ โดยในการวิเคราะห์จะนำขนาดของสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ที่ได้คำนวณ ในบทที่แล้วแล้วนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยโปรแกรม CST แล้วทำการปรับแต่งขนาดเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimum) แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์โปรแกรม CST มาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการสร้างและพัฒนาสายอากาศต่อไป

4.1.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

สายอากาศไมโครสตริปจะมีส่วนที่สายอากาศจะมีส่วนที่สายส่งไมโครสตริป (Strip Line) ซึ่งมีค่าความกว้างแล้วความยาวของสายส่งนี้จะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ โดยอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50 โอห์มเพื่อให้สัญญาณไม่เกิดการสะท้อนซึ่งมีผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST นั้นต้องพิจารณาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้ความถี่ใช้งานทั้งย่านความถี่ (3.1– 10.6) GHz

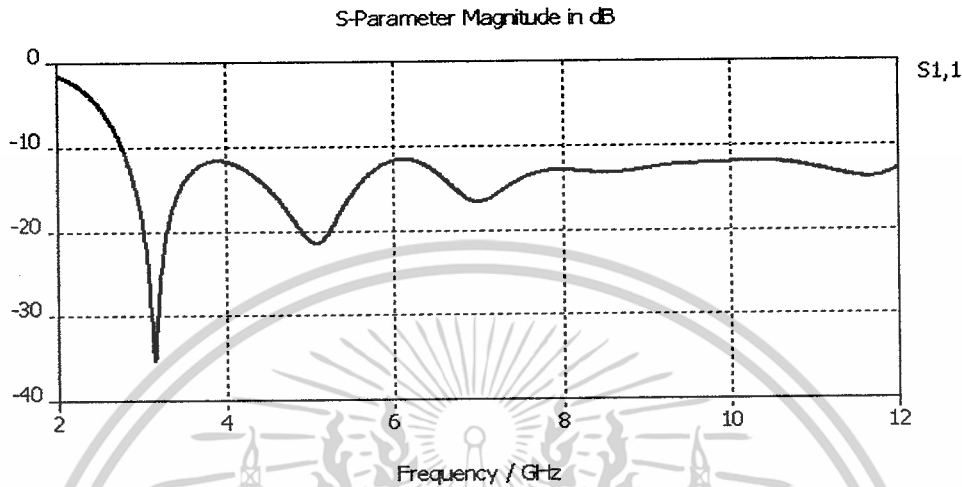


รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

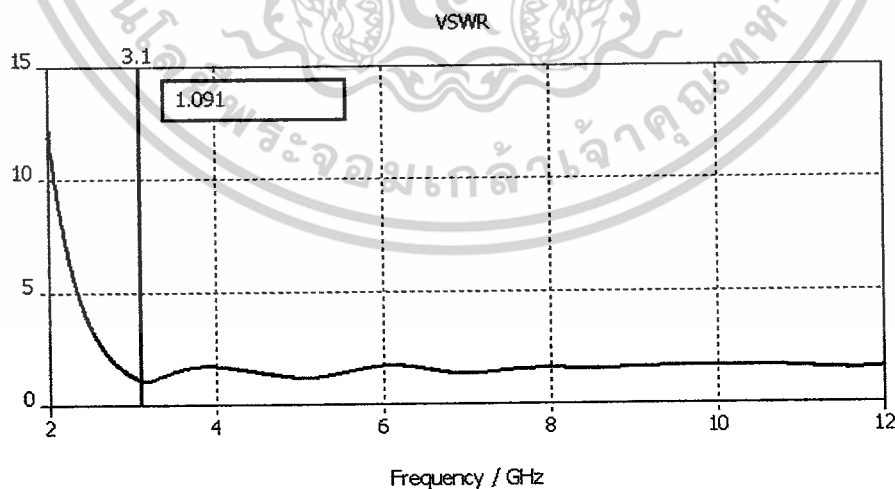
เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศจนได้ค่าตามที่ต้องการแล้ว ส่วนต่อไปที่เราจะพิจารณาคือการพิจารณาการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งในการพิจารณาค่าดังกล่าวก็ต้องพิจารณาที่ความถี่ใช้งานทั้งย่านความถี่อัลตรา ไรด์แบนด์ UWB ตั้งแต่ย่านความถี่ 3.1 GHz – 10.6 GHz



รูปที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้จากโปรแกรม CST

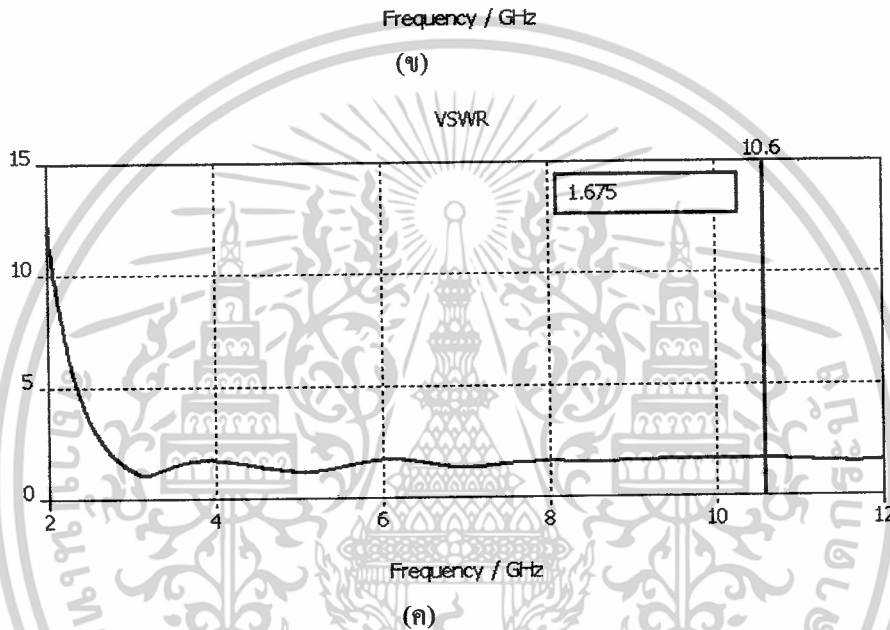
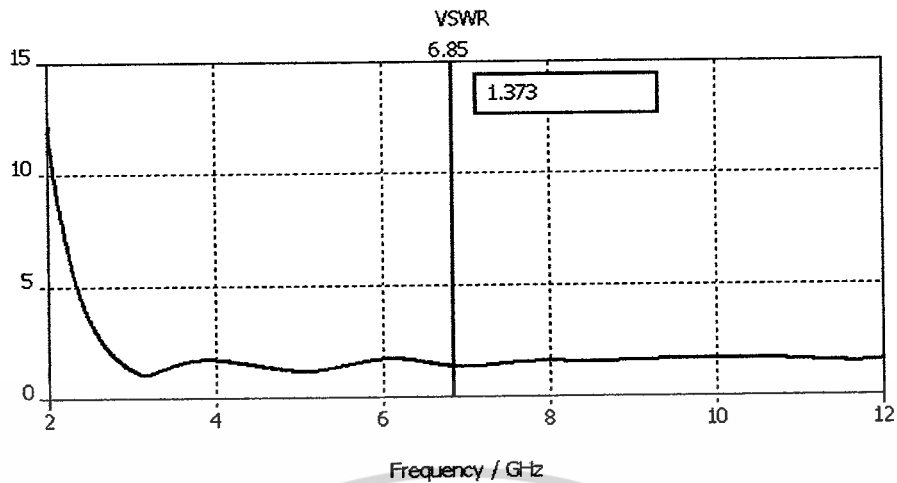
4.1.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio) คือค่าแรงดัน V_{max} ของคลื่นนิ่ง และแรงดัน V_{min} ของคลื่นที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันและตรงกันข้ามตามลำดับ โดยการนำอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุดก็จะเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน โดยในการพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนี้ ไม่ควรมีค่าเกิน 2 หรือต้องไม่สูงกว่า 2 นั้นเอง ที่สามารถยอมรับนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าจะให้ดีกว่าจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 จะดีมากกว่า



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากโปรแกรม CST

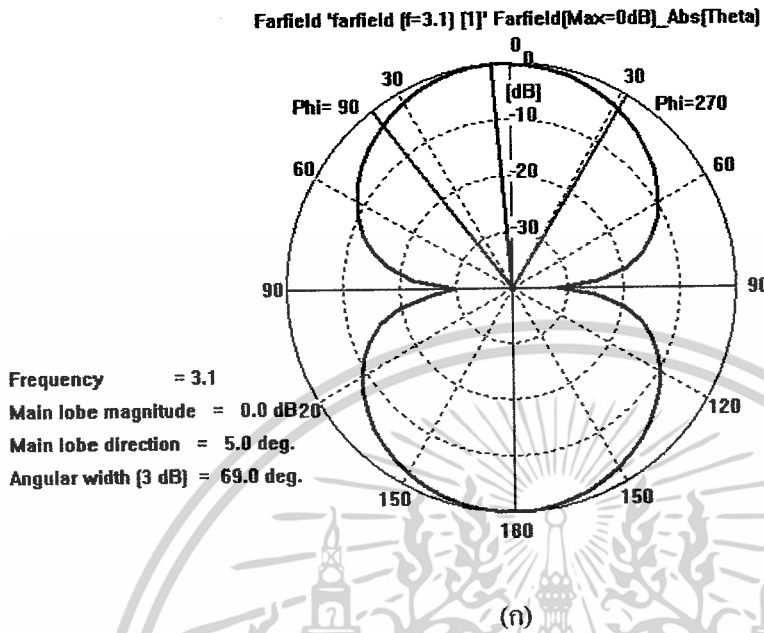
- (ก) ความถี่ 3.1 GHz
- (ข) ความถี่ 6.85 GHz
- (ค) ความถี่ 10.6 GHz

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST นั้นพบว่า VSWR ที่ความถี่ 3.1 GHz ประมาณ 1.091:1 ที่ความถี่ 6.85 GHz ประมาณ 1.373:1 ที่ความถี่ 10.6 GHz ประมาณ 1.675:1 ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณากับหลักการเบื้องต้นที่ว่าค่า VSWR ต้องมีค่าต่ำกว่า 2 ก็ถือว่าค่า VSWR ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้งานได้

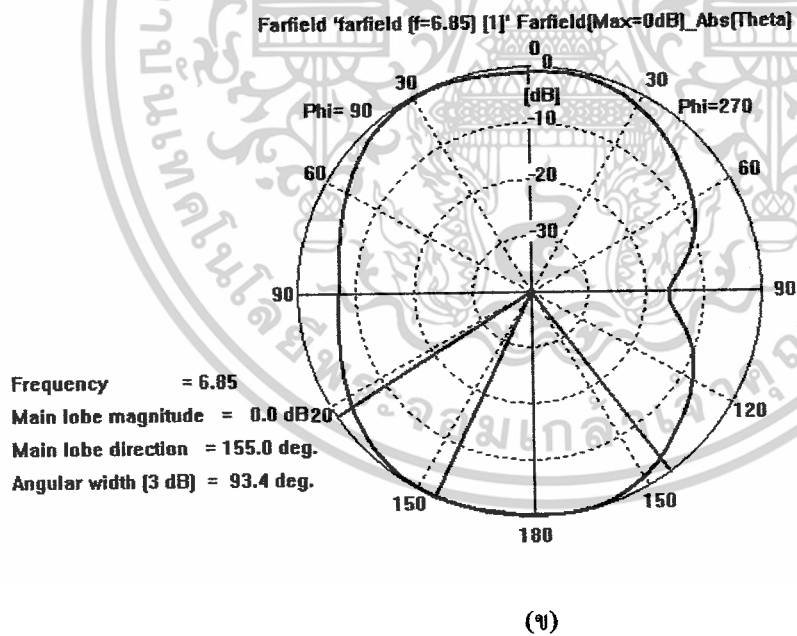
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 พิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากโปรแกรม CST

- ที่ความถี่ 3.1 GHz

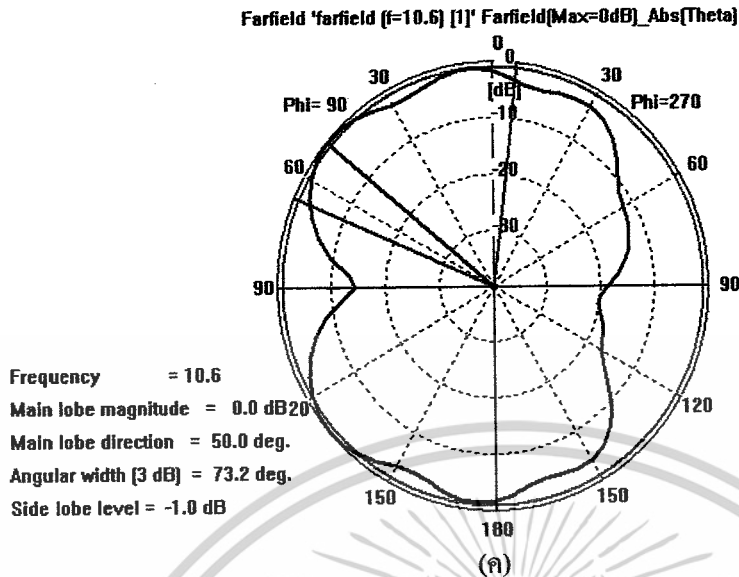


- ที่ความถี่ 6.85 GHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 10.6 GHz



รูปที่ 4.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

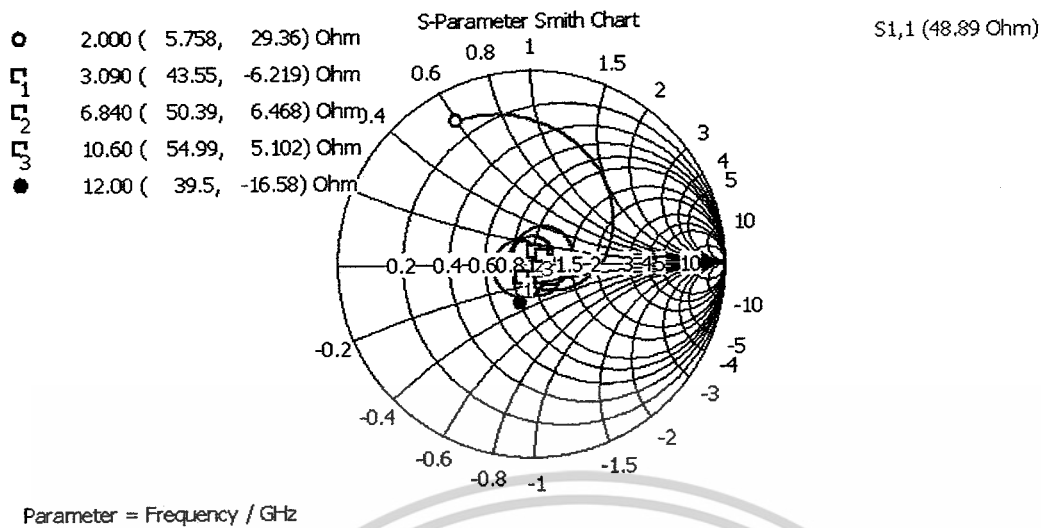
- (ก) ความถี่ 3.1 GHz
- (ข) ความถี่ 6.85 GHz
- (ค) ความถี่ 10.6 GHz

4.2 การปรับปรุงคุณลักษณะสายอากาศ

จากการวิเคราะห์สายอากาศในแบบที่แล้ว ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ โดยได้นำมาวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ที่ได้คำนวณแล้วทำการวิเคราะห์ใหม่เพื่อทำการปรับปรุงเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้ดีที่สุดแล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST มาวิเคราะห์เพื่อทำนายผลแล้วนำมาพัฒนาต่อไป

4.2.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

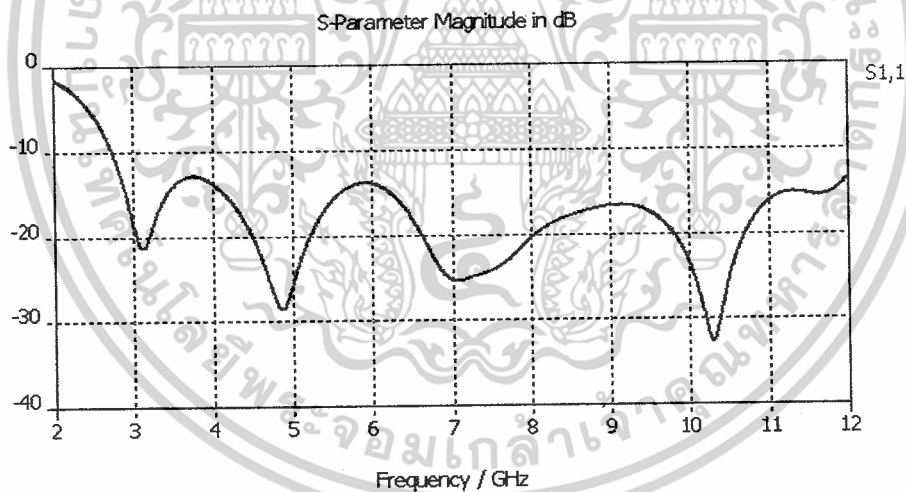
สายอากาศไมโครสตริป (Strip Line) ซึ่งมีค่าความกว้างและความยาวของสายส่งนี้จะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ โดยอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม



รูปที่ 4.5 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้ปรับปรุงจากโปรแกรม CST

4.2.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

การพิจารณาการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งในการพิจารณาค่าดังกล่าวก็ต้องพิจารณาที่ความถี่ใช้งานทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ UWB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3.1GHz – 10.6GHz

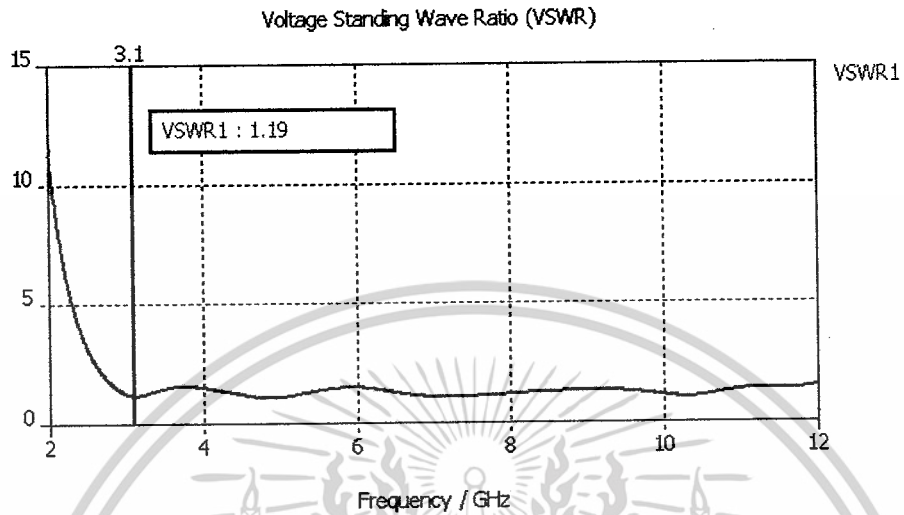


รูปที่ 4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้ปรับปรุงจากโปรแกรม CST

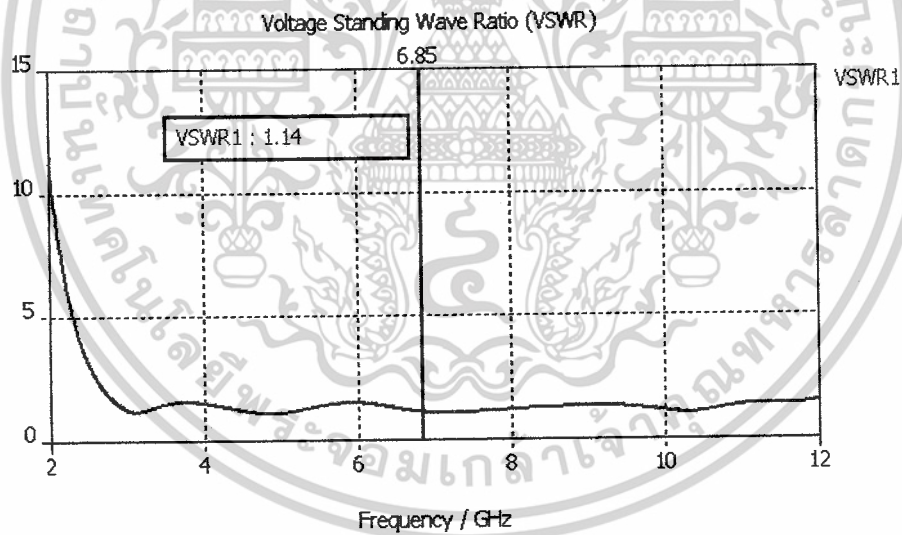
4.2.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio) คือค่าแรงดัน V_{max} ของคลื่นนิ่ง และแรงดัน V_{min} ของคลื่นที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันและตรงกันข้ามตามลำดับ โดยการนำอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุดก็จะเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ของแรงดัน โดยการพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนี้ ไม่ควรมีค่าเกิน 2 หรือต้องไม่สูงกว่า 2 นั้นเอง ที่สามารถยอมรับนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าจะให้ดีด้วยจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 จะดีมากกว่า

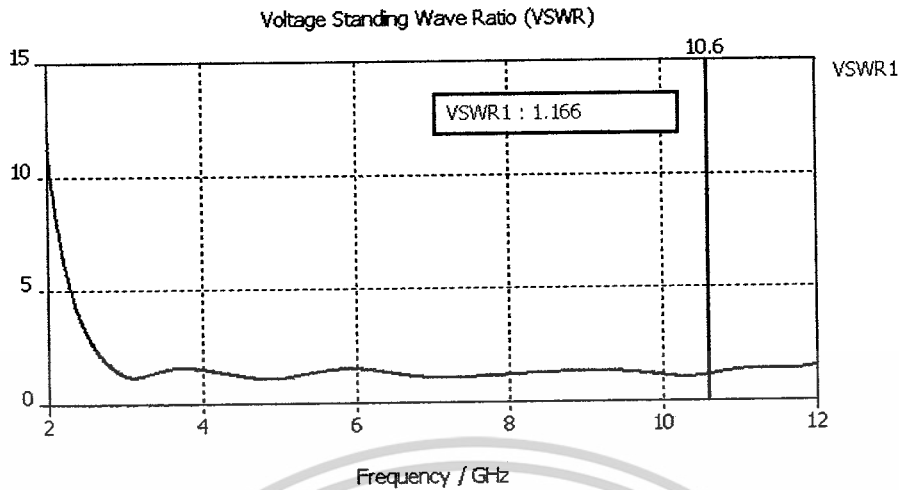


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้ปรับปรุงจากโปรแกรม CST

(ก) ความถี่ 3.1 GHz

(ข) ความถี่ 6.85 GHz

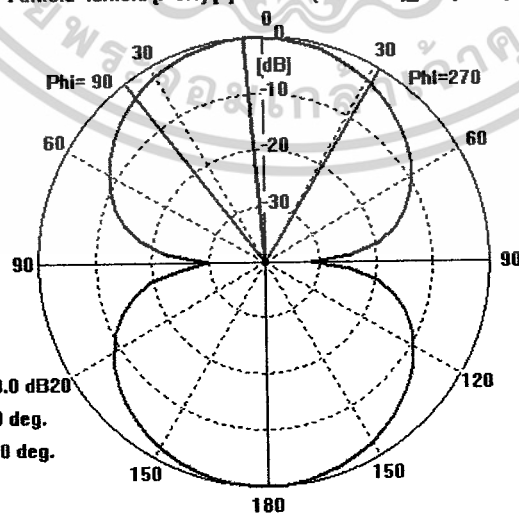
(ค) ความถี่ 10.6 GHz

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST ที่ได้มีการปรับปรุงโดยการเจาะสล๊อคใหม่ พบว่า VSWR ที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่าประมาณ 1.19:1 ที่ความถี่ 6.85 GHz มีค่าประมาณ 1.14:1 ที่ความถี่ 10.6 GHz มีค่าประมาณ 1.166:1 ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณากับหลักการเบื้องต้นที่ว่าค่า VSWR ต้องมีค่าต่ำกว่า 2 ก็ถือว่าค่า VSWR ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้งานได้ดีกว่าครั้งแรกที่ได้ออกแบบ

4.2.4 พิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่ได้ปรับปรุงจากโปรแกรม CST

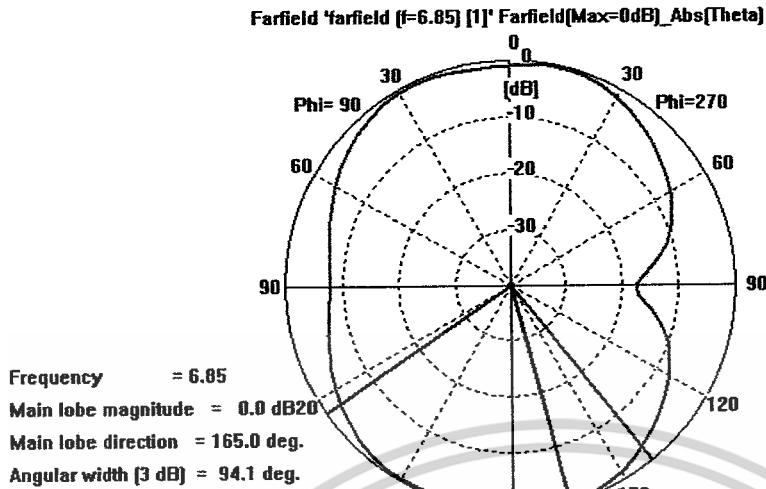
- ที่ความถี่ 3.1 GHz

Farfield 'farfield [f=3.1] [1]' Farfield(Max=0dB)_Abs[Theta]

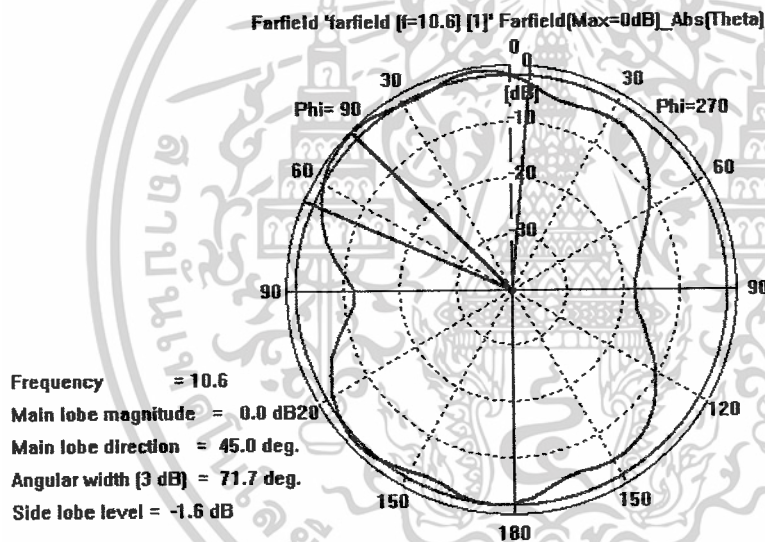


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 6.85 GHz



- ที่ความถี่ 10.6 GHz



รูปที่ 4.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

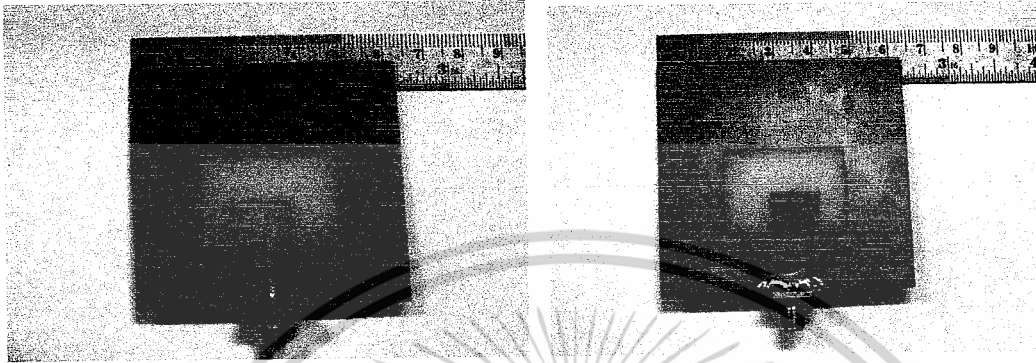
- (ก) ความถี่ 3.1 GHz
- (ข) ความถี่ 6.85 GHz
- (ค) ความถี่ 10.6 GHz

จากกราฟที่ความถี่ที่เราทำการเปรียบเทียบระหว่าง สายอากาศที่ไม่ได้ทำการเจาะสล๊อตกับสายอากาศที่มีการเจาะสล๊อตพบว่า รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ที่สามความถี่ที่ได้จากโปรแกรมออกแบบสายอากาศมีรูปแบบที่มีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบ

จากการวิเคราะห์การออกแบบ และการสร้าง ทำให้เราทราบถึงขนาดและส่วนประกอบต่างๆ โดยให้ทำงานที่ย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ตั้งแต่ย่านความถี่ 3.1GHz – 10.6GHz ซึ่งเมื่อสร้างก็จะได้ชิ้นงานออกมาดังในรูป 4.9



(ก) แพทช์การแพร่กระจายคลื่น

(ข) แผ่นรูประนาบเงา

รูปที่ 4.9 สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับการวัดและการทดสอบค่าต่างๆ ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุ (Network Analyzer: รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุนี้สามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณพร้อมทั้งค่าต่างๆออกมาโดยละเอียดส่วนอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ได้แก่ตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องวัดจะใช้หัวต่อเป็นแบบ SMA และอุปกรณ์ที่ใช้ในการคาร์ริเบรทสัญญาณ

การทดลองจะประกอบไปด้วยการวัดและการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ และค่าอัตราขยายของสายอากาศ เป็นต้นซึ่งผลจากการทดลองที่ได้นี้จะนำมาวิเคราะห์หาความผิดพลาดของการคำนวณว่าได้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่อย่างไรเพื่อนำมาปรับปรุงสายอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง Network Analyzer : รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz
2. ชุดคาร์ริเบรท
3. สายอากาศไมโครสตริป
4. เครื่องส่งสัญญาณ Access Point
5. Computer Notebook

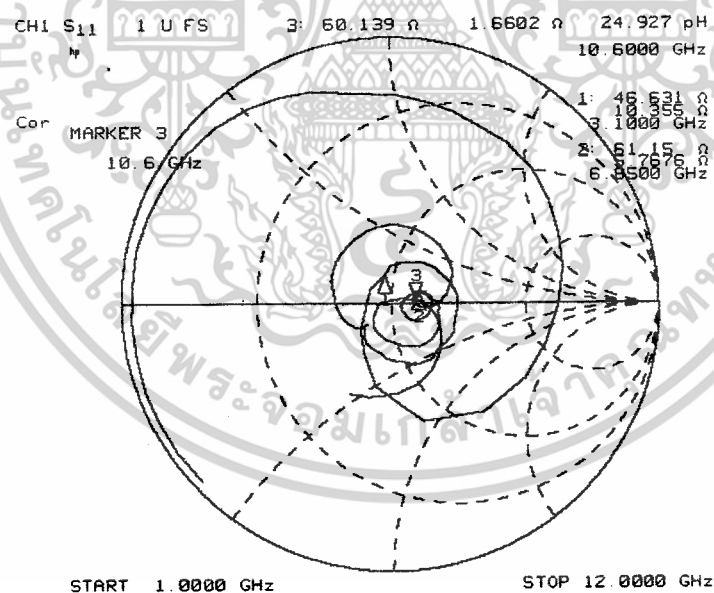
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการคาร์ิเบรทเครื่อง Network Analyzer ด้วยชุดคาร์ิเบรท
2. เลือกความถี่เริ่มต้น 1 GHz และความถี่สุดท้าย 12GHz
3. ทำการต่อสายอากาศไมโครสตริป เข้ากับเครื่อง Network Analyzer
4. ทดสอบการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปด้วยเครื่อง Network Analyzer
5. ทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Return loss)
6. ทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป (VSWR)
7. ทดสอบการหาค่าแบนด์วิธ (Bandwidth : BW)
8. ทดสอบการหาค่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)
9. ทดสอบการหาค่าอัตราขยายสายอากาศ (Gain)

4.3.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

โดยการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปนี้โดยการอ่านค่า Smith chart จากเครื่อง Network Analyzer โดยกำหนดให้ Marker 1 เป็นความถี่ Center ที่ 3.1 GHz Marker 2 เป็นความถี่ Center ที่ 10.6 GHz ซึ่งผลการทดสอบจะได้ดังในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

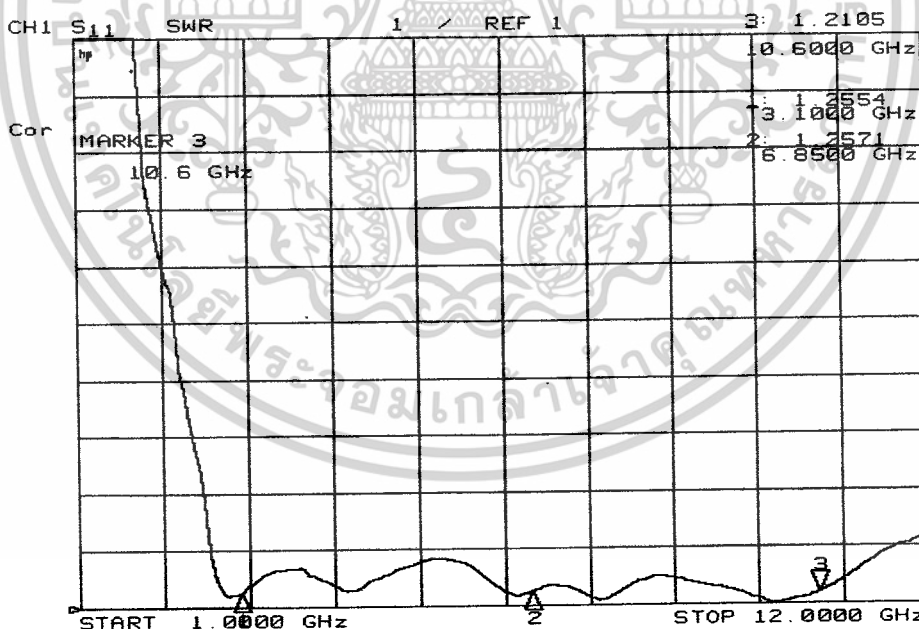
ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

Maker	ความถี่ที่ใช้งาน	ค่าอิมพีแดนซ์ Ω
1	3.1 GHz	46.631-j10.355
2	6.85 GHz	61.15+j5.77
3	10.6GHz	60.139+j1.660

ซึ่งในการวัดค่าอิมพีแดนซ์นี้เราต้องทำให้ค่าจินตภาพของสายอากาศเข้าสู่ศูนย์มากที่สุดเพื่อจะได้เฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นค่าจริง โดยผลจากการทดสอบจะพบว่า ที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 46.631-j10.355 โอห์ม ที่ความถี่ 6.85 GHz มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 61.15+j5.77 และที่ ความถี่ 10.6 GHz มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 60.139+j1.660 โอห์มจะเห็นได้ว่าค่าที่เราทดสอบทั้งสามความถี่ มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เราต้องการคือ 50 โอห์ม ซึ่งค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้จะมีผลต่อค่า Return Loss และค่า VSWR ในการทดสอบต่อไป

4.3.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปนี้ก็จะทำการทดสอบคล้ายๆกับการหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์คือ จะดูอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ใช้งานทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์โดยให้ Maeker 1 คือความถี่ใช้งาน 3.1 GHz และที่ Maeker 2 ความถี่ที่ใช้งาน 10.6 GHz ซึ่งผลการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

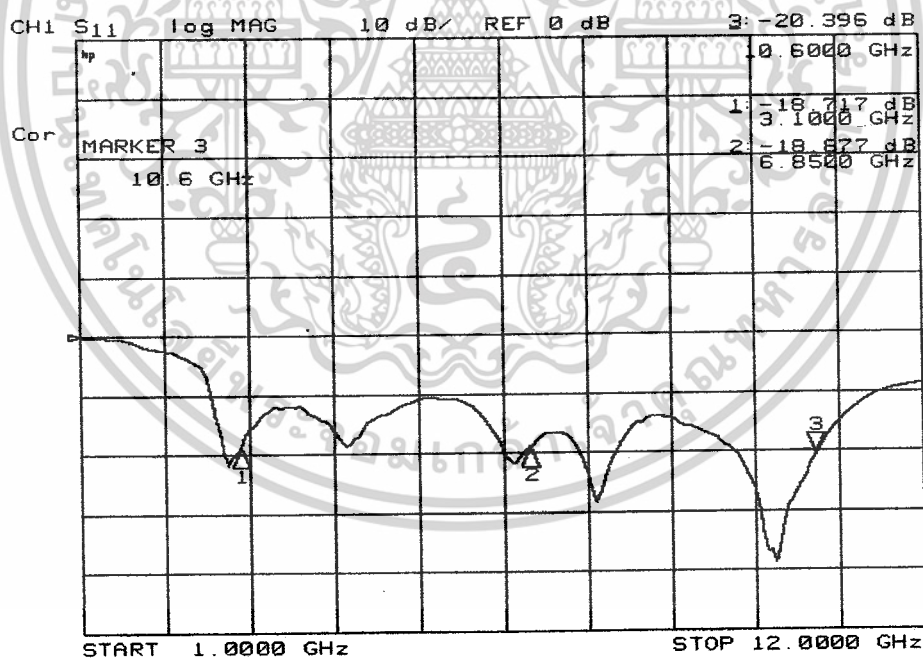
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป

Maker	ความถี่ที่ใช้งาน	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
1	3.1 GHz	1.255:1
2	6.85 GHz	1.257:1
3	10.6 GHz	1.21 :1

จากการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.255:1 ความถี่ 6.85 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.257:1 และที่ความถี่ 10.6 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.21:1 โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องการนี้จะสามารถใช้งานได้นั้นต้องมีค่าต่ำกว่า 2:1 แต่จะให้ใช้งานมีประสิทธิภาพต้องให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้นต่ำกว่า 1.5:1 ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่าทั้ง 3 ความถี่นั้นสามารถนำมาใช้งานได้แต่ในบางความถี่ซึ่งไม่ได้มารัดไว้ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเข้าใกล้ 2:1

4.3.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

ในการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์จะทำการวัด โดยดูที่ความถี่ใช้งานทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์โดยให้ Marker 1 คือความถี่ใช้งาน 3.1 GHz และที่ Marker 2 ความถี่ที่ใช้งาน 10.6 GHz ซึ่งผลการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 4.12



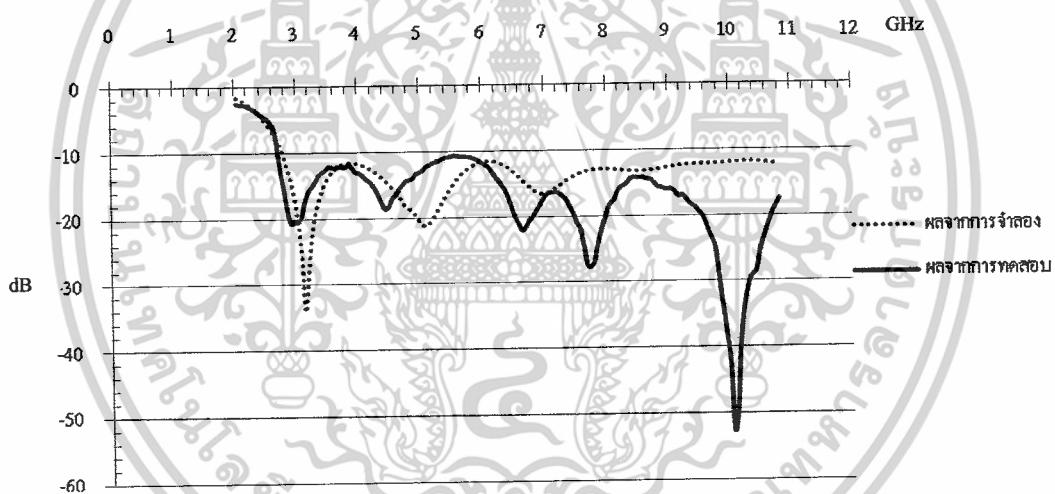
รูปที่ 4.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริป

Maker	ความถี่ที่ใช้งาน	การสูญเสียย้อนกลับ
1	3.1 GHz	-18.717 dB
2	6.85 GHz	-18.877 dB
3	10.6 GHz	-20.396 dB

จากผลการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้พบว่าที่ความถี่ 3.1GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ เท่ากับ -18.717 dB ที่ความถี่ 6.85 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -18.877 dB และที่ความถี่ 10.6 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -20.396 dB โดยค่าในการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้ค่าที่สามารถใช้งานได้ต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ซึ่งพบว่าทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ นั้นสามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่า -10dB เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับสายอากาศไมโครสตริประหว่างการทดลองกับการทดสอบจะได้ค่าดังในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

จากกราฟจะเห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม CST จะมีความแตกต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบเนื่องด้วยองค์ประกอบทางกายภาพ เช่นการเชื่อมต่อคอนเน็คเตอร์ การกักตายนองแดงเป็นต้น ซึ่งผลที่วัดจริงจะมีค่า Return loss ที่ดีกว่าในช่วงความถี่สูง ส่วนทางด้านความถี่ต่ำนั้นมีความคล้ายคลึงกัน ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 8 GHz ส่วนที่ความถี่ 8 GHz ขึ้นไปมีค่าแนวโน้มที่แตกต่างกัน

4.3.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

ในการทดสอบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การทดสอบนั้นจะทำในห้องที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถทำได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้อง ส่วนของระยะที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณที่ค่าสนามไฟฟ้าที่ตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกลบริเวณสนามระยะไกลมีสมการดังนี้

$$\text{Far Field Distance (R)} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

โดยที่ R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง (เมตร)

D = มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (เมตร)

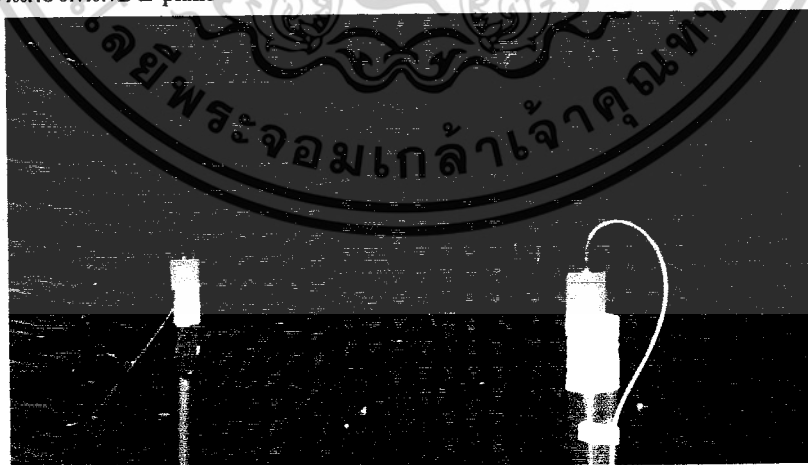
ระยะที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยที่ D = 0.063 เมตร

λ = 0.0283 เมตร

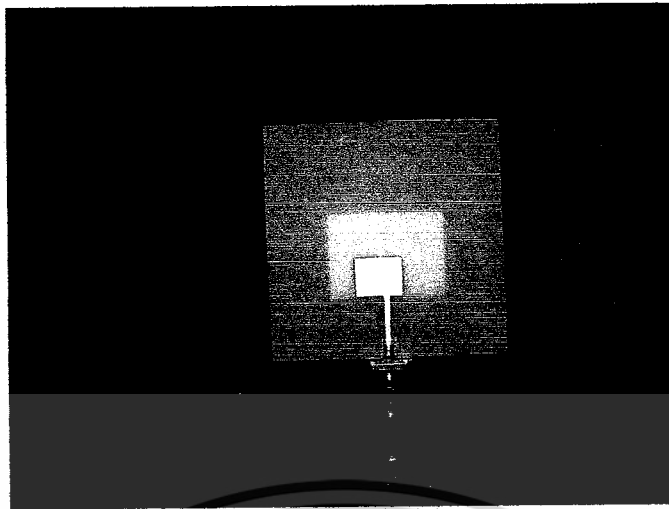
$$\text{Far Field Distance (R)} = \frac{2(0.063)^2}{0.0283} = 0.280 \text{ เมตร}$$

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ Far Field ที่มากกว่า 0.28 เมตร คือใช้ระยะที่ 1.15 เมตร ในระนาบ E-Plane โดยติดตั้งสายอากาศที่ไว้รับและส่ง ให้โพรบตั้งฉากกับพื้นระนาบโดยนำสายอากาศ ไปติดตั้งที่แท่นหมุนซึ่งจะหมุนด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ ครั้งละ 10 องศา และวัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างๆจนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ระบบเครือข่าย Network Analyzer เป็นตัวส่งและรับส่วนการวัดค่ากำลังสนามในระนาบ H-Plane นั้นต้องติดตั้งสายอากาศที่ไว้รับและส่งให้โพรบขนาน กับพื้นระนาบและทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ E-plane

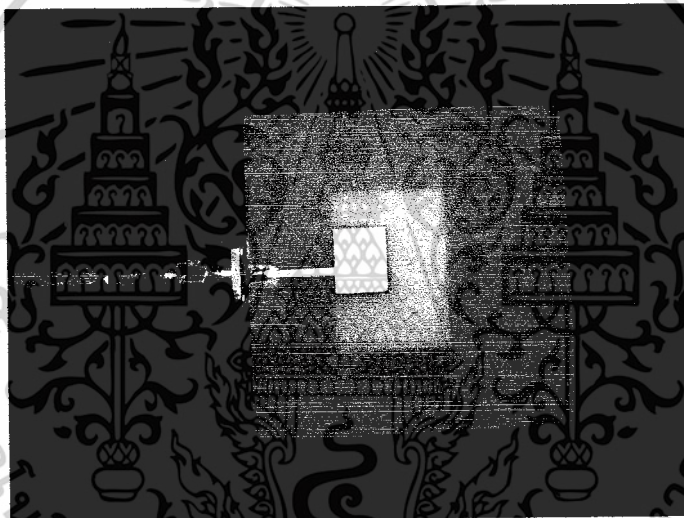


รูปที่ 4.14 การจัดวางสายอากาศภายในห้องเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



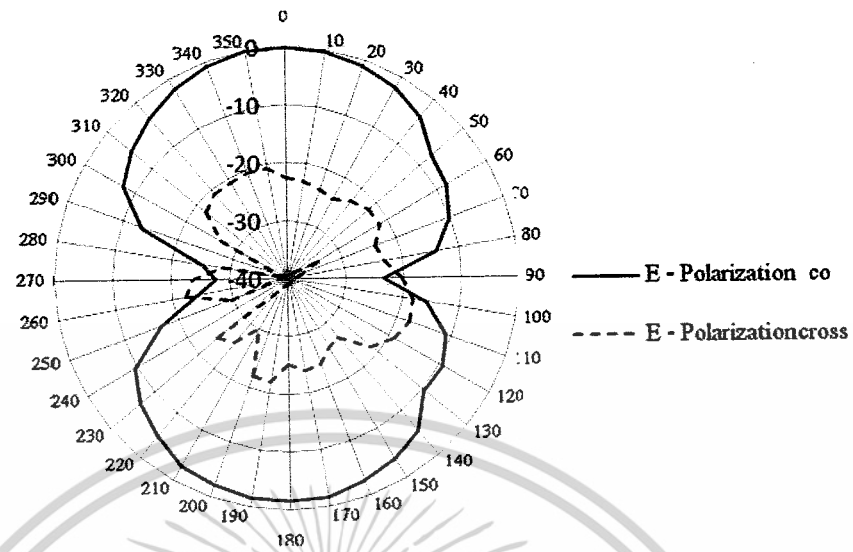
(ข)

รูปที่ 4.15 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ

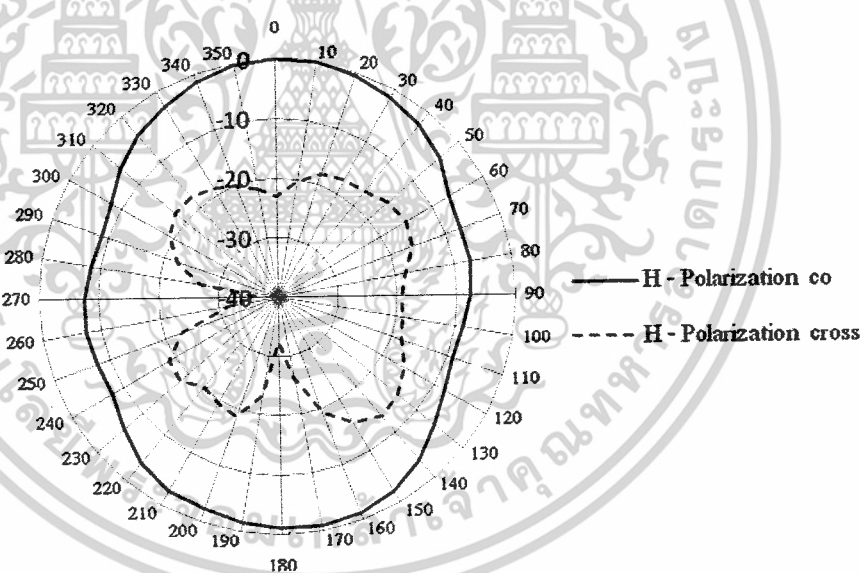
(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



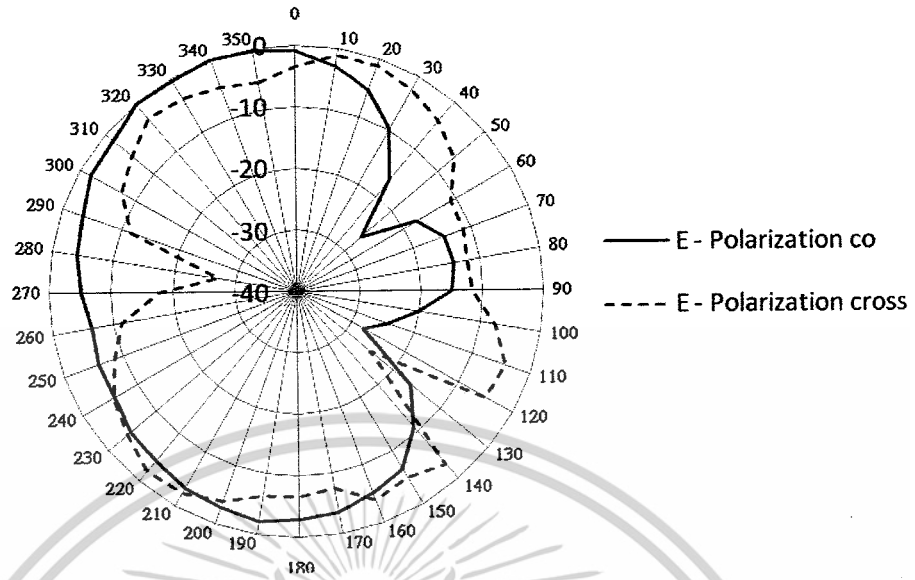
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



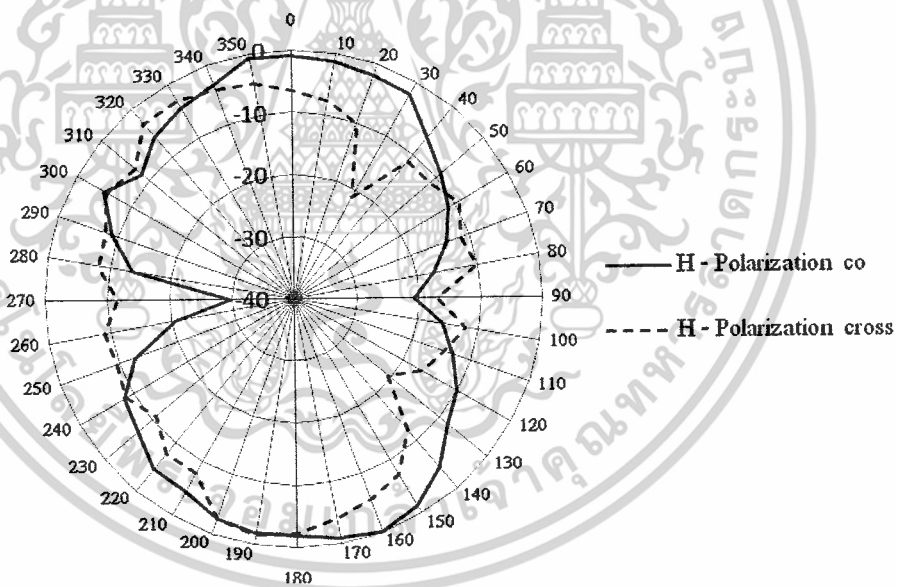
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.16 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



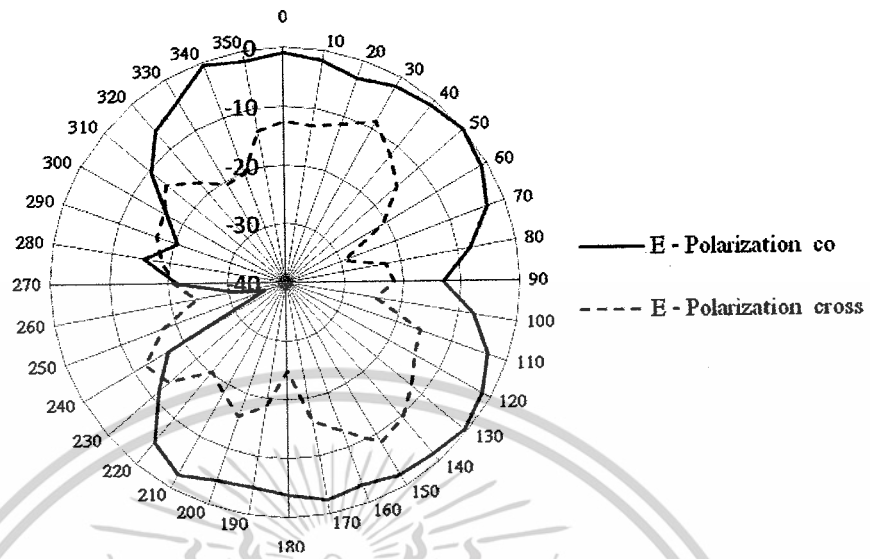
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



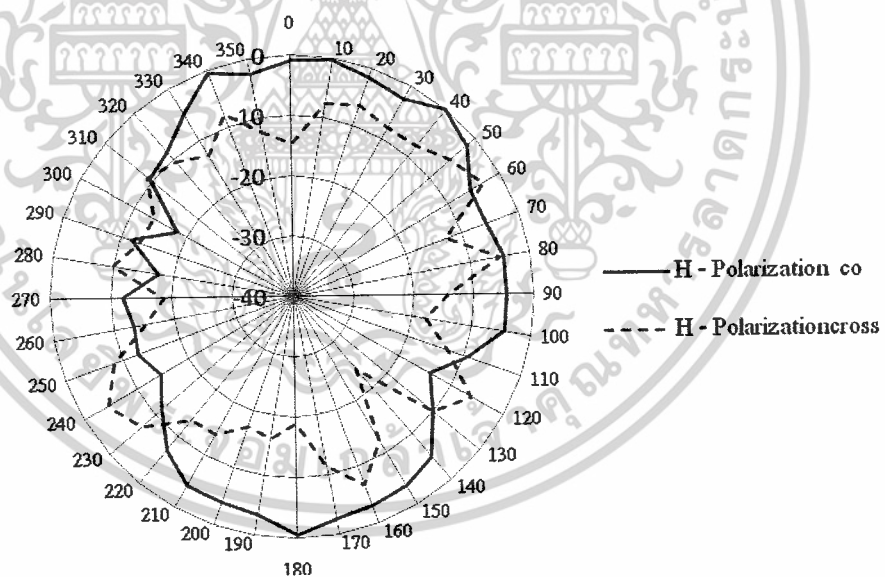
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.17 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.85 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



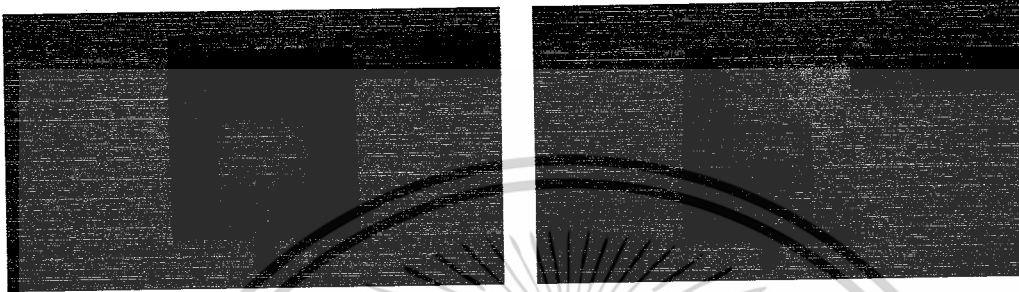
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.18 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบการปรับปรุงสายอากาศ

จากการวิเคราะห์การออกแบบ และการสร้าง ทำให้เราทราบถึงขนาดและส่วนประกอบต่างๆ โดยทำการปรับปรุงโดยการทำสายอากาศใหม่โดยทำการเจาะสลีต ขนาดความกว้าง 2 mm ความยาว 8 mm โดยทำงานซิมมูลेशनเพื่อให้รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ตั้งแต่ย่านความถี่ 3.1GHz – 10.6 GHz ซึ่งเมื่อสร้างก็จะได้ชิ้นงานออกมาดังในรูป 4.19

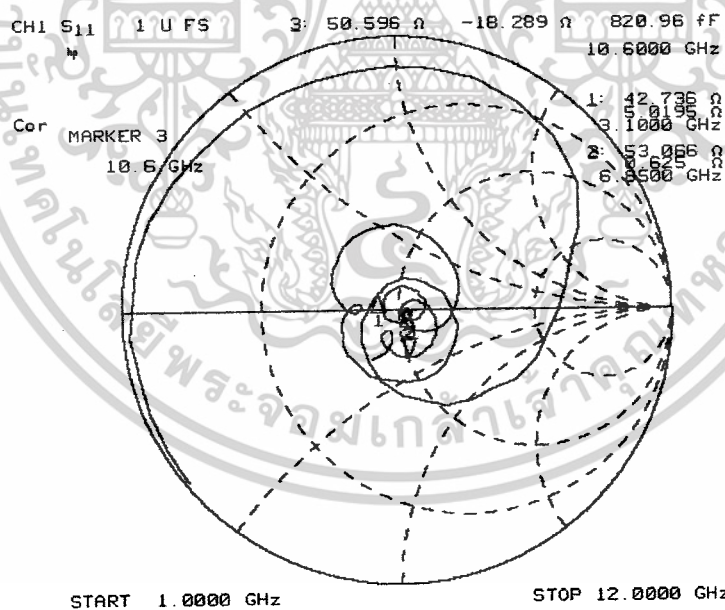


(ก) แพทช์การแพร่กระจายคลื่น

(ข) แผ่นรูปประธานาภิเษก

รูปที่ 4.19 สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการทดสอบ

4.4.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 4.20 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ

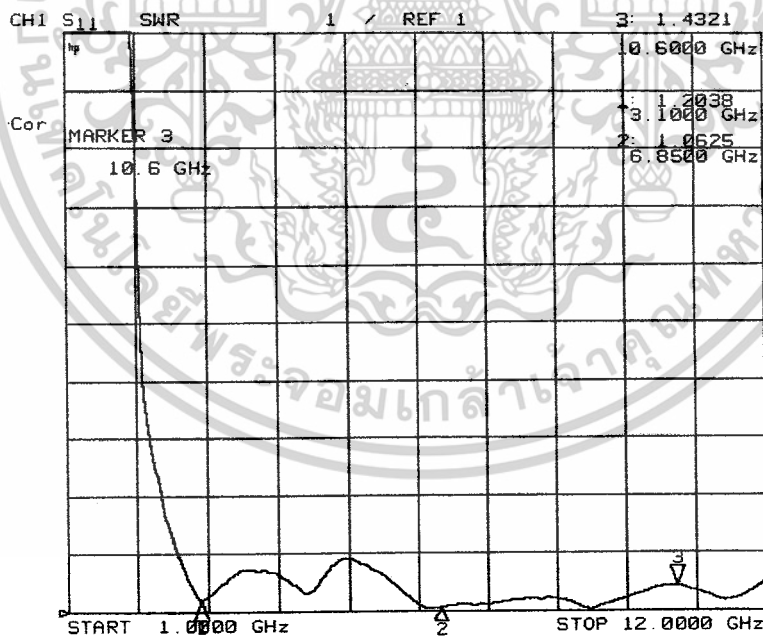
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

Maker	ความถี่ใช้งาน	ค่าอิมพีแดนซ์ Ω
1	3 GHz	42.191+j4.502
2	4 GHz	38.947-j21.602
3	5 GHz	31.217+j3.497
4	6 GHz	77.742+j4.679
5	7 GHz	54.732-j1.117
6	8 GHz	51.178+j8.679
7	9 GHz	53.561-j3.857
8	10 GHz	65.359-j2.75
9	11 GHz	43.189-j3.728

ซึ่งในการวัดค่าอิมพีแดนซ์นี้เราจะต้องพยายามทำให้ค่าจินตภาพของสายอากาศเข้าสู่ศูนย์มากที่สุดเพื่อจะได้เฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นค่าจริงเพื่อทำให้สัญญาณไม่เกิดการสะท้อนโดยผลการทดลองจะได้ในตารางที่ 4.4

4.4.2 การทดสอบหาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)



รูปที่ 4.21 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากการทดสอบ

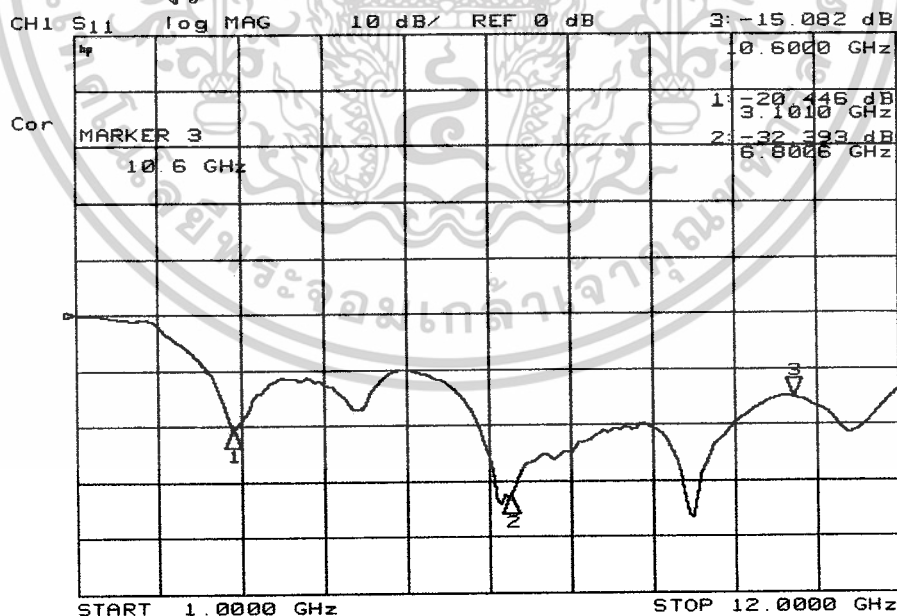
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป

Maker	ความถี่ที่ใช้งาน	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
1	3 GHz	1.25:1
2	4 GHz	1.692:1
3	5 GHz	1.61:1
4	6 GHz	1.561:1
5	7 GHz	1.108:1
6	8 GHz	1.187:1
7	9 GHz	1.077:1
8	10 GHz	1.314:1
9	11 GHz	1.316:1

จากการทดสอบที่ได้หาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ 3 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.25:1 ที่ความถี่ 6 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.561:1 และที่ความถี่ 10 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.314:1 โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องการนี้จะสามารถใช้งานได้นั้นต้องมีค่าต่ำกว่า 2:1 แต่จะให้ใช้งานจริงๆต้องให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้นต่ำกว่า 1.5:1 ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่าค่าส่วนมากนั้นมีค่าต่ำกว่า 1.5:1 แต่ก็ยังมีบางช่วงความถี่ที่ค่าเกิน 1.5:1 แต่โดยภาพรวมแล้วสามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากต่ำกว่า 2:1 ทั้งย่านความถี่

4.4.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)



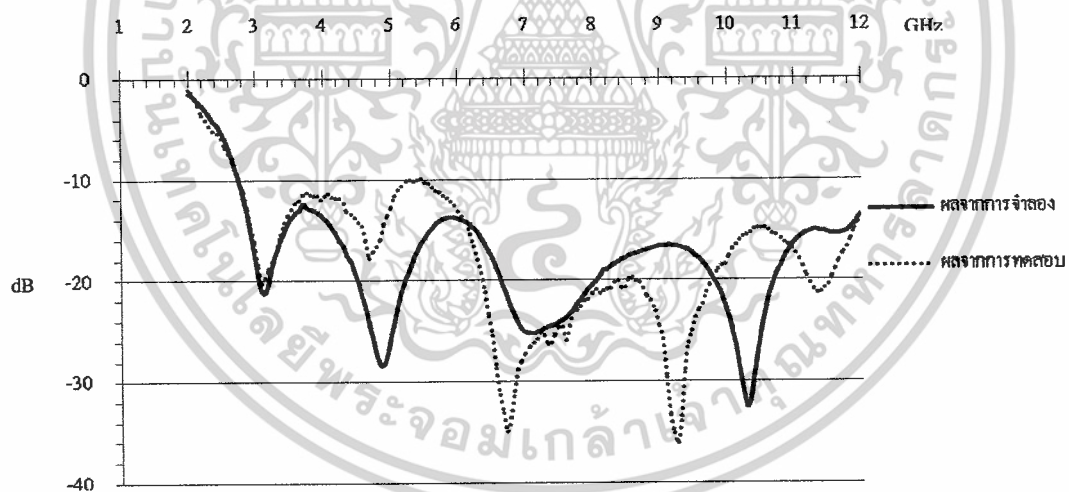
รูปที่ 4.22 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริป

Maker	ความถี่ที่ใช้งาน	การสูญเสียย้อนกลับ (dB)
1	3 GHz	-18.703
2	4 GHz	-11.654
3	5 GHz	-12.754
4	6 GHz	-13.217
5	7 GHz	-26.557
6	8 GHz	-20.889
7	9 GHz	-25.836
8	10 GHz	-17.55
9	11 GHz	-17.402

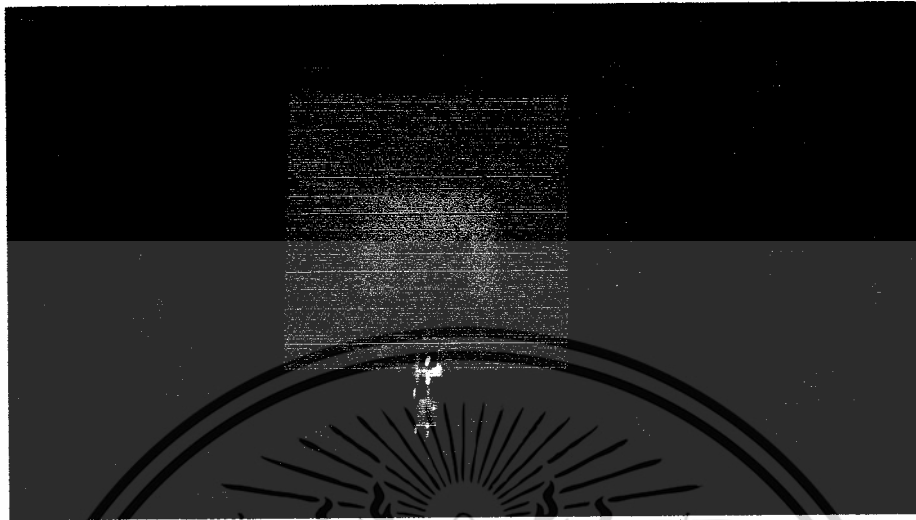
เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียย้อนกลับสายอากาศไมโครสตริป ระหว่างการจำลองกับการทดสอบจะได้ค่าดังในรูปที่ 4.23



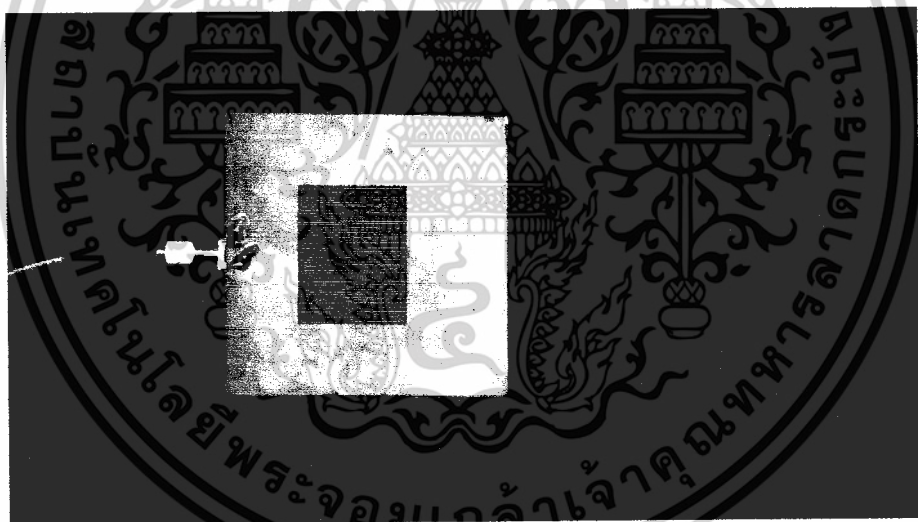
รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ที่ได้มีการปรับปรุง

จากกราฟจะเห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม CST จะมีความแตกต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบเนื่องด้วยองค์ประกอบทางกายภาพ เช่น การคาริเบรทสายสัญญาณการกีดขวางของแดง การเชื่อมต่อคอนเน็คเตอร์ ซึ่งผลที่วัดจริงและจำลองจากโปรแกรมจะมีค่า return loss ที่คล้ายคลึงกันของการจำลองและการทดสอบแต่มีแนวโน้มว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันแต่มี

การเบี่ยงเบนเกิดขึ้น ในบางช่วงความถี่ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการนำชุดข้อมูลที่มีค่าไม่เท่ากันพอดี มาทำการพล็อตกราฟ



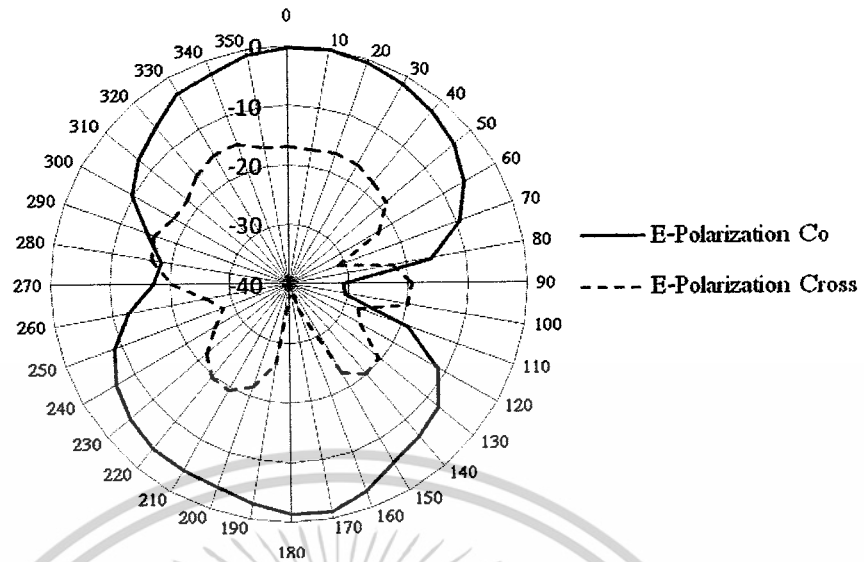
(ก)



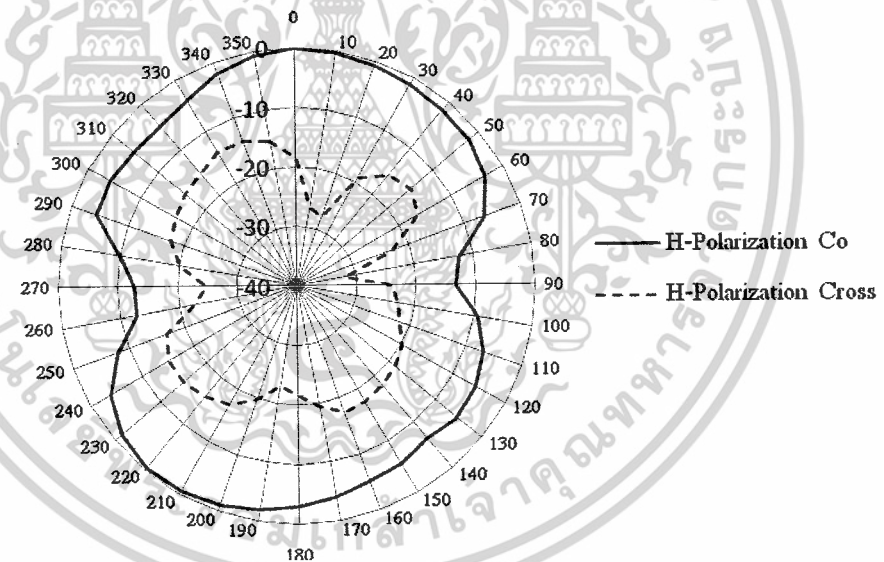
(ข)

รูปที่ 4.24 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



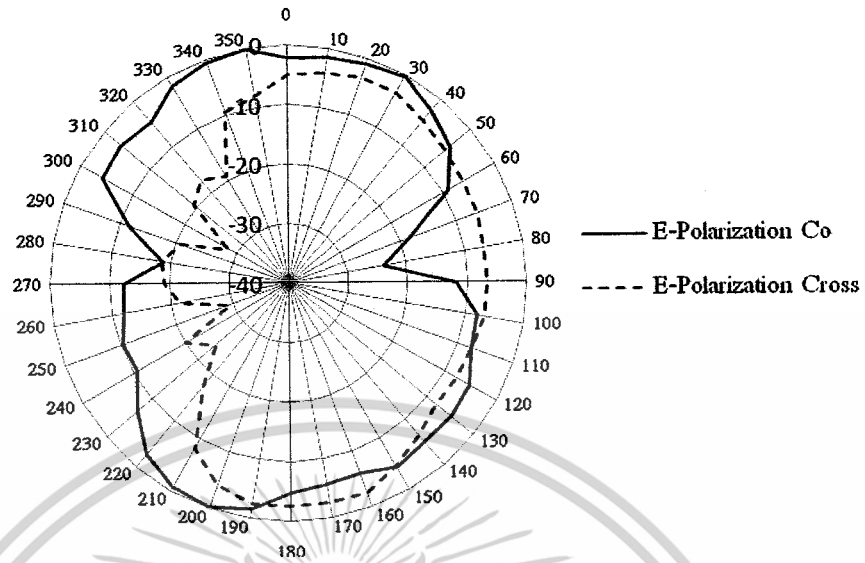
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



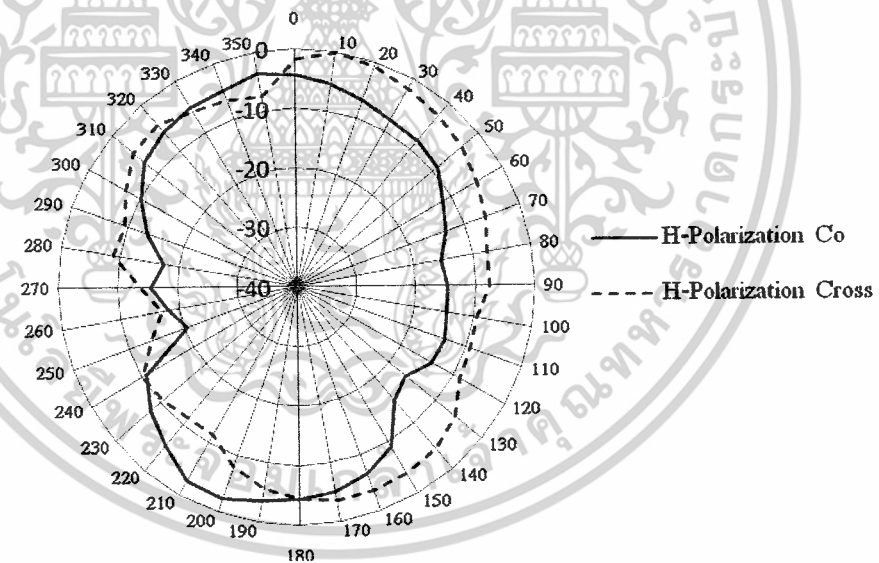
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.25 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



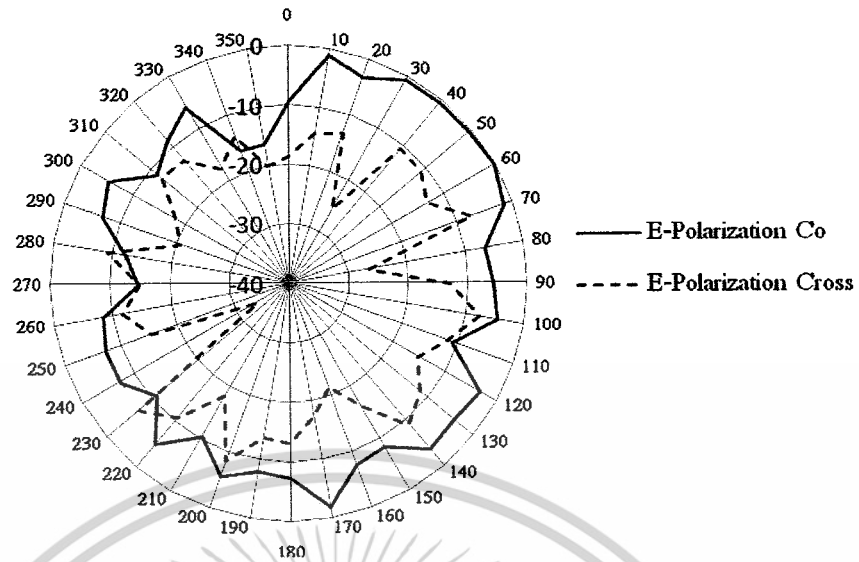
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



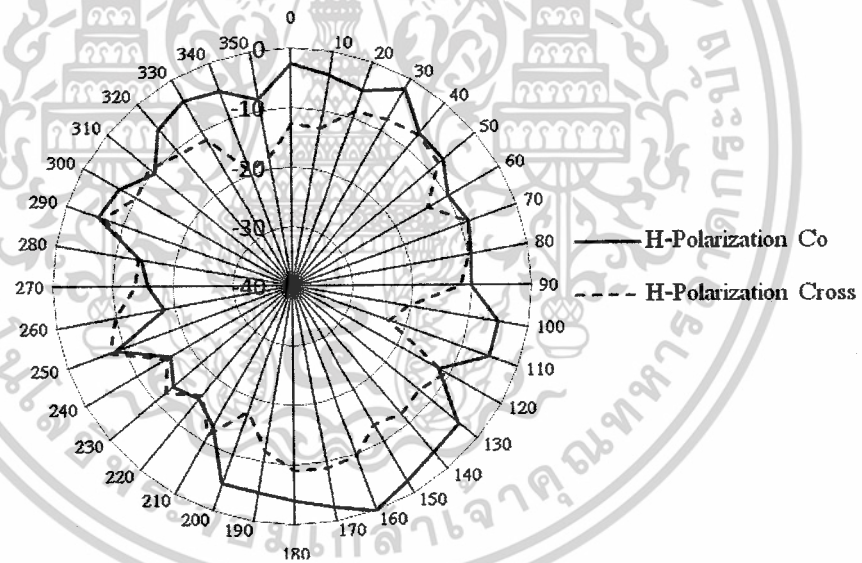
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.26 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.85 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.27 รูปแบบแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$L_S (dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (4-2)$$

จากการทดลองวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบแผ่นสตริปที่มีการโพลาริซแบบเชิงเส้นที่ความถี่ ระหว่าง 3.10GHz, 6.85GHz และ 10.6 GHz ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ $d = 1.15$ m. ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราขยายกรณีไม่มีสล็อต

ความถี่	ครั้งที่ 1 (dB)	ครั้งที่ 2 (dB)	ครั้งที่ 3 (dB)	ค่าเฉลี่ย (dB)
3.1GHz	-34.253	-35.54	-35.016	-34.936
6.85GHz	-45.515	-45.63	-45.974	-45.706
10.6GHz	-47.491	-47.982	-46.65	-47.374

ที่ความถี่ 3.1 GHz

$$P_R(\text{dBm}) = -35.563 \text{ dBm}$$

$$P_T(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 1.15}{46 \times 10^{-3}} \right) = 43.48 \text{ dB}$$

$$L_{fT}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$L_{fR}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$G_R(\text{dBi}) = \frac{43.48 \text{ dBi} - 34.936 \text{ dBi}}{2} = 4.273 \text{ dBi}$$

ที่ความถี่ 6.85 GHz

$$P_R(\text{dBm}) = -45.706 \text{ dBm}$$

$$P_T(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 1.15}{43.796 \times 10^{-3}} \right) = 50.365 \text{ dBi}$$

$$L_{fT}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$L_{fR}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$G_R(\text{dBi}) = \frac{50.365 \text{ dBi} - 45.706 \text{ dBi}}{2} = 2.329 \text{ dBi}$$

ที่ความถี่ 10.6 GHz

$$P_R(\text{dBm}) = -49.638 \text{ dBm}$$

$$P_T(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 1.15}{28.3 \times 10^{-3}} \right) = 54.158 \text{ dBi}$$

$$L_{fT}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$L_{fR}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$G_R(\text{dBi}) = \frac{54.158 \text{ dBi} - 47.374 \text{ dBi}}{2} = 3.39 \text{ dBi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราขยายกรณีมีสล็อต

ความถี่	ครั้งที่ 1 (dB)	ครั้งที่ 2 (dB)	ครั้งที่ 3 (dB)	ค่าเฉลี่ย
3.1GHz	-33.951	-34.364	-35.433	-34.583
6.85GHz	-39.263	-46.147	-47.195	-44.20
10.6GHz	-46.505	-46.503	-50.326	-47.778

ที่ความถี่ 3.1 GHz

$$P_R(\text{dBm}) = -34.583 \text{ dBm}$$

$$P_T(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 1.15}{46 \times 10^{-3}} \right) = 43.478 \text{ dBi}$$

$$L_{fT}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$L_{fR}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$G_R(\text{dBi}) = \frac{43.478 \text{ dBi} - 34.583 \text{ dBi}}{2} = 4.447 \text{ dBi}$$

ที่ความถี่ 6.85 GHz

$$P_R(\text{dBm}) = -44.20 \text{ dBm}$$

$$P_T(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 1.15}{43.796 \times 10^{-3}} \right) = 50.365 \text{ dBi}$$

$$L_{fT}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$L_{fR}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$G_R(\text{dBi}) = \frac{50.365 \text{ dBi} - 44.20 \text{ dBm}}{2} = 3.083 \text{ dBi}$$

ที่ความถี่ 10.6 GHz

$$P_R(\text{dBm}) = -47.778 \text{ dBm}$$

$$P_T(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 1.15}{28.3 \times 10^{-3}} \right) = 54.158 \text{ dB}$$

$$L_{fT}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$L_{fR}(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

$$G_R(\text{dBi}) = \frac{54.158 \text{ dBi} - 47.778 \text{ dBm}}{2} = 3.19 \text{ dBi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่า Gain ระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม

ความถี่ (GHz)	ผลซิมไม่มี slot (dBi)	ผลวัดไม่มี slot (dBi)	ค่าผิดพลาด error (%)	ผลซิมมี slot (dBi)	ผลวัดมี slot (dBi)	ค่าผิดพลาด error (%)
3.1	4.545	4.273	5.98	4.539	4.447	2.03
6.85	4.265	2.329	45.392	4.219	3.083	26.93
10.6	5.805	3.39	41.6	5.451	3.19	41.48

จากการวัดค่า Gain ของสายอากาศเราพบว่า ที่ความถี่ 3.1 GHz ค่าผิดพลาดของผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับผลจากการทดสอบ มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี ส่วนที่ความถี่ 6.85 GHz ค่าของค่าผิดพลาดระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมกับการทดสอบจริงมีค่ามาก เนื่องจากการจำลองด้วยโปรแกรมมิได้คิดผลกระทบของ อุปกรณ์ในการ ใช้งานเพื่อทดสอบเช่น สายสัญญาณ ชุดหัวต่อคาร์ริเบรท ซึ่งทำให้เกิด การวัดที่มีการเบี่ยงเบน ไป โดยมี loss ภายในสายค่อนข้างมากที่ความถี่สูงส่วนผลกรณีที่มี slot และไม่มี slot จะพบว่าที่ความถี่นี้กรณีที่เรานำเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะพบว่าค่าที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ ส่วนที่ความถี่ 10.6 GHz ก็มีลักษณะคล้ายกับความถี่ 6.85 GHz โดยมีค่า error ของการทดสอบและทดลองสูงใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากปัญหาทางกายภาพของการวัด เช่น loss ภายในสายที่สูง ความแน่นอนของการคาร์ริเบรทสายสัญญาณ ที่ความถี่นี้ ค่าแกนของสายอากาศของกรณีมี slot และ ไม่มี slot จะมีค่าใกล้เคียงกัน

สรุป

ในบทนี้จะแบ่งเป็นสามส่วนใหญ่ๆ โดยส่วนแรกจะเป็นการอธิบายถึงการจำลองชิ้นงานภายในโปรแกรม CST เพื่อวัดคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศไมโครสตริบ โดยมีการกำหนดขนาดความกว้างยาวจากการออกแบบในบทที่ 3 และทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST เราจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 48.8 โอห์ม และค่า (Return Loss) ที่มีค่าต่ำกว่า -10dB ตลอดการ ใช้งานในย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz ค่า VSWR ที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่าเท่ากับ 1.091 : 1 ที่ความถี่ 6.85 GHz มีค่าเท่ากับ 1.373:1 และที่ความถี่ 10.6 GHz มีค่าเท่ากับ 1.675:1 ซึ่งทุกค่ามีค่าต่ำกว่า 2 ถือว่าสามารถนำไปใช้งานได้โดยเรา ได้ทำการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของสายอากาศโดยเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยโปรแกรมจะพบว่าผลของค่า Return loss VSWR จากการเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้เนื่องจากเมื่อเรานำเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จะพบว่าค่าที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้เนื่องจากเมื่อเรานำเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จะพบว่าค่าที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้

ส่วนที่สองเป็นการวัดผลการทดลองจริงจากการสร้างชิ้นงาน โดยเราจะทำการต่อชิ้นงานเข้ากับเครื่อง Network Analyzer โดยทำการวัดผล เช่น วัดค่า (Return Loss) โดยผลจากการวัดค่าได้ค่า return loss ที่มีค่าต่ำกว่า -10dB ตลอดการ ใช้งานในช่วงอัลตราไวด์แบนด์ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม ค่า VSWR มีค่าต่ำกว่า 2 ส่วนนี้เราได้ทำการเปรียบเทียบกับการวัดจริงของกรณีเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จะพบว่าค่าที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้และมีแนวโน้มที่ค่อนข้างเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และส่วนสุดท้ายเป็นการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น โดยเราจะทำการคาร์ริเบรทสาย และทำการติดตั้งการวัด ซึ่งผลจากการวัดกรณีไม่มีเอาผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จะพบว่าค่า การแพร่กระจายคลื่นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่าแกนของทั้งสองกรณีมีค่าแตกต่างกันไม่มากในกรณีทดสอบจริง แต่ถ้าเปรียบเทียบกับค่าที่จำลอง

ด้วยโปรแกรมมีค่าแตกต่างกันมากเนื่องด้วยองค์ประกอบทางกายภาพ เพราะเราชิมูเลชั่นด้วยโปรแกรม แต่การทดสอบจริงเราวัดจากเครื่องซึ่งมีสายต่อ ทำให้เกิดการลวดทอน หรือหัวคอนเน็กเตอร์ซึ่งเกิดความต้านทานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการสรุปการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่มีการใช้งานในเทคโนโลยี อัลตราไวด์แบนด์ที่มีช่วงความถี่ (3.1-10.6) GHz ซึ่งรองรับการใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลหรือที่เรียกว่า Personal area Network (PAN) โดยสายอากาศที่เราทำการออกแบบมีสองแบบด้วยกันคือแบบที่หนึ่งเป็นสายอากาศที่ไม่มีการทำช่องเปิด และสองเป็นสายอากาศที่มีทำช่องเปิดเราจะพบว่ากรณีที่เราทำการเจาะช่องเปิดจะมีค่าที่ดีกว่าเช่น อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสัญญาณ แต่ค่าในกรณีที่เราไม่เจาะช่องเปิดจะดีกว่าในเรื่องของค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งถ้าเรานำไปใช้งานเราควรที่จะเลือกสายอากาศที่ได้ทำการเจาะช่องเปิดเนื่องจากว่ามีช่วงความกว้างของความถี่ที่มากกว่า และมีค่าอัตราส่วนการสูญเสียย้อนกลับที่ดีกว่า แต่ค่าอิมพีแดนซ์ไม่ดีเท่ากรณีที่เราทำการเจาะช่องเปิด ข้อจำกัดของสายอากาศที่เราทำการออกแบบคือเป็นสายอากาศที่มีเกนซ์ไม่สูง เนื่องด้วยตัวของสายอากาศมีขนาดเล็ก ข้อควรปรับปรุงคือเราควรปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เราทำการออกแบบให้มีค่าที่เข้าใกล้ 50 โอห์มมากๆ เนื่องจากว่าค่านี้มีผลในการแพร่กระจายคลื่นออกไปเพราะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังส่งของสายอากาศ และจากการออกแบบเราพบว่าสายอากาศไมโครสตริปที่เราทำการออกแบบนั้น มีระยะทางในการแพร่กระจายคลื่นที่สั้น เนื่องด้วยมีการใช้งานในย่านความถี่ที่สูงมาก ทำให้เกิดการลดทอนได้ง่ายและเราควรแก้ไขโดยทำอาเรียเพื่อเพิ่มเกนซ์ของสายอากาศเพื่อเพิ่มระยะการใช้งานให้มีการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น แต่ข้อดีของการที่เราส่งที่ความถี่สูงคือเราได้การส่งข้อมูลที่สูงขึ้น และจากการวิเคราะห์อัตราขยายของสายอากาศเราพบว่า กรณีที่เราทำการเจาะช่องเปิดจะให้ค่าเกนซ์ที่สูงกว่ากรณีที่เราไม่เจาะช่องเปิด จึงเป็นผลทำให้ระยะทางการส่งของกรณีที่เราได้ทำการเจาะช่องเปิดสูงกว่า ที่ความถี่ที่เราพิจารณา ในตารางข้างล่างและสามารถสรุปได้ว่าเราควรเลือกใช้สายอากาศที่มีการเจาะช่องเปิดเพื่อทำช่องเปิดเพราะว่ามีค่าที่ดีกว่าในหลายๆด้าน ส่วนการเปรียบเทียบกับห้องคลาดนั้นเราควรที่จะนำกรณีที่เราทำการเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยม ไปเปรียบเทียบกับเนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีคุณลักษณะที่ดีกว่า และในส่วนของเป้าหมายของการปฏิบัติงานที่เราได้ทำการตั้งเป้าหมายไว้ในบทที่ 3 พบว่า ค่าอัตราส่วนย้อนกลับของสัญญาณ มีค่าที่ใกล้เคียง -15 dB ซึ่งมีค่าใกล้ที่เราตั้งเป้าหมายไว้ ส่วนค่าความต้านทานก็มีค่าเข้าใกล้ 50 โอห์ม ส่วนค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันก็พบว่ามีค่าน้อยกว่า 2:1 ตลอดช่วงความถี่ และส่วนสุดท้ายคืออัตราขยายของสายอากาศเราพบว่ามีค่าสูงกว่าที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้เล็กน้อย และเราสามารถเขียนค่าที่เราวัดได้เป็นผลรวมดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบ

ความถี่ (GHz)	สายอากาศตัวที่ไม่มีการเจาะช่องเปิด			
	Return loss (dB)	Impedance (Ω)	VSWR :1	Gain (dBi)
3.1	-18.717	46.631-j10.355	1.255:1	4.273
6.85	-18.877	61.15+j5.77	1.257:1	2.329
10.6	-20.396	60.139+j1.660	1.213:1	3.39

ความถี่ (GHz)	สายอากาศที่มีการเจาะช่องเปิด			
	Return loss (dB)	Impedance (Ω)	VSWR:1	Gain (dBi)
3.1	-20.446	42.736+j5.02	1.204:1	4.447
6.85	-32.393	53.07+j0625	1.063:1	3.083
10.6	-15.082	50.60-j18.289	1.432:1	3.19

จากการวัดคุณลักษณะ การแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กในบทยี่ 4 กรณี PLF (Polarize loss factor) โดยเราทำการแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่เราไม่ได้ทำการเจาะช่องเปิดและกรณีที่เราทำการเจาะช่องเปิดเราพบว่าที่ความถี่ 3.1 GHz ค่า Cross มีค่าไม่สูงมากทำให้การรับคลื่นที่แพร่กระจายออกมามีประสิทธิภาพส่วนที่ความถี่ที่ 6.85 GHz ทั้งสองกรณีเราพบว่าค่า Cross มีค่าสูงมากทำให้การรับคลื่นที่ความถี่นี้ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากเกิดการสูญเสียเนื่องจาก PLF และสุดท้ายที่ความถี่ 10.6 GHz เราพบว่าค่า Cross มีค่าไม่สูงมากนัก ทำให้การสูญเสียเนื่องจาก PLF ที่ความถี่นี้มีไม่มากนัก แต่ว่าเนื่องจากที่ความถี่สูงทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีทิศทางที่ไม่แน่นอน

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้
ในทางด้านโทรคมนาคม ให้ทางคณะผู้จัดทำมีแนวทางในการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณเหล่าพี่ๆที่อยู่ห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกๆท่านที่ได้คอยชี้แนะเกี่ยวกับการ
วัดผลต่างๆและคอยแนะแนวทางในการสร้างชิ้นงานให้ได้ผลสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่ได้ช่วยเหลือให้การทำให้โครงการสำเร็จ
ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่ให้ความรัก ความหวัง โอบ กาลังใจ กำลังทรัพย์และ
ทุกสิ่งทุกอย่างกับทางคณะผู้จัดทำ

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Zhi-Ning Chen, Antennas for Portable Devices, John Wiley & son, 2007.
- [2] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & son, 2005.
- [3] JR James & PS Hall, Handbook of Microstrip Antennas, Peter Peregrinus Ltd, 1989.
- [4] ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร, การวิเคราะห์สายอากาศ, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] โมไนย ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2544.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้