

การออกแบบสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการ  
การเซาะร่อง สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง

**DESIGN OF SMALL RUGBY BALL ANTENNA AND RECTANGULAR  
ANTENNA WITH SLOT ETCHING FOR UWB APPLICATIONS**

พิพัฒน์ คงเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

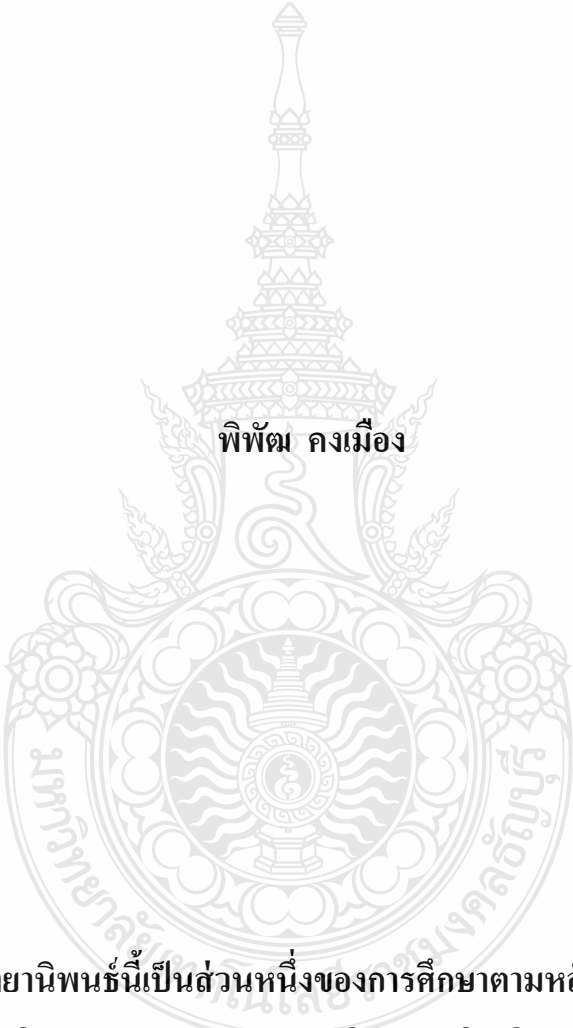
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบสายอากาศรับบี้อขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า  
ร่วมกับการเซาะร่อง สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง



พิพัฒ คมเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศรัศมีบอลลูนขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเซาะร่อง สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง
ชื่อ - นามสกุล	นายพิพัฒ คงเมือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์อำนวยการ เรื่องวาริ, Dr.-Ing
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบเรดาร์ทะเลพื้นดินเริ่มเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานการตรวจสอบระยะใกล้หลากหลายมากขึ้น แลบทความถี่ใช้งานที่รองรับระบบดังกล่าวอยู่ในช่วงความถี่กว้างยิ่ง การวิจัยและพัฒนาสายอากาศเพื่อรองรับระบบเรดาร์ทะเลพื้นดินจึงมีความจำเป็นเพราะว่าจากสายอากาศที่พบในอดีตยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ประยุกต์ใช้งานตามมาตรฐานระบบเรดาร์ทะเลพื้นดิน อีกทั้งสายอากาศที่ปรากฏอยู่ยังคงมีขนาดที่ไม่เหมาะสมและมีความซับซ้อนในการออกแบบและการสร้าง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การออกแบบสายอากาศที่มีการป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วม สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง ด้านการประยุกต์ใช้งานกับระบบเรดาร์ทะเลพื้นดิน โครงสร้างสายอากาศต้นแบบนี้ทำจากวัสดุฐานรองชนิดเฟอร์ไรท์ (FR-4) การออกแบบแบ่งเป็นสองส่วน คือ ในส่วนแรกจะเป็นการออกแบบสายอากาศรัศมีบอลลูนขนาดเล็ก และส่วนที่สองจะเป็นการออกแบบสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเทคนิคการเซาะร่อง การวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศต้นแบบทั้งสองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงประจักษ์ร่วมกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation Technology : CST)

ผลจากการจำลองแบบเปรียบเทียบกับผลจากการวัดจริงของสายอากาศต้นแบบทั้งสอง พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับสายอากาศรัศมีบอลลูนขนาดเล็ก มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 3.03-14.02 GHz และมีอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศเท่ากับ 4.79 dBi ส่วนสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเซาะร่อง มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 3.09-10.61 GHz และมีอัตราขยายเฉลี่ยเท่ากับ 3.83 dBi อีกทั้งสายอากาศต้นแบบทั้งสองมีการแผ่พลังงานในแบบรอบทิศทาง

**คำสำคัญ:** สายอากาศแบบรัศมีบอลลูนขนาดเล็ก สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่านความถี่กว้างยิ่ง

<b>Thesis Title</b>	Design of Small Rugby Ball Antenna and Rectangular Antenna with Slot Etching for UWB Applications
<b>Name - Surname</b>	Mr. Pipat Kongmuang
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Amnoiy Ruengwaree, Dr.-Ing
<b>Academic Year</b>	2012

### ABSTRACT

Recently, the ground penetrating radar (GPR) has become a popular technique using for near field detection application. The application frequency band of GPR system is in ultra-wide band (UWB) frequency range. The research and development of antenna for ground penetrating radar are necessary because the bandwidth of previous antennas do not covered operation frequency range of GPR standard. In addition, the existing antenna is unsuitable size and too sophisticated to design and fabricate.

This thesis presents the design of the antenna with coplanar waveguide fed for ultra wide band frequency range. The prototype antenna structure is fabricated from FR-4 material. The design of antenna structure has two parts. The first part is a small rugby ball antenna and the second part is rectangular antenna with slot etching. Both prototype antennas are designed and optimized with parameters using empirical method and Computer Simulation Technology (CST) program.

The simulation results agreed very well with the measurement results of both prototype antennas. The bandwidth of small rugby ball antenna covers ultra wide band frequency with frequency range from 3.03 GHz to 14.02 GHz and the average gain is 4.79 dBi. On the other hand, the rectangular antenna with slot etching is operated within the frequency range from 3.09 GHz to 10.61 GHz with antenna average gain 3.83 dBi. Finally, the radiation patterns of both prototype antennas are omni-directional pattern.

**Keywords:** small rugby ball antenna rectangular antenna ultra wide band frequency



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือในการออกแบบงานวิจัย การทดลอง ผล รวมถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยจาก ดร. อำนวย เรืองวาริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ขอขอบคุณ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร ดร.อภิรดา นามแสง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ อรรถทิมากุล ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และ ตรวจสอบข้อบกพร่องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยใน ครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ โทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือวิเคราะห์ โครงข่ายทางไฟฟ้า เพื่อการวัดและทดสอบชิ้นงานต้นแบบ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่ามาเพื่อประ สิทธิประสาทความรู้ และ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พิพัฒ คมเมือง



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.3 ทฤษฎีของคลื่น.....	4
2.4 สายอากาศ.....	8
2.5 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์.....	28
2.6 เรดาร์ทะลุพื้นดิน (Ground Penetrating Radar: GPR).....	30
2.7 การออกแบบสายส่งของสายอากาศแบบระนาบร่วม.....	33
2.8 การออกแบบความกว้างและความยาวของสายอากาศ.....	35
2.9 การออกแบบสายอากาศแบบรัศมีบอล.....	36
3 การออกแบบสายอากาศ.....	38
3.1 บทนำ.....	38
3.2 สายอากาศแบบรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง.....	38

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการ เซาะร่อง.....	56
4 ผลการทดลอง.....	74
4.1 บทนำ.....	74
4.2 การสร้างและวัดสายอากาศรีบ็อลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง..	74
4.3 การสร้างและการวัดสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้าง ยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง.....	82
5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของ SMA Connector.....	95
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของสายอากาศด้านตัวส่ง.....	104
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	129

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ย่านความถี่และความยาวคลื่น.....	8
2.2 เปรียบเทียบการใช้แบนด์วิธของเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย.....	29
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบ.....	67



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางไปยังตัวกลาง.....	7
2.2 การเบี่ยงเบนของคลื่นวิทยุ.....	7
2.3 ระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงาน.....	9
2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง.....	10
2.5 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก ระนาบสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H).....	11
2.6 พลูคลื่นต่างๆ ของสายอากาศ.....	12
2.7 การหาความกว้างลำคลื่นแบบครึ่งกำลัง (Half-Power Beam Width: HPBW).....	12
2.8 การสูญเสียของสายอากาศ.....	15
2.9 โพลาริเซชันและวงรีโพลาริเซชัน.....	17
2.10 การกระจายของกระแสและระบบแกนประสานของสายอากาศไดโพลอุดมคติ.....	18
2.11 การแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลทางอุดมคติ.....	19
2.12 สายอากาศไดโพลขนาดสั้น.....	20
2.13 การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพลเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรกระจาย ของกระแสในสายส่งปลายเปิด.....	21
2.14 การกระจายของกระแสสำหรับไดโพลที่ป้อนสัญญาณตรงกลาง.....	21
2.15 การแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศไดโพลแบบตรง.....	23
2.16 ระยะแกนประสานของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กกรุปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	24
2.17 สายอากาศแบบจานดาวเทียม.....	26
2.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครเวฟ.....	27
2.19 สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กและความชัดเจนของความยาวคลื่นสเปกตรัมจากคลื่นวิทยุ ไปจนถึงรังสีแกมมา.....	31
2.20 สายอากาศ GPR ประกอบด้วยความถี่และความยาวที่แตกต่างกันแต่ละประเภท.....	32
2.21 คลื่นความถี่สูงมีจำนวนช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าความถี่ต่ำ.....	32
2.22 ตัวแปรการคำนวณหาขนาดระนาบท่อน้ำสัญญาณ.....	33
2.23 รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศรักรีบบอล.....	36
3.1 ตัวแปรระยะของสายอากาศรักรีบบอล.....	39
3.2 ลัดส่วนของสายอากาศที่หาได้จากสมการ.....	40

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3.3	สายอากาศแบบรักบี้บอลแบบแผ่นพิมพ์ที่ถูกรอกแบบโดยโปรแกรม CST.....	41
3.4	ผลของการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ.....	42
3.5	อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง.....	42
3.6	สายอากาศแบบรักบี้บอล ที่เพิ่มแถบกราวด์ และป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบ ร่วม สำหรับแถบความถี่กว้างยิ่ง.....	43
3.7	โปรแกรม AppCAD for Windows สำหรับหาขนาดของสายนำสัญญาณ.....	44
3.8	ตำแหน่งความยาว และความกว้างของระนาบสร้างเงาที่ทำการปรับ.....	48
3.9	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เมื่อปรับความยาวของแถบระนาบสร้างเงา.....	48
3.10	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เมื่อปรับความกว้างของแถบระนาบสร้างเงา.....	49
3.11	ขนาดของสายอากาศแบบรักบี้บอลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในแถบย่านความถี่กว้างยิ่ง...	50
3.12	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรักบี้บอลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่าน ความถี่แถบกว้างยิ่ง.....	51
3.13	อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศรักบี้บอลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่าน ความถี่แถบกว้างยิ่ง.....	51
3.14	อัตราขยายของสายอากาศสายอากาศรักบี้บอลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่ แถบกว้างยิ่ง.....	52
3.15	แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 4 GHz.....	53
3.16	แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 8 GHz.....	54
3.17	แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 12 GHz.....	55
3.18	ขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ.....	57
3.19	หน้าต่างของโปรแกรม AppCAD for Windows.....	58
3.20	โครงสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งต้น.....	61
3.21	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งต้น.....	62
3.22	โครงสร้างของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบ สร้างเงา.....	63
3.23	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะร่องรูปครึ่ง วงกลมที่ระนาบสร้างเงา.....	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3.24	โครงสร้างของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา และรูปซิกูที่ส่วนแผ่พลังงาน.....	64
3.25	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา และรูปซิกูที่ส่วนแผ่พลังงาน.....	65
3.26	ตำแหน่งที่ทำการปรับขนาดของสายอากาศ.....	65
3.27	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อปรับขนาด $L2$ โดยที่ $W4$ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร.....	66
3.28	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อปรับขนาด $W4$ โดยที่ $L2$ เท่ากับ 9 มิลลิเมตร.....	66
3.29	โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ.....	67
3.30	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเจาะร่อง.....	69
3.31	อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเจาะร่อง.....	69
3.32	อัตราขยายจากการจำลองแบบสายอากาศต้นแบบ.....	70
3.33	แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz.....	71
3.34	แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 7 GHz.....	72
3.35	แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 10 GHz.....	73
4.1	สายอากาศรัศมีบ็อลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่งต้นแบบ.....	74
4.2	เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้า (Network Analyzer) รุ่น E8363B.....	75
4.3	การทดสอบสายอากาศรัศมีบ็อลขนาดเล็กต้นแบบ.....	75
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับที่วัดได้.....	76
4.5	เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ.....	76
4.6	อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่วัดได้.....	77
4.7	เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง.....	77
4.8	อัตราขยายของสายอากาศรัศมีบ็อลขนาดเล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่ง.....	78
4.9	แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 4 GHz.....	79
4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 8 GHz.....	79

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 12 GHz.....	80
4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 4 GHz.....	80
4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 8 GHz.....	81
4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 12 GHz.....	81
4.15 สายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างด้วยเทคนิคการ เซาะร่องคั่นแบบ.....	82
4.16 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน กลับ.....	83
4.17 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าแรงดันอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	84
4.18 อัตราขยายของสายอากาศรีบิลอดขนาดเล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่ กว้าง.....	84
4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	85
4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 7 GHz.....	85
4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 10 GHz.....	86
4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	86
4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 7 GHz.....	87
4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 10 GHz.....	87



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\Delta$	Delta
$\epsilon_r$	Dielectric
$\lambda$	Wave length
BW	Band Width
C	Capacitor
CPW	Coplanar Waveguide
CST	Computer Simulation Technology
D	Distance
dB	Decibel
E	Electric field
EFIE	Electric Field Integral Equation
$f$	Frequency
$f_c$	Frequency center
$f_{max}$	Frequency maximum
$f_{min}$	Frequency minimum
FCC	Federal Communications Commission
GHz	Giga Hertz
h	Height
H	Electromagnetic field
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
L	Length
mm	Millimeter
Q	Quality Factor
R	Radian
S11	Return Loss
t	thickness
TEM	Transverse Electric-Magnetic

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TM	Transverse Mode
UWB	Ultra-wideband
VSWR	Standing Wave Ratio
W	Width
WLAN	Wireless Local Area Network



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีความถี่แถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband : UWB) เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลายด้าน ในส่วนของเรดาร์ทะลุพื้นดิน (Ground Penetrating Radar : GPR) เป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีความถี่แถบกว้างยิ่งด้านหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเป็นการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแพร่กระจายคลื่น ไปตรวจหาเป้าหมายระยะไกล แล้วอาศัยการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กเพื่อชี้ตำแหน่งหรือชนิดของเป้าหมาย ระบบเรดาร์ทะลุพื้นดินสามารถนำไปใช้งานต่างๆ ได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น สำรวจเส้นทางของสายสายสัญญาณหรือท่อในใต้พื้นดิน, เพื่อหาที่ตั้งและทางขึ้นลงของเครื่องบิน, เพื่อตรวจสอบแบบไม่ทำลายความสมบูรณ์ทางโครงสร้าง, เป็นการสำรวจระเบิดที่ฝังในพื้นดิน, เป็นการศึกษาหรือการวิจัยน้ำใต้ดินและสำรวจพื้นที่เพื่อการปลูกสร้าง เป็นต้น

มาตรฐาน FCC (Federal Communication Commission) ได้มีการกำหนดให้เรดาร์ทะลุพื้นดิน มีความกว้างของของความถี่ 3.1-10.6 GHz และระบบเรดาร์ทะลุพื้นดิน มีการควบคุมด้านกำลังงานในการส่งสัญญาณไม่เกินกำลังที่กำหนดตามมาตรฐานเพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนการสื่อสารแบบไร้สายความถี่อื่น

ซึ่งสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของระบบเป็นอย่างมากก็คือ สายอากาศ ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ทำการศึกษาการออกแบบสายอากาศ ที่มีการป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วม สำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง โดยใช้วัสดุฐานรองชนิด เอฟอาร์โพร์ (FR-4)

### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบสายอากาศที่มีการป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วม

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการปรับขนาดของพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศ

1.2.3 เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการเจาะร่องที่ส่วนแผ่พลังงาน และระนาบสร้างเงาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบรัศมีบอลขนาดเล็กที่มีการป้องกันสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

1.3.2 ออกแบบและสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเจาะรู สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง

1.3.3 สายอากาศต้นแบบสามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ

1.4.2 ศึกษาเทคนิคการออกแบบสายอากาศ

1.4.3 ศึกษาเทคนิคการเจาะรูสำหรับการประยุกต์ใช้กับการออกแบบสายอากาศแบบรัศมีบอล

1.4.4 ศึกษามาตรฐานและการประยุกต์ใช้งานระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE

1.4.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม CST เพื่อใช้ในการวิเคราะห์จำลองแบบ

1.4.6 ทำการออกแบบสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเจาะรู เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารไร้สาย

1.4.7 จำลองแบบโครงสร้างสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CST

1.4.8 ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบโดยใช้ขนาดต่างๆที่ได้จากการปรับจากการจำลองแบบ

1.4.9 ทำการวัดจริงและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการวัดและจำลองแบบและสรุปผลการวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้สายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเจาะรู สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง

1.5.2 นำสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเจาะรู มาประยุกต์การใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง และด้านเรดาร์ทะลุพื้นดินอย่างเหมาะสม

1.5.3 เข้าใจในการทำงานของสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก และสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับการเจาะรู สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งได้

1.5.4 มีความรู้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งและเป็นพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศชนิดอื่นในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศ จำเป็นต้องศึกษาความรู้พื้นฐาน เกี่ยวกับคลื่น ส่วนประกอบของคลื่น และคุณสมบัติบางประการของคลื่น ชนิดของสายอากาศแต่ละชนิด คุณสมบัติพื้นฐานพารามิเตอร์ตลอดจนการแผ่กระจายของคลื่นในสายอากาศแต่ละชนิด เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ในการสร้างสายอากาศแบบแผ่นพิมพ์

#### 2.2 ทบทวนวรรณกรรม

ในการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการพัฒนาสายอากาศสำหรับใช้งานในย่านความถี่ แถบกว้างอยู่หลายรูปแบบ โดยงานวิจัยที่มีความน่าสนใจเพื่อนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบ สายอากาศมีดังนี้

งานวิจัยเรื่อง “A novel Rugby-Ball Antenna for Pulse Radiation” [1] ซึ่งเป็นผลงานของ A. Ruengwaree, R. Yowuno และ G. Kompa ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการศึกษาการออกแบบโครงสร้าง ของสายอากาศโดยใช้รูปแบบจากลูกรักบี้ และใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมแผ่น โดยมีการป้อนสัญญาณด้วย สายโคแอกเซียล 50 โอห์ม และมีแผ่นอลูมิเนียมที่ด้านหลังเพื่อเป็นตัวสะท้อนของสัญญาณ ซึ่ง สามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่กว้างได้ อีกทั้งยังมีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 198% และยังสามารถสร้าง ได้ง่ายและมีราคาถูกอีกด้วย

งานวิจัยเรื่อง “A Novel UWB Rugby-Ball Antenna for Near-Range Microwave Radar System” [2] ผลงานของ A. Ruengwaree, A. Ghose and G. Kompa ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำสายอากาศ แบบรักบี้บอลมาประยุกต์ใช้ในระบบของเรดาร์ระยะใกล้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ระบุไว้ว่า รูปทรงรักบี้จะ ถูกสร้างจากการซ้อนทับกันของวงกลมสองรูปที่มีรัศมีต่างกัน โดยจะกำหนดแบนด์วิดท์ได้จากรัศมี ของเส้นโค้งด้านบนและด้านล่างของรูปลูกรักบี้ ซึ่งสายอากาศแบบรักบี้บอลนี้มีค่าความผิดพลาดใน การวัดระยะทางในระบบเรดาร์ระยะใกล้เท่ากับ 1.54% และครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 0.1 - 20 GHz

งานวิจัยเรื่อง “การลดน้ำหนักของสายอากาศแบบรักบี้บอล” [3] ผลงานของ อำนวย เรือง วารี ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำสายอากาศรักบี้บอลสำหรับใช้งานในย่าน UWB จากงานวิจัย [1] และ [2] มาทำการเจาะรูขนาด 4 มิลลิเมตร ที่ตัวสายอากาศ เพื่อลดน้ำหนัก ซึ่งผลปรากฏว่า สามารถลดน้ำหนัก ไปได้ 20.83% โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ การทำงานของสายอากาศตลอดช่วงความถี่ใช้งาน

งานวิจัยเรื่อง “A CWP Fed Circular Monopole Antenna for Ultra Wideband Wireless Communications” [4] ผลงานของ W. Tong และ Z. R. Hu เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วม ให้กับสายอากาศสำหรับใช้ในย่านความถี่กว้างยิ่ง โดยสายอากาศที่ได้จะมีความกว้างของช่วงความถี่อยู่ที่ 2.3 – 15.6 GHz ซึ่งในการใช้การการป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วมนี้ไม่ต้องมีการเจาะที่ตัวสายอากาศ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้สะดวกยิ่งขึ้น

งานวิจัยเรื่อง “Ultra Wide Band CPW-fed Printed Pentagonal Antenna with Modified Ground Plane for UWB Applications” [5] ผลงานของ V. Shrivastava และ Y. Ranga เป็นงานวิจัยสายอากาศรูปห้าเหลี่ยมที่มีการป้อนสัญญาณแบบระนาบ สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง ที่มีขนาด กว้าง 50 มม. ยาว 58 มม. โดยในงานวิจัยนี้จะทำการปรับระนาบสร้างเงาโดยใช้รูปทรงเลขาคณิตเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของสายอากาศดีที่สุด โดยสายอากาศต้นแบบนั้นสามารถรองรับความถี่ตั้งแต่ 2.45 GHz ถึง 20.5 GHz และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง

งานวิจัยเรื่อง “Increasing Bandwidth of Flambeau- Shape Monopole Antenna for UWB Application” [6] ผลงานของ W. Naktong และ A. Ruengwaree เป็นงานวิจัยสายอากาศโมโนโพลที่มีการป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วมสำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง โคนในงานวิจัยนี้ จะทำการเจาะระนาบกราวด์เป็นรูปทรงเลขาคณิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยจะมีศึกษาผลของการเจาะเป็นรูปสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และครึ่งวงกลม โดยสายอากาศที่ได้สามารถรองรับความถี่ตั้งแต่ 2.49 GHz ถึง 24.09 GHz และมีการแผ่พลังงานในแบบรอบทิศทาง

## 2.3 ทฤษฎีของคลื่น

### 2.3.1 ชนิดของคลื่น [7]

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่รูปแบบหนึ่ง คลื่นสามารถจำแนกตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

#### 2.3.1.1 จำแนกตามลักษณะการอาศัยตัวกลาง

ก) คลื่นเชิงกล (Mechanical wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยอาศัยตัวกลาง ซึ่งอาจเป็นของแข็งของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ตัวอย่างของคลื่นกล ได้แก่ คลื่นเสียง คลื่นที่ผิวน้ำ คลื่นในเส้นเชือก เป็นต้น

ข) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ โดยไม่อาศัยตัวกลางสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ เช่น คลื่นแสง คลื่นวิทยุและโทรทัศน์ คลื่นไมโครเวฟ ริงสิเอกซ์ ริงสิแกมมา เป็นต้น

### 2.3.1.2 จำแนกตามลักษณะการเคลื่อนที่

ก) คลื่นตามขวาง (Transverse wave) เป็นคลื่นที่มีอนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างของคลื่นตามขวาง ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ข) คลื่นตามยาว (Longitudinal wave) คลื่นเกิดจากการรบกวนตัวกลาง ทำให้ตัวกลางเกิดการสั่น พลังงานจากการสั่นจะถูกส่งผ่านตัวกลางอย่างต่อเนื่องที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไปมาในแนวเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างของคลื่นตามยาว ได้แก่ คลื่นเสียง

### 2.3.1.3 จำแนกตามลักษณะการเกิดคลื่น

ก) คลื่นพัลส์ (Pulse wave) เป็นคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดนั้นถูกรบกวนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

ข) คลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave) เป็นคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิด ถูกรบกวนเป็นจังหวะต่อเนื่องกัน

### 2.3.2 ส่วนประกอบของคลื่น [7]

สันคลื่น เป็นตำแหน่งสูงสุดของคลื่น หรือเป็นตำแหน่งที่มีการกระจัดสูงสุดในทางบวก ท้องคลื่นเป็นตำแหน่งต่ำที่สุดของคลื่นหรือเป็นตำแหน่งที่มีการกระจัดสูงสุดในทางลบ

แอมพลิจูด (Amplitude) เป็นระยะการกระจัดที่มากที่สุดทั้งค่าบวกและค่าลบ

ความยาวคลื่น (Wavelength) เป็นความยาวของคลื่นหนึ่งลูก มีค่าเท่ากับระยะระหว่างสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่อยู่ติดกัน ความยาวคลื่นแทนด้วยสัญลักษณ์  $\lambda$  มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ความถี่ (Frequency) หมายถึง จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนผ่านตำแหน่งใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา แทนด้วยสัญลักษณ์  $F$  มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที ( $s^{-1}$ ) หรือ เฮิรตซ์ (Hz)

คาบ (Period) หมายถึง ช่วงเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ ครบหนึ่งลูกคลื่น แทนด้วยสัญลักษณ์  $T$  มีหน่วยเป็นวินาทีต่อรอบ (s)

อัตราเร็วของคลื่น (Wave speed) หาได้จากผลคูณระหว่างความยาวคลื่นและความถี่

### 2.3.3 สมบัติของคลื่น (Wave properties) [7]

คลื่นทุกชนิดแสดงสมบัติของคลื่น 4 อย่าง คือ การสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการสอดแทรก

2.3.3.1 การสะท้อน (Reflection) เกิดจากคลื่นเคลื่อนที่ไปกระทบสิ่งกีดขวาง แล้วเปลี่ยนทิศทางกลับสู่ตัวกลางเดิม โดยลักษณะการสะท้อนของคลื่นจะมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

ก) มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

ข) คุณสมบัติต่างๆ ของคลื่น เช่น ความเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่นจะมีค่าเท่ากันทั้งก่อนการสะท้อนและหลังการสะท้อน

2.3.3.2 การหักเห (Refraction) โดยเกิดจาก คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ต่างกัน แล้วทำให้อัตราเร็วเปลี่ยนไป

2.3.3.4 การเลี้ยวเบน (Diffraction) เกิดจาก คลื่น เคลื่อนที่ไปพบสิ่งกีดขวาง ทำให้คลื่นส่วนหนึ่งอ้อมบริเวณของสิ่งกีดขวางแผ่ไปทางด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้น

2.3.3.5 การแทรกสอด (Interference) เกิดจากคลื่นสองขบวนที่เหมือนกันทุกประการเคลื่อนที่มาพบกัน แล้วเกิดการซ้อนทับกัน ถ้าเป็นคลื่นแสงจะเห็นแถบมืดและแถบสว่างสลับกัน ส่วนคลื่นเสียงจะได้ยินเสียงดังเสียงค่อยสลับกัน ทำให้เกิดการแทรกสอด สองแบบ คือ

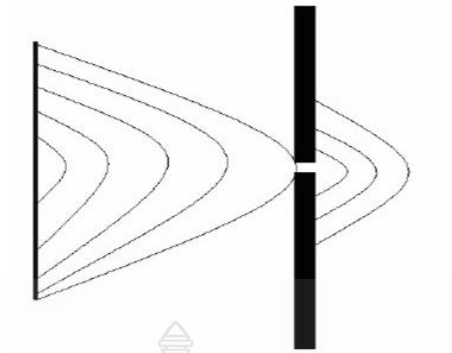
ก) การแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive interference) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนมีการจัดในทิศเดียวกัน เช่น ท้องคลื่นเจอกับท้องคลื่น หรือ สันคลื่นเจอกับสันคลื่น

ข) การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive interference) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนมีการจัดในทิศตรงข้ามกัน เช่น ท้องคลื่นเจอกับสันคลื่น

#### 2.3.4 การแผ่พลังงาน [7]

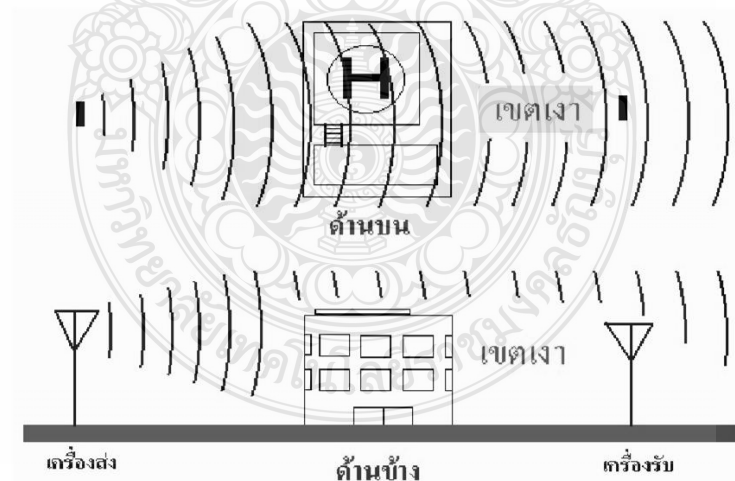
การแผ่พลังงานมีชื่อเรียกได้ต่างๆ กันไป เช่น การเลี้ยวเบนของคลื่นหรือการเบี่ยงเบนของคลื่น การเบี่ยงเบนของคลื่นเกิดขึ้นเมื่อ คลื่นเดินทางผ่านมุมหรือขอบของตัวกลางทึบที่คลื่นนั้นไม่สามารถผ่านได้ เช่น คลื่นวิทยุความถี่สูงมากเดินทางผ่านยอดเขา คลื่นนี้มีคุณสมบัติเดินทางเป็นเส้นตรง ดังนั้นถ้าเรลากเส้นตรงจากสายอากาศไปยังยอดเขา ส่วนที่อยู่หลังเขาและต่ำกว่าเส้นนี้ลงมาไม่สามารถที่จะรับคลื่นได้เลย แต่บางส่วนที่อยู่หลังยอดเขาสามารถรับคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงได้เนื่องจากความถี่สูงขึ้นการเบี่ยงเบนของคลื่นก็ยิ่งลดลง กล่าวคือ คลื่นจะเดินทางเป็นแนวเส้นตรงแต่บางส่วนของคลื่นเกิดการกระทบกับ สลิตแคบๆ (ยอดเขา) ทำให้คลื่นเกิดการแตกกระจายออกไปโดยรอบ เสมือนกับเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่นั้นเอง ดังภาพที่ 2.1 แสดงคลื่นผ่านช่องสลิตที่แคบ โดยมีหลักการดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น





ภาพที่ 2.1 คุณสมบัติการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางไปยังตัวกลาง [7]

จากภาพที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติการเบี่ยงเบนของคลื่นวิทยุ เมื่อเดินทางไปยังตัวกลางที่ทึบ และเงียดขอบ ดังกล่าวจะเห็นได้ว่า บริเวณบางส่วนหลักตัวกลางนั้นเป็นเขตที่มีการเบี่ยงเบน ซึ่งสามารถติดต่อสื่อสารได้ และบริเวณบางส่วนที่จะไม่สามารถที่จะทำการติดต่อสื่อสารกันได้เลย จึงเรียกบริเวณนั้นว่า เขตเงา (Shadow)



ภาพที่ 2.2 การเบี่ยงเบนของคลื่นวิทยุ [7]

### 2.3.5 ความถี่และความยาวคลื่น [7]

ส่วนใหญ่เรานิยมแบ่งคลื่นวิทยุออกเป็นความถี่ในย่านต่างๆ โดยมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz) ในประวัติศาสตร์การวิทยุ เราแบ่งคลื่นวิทยุตามความยาวคลื่น (Wave length) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่นเป็นไปตามสมการดังนี้

$$v = \lambda f \quad (2.1)$$

ในที่นี้  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร

$v$  เป็นความเร็วของคลื่นวิทยุในอากาศ เท่ากับความเร็วของแสง =  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$f$  เป็นความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

ในส่วนของความถี่ที่มีการใช้งานในช่วงความถี่ต่างๆ สามารถแสดงให้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจะแสดงการใช้ย่านความถี่ ความถี่และความยาวของคลื่นในการสร้างสายอากาศ และทำการส่งสัญญาณไม่ว่าจะเป็นการส่งสัญญาณดาวเทียม ส่งสัญญาณโทรทัศน์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่และความยาวคลื่น

ย่านความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น
Very Low Frequency (VLF)	ต่ำกว่า 30 kHz	ยาวกว่า 10 km
Low Frequency (LF)	30-300 kHz	10-1 km
Medium Frequency (MF)	300-3000 kHz	1000-100 m
High Frequency (HF)	3-30 MHz	100-10 m
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	10-1 m
Ultra High Frequency (VHF)	300-3000 MHz	100-10 cm
Super High Frequency (VHF)	3-30 GHz	10-1 cm
Extremely High Frequency (VHF)	30-300 GHz	10-1 mm

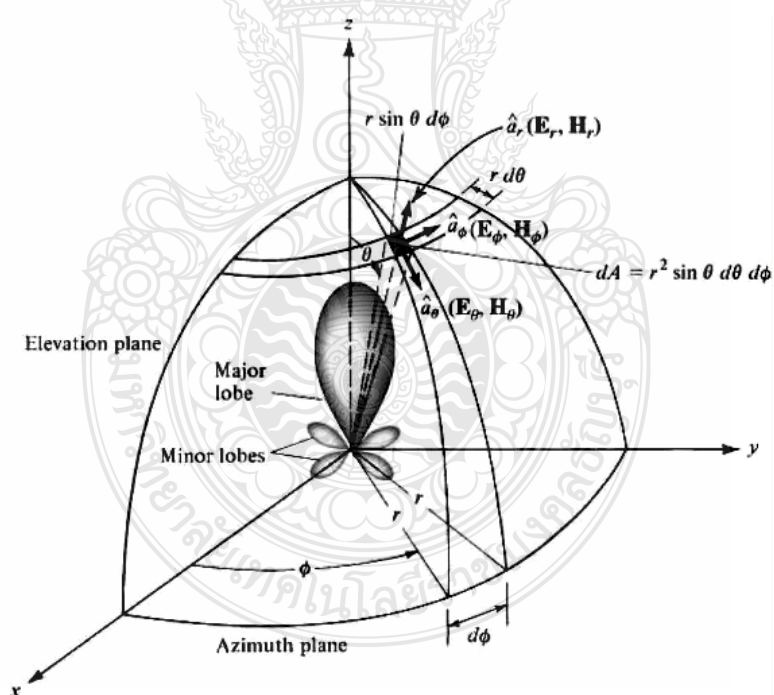
## 2.4 สายอากาศ

### 2.4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ [8]

พารามิเตอร์ของสายอากาศมีหลายลักษณะต่าง ๆ กัน โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศนั้นจะแสดงถึงรูปแบบต่างๆของสายอากาศดังนี้

### 2.4.1.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) [8]

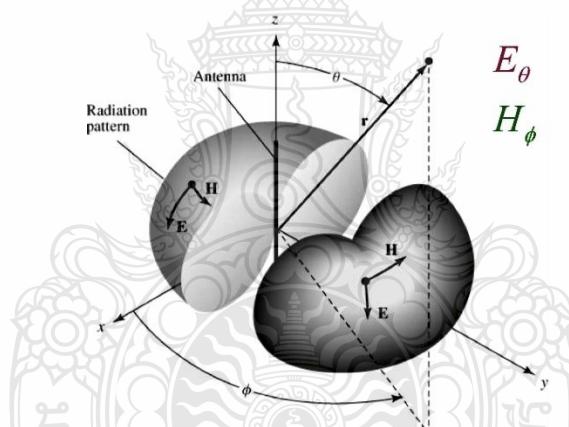
แบบรูปการแผ่พลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแผ่พลังงาน ซึ่งมีคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงความแจ่มแจ้งรูปของพลังงาน เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติ ที่รัศมีคงที่และแสดงระบบพิกัด โคออดิเนตที่แสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงานสำหรับการใช้เส้น เพื่อแสดงกำลังงานของสายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า รูปแบบกำลังงาน (Power) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (Field pattern) ของสายอากาศนั้น จากภาพที่ 2.3 จะแสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงาน สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า รูปแบบกำลังงานของสายอากาศ และ กราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า รูปแบบสนามไฟฟ้าของสายอากาศนั้นๆ



ภาพที่ 2.3 ระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงาน [8]

2.4.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบไอโซโทรปิกไดเรกชันแนล และออมนิไดเรกชันแนล ตัวแผ่พลังงานไอโซโทรปิก (Isotropic radiator) [8]

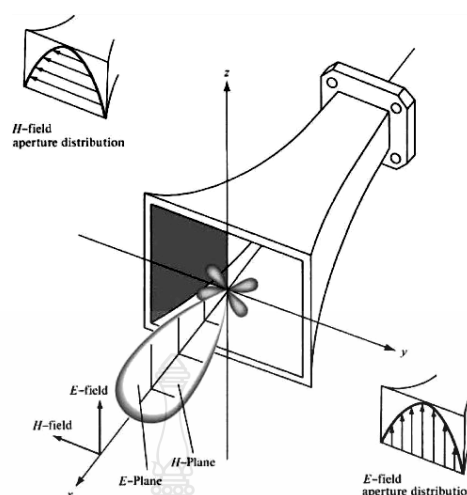
แบบรูปการแผ่พลังงานแบบไอโซโทรปิกไดเรกชันแนลและออมนิไดเรกชันแนล (Omni directional antenna) ตัวแผ่พลังงานไอโซโทรปิก (Isotropic radiator) คือ สายอากาศทางอุดมคติเท่านั้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่พลังงานเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น ต้นกำเนิดแบบจุดหรือพอยท์ซอร์ส (Point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่ส่วนมากมักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริง ที่เกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ ได้บ่งบอกถึงทิศทางของสายอากาศ สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล เป็นคุณสมบัติของสายอากาศที่แสดงในภาพที่ 2.4 จากรูปการแผ่กระจายของคลื่นนั้นจะเห็นว่ามีความเหมือนกับรูปทรงกลมที่มีการผ่าครึ่ง



ภาพที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง [8]

#### 2.4.1.3 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก [8]

คุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปกระจายคลื่นหลัก (Principal pattern) ของระนาบสนามไฟฟ้า (E) และ ระนาบสนามแม่เหล็ก (H) สำหรับสายอากาศโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly-polarization) แบบรูปการกระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแผ่พลังงานที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปกระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และ ทิศทางของการแผ่พลังงานที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปกระจายคลื่นหลักมีดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยมีระนาบ  $x, z$  เป็นระนาบ H หลัก



ภาพที่ 2.5 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก ระนาบสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H) [8]

#### 2.4.1.4 พลูคลื่นการแผ่พลังงาน [8]

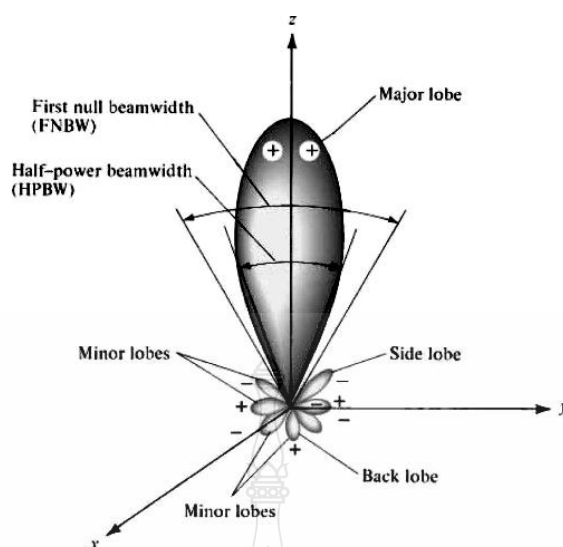
พลูคลื่นของการแผ่พลังงาน (Radiation lobe) เป็น ส่วนหนึ่งของการแผ่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแผ่พลังงานต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยมีการแสดงขั้วแบบรูป (Polar pattern) แผ่พลังงาน แบบสามมิติซึ่งแบ่งเป็นพลูคลื่นต่างๆดังนี้

พลูคลื่นหลัก (Major lobe หรือ Main lobe) เป็นพลูคลื่นของการแผ่พลังงานซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานแรงที่สุด ตามภาพที่ 2.6 มีพลูคลื่นหลักอยู่ในทิศทางแกน Z สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีพลูคลื่นหลักมากกว่า 1 พลูคลื่น เช่น สายอากาศแยกบีม (Beam antenna)

พลูคลื่นย่อย (Minor lobe) ได้แก่พลูคลื่นอื่นๆ นอกเหนือไปจากพลูคลื่นหลัก

พลูคลื่นข้างหรือไซด์พลูคลื่น (Side lobe) เป็นพลูคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับพลูคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับพลูคลื่นหลัก

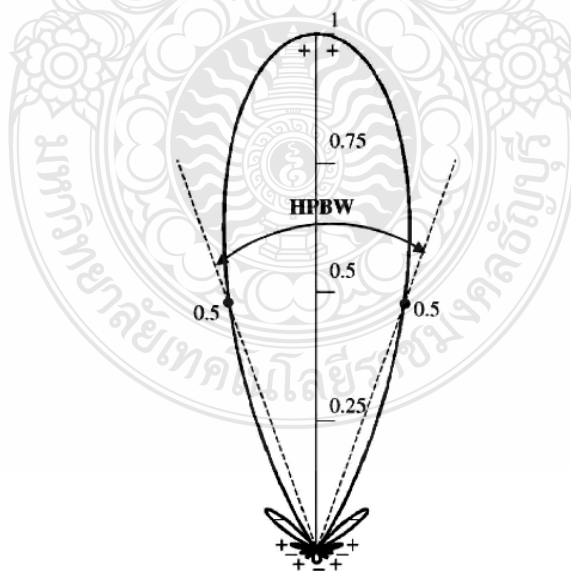
พลูคลื่นหลัง (Back lobe) เป็นพลูคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลม ตรงข้ามกับพลูคลื่นหลัก ปกติแล้วพลูคลื่นย่อยจะเกิดจากการแผ่พลังงานในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดพลูคลื่นเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของพลูคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในพลูคลื่นที่กำลังคิด ต่อความหนาแน่นของพลังงานในพลูคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (Side lobe ratio) เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในพลูคลื่นที่กำลังคิด ต่อความหนาแน่นของพลังงานในพลูคลื่นหลัก หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์น้อยกว่า -20 dB



ภาพที่ 2.6 พลุคลื่นต่างๆ ของสายอากาศ [8]

#### 2.4.1.5 ความสามารถในการชี้ทิศทาง (Directivity) [9]

เป็นค่า ที่บอกถึงความสามารถของสายอากาศ ในการกระจายคลื่นออกไปในทิศทางที่ต้องการได้มากน้อยเพียงใด โดยสามารถพิจารณาได้จาก แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E และ รูปการแผ่พลังงานในระนาบ H ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beam Width: HPBW) ดัง ภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การหาความกว้างลำคลื่นแบบครึ่งกำลัง (Half-Power Beam Width: HPBW) [9]

โดยค่าความสามารถในการชี้ทิศทาง ( $D_0$ ) dB หาได้จาก

$$D_0 \approx 10 \log \frac{41253}{(BW_E)(BW_H)} \quad (2.2)$$

โดย  $BW_E$  เป็นกำลังงานครึ่งหนึ่งของบีมในแบบรูปกระจายคลื่นระนาบ สนามไฟฟ้า  
 $BW_H$  เป็นกำลังงานครึ่งหนึ่งของบีมในแบบรูปกระจายคลื่นระนาบ สนามแม่เหล็ก

#### 2.4.1.6 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แผ่พลังงาน (Radiation power density) [9]

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลาง ถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แก่ พอยติง เวกเตอร์ (Pointing vector) ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

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

เมื่อ  $\vec{W}$  เป็นพอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{W/m}^2$ )

$\vec{E}$  เป็นพอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{V/m}$ )

$\vec{H}$  เป็นพอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{A/m}$ )

เนื่องจากพอยติงเวกเตอร์มีความหมาย แสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิด จะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยติงเวกเตอร์ ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมด

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

เมื่อ  $P$  เป็นกำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น (W)

$da$  เป็นพื้นที่จวบพื้นที่ปิด ( $\text{m}^2$ )

#### 2.4.1.7 ความเข้มของการแผ่พลังงาน (Radiation intensity) [9]

คำจำกัดความของคำว่า ความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ คือ กำลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่พลังงาน เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่พลังงานสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่พลังงาน และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $U$  เป็นความเข้มของการแผ่พลังงาน (W / หน่วยมุมตัน)

$W_{rad}$  เป็นความหนาแน่นของการแผ่พลังงาน ( $w/m^2$ )

$r$  เป็นรัศมีของการแผ่พลังงาน

ความเข้มของการแผ่พลังงานถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้ คือ

$$U \approx r^2 / 2\eta [E_\theta(r, \theta, \phi)^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2] \quad (2.6)$$

$$U \approx 1/2\eta [E_\theta(r, \phi)^2 \times |E_\phi(\theta, \phi)|^2] \quad (2.7)$$

เมื่อ  $E$  เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi$  เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$\eta$  เป็นอินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นรูปแบบของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่พลังงานได้เช่นกันกำลังงานทั้งหมดนี้หาได้จากอินทิเกรตความเข้มขึ้นของการแผ่พลังงานตามสมการ 2.5 ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.8)$$

#### 2.4.1.8 อัตราการขยาย (Gain) [9]

สิ่งที่แสดงคุณสมบัติของสายอากาศ ก็คืออัตราการขยาย (Gain) อัตราการขยายเป็นความสัมพันธ์ได้มาจากไดเรกทิวิตี (Directivity) โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรกทิวิตี อธิบายคุณสมบัติ ในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

กำลังอัตราขยาย (Power gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณกับอัตราส่วนของความเข้มขึ้นของการแผ่พลังงานในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้ โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานแรงที่สุด ดังนั้น

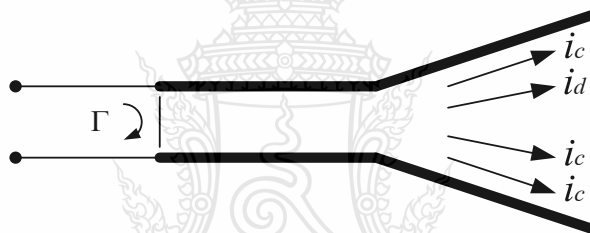


อัตราขยาย =  $4\pi$  คูณความเข้มข้นของการแผ่พลังงานกำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้กับสายอากาศ

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

#### 2.4.1.9 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency) [9]

ประสิทธิภาพของสายอากาศ  $E_1$  จะใช้เมื่อเรากำลังพิจารณาการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆ เมื่ออ้างอิงตามภาพที่ 2.8 อาจเนื่องมาจากการสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่สัมพันธ์กัน (Mismatch) กันระหว่างสายส่ง (Transmission line) กับสายอากาศ มีการสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน ( $I^2 R$ ) และการสูญเสียจากการสะท้อนตัวนำ



ภาพที่ 2.8 การสูญเสียของสายอากาศ [9]

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$E_1 = e_r e_c e_d \quad (2.10)$$

เมื่อ	$E_1$	เป็นประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)
	$e_r$	เป็นประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ (ไม่มีหน่วย)
	$e_c$	เป็นประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)
	$e_d$	เป็นประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

#### 2.4.1.10 ประสิทธิภาพของบีม [9]

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินว่าสายอากาศมีคุณภาพของการส่งหรือรับคลื่นดี มากน้อยเพียงใดนั้น ได้แก่ ประสิทธิภาพของบีม (Beam Efficiency : BE) สำหรับสายอากาศซึ่งมีพลุคลื่นหลักอยู่ในทิศทางแกน  $z$  ( $q = 0$ ) ประสิทธิภาพของบีมจะกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$BE = \frac{\text{กำลังที่ส่ง (หรือรับ) ภายในกรวยซึ่งทำมุม } q_1}{\text{กำลังงานที่ส่ง (หรือรับ) ทั้งหมดด้วยสายอากาศนั้น}} \quad (2.11)$$

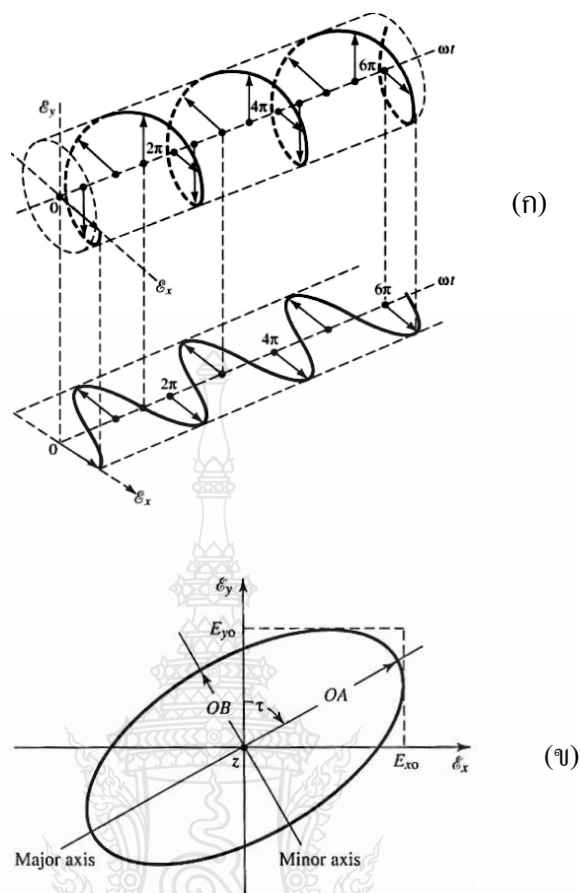
เมื่อ  $q_1$  เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมกรวย ที่เราต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงาน ทั้งหมดในนั้น ดังนั้นจะเขียนสมการ 2.11 ได้เป็นดังนี้

$$BE = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.12)$$

เมื่อให้ เป็นมุมที่เกิดมีนัล (Null) คือ จุดตำแหน่งที่กำลังมีค่าเป็นศูนย์เป็นคู่แรก ดังนั้น ประสิทธิภาพของบีม จะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในพลุคลื่นหลัก ต่อ กำลังงานที่มีทั้งหมด

#### 2.4.1.11 โพลาริเซชัน (Polarization) [9]

ความหมายของโพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของ โพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ สนามไฟฟ้าที่เวลา ต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป ดัง แสดงในภาพที่ 2.9 ประกอบสำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็น โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้ จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศ มีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน



ภาพที่ 2.9 โพลาริเซชันและวงรีโพลาริเซชัน [9]

(ก) การหมุนของคลื่น

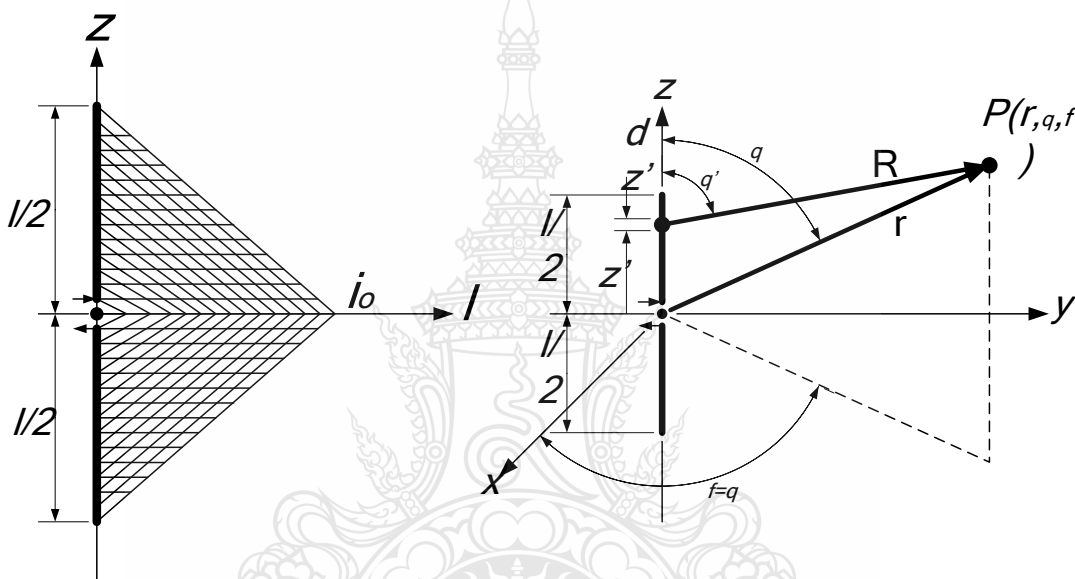
(ข) โพลาริเซชันแบบวงรี

ในการแบ่งชนิดของโพลาริเซชันนั้น อาจแบ่งออกได้เป็นหลายแบบเช่น เป็นแบบลิเนียร์ โพลาริเซชัน (Linearly polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly polarization) และ โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในสูญญากาศซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอ จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันแบบเส้นตรง หรือ ลิเนียร์โพลาริเซชัน แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรี จะเรียกสนามแบบนี้ว่า เป็นโพลาริเซชันแบบวงรี ทั้งลิเนียร์โพลาริเซชัน และโพลาริเซชันแบบวงกลม ต่างก็เป็นกรณีพิเศษของโพลาริเซชันแบบวงรี ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือ เมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว จะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเป็นโพลาริเซชันซ้าย

## 2.4.2 ชนิดของสายอากาศ [9]

### 2.4.2.1 สายอากาศแบบไดโพล (Dipole antenna)

ในสายอากาศไดโพลจิวซึ่งมีความยาวน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\lambda/50$  จะมีการแจกแจงกระแส (Current Distribution) คงที่ตลอดความยาวของไดโพลจิว แม้ว่าจะสร้างสายอากาศให้มีการแจกแจงกระแสคงที่ไม่ได้ก็ตาม แต่ก็ใช้ไดโพลจิวเป็นเครื่องช่วยในการคำนวณการแจกแจงกระแสของสายอากาศที่ใช้งานจริงๆ หากจะประมาณสายอากาศแบบเส้นลวดซึ่งมีความยาว  $\lambda/50 \leq l \leq \lambda/10$  ได้ดีแล้ว จะสมมุติให้มีการแจกแจงสามเหลี่ยมดังแสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การกระจายของกระแสและระบบแกนประสานของสายอากาศไดโพลอุดมคติ [9]

นิพจน์ของสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามไฟฟ้า  $H$  ของไดโพลในทางอุดมคติสามารถหาได้โดยการแก้สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ที่ระยะห่างออกไปจากไดโพลอุดมคติ ( $r \gg \lambda$ ) เราสามารถแสดงได้ว่า

$$\vec{E} = \frac{I\Delta z}{\pi} j\omega\mu \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \vec{a}_\theta \quad (2.13)$$

$$\vec{H} = \frac{I\Delta z}{\pi} j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \vec{a}_\phi \quad (2.14)$$

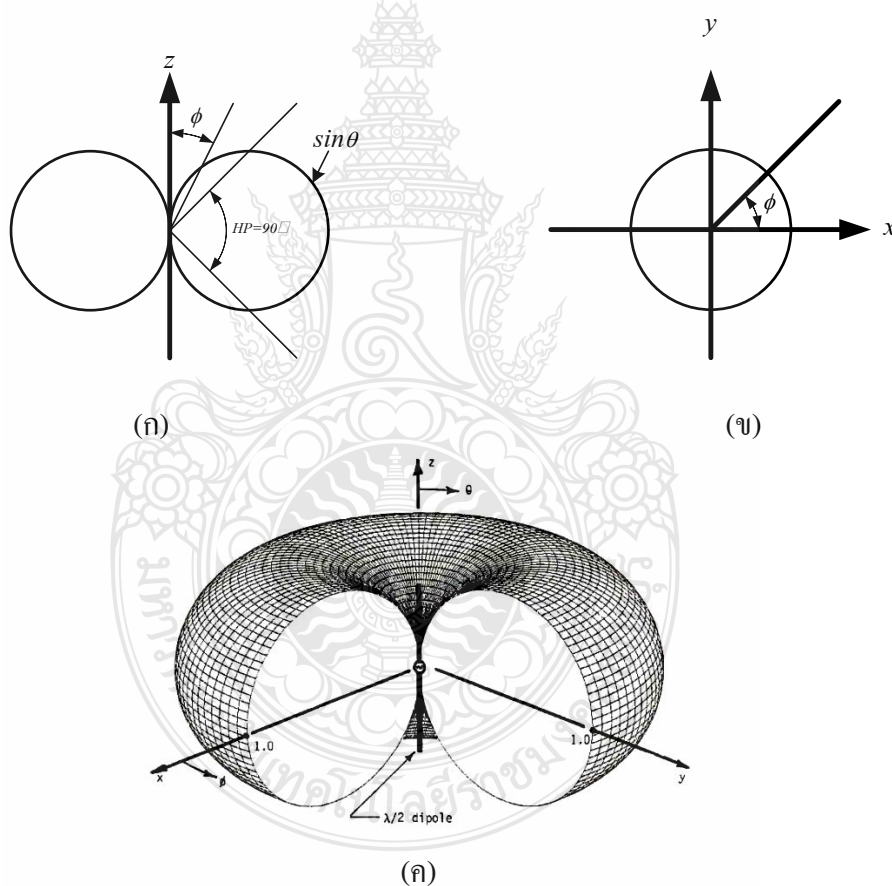
เมื่อ  $\beta = \pi / \lambda_0$  เมื่อค่าคงตัวเฟสของการแผ่พลังงาน

$\lambda_0$  เป็นความยาวของคลื่นในอากาศว่าง

$\vec{a}_\theta$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทำมุม  $\theta$  กับแกน  $z$

$\vec{a}_\phi$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทำมุม  $\phi$  กับแกน  $x$

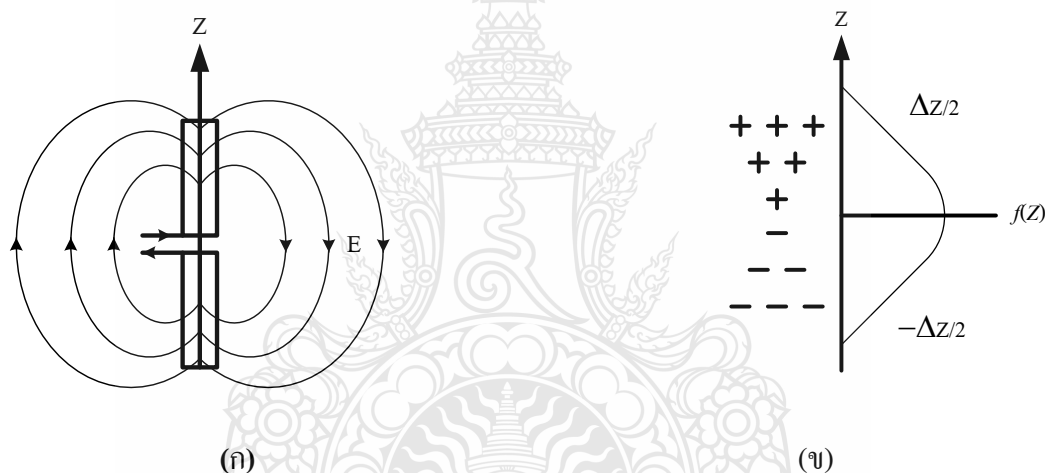
เมื่อให้  $r$  คงที่  $E$  และ  $H$  ที่นอร์มอลไลซ์ (Normalize) กับค่าสูงสุดของมันแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงกับทิศทางดังแสดงในภาพที่ 2.11 สังเกตว่าสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันไซน์กับมุม  $\theta$  ในขณะที่ขนาดของสนามแม่เหล็กไม่ขึ้นอยู่กับทิศ  $\theta$  ความกว้างลำครึ่งของไดโพลอุดมคติมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$



ภาพที่ 2.11 การแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลทางอุดมคติ [8]

- (ก) ในระนาบที่มีสายอากาศอยู่ในระนาบสนามไฟฟ้า
- (ข) ในระนาบ  $XY$  ( $\theta=90^\circ$ ) หรือ ระนาบสนามแม่เหล็ก
- (ค) รูปพล็อตของการแผ่พลังงานใน 3 มิติ

สายอากาศไดโพลสั้น (Short dipole antenna) เป็นสายอากาศไดโพลจริงที่มีความยาวน้อยมาก ( $\Delta z \ll \lambda$ ) การกระจายของกระแสจะเป็นรูปไซน์โดยประมาณ กล่าวคือประจุไฟฟ้าจะออกมาปรากฏที่ผิวขดลวดในขณะที่กระแสลดลง เมื่อเข้าสู่ปลายของสายอากาศ กระแสกระจัดนี้ ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ออกจากสายอากาศ และเชื่อมโยงสายอากาศส่งคลื่นเข้ากับสายอากาศรับคลื่น การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพลสั้นสามารถประมาณให้เป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีพื้นที่เป็นครึ่งหนึ่งของรูปการกระจายของกระแสบนไดโพลอุดมคติ (ดูจากภาพที่ 2.11 และภาพที่ 2.12 ประกอบ) ด้วยเหตุนี้การแผ่พลังงานของไดโพลทั้งสองจึงเหมือนกัน (รวมทั้งไดเรกทิวิตีก็เหมือนกันด้วย) แต่ขนาดสนามจะต่างกันด้วยแฟกเตอร์  $\frac{1}{2}$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งกำลังการแผ่พลังงานจะต่างกันด้วยแฟกเตอร์  $\frac{1}{4}$  โดยไดโพลนั้นมีกำลังการแผ่พลังงานน้อยกว่า

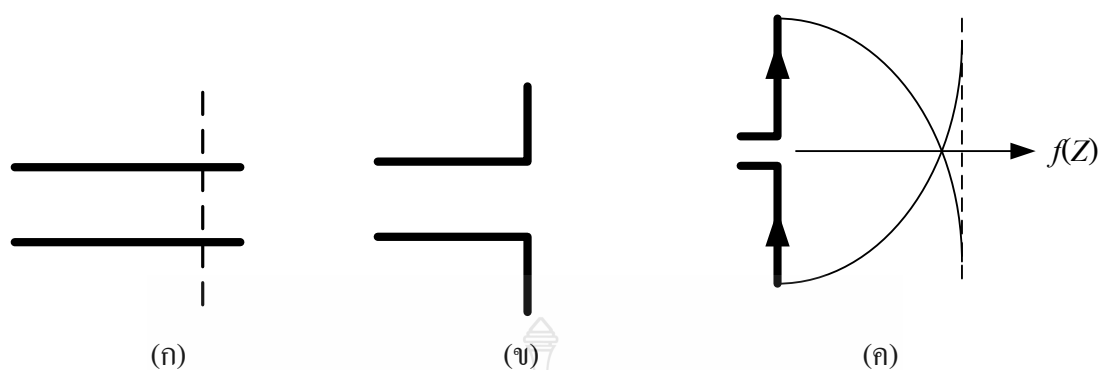


ภาพที่ 2.12 สายอากาศไดโพลขนาดสั้น [8]

(ก) กระแสบนสายอากาศและสนามไฟฟ้ารอบๆ สายอากาศ

(ข) การกระจายของกระแสและประจุไฟฟ้าบนสายอากาศ

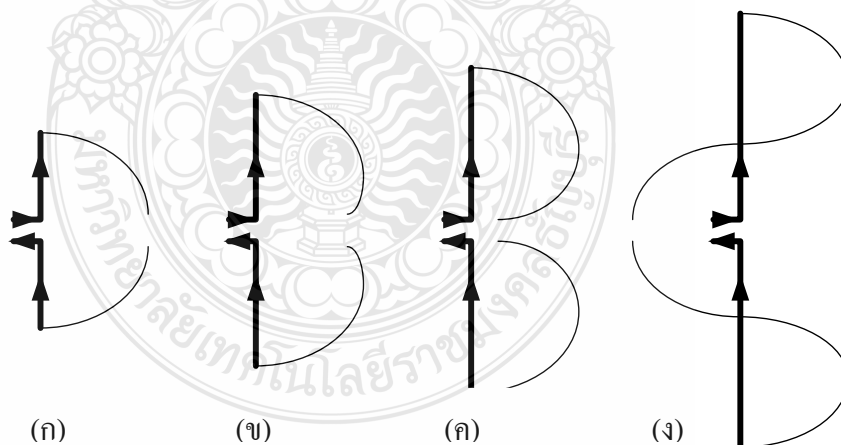
สายอากาศไดโพลแบบยาว (Long wire antenna) เป็นไดโพลที่มีขนาดยาว เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นและเป็นสายอากาศชนิดง่ายที่สุด ในการหาสนามของสายอากาศชนิดนี้ จะต้องทราบการกระจายของกระแสบนสายอากาศก่อน ลักษณะการกระจายของกระแสไดโพลยาว สามารถหาได้โดยทฤษฎีสายส่ง กล่าวคือ พิจารณาสายอากาศให้เป็นโครงสร้างที่แปลงมาจากสายส่งปลายเปิด ซึ่งปลายสายแยกออกจากกันดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การกระจายของกระแสนสายอากาศไดโพลเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การกระจายของ กระแสในสายส่งปลายเปิด [8]

- (ก) สายส่งปลายเปิด
- (ข) สายอากาศไดโพลที่ได้จากการพับสายส่ง
- (ค) การกระจายของกระแสน ไดโพล

การกระจายของกระแสที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของสายอากาศไดโพลที่ความยาวอื่น ๆ แสดงได้ในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การกระจายของกระแสสำหรับไดโพลที่ป้อนสัญญาณตรงกลาง [8]

- (ก) ความยาว  $L = \frac{\lambda}{2}$
- (ข) ความยาว  $L = \frac{3}{4}\lambda$
- (ค) ความยาว  $L = \lambda$
- (ง) ความยาว  $L = \frac{3}{2}\lambda$

ถ้าสัญญาณที่ป้อนสายอากาศ มาจากแหล่งจ่ายคลื่นไซน์ กระแสที่กระจายอยู่บนอากาศ สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2.15 ดังนี้

$$I(z) = I_m \sin \left[ \beta \left( \frac{L}{2} - |z| \right) \right] \quad \text{เมื่อ } |z| > \frac{L}{2} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $I_m$  เป็นค่ากระแสสูงสุดบนสายอากาศ  
 $L$  เป็นความยาวสายอากาศ  
 $Z$  เป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การวิเคราะห์หาค่านิพจน์ของสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  อยู่ในบริเวณที่อยู่ห่างไกลจากสายอากาศโดยใช้  $I_{(z)}$  จาก 2.5 ให้ผลเป็นสมการดังนี้

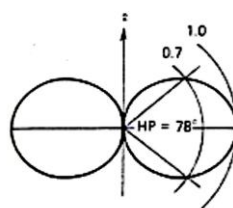
$$\vec{E} = \frac{j\eta r^{-j\beta r}}{\pi} \times \frac{I_m \cos[(\beta L/2) \cos \theta] - \cos(\beta L/2) \vec{a}_e}{\sin \theta} \quad (2.16)$$

$$\vec{H} = \frac{j\eta e^{-j\beta r}}{\pi} \times \frac{I_m \sin[(\beta L/2) \cos \theta] - \sin(\beta L/2) \vec{a}_e}{\sin \theta} \quad (2.17)$$

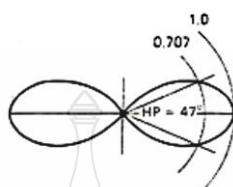
เมื่อ  $\eta = \omega\mu/\beta$  เป็นค่าอินทริติก อิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance) ของตัวกลางการแผ่กระจายคลื่นในกรณีที่ตัวกลางคลื่นเป็นอากาศ  $\eta = \eta_0 = 120\pi$

การแสดงการแผ่พลังงานมักจะทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ซึ่งค่าสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  และสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  เพื่อให้มีค่าที่สูงสุดเป็น 1 ก่อนนำไปพล็อตเทียบกับมุม โดยใช้สมการที่ 2.6 กระแสของสนามไฟฟ้าที่ทำการนอร์มอลไลซ์ (Intrinsic impedance) แล้วได้แสดงในภาพที่ 2.15 สำหรับไดโพลที่มีความยาวต่างๆ กัน

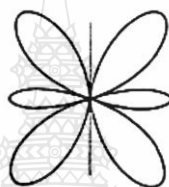




(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.15 กระแสการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศไดโพลแบบตรง [8]

(ก) ความยาว  $L = \lambda / 2$

(ข) ความยาว  $L = \lambda$

(ค) ความยาว  $L = 3 \lambda / 2$

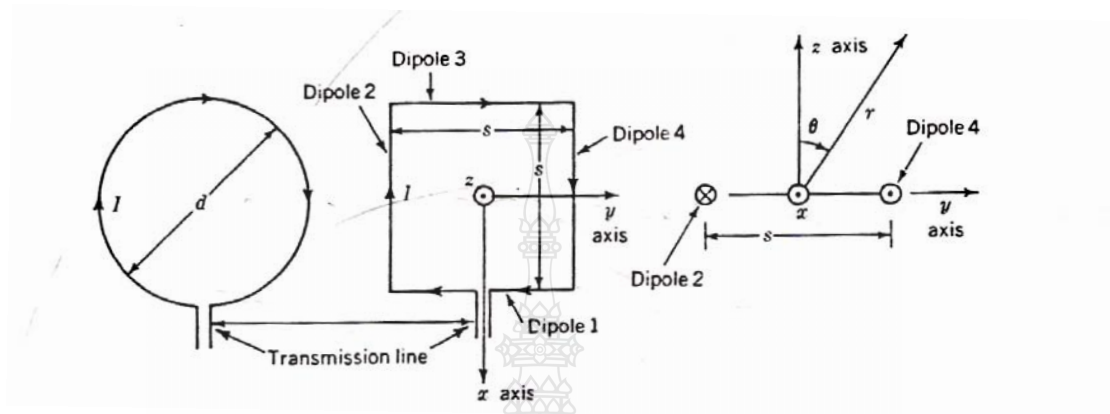
#### 2.4.2.2 สายอากาศแบบบ่วง (Loop antenna)

สายอากาศแบบบ่วงมีลักษณะโค้งงอเป็นวงปิด ซึ่งอาจจะเป็นวงแหวน หรือวงสี่เหลี่ยมก็ได้ ลักษณะโค้งงอเป็นวงปิดนี้เอง โพลาริเซชันของมันจึงเป็นแบบวงกลม เราสามารถแบ่งสายอากาศแบบบ่วงตามความยาวของเส้นรอบรูปสายอากาศได้ 2 ชนิด คือ

ก) สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก (Small Loop antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีความยาวเส้นรอบรูปน้อยมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สายอากาศแบบนี้นิยมใช้กับเครื่องรับวิทยุชนิดถี้อัดตัวได้และใช้เป็นสายอากาศแบบทิศทางสำหรับการเดินเรือโดยใช้คลื่นวิทยุ

ข) สายอากาศแบบบ่วงขนาดใหญ่ (Larger loop antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีความยาวเส้นรอบรูปมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าความยาวคลื่น สายอากาศแบบนี้นิยมใช้เป็นองค์ประกอบ (Element) ของสายอากาศ

สายอากาศแบบห้วงขนาดเล็กมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่ามาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ( $d \ll \lambda$ ) ดังนั้นกระแสที่กระจายอยู่บนสายอากาศ จึงถือได้ว่ามีขนาดและเฟสเท่ากัน การวิเคราะห์สายอากาศชนิดนี้มักเริ่มต้นพิจารณาบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ระบบแกนประสานของสายอากาศแบบห้วงขนาดเล็กรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส [8]

จากรูปโครงสร้างของรูปสายอากาศบ่วงสนามในระนาบ  $y$  และ  $z$  เกิดขึ้นโดยการแผ่พลังงานจากไดโพลสั้นตัวที่ 2 และ 4 เท่านั้น เพราะสนามที่เกิดจากไดโพลตัวที่ 1 และ 3 มีขนาดเท่ากัน แต่มีเฟสตรงกันข้ามที่ทุกๆจุด ในระนาบ  $yz$  จะทำการหาสนามไฟฟ้าในระนาบ  $yz$  สามารถทำได้โดยพิจารณาให้ไดโพล 2 และ 4 แทนด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นจุด (Isotropic point source) โดยที่เราทราบระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดทั้งสอง เราจึงสามารถหากระแสของสนามที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นได้ กระแสของสนามดังกล่าว มีชื่อเรียกว่าแอมป์แฟคเตอร์ (Array factor) อาศัยหลักการคูณกระแส (Principle of pattern multiplication) เราสามารถแสดงได้ว่าสนามไฟฟ้าในระนาบ  $yz$  ที่เกิดจากไดโพล 2 และ 4 มีสมการเป็น

$$\vec{E} = \frac{\eta\beta^2 S I e^{-j\beta r} \sin\theta \vec{a}_\phi}{4\pi r} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $I$  เป็นกระแสบนสายอากาศซึ่งเราสมมติให้มีขนาดคงที่และเฟสเท่ากันตลอดบ่วง  
 $S$  เป็น  $I^2$  เป็นพื้นที่ของบ่วง

สนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ด้วย  $\vec{H} = 1/\eta \vec{a}_r \times \vec{E}$  เมื่อ  $\vec{a}_r$  คือเวกเตอร์หน่วยในแนวรัศมี ดังนั้น

$$\vec{H} = \frac{-\beta^2 S I e^{-j\beta r} \sin \theta \vec{a}_\theta}{4\pi r} \quad (2.19)$$

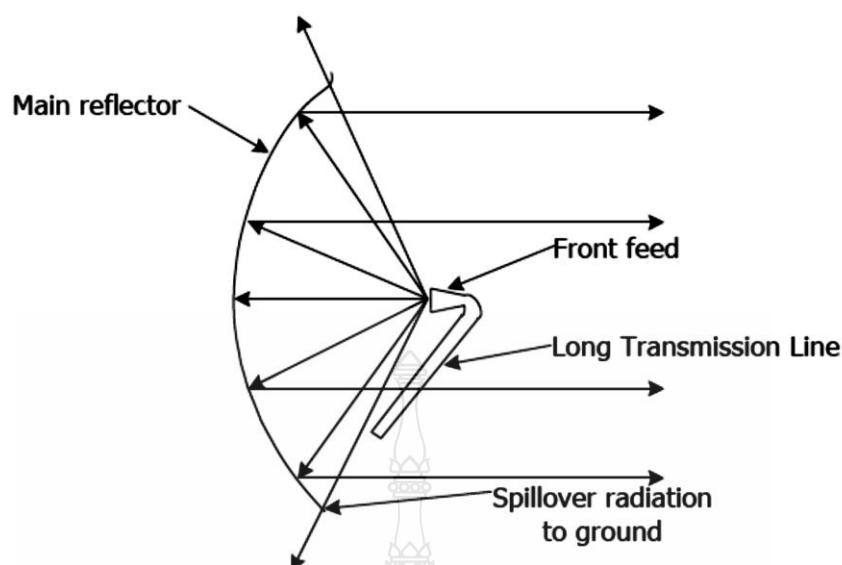
จากสมการ (2.18) และ (2.19) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับกระแสและพื้นที่ของสายอากาศบ่วง แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างสายอากาศ สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กนี้ เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้ว จะมีค่าเท่ากับค่านอร์มอลไลซ์ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ดังนั้นกระแสการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก จึงมีรูปร่างเหมือนกับกระแสของการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลอุดมคติ (รวมทั้งไดเร็กทิวิตี)

#### 2.4.2.3 สายอากาศแบบพาราโบลา [9]

สายอากาศที่ใช้ส่งคลื่นวิทยุไมโครเวฟมีหลายรูปแบบในระบบโทรคมนาคม ส่วนมากใช้สายอากาศแบบพาราโบลา (Parabola) เนื่องจากบังคับให้คลื่นวิทยุเดินทางในทิศทางเดียวได้สูง (Highly directional) และพลังงานคลื่นวิทยุไมโครเวฟถูกรวม (Focus) ให้เป็นลำคลื่นที่แคบมากโดยสายอากาศทางส่งเล็งตรงไปยังสายอากาศเครื่องรับซึ่งจะรวมพลังงานที่รับได้คล้ายเทเลสโคป

#### 2.4.3 อัตราขยายของสายอากาศ [9]

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของสายอากาศคือ อัตราขยาย (Gain) เป็นมาตรสำหรับใช้วัดความสามารถของสายอากาศในการส่งคลื่นวิทยุไปในทิศทางที่ต้องการ และใช้วัด ทิศทาง (Directionality) ด้วย สายอากาศที่แผ่พลังงานเท่ากันทุกทิศทาง เรียกว่า ออมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional) หรือ ไอโซโทรปิก (Isotropic) การติดต่อสื่อสารในระบบโทรคมนาคมแบบจุดต่อจุดต้องการสายอากาศที่มีทิศทางการแผ่พลังงานสูง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสายอากาศแบบ Isotropic ไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการสูญเสียพลังงาน อัตราขยาย ของสายอากาศ อธิบายขนาดของพลังงานที่แผ่กระจายออกรอบทิศทางถูกบังคับให้เป็นคล้ายลำแสง ถ้ายังมีแคบสายอากาศนั้นก็ยังมี ทิศทางสูงและหมายถึง อัตราขยายที่สูงขึ้นด้วยดังแสดงสายอากาศจานดาวเทียมไว้ในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สายอากาศแบบจานดาวเทียม [9]

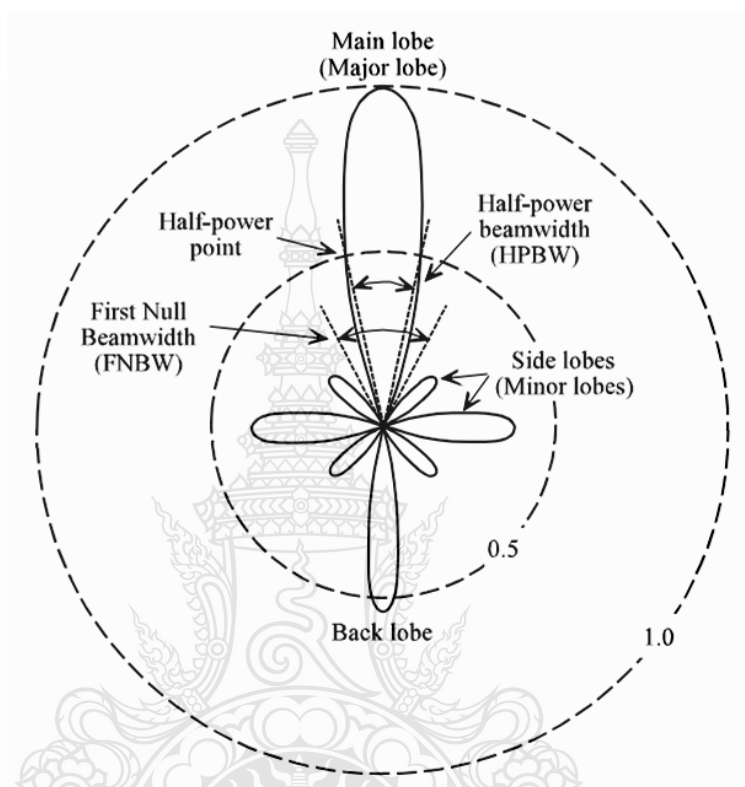
สายอากาศแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) มีอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 1 (หรือ 0 dB) สำหรับสายอากาศแบบพาราโบลิก (Parabolic) ก็เชื่อว่าจะมีประสิทธิภาพเต็ม 100 % เนื่องจากพลังงานส่วนหนึ่งล้นออกมาที่ขอบของจานดาวเทียม (Spillover) ซึ่งค่าประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์นั้น ขณะนี้มีประสิทธิภาพประมาณ 50-70 % อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศที่มีประสิทธิภาพ 50 % หาได้จากสูตรนี้

$$G = 10 \log_{10} (7.4 D f) \quad (2.20)$$

เมื่อ  $D$  เป็นขนาดของจานสายอากาศ (เมตร)  
 $f$  เป็นความถี่ (GHz)

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสายอากาศ คือ อัตราส่วนอยู่ที่ (Front to back ratio) ซึ่งคำจำกัดความ คือ อัตราส่วนของอัตราขยาย (Gain) สูงสุดในทิศทางด้านหน้ากับอัตราขยาย (Gain) ในทิศทางด้านหลังทางพลุกสิ้นหลัง (Back lobe) ดังภาพที่ 2.18 แสดงสายอากาศที่ถูกออกแบบมานั้น ไม่เหมาะสมเพราะมีอัตราส่วนอยู่ที่ (Front to back ratio) เพียง 32 dB เท่านั้น การแผ่กระจายในทิศทางด้านหลังนี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) และการแทรกสอด (Interference) ได้ สัญญาณที่แผ่กระจายในทิศทางด้านหลังของสายอากาศอาจสะท้อนกับพื้นดินและเดินทางถึงเครื่องรับได้ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ประการที่ 2 คือ สถานีวิทยุถ่ายทอด (Repeater) ที่ใช้ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันระหว่างสัญญาณที่ส่งออกไป และรับเข้ามามีการส่งถ่ายเข้าหากัน

ได้ระหว่างสายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ เนื่องจากปกติแล้ว กำลังส่งออกอากาศของเครื่องส่งจะสูงกว่าสัญญาณที่รับเข้ามาไม่น้อยกว่า 60 dB ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าจะต้องมีการแยกสายอากาศออกจากกัน (อาจจะด้วยระยะทาง หรือ Polarization) เพื่อป้องกันการแทรกสอด (Interference)



ภาพที่ 2.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครเวฟ [9]

สายอากาศแบบพาราโบลา มีโครงสร้างเป็นทรงกลม งานสะท้อนเป็นแบบพาราโบลอยด์ และมีตัวสะท้อนขั้นต้น (Primary radiator) วางอยู่ตำแหน่ง ณ จุดโฟกัสของจานพาราโบลอยด์ คลื่นที่ออกจากตัวกระจายคลื่นขั้นต้นจะเป็นทรงกลม (Spherical wave) และเมื่อลำคลื่นสะท้อนที่ผิวของจานจะทำให้คลื่นระนาบ (Plane wave) ออกมาที่ช่องเปิดของจานพาราโบลอยด์ จึงเท่ากับเป็นการขยายพื้นที่ของจานกระจายคลื่นสายอากาศแบบนี้มีใช้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารไมโครเวฟพื้นดิน หรือใช้รับสัญญาณดาวเทียม ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายและมีอัตราการขยายสูง สำหรับตัวกระจายคลื่นขั้นต้นนั้น ถ้าเป็นความถี่ย่านไมโครเวฟนั้นก็จะใช้พีคฮอว์นรูปต่าง ๆ แต่ถ้าเป็นความถี่ในระดับที่ต่ำกว่า 1 GHz ลงมาจะใช้เป็นสายอากาศแบบยาคีโคโพลแทน

## 2.5 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ [10]

เทคโนโลยีการสื่อสารระบบอัลตราไวด์แบนด์ได้ถูกนำมาในโครงการที่เป็นความลับของทหารสหรัฐอเมริกาในช่วงระหว่างปี 1960-1990 ซึ่งพบว่า เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารของระบบเรดาร์ (Radar) และการติดต่อสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง เทคโนโลยีการสื่อสารระบบอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra Wide Band : UWB) มีประวัติย้อนหลังมายาวนานตั้งแต่สมัยที่มาร์โคนิ (Marconi) ได้ทดลองสาธิตเครื่องส่งสปาร์กแก๊ป (spark gap) ในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกในปี 1901 จากนั้นเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการที่เป็นความลับของทหารสหรัฐฯ ในช่วงระหว่างปี 1960-1990 ซึ่งพบว่าอัลตราไวด์แบนด์เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับการสื่อสารของเรดาร์และการติดต่อสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง

ต่อมาเดือนพฤษภาคมในปี 2000 ทาง FCC (Federal Communication Commission) ได้ออกหนังสือ Notice of Proposed Rule Making (NPRM) ซึ่งจะเชิญชวนให้หน่วยงานต่างๆ ได้มีการนำเสนอข้อคิดเห็นต่างๆ ที่จะนำมาใช้ปรับปรุงแก้ไขกฎข้อบังคับของ FCC เพื่อควบคุม และจำกัดกำลังส่งสัญญาณของอัลตราไวด์แบนด์ ข้อบังคับใหม่นี้ได้ถูกประกาศออกมาใช้งานแล้ว เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี 2002 โดยเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายอัลตราไวด์แบนด์นี้อาจถูกให้คำนิยามตามที่กำหนดโดย FCC ว่าเป็นระบบสื่อสารสัญญาณไร้สายที่มีขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) มากกว่า 25% ของความถี่ศูนย์กลาง (Center frequency) หรือมากกว่า 1.5 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ซึ่งจะมีขนาดกว้างมากกว่าแบนด์วิดท์ที่ใช้โดยเทคโนโลยีอื่นๆ ในปัจจุบัน (ดูการเปรียบเทียบขนาดแบนด์วิดท์ของเทคโนโลยีต่างๆ ในตารางที่ 2.2 แนวโน้มในอนาคตของระบบอัลตราไวด์แบนด์)

เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a โดยมีความถี่ที่ถูกกำหนดโดยทาง FCC อยู่ในย่านที่ 3.1-10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับการสื่อสารผ่านดาวเทียม ทั้งนี้การกำหนดความถี่ในย่านดังกล่าวจะช่วยป้องกันปัญหาการรบกวนของสัญญาณวิทยุกับเทคโนโลยีสื่อสารภาคพื้นอื่นๆ ที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดังกล่าวเคยถูกห้ามในการนำมาใช้งานในช่วงระยะเวลาหนึ่ง อันเนื่องมาจากในช่วงแรกๆ เทคโนโลยีดังกล่าวได้รับการพัฒนาเพื่อการใช้งานในหน่วยงานทางทหารของสหรัฐอเมริกา รวมไปถึงความกังวลอันเนื่องมาจากความถี่ของอัลตราไวด์แบนด์ที่แตกต่างจากความถี่วิทยุทั่วไปซึ่งได้ส่งผลให้หลายฝ่ายกังวลว่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ จะไปรบกวนระบบสื่อสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อย่างเช่น ระบบ GPS (Global Positioning System) ที่อยู่ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และระบบการบิน เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการใช้แบนด์วิธของเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย

เทคโนโลยี	มาตรฐาน	เครือข่าย	อัตราความเร็ว	ระยะทาง	ความถี่
Wi-Fi	IEEE802.11a	WLAN	สูงสุด 54 Mbps	100 เมตร	5 GHz
Wi-Fi	IEEE802.11b	WLAN	สูงสุด 11 Mbps	100 เมตร	2.4 GHz
Wi-Fi	IEEE802.11g	WLAN	สูงสุด 54 Mbps	100 เมตร	2.4 GHz
WiMax	IEEE802.16d	WLAN	สูงสุด 75 Mbps (20 MHz BW)	6.4-10 กิโลเมตร	Sub 11 GHz
WiMax	IEEE802.16e	Mobile WMAN	สูงสุด 30 Mbps (10 MHz BW)	1.6-5 กิโลเมตร	2-6 GHz
WCDMA/ U MTS	3G	WWAN	สูงสุด 2 Mbps/ 10 Mbps	1.6-8 กิโลเมตร	1800,1900, 2100 MHz
CDMA 2000	1XEV-DO 3D	WWAN	สูงสุด 2.4 Mbps	1.6-8 กิโลเมตร	400,800,900, 1700,1800,1900 2100 MHz
EDGE	2.5 G	WWAN	สูงสุด 348 Kbps	1.6-8 กิโลเมตร	1900 MHz
UWD	IEEE802.15.3a	WPAN	100-480 Mbps	10 เมตร	7.5 GHz

ระบบสื่อสารไร้สายแต่เดิมนั้นมุ่งเน้นที่จะให้มีระยะทางในการส่งที่ไกลออกไป แต่แนวโน้มที่เกิดขึ้นในระยะหลังเริ่มที่จะมีการปรับปรุงความต้องการในด้านอื่นให้ดีขึ้น ขณะที่ยอมสูญเสียระยะทางให้สั้นลง ระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์เป็นตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดไปจนถึง 30 กิโลเมตร การมีระยะทางที่สั้นลง จะทำให้สามารถนำสเปกตรัมความถี่มาใช้ใหม่ ได้มากขึ้น ส่งผลให้รองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากขึ้น และเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาก็ได้ริเริ่ม มีระบบสื่อสารไร้สายที่มีระยะทางการส่งสั้นลงไปอีก คือประมาณ 10-100 เมตร โดยมุ่งที่จะให้บริการสื่อสารข้อมูลอย่างเช่น อินเทอร์เน็ตเป็นหลัก หลายคนคาดหมายว่า จะมีการนำระบบสื่อสารไร้สายในระยะสั้นนี้ มาใช้เป็นส่วนขยายเพิ่มเติม ให้กับระบบเซลลูลาร์ในยุคถัดไป สำหรับให้บริการด้านข้อมูลเสียง และภาพ แนวโน้มที่ผลักดันให้มีการนำระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้นเข้ามาใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบ อัลตราไวด์แบนด์ก็คือ

- ความต้องการที่เพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็วสำหรับการสื่อสารข้อมูลไร้สาย ในอุปกรณ์แบบพกพา ที่มีความต้องการแบนด์วิธที่สูงขึ้นแต่มีราคาที่ถูกกลง และมีการใช้กำลังงานต่ำกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน
- เกิดความคับคั่งของการใช้งานสเปกตรัมความถี่ที่มีการจัดสรรให้อนุญาตไป ซึ่งระบบอัลตราไวด์แบนด์จะเข้ามาช่วยลดปัญหาความขาดแคลนของช่องสัญญาณ ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากการแบ่งสรรช่องความถี่ในปัจจุบัน จะมีการกำหนดความถี่คลื่นสูงสุดและต่ำสุด และจะต้องมีคลื่นความถี่อีกช่วงหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันไม่ให้คลื่นในแต่ละย่านความถี่รบกวนซึ่งกันและกัน
- การเติบโตของการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง ในหน่วยงาน และองค์กรต่างๆ บ้านพักอาศัย และตามสถานที่สาธารณะต่างๆ
- ราคาที่ลดต่ำลงของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ รวมทั้งการใช้กำลังงานที่น้อยลง ของอุปกรณ์ในการประมวลผลสัญญาณ

#### 2.5.1 การเปรียบเทียบระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น [10]

หากเปรียบเทียบอัลตราไวด์แบนด์กับเทคโนโลยีอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth แล้ว ก็จะพบว่า เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีดังกล่าว ทั้งด้านความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล, การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ โดยอัลตราไวด์แบนด์จะมีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลสูงสุดถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตร และความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร ขณะที่ Wi-Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54 Mbps และหากเปรียบเทียบกับ Bluetooth ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล ในปัจจุบันเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ จะให้ความสามารถในการรับส่งข้อมูลสูงกว่า Bluetooth ถึง 100 เท่าเลยทีเดียว

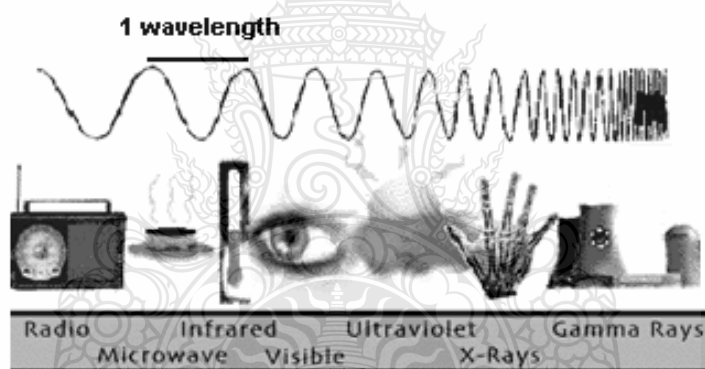
#### 2.6 เรดาร์ทะลุพื้นดิน (Ground Penetrating Radar: GPR) [11]

อัลตราไวด์แบนด์ เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ ในการสำรวจแผนที่โลก แต่เรดาร์ทะลุพื้นดิน (GPR) เป็นการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแผ่พลังงานไปถึงเป็นการสะท้อน และเป็นการระบุนความเปลี่ยนแปลงในไฟฟ้าและแม่เหล็กในพื้นดินได้อย่างแม่นยำ ระบบเรดาร์ทะลุพื้นดิน มีคุณสมบัติหลายชนิด ตัวอย่างเช่น สำรวจเส้นทางที่มีประโยชน์ในพื้นใต้ดิน เพื่อหาที่ตั้งของทางขึ้นลงของเครื่องบิน เพื่อความสมบูรณ์ทางโครงสร้าง เป็นการสำรวจระเบิดในที่ที่ยังไม่ได้สำรวจ เป็นการศึกษาหรือการวิจัยน้ำใต้ดินและสำรวจพื้นที่เพื่อการปลูกสร้าง



มาตรฐาน FCC [11] ได้มีการกำหนดให้เรดาร์ทะลุพื้นดิน มีการใช้ความถี่ต่ำกว่า 960 MHz หรือมีความกว้างของความถี่ 3.1-10.6 GHz และระบบเรดาร์ทะลุพื้นดิน ต้องสามารถปฏิบัติให้อยู่ในความใกล้เคียงกับพื้นผิวดิน เพื่อตรวจหาสิ่งที่ต้องการ และเป็นการสะท้อนสิ่งผิดปกติใต้พื้นผิวดิน เช่น วัตถุที่อยู่ในบ่อน้ำหรือถ้ำที่อยู่ใต้พื้นดิน

เรดาร์ทะลุพื้นดิน เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบโดยทางอ้อม เช่น วัตถุที่อยู่ใต้ก้อนกรวด และชั้นหาดทรายและ โครงสร้างต่างๆที่อยู่ในดิน ข้อมูลที่ได้จากเรดาร์ทะลุพื้นดิน เป็นการใช้รังสีที่สะท้อนกลับ หรือแสดงเป็นแผนที่ใต้พื้นดิน โดยที่จริงแล้วเรดาร์ทะลุพื้นดิน จะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยขณะที่อุปกรณ์จะทำการแผ่รังสี แต่ เรดาร์ทะลุพื้นดิน จะมีคลื่นวิทยุจะมีช่วงความยาวของคลื่นแสดงในภาพที่ 2.19 ความยาวคลื่นหรือความยาว 1 ลูกคลื่น เป็นความแตกต่างทางด้านพื้นฐานของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ขยายออกประมาณ 10 ล้านเมตร ไปถึงประมาณ 10 ล้านล้านเมตร ในทางตรงข้ามคลื่นวิทยุสามารถเปลี่ยนเป็นความยาวคลื่นได้น้อยมาก

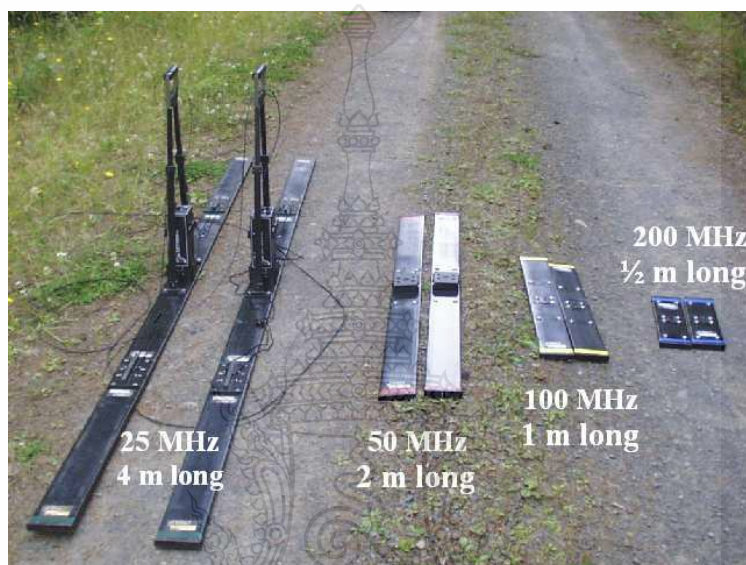


ภาพที่ 2.19 สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กและความชัดเจนของความยาวคลื่นสเปกตรัมจากคลื่นวิทยุ ไปจนถึงรังสีแกมมา [11]

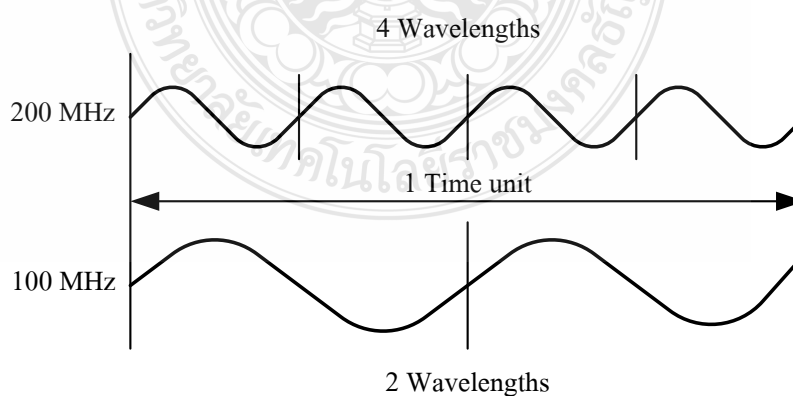
### 2.6.1 สายอากาศเรดาร์ทะลุพื้นดิน (Ground penetrating radar antenna) [11]

สายอากาศเรดาร์ทะลุพื้นดิน เป็นการระบุตำแหน่งช่องว่างในพื้นที่ผิวดินที่มีอย่างต่อเนื่อง จะแตกต่างจากสายอากาศโทรทัศน์ และสายอากาศวิทยุ สายอากาศเรดาร์ทะลุพื้นดิน นั้นจะคล้ายกับแผ่นกระดาษสกี 2 แผ่น จะแตกต่างในเรื่องของความยาวซึ่งมีความยาวถึง 4 เมตร หรือมีความยาวเมตรน้อยกว่านั้น จะแสดงในภาพที่ 2.20 สายอากาศที่มีความยาวแตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดคลื่นความถี่ที่แตกต่างกันด้วย ความถี่เป็นหน่วยของความยาวคลื่นต่อวินาทีโดยวัดเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ความถี่วิทยุที่วัดได้นั้นเป็นจำนวนของความยาวคลื่นต่อวินาที ซึ่งเรียกว่า เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ความยาวคลื่นสำหรับ

สายอากาศแต่ละเส้น จะเป็นระยะทางที่สายอากาศมีความใกล้เคียงกันมากๆ ในวัตถุใต้ดิน นักธรณีวิทยาส่วนใหญ่จะใช้สายอากาศเรดาร์ทะลุพื้นดิน ทำการสำรวจพื้นดินเพื่อหาวัตถุโบราณ หรือทำการสำรวจพื้นดินที่มีการทรุดตัวของพื้นดินในภาพที่ 2.20 จะเป็นการเปรียบเทียบความถี่ของสายอากาศ และที่สร้างคลื่นมา 4 ความยาวคลื่นที่สมบูรณ์ในความถี่ 200 MHz คลื่นที่ 2 จะมีความยาวคลื่นที่ความถี่ 100 MHz



ภาพที่ 2.20 สายอากาศ GPR ประกอบด้วยความถี่และความยาวที่แตกต่างกันแต่ละประเภท [11]

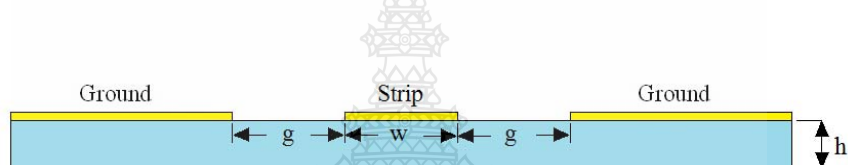


ภาพที่ 2.21 คลื่นความถี่สูงมีจำนวนช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าความถี่ต่ำ [11]

ในความยาวคลื่นที่ความถี่สูง มีการเปรียบเทียบของความถี่ในความยาวคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 2.21 นั้นจะสังเกตว่าความยาวคลื่น (Wavelengths) ในความถี่ที่ต่างกัน ค่าความยาวคลื่นก็จะเปลี่ยนไปตามความถี่ที่เกิดขึ้น

## 2.7 การออกแบบสายส่งของสายอากาศแบบระนาบร่วม [12]

การออกแบบสายส่งของสายอากาศแบบระนาบ ตัวแบบที่มีการส่งผ่านสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์คือการออกแบบสายส่งให้มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ( $Z_{in}$ ) โดยการคำนวณหาความกว้างของระนาบที่นำสัญญาณ ( $W = a$ ) จากสมการที่ 2.21-2.34 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) และความหนาหรือความสูงของวัสดุฐานรอง ( $h$ )



ภาพที่ 2.22 ตัวแปรการคำนวณหาขนาดระนาบที่นำสัญญาณ

หาความต้านทาน  $Z_o$

$$Z_o = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (2.21)$$

ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.22)$$

โดยที่

$$q = \frac{1}{2} \left( \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right) \quad (2.23)$$

( $q$  หมายถึง ตัวประกอบในการคูณ)

และ  $k_1 = \frac{a}{b}$  (2.24)

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$a = \frac{w}{2} \quad (2.26)$$

$$b = \frac{(2g + w)}{2} \quad (2.27)$$

โดยที่

$w$  หมายถึง ความกว้างของสายนำสัญญาณ

$g$  หมายถึง ความกว้างของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์

$h$  หมายถึง ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก

เนื่องจาก

$$K'(k) = K(k') \quad (2.28)$$

และ

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2.29)$$

โดยมีเงื่อนไขการประมาณค่า  $\frac{K(k)}{K'(k)}$  ได้ดังนี้

กรณี  $0 \leq k \leq 0.707$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k'})}{(1 - \sqrt{k'})} \right]} \quad (2.30)$$

กรณี  $0.707 \leq k \leq 1$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k'})}{(1 - \sqrt{k'})} \right] \quad (2.31)$$

และ 
$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.32)$$

การคำนวณหาแบนด์วิดท์ [13] จากช่วงความถี่ที่มี VSWR ต่ำกว่า 2 หรือสามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์จากกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB

$$\text{Bandwidth} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_r} \times 100\% \quad (2.34)$$

เมื่อ	$f_r$	คือ ค่าความถี่กลางของแบนด์วิดท์ที่ต้องการออกแบบ
	$f_{\max}$	คือ ค่าความถี่สูงสุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ต่ำกว่า -10 dB
	$f_{\min}$	คือ ค่าความถี่ต่ำสุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ต่ำกว่า -10 dB

## 2.8 การออกแบบความกว้างและความยาวของสายอากาศ [12]

การออกแบบความกว้างและความยาวของสายอากาศแบบระนาบร่วมของสายอากาศจะคำนวณความยาว  $L_t$  และความกว้าง  $W_t$  ได้จาก

$$W_t = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{re}}} - 2\Delta L \quad (2.35)$$

$$L_t = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.36)$$

โดย	$W_t$	คือ ความกว้างทั้งหมดของสายอากาศ
	$L_t$	คือ ความยาวทั้งหมดของสายอากาศ
	$C$	คือ ความเร็วแสงที่เคลื่อนที่ในอากาศเท่ากับ $3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที
	$f$	คือ ความถี่ที่ออกแบบ
	$\epsilon_{re}$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล
	$\epsilon_r$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

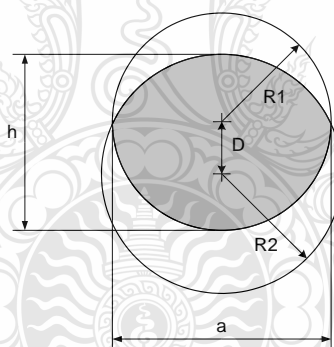
โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลและ  $\Delta L$  หาได้จาก

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{L_t} \right]^{1/2} \quad (2.37)$$

$$\Delta L = h(0.412) \frac{[\epsilon_{re} + 0.3] \times \left[ \frac{L_t}{h} + 0.264 \right]}{[\epsilon_{re} - 0.258] \times \left[ \frac{L_t}{h} + 0.8 \right]} \quad (2.38)$$

## 2.9 การออกแบบสายอากาศแบบรัศมีบอล [2]

ในการออกแบบสายอากาศแบบรัศมีบอลทำการออกแบบจากลูกรัศมีบอลในกีฟาร์กบี้ โดยมี การพิจารณาการทับซ้อนของวงกลมทั้งสองวงกลม มีระยะห่างของวงกลมทั้งสองในการคำนวณหาค่า ของสายอากาศนั้น ต้องการหาความสูง ( $h$ ) และความกว้าง ( $a$ ) ของสายอากาศดังแสดงในภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศรัศมีบอล [2]

โดยพิจารณาจาก  $\lambda_L$  เมื่อ  $\lambda_L$  คือความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด โดยมีสมการของความยาวคลื่นดังนี้

$$\lambda_L = \frac{c}{f_L} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสงที่เคลื่อนที่ในอากาศเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที  
 $f_L$  คือ ค่าความถี่ต่ำสุดมีหน่วยเป็น Hz

จากค่า  $\lambda_L$  ที่หาได้จากสมการที่ 2.39 เราจะสามารถทำการคำนวณเพื่อหาความสูงของสายอากาศ ( $h$ ) ได้โดย

$$h = \frac{\lambda_L}{4} \quad (2.10)$$

จากนั้นหาค่าของระยะห่างของจุดศูนย์กลางของวงกลมทั้งสองรูป ( $D$ ) ได้จาก

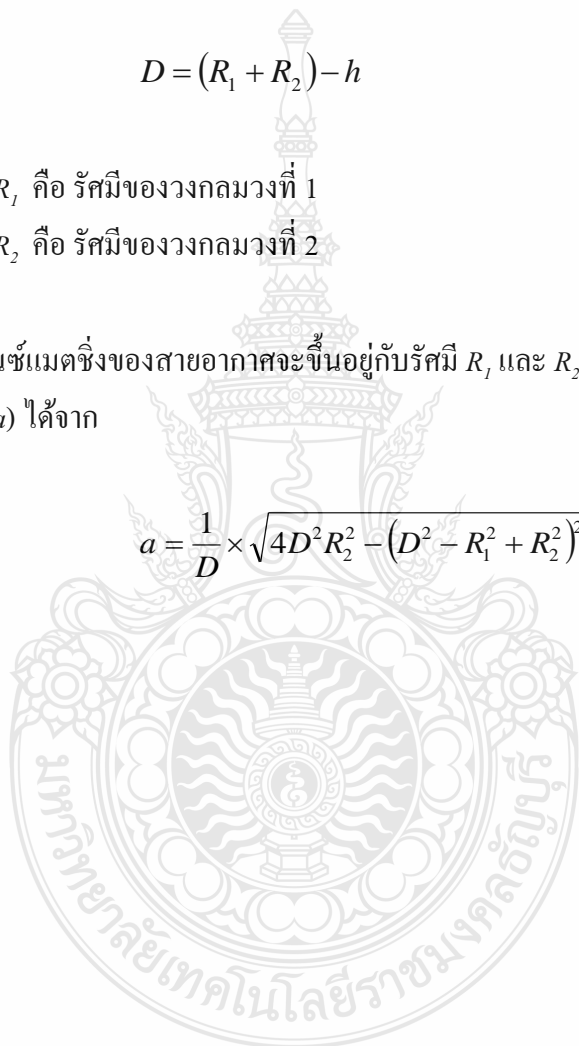
$$D = (R_1 + R_2) - h \quad (2.11)$$

โดย  $R_1$  คือ รัศมีของวงกลมวงที่ 1

$R_2$  คือ รัศมีของวงกลมวงที่ 2

อิมพีแดนซ์แมตซ์ของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับรัศมี  $R_1$  และ  $R_2$  ซึ่งจะสามารถหาความกว้างของสายอากาศ ( $a$ ) ได้จาก

$$a = \frac{1}{D} \times \sqrt{4D^2 R_2^2 - (D^2 - R_1^2 + R_2^2)^2} \quad (2.12)$$



## บทที่ 3

### การออกแบบสายอากาศ

#### 3.1 บทนำ

ระบบการสื่อสารไร้สายในรูปแบบระยะทางสั้นที่มีการรับ-ส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมากมีขนาดของแบนด์วิดท์ที่กว้างความเร็วสูงนั้นได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ในด้านการนำไปใช้กับระบบค้นหาโลหะใต้พื้นดิน ระบบส่งภาพและเสียง ระบบทางการศึกษา ระบบทางทหารและระบบทางการแพทย์ เป็นต้น จากระบบดังกล่าวนี้ ได้ใช้มาตรฐานของ FCC ที่กำหนดช่วงย่านความถี่แถบ 3.1 - 10.6 GHz (Ultra-Wide Band : UWB) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ผู้ที่ใช้งานระบบมาตรฐานนั้น ได้นำมาพัฒนาออกแบบและลดขนาดของอุปกรณ์วงจรต่างๆ ให้ใช้งานแบบไม่จำกัดพื้นที่สามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นและอีกส่วนที่สำคัญในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือสายอากาศที่ช่วยเพิ่มที่ประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์หรือวงจรในระบบต่างๆ จึงได้มีผู้ออกแบบสายอากาศเพื่อตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่ง แต่มีโครงสร้างสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ นำมาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องมือที่ขนาดเล็กไม่สะดวก จากที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงได้ศึกษาโครงสร้างสายอากาศ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 และออกแบบสายอากาศแบบรักรีบลดขนาดเล็ก และการออกแบบสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง ร่วมกับโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สายอากาศต้นแบบมีประสิทธิภาพดีที่สุด

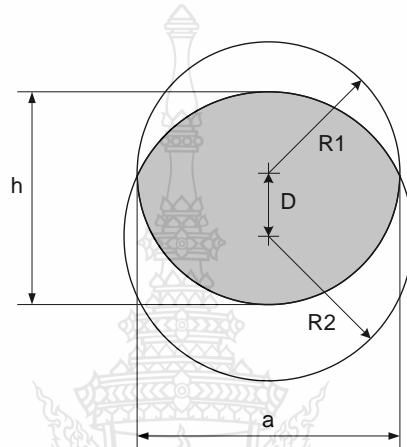
#### 3.2 สายอากาศแบบรักรีบลดขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง

สายอากาศแบบรักรีบลดขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง ซึ่งมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 - 10.6 GHz ตามมาตรฐานของ FCC (Federal Communication Commission) [11] ที่ได้มีการออกแบบโดยอาศัยพื้นฐานอ้างอิงจากแบบดั้งเดิม โดยอาศัยโครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบดั้งเดิม การวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบรักรีบลด โดยทำการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการสร้างเป็นแผ่นวงจรพิมพ์แทนการใช้แผ่นอลูมิเนียม เพื่อความสะดวกในการสร้างอีกทั้งยังเป็นการลดน้ำหนัก และขนาดของสายอากาศ โดยสายอากาศโครงสร้างใหม่นี้ยังคงคุณลักษณะการใช้งานของตัวสายอากาศให้อยู่ในย่านความถี่ 3.1 - 10.6 GHz



### 3.2.1 การออกแบบสร้างสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศแบบรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง ซึ่งมีความถี่ 3.1 – 10.6 GHz จะทำการออกแบบและสร้างชิ้นงาน ที่มีลักษณะคล้ายกับคูร์กบ็อลในกีฬารักบี้ ที่ใช้งานในความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยมีการพิจารณาการทับซ้อนของวงกลมทั้งสองวงกลม มีระยะห่างของวงกลมทั้งสองในการคำนวณหาค่าของสายอากาศนั้นจะต้องการหาความสูง และความกว้างของสายอากาศดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ตัวแปรระยะของสายอากาศรัศมีบอล [2]

โดยพิจารณาจาก  $\lambda_L$  จากสมการที่ 2.39 จะได้

$$\lambda_L = \frac{c}{f_L} = \frac{3 \times 10^8}{3.1 \times 10^9} = 96.77 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากค่า  $\lambda_L$  ที่หาได้จากสมการที่ 2.39 เราจะสามารถทำการคำนวณเพื่อหาความสูงของสายอากาศ ( $h$ ) ได้โดยใช้สมการที่ 2.40 จะได้

$$h = \frac{96.77 \times 10^{-3}}{4} = 24.2 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าของ  $h$  ที่ได้มา กับค่าของของ  $h$  จากสายอากาศแบบรัศมีบอลแบบดั้งเดิม [6] คือ 115 มิลลิเมตร จะสังเกตได้ว่าขนาดความสูงของสายอากาศแบบรัศมีบอลแบบดั้งเดิมสูง

กว่าที่คำนวณได้ 4.75 เท่าของความสูง  $h$  ดังนั้นค่ารัศมี  $R_1$  และ  $R_2$  หาได้จากรัศมีของ  $R_1'$  และ  $R_2'$  ของสายอากาศแบบดั้งเดิม

$$R_1 = \frac{R_1'}{4.75} = \frac{67 \times 10^{-3}}{4.75} = 14.1 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{4.75} = \frac{70 \times 10^{-3}}{4.75} = 14.7 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อได้ค่าของ  $h$ ,  $R_1$  และ  $R_2$  จะทำการหาค่าของ  $D$  ได้จากสมการที่ 2.41

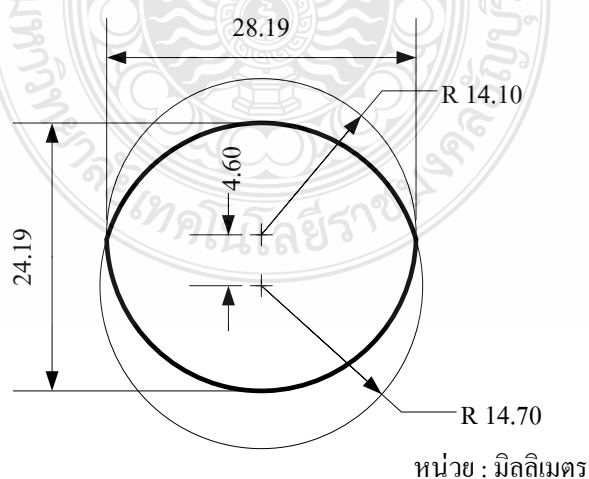
$$D = (14.1 \times 10^{-3} + 14.7 \times 10^{-3}) - 24.2 \times 10^{-3}$$

$$D = 4.6 \text{ มิลลิเมตร}$$

อิมพีแดนซ์แมตซ์ของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับรัศมี  $R_1$  และ  $R_2$  ซึ่งจะสามารถหาความกว้างของสายอากาศ ( $a$ ) ได้จากสมการที่ 2.42 โดยแทนค่าที่ได้มาข้างต้นลงในสมการที่ 2.42 จะได้

$$a = 28.19 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งจะสามารถสร้างสายอากาศแบบรีกบ็อบอลได้ดังภาพที่ 3.2

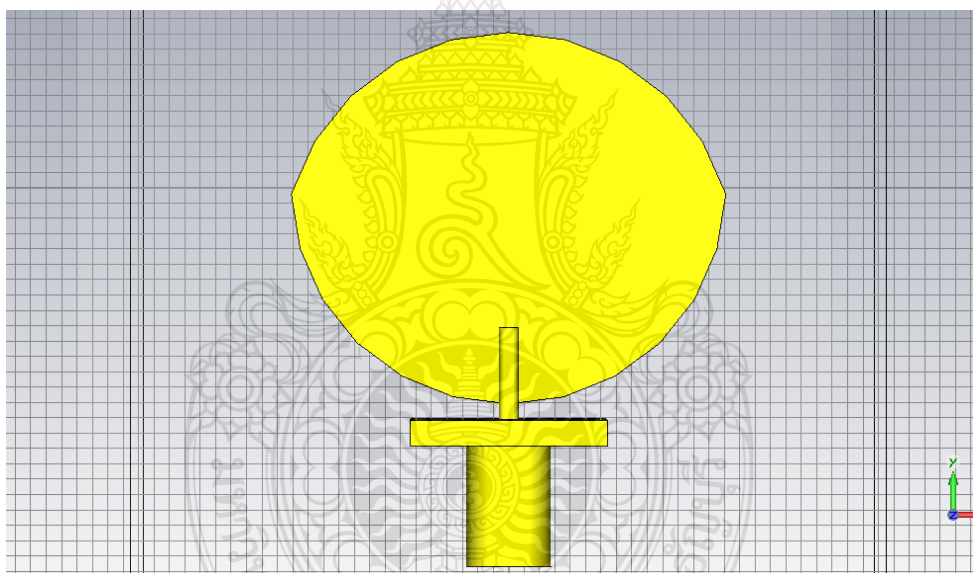


ภาพที่ 3.2 สัดส่วนของสายอากาศที่หาได้จากสมการ

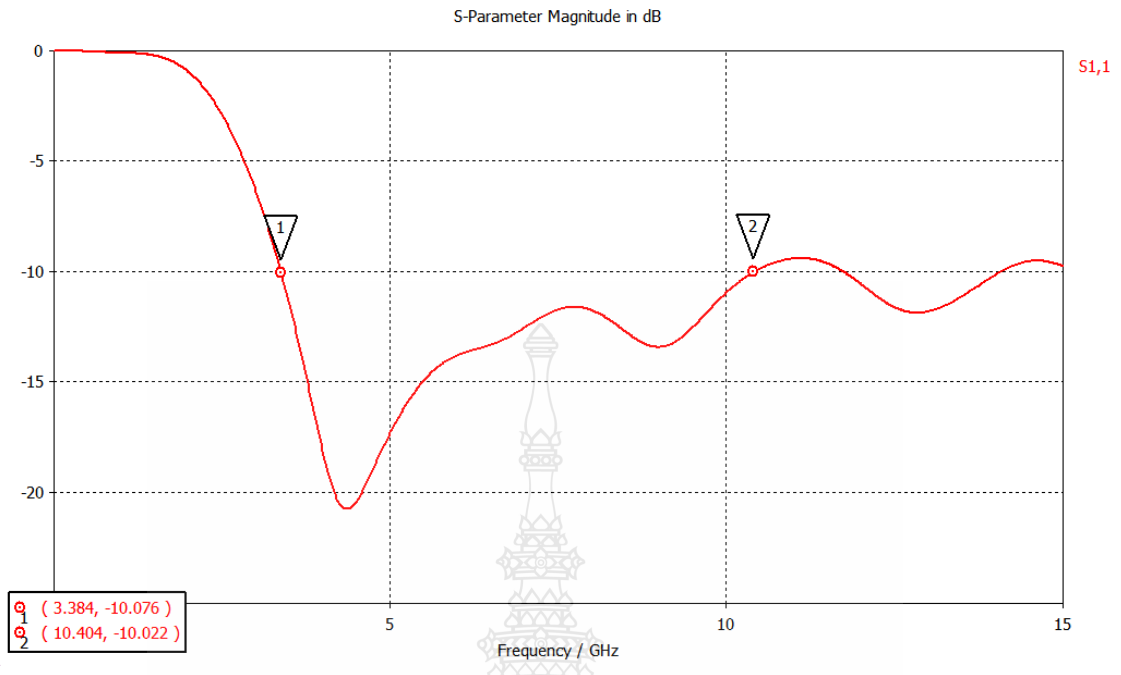
### 3.2.2 การจำลองแบบสายอากาศ

จากสายอากาศที่ได้มาจากการคำนวณ ต่อมานำมาสร้างบนโปรแกรมจำลอง CST โดยการสร้างสายอากาศรัศมีบอลแบบแผ่นพิมพ์สำหรับเรดาร์ภาคพื้นดินนั้นจะทำการจำลองการออกแบบโดยมีขนาดของสายอากาศที่เกิดจากการคำนวณในเบื้องต้น โดยใช้วัสดุฐานรอง FR4 ซึ่งมีความสูงของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.77 มิลลิเมตร โดยมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 ความหนาของทองแดงเท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร

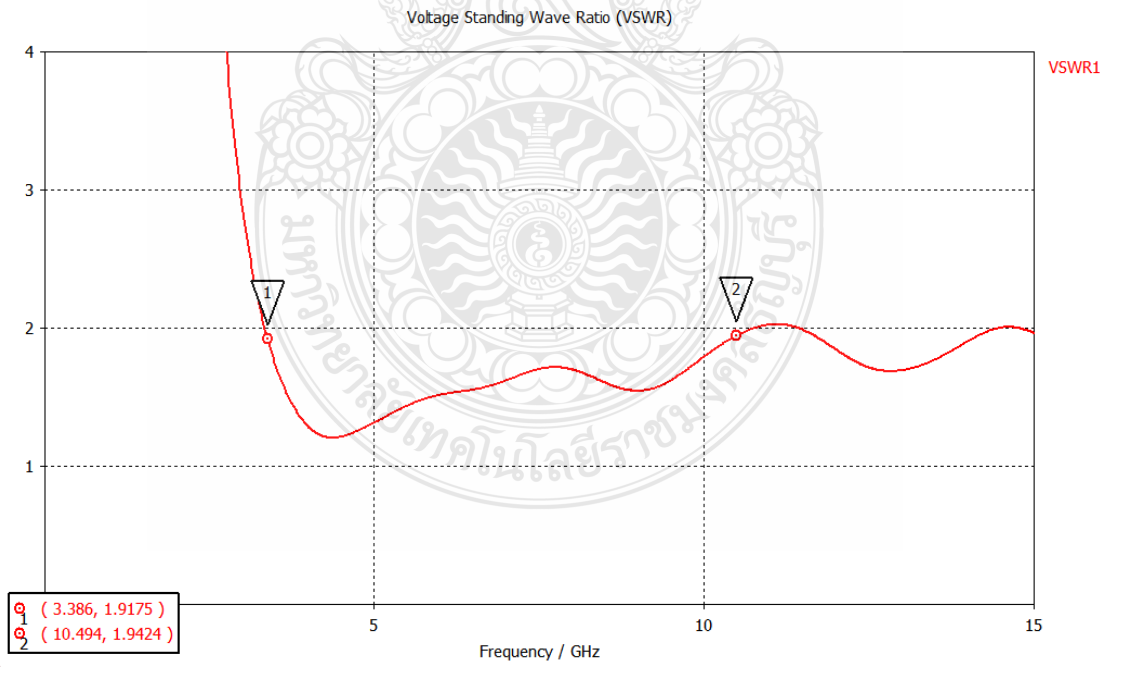
ในการออกแบบนั้นจะออกแบบให้ด้านหน้าของแผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรองเป็นรูปรัศมีบอล โดยจะมีหัวต่อ (Connector) แบบ SMA ต่อเข้าตรงด้านล่างของสายอากาศ ดังภาพที่ 3.3 และผลของการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง แสดงได้ตามภาพที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.3 สายอากาศแบบรัศมีบอลแบบแผ่นพิมพ์ที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม CST

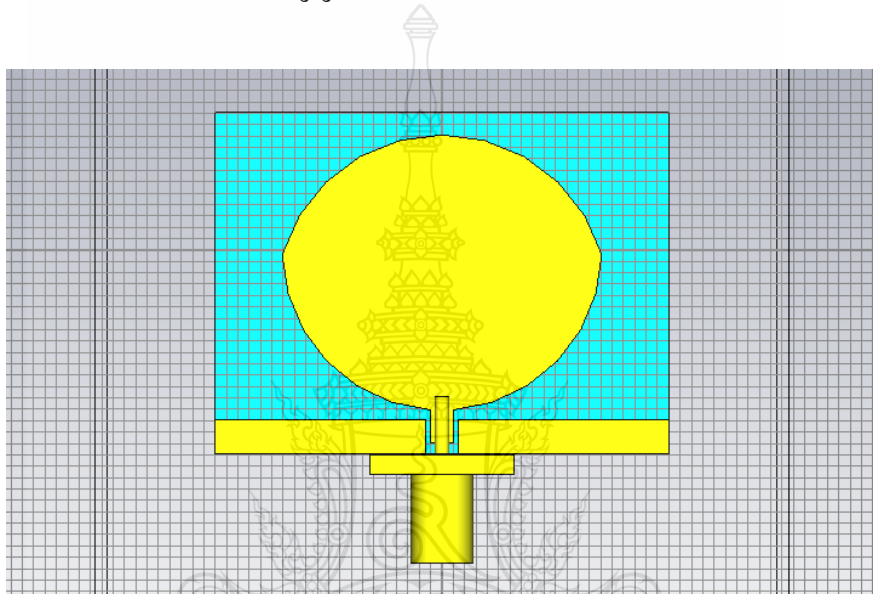


ภาพที่ 3.4 ผลของการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ



ภาพที่ 3.5 อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง

จากภาพที่ 3.4 จะเห็นว่าผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB จะเริ่มตั้งแต่ 3.35 GHz ไปจนถึง 10.40 GHz และจากภาพที่ 3.5 ค่าของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่มีค่าต่ำกว่า 2 จะเริ่มตั้งแต่ 3.35 – 10.4 GHz ซึ่งยังไม่ครอบคลุมช่วงของ UWB คือ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ดังนั้นจึงได้ศึกษางานวิจัย [4] เพิ่มเติมพบว่าเมื่อเพิ่มแถบกราวด์ด้านล่าง และป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมทำให้สามารถขยายแบนด์วิธของสายอากาศได้ จึงได้ทำการออกแบบโดยเพิ่มแถบกราวด์ด้านล่างและป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบแถบความถี่กว้างดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 สายอากาศแบบรับบิ้นอล ที่เพิ่มแถบกราวด์ และป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม สำหรับแถบความถี่กว้างยิ่ง

### 3.2.3 ออกแบบโครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

#### 3.2.3.1 ออกแบบโครงสร้างสายนำสัญญาณด้วยโปรแกรม AppCAD for Windows

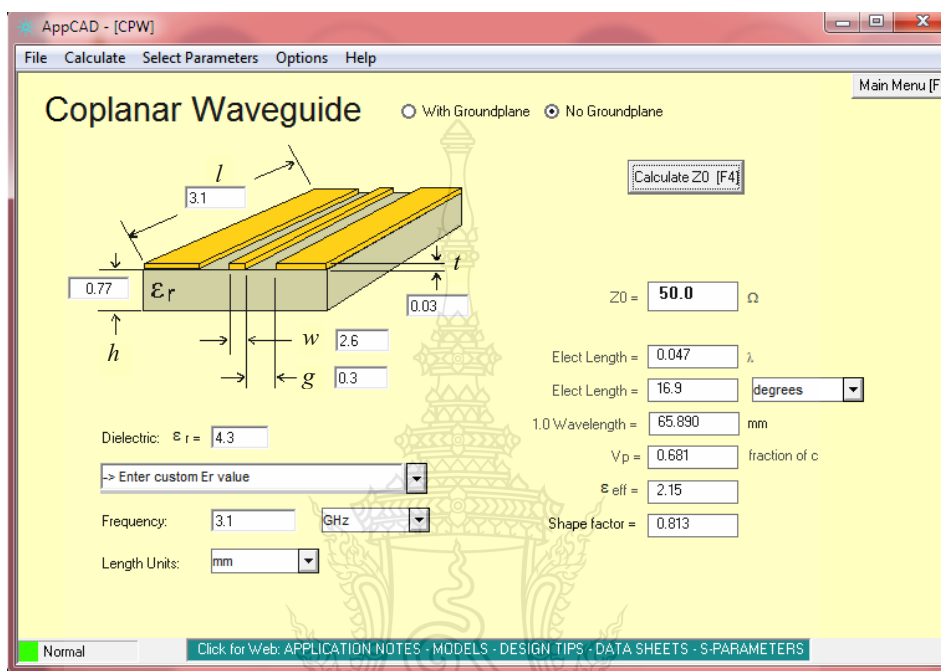
สามารถหาขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณ (Strip หรือ  $w$ ) และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบสร้างเงา ( $g$ ) ได้ด้วยวิธีการใช้โปรแกรม AppCAD for Windows โดยจะต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานของแผ่น FR4 ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบดังนี้

$$\text{ความหนาของแผ่นตัวนำ } (t) = 0.03 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ความสูงของแผ่นไดอิเล็กตริก } (h) = 0.77 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ค่าไดอิเล็กตริก Dielectric } (\epsilon_r) = 4.3$$

โดยจะใช้เทคนิคการปรับจูนค่าความกว้างของสายนำสัญญาณ และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบสร้างเงา จนกว่าจะได้ค่าความต้านทานที่ 50 โอห์มหรือใกล้เคียง ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 โปรแกรม AppCAD for Windows สำหรับหาขนาดของสายนำสัญญาณ

จากภาพที่ 3.7 การปรับจูนทำให้ได้ขนาดของความกว้างของสายนำสัญญาณ ที่ความกว้าง 2 มิลลิเมตร และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบสร้างเงาที่ความกว้าง 0.3 มิลลิเมตร โดยใช้ความถี่ในการออกแบบที่ 3.1 GHz และความยาวของสายนำสัญญาณที่ 3.1 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ได้ค่า  $Z_0 = 50.0 \Omega$

### 3.2.3.2 ออกแบบโครงสร้างสายนำสัญญาณด้วยวิธีการคำนวณจากสูตร

จากการปรับจูนหาค่าขนาดของความกว้างของสายนำสัญญาณ (Strip หรือ  $w$ ) ได้ที่ความกว้าง 5 มิลลิเมตร และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบสร้างเงา ที่ความกว้าง 0.5 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม AppCAD แล้ว สามารถนำค่าที่ได้ดังกล่าวมาคำนวณเพื่อหาความต้านทาน  $Z_0$  ได้จากสูตรที่ 2.21-2.32 เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าที่ได้มาว่าตรงกันหรือไม่

หาค่า  $a$  ได้จากสมการที่ 2.26

$$\begin{aligned} a &= \frac{w}{2} \\ &= \frac{2.6}{2} \\ &= 1.3 \end{aligned}$$

หาค่า  $b$  ได้จากสมการที่ 2.27

$$\begin{aligned} b &= \frac{(2g + w)}{2} \\ &= \frac{(2(0.3) + 2.6)}{2} \\ &= 1.6 \end{aligned}$$

หาค่า  $k_1$  ได้จากสมการที่ 2.24

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{a}{b} \\ &= \frac{1.3}{1.6} \\ &= 0.813 \end{aligned}$$

หาค่า  $k_2$  ได้จากสมการที่ 2.25

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \\ &= \frac{\sinh\left(\frac{1.3\pi}{2 \times 0.77}\right)}{\sinh\left(\frac{1.6\pi}{2 \times 0.77}\right)} \end{aligned}$$

$$= 0.541$$

หาค่า  $k'$  ได้จากสมการที่ 2.29

$$k' = \sqrt{1 - k^2}$$

จะได้  $k_1'$  ดังนี้

$$\begin{aligned} k_1' &= \sqrt{1-k_1^2} \\ &= \sqrt{1-0.813^2} \\ &= 0.583 \end{aligned}$$

จะได้  $k_2'$  ดังนี้

$$\begin{aligned} k_2' &= \sqrt{1-k_2^2} \\ &= \sqrt{1-0.841^2} \\ &= 0.861 \end{aligned}$$

หาค่า  $\frac{K(k_1)}{K'(k_1)}$  ได้จากสมการที่ 2.30 เนื่องจาก  $k_1' = 0.583$  ตามเงื่อนไข  $0 \leq k \leq 0.707$

$$\begin{aligned} \frac{K(k_1)}{K'(k_1)} &= \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1+\sqrt{k_1'})}{(1-\sqrt{k_1'})} \right]} \\ &= \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1+\sqrt{0.583})}{(1-\sqrt{0.583})} \right]} \\ &= 1.162 \end{aligned}$$

ฉะนั้น  $\frac{K'(k_1)}{K(k_1)}$  จึงเท่ากับ 0.861

หาค่า  $\frac{K(k_2)}{K'(k_2)}$  ได้จากสมการที่ 2.31 เนื่องจาก  $k_2' = 0.861$  ตามเงื่อนไข  $0.707 \leq k \leq 1$

$$\begin{aligned} \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} &= \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1+\sqrt{k_2'})}{(1-\sqrt{k_2'})} \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1+\sqrt{0.861})}{(1-\sqrt{0.861})} \right] \\ &= 1.222 \end{aligned}$$



หาค่า  $q$  ได้จากสมการที่ 2.23

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{2} \left( \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right) \\ &= \frac{1}{2} (1.222 \times 0.861) \\ &= 0.526 \end{aligned}$$

หาค่า  $\epsilon_{re}$  ได้จากสมการที่ 2.22

$$\begin{aligned} \epsilon_{re} &= 1 + q(\epsilon_r - 1) \\ &= 1 + 0.526(4.3 - 1) \\ &= 2.735 \end{aligned}$$

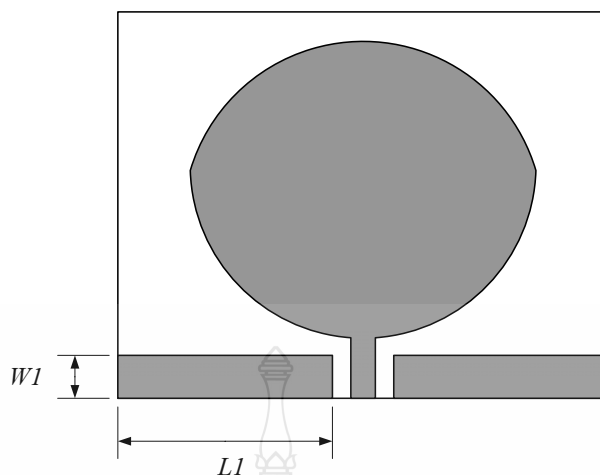
หาค่า  $Z_o$  ได้จากสมการที่ 2.21

$$\begin{aligned} Z_o &= \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \\ &= \frac{30\pi}{\sqrt{2.858}} 0.861 \\ &= 49.024 \Omega \end{aligned}$$

หาค่า  $\lambda_g$  ได้จากสมการที่ 2.32

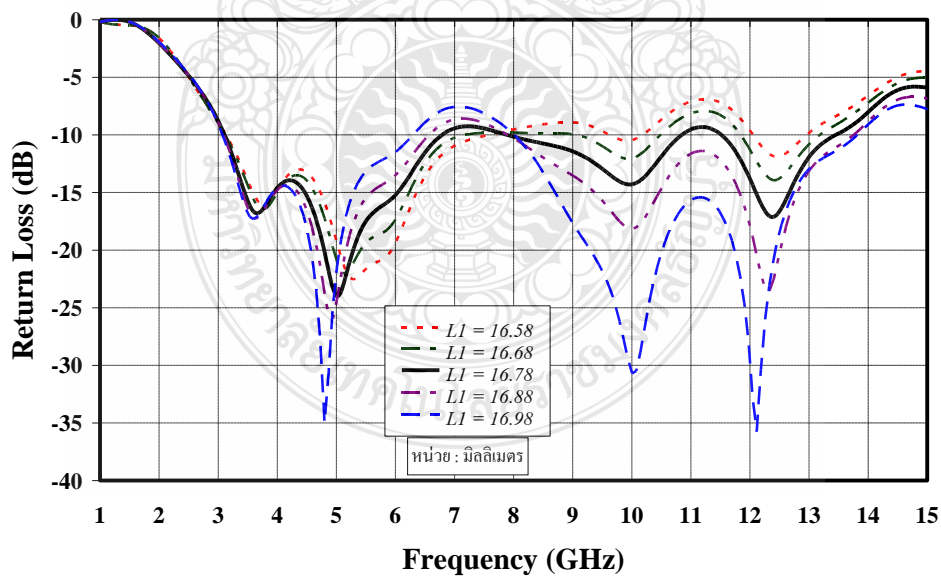
$$\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{re}}} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{(3.1 \times 10^9) \sqrt{2.735}} \\ &= 58.52 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

เมื่อออกแบบแล้วได้ทำการปรับขนาดของแถบระนาบสร้างเงาเพื่อหาขนาดที่สามารถทำให้สายอากาศสามารถใช้งานในช่วง 3.1 -10 GHz ได้ดีที่สุด โดยใช้วิธีการปรับขนาดของความยาวของระนาบสร้างเงา ( $L1$ ) และความกว้างของระนาบสร้างเงา ( $W1$ ) ดังภาพที่ 3.8



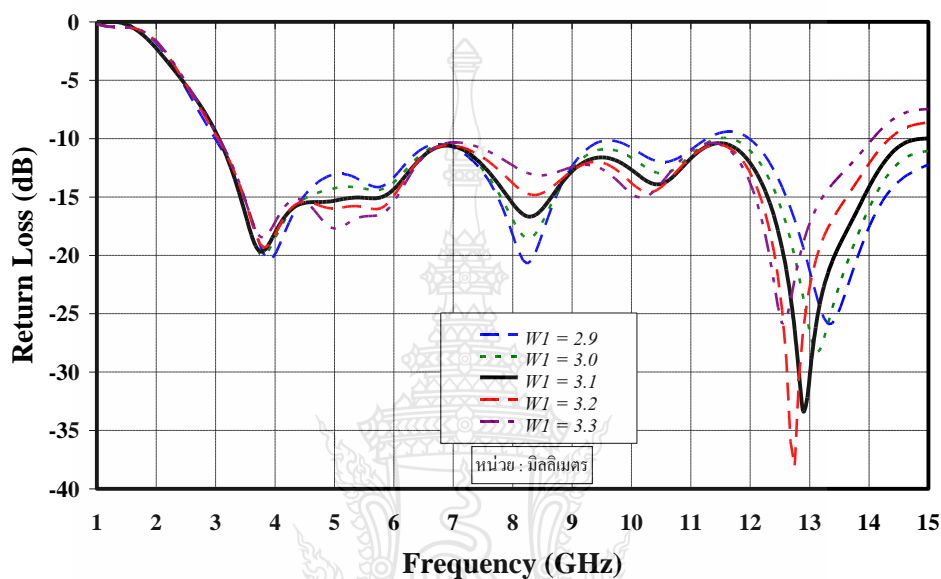
ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งความยาว และความกว้างของระนาบสร้างเงาที่ทำการปรับ

โดยจะเริ่มโดยการปรับที่ความยาวของแถบระนาบสร้างเงา ( $L1$ ) ซึ่งจะได้ขนาดความยาวที่เหมาะสมคือ 16.78 มิลลิเมตร ซึ่งผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของการปรับขนาดความยาวในแต่ละขนาดแสดงได้ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เมื่อปรับความยาวของแถบระนาบสร้างเงา

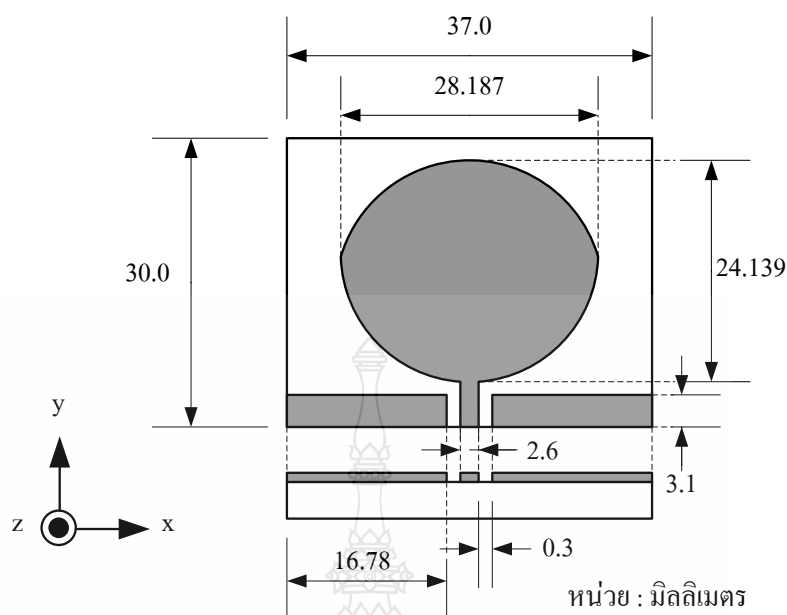
จากภาพที่ 3.9 จะเห็นว่าที่  $L1 = 16.78$  มิลลิเมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่เหมาะสมที่สุด แต่ก็ยังไม่เพียงพอเพราะยังมีบางช่วงที่ยังสูงกว่า  $-10$  dB อยู่ จึงได้ทำการปรับความกว้างของแถบกราวด์ ( $W1$ ) เพิ่ม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเมื่อทำการปรับความกว้างของแถบกราวด์ จะแสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เมื่อปรับความกว้างของแถบระนาบสร้างเงา

จากภาพที่ 3.10 จะแสดงให้เห็นว่าค่าของความกว้างของแถบระนาบสร้างเงาที่ดีที่สุดคือ  $3.1$  มิลลิเมตร เมื่อขนาดความยาวของระนาบสร้างเงาเท่ากับ  $16.78$  มิลลิเมตร ซึ่งทำให้สายอากาศแบบรัศมีบอลขนาดเล็กสามารถใช้งานในช่วงตั้งแต่  $3.1 - 14.9$  GHz ดังนั้นหลังจากทำการปรับค่าของความยาว และความกว้างของระนาบสร้างเงา จะได้ค่าขนาดความยาวของระนาบสร้างเงาของสายอากาศเท่ากับ  $16.78$  มิลลิเมตร และความกว้างของระนาบสร้างเงาของสายอากาศแลร์รัศมีบอลขนาดเล็กเท่ากับ  $3.1$  มิลลิเมตร

จากการคำนวณและจำลองผลบนโปรแกรม CST เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของสายอากาศดีที่สุด ทำให้ได้ค่าขนาดต่างๆ ของสายอากาศ ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ขนาดของสายอากาศแบบรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในแถบย่านความถี่กว้างยิ่ง

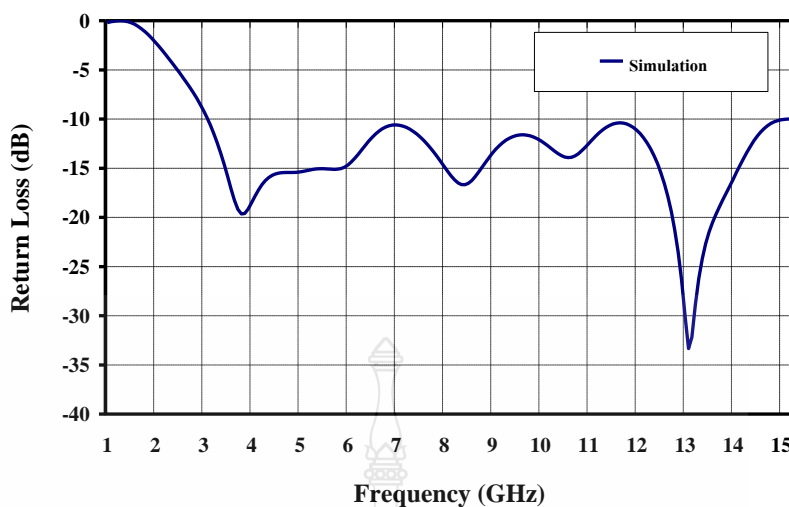
### 3.2.4 ผลการจำลองแบบสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก

ผลการจำลองแบบสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งนั้น โดยแสดงได้จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง อินพุตอิมพีแดนซ์ และการแผ่พลังงานสนามระยะไกลรอบทิศทางในระนาบ 3 มิติ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 3.2.4.1 สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ คือค่าที่บ่งบอกถึงการสะท้อนกลับของสัญญาณ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB นั้น จะทำให้สายอากาศเกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี ดังแสดงในภาพที่ 3.12 จะเห็นว่าในช่วงตั้งแต่ 3.061 – 14.928 GHz ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ ของสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง จะมีค่าต่ำกว่า -10 dB โดยมีแบนด์วิดท์ซึ่งใช้การคำนวณจากสมการที่ 2.34

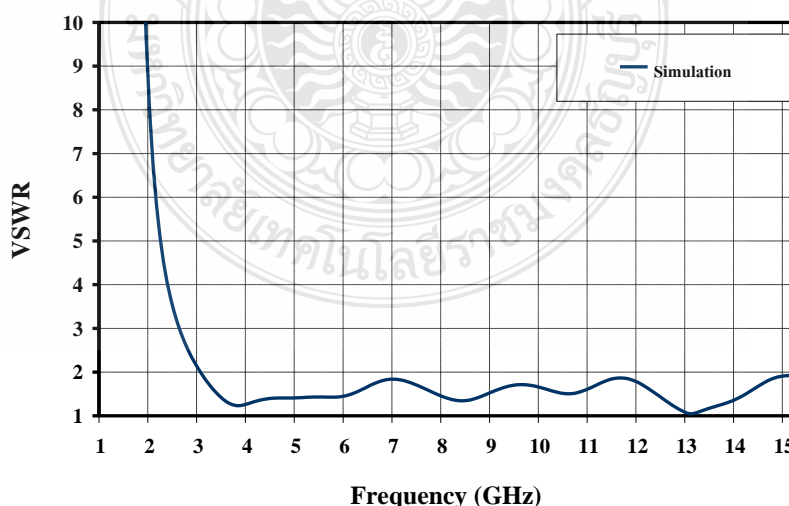
$$\text{Bandwidth} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_r} \times 100\% = \frac{14.928 - 3.061}{(14.928 + 3.061)/2} \times 100 = 131.94\%$$



ภาพที่ 3.12 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

#### 3.2.4.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)

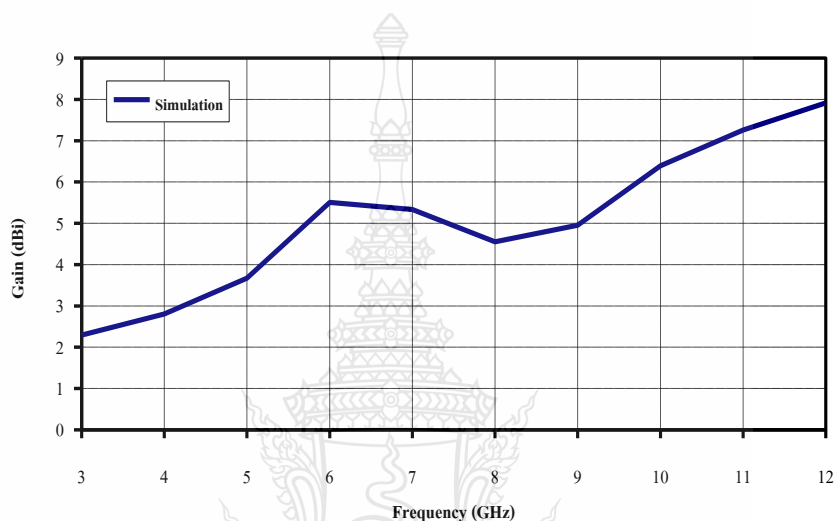
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง คือค่าที่บ่งบอกถึงอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง ( $V_{\max}/V_{\min}$ ) กล่าวคือเมื่อเราป้อนสัญญาณจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังสายอากาศซึ่งทำหน้าที่เป็นโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์คงที่ 50 โอห์ม อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่งที่ได้นั้นจะต้องเท่ากับ 1 โดยค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศรีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งนั้น ในช่วงตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz จะมีค่าใกล้เคียง 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศรีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

### 3.2.4.3 อัตราขยายของสายอากาศ

สำหรับส่วนของค่าอัตราขยายของสายอากาศสายอากาศรัศมีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง การจำลองแบบโดยเริ่มที่ความถี่ 3 GHz มีค่าอัตราขยาย 3.29 dBi จนถึงความถี่ 12 GHz มีค่าอัตราขยาย 7.92 dBi มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.06 dBi ค่าอัตราขยาย ณ. ความถี่อื่นๆแสดงได้ดังภาพที่ 3.14

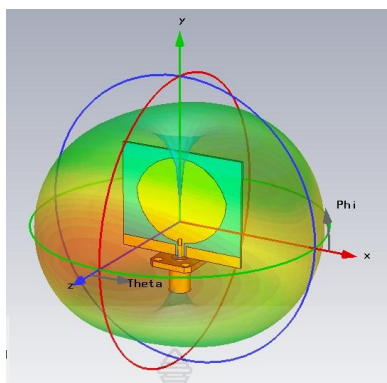


ภาพที่ 3.14 อัตราขยายของสายอากาศสายอากาศรัศมีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

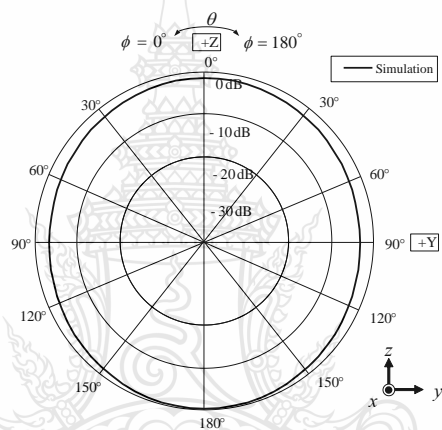
### 3.2.4.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน

จากนั้นทำการวัดแบบรูปของการแผ่พลังงานของการจำลองที่ความถี่ 4 GHz 8 GHz และ 12 GHz พบว่าการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) เป็นแบบสองทิศทาง และในส่วนการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) เป็นแบบสองทิศทาง

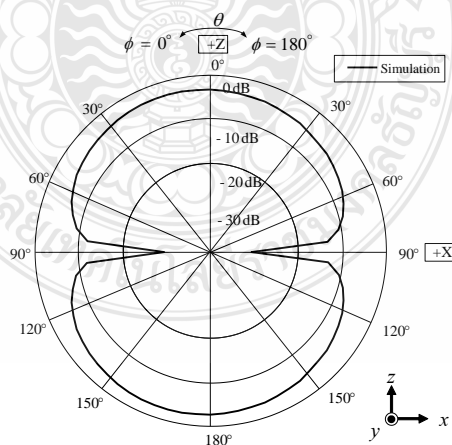
โดยแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก และการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 4 GHz 8 GHz และ 12 GHz สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.15 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ



(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระบบ 3 มิติ

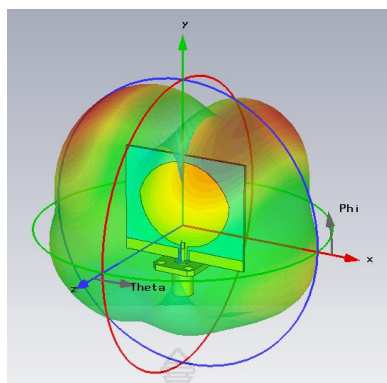


(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

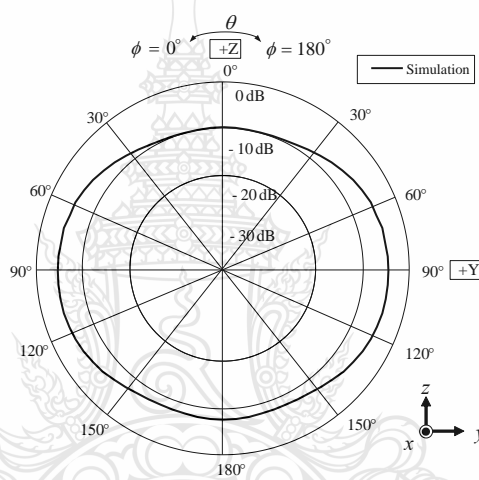


(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

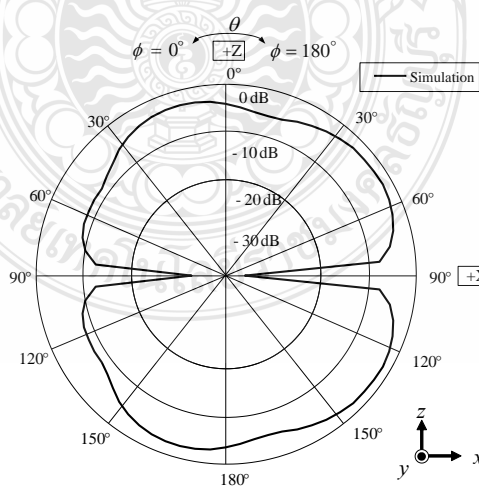
ภาพที่ 3.15 แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 4 GHz



(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระบบ 3 มิติ



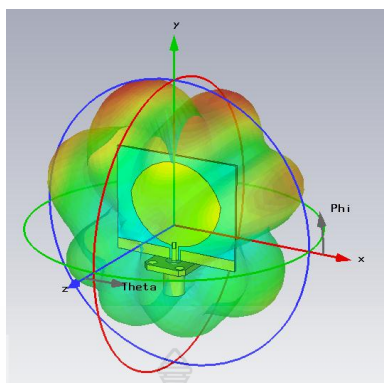
(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



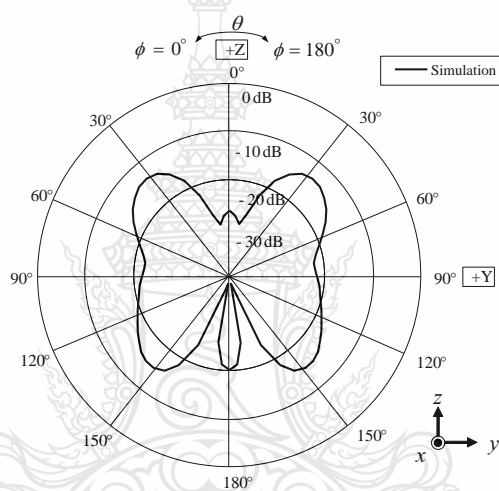
(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 3.16 แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 8 GHz

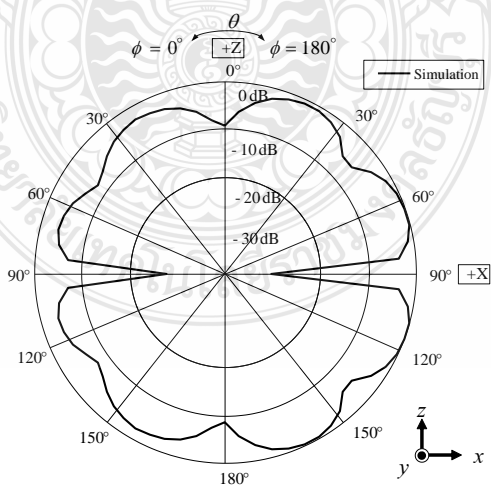




(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระบบ 3 มิติ



(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 3.17 แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 12 GHz

### 3.3 สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างด้วยเทคนิคการเซาะร่อง

การออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยเทคนิคการเซาะร่องรูปตัวซี ที่ส่วนแผ่พลังงาน และรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา โดยโครงสร้างสายอากาศถูกออกแบบบนแผ่นวงจร พิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิดเอพอกซีโฟร์ (FR4) การออกแบบสายอากาศใช้วิธีการศึกษาและแปรค่าพารามิเตอร์ด้วยการจำลองแบบเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ที่ใช้งานในช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยอาศัยการปรับขนาดของร่องรูปตัวซีที่ตัวสายอากาศ และขนาดของการเซาะรูปครึ่งวงกลมที่กราวด์จนมีการสูญเสียย้อนกลับต่ำที่สุดรวมไปถึงการคำนึงถึงคุณลักษณะของแบนด์วิดท์และแบบรูปการแพร่คลื่น

#### 3.3.1 การออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเริ่มศึกษาจากโครงสร้างสายอากาศและใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปทรงเลขาคณิต [5-6] มาทำการคำนวณและปรับจูน ด้วยวิธีเชิงประจักษ์ (Experimental method) ร่วมกับโปรแกรม CST จนได้ขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมหลังจากทำการปรับขนาดจนทำให้สายอากาศสามารถรองรับย่านความถี่แถบกว้างคือ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และมีประสิทธิภาพสูงสุด

##### 3.3.1.1 ออกแบบความกว้างและความยาวของสายอากาศ

การออกแบบความกว้างและความยาวของสายอากาศแบบระนาบร่วมของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยเทคนิคการเซาะร่องรูปตัวซี โดยจะคำนวณความยาว และความกว้างของสายอากาศได้จากสมการ 2.35 – 2.38 โดยออกแบบที่ความถี่ต่ำสุดที่ใช้งานคือ 3.1 GHz จะได้อ่า  $L_r$  ได้จากสมการที่ 2.36

$$L_r = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.1 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.3 + 1}} = 34.97 \approx 35 \text{ มิลลิเมตร}$$

และหาค่า  $\epsilon_{re}$  ซึ่งใช้ในการหาค่า  $W_r$  ได้จากสมการที่ 2.37

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{L_r} \right]^{-1/2} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{0.77}{34.97} \right)^{-1/2} = 4.093$$

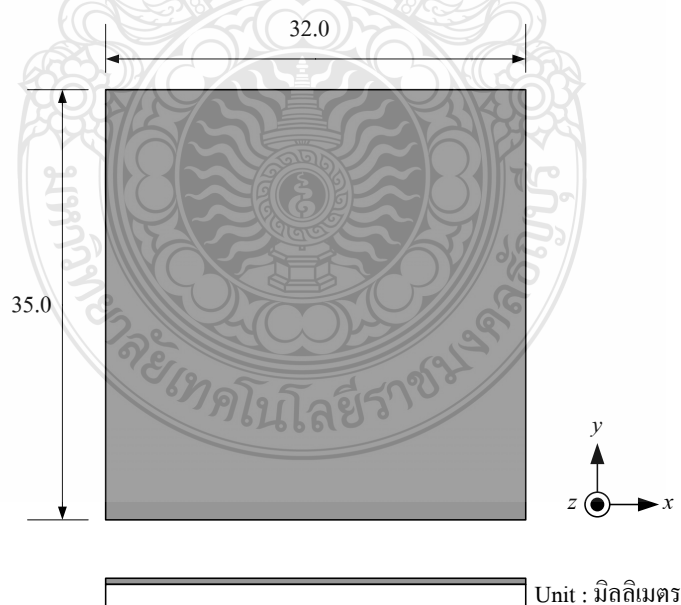
จากนั้นหาค่า  $\Delta L$  ได้จากสมการที่ 2.38

$$\Delta L = (0.77 \times 0.412) \frac{[4.3 + 0.3] \times \left[ \frac{30}{0.77} + 0.264 \right]}{[4.093 - 0.258] \times \left[ \frac{30}{0.77} + 0.8 \right]} = 17.8$$

และหาค่า  $W_t$  ได้จากสมการที่ 2.35

$$W_t = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{re}}} + 2\Delta L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.1 \times 10^9} + 17.8 = 31.89 \approx 32 \text{ มิลลิเมตร}$$

โดยโครงสร้างสายอากาศต้นแบบถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ซึ่งขนาดความยาว ( $L$ ) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง ( $W$ ) เท่ากับ 34 มิลลิเมตร แผ่นวงจรพิมพ์ดังกล่าวมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) = 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐาน รอง ( $h$ ) = 0.764 มิลลิเมตร ขนาดโครงสร้างที่ได้จากคำนวณแสดงได้ตามภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ

### 3.3.1.2 ออกแบบโครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

ก) ออกแบบโครงสร้างสายนำสัญญาณด้วยโปรแกรม AppCAD for Windows

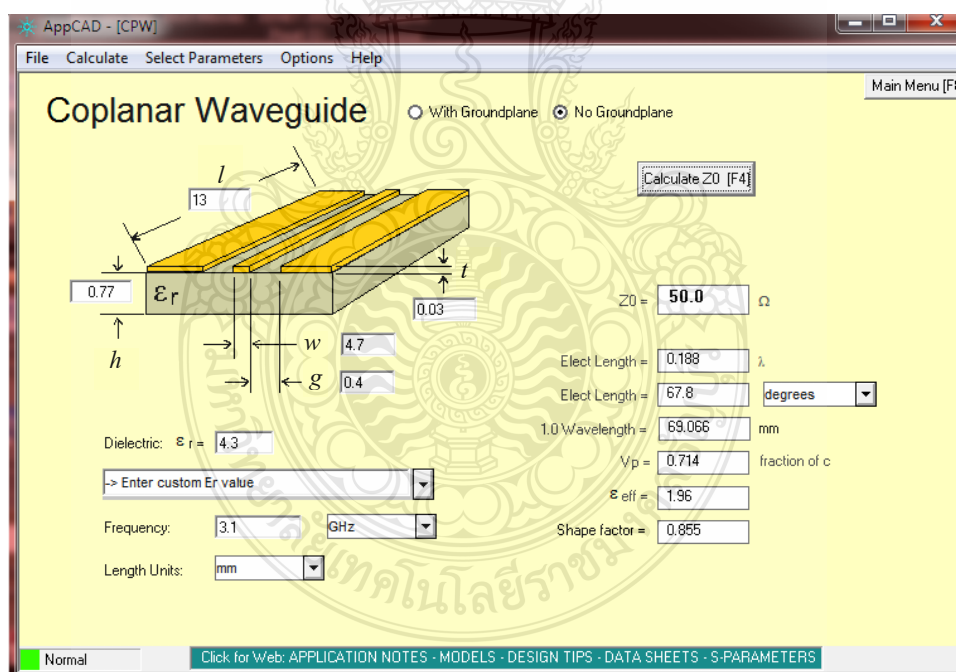
สามารถหาขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณและขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบสร้างเงาได้ด้วยวิธีการใช้โปรแกรม AppCAD for Windows โดยจะต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานของแผ่น FR4 ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบดังนี้

ความหนาของแผ่นตัวนำ( $t$ ) = 0.03 มิลลิเมตร

ความสูงของแผ่นไดอิเล็กตริก( $h$ ) = 0.77 มิลลิเมตร

ค่าไดอิเล็กตริก Dielectric ( $\epsilon_r$ ) = 4.3

โดยจะใช้เทคนิคการปรับจนค่าความกว้างของสายนำสัญญาณ และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ จนกว่าจะได้ค่าความต้านทานที่ 50 โอห์มหรือใกล้เคียง ดังแสดงในภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 หน้าต่างของโปรแกรม AppCAD for Windows

จากภาพที่ 3.19 การปรับขนาดของความกว้างของสายนำสัญญาณ ที่ความกว้าง 4.7 มิลลิเมตร และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ ที่ความกว้าง 0.4 มิลลิเมตร

โดยใช้ความถี่ในการออกแบบที่ 3.1 GHz และความยาวของสายนำสัญญาณที่ 13 มิลลิเมตร โดยใช้ความถี่ในการออกแบบที่ 3.1 GHz และความยาวของสายนำสัญญาณที่ 3.1 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ได้ค่า  $Z_0 = 50.0 \Omega$

ข) ออกแบบโครงสร้างสายนำสัญญาณด้วยวิธีการคำนวณจากสูตร

จากการปรับจนหาค่าขนาดของความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $w$ ) ได้ที่ความกว้าง 5 มิลลิเมตร และขนาดของช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ ( $g$ ) ที่ความกว้าง 0.5 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม AppCAD แล้ว สามารถนำค่าที่ได้ดังกล่าวมาคำนวณเพื่อหาความต้านทาน  $Z_0$  ว่าตรงกับที่ใช้โปรแกรมหรือไม่ โดยใช้จากสูตรที่ 2.21-2.32

หาค่า  $a$  ได้จากสมการที่ 2.26

$$a = \frac{w}{2} = \frac{4.7}{2} = 2.35$$

หาค่า  $b$  ได้จากสมการที่ 2.27

$$b = \frac{(2g + w)}{2} = \frac{(2 \times 0.4) + 4.7}{2} = 2.75$$

หาค่า  $k_1$  ได้จากสมการที่ 2.24

$$k_1 = \frac{a}{b} = \frac{2.35}{2.75} = 0.854$$

หาค่า  $k_2$  ได้จากสมการที่ 2.25

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} = \frac{\sinh\left(\frac{2.35\pi}{2 \times 0.77}\right)}{\sinh\left(\frac{2.75\pi}{2 \times 0.77}\right)} = \frac{60.389}{136.570} = 0.442$$

หาค่า  $k_1'$  ได้จากสมการที่ 2.29

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}$$

จะได้  $k_1'$  ดังนี้

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} = \sqrt{1 - 0.854^2} = 0.520$$

จะได้  $k_2'$  ดังนี้

$$k_2' = \sqrt{1 - k_2^2} = \sqrt{1 - 0.442^2} = 0.897$$

หาค่า  $\frac{K(k_1)}{K'(k_1)}$  ได้จากสมการที่ 2.30 เนื่องจาก  $k_1 = 0.520$  ตามเงื่อนไข  $0 \leq k \leq 0.707$

$$\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} = \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k_1'})}{(1 - \sqrt{k_1'})} \right]} = \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{0.520})}{(1 - \sqrt{0.520})} \right]} = 1.250$$

ฉะนั้น  $\frac{K'(k_1)}{K(k_1)}$  จึงเท่ากับ 0.8

หาค่า  $\frac{K(k_2)}{K'(k_2)}$  ได้จากสมการที่ 2.31 เนื่องจาก  $k_2 = 0.897$  ตามเงื่อนไข  $0.707 \leq k \leq 1$

$$\frac{K(k_2)}{K'(k_2)} = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k_2'})}{(1 - \sqrt{k_2'})} \right] = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{0.897})}{(1 - \sqrt{0.897})} \right] = 1.368$$

หาค่า  $q$  ได้จากสมการที่ 2.23

$$q = \frac{1}{2} \left( \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right) = \frac{1}{2} (1.368 \times 0.8) = 0.547$$

หาค่า  $\epsilon_{re}$  ได้จากสมการที่ 2.22

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) = 1 + 0.547(4.3 - 1) = 2.806$$

หาค่า  $Z_o$  ได้จากสมการที่ 2.21

$$Z_o = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} = \frac{30\pi}{\sqrt{2.806}} 0.8 = 45.011 \Omega$$

หาค่า  $\lambda_g$  ได้จากสมการที่ 2.32

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{re}}} = \frac{3 \times 10^8}{(3.1 \times 10^9) \sqrt{2.806}} = 0.0578 \text{ เมตร}$$

### 3.3.1.3 การออกแบบส่วนสายอากาศ

การออกแบบส่วนสายอากาศจะเริ่มจากขนาดของตัวแผ่นพลังงาน ซึ่งจะออกแบบโดยใช้สมการของ  $\lambda_g$  จากสมการที่ 2.32 โดยจะออกแบบที่ความถี่ต่ำสุดที่ใช้งานคือ 3.1 GHz จะได้

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} = \frac{3 \times 10^8}{(3.1 \times 10^9)\sqrt{2.806}} \approx 60 \text{ มิลลิเมตร}$$

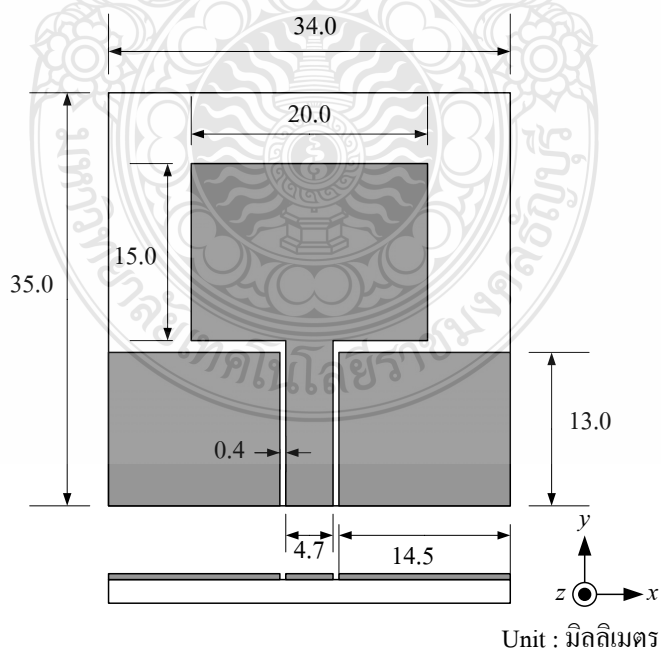
โดยความกว้างของส่วนแผ่นพลังงานเท่ากับ

$$\frac{\lambda_g}{3} = \frac{60}{3} = 20 \text{ มิลลิเมตร}$$

และความสูงของส่วนแผ่นพลังงานเท่ากับ

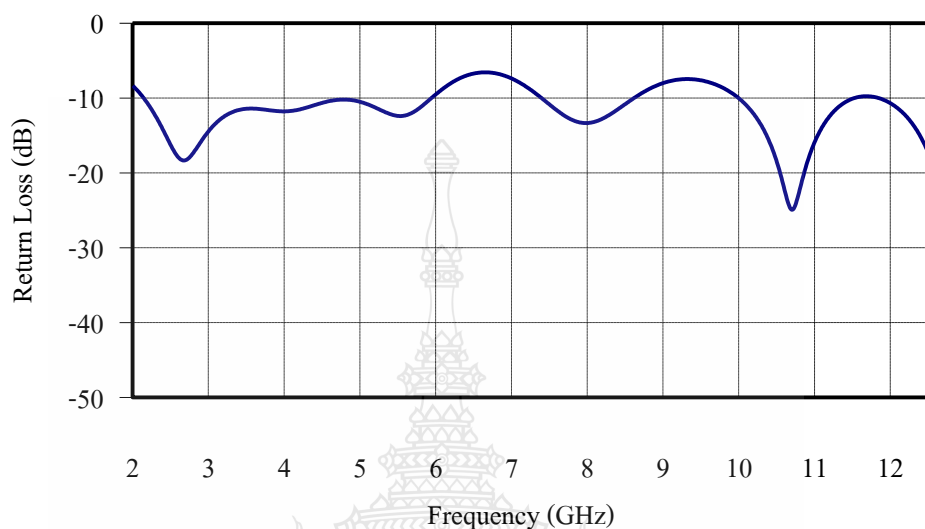
$$\frac{\lambda_g}{4} = \frac{60}{4} = 15 \text{ มิลลิเมตร}$$

ทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้น โดยใช้ค่าจากโปรแกรม AppCAD ร่วมกับค่าที่ได้จากการคำนวณตัวส่วนสายอากาศดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 โครงสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งต้น

จากนั้นทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST จำลองผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งต้น

จากภาพที่ 3.21 จะเห็นว่ายังไม่ครอบคลุมย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง จึงศึกษางานวิจัย [5-6] ซึ่งเป็นการเซาะร่องรูปทรงเลขาคณิตไปที่ส่วนแผ่พลังงาน และระนาบสร้างเงา จากนั้นจึงเลือกการเซาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่ส่วนระนาบสร้างเงา เนื่องจากง่ายในการออกแบบ และไม่มีเหลี่ยม มุม โดยจะออกแบบขนาดของครึ่งวงกลมโดยใช้สมการของ  $\lambda_g$  จากสมการที่ 2.32 โดยจะออกแบบที่ความถี่ 9 GHz เนื่องจากต้องการทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่แสดงในภาพที่ 3.21 ที่ความถี่ 9 GHz มีค่าที่ต่ำลง จะได้

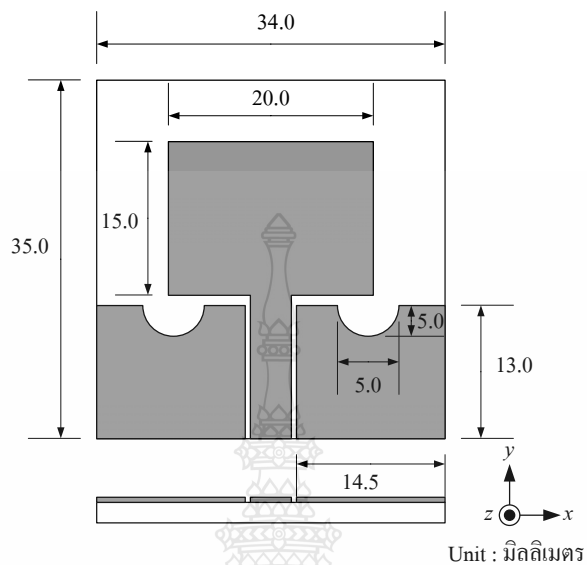
$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} = \frac{3 \times 10^8}{(9 \times 10^9)\sqrt{2.806}} = 20 \text{ มิลลิเมตร}$$

เซาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงาโดยให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{4}$  จะได้

$$\frac{\lambda_g}{4} = \frac{20}{4} = 5 \text{ มิลลิเมตร}$$

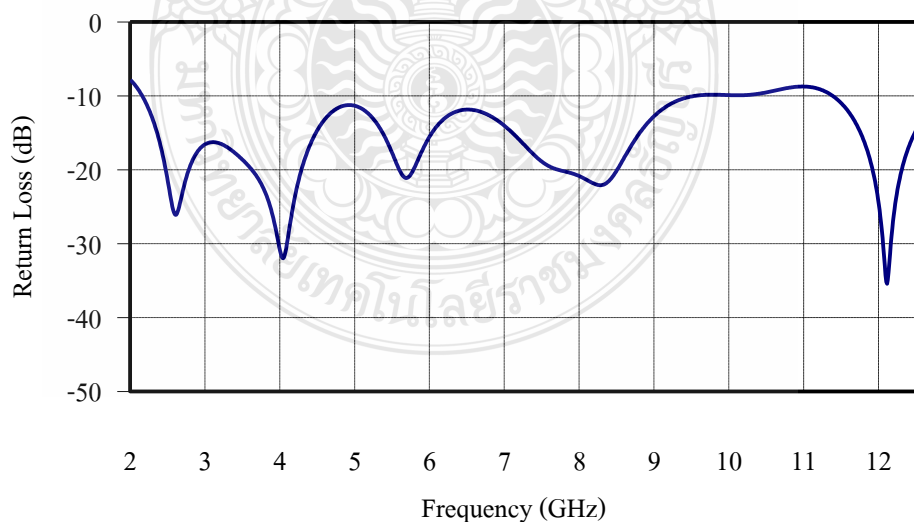


ทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะรูรูปครึ่งวงกลมที่  
ระนาบสร้างเงาดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 โครงสร้างของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะรูรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบ  
สร้างเงา

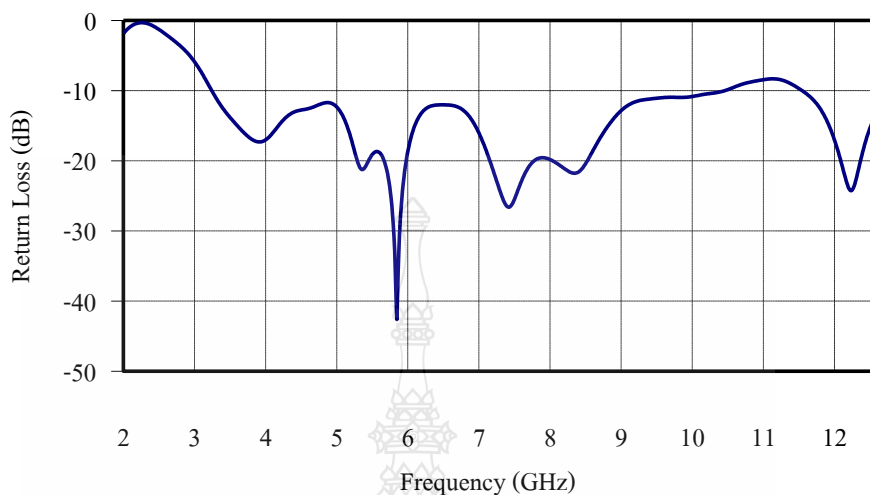
จากนั้นทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST จำลองผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  
กลับ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะรูรูปครึ่ง  
วงกลมที่ระนาบสร้างเงา

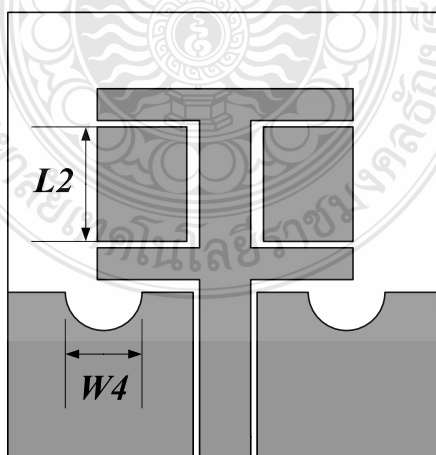


จากนั้นทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST จำลองผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 3.25



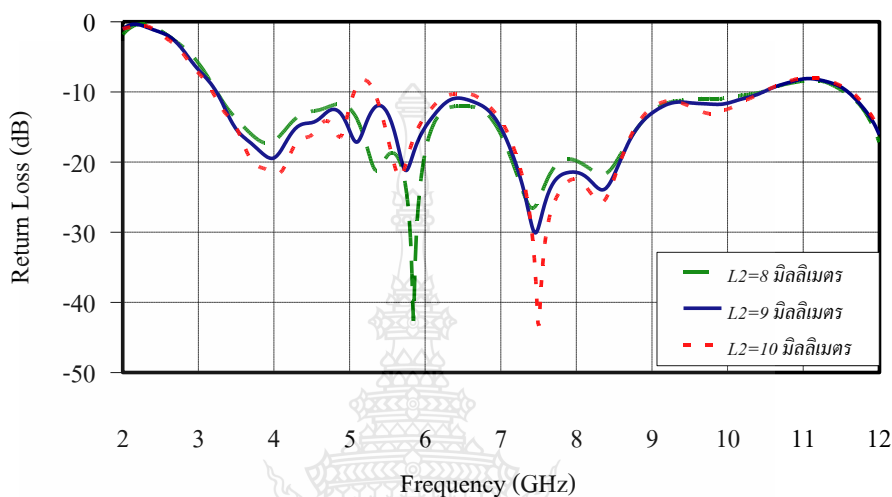
ภาพที่ 3.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะรูรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา และรูปสี่เหลี่ยมที่ส่วนแผ่พลังงาน

จากภาพที่ 3.25 ค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB จะอยู่ตั้งแต่ความถี่ 3.26 GHz ถึง 10.48 GHz ซึ่งยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง จึงทำการปรับจูนการเจาะรูของสายอากาศทั้งสองจุดคือ ค่าความกว้าง  $W4$  และค่าความยาวของแถบ  $L2$  ดังภาพที่ 3.26



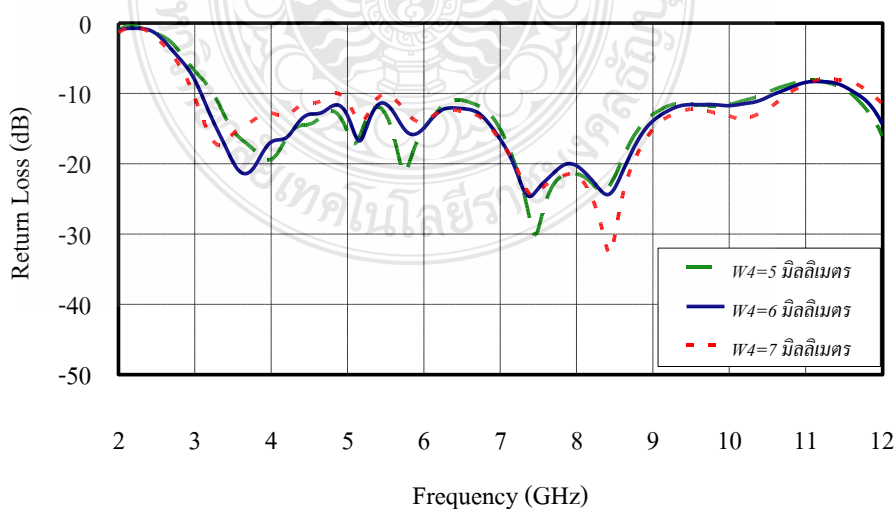
ภาพที่ 3.26 ตำแหน่งที่ทำการปรับขนาดของสายอากาศ

ส่วนแรกปรับค่าความกว้าง  $W4$  คงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และปรับค่าความยาวของแถบ  $L2$  โดยมีขนาดตั้งแต่ 8, 9 และ 10 มิลลิเมตร พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ  $L2$  เท่ากับ 9 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับลดลง แต่ช่วงความถี่ยังไม่กว้างพอคือ ตั้งแต่ 3.24 - 10.47 GHz แสดงดังภาพที่ 3.27



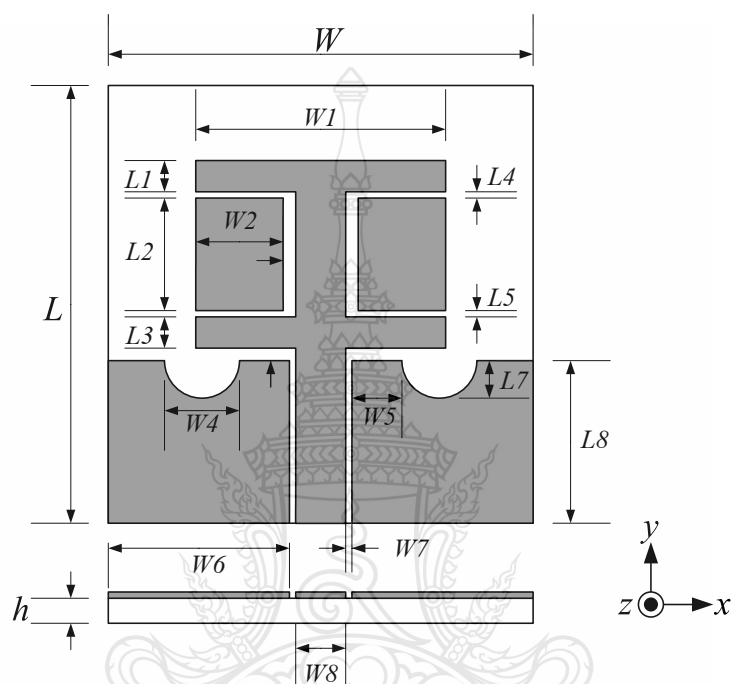
ภาพที่ 3.27 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อปรับขนาด  $L2$  โดยที่  $W4$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

ส่วนที่สองทำปรับค่าความยาวคงที่ของแถบ  $L2$  เท่ากับ 9 มิลลิเมตร และค่าความกว้างของแถบ  $W4$  โดยมีขนาดตั้งแต่ 5, 6 และ 7 มิลลิเมตร พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ  $W4$  เท่ากับ 6 มิลลิเมตร โดยมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.08 GHz ถึง 10.61 GHz ดังภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อปรับขนาด  $W4$  โดยที่  $L2$  เท่ากับ 9 มิลลิเมตร

ทำให้ได้สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง โดยขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมหลังจากทำการปรับขนาดจนทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุดแสดงได้ตามภาพที่ 3.29 และตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.29 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบ

ขนาดความยาว		ขนาดความกว้าง	
ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)	ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
$L$	35	$W$	34
$L1$	2.5	$W1$	20
$L2$	9	$W2$	7
$L3$	2.5	$W3$	1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบ (ต่อ)

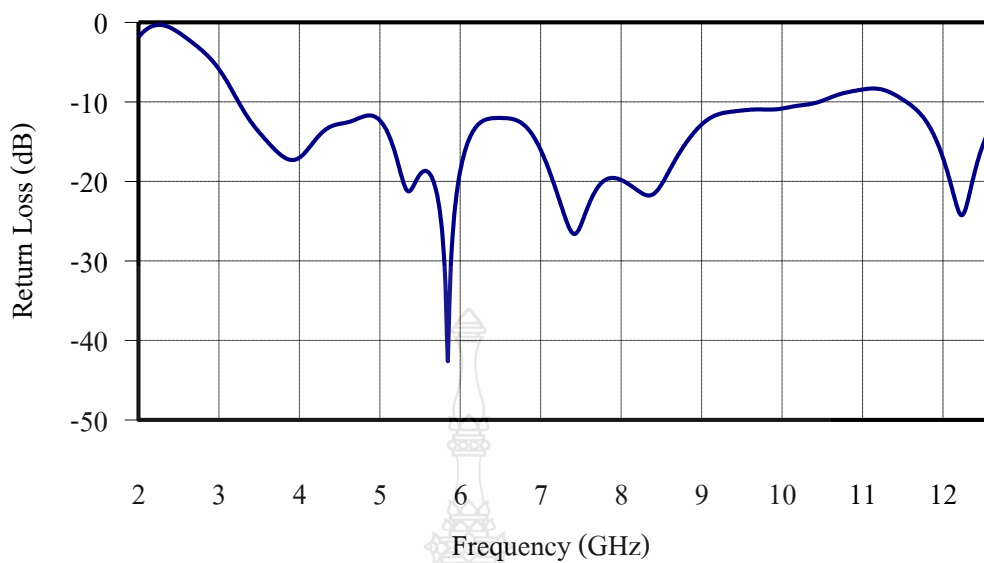
ขนาดความยาว		ขนาดความกว้าง	
ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)	ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
$L4$	0.5	$W4$	6
$L5$	0.5	$W5$	4
$L6$	1	$W6$	14.5
$L7$	3	$W7$	0.5
$L8$	13	$W8$	4
$h$	0.77	-	-

3.3.2 ผลการจำลองแบบสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง

ผลการจำลองแบบสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง นั้น โดยแสดงได้จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง อินพุตอิมพีแดนซ์ และการแผ่พลังงานสนามระยะไกลรอบทิศทางในระนาบ 3 มิติ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

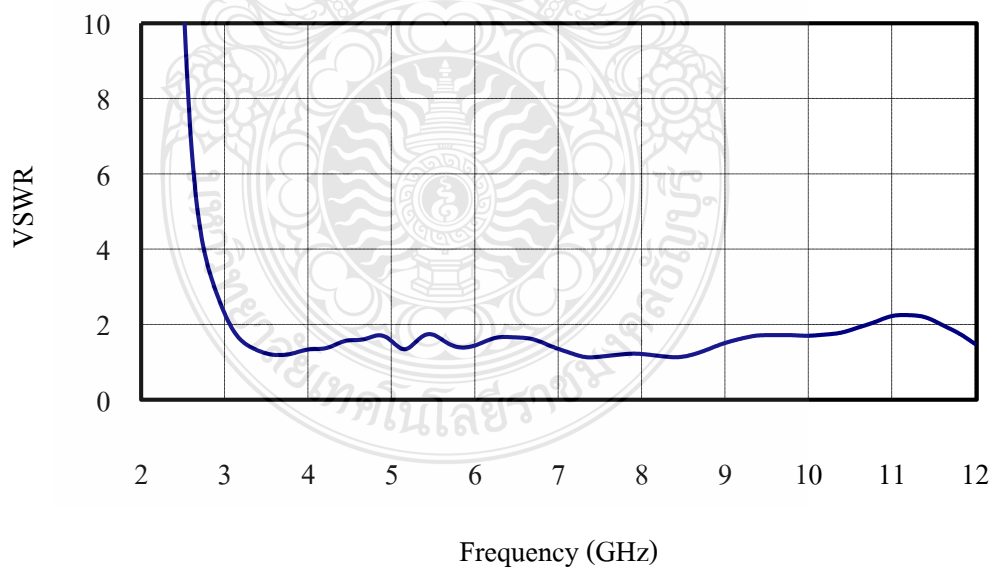
#### 3.3.2.1 สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

ในภาพที่ 3.30 จะเห็นว่าในช่วงตั้งแต่ 3.08 – 10.61 GHz ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ ของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง จะมีค่าต่ำกว่า -10 dB โดยมีแบนด์วิดท์จากการคำนวณด้วยสมการที่ 2.34 เท่ากับ 110.01%



ภาพที่ 3.30 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง

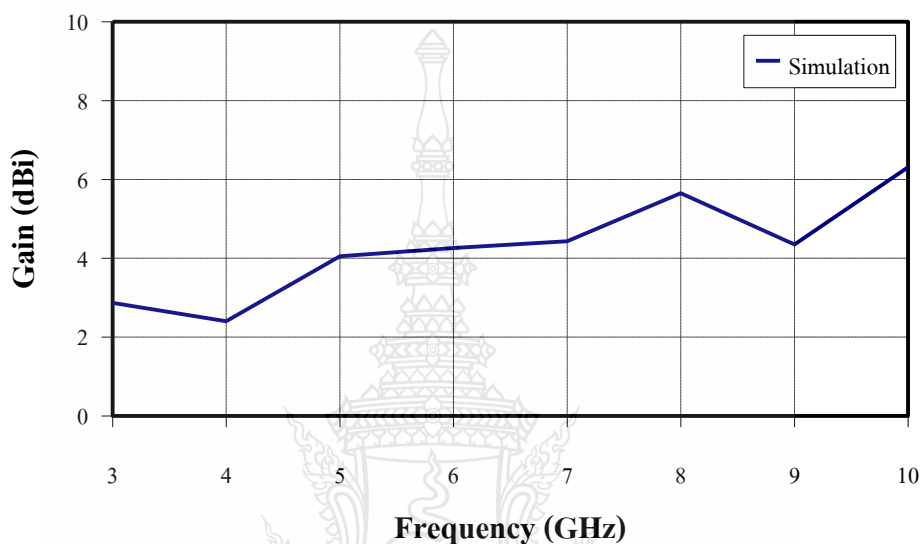
### 3.3.2.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง



ภาพที่ 3.31 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง

### 3.3.2.3 อัตรายาย

สำหรับส่วนของค่าอัตรายายของสายอากาศต้นแบบ การจำลองแบบโดยเริ่มที่ความถี่ 3 GHz มีค่าอัตรายาย 2.87 dBi จนถึงความถี่ 10 GHz มีค่าอัตรายาย 6.32 dBi มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.94 dBi ค่าอัตรายาย ณ. ความถี่อื่นๆแสดงได้ดังภาพที่ 3.32



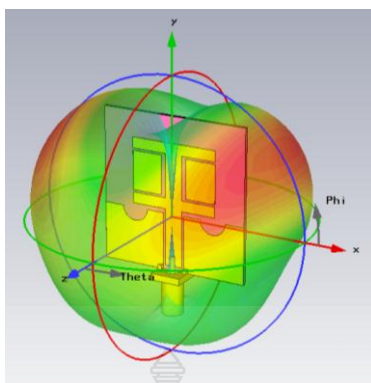
ภาพที่ 3.32 อัตรายายจากการจำลองแบบสายอากาศต้นแบบ

### 3.3.2.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน

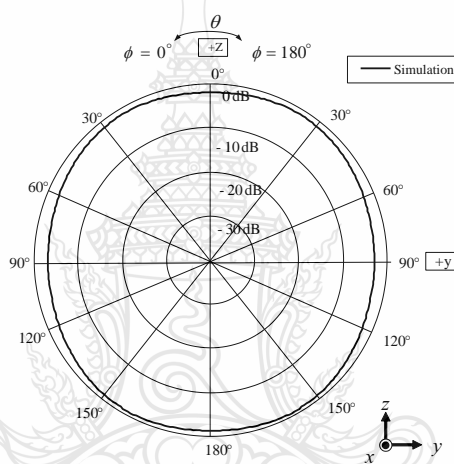
จากนั้นทำการวัดแบบรูปของการแผ่พลังงานของการจำลองที่ความถี่ 3.5 GHz 7 GHz และ 10 GHz พบว่าการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) เป็นแบบรอบทิศทาง และในส่วนการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) เป็นแบบรอบทิศทาง

โดยแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก และการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz 7 GHz และ 10 GHz สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.33 3.34 และ 3.35 ตามลำดับ

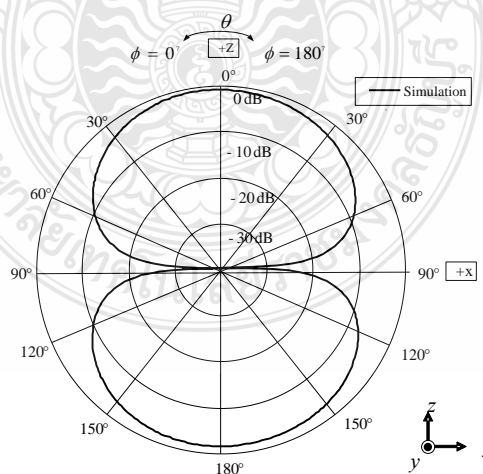




(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระบบ 3 มิติ

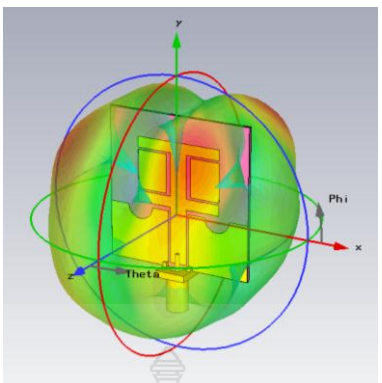


(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

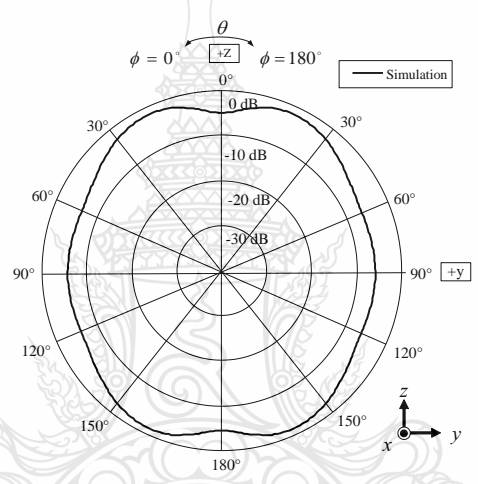


(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

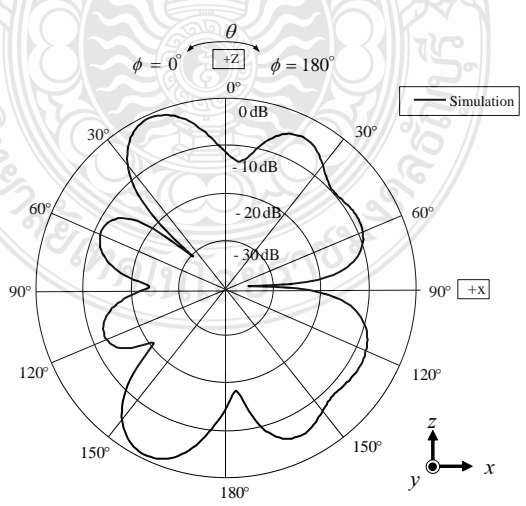
ภาพที่ 3.33 แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz



(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระบบ 3 มิติ

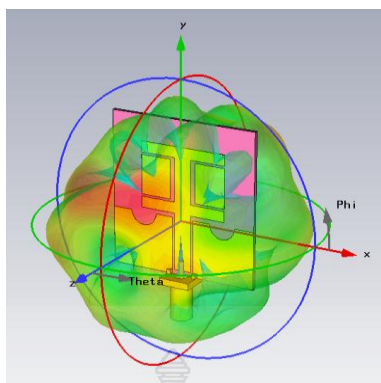


(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

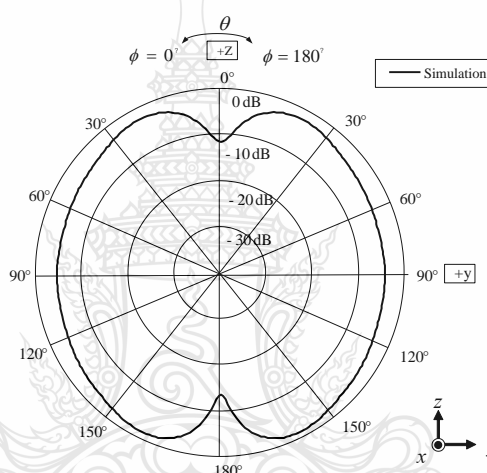


(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

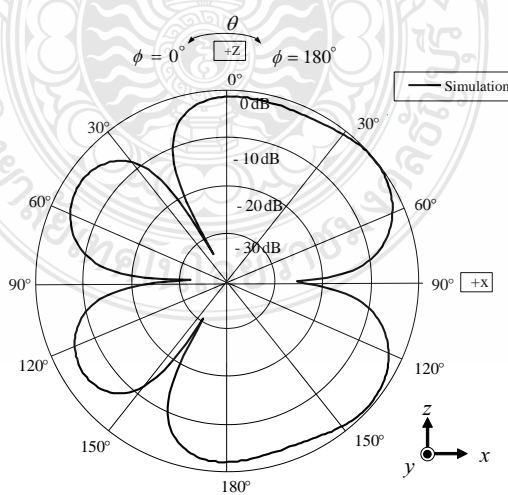
ภาพที่ 3.34 แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 7 GHz



(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระบบ 3 มิติ



(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 3.35 แบบรูปการจำลองแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 10 GHz

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการมีส่วนประกอบต่างๆ ของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งตามที่ได้นำเสนอการออกแบบและจำลองแบบในบทก่อนหน้านี้ เพื่อยืนยันว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้จริง สายอากาศที่สร้างจริงมาทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยค่าการสูญเสียย้อนกลับ อินพุทอิมพีแดนซ์ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง แบนด์วิดท์ ตลอดจนแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายของสายอากาศ

#### 4.2 การสร้างและวัดสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

จากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบสายอากาศทำให้ได้ขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด และได้นำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบดังแสดงในภาพที่ 4.1

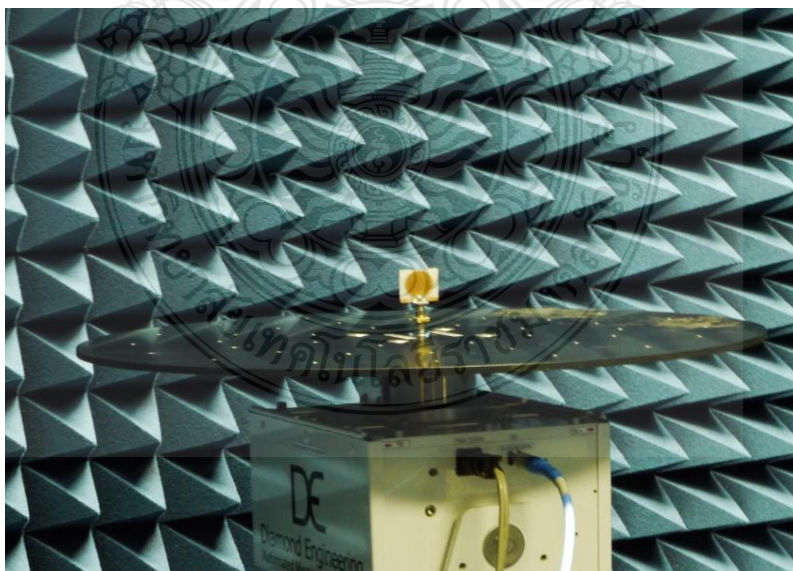


ภาพที่ 4.1 สายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่งต้นแบบ

จากนั้นทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับและแบนด์วิดท์ของสายอากาศด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้า (Network Analyzer) รุ่น E8363B



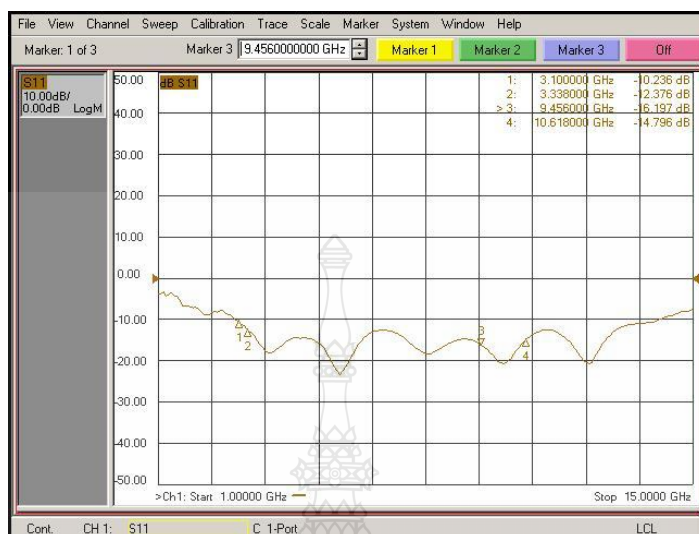
ภาพที่ 4.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้า (Network Analyzer) รุ่น E8363B



ภาพที่ 4.3 การทดสอบสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็กต้นแบบ

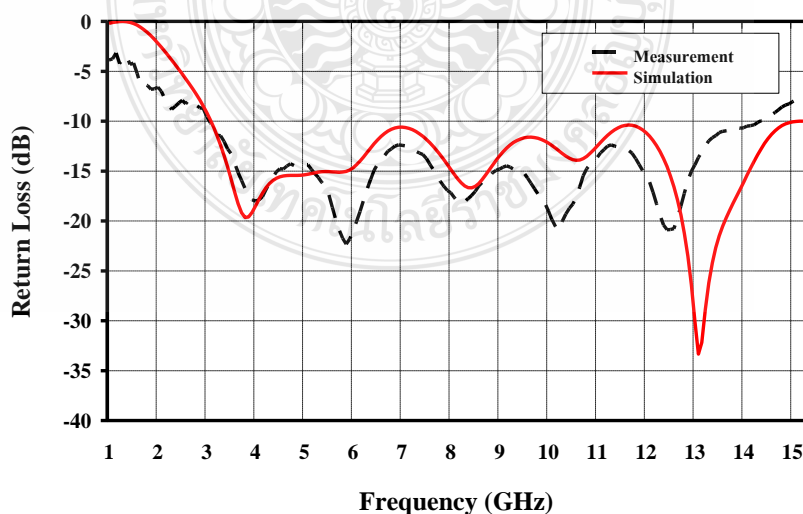


#### 4.2.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ



ภาพที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับที่วัดได้

จากภาพที่ 4.4 เห็นได้ว่าสายอากาศรีบีบอลขนาดเล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งที่สร้างขึ้นมา จากการทดสอบจะได้เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่ 3.03 GHz ถึง 14.02 GHz ซึ่งน้อยกว่าความถี่ที่ได้จากการจำลองผล 2.043 % โดยมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเมื่อนำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบผลของค่าจากการจำลองแบบ ดังภาพที่ 4.5



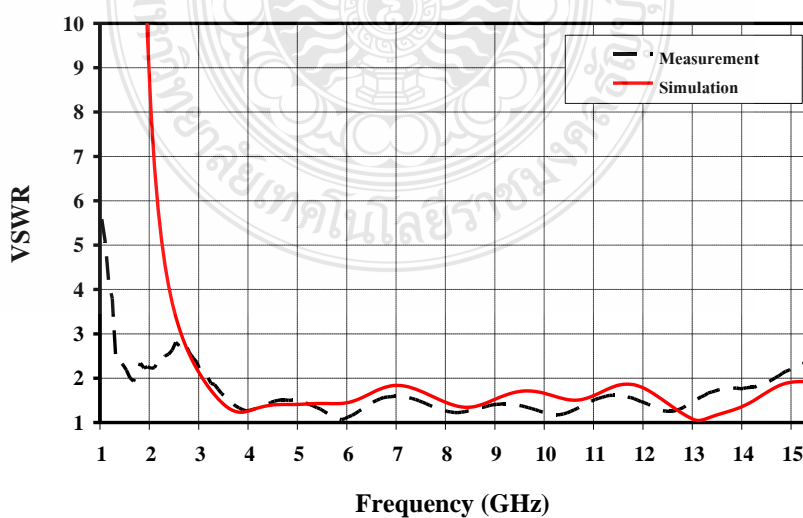
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

#### 4.2.2. ผลการทดสอบอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง



ภาพที่ 4.6 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่วัดได้

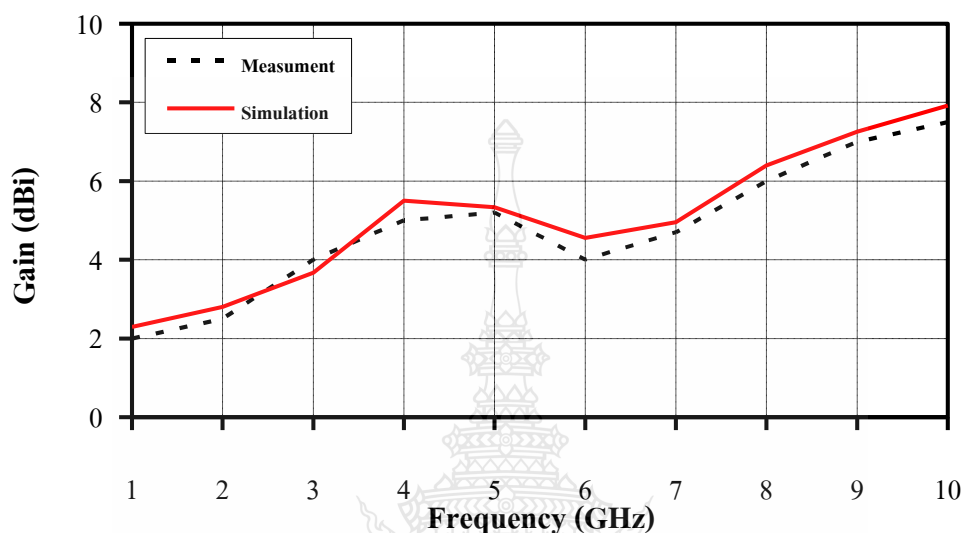
แรงดันอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศรัศมีบอลลูนขนาดเล็ก จากการวัดจริงดังภาพที่ 4.6 นั้นเห็นได้ว่าที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 14.3 GHz มีค่าน้อยกว่า 2 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่สามารถใช้งานได้ เมื่อนำผลการวัดไปเปรียบเทียบกับผลจำลองแบบพบว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ดังแสดงภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

### 4.2.3 อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งจากการวัดจริงจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 dBi ดังภาพที่ 4.8

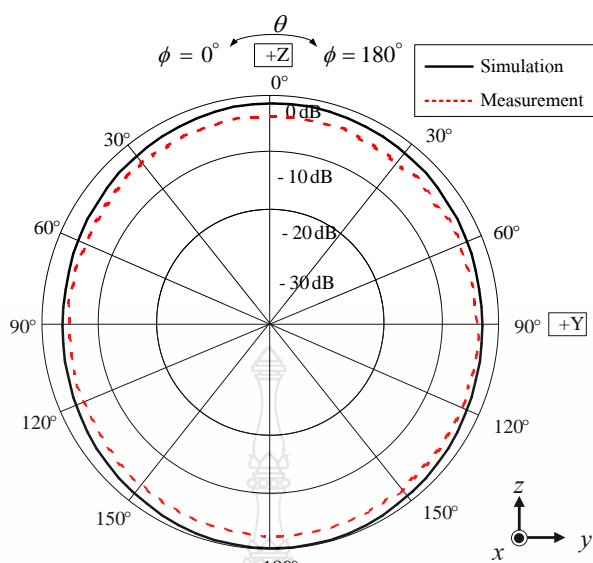


ภาพที่ 4.8 อัตราขยายของสายอากาศรัศมีบอลขนาดเล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่ง

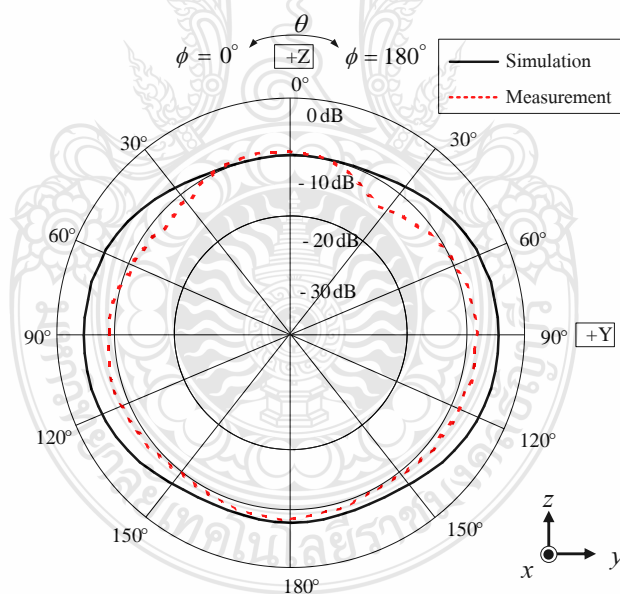
### 4.2.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน

จากนั้นทำการวัดแบบรูปของการแผ่พลังงานของการจำลองแบบเปรียบเทียบกับสายอากาศสร้างจริงที่ความถี่ 4 GHz 8 GHz และ 12 GHz พบว่าการแผ่พลังงานคลื่นสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทาง โดยการแผ่พลังงานของการจำลองแบบและการวัดผลในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 4 GHz 8 GHz และ 12 GHz แสดงดังภาพที่ 4.9 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

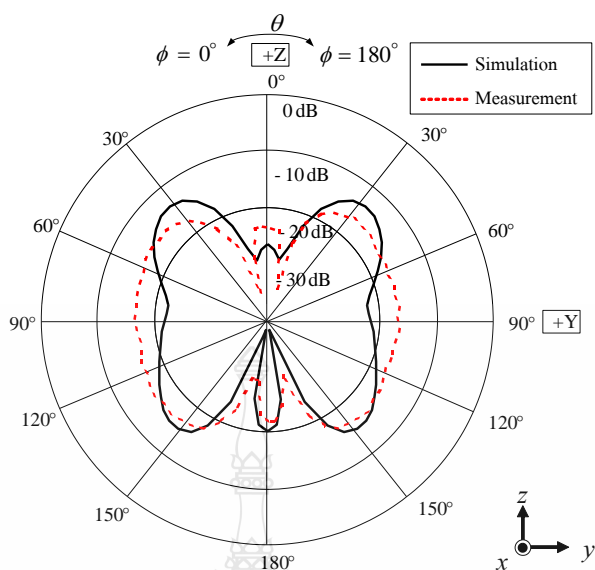




ภาพที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 4 GHz

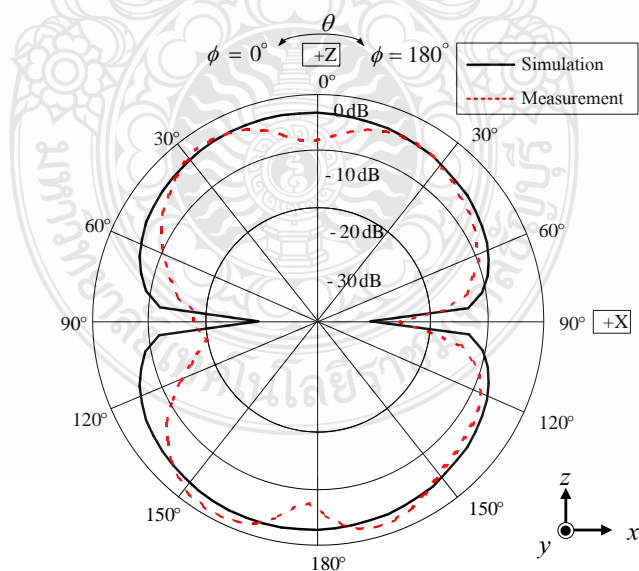


ภาพที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 8 GHz

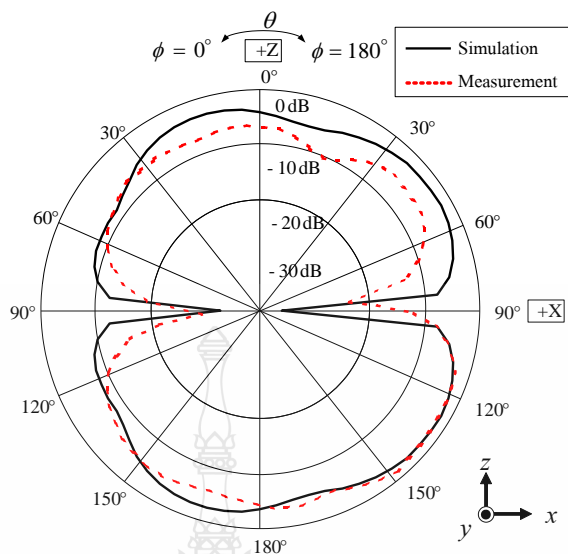


ภาพที่ 4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 12 GHz

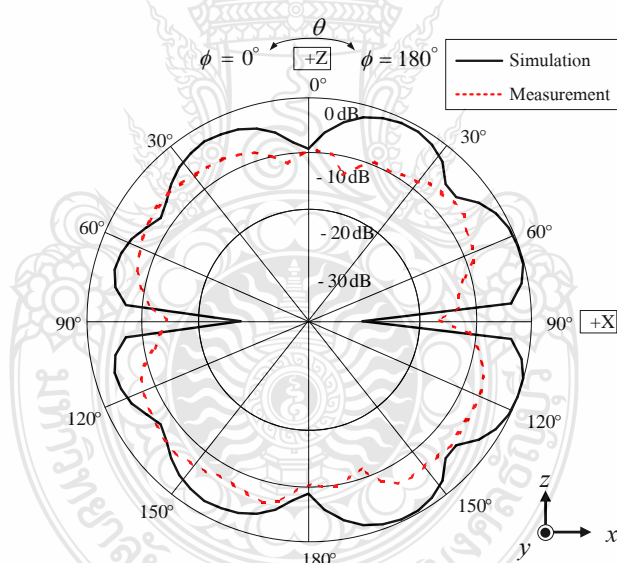
ในส่วนการแผ่พลังงานคลื่นสนามไฟฟ้าเป็นแบบรอบทิศทาง โดยการแผ่พลังงานของการจำลองแบบและการวัดผลในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 4 GHz 8 GHz และ 12 GHz แสดงดังภาพที่ 4.12 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 4 GHz



ภาพที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 8 GHz



ภาพที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 12 GHz

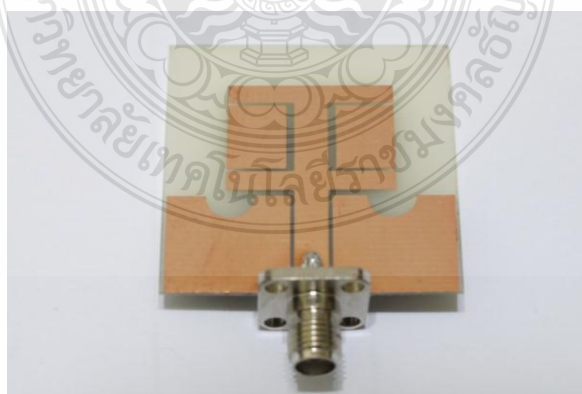
#### 4.2.4 สรุปผลของการทดสอบจริง

การจำลองแบบและการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านต่างๆ ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่าค่าผลลัพธ์ทั้ง 2 คือ ผลของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 และค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันดังแสดงใน

ภาพที่ 4.5 และ 4.7 คือค่าแบนด์วิดท์สามารถรองรับช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.03 GHz ถึง 14.02 GHz โดยแสดงผลตอบสนองความถี่ช่วงการใช้งานอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน จากผลลัพธ์ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน มีอัตราขยายเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 dBi และการแผ่พลังงานมีรูปแบบใกล้เคียงผลการออกแบบทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในย่านความถี่ต่ำคือความถี่ 4 GHz แต่ความถี่ 8 GHz และ 12 GHz การแผ่พลังงานทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้นจะมีความผิดเพี้ยนจากผลที่ออกแบบเล็กน้อยอาจเป็นเพราะค่าความถี่ที่สูงทำให้ค่าไดอิเล็กทริกของสายอากาศมีค่าเปลี่ยนไป แบบรูปการแผ่พลังงานจึงไม่เหมือนที่ออกแบบไว้และเป็นเพราะการสร้างสายอากาศจริงนั้นไม่สามารถสร้างขนาดได้ตรงกับขนาดจริงได้เนื่องจากบางส่วนของสายอากาศมีขนาดเล็กมากๆจึงทำให้รูปแบบการแผ่พลังงานผิดเพี้ยนไปและบางครั้งนั้นการบัดกรีที่หัวคอนเนคเตอร์ (SMA Connector) ที่ใช้ร่วมกับสายนำสัญญาณที่มีความยาวมากนั้น ก็มีผลเช่นกันสำหรับการแผ่พลังงานทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแต่ก็สามารถนำสายอากาศรูปแบบนี้ไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง

#### 4.3 การสร้างและวัดสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง

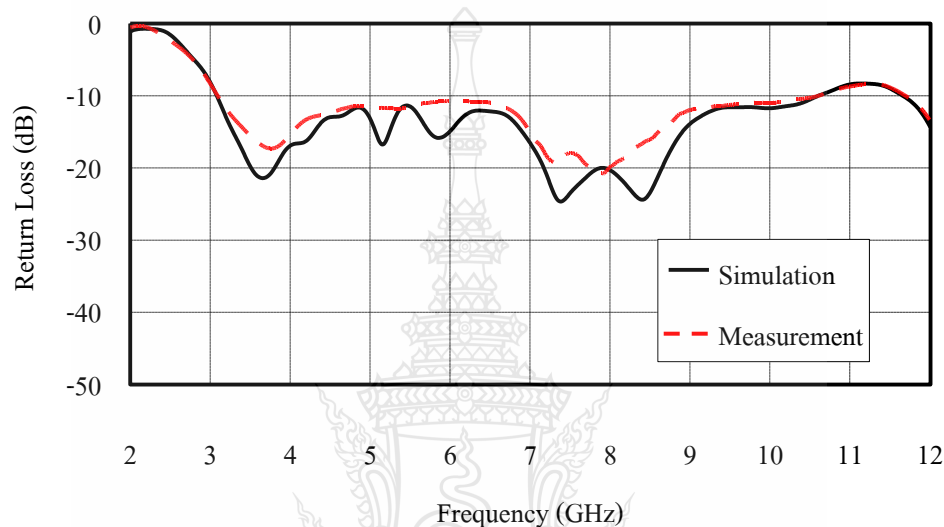
จากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบสายอากาศทำให้ได้ขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด และได้นำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบดังแสดงในภาพที่ 4.15 และจากนั้นทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับและแบนด์วิดท์ของสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้า (Network Analyzer) รุ่น E8363B



ภาพที่ 4.15 สายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่องต้นแบบ

#### 4.3.1 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

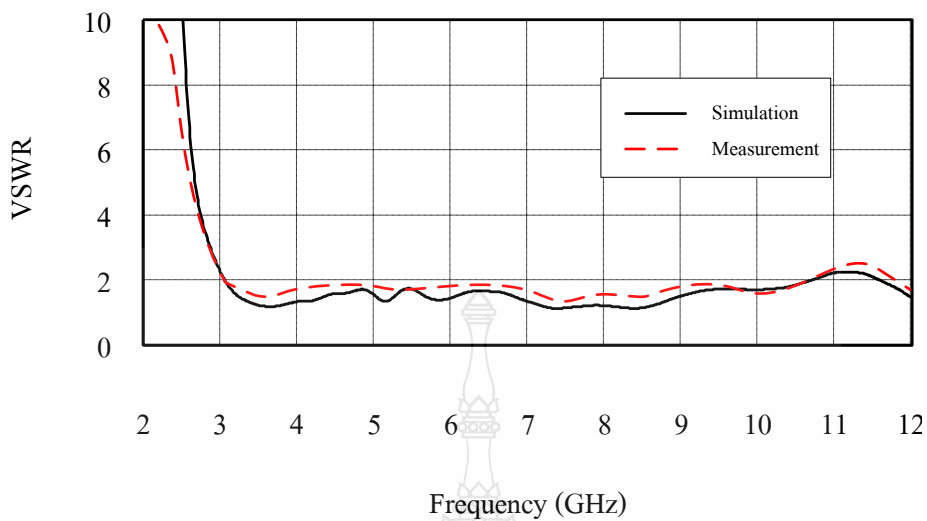
สายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่องตันที่สร้างขึ้นมา จากการทดสอบจะได้เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่ 3.09 GHz ถึง 10.61 GHz ซึ่งน้อยกว่าความถี่ที่ได้จากการจำลองผล 0.26% โดยมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

#### 4.3.2 ผลการทดสอบแรงดันอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

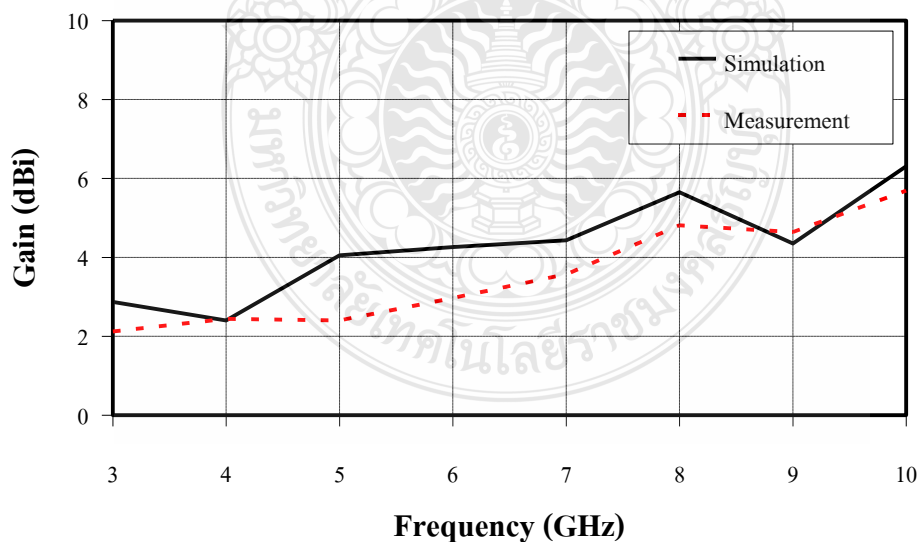
แรงดันอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศสายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง ตันที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 3.09 GHz ถึง 10.61 GHz มีค่าน้อยกว่า 2 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่สามารถใช้งานได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจำลองพบว่า มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ดังแสดงภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าแรงดันอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

#### 4.2.3 อัตราขยายของสายอากาศ

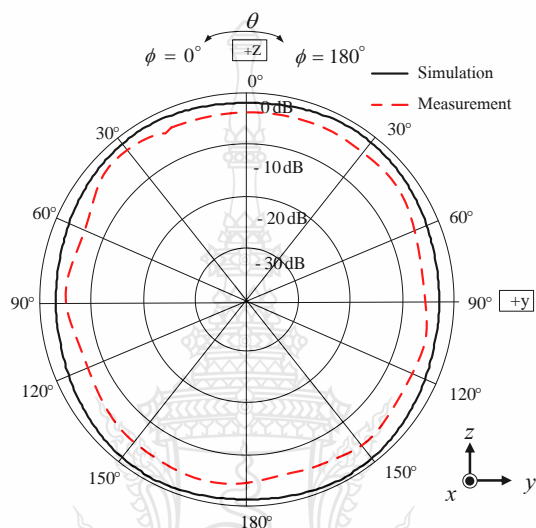
อัตราขยายของสายอากาศสายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง จากการวัดจริงจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.83 dBi ดังภาพที่ 4.18



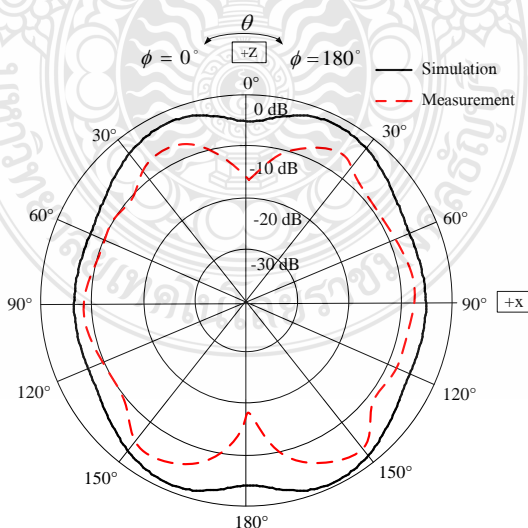
ภาพที่ 4.18 อัตราขยายของสายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่ง

### 4.3.3 แบบรูปการแผ่พลังงาน

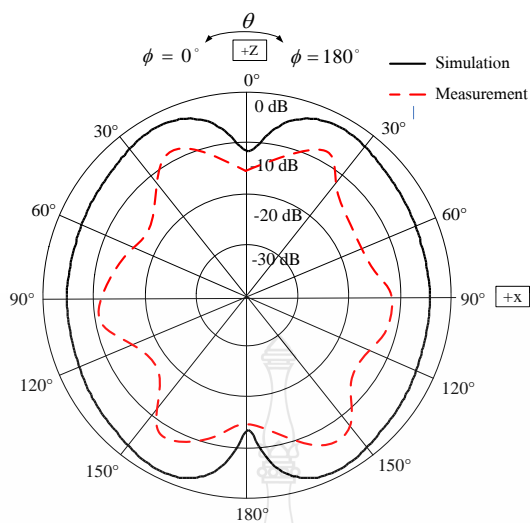
จากนั้นทำการวัดแบบรูปของการแผ่พลังงานของการจำลองแบบเปรียบเทียบกับสายอากาศสร้างจริงที่ความถี่ 3.5 GHz 7 GHz และ 10 GHz พบว่าการแผ่พลังงานคลื่นสนามแม่เหล็ก เป็นแบบรอบทิศทาง โดยการแผ่พลังงานของการจำลองแบบและการวัดผลในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 3.5 GHz 7 GHz และ 10 GHz แสดงดังภาพที่ 4.19 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 3.5 GHz

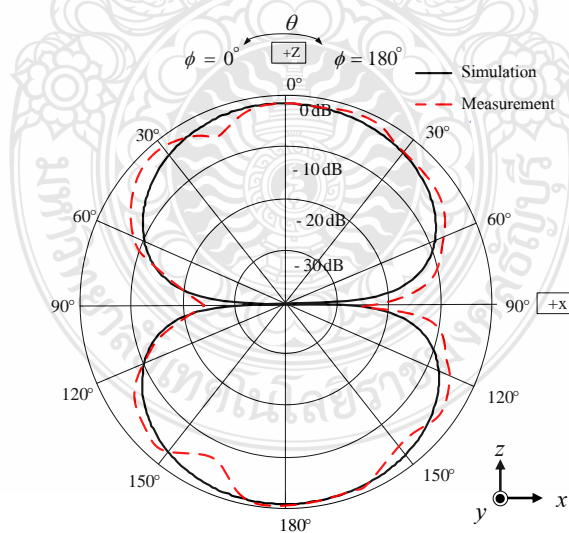


ภาพที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 7 GHz



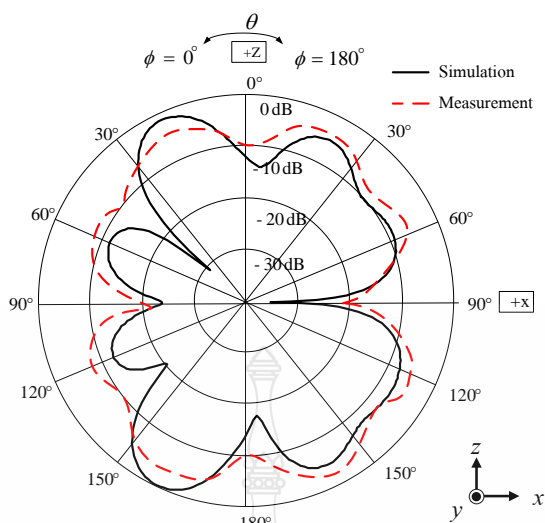
ภาพที่ 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 10 GHz

ในส่วนการแผ่พลังงานคลื่นสนามไฟฟ้าเป็นแบบรอบทิศทาง โดยการแผ่พลังงานของการจำลองแบบและการวัดผลในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz แสดงดังภาพที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ

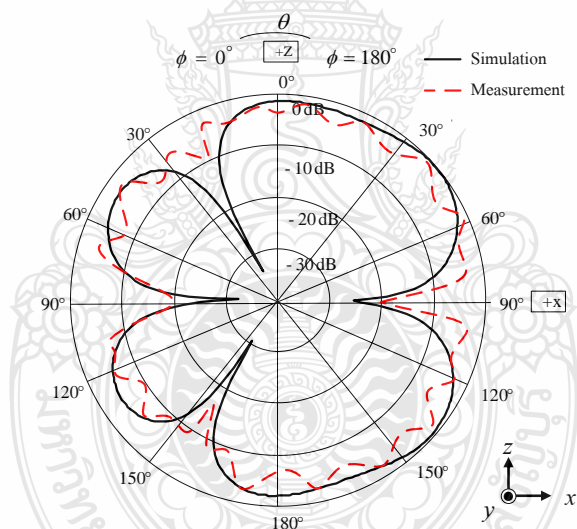


ภาพที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz





ภาพที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 7 GHz



ภาพที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 10 GHz

#### 4.3.4 สรุปผลการทดสอบจริงวัด

สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่องโดยเริ่มจากการใช้เทคนิคการเซาะร่องตัวซีร่วมกับ การเซาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่กรวดทั้ง สองด้าน โดยโครงสร้างสายอากาศต้นแบบถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ซึ่งขนาดความยาว ( $L$ ) เท่ากับ 35 มม. ขนาดความกว้าง ( $W$ ) เท่ากับ 34 มม. ดังภาพที่ 4.15 จากการวัดผลจริงโดยจะนำมา

เปรียบเทียบกับผลที่ได้จำลองแบบ พบว่าค่าผลลัพธ์ทั้ง 2 คือ ผลของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 และค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4.16 และ 4.71 คือค่าแบนด์วิดท์สามารถรองรับช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.09 GHz ถึง 10.61 GHz โดยแสดงผลตอบสนองความถี่ช่วงการใช้งานอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน จากผลลัพธ์อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และการแผ่พลังงานมีรูปแบบใกล้เคียงผลการออกแบบทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในย่านความถี่ 3.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz โดยการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง และมีอัตราขยายเฉลี่ยอยู่ที่ 3.83 dBi



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองแบบสายอากาศโดยโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) และการวัดจริง โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการรับส่งข้อมูลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 – 10.6 GHz

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

##### 5.1.1 สายอากาศรัศมีบ็อลขนาดเล็กสำหรับใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

การจำลองแบบและการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านต่างๆ ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่าค่าผลลัพธ์ทั้ง 2 คือ ผลของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 และค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB มีแบนด์วิดท์ที่สอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.7 คือค่าแบนด์วิดท์สามารถรองรับช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.03 GHz ถึง 14.02 GHz โดยแสดงผลตอบสนองความถี่ช่วงการใช้งานอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) จากผลลัพธ์ค่า VSWR และการแผ่กระจายคลื่นมีรูปแบบใกล้เคียงผลการออกแบบทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในย่านความถี่ต่ำคือความถี่ 4.1 GHz แต่ความถี่ 8 GHz และ 12.4 GHz การแผ่กระจายคลื่นทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้นจะมีความผิดเพี้ยนจากผลที่ออกแบบเล็กน้อยอาจเป็นเพราะค่าความถี่ที่สูงทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของสายอากาศมีค่าเปลี่ยนไป แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจึงไม่เหมือนที่ออกแบบไว้และเป็นเพราะการสร้างสายอากาศจริงนั้นไม่สามารถสร้างขนาดได้ตรงกับขนาดจริงได้เนื่องจากบางส่วนของสายอากาศมีขนาดเล็กมากจึงทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นผิดเพี้ยนไปและบางครั้งนั้นการบัดกรีที่หัวคอนเนคเตอร์ (SMA Connector) ที่ใช้ร่วมกับสายนำสัญญาณที่มีความยาวมากนั้น ก็มีผลเช่นกันสำหรับการแผ่กระจายคลื่นทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแต่ก็สามารถนำสายอากาศรูปแบบนี้ไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง

##### 5.1.2 สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง

สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง โดยเริ่มจากการใช้เทคนิคการเซาะร่องตัวชี้ร่วมกับ การเซาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่กราวด์ทั้ง

สองด้าน โดยใช้วิธีเชิงประจักษ์ร่วมกับโปรแกรม CST จนได้โครงสร้างสายอากาศต้นแบบดังภาพที่ 4.10 โดยโครงสร้างสายอากาศต้นแบบถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ซึ่งขนาดความยาว ( $L$ ) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร. ขนาดความกว้าง ( $W$ ) เท่ากับ 34 มิลลิเมตร จากการปรับค่าเซาะร่องทำให้ได้ดังกล่าว ซึ่งได้ค่าตอบสนองต่อความถี่ตั้งแต่ 109.78% (3.09 - 10.61 GHz) และมีการแผ่พลังงานในแบบรอบทิศทาง (Omi-directional)

จากผลการวัดและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ ได้ค่าพารามิเตอร์ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง และแบนด์วิดท์ ถือว่าอยู่ในระดับที่สามารถเป็นไปตามทฤษฎีข้างต้น ถึงแม้ว่าค่าที่ได้ออกมานั้นในบางความถี่อาจไม่ตรงกับแบบที่ได้ทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO™ แต่สามารถได้แบนด์วิดท์ที่ใกล้เคียงกับที่ได้กำหนดไว้ แต่ยังมีข้อผิดพลาดบางอย่างซึ่งสามารถสรุปความได้ดังนี้

#### 1. ความผิดพลาดที่เกิดจากการสร้างสายอากาศ

ในขั้นตอนการกัดลายทองแดงเพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณของสายอากาศและขนาดของสายอากาศต้องการความละเอียดสูงมาก ซึ่งในการปฏิบัตินั้นไม่สามารถทำได้เพราะลายทองแดงแผ่นพิมพ์ของสายอากาศรีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งนี้ได้ถูกออกแบบให้อยู่ในลักษณะที่เป็นแบบวงรี จึงทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนได้ง่าย ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายไปตามส่วนโค้งงอตามผิวของแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งเป็นลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและการกระจายคลื่นแย่ง

#### 2. ความผิดพลาดจากการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับคอนเนคเตอร์ SMA

เนื่องจากการสร้างสายอากาศรีบ็อลขนาดเล็ก สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งนี้ได้มีการเชื่อมต่อโดยใช้การบัดกรี ซึ่งจุดบัดกรีนี้จะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่เข้ากันของสายส่งสัญญาณและสายอากาศ จึงทำให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศลดลงไปเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 พัฒนาสายอากาศรีบ็อลให้มีลักษณะการแผ่ของสัญญาณไปข้างหน้ามากกว่านี้ โดยใช้วิธีโค้งงอแผ่นวัสดุที่ใช้สร้าง

5.2.2 พัฒนาสายอากาศแบบรีบ็อลโดยใช้วัสดุอื่น เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายขึ้น

5.2.3 พัฒนาสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง ให้สามารถรองรับช่วงความถี่ได้กว้างขึ้น โดยศึกษาการเซาะร่องรูปทรงเลขาคณิตเพิ่มเติม หรืออาจใช้วิธีการเพิ่มสลับในการรองรับความถี่อื่น

5.2.4 ศึกษาการสร้างสายอากาศแบบ Array เพื่อนำสายอากาศทั้งสองมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศ



## รายการอ้างอิง

- [1] A. Ruengwaree, R. Yowuno, G. Kompa, "A novel rugby-ball antenna for pulse radiation," **European Microwave Conference Proceedings**, Paris, France, pp. 1855-1858, 2005.
- [2] A. Ruengwaree, A. Ghose, G. Kompa, "A Novel Rugby-Ball UWB Antenna for Near-range Microwave Radar System," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, vol. 54, no. 6, pp. 2774-2779. 2006.
- [3] Amnoiy Ruengwaree, "Reducing Weight of a Rugby-Ball Antenna," **The Ninth PSU Engineering Conference**, Phuket, Thailand, 2008.
- [4] Wei Tong, Z. R. Hu, "A CWP Fed Circular Monopole Antenna for Ultra Wideband Wireless Communications," **Antennas and Propagation Society International Symposium**, vol. 3A, pp. 528-531, 2005.
- [5] V. Shrivastava and Y. Ranga, "Ultra wide band CPW-fed printed pentagonal antenna with modified ground plane for UWB Applications," **Mobile and Multimedia Networks, 2008. IET International Conference**, pp.1-2, January 11-12, 2008.
- [6] W. Naktong and A. Ruengwaree, "Increasing bandwidth of Flambeau- Shape monopole antenna for UWB Application," **8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2011)**, Khon Kaen, Thailand, pp. 172-175, May 17-19, 2011.
- [7] J.D. Kraus., **Electromagnetics**. New York: Mc Graw-Hill, 1984.
- [8] C.A. Balanis, **Antenna theory analysis and design**, Singapore : John Wiley & Son, 1997.
- [9] W.L.Stutzman and G.A. Thiele., **Antenna Theory and design**, New York : John Wiley & Son, 1981.
- [10] What is UWB. (Online), Available: <http://webopedia.com/TERM/U/UWB.html> (26 January 2010)

- [11] What is GPR (Online), Available: <http://webopedia.com/TERM/G/GPR.html> (26 January 2010)
- [12] R.N. Simons, **Coplanar waveguide circuit, components, and system**, New York: John Wiley & Son, 2001.
- [13] FCC, “**FCC Report and Order for Part 15 Acceptance of Ultra Wideband (UWB) Systems from 3.1-10.6 GHz**,” Washington DC, 2002.
- [14] R.S. Elliot., **Antenna Theory and Design**. Englewood Cliffs,NJ.:Prent-Hall, 1984.
- [15] A. Ruengwaree, R. Yowuno, G. Kompa, “Design and performance of an UWB antenna for a mono-static microwave radar system,” **German Microwave Conference**, Karlsruhe, Germany, 2006.
- [16] P. Eskelinen, “Improvements of an Inverted Trapezoidal Pulse Antenna,” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine**, vol. 43, no. 3, pp. 82-85, 2001.
- [17] พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ (ออนไลน์), เข้าถึงจาก:  
<http://elearning.spu.ac.th/homepage/een424/lesson2.html> (21 มกราคม 2553)
- [18] H. Schantz, **The Art and Science of Ultrawideband Antennas**, Boston, London, Artech House, 2005.
- [19] M.J. Ammann, and Z. N. Chen, “Wideband monopole antenna for multi-band wireless system,” **IEEE Antenna Propag. Mag**, vol.45, no.2, pp. 146-150, 2003.
- [20] Z. N. Chen, M.W. Y. Chia, and M. J. Ammann, “Optimization and comparison of broadband monopole,” **IEE Proc. Micro. Antennas Propag**, vol.50, no.6, pp.429-435, 2003.

ภาคผนวก






ภาคผนวก ก  
คุณสมบัติของ SMA Connector



## SMA - 50 Ohm Connectors

Panel Mount



142-0701-621	4
142-0701-626	4
142-0701-631	4
142-0701-636	4
142-0701-701	7
142-0701-706	7
142-1701-011	5
142-1701-016	5
142-1701-031	4
142-1701-036	4
142-1701-041	5
142-1701-046	5
142-1701-121	5
142-1701-126	5
142-1701-131	4
142-1701-136	4
142-1701-191	7
142-1701-196	7
142-1701-201	6
142-1701-206	6
142-1711-001	7
142-1711-006	7
142-1711-011	8
142-1711-016	8
142-1711-021	8
142-1711-026	8
142-1711-031	8
142-1711-036	8
142-1801-031	6
142-1801-036	6
142-1801-041	6
142-1801-046	6
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	4, 6
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric	4
2-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric	6
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	8
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric	8
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric	8
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	5
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric	4
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric	7
4-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric	6
4-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	7
4-Hole Right Angle Flange Mount Jack Receptacle	7
Specifications	2, 3

# SMA - 50 Ohm Connectors

Specifications



INCHES (MILLIMETERS)  
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

## ELECTRICAL RATINGS

**Impedance:** 50 ohms

**Frequency Range:**

Dummy loads	0-2 GHz
Flexible cable connectors	0-12.4 GHz
Uncabled receptacles, RA semi-rigid and adapters	0-18.0 GHz
Straight semi-rigid cable connectors and field replaceable connectors	0-26.5 GHz

**VSWR:** (f = GHz)

	Straight		Right Angle
	Cabled Connectors	Cabled Connectors	Cabled Connectors
RG-178 cable	1.20 + .025f	1.20 + .03f	1.20 + .03f
RG-316, LMR-100 cable	1.15 + .02f	1.15 + .03f	1.15 + .03f
RG-58, LMR-195 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f	1.15 + .02f
RG-142 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f	1.15 + .02f
LMR-200, LMR-240 cable	1.10 + .03f	1.10 + .06f	1.10 + .06f
.086 semi-rigid	1.07 + .008f	1.18 + .015f	1.18 + .015f
.141 semi-rigid (w/contact)	1.05 + .008f	1.15 + .015f	1.15 + .015f
.141 semi-rigid (w/o contact)	1.035 + .005f		
Jack-bulkhead jack adapter and plug-plug adapter		1.05 + .01f	
Jack-jack adapter and plug-jack adapter		1.05 + .005f	
Uncabled receptacles, dummy loads		N/A	
Field replaceable (see page 59)		N/A	

**Working Voltage:** (Vrms maximum)<sup>†</sup>

Connectors for Cable Type	Sea Level	70K Feet
RG-178	170	45
RG-316; LMR-100, 195, 200	250	65
RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, uncabled receptacles, .141 semi-rigid w/o contact	335	85
.141 semi-rigid with contact and adapters	500	125
Dummy loads		N/A

Dielectric Withstanding Voltage: (VRMS minimum at sea level)		
Connectors for RG-178	500	
Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200	750	
Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, field replaceable, uncabled receptacles	1000	
Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters	1500	
Connectors for .141 semi-rigid w/o contact, dummy loads	N/A	

Corona Level: (Volts minimum at 70,000 feet)		
Connectors for RG-178	125	
Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200	190	
Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, uncabled receptacles, .141 semi-rigid w/o contact	250	
Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters	375	
Dummy loads		N/A

**Insertion Loss:** (dB maximum)

Straight flexible cable connectors and adapters	0.06	√f (GHz), tested at 6 GHz
Right angle flexible cable connectors	0.15	√f (GHz), tested at 6 GHz
Straight semi-rigid cable connectors with contact	0.03	√f (GHz), tested at 10 GHz
Right angle semi-rigid cable connectors	0.05	√f (GHz), tested at 10 GHz
Straight semi-rigid cable connectors w/o contact	0.03	√f (GHz), tested at 16 GHz
Straight low loss flexible cable connectors	0.06	√f (GHz), tested at 1 GHz
Right Angle low loss flexible cable connectors	0.15	√f (GHz), tested at 1 GHz
Uncabled receptacles, field replaceable, dummy loads		N/A

**Insulation Resistance:** 5000 megohms minimum

Contact Resistance: (milliohms maximum)	Initial	After Environmental
Center contact (straight cabled connectors and uncabled receptacles)	3.0*	4.0*
Center contact (right angle cabled connectors and adapters)	4.0	6.0
Field replaceable connectors	6.0	8.0
Outer contact (all connectors)	2.0	N/A
Braid to body (gold plated connectors)	0.5	N/A
Braid to body (nickel plated connectors)	5.0	N/A

\*N/A where the cable center conductor is used as a contact

**RF Leakage:** (dB minimum, tested at 2.5 GHz)

Flexible cable connectors, adapters and .141 semi-rigid connectors w/o contact	-60 dB
Field replaceable w/o EMI gasket	-70 dB
.086 semi-rigid connectors and .141 semi-rigid connectors with contact, and field replaceable with EMI Gasket	-90 dB
Two-way adapters	-90 dB
Uncabled receptacles, dummy loads	N/A

**RF High Potential Withstanding Voltage:** (Vrms minimum, tested at 4 and 7 MHz)

Connectors for RG-178	335
Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200	500
Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, .141 semi-rigid cable w/o contact, uncabled receptacles	670
Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters	1000

**Power Rating (Dummy Load):** 0.5 watt @ + 25°C, derated to 0.25 watt @ +125°C

## MECHANICAL RATINGS

**Engagement Design:** MIL-C-39012, Series SMA

**Engagement/Disengagement Force:** 2 inch-pounds maximum

**Mating Torque:** 7 to 10 inch-pounds

**Bulkhead Mounting Nut Torque:** 15 inch-pounds minimum

**Coupling Proof Torque:** 15 inch-pounds minimum

**Coupling Nut Retention:** 60 pounds minimum

**Contact Retention:**

6 lbs. minimum axial force (captivated contacts)

4 inch-ounce minimum torque (uncabled receptacles)

**Cable Retention:**

	Axial Force*(lbs)	Torque (in-oz)
Connectors for RG-178	10	N/A
Connectors for RG-316, LMR-100	20	N/A
Connectors for LMR-195, 200	30	N/A
Connectors for RG-58, LMR-240	40	N/A
Connectors for RG-142	45	N/A
Connectors for .086 semi-rigid	30	16
Connectors for .141 semi-rigid	60	55

\*Or cable breaking strength whichever is less.

**Durability:** 500 cycles minimum

100 cycles minimum for .141 semi-rigid connectors w/o contact

**ENVIRONMENTAL RATINGS** (Meets or exceed the applicable paragraph of MIL-C-39012)

**Temperature Range:** - 65°C to + 165°C

**Thermal Shock:** MIL-STD-202, Method 107, Condition B

**Corrosion:** MIL-STD-202, Method 101, Condition B

**Shock:** MIL-STD-202, Method 213, Condition I

**Vibration:** MIL-STD-202, Method 204, Condition D

**Moisture Resistance:** MIL-STD-202, Method 106

†Avoid user injury due to misapplication. See safety advisory definitions on page 2.

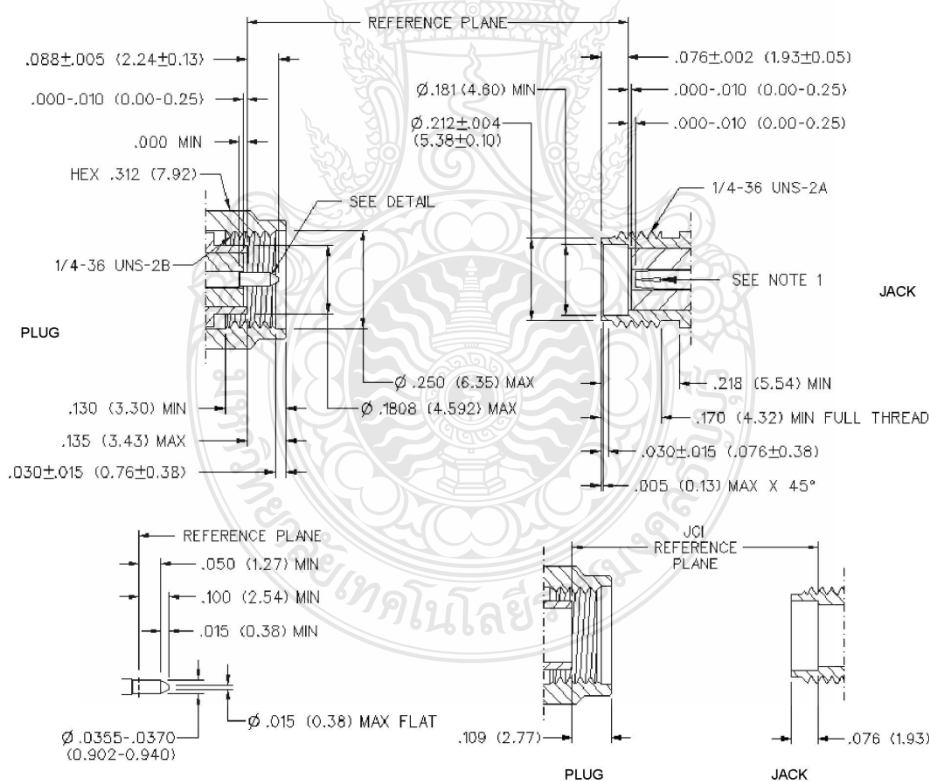
Johnson Components® • P.O. Box 1732 • Waseca, MN 56093-0832 • 1-800-247-8256 • Fax: 507-835-6287 • www.johnsoncomp.com

## MATERIAL SPECIFICATIONS

- Bodies:** Brass per QQ-B-626, gold plated\* per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
- Contacts:** Male - brass per QQ-B-626, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.  
Female - beryllium copper per QQ-C-530, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.
- Nut Retention Spring:** Beryllium copper per QQ-C-533. Unplated
- Insulators:** PTFE fluorocarbon per ASTM D 1710 and ASTM D 1457 or Tefzel per ASTM D 3159
- Expansion Caps:** Brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
- Crimp Sleeves:** Copper per WW-T-799 or brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
- Mounting Hardware:** Brass per QQ-B-626 or QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
- Seal Rings:** Silicone rubber per ZZ-R-765
- EMI Gaskets:** Conductive silicone rubber per MIL-G-83528, Type M

\* All gold plated parts include a .00005" min. nickel underplate barrier layer.

Mating Engagement for SMA Series per MIL-C-39012



**NOTES**

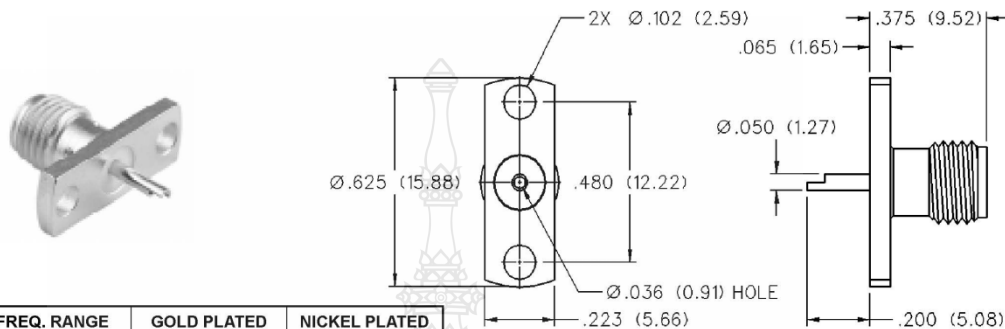
1. ID OF CONTACT TO MEET VSWR, CONTACT RESISTANCE AND INSERTION WITHDRAWAL FORCES WHEN MATED WITH DIA .0355-.0370 MALE PIN.

# SMA - 50 Ohm Connectors



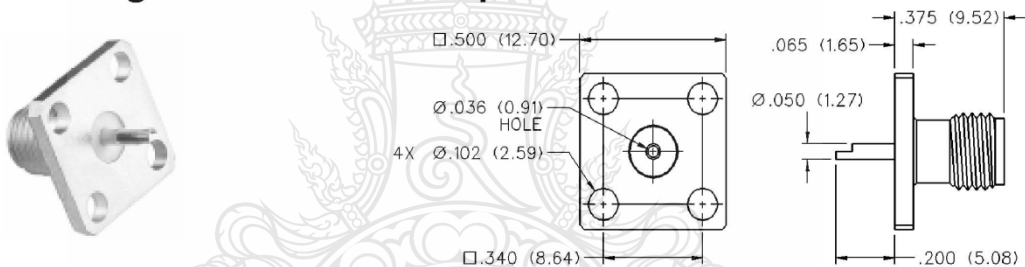
Panel Mount

## 2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



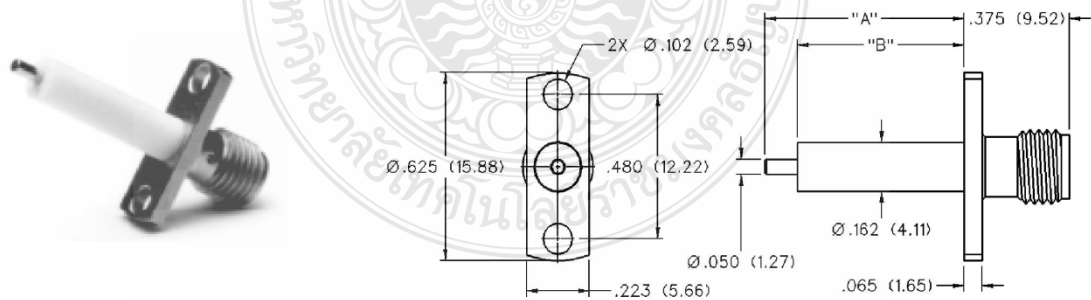
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-621	142-0701-626

## 4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



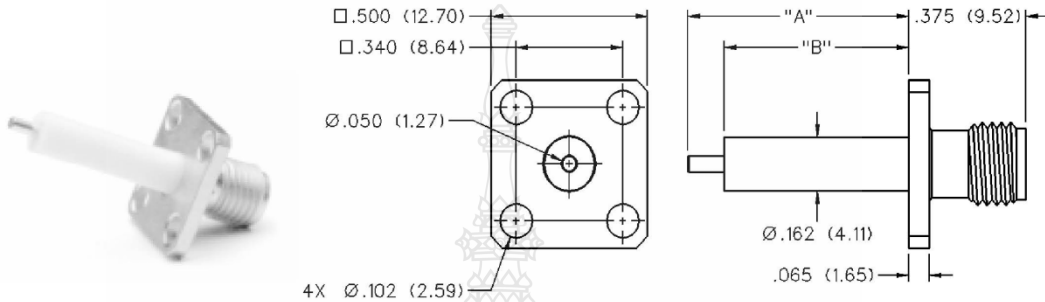
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-631	142-0701-636

## 2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



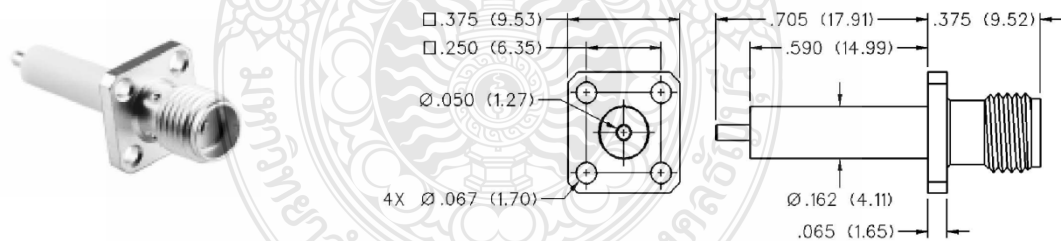
VSWR & FREQ. RANGE	PRODUCT SERIES	GOLD PLATED	NICKEL PLATED	"A"	"B"
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	Brass	142-1701-131	142-1701-136	.705 (17.91)	.590 (14.99)
		142-1701-031	142-1701-036	.240 (6.10)	.180 (4.57)

**4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -  
Extended Dielectric**



VSWR & FREQ. RANGE	PRODUCT SERIES	GOLD PLATED	NICKEL PLATED	"A"	"B"
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	Brass	142-1701-121	142-1701-126	.705 (17.91)	.590 (14.99)
		142-1701-041	142-1701-046	.190 (4.83)	.095 (2.41)

**4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -  
Extended Dielectric**



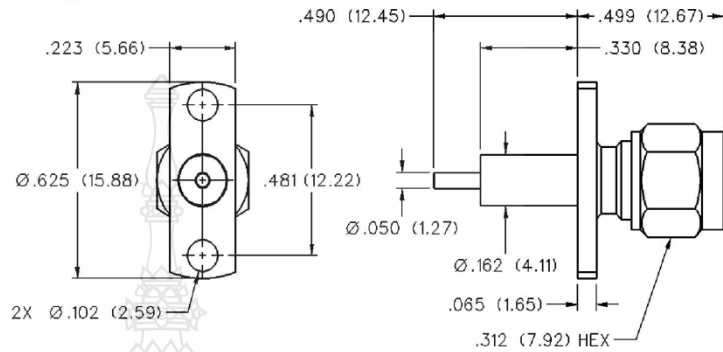
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1701-011	142-1701-016

# SMA - 50 Ohm Connectors



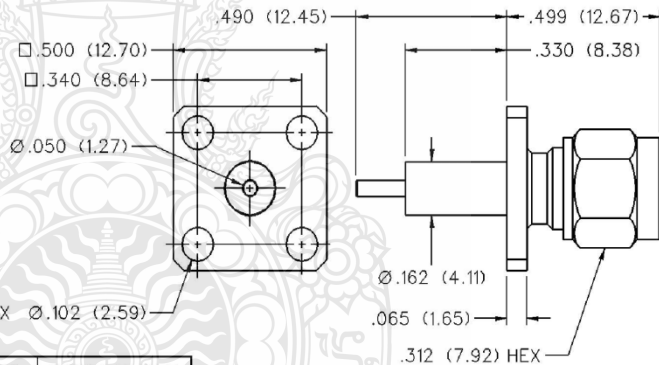
Panel Mount

## 2-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric



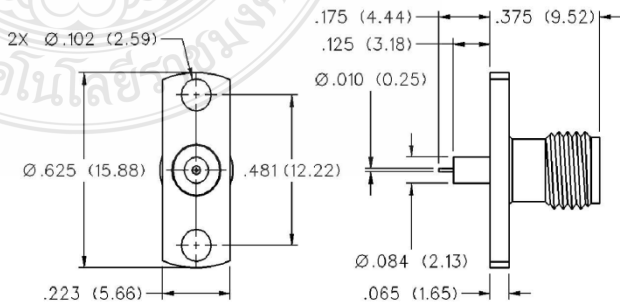
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1801-041	142-1801-046

## 4-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric



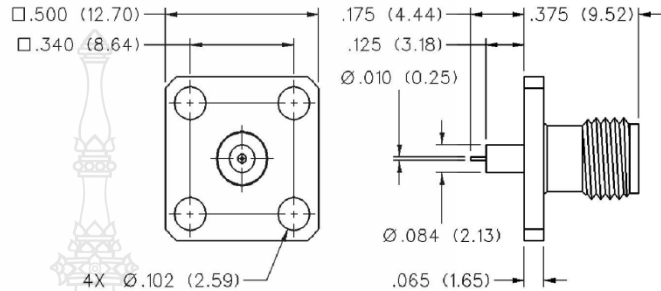
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1801-031	142-1801-036

## 2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



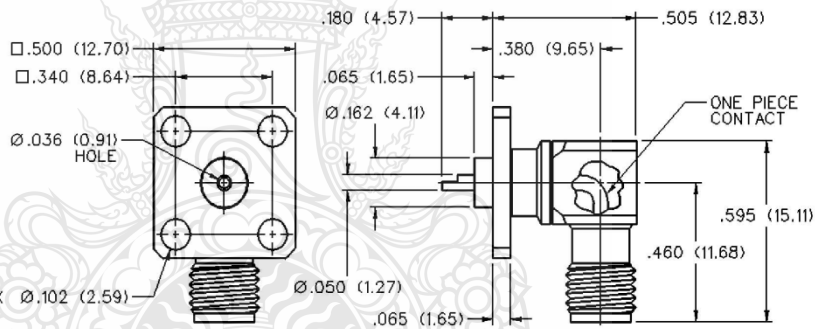
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1701-201	142-1701-206

**4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -  
Extended Dielectric**



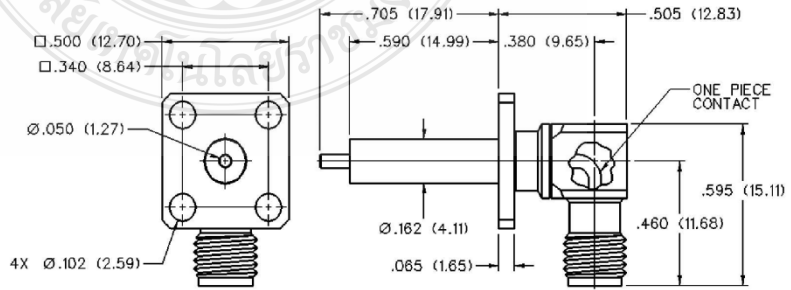
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1701-191	142-1701-196

**4-Hole Right Angle Flange Mount Jack Receptacle**



VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-701	142-0701-706

**4-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -  
Extended Dielectric**



GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-001	142-1711-006

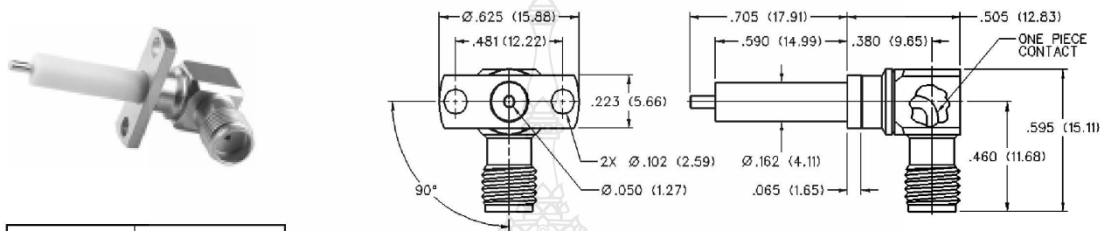


# SMA - 50 Ohm Connectors



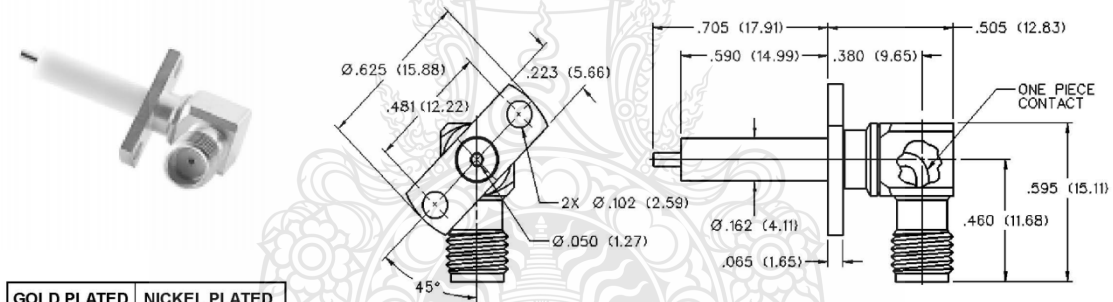
Panel Mount

## 2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric 90° Orientation



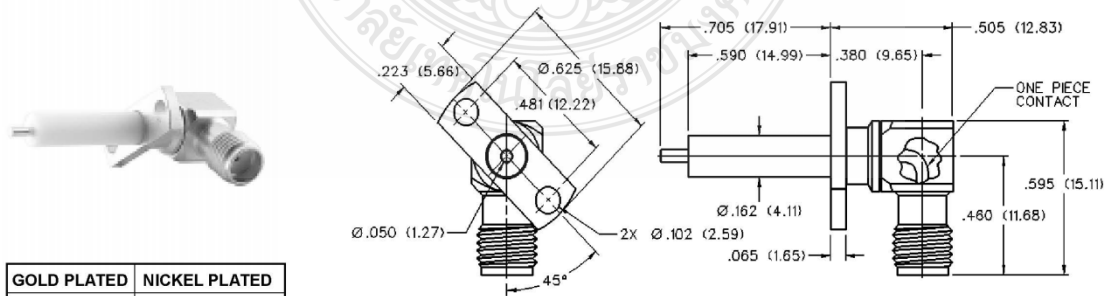
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-011	142-1711-016

## 2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric +45° Orientation

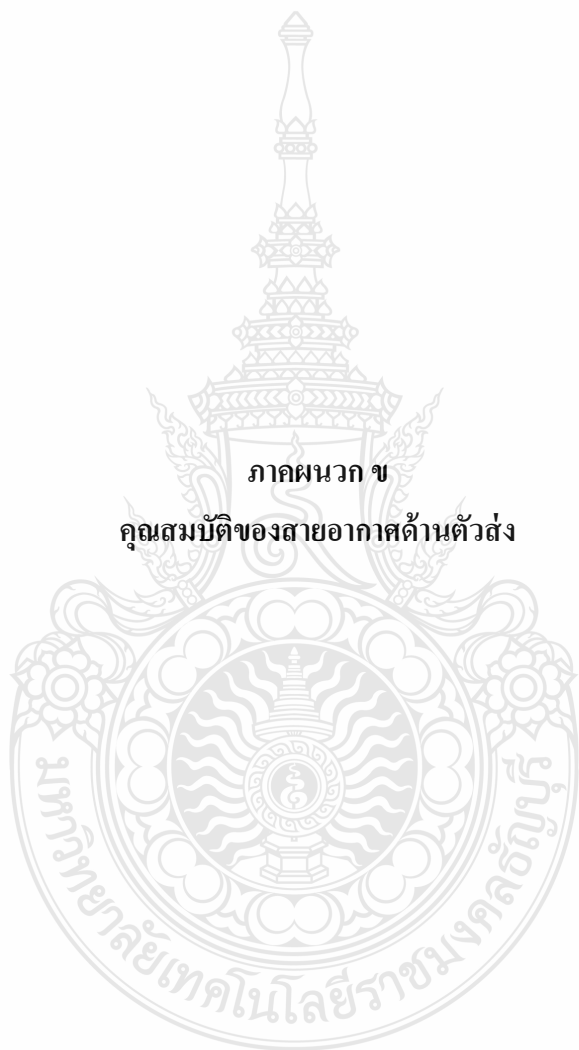


GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-021	142-1711-026

## 2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric -45° Orientation



GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-031	142-1711-036



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของสายอากาศด้านตัวส่ง



EMC Antennas  
**Double-Ridged  
 Waveguide Horn**  
 Model 3117

3-D Patterns  
 Available at  
[www.ets-lindgren.com/3117](http://www.ets-lindgren.com/3117)

**FEATURES:**

- Ultra Broadband: 1 GHz - 18 GHz
- Maintains Single Lobe Radiation Pattern Over Frequency
- 300 W Power Input Capacity
- Optimized High Frequency Gain
- Low VSWR
- Flexible Mounting Systems



ETS-Lindgren's Model 3117 Double-Ridged Waveguide Horn  
 PATENT # 6,995,728

**The Model 3117 Double Ridged Waveguide** is the latest addition to a family of double ridge waveguides for microwave and EMC measurement from ETS-Lindgren. This model corrects the lower gain at the upper end of the frequency range, commonly found in ridged waveguide antennas. Users of this antenna benefit from uniform illumination of target surfaces and accurate gain measurement. In addition, the Model 3117 exhibits high gain and low VSWR across its operational frequency band, accepting moderate power input of 300 watts.

The electrical characteristics of this antenna were designed and modeled using powerful workstations running electromagnetic simulation software. Equally important, experienced RF engineers worked with our manufacturing team to produce a practical and affordable realization of the modeling process. All production units are individually calibrated at our A2LA accredited lab.

**FEATURES**

**Single Lobe Radiation Pattern**

The Model 3117 maintains a single main lobe pattern in the direction of the horn axis over its frequency

range. This characteristic is essential for even distribution of electromagnetic energy on a target surface, and accurate measurement of gain and vector information. The Model 3117's unique design suppresses the propagation of high order modes. The result is an antenna with a well-defined single lobe radiation pattern that outperforms other antennas in its class.

**Ultra Broadband**

The Model 3117 sweeps from 1 GHz to 18 GHz without stopping for band breaks, making it ideal



## EMC Antennas Double-Ridged Waveguide Horn

Model 3117

for automated testing. It has the widest usable frequency range of any antenna in its class, with no performance degradation from high order modes.

### Power Input

The Model 3117 uses a Type N connector and accepts up to 300 watts of continuing input power with up to 400 watts of peak power. The antenna's high gain and low VSWR over its operating frequency translates into efficient amplifier use and high field strengths.

### Uniform Gain, Low VSWR

The Model 3117 has a more uniform gain and antenna factor because of the better behavior of its radiation pattern. Since the pattern is stable over frequency, the gain and the AF also remain stable. Similar antennas of this class exhibit large variations of the gain and the AF as the frequency increases.

### Flexible Mounting System

The Model 3117 antenna includes both an EMCO classic mount and a rear "stinger" mount.

### STANDARD CONFIGURATION

- Antenna Assembly
- Mounting bracket drilled to accept ETS-Lindgren or other tripod mounts with 1/4 in x 20 threads
- Rear "stinger" Mount
- Individually calibrated at 1 m per SAE ARP 958 at our A2LA accredited lab. 3 m calibration per ANSI C63.5 available at additional cost. Actual antenna factors and a signed Certificate of Calibration Conformance included with manual.

### OPTIONS

- Antenna Mast
- Antenna Tripod

## Electrical Specifications

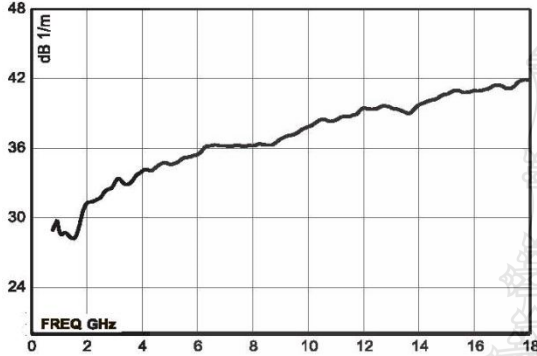
MODEL	FREQUENCY RANGE	VSWR RATIO (AVG)	MAXIMUM CONTINUOUS POWER	PEAK POWER	IMPEDANCE (NOMINAL)	CONNECTORS
3117	1 GHz - 18 GHz	3.5:1 max <2:1 above 1.5 GHz	300 W	400 W	50 $\Omega$	Type N

## Physical Specifications

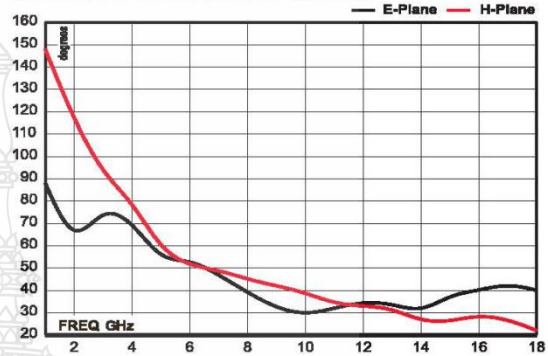
MODEL	WIDTH	DEPTH	HEIGHT	WEIGHT
3117	17.5 cm 6.9 in	17.5 cm + 15.5 cm mount 6.9 in + 6.1 in mount	15.5 cm 6.1 in	1.13 kg 2.5 lb

EMC Antennas  
**Double-Ridged Waveguide Horn**  
Model 3117

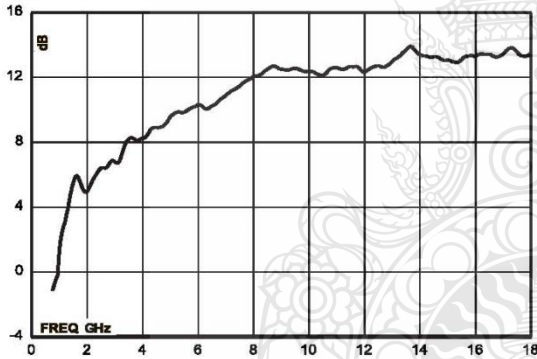
**Model 3117 Antenna Factor**



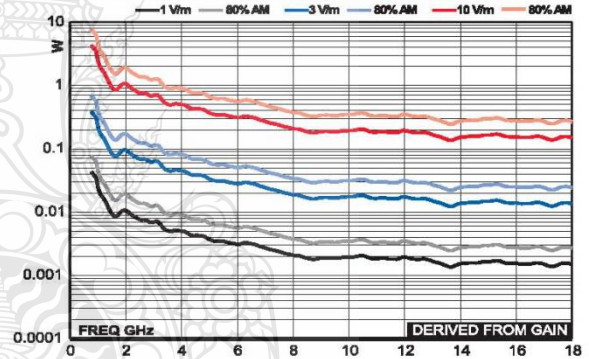
**Model 3117 Half Power Beamwidth**



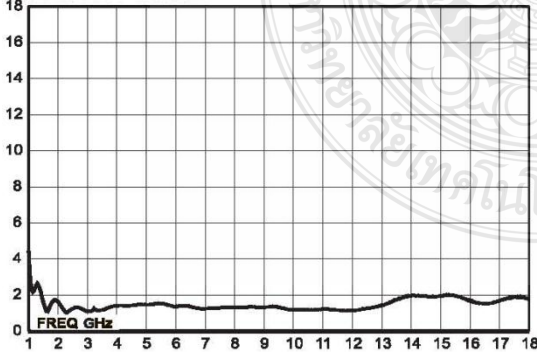
**Model 3117 Gain**



**Model 3117 Forward Power @ 1 m**

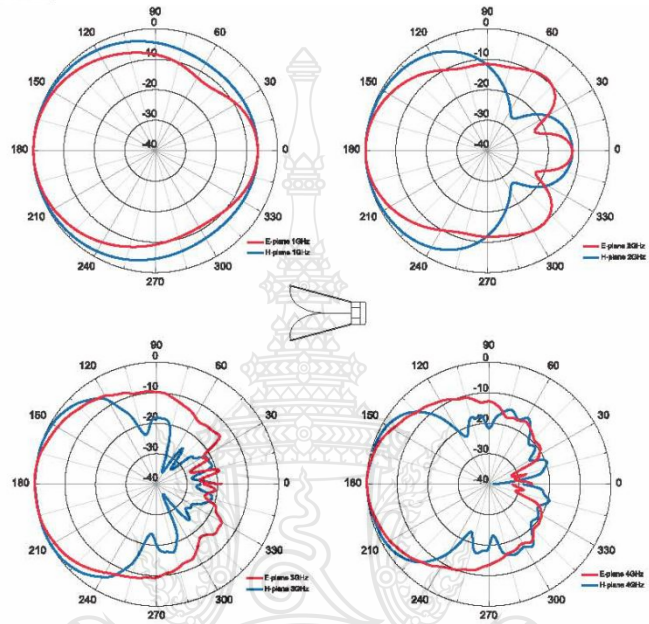


**Model 3117 VSWR**

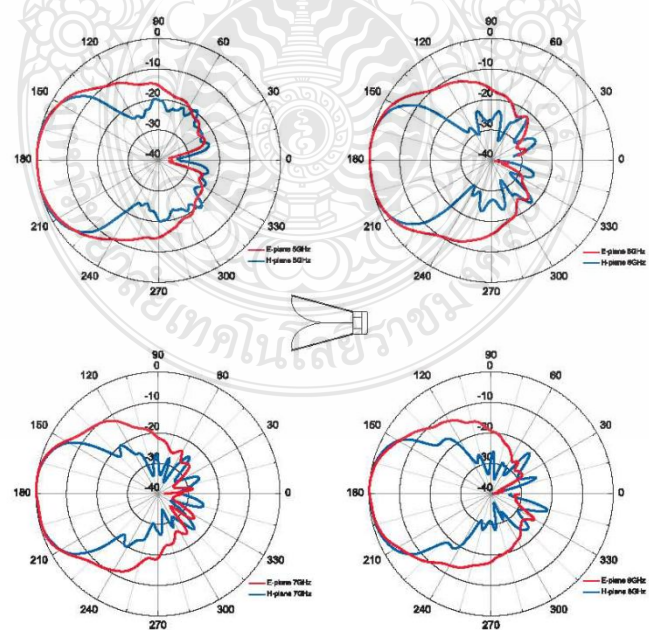




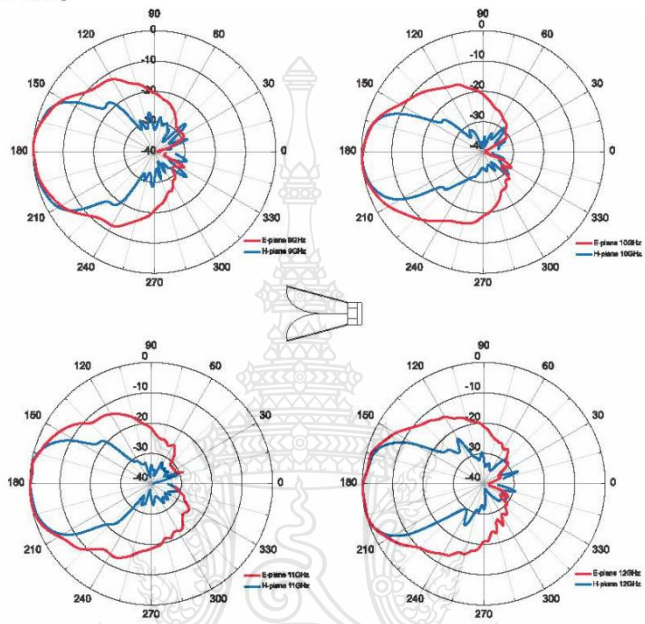
**Model 3117 (1 GHz - 4 GHz)**



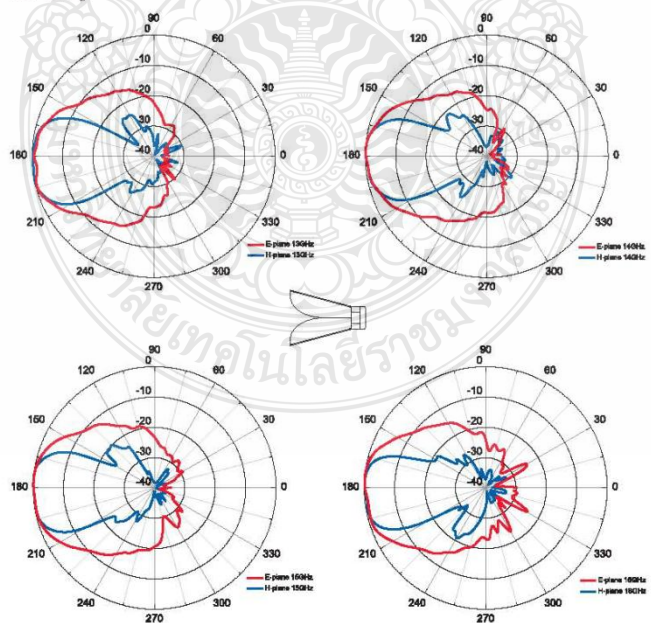
**Model 3117 (5 GHz - 8 GHz)**

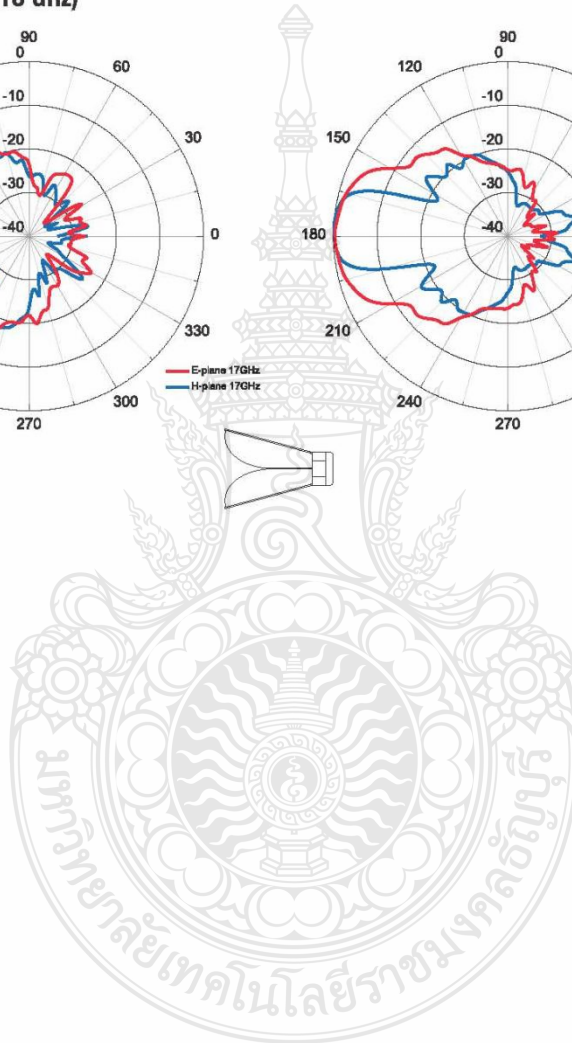
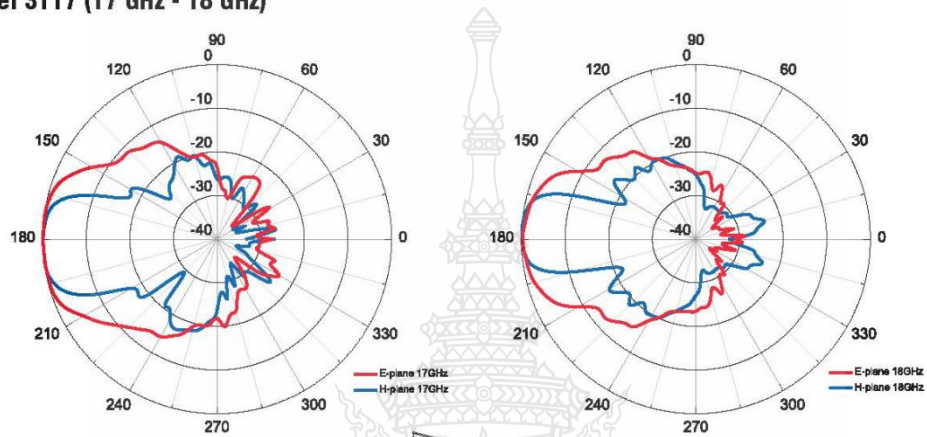


**Model 3117 (9 GHz - 12 GHz)**



**Model 3117 (13 GHz - 16 GHz)**



**Model 3117 (17 GHz - 18 GHz)**





ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Pipat Kongmuang and Amnoiy Ruengwaree, “Small Rugby Ball Antenna for UWB Application,” **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS PROPAGATION (ISAP 2011)**, Jeju, Korea, 2011 October 26-28.

พิพัฒ คงเมือง, วัชรพล นาคทอง และ อำนาจ เรืองวาริ, “การออกแบบสายอากาศแบบโมนโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิคการเซาะร่อง.”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, หนองคาย, 3-5 เมษายน 2555.

Final Program & Abstract Book

<http://www.isap2011.org>

**“Towards Green Convergence”**

2011 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS AND PROPAGATION

**ISAP 2011**

October 25~28, 2011 / Lotte Hotel Jeju, Jeju, Korea

#### Organized & Sponsored by

- Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES)

#### Co-Sponsored by

- Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)

#### Technically Co-Sponsored by

- Antennas and Propagation Society of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE/AP-S)
- Antennas Society of CIE (CIE-AS)
- International Union of Radio Science (URSI)
- The Institute of Electronics Engineers of Korea (IEEK)
- IEEE AP-S Seoul Chapter



## VI. TECHNICAL PROGRAM

### Poster Session I & II / October 28, 2011 [Friday]

#### FrP2-23 Study on Channel Capacity in Near-field MIMO System when Using Dual-dipole Array

Dalin Zhang, Toshikazu Hori, and Mitoshi Fujimoto, *Univ. of Fukui, Japan*

This paper introduces the dual-dipole array into the near-field MIMO communication system. Comparing with the conventional single-dipole array, the proposed array possesses very huge dominance in channel capacity. The optimal HPBW of the radiation pattern of the dual-dipole element is found at about 50°. The deterioration of channel capacity caused by antenna location errors is also clarified in detail.

#### FrP2-24 Compact Printed Ultra-wideband Antenna with Band-Notch for WLAN

Mohammad Tariqul Islam, Rezaul Azim, Ahmed Toaha Mobashsher, Norbahiah Misran, and Kamarulzaman Mat, *Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia*

A compact printed antenna with band-notch characteristics for WLAN is proposed. The proposed compact antenna consists of a partial ground plane and an annular ring patch with a partial annular slot. By properly designing the annular slot placed at the lower side of the ring radiator, good frequency rejection of 5.1-5.9 GHz with a wide operating band from 3 to 10.6 GHz can be obtained. Furthermore, a symmetric radiation pattern and stable gain except in the notched band makes the proposed antenna suitable for being used in UWB applications.

#### FrP2-25 Bandwidth Enhancement of E Shaped Patch Antenna Using Parasitic Radiator

Zeeshan Zahid, *Nat'l Univ. of Sciences and Technology, Pakistan*

A simple technique of bandwidth enhancement of E shaped patch antenna using a coplanar parasitic radiator has been presented. The E shaped patch antenna is coaxial probe fed and parasitic radiator is a rectangular strip. Adding the strip to the design introduces additional resonance, responsible for the enhancement of bandwidth. The length and width of the strip have been optimized to achieve the aim. Both simulation and experimental study is conducted. The maximum measured bandwidth is 43.37% and maximum simulated gain is 9.91dBi. Measured and simulated results of reflection coefficient are in good agreement. The design has been simulated in HFSS.

#### FrP2-26 Self-Complementary Ring Planer Antenna of Very Wideband Operation

Yasser Fadhel<sup>1)</sup> and Khalil Sayidmarie<sup>2)</sup>, <sup>1)</sup>*Institute of Technology / Mosul, Iraq*, <sup>2)</sup>*Univ. of Mosul, Iraq*

The principle of self-complementary is applied to develop the traditional planar monopole antenna into a dipole antenna with frequency range which exceeds UWB requirements. The proposed design has compact, planar, and simple shape arranged in self-complementary manner. The self-complementary structure reduced the imaginary part of the antenna impedance, resulting in wider bandwidth. The proposed antenna showed -10dB return loss bandwidth extending from 1.87 GHz up to 17.77 GHz.

#### FrP2-27 Small Rugby Ball Antenna for UWB Application

Pipat Kongmuang and Amnoiy Ruengwaree, *Rajamangala Univ. of Technology Thanyaburi, Thailand*

This article presents the reducing size of Rugby Ball antenna for UWB (Ultra-wideband) application which is fabricated on PCB FR4 type. The prototype antenna can support the UWB according to the requirement of the Federal Communications Commission (FCC) that set the range of frequencies about 3.1-10.6 GHz. The analysis of antenna qualifications employed the simulation structure which resulted by the Computer Simulation Technology (CST) program. The proposed antenna has been reduced of 97.05% when compared with the conventional one.



### III. ORGANIZING COMMITTEE

#### General Chair

- Young Ki Cho (Kyungpook National University, Korea)

#### Vice Chair

- Jaehoon Choi (Hanyang University, Korea)
- Young Joong Yoon (Yonsei University, Korea)

#### Advisory committee

##### Chair

- Hyo Joon Eom (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea)

##### Members

- Dong Il Kim (Korea Maritime University, Korea)
- Noh Hoon Myung (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea)
- Jeong Ki Paek (Chungnam National University, Korea)
- Dong Chul Park (Chungnam National University, Korea)
- Sang-won Yun (Sogang University, Korea)

#### Technical Program committee

##### Chair

- Sangwook Nam (Seoul National University, Korea)

##### Special Session Chair

- Bom Son Lee (Kyung Hee University, Korea)

##### Short Course Chair

- Taek Kyung Lee (Korea Aerospace University, Korea)

##### Young Scientist Awards Chair

- Raj Mittra (The Pennsylvania State University, USA)
- Ik Mo Park (Ajou University, Korea)

##### Members

- Hiroyuki Arai (Yokohama National University, Japan)
- Seungwon Choi (Hanyang University, Korea)
- Jiro Hirokawa (Tokyo Institute of Technology, Japan)
- Hong Koo Kim (University of Pittsburgh, Korea)
- Hyeong Dong Kim (Hanyang University, Korea)
- Jeong Hwan Kim (Korea Research Institute of Standards and Science, Korea)
- Il Seuk Koh (Inha University, Korea)
- De-Hoon Kwon (University of Massachusetts Amherst, Korea)
- Yisok Oh (Hongik University, Korea)
- Seong-Ook Park (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea)
- Yoan Shin (Soongsil University, Korea)
- Toru Uno (The University of Tokyo, Japan)
- Jong-Gwan Yook (Yonsei University, Korea)
- Jong won Yu (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea)



October 25~28, 2011 / Lotte Hotel Jeju, Jeju, Korea

**ISAP2011****III. ORGANIZING COMMITTEE****Finance committee****Chair**

- Chang-Joo Kim (Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea)

**Members**

- Kwang-Man Lee (Jeju National University, Korea)
- Jae Wook Lee (Korea Aerospace University, Korea)
- Jeong gun Oh (Ace & Partners, Korea)

**Publication and Publicity committee****Chair**

- Kyeong Sik Min (Korea Maritime University, Korea)

**Members**

- Young Heui Cho (Mokwon University, Korea)
- Kang Wook Kim (Kyungpook National University, Korea)
- Hyung-Gi Na (LIGNEX1, Korea)

**Exhibition Committee****Chair**

- Jaehoon Choi (Hanyang University, Korea)

**Members**

- Kyung Heon Koo (University of Incheon, Korea)
- Won-mo Seong (EMW Corporation, Korea)

**Local Arrangement committee****Chair**

- Heung Soo Kim (Jeju National University, Korea)

**Members**

- Ki-Chai Kim (Yeungnam University, Korea)
- Bom Son Lee (Kyung Hee University, Korea)

**General Secretary**

- Sungtek Kahng (University of Incheon, Korea)

**International Advisory Committee**

- Makoto Ando (Tokyo Institute of Technology, Japan)
- Cristophe Caloz (Ecole Polytechnique of Montreal, Canada)
- Dau Chyrh Chang (Oriental Institute of Technology, Taiwan)
- Zhi Ning Chen (Institute for Infocomm Research, Singapore)
- Weng Cho Chew (The University of Hong Kong, Hong Kong)
- Koichi Ito (Chiba University, Japan)
- Per-Simon Kildal (Chalmers University of Technology, Sweden)
- Jay K. Lee (Syracuse University, USA)
- Kai Fong Lee (The University of Mississippi, USA)
- Joshua Le-Wei Li (University of Electronic Science and Technology of China, China)
- Kwai Man Luk (City University of Hong Kong, Singapore)
- Wolfgang Menzel (University of Ulm, Germany)
- Raj Mittra (The Pennsylvania State University, USA)
- Robert Nevels (Texas A & M University, USA)
- Yahya Rahmat-Samii (The University of California, USA)
- Tapan Sarkar (Syracuse University, USA)
- Ross Stone (Stoneware Ltd., USA)
- Kam Weng Tam (University of Macau, China)
- Kin Lu Wong (National Sun Yat-sen University, Taiwan)
- Wen Xun Zhang (Southeast University, China)



# Small Rugby Ball Antenna for UWB Application

Pipat Kongmuang, Dr. Amnoiy Ruengwaree

2011 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS AND PROPAGATION  
ISAP2011  
October 25-28, 2011 / Luoyi Hotel Appl. Eng. Korea

RMUTS HFRG  
High Frequency Research Group

## 1. Introduction

Currently, the application lists using antenna UWB are also abundant, but widely used to the ground penetrating radar (GPR). The GPR is used to detect, such as examination of objects, pipelines underground, structure, building etc. The rugby ball antenna is an antenna that can be used in the ground radar as well because of transmit and receive waveforms with pulse rise time and pulse width with a very narrow range [1]. In the previous designs, the researchers were introduced rugby ball antennas applied to a radar system for near range [2-3]. However, its application need to be moving the antenna to detect any targets, but the antenna is too large, so that the problem of size and weight have been considered and developed.

## 2. Antenna Structure

In previous research, the structural design of antennas is similar to the rugby ball [1]. The rugby ball is created by the overlapping circles which its distance height,  $h$ , width,  $a$ , and distance between the centers of two circles,  $D$ , as shown in Figure 1(a) are calculated from formulas (1) and (2) when  $\lambda_c$  is the lowest desired frequency:

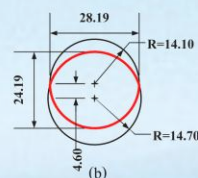
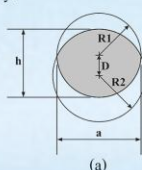


Figure 1: (a) Geometry of the Rugby Balls Antenna (b) The Size of The Antenna Given By Equations.

$$D = (R_1 + R_2) - h \quad (1)$$

$$\text{When } h = \frac{\lambda_c}{4} \text{ so that } a = \frac{1}{D} \times \sqrt{4D^2 R_1^2 - (D^2 - R_1^2 + R_2^2)^2} \quad (2)$$

First, in the UWB frequencies ranging of 3.1 GHz to 10.6 GHz with the previous formulas, the  $h = 24.19$  mm,  $D = 4.60$  mm,  $R_1 = 14.10$  mm, and  $R_2 = 14.70$  mm, so that the rugby ball antenna can be created as shown in Figure 1(b). Then the size of the antenna from the calculations is proved by using the electromagnetic software CST. By the prototype antenna was fabricated on PCB type FR-4 with the total length and width are 37 and 30 mm, respectively. The PCB has a dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) of 4.5 and its thickness of 0.77 mm. However, the feeding line is CPW-Fed which is respected with a SMA 50 ohm.

## 3. Creation and Measurement

From the analysis and design of antenna prototype by simulation until getting the sizes of parameter that proper for the antenna is shown in figure 3. By explaining the responding result of frequency range is presented in the form of the return loss and the Voltage Standing Wave Ratio: VSWR. Figure 4(a) and (b) show the comparison of the simulated and measured return loss and VSWR, respectively. It can be seen that both results from the simulation and real measurement tend to be in the same way which are able to use with the frequency range from 3.03 GHz to 14.02 GHz.



Figure 2: The Proposed FR4 Rugby Ball Antenna (a) Its Dimension (b) Its Photograph.

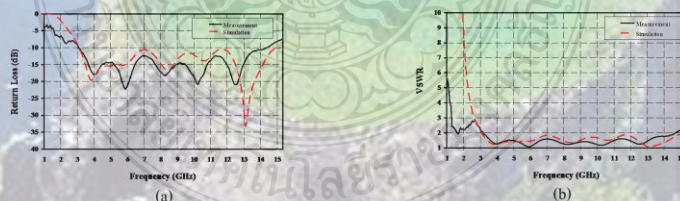


Figure 3: (a) Return Loss (b) VSWR.

## 4. Conclusion

This paper has presented the modified rugby ball antenna by using PCB FR4. The proposed rugby ball antenna is designed for supporting the UWB application to use with the wireless communication on IEEE 802.15.3a standard. The results of antenna from the simulation and measurement responses constantly conform through the frequency used in 3.1 - 10.6 GHz and its VSWR is less than 2. Also, it is found to have 128.91% of bandwidth (3.03 - 14.02 GHz) and be able to reduce the size of  $30 \times 37$  mm which is 96.14% of the conventional one. As show in Table 1.

Item	Conventional Rugby Ball Antenna	Proposed Rugby Ball Antenna
Size (W×L)	151.45×196.40 mm	30×37 mm
Area (mm <sup>2</sup> )	29,744.78 mm <sup>2</sup>	1,110 mm <sup>2</sup>
Frequency Range	0.9 - 20 GHz	3.03 - 14.02 GHz

Table 1: Comparison Between Prototype And Small Rugby Ball Antenna.

## Small Rugby Ball Antenna for UWB Application

<sup>#</sup>Pipat Kongmuang<sup>1</sup>, Amnoiy Ruengwaree<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Rangsit–Nakorn Nayok rd. Thanyaburi, Patumthani, Thailand, pom883r@hotmail.com

<sup>2</sup>Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Rangsit–Nakorn Nayok rd. Thanyaburi, Patumthani, Thailand, amnoiy.r@en.rmutt.ac.th

### Abstract

This article presents the reducing size of Rugby Ball antenna for UWB (Ultra-wideband) application which is fabricated on PCB FR4 type. The prototype antenna can support the UWB according to the requirement of the Federal Communications Commission (FCC) that set the range of frequencies about 3.1-10.6 GHz. The analysis of antenna qualifications employed the simulation structure which resulted by the Computer Simulation Technology (CST) program. The proposed antenna has been reduced of 97.05% when compared with the conventional one.

**Keywords :** Reducing size Rugby Ball antenna CPW-Fed UWB

### 1. Introduction

Currently, the application lists using antenna UWB are also abundant, but widely used to the ground penetrating radar (GPR). The GPR is used to detect, such as examination of objects, pipelines underground, structure, building etc. The rugby ball antenna is an antenna that can be used in the ground radar as well because of transmit and receive waveforms with pulse rise time and pulse width with a very narrow range [1]. In the previous designs, the researchers were introduced rugby ball antennas applied to a radar system for near range [2-3]. However, its application need to be moving the antenna to detect any targets, but the antenna is too large, so that the problem of size and weight have been considered and developed.

### 2. Structure and Designing Principles

#### 2.1 Antenna Structure

In previous research, the structural design of antennas is similar to the rugby ball [1]. The rugby ball is created by the overlapping circles which its distance height,  $h$ , width,  $a$ , and distance between the centers of two circles,  $D$ , as shown in Figure 1(a) are calculated from formulas (1) and (2) when  $\lambda_L$  is the lowest desired frequency:

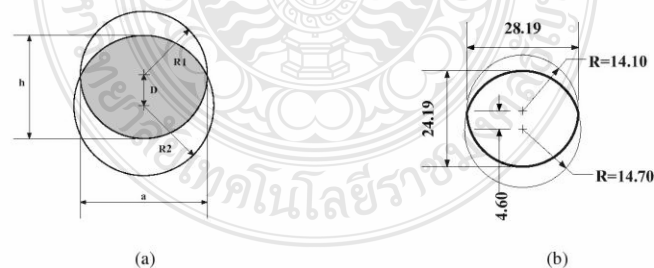


Figure 1: (a) Geometry of the Rugby Balls Antenna (b) The Size of The Antenna Given By Equations.



$$D = (R_1 + R_2) - h \quad (1)$$

When  $h = \frac{\lambda_L}{4}$  so that

$$a = \frac{1}{D} \times \sqrt{4D^2 R_2^2 - (D^2 - R_1^2 + R_2^2)^2} \quad (2)$$

First, in the UWB frequencies ranging of 3.1 GHz to 10.6 GHz with the previous formulas, the  $h = 24.19$  mm,  $D = 4.60$  mm,  $R_1 = 14.10$  mm, and  $R_2 = 14.70$  mm, so that the rugby ball antenna can be created as shown in Figure 1(b). Then the size of the antenna from the calculations is proved by using the electromagnetic software CST. By the prototype antenna was fabricated on PCB type FR-4 with the total length and width are 37 and 30 mm, respectively. The PCB has a dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) of 4.5 and its thickness of 0.77 mm. However, the feeding line is CPW-Fed which is respected with a SMA 50 ohm [6].

## 2.2 The Simulation Analysis

The simulation CST program is required to revise the responses of antenna such as the return loss, radiation pattern and bandwidth for optimizing the size of antenna. It can be noticed that when the length of both side ground planes ( $L_1$ ) are varied, the proper bandwidth is also changed. Figure 2(a) shows the return loss ( $S_{11}$ ). It found that when  $L_1 = 16.78$  mm, the widest bandwidth is presented around 74.09% (3.11 – 6.77 GHz). By the way, when the width of both side ground plane ( $W_1$ ) is adjusted as shown in figure 2(b), it found that the proper value is  $W_1$  of 3.1 mm is suitable. Because the frequency response will be around 132.04% (3.06 – 14.95 GHz) which is more than 57.14% compared with the conventional one. Finally, the proposed antenna dimension is shown in figure 3(a). Figure 3(b) shows the fabricated antenna. Table 1 shows that the size of the proposed antenna can be reduced 96.14% when compared with the conventional rugby ball antenna in [2].

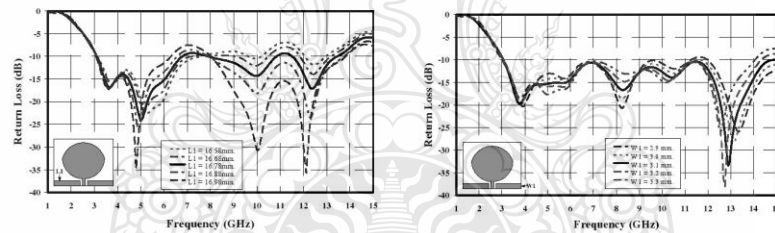


Figure 2: The Return Loss (a) When Adjusting  $L_1$  (b) When Adjusting  $W_1$ .

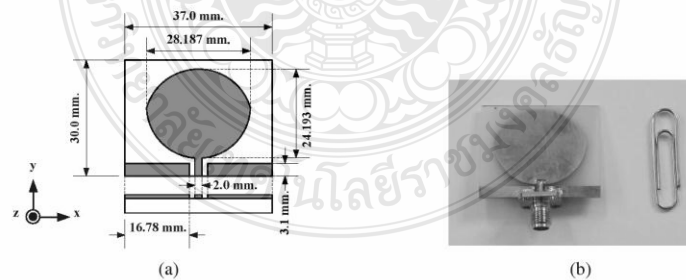


Figure 3: The Proposed FR4 Rugby Ball Antenna (a) Its Dimension (b) Its Photograph.



Table 1: Comparison Between Prototype And Small Rugby Ball Antenna.

Item	Conventional Rugby Ball Antenna	Proposed Rugby Ball Antenna
Size (W×L)	151.45×196.40 mm	30×37 mm
Area (mm <sup>2</sup> )	29,744.78 mm <sup>2</sup>	1,110 mm <sup>2</sup>
Frequency Range	0.9 – 20 GHz	3.03 – 14.02 GHz

### 3. Creation and Measurement

From the analysis and design of antenna prototype by simulation until getting the sizes of parameter that proper for the antenna is shown in figure 3. By explaining the responding result of frequency range is presented in the form of the return loss and the Voltage Standing Wave Ratio: VSWR. Figure 4(a) and (b) show the comparison of the simulated and measured return loss and VSWR, respectively. It can be seen that both results from the simulation and real measurement tend to be in the same way which are able to use with the frequency range from 3.03 GHz to 14.02 GHz. Figure 5 and 6 show the simulated and measured results of the antenna pattern on H and E plane, respectively. It can be noticed that the proposed antenna pattern is generated in bi-directional which can cover up the UWB range.

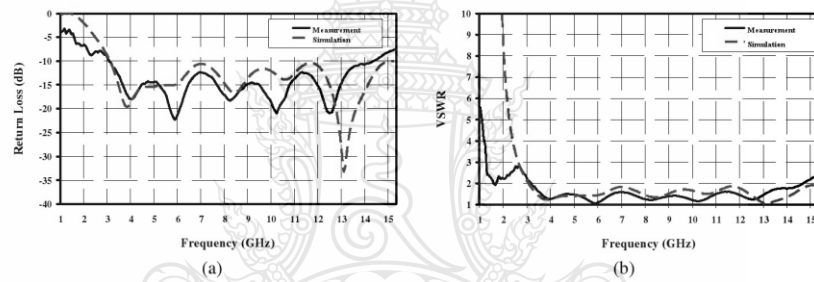
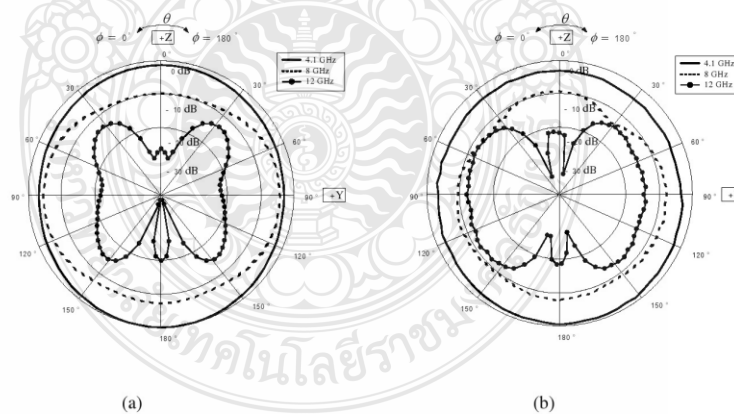


Figure 4: (a) Return Loss (b) VSWR.

Figure 5: The Radiation Pattern at The Frequencies of 4.1 GHz, 8 GHz and 12.4 GHz on H-Plane  
(a) Simulation (b) Measurement.

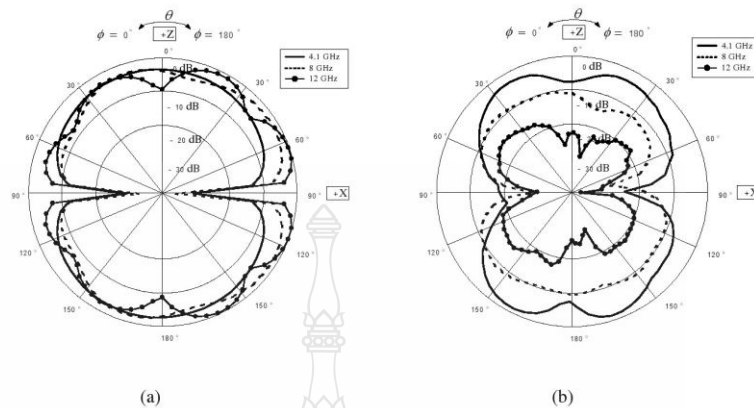


Figure 6: The Radiation Pattern at The Frequencies of 4.1 GHz, 8 GHz and 12.4 GHz on E-Plane  
(a) Simulation (b) Measurement.

#### 4. Conclusion

This paper has presented the modified rugby ball antenna by using PCB FR4. The proposed rugby ball antenna is designed for supporting the UWB application to use with the wireless communication on IEEE 802.15.3a standard. The results of antenna from the simulation and measurement responses constantly conform through the frequency used in 3.1 - 10.6 GHz and its VSWR is less than 2. Also, it is found to have 128.91% of bandwidth (3.03 – 14.02 GHz) and be able to reduce the size of  $30 \times 37$  mm which is 96.14% of the conventional one.

#### Refereces

- [1] A. Ruengwaree, R. Yowuno, G. Kompa, "A novel rugby-ball antenna for pulse radiation," European Microwave Conference Proceedings, Paris, France, pp. 1855-1858, 2005.
- [2] A. Ruengwaree, R. Yowuno, G. Kompa, "Design and performance of an UWB antenna for a mono-static microwave radar system," German Microwave Conference, Karlsruhe, Germany, 2006.
- [3] A. Ruengwaree, A. Ghose, G. Kompa, "A Novel Rugby-Ball UWB Antenna for Near-range Microwave Radar System," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 6, pp. 2774-2779, 2006.
- [4] P. Eskelinen, "Improvements of an Inverted Trapezoidal Pulse Antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine, vol. 43, no. 3, pp. 82-85, 2001.
- [5] Amnoiy Ruengwaree, "Reducing Weight of a Rugby-Ball Antenna," The Nineth PSU Engineering Conference, Phuket, Thailand, 2008.
- [6] Wei Tong, Z. R. Hu, "A CWP Fed Circular Monopole Antenna for Ultra Wideband Wireless Communications," Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 3A, pp. 528-531, 2005.

#### Acknowledgments

The author would like to express their thanks to the Rajamangala University of Technology Thanyaburi for any supporting on this study.

# การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

## มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

3-5 เมษายน 2555 ณ โรงแรมแกรนด์พาราไดซ์ จังหวัดหนองคาย



### Electrical Engineering Network 2012 (EENET2012) of Rajamangala University of Technology

3-5 April 2012, Grand Paradise Hotel, Nongkhai, Thailand

<http://dee.ea.rmuti.ac.th/eenet2012>

EENET เป็นเครือข่ายความร่วมมือด้านวิศวกรรมไฟฟ้าของกลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล โดยสมาชิกในเครือข่ายประกอบด้วยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง 9 แห่ง มีจุดประสงค์เพื่อการร่วมมือด้านวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

การประชุมวิชาการที่จัดขึ้นประจำปีเป็นกิจกรรมหนึ่งที่เครือข่ายได้ดำเนินการติดต่อกันอย่างต่อเนื่อง การจัดการประชุมวิชาการครั้งนี้เป็นครั้งที่ 4 ใช้ชื่อว่า EENET2012 การประชุมทั้ง 3 ครั้งที่ผ่านมาได้รับความร่วมมือจากนักวิชาการทั้งในและนอกเครือข่ายเป็นอย่างดี ขอเชิญชวนนักวิชาการและนักวิจัยเข้าร่วมประชุมหรือส่งบทความวิจัยหรือบทความวิชาการเข้าร่วมประชุม โดยทุกบทความจะผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่านต่อบทความ จึงจะสามารถนำเสนอในที่ประชุมได้

EENET is the academic network of Rajamangala University of Technology in electrical engineering. EENET includes 9 Rajamangala universities of technology of Thailand. The aim of network is to co-operating the research and academic activities.

Conference is an activity of the network that organizes every year. This EENET2012 conference is the 4<sup>th</sup> since the network establishment. All submitted paper will be reviewed by 3 blind reviewers.

ขอเชิญเข้าร่วมประชุมและส่งบทความในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 ประจำปี 2555 (Electrical Engineering Network 2012 of Rajamangala University of Technology, EENET2012) ณ โรงแรมแกรนด์พาราไดซ์ จ.หนองคาย

The 4<sup>th</sup> Electrical Engineering Network conference EENET2012 of Rajamangala University of Technology will be organized at Grand Paradise Hotel, Muang, Nongkhai, Thailand. Both Thai and English can be used for contribution.

#### Conference Topics

<b>Group 1</b>	Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.
<b>Group 2</b>	Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy Generating Systems.
<b>Group 3</b>	Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.
<b>Group 4</b>	Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.
<b>Group 5</b>	Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.
<b>Group 6</b>	Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.

#### Important Dates

Full Paper Submission Deadline:	15 January 2012	15 มกราคม 2555
Notification of Acceptance:	15 February 2012	15 กุมภาพันธ์ 2555
Revised Full Paper Submission Due:	22 February 2012	22 กุมภาพันธ์ 2555
Registration:	15-29 February 2012	15-29 กุมภาพันธ์ 2555
Conference Date:	3-5 April 2012	3-5 April 2555

ผู้สนับสนุนหลัก



ผู้ร่วมกิจกรรม



คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ติดต่อกับ [eenet2012@gmail.com](mailto:eenet2012@gmail.com) Tel.&Fax. +66 044 252659



## Session chairs

No	Name	Abbr	Session	Date	Time	Room
1	ผศ. กฤติวิทย์ บัวใหญ่	KBY	PW#4	4 เม.ย 55	10.00 - 12.00	Room 1
2	ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์	KBP	PE#2	3 เม.ย 55	13.00 - 15.00	Room 2
3	รศ.ดร. โกศล ไชยารโหโรจน์	KOR	RE#1	4 เม.ย 55	15.10 - 17.10	Room 1
4	ดร. จักรี ศรีรินทร์ฉัตร	JSC	TE#2	3 เม.ย 55	13.00 - 15.00	Room 3
5	ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	CSK	GN#1	5 เม.ย 55	08.30 - 10.30	Room 2
6	อ. ชาญฤทธิ์ ธาธาสันติสุข	CTS	AP#1	5 เม.ย 55	10.40 - 12.40	Room 3
7	ดร. ณัฐภัทร พันธังคัง	NPK	PE#3	3 เม.ย 55	15.10 - 17.10	Room 2
8	รศ.ดร. ธวัช เกิดชื่น	TKC	PW#1	3 เม.ย 55	10.00 - 12.00	Room 1
9	รศ. นภัทร วิงนเทพินทร์	NWP	RE#4	5 เม.ย 55	10.40 - 12.40	Room 1
10	ดร. นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	NRC	PW#3	3 เม.ย 55	15.10 - 17.10	Room 1
11	ดร. นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	NPR	TE#6	3 เม.ย 55	15.10 - 17.10	Room 3
12	ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง	BPK	RE#3	5 เม.ย 55	08.30 - 10.30	Room 1
13	ผศ.ดร. ประมุข อุณหเลขกะ	PUK	PW#5	4 เม.ย 55	13.00 - 15.00	Room 1
14	อ. พงษ์ศักดิ์ อ้าภา	PAP	CP#1	5 เม.ย 55	08.30 - 10.30	Room 3
15	อ. พิณิจ จิตจรัส	PJJ	PW#2	3 เม.ย 55	13.00 - 15.00	Room 1
16	ดร. พิณิจ ศรีธรร	PST	PE#5	4 เม.ย 55	13.00 - 15.00	Room 2
17	ดร. ยุทธนา ชำสุวรรณ์	YKW	PE#4	4 เม.ย 55	10.00 - 12.00	Room 2
18	ดร. วรณรีย์ วงษ์ไตรรัตน์	WWR	TE#4	4 เม.ย 55	10.00 - 12.00	Room 3
19	ดร. วรณรีย์ วงษ์ไตรรัตน์	WWR	TE#5	4 เม.ย 55	13.00 - 15.00	Room 3
20	ผศ.ดร. วันชัย ทริพย์สิงห์	WSS	GN#3	5 เม.ย 55	13.15 - 15.15	Room 2
21	ผศ. วุฒิชัย ส่งงาม	WSN	GN#4	5 เม.ย 55	13.15 - 15.15	Room 3
22	ผศ. ศิริชัย แดงอม	SDE	PE#1	3 เม.ย 55	10.00 - 12.00	Room 2
23	ผศ.ดร. สมชัย หิรัญวิโรตม	SHD	GN#2	5 เม.ย 55	10.40 - 12.40	Room 2
24	ดร. สุริยา แก้วอาษา	SKS	RE#2	4 เม.ย 55	15.10 - 17.10	Room 2
25	ดร. อำนวย เรืองวาริ	ARR	TE#3	3 เม.ย 55	15.10 - 17.10	Room 3
26	ดร. อุเทน คำน่าน	UKN	RE#5	5 เม.ย 55	13.15 - 15.15	Room 1
27	ผศ.ดร. อภินันท์ อูไรโสภณ	AUP	TE#1	3 เม.ย 55	10.00 - 12.00	Room 3



3 APRIL 2012, ROOM3				
SESSION	TIME	TITLE	PRESENTER	CHAIR
	09.00	-		
Morning Break				
TE#1	10.00	TE01 Current Controlled Current Mode Active Filter Using All-Pass Function	Seangrawee Buakaew	AUP
	10.15	TE02 วงจรรีเลย์เซนเซอร์ฮิสเทอรีซิสที่ใช้วงจรสายพานกระแสที่สอง	Wipavan Narksarp	
	10.30	TE03 การออกแบบวงจรกรองความถี่สูงด้วยวงจรถอดรูปที่เกเรเตอร์แบบไม่สูญเสียที่มีอัตราขยายสูง	เสนอ สะอาด	
	10.45	TE04 การแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัลแบบเคลื่อนที่ DVB-H กับรูปแบบการสูญเสีย Okumura-Hata ในพื้นที่กรุงเทพฯ	เสนอ สะอาด	
	11.00	TE05 การการทดลองออกอากาศแพร่ภาพระบบโทรทัศน์ดิจิทัลแบบเคลื่อนที่ตามมาตรฐาน DVB-H ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร	เสนอ สะอาด	
	11.15	TE06 อัลกอริทึมสำหรับการฝังและการถอดสายน้ำดิจิทัลสำหรับภาพสลับพื้นฐานการแปลงเวฟเลตแพกเกจกับแบนด์วิดท์ที่ต่ำสุด	สุรินทร์ แหมงงาม	
	11.30	TE07 การออกแบบสายอากาศความถี่กว้างแบบสวมใส่ได้สำหรับอุปกรณ์พกพา	ระพีพันธ์ แก้วอ่อน	
	11.45	TE08 การออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างด้วยเทคนิคการเจาะร่อง	พิพัฒน์ คงเมือง	
	12.00	TE29 การพัฒนาเทคนิคการประมวลผลสัญญาณเสียงพูดแบบฐานเวลาจริงโดยใช้บอร์ดเอพพีเจไอ	เฉลิมเกียรติ สุดาชา	
Lunch Break				
TE#2	13.00	TE09 Realization of Electronic Tunable Current-mode Quadrature Oscillator Based on Third Order Technique	Koson Pitakuttayaprot	JSC
	13.15	TE10 โมดูลวงจรมอดูเลเตอร์ขนาดตัวชิพวงจรรวมคุณสมบัติสัญญาณ	อัญชลี พานิชเจริญ	
	13.30	TE11 การสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบ PI, PD และ PID ใหม่กระแสโดยใช้วงจรถ่ายพานกระแส	วิภา ศรีกุล	
	13.45	TE12 ระบบสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัล	ชวีชัย จิตต์สนธิ	
	14.00	TE13 การขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศของเบ็ดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสลับรูปตัวโอแบบแล้วลำดับ สำหรับการสื่อสารไร้สาย	วัชรพล นาคทอง	
	14.15	TE14 สายอากาศโมโนโพลรูปตัววายสำหรับการใช้งานย่านความถี่แถบคู่	จักรกฤษณ์ บุญมหาหา	
	14.30	TE15 การออกแบบติดตั้งแอสซิมเมตริกพื้นฐาน IEEE 802.11b/g ย่านความถี่ 2.4 GHz	ณัฐกรินทร์ ทองรักษา	
	14.45	TE16 การออกแบบสายอากาศหลายความถี่ที่ป้อนด้วยโครงสร้างระนาบร่วมรูปวงรีซ้อน	ภูษิต ทองแสำร์	
Afternoon Break				
TE#3	15.10	TE17 เทคนิคการเปรียบเทียบเวฟเลตสำหรับอัตราการบีบอัดใหม่ของสัญญาณเสียง	สุภาณี ศรีสิงห์	ARR
	15.25	TE18 การพัฒนาเทคนิคในการแยกแยะเสียงโห่และเสียงโห่ขณะบนพื้นฐาน LSP Coefficients	ไกรยงค์ดี พัฒนบุรี	
	15.40	TE19 CCDDCCs based Three-Input Single-Output Electronically Tuned Current Mode Universal Filter	Montri Somdunyanakok	
	15.55	TE20 การกำเนิดสัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้าแบบสั้นยิ่งสำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	อำนาจ เรืองวารี	
	16.10	TE21 Current Controlled Voltage-mode Universal Filter with High Input Impedance	Weera Rattanangam	
	16.25	TE22 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแอนต้อพแบบมัลติฟังก์ชันสำหรับเครือข่าย NEMO และ 3G	करชิต โขยคำนวน	
	16.40	TE23 สายอากาศโมโนโพลรูปตัววีที่มีการปรับจูนระนาบกรวดสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้าง	วีรศักดิ์ แก้วศรีดำ	
	16.55	TE24 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบขั้นบันได ลำดับที่ 2 โดยใช้ CCTA	นันทวุฒิ ศรีวรรณศิริ	

การออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งด้วยเทคนิค  
การเซาะร่อง

**Design of rectangular monopole antenna with slot etching for Ultra-wide Band Applications**

พิพัฒน์ คงเมือง<sup>1\*</sup> วัชรพล นาคทอง<sup>2</sup> และ อำนวย เรืองวารี<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
อ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-4620, 086-7540751 E-mail: pom883r@hotmail.com  
<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
744 อ.สุวรรณวาระณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-233000 ต่อ 3140-1 E-mail: watchraphonnak@gmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยเทคนิคการเซาะร่องรูปตัวซีที่ส่วนแผ่หลังงาน และรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา โดยโครงสร้างสายอากาศถูกออกแบบบนแผ่นวงจร พิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 การออกแบบสายอากาศใช้วิธีการศึกษาและแปรค่าพารามิเตอร์ด้วยการจำลองแบบเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยอาศัยการปรับขนาดของร่องรูปตัวซีที่ตัวสายอากาศ และขนาดของการเซาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่กราวด์จนมีการสูญเสียย้อนกลับค่าที่สุทธรวม ไปถึงการคำนึงถึงคุณลักษณะของแบนด์วิดท์และแบบรูปการแพร่คลื่น จากผลการจำลองแบบพบว่า สายอากาศที่ออกแบบมีแถบความถี่กว้างยิ่ง คือมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 110.01% (3.08 - 10.61 GHz.) ซึ่งครอบคลุมการใช้งานย่านความถี่กว้างยิ่งตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a

คำสำคัญ: รูปตัวซี รูปครึ่งวงกลม การเซาะร่อง สายอากาศโมโนโพล

**Abstract**

This paper is presented a Design of rectangular monopole antenna with slot etching for Ultra-wide Band Applications. The antenna structure is designed on the printed circuit board with FR4 material. Antenna design and process parameters using a simulation model to find the best results. Based on the size of the C-shaped groove on the antenna and the size of the semicircular erode the ground plane. Until a minimum return loss and the characteristics of the bandwidth and the transmission spectrum. From the simulation results showed that the antenna has ultra-wide band frequency. Is a good impedance bandwidth equal to 110.01% (3.08 - 10.61 GHz.) Which cover a ultra-wide band range of standard IEEE 802.15.3a.

Keywords: C-shape, semicircular, slot etching, monopole antenna

**1. คำนำ**

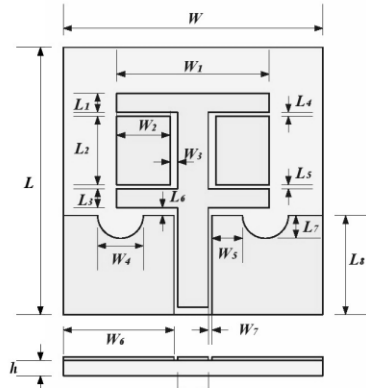
ระบบการสื่อสารไร้สายในรูปแบบระยะทางสั้นที่มีกรับ-ส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมากมีขนาดของแบนด์วิดท์ที่กว้างความถี่สูงนั้น [1-2] ได้รับความนิยมน้อย่างมาก ในด้านการนำไปใช้กับระบบค้นหาโลหะใต้พื้นดิน ระบบส่งภาพและเสียง ระบบทางการศึกษา ระบบทางทหารและระบบทางการแพทย์เป็นต้น จากระบบดังกล่าวนี้ ได้ใช้มาตรฐานของ FCC ที่กำหนดช่วงย่านความถี่แถบ 3.1 - 10.6 GHz (Ultra-wide band :UWB) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a [1-4] ผู้ใช้งานระบบมาตรฐานนั้น ได้นำมาพัฒนาออกแบบและลดขนาดของอุปกรณ์วงจรต่างๆ ให้ใช้งานแบบไม่จำกัดพื้นที่สามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นและอีกส่วนที่สำคัญในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือสายอากาศที่ช่วยเพิ่มที่ประสิทธิภาพใช้กับอุปกรณ์หรือวงจรในระบบต่างๆ จึงได้มีผู้ออกแบบสายอากาศเพื่อตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่ง แต่มีโครงสร้างสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ [4-6] นำมาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องมือที่ขนาดเล็กไม่สะดวก จากที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงได้ศึกษาโครงสร้างสายอากาศ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 และออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยม โดยจะมีการปรับขนาดของการเซาะร่องรูปตัวซีที่ตัวสายอากาศ และรูปของครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา โดยใช้วิธีเชิงประจักษ์ (Experimental method) ร่วมกับโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สายอากาศต้นแบบมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

**2. การออกแบบและผลการจำลองแบบสายอากาศ**

**2.1 โครงสร้างสายอากาศ**

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเริ่มศึกษาจากโครงสร้างสายอากาศและใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปทรงเลขาคณิตจากงานวิจัยที่ [6-9] มาปรับบน ด้วยวิธีเชิงประจักษ์ (Experimental method) ร่วมกับโปรแกรม CST จนได้โครงสร้างสายอากาศต้นแบบดังรูปที่ 1 โดยโครงสร้างสายอากาศ

ต้นแบบถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ซึ่งขนาดความยาว ( $L$ ) เท่ากับ 34 มม. ขนาดความกว้าง ( $W$ ) เท่ากับ 34 มม. แผ่นวงจรพิมพ์ดังกล่าวมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) = 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) = 0.764 มม. ขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมหลังจากทำการปรับขนาดทำให้เสาอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุดแสดงได้ตามตารางที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของเสาอากาศต้นแบบ

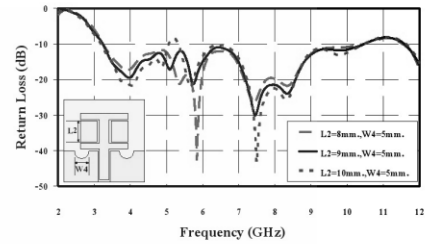
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเสาอากาศต้นแบบ

ขนาดความยาว		ขนาดความกว้าง	
ตัวแปร	ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
$L$	35	$W$	34
$L_1$	2.5	$W_1$	20
$L_2$	9	$W_2$	7
$L_3$	2.5	$W_3$	1
$L_4$	0.5	$W_4$	6
$L_5$	0.5	$W_5$	4
$L_6$	1	$W_6$	14.5
$L_7$	3	$W_7$	0.5
$L_8$	13	$W_8$	4
$h$	0.764	-	-

2.2 ผลการจำลองแบบของเสาอากาศ

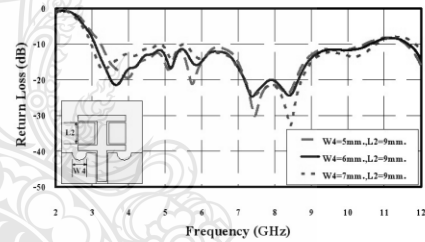
การจำลองแบบเสาอากาศด้วยโปรแกรม CST เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเสาอากาศเช่น ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ รูปแบบการแผ่พลังงานและแบนด์วิดท์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับขนาดโครงสร้างเสาอากาศ การปรับจูนการเจาะรูของเสาอากาศทั้งสองจุดในบทความวิจัยนี้คือ ส่วนแรกเจาะรูรูปตัวซีที่ตัว

เสาอากาศ โดยปรับค่าความกว้าง  $W_7$  คงที่เท่ากับ 5 มม. และค่าความยาวของแถบ  $L_2$  โดยมีขนาดตั้งแต่ 8, 9 และ 10 มม. พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ  $L_2$  เท่ากับ 9 มม. ซึ่งทำให้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับลดลง แต่ช่วงความถี่ยังไม่กว้างพอคือ ตั้งแต่ 3.24 - 10.47 GHz แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ  $|S_{11}|$  เมื่อปรับขนาด  $L_2$

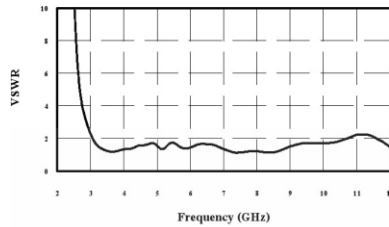
ส่วนที่สองทำการเจาะรูที่ระนาบสร้างเงา (Ground plane) รูปครึ่งวงกลม ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับเจาะรูแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยปรับค่าความยาวคงที่ของแถบ  $L_2$  เท่ากับ 9 มม. และค่าความกว้างของแถบ  $W_7$  โดยมีขนาดตั้งแต่ 5, 6 และ 7 มม. พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ  $W_7$  เท่ากับ 6 มม. โดยมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.08 - 10.61 GHz



รูปที่ 3 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ  $|S_{11}|$  เมื่อปรับขนาด  $W_7$

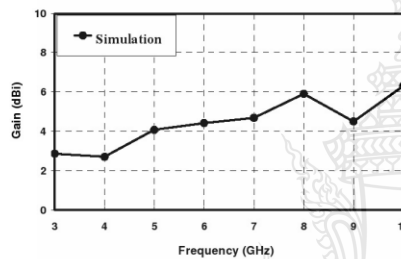
จากนั้นทำการจำลองแบบผลตอบสองความถี่ช่วงการใช้งานในรูปแบบของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าค่า VSWR จะต่ำกว่า 2 ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.31 - 7.79 GHz





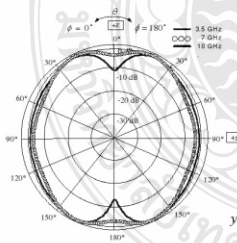
รูปที่ 4 การจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน VSWR

สำหรับส่วนของค่าอัตราขยายของสายอากาศดินแบบ การจำลองแบบโดยเริ่มที่ความถี่ 3 GHz มีค่าอัตราขยาย 2.87 dBi จนถึงความถี่ 10 GHz มีค่าอัตราขยาย 6.32 dBi มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.94 ค่าอัตราขยายนี้ ความถี่อื่นๆแสดงได้ดังรูปที่ 5

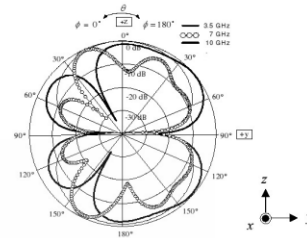


รูปที่ 5 อัตราขยายจากการจำลองแบบสายอากาศดินแบบ

จากนั้นทำการจำลองแบบสายอากาศดินแบบเพื่อศึกษา รูปแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz พบว่าการแผ่พลังงานคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศ เป็นแบบรอบทิศทาง (Omi-directional) ในระนาบ x-z ดังรูปที่ 9 และระนาบ y-z ดัง รูปที่ 10



รูปที่ 6 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz ระนาบ E-plane



รูปที่ 7 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz ระนาบ H-plane

5. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอสายอากาศแบบ โมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับใช้งานในย่านความถี่กว้างเชิง โดยมีการเซาะร่องรูปตัวซีที่ตัวสายอากาศ และเชิงเซาะร่องที่ระนาบกรวดรูปครึ่งวงกลม จากการจำลองแบบพบว่าอิมพีแดนซ์มีค่าความถี่ตั้งแต่ 110.01% (3.08 - 10.61 GHz) ซึ่งครอบคลุมต่อย่านความถี่กว้างเชิง (Ultra-wide Band) โดยการเซาะร่องรูปตัวซีที่ตัวสายอากาศที่มีผลทำให้ทำการสูญเสียย้อนกลับต่ำที่สุด คือการปรับขนาดของค่าความกว้างของแถบ  $L_2$  และการเซาะร่องรูปครึ่งวงกลมที่ระนาบสร้างเงา การปรับเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ สามารถปรับได้จากการปรับขนาดความกว้างของ  $W_2$  ในสายอากาศดินแบบพบว่ามีแบบรูปการแผ่พลังงานของสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z เป็นรอบทิศทางและแบบรูปการแผ่คลื่นของสนามแม่เหล็กในระนาบ y-z เป็นแบบรอบทิศทาง และมีอัตราขยายเฉลี่ย 3.94 dBi

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตราจารย์สุชาติธรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้งานด้านโปรแกรม CST

เอกสารอ้างอิง

- [1] FCC, "FCC Report and Order for Part 15 Acceptance of Ultra Wideband (UWB) Systems from 3.1-10.6 GHz," Washington DC, 2002.
- [2] H. Schantz, "The Art and Science of Ultrawideband Antennas," Boston, London, Artech House, 2005.
- [3] M.J. Ammann, and Z. N. Chen, "Wideband monopole antenna for multi-band wireless system," IEEE Antenna Propag. Mag., Vol.45, no.2, pp. 146-150, 2003.
- [4] Z. N. Chen, M.W. Y. Chia, and M. J. Ammann, "Optimization and comparison of broadband monopole," IEE Proc. Micro. Antennas Propag., vol. 150, no.6, pp.429-435, 2003.

- [5] V. Shrivastava and Y. Ranga, "Ultra wide band CPW-fed printed pentagonal antenna with modified ground plane for UWB Applications," *Mobile and Multimedia Networks, 2008. IET International Conference on*, pp.1-2, January 11-12, 2008.
- [6] W. Naktong and A. Ruengwaree, "Increasing bandwidth of Flambeau- Shape monopole antenna for UWB Application," *8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2011)*, Khon Kaen, Thailand, pp 172-175, May 17-19, 2011.



นายพิพัฒน์ คงเมือง กำลังศึกษาระดับปริญญาโท  
หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์  
และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ

Antenna Design, Dual-band, Ultra-Wideband



วีรพล นาคทอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท  
หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์  
และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2554 ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design



อำนวยการศึกษาระดับปริญญาเอก  
จากมหาวิทยาลัยเคสเซล ประเทศสาธารณรัฐเยอรมัน  
ปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำ  
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ โทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
งานวิจัยที่สนใจ Ultra Wideband Radar System, Ultra Fast Electrical Pulse Generator, Antenna Design

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายพิพัฒ คมเมือง
วัน เดือน ปีเกิด	6 ธันวาคม 2522
ที่อยู่	117/77 หมู่ 6 แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อ พ.ศ. 2546
ความชำนาญเฉพาะทาง	ทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2546 – 2548	วิศวกรควบคุมงาน 6 ฝ้ายผลิต แผนก Motor Winding บริษัท มิตรชุบิชิ อิเล็กทริก ออโตเมชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ.2548 – 2550	วิศวกรควบคุมงาน 5 ฝ้ายผลิต แผนก Aluminum Motor บริษัท มิตรชุบิชิ อิเล็กทริก ออโตเมชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน	วิศวกรควบคุมงาน 4 ฝ้ายควบคุมคุณภาพ แผนก Field QC บริษัท มิตรชุบิชิ อิเล็กทริก ออโตเมชั่น (ประเทศไทย) จำกัด

