

สายอากาศไดโพลล็อกฟิรูดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้
ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

LOG - PERIODIC DIPOLE ARRAY ANTENNA FOR ULTRA -
WIDEBAND COMMUNICATION SYSTEM

ขั้วลัญหัย โปธิแจ็ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สายอากาศไดโพลล๊อคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้
ในระบบอัลตราไวต์แบนด์

จวิญหทัย โปธิแจ่ม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศไดโพลสี่อวกพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวขวัญหทัย โพธิ์แจ้ง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศไดโพลสี่อวกพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ โดยสายอากาศจะถูกวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วย โปรแกรม Computer Simulation Technology : CST Microwave Studio การออกแบบสายอากาศใช้วัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.3 ความหนา 0.8 มิลลิเมตร โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่จะนำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล (Pattern) เป็นต้น

สายอากาศถูกออกแบบให้มีขนาด 72.2×115 ตร.มม. โดยมีไดโพลสี่อวกพิริออดิกแถวลำดับ 8 อิลิเมนต์ ซึ่งพารามิเตอร์หลักในการออกแบบสายอากาศคือ องค์ประกอบทางด้านขนาดและองค์ประกอบทางด้านระยะห่างของอิลิเมนต์ที่ไดโพล ซึ่งปัจจัยหลักนี้ทำให้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่กว้างครอบคลุมการใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ตั้งแต่ 1.8 – 12 GHz ซึ่งคิดที่ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB สายอากาศมีค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 2 ns อัตราขยายของสายอากาศตลอดย่านความถี่ไม่น้อยกว่า 4 dBi และแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียว จากคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจึงมีความเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a

คำสำคัญ: สายอากาศไดโพลสี่อวกพิริออดิก ระบบอัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศแบบทิศทางเดียว

Thesis Title	Log-Periodic Dipole Array Antenna for Ultra-Wideband Communication System
Name - Surname	Miss Kwanhatai Pojang
Program	Electronics and Telecommunication Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Paitoon Rakluea, D.Eng.
Academic Year	2018

ABSTRACT

This research proposed a Log-Periodic Dipole Array Antenna for Ultra-Wideband Communication System. The antenna was analyzed using numerical methods by the Computer Simulation Technology program: CST Microwave Studio. Its design was based on FR4 base material with dielectric constant (ϵ_r) of 4.3 and 0.8 mm thickness. Its analyzed characteristics consisted of Return Loss (S_{11}), Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), Gain and Wave radiation pattern, etc.

The size of the antenna was $72.2 \times 115 \text{ mm}^2$ including log-periodic dipole array 8th element. The main parameter in the design of the antenna was configuration of scale and distance composition of dipole elements. This main factor created wide bandwidth covering the use of the ultra-wideband system.

The result indicated that Log-Periodic Dipole Array Antenna has 1.8 - 12 GHz bandwidth involving return loss lower than -10 dBi. This antenna has a delay group lower than 2 ns. Its gain throughout frequency range was at least 4 dBi with its wave radiation pattern of one direction. Consequently, this antenna is suitable to apply with the ultra-wideband system according to the IEEE 802.15.3a standard.

Keywords: log – periodic dipole antenna, ultra–wideband, directional antenna

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ทางทอง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์ และอาจารย์มาลียา ตั้งจิตเจษฎา ผู้ทรงคุณวุฒิกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้าและได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขออุทิศส่วนกุศลทั้งหลายแก่พระคุณของบิดา มารดา ที่ท่านได้ลุล่วงไปแล้ว และขอบคุณครอบครัวญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ขวัญหทัย โพธิ์แจ้ง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	17
1.2 วัตถุประสงค์.....	18
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	18
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	19
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	20
2.2 ทฤษฎีของสายอากาศ.....	21
2.2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole antenna).....	21
2.2.2 สายอากาศแบบแถวลำดับ (Antenna Array).....	22
2.2.3 สายอากาศล็อกพีริอดิก (Log – Periodic Antenna).....	22
2.2.4 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบล็อกพีริอดิกเพื่อใช้งานจริง.....	24
2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ.....	27
2.3.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}).....	27
2.3.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR).....	27
2.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain).....	28
2.3.4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Wave radiation pattern).....	31
2.3.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency).....	33
2.3.6 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity).....	33

สารบัญ (ต่อ)

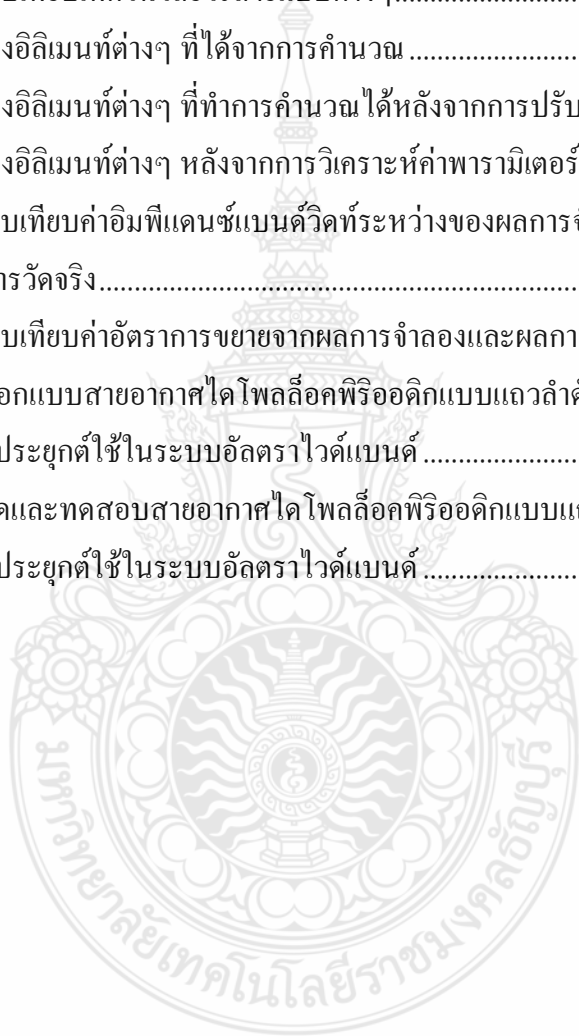
	หน้า
2.3.7 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance).....	34
2.3.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth).....	34
2.3.9 โพลาริซ (Polarization).....	35
2.3.10 ตัวประกอบการสูญเสียจากโพลาริซ	37
2.4 หลักการพื้นฐานของอัลตราไวด์แบนด์.....	38
2.4.1 นิยามของระบบอัลตราไวด์แบนด์	38
2.4.2 คุณสมบัติของระบบอัลตราไวด์แบนด์	39
2.4.3 ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์	40
2.4.4 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	41
2.4.5 คุณลักษณะเด่นของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์	42
2.5 มาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย	44
2.5.1 มาตรฐาน IEEE 802.11	44
2.5.2 มาตรฐาน IEEE 802.16	45
2.5.3 มาตรฐาน IEEE 802.15	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 การออกแบบและแนวทางการพัฒนาสายอากาศ.....	47
3.1.1 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ.....	47
3.1.2 การออกแบบขนาดของสายนำสัญญาณ	48
3.1.3 การออกแบบขนาดของสายอากาศ	49
3.1.4 การออกแบบขนาดความยาวของอิลิเมนต์.....	51
3.1.5 การออกแบบขนาดความกว้างของอิลิเมนต์	52
3.1.6 การออกแบบระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์.....	54
3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อสายอากาศ	56
3.2.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของทุกอิลิเมนต์	56
3.2.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางความยาวของอิลิเมนต์	58
3.2.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางความกว้างของอิลิเมนต์	58
3.2.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางระยะห่างของอิลิเมนต์	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 การปรับโครงสร้างสายอากาศ.....	60
3.3 การวัดและทดสอบสายอากาศ.....	60
3.3.1 โครงสร้างของสายอากาศ.....	60
3.3.2 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	61
3.3.3 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR).....	62
3.3.4 การแผ่พลังงานของสายอากาศ	62
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	70
4.1 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ	70
4.1.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	71
4.1.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)	74
4.1.3 การวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance).....	75
4.1.4 การวัดทดสอบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay).....	76
4.1.5 การวัดทดสอบค่าอัตราขยาย.....	77
4.1.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	80
4.2 สรุปผลของการทดสอบวัดสายอากาศ.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	86
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	95
ภาคผนวก ค.....	102
ภาคผนวก ง	111
ประวัติผู้เขียน.....	125

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่างๆ.....	31
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีแบบต่างๆ.....	40
ตารางที่ 2.3 การแผ่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ FCC	41
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ.....	44
ตารางที่ 3.1 ขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ	55
ตารางที่ 3.2 ขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ ที่ทำการคำนวณได้หลังจากการปรับลดขนาด 27%	57
ตารางที่ 3.3 ขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ หลังจากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	61
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ระหว่างของผลการจำลอง..... กับผลการวัดจริง.....	73
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยายจากผลการจำลองและผลการวัดจริง.....	79
ตารางที่ 5.1 ผลการออกแบบสายอากาศไดโพลสี่คัพรีออดิกแบบแถวลำดับ	
สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์	85
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดและทดสอบสายอากาศไดโพลสี่คัพรีออดิกแบบแถวลำดับ	
สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์	86



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลล๊อคฟิรียอดิก.....	23
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Scaling และ Spacing factor.....	25
รูปที่ 2.3 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	30
รูปที่ 2.4 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ.....	32
รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ	32
รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและการโพลาไรซ์.....	35
รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในบ้านพักอาศัยหรือที่สำนักงาน	41
รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราไวด์แบนด์ในการหาตำแหน่งของวัตถุ.....	42
รูปที่ 2.9 ผลของปรากฏการณ์หลายเส้นทางต่อการสื่อสารความถี่แคบกับความถี่กว้าง	42
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ	55
รูปที่ 3.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio	56
รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบหลังการลดขนาดของทุกอิมิต.....	57
รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการวิเคราะห์	
ความยาวของทุกอิมิต.....	58
รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการวิเคราะห์	
ความกว้างของทุกอิมิต	59
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการวิเคราะห์ระยะห่างของ D4	59
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลล๊อคฟิรียอดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้.....	
ในระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	60
รูปที่ 3.8 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไดโพลล๊อคฟิรียอดิก	
แบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	61
รูปที่ 3.9 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง.....	62
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 1.8 GHz	63
รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 1.8 GHz	63
รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 2.45 GHz	64

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz	64
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 3.5 GHz	65
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 3.5 GHz	65
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 5.2 GHz	66
รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 5.2 GHz	66
รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 7 GHz	67
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 7 GHz	67
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 9 GHz	68
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 9 GHz	68
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ	
ที่ความถี่ 11 GHz	69
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 11 GHz	69
รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B	78
รูปที่ 4.2 สายอากาศไดโพลสี่อครีโอดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้	
ในระบบอัตราไวต์แบนด์.....	79
รูปที่ 4.3 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	79
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับระหว่าง	
ผลการจำลองกับผลการวัดจริง.....	80
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR).....	82
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดจริง	82
รูปที่ 4.7 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ	83
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ	84
รูปที่ 4.9 วิธีวัดค่าประวิงกลุ่มของสายอากาศ	84

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ผลการวัดค่าประวิงกลุ่มของสายอากาศ.....	85
รูปที่ 4.11 การวัดทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	85
รูปที่ 4.12 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	86
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบอัตราขยายจากผลการจำลองและผลการวัดจริง.....	87
รูปที่ 4.14 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศ.....	88
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 1.8 GHz.....	89
รูปที่ 4.16 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 2.45 GHz.....	89
รูปที่ 4.17 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 3.5 GHz.....	89
รูปที่ 4.18 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 5.2 GHz.....	90
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 7 GHz.....	90
รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 9 GHz.....	90
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 11 GHz.....	91
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับ.....	
สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	84
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดและทดสอบสายอากาศ.....	
ของค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ.....	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c	Wave velocity
C	Capacitor
cm	Centimeter
D	Distance
dB	Decibel
dB _i	Decibel Isotropic
dB _m	Decibel mill watt
E	Electric field
f	Frequency
f _c	Frequency center
f _h	High Frequency
f _l	Low Frequency
GHz	Giga Hertz
h	Thickness of substrate
H	Magnetic field
kbsp	Kilobit Per Second
kV	Kilovolt
L	Long
m	Metter
Mbps	Mega Bit Per Second
MHz	Mega Hertz
mm	Millimeter
mp3	MPEG Audio Layer3
mW	Mill watt
Q	Quality Factor
R	Radiating
r	Radius

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Rx	Receiver
S_{11}, S_{22}	Reflection coefficient
S_{21}, S_{12}	Transmission coefficient
SNR	Signal to Noise Ratio
SVD	Singular Value Decomposition
t	Thickness of microstrip
Tx	Transceiver
uW	Microwatt
V_p	Phase Velocity
W	Wide
\vec{E}	Electric field vector
\vec{H}	Magnetic field vector
V_p	Phase velocity
Z_0	Characteristic impedance
Z_{in}	Input impedance
α_m	Metallic attenuation constant
α_d	Dielectric loss
β	Radiation characteristic
γ	Propagation constant
ϵ	Absolute permittivity
ϵ_r	Relative dielectric constant
ϵ_{eff}	Effective dielectric constant
η	Intrinsic impedance
λ_0	Wavelength of free space
λ_g	Wavelength of material
σ	Electric conductivity
ω	Angular frequency

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ADC	Analog to Digital Converter
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BW	Bandwidth
CCK	Complementary Code Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CST	Computer Simulation Technology
DCS	Digital Cellular System
DSS	Direct-sequence Spread Spectrum
DVD	Digital Versatile Disc
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EV-DO	Evolution-Data Optimized
FAA	Federal Aviation Administration
FCC	Federal Communication Commission
FNBW	First null beam width
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
HPBW	Half-power beam width
HSPDA	High Speed Downlink Packet Access
IE3D	Integral Equation Three Dimensional
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT2000	International Mobile Telecommunications for the year 2000
ISM	Industrial Scientific and Medical

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NLOS	Non-Line-of-Sight
NOI	Notice of inquiry
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAN	Personal area network
PDC	Personal Digital Communication
PHS	Personal Handset System
PPM	Pulse Position Modulation
QAM	Quadrature amplitude modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
Radar	Radio detection and ranging
RF	Radio Frequency
SNR	Signal to Noise Ratio
SVD	Singular Value Decomposition
TEM	Transverse Electric-Magnetic
TM	Transverse Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
UWB	Ultra-Wideband
VSWR	Standing Wave Ratio Voltage
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทนี้ประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะได้นำเสนอดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless communication System) ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เพราะสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้ทุกที่ทุกเวลา ซึ่งหลักการที่ผู้ใช้ต้องการเชื่อมต่อสื่อสารได้ตลอดเวลาเป็นปัจจัยที่ช่วยผลักดันให้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงอุปกรณ์ในการรับและส่งคลื่นวิทยุในการสื่อสารแบบไร้สายนั้น สายอากาศนับเป็นอุปกรณ์หลักที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากสายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งหลักการทำงานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายจะมีกระบวนการตั้งแต่สายอากาศภาคส่งจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ด้วยวิธีการเหนี่ยวนำกระแสให้กลายเป็นคลื่นวิทยุ (Radio Wave) แล้วส่งผ่านอากาศไปยังเครื่องรับ โดยสายอากาศภาครับจะรับคลื่นวิทยุเข้ามาแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนนำส่งไปยังภาคอื่นต่อไป

สายอากาศมีอยู่หลายประเภท และสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิก (Log - Periodic Dipole, LPD Antenna) ก็เป็นสายอากาศที่มีความนิยมใช้อีกโครงสร้างหนึ่ง เนื่องจากมีช่วงการตอบสนองความถี่กว้าง อีกทั้งยังมีอัตราขยายสูง และมีความถี่ที่ไม่ขึ้นกับการใช้งาน จึงเป็นที่นิยมในงานสื่อสารที่ต้องใช้ความถี่กว้าง และเป็นสายอากาศที่น่าสนใจเพื่อนำมาใช้ในงานในยุคของการสื่อสารแบบไร้สาย

โดยวิทยานิพนธ์นี้สนใจการออกแบบสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา มีการออกแบบสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกเพื่อนำมาใช้กับการติดต่อสื่อสารไร้สายเฉพาะบางช่วงความถี่เท่านั้น ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนางานวิจัยเดิมให้สามารถใช้งานในช่วงความถี่แถบกว้างและระบุทิศทางเพื่อรองรับการใช้งานด้านการติดต่อสื่อสารได้หลายรูปแบบในปัจจุบัน

จากปัญหาข้างต้นจึงได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ พัฒนา ออกแบบสายอากาศไดโพล ล็อกพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ มีการใช้เทคนิค การวิเคราะห์เชิงประสพการณ์ร่วมกับการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดย โปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio เพื่อให้ได้สายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกที่มีการแผ่กระจายคลื่นแบบทิศทาง เดียว มีผลตอบสนองของค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) อัตราการขยาย (Gain) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Pattern) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) และ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิก
- 1.2.2 ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ขนาดของแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิก
- 1.2.3 ศึกษาทฤษฎีการใช้โปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio
- 1.2.4 ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกและการใช้โปรแกรม จำลองแบบ CST Microwave Studio เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกแบบแถว ลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 โดยใช้ เทคนิคการวิเคราะห์เชิงประสพการณ์เพื่อประยุกต์ใช้งานระบบอัลตราไวด์แบนด์
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลล็อกพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ในช่วงความถี่ 1.8 GHz – 12 GHz
- 1.3.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้องมีลักษณะเป็นการแผ่เป็นแบบทิศทางเดียว บีมวิดธ์ไม่ต่ำกว่า 30 องศา มีอัตราการขยายไม่ต่ำกว่า 3 dBi และมีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม
- 1.3.4 วิเคราะห์ผลคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองแบบด้วย โปรแกรมจำลอง แบบ CST Microwave Studio เปรียบเทียบกับผลการวัดจริง

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติของการออกแบบสายอากาศไดโพลล้อยอกพรีออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง

1.4.3 ศึกษาการออกแบบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงประสพการณ์เพื่อให้ได้สายอากาศล้อยอกพรีออดิกที่มีประสิทธิภาพเหมาะสม

1.4.4 ทำการออกแบบสายอากาศต้นแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานระบบอัลตราไวด์แบนด์

1.4.5 ทำการวิเคราะห์สัญญาณจากการจำลองแบบด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio

1.4.6 ทำการสร้างสายอากาศจากผลการจำลองแบบที่สามารถใช้งานได้ทางปฏิบัติ

1.4.7 เปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากการวัดทดสอบจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

1.4.8 วิเคราะห์ผลการวัด การจำลองแบบและสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลล้อยอกพรีออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

1.5.2 มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ

1.5.3 สามารถพัฒนาสายอากาศไดโพลล้อยอกพรีออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศไดโพลล้อยอกพริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ รวมถึงไปถึงทฤษฎีของสายอากาศ พารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ ของสายอากาศ หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และมาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษางานวิจัยสายอากาศไดโพลล้อยอกพริออดิกแบบแถวลำดับพบว่าสายอากาศไดโพลล้อยอกพริออดิกเป็นสายอากาศที่มีช่วงการตอบสนองความถี่กว้างอีกทั้งมีอัตราการขยายสูง และมีความถี่ที่ไม่ขึ้นกับการใช้งาน จึงเป็นที่นิยมในงานสื่อสารที่ต้องใช้ความถี่กว้าง และเป็นสายอากาศที่น่าศึกษาเพื่อนำมาใช้ในงานในยุคของการสื่อสารแบบไร้สาย แต่งานวิจัยส่วนมากจะนำเสนอสายอากาศไดโพลล้อยอกพริออดิกที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสายอากาศมีขนาดเท่ากับ $2.4 \times 0.756 \times 0.76$ เมตร มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตอบสนองย่านความถี่ 200 MHz – 2 GHz มีอัตราการขยาย 8.3 dBi ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ และใช้เทคนิคการลดขนาดลงเพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานจริง [1, 2] สายอากาศมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ $7.5 \times 90 \times 217$ มิลลิเมตร ใช้เทคนิค Time - Reversal ในการออกแบบ ทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 93% มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตอบสนองย่านความถี่ 3 GHz – 10 GHz ตอบสนองย่านความถี่แถบกว้าง (UWB) [3] สายอากาศมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 100×130 มิลลิเมตร มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตอบสนองย่านความถี่ 1.1 GHz – 13.8 GHz ตอบสนองย่านความถี่ GPS, IMT-2000, PCS, WLAN, Bluetooth, X-Band, WiMAX และ UWB มีอัตราการขยาย 5.2 dBi [4] สายอากาศมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 160×150 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีขนาด มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตอบสนองย่านความถี่ 800 MHz – 2.5 GHz มีอัตราการขยาย 6.5 dBi รองรับระบบ GSM, Mobile, WIFI, 3G และ WLAN [5] สายอากาศขนาด 350.68×200 มิลลิเมตร ตอบสนองที่ย่านความถี่ 1 – 18 GHz โดยมีเสาอากาศสูง 1.2 เมตร และอัตราขยายเฉลี่ย 17.4 dBi [6]

ในงานวิจัยสายอากาศไดโพลล้อยอกพริออดิก [7, 8] ใช้เทคนิคการลดขนาดของสายอากาศลง 27% ลดขนาดความกว้างและความยาวลง 20% และใช้เทคนิคการเจาะร่องบริเวณส่วนปลายของสายนำสัญญาณ ทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดประมาณ 300×100 มิลลิเมตร และมีค่าการสูญเสียเนื่องจาก

การย้อนกลับตอบสนองที่ช่วงความถี่ 0.55 - 9 GHz และในส่วนของการใช้เทคนิคการปรับขนาดของสายนำสัญญาณด้านความกว้าง 37% จากการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพฟูรีเยร์ โดยมีอัตราเฉลี่ย 7 dBi และมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตอบสนองย่านความถี่ 2 - 4 GHz [9, 10] ซึ่งอีกงานวิจัยหนึ่งได้นำเสนอทฤษฎี Fractal เพื่อลดขนาดความยาวของสายอากาศและใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2016 วัดผลการจำลองของสายอากาศ ซึ่งได้สายอากาศที่ตอบสนองที่ช่วงความถี่ 0.9 - 2.4 GHz และมีอัตราขยายเฉลี่ย 5 dBi รองรับการทำงานระบบ GSM, GPS, 3G, Bluetooth และ Wi-Fi [11]

และจากการศึกษาการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ τ และ σ ซึ่งจากผลการทดลองสรุปว่าค่าพารามิเตอร์ $\tau = 0.90$, $\sigma = 0.166$ เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดตอบสนองที่ช่วงความถี่ 4.835 – 7.44 GHz [12] และการออกแบบสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิก ซึ่งประกอบด้วยจำนวนของอิลิเมนต์และขนาดของสายนำสัญญาณ L, W เพื่อรองรับการใช้งานระบบอัลตราไวด์แบนด์ [13]

2.2 ทฤษฎีของสายอากาศ

2.2.1 ไดโพล (Dipole antenna)

สายอากาศแบบไดโพล ถือเป็นต้นแบบของสายอากาศแบบมาตรฐานที่นำไปประยุกต์เพื่อสร้างสายอากาศในลักษณะอื่นๆ ซึ่งสายอากาศประกอบไปด้วยลวดตัวนำเป็นท่อนหรือกลวงก็ได้ ทำหน้าที่เปรียบเสมือนวงจรไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออยู่ ซึ่งลวดตัวนำอาจเป็นเส้นตรงหรือโค้งงอก็ได้แล้วแต่ชนิดของสายอากาศ และเมื่อใดที่เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดการแกว่ง และทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยปกติเราจะใช้สายอากาศทำหน้าที่ได้ทั้งภาคส่งและภาครับ โดยสายอากาศจะมีขนาดความยาวเท่ากับความยาวคลื่น 1λ (แลมด้า Lambda) โดยสำหรับการแผ่กระจายหรือรับคลื่นของสายอากาศนั้น จะเกิดการหักล้างกันน้อยมาก และสามารถส่งออกอากาศได้มาก โดยมีสนามแม่เหล็กจะกระจายไปรอบๆ ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นออกได้เต็มที่

การหาความยาวคลื่น

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

เมื่อ

v = ค่าคงที่ของความเร็วแสง 3×10^8 s/m

f = ความถี่

2.2.2 สายอากาศแบบแถวลำดับ (Antenna Array)

สายอากาศแบบแถวลำดับ คือการนำเอาสายอากาศหลายๆ ตัวมาจัดวางเรียงต่อกัน โดยมีระยะห่างที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้นจะเรียกว่า องค์ประกอบ (Element) ซึ่งการนำเอาแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จะส่งผลให้ได้ สมรรถนะที่คล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การนำสายอากาศมา จัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นจะขจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆ อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่ของ สายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงต่อกันเป็นแถวลำดับจะทำให้สามารถเพิ่มค่าการ แผ่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถว ลำดับยังสามารถปรับขนาดของเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบได้อีก ด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการได้

การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับสามารถแบ่งตามรูปร่างได้หลายประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบจำนวนมากอย่างสมมาตร เมื่อ เทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากัน หรือไม่เท่ากันก็ได้ และประเภทต่อไปคือ แถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) เป็นการจัดเรียง องค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้ อาจจัดเรียงใน ลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม

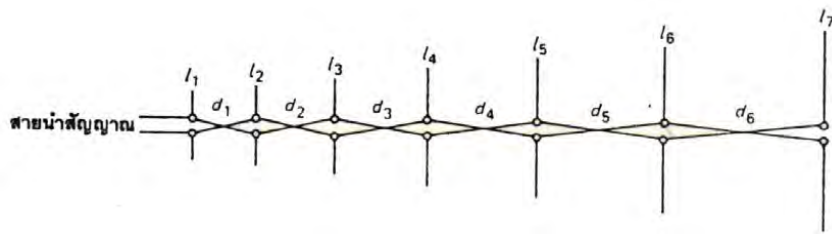
2.2.3 สายอากาศลือคพิริออติก (Log – Periodic Antenna)

สายอากาศลือคพิริออติกเป็นสายอากาศที่ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย ซึ่งเป็นที่ นิยมนำมาใช้แทนสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนในย่านความถี่ HF และข้อดีอีกข้อหนึ่งคือ สายอากาศแบบลือคพิริออติก จัดเป็นแอนไทร์อาร์เรย์ในแบบที่ใช้งานในช่วงความถี่กว้าง และมีแบบ รูปการแผ่กระจายคลื่นด้านหลังหรือด้านข้างน้อยมาก

อาร์เรย์แบบแอนไทร์ หมายถึง อาร์เรย์แบบเส้นตรงและมีทิศทางการแผ่กระจายของ คลื่นสูงสุดในทิศทางตามแกนของอาร์เรย์ อาจจะเป็นแบบไบโคเร็คชันแนล หรือยูนิโคเร็คชันแนลก็ได้ และมีการวางอิมเม้นท์ที่ขนานกัน

ทฤษฎีเบื้องต้น โครงสร้างของ (Log-periodic dipole antenna) หรือ LPDA ความยาว I_1, I_2, I_3 และต่อไป ของไดโพลจะเพิ่มขนาดจากซ้ายไปขวา โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$I_2 / I_1 = I_3 / I_2 = I_4 / I_3 = I_5 / I_4 = I_6 / I_5 = I_7 / I_6 \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลลอคพิริออดิก [16]

อัตราส่วนคงที่ในการออกแบบแทนด้วยสัญลักษณ์ τ ส่วนระยะห่าง d_1, d_2, d_3, d_4 จนถึง d_6 มีค่าเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวาเช่นกัน การใช้ที่ความถี่ใดๆ ภายในความถี่ของสายอากาศนี้จะมีเพียงสองหรือสาม ไดโพลเท่านั้นที่มีลักษณะใกล้เคียงโรซแนนซ์ ซึ่งจะมีความยาวประมาณ $\lambda/2$ โดยไดโพลส่วนนี้จะมีกระแสอินพุทที่สูงที่สุด และแพร่คลื่นออกมาในปริมาณมาก จากที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่าเป็นอาร์เรย์แบบเอนไพร์ จึงทำให้การแพร่กระจายทิศทางของโลบชี้จากอิลิเมนต์ที่ยาวที่สุดไปยังอิลิเมนต์ที่สั้นที่สุด และในขณะเดียวกัน ไดโพลที่เหลือซึ่งยาวหรือสั้นกว่า $\lambda/2$ จะมีการแพร่กระจายคลื่นเพียงเล็กน้อย [8]

โดยอิลิเมนต์ต่างๆ ของสายอากาศมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{1}{\tau} \quad (2.3)$$

$$\frac{d_n}{4l_{n+1}} = \frac{R_{n+1} - R_n}{2l_{n+1}} = \sigma \quad (2.4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] \quad (2.5)$$

$$2^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$$

เมื่อ

τ = Scaling factor

σ = Spacing factor

จากสมการที่ (2.4) - (2.6) จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาจากอิลิเมนต์ที่สั้นที่สุดจะได้รับความยาวของแต่ละอิลิเมนต์ และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์จะเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนคงที่ เมื่อค่า n เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะการป้อนสัญญาณเข้าสายอากาศแบบลอคพิริออดิกจะเป็นแบบ Crisscross Connection ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการทำให้กระแสที่ไหลในอิลิเมนต์ที่ติดกันมีเฟสตรงข้ามกัน จึงทำให้เกิดความสมดุล โดยการป้อนสัญญาณจะป้อนเข้าด้านที่มีอิลิเมนต์สั้นที่สุด เมื่อมีพลังงานที่ความถี่หนึ่งๆ เคลื่อนที่ไปตามสายนำสัญญาณ หรือ Feeder จนกระทั่งถึงส่วนที่ความยาวของอิลิเมนต์และเฟสมีความสัมพันธ์กัน ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นขึ้น ซึ่งบริเวณที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น (Radiation) นี้เรียกว่า Active region โดยความถี่หนึ่งๆ Active region จะเกิดขึ้นบริเวณใดบริเวณหนึ่ง

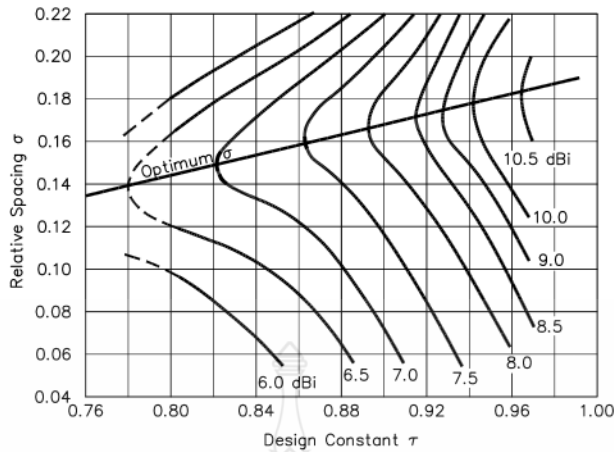
- 1) ถ้าความถี่ต่ำๆ Active region จะเกิดด้านที่มีอิลิเมนต์ยาว
- 2) เมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้น Active region ก็จะเลื่อนมาทางด้านอิลิเมนต์ที่สั้นกว่า จนถึงอิลิเมนต์ที่สั้นที่สุด

คือ ที่ความถี่ใช้งานสูงสุด และเหนือ Active region ขึ้นไปจะมีการแพร่กระจายคลื่นที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับบริเวณ Active region คลื่น หรือ Beam ที่ Radiate จาก Active region จะมีทิศทางชี้ไปทางด้านที่มีอิลิเมนต์สั้นเสมอ หรืออาจกล่าวได้ว่า Beam จะมีทิศทางในการ Radiate ไปทางอิลิเมนต์ที่มีความยาวน้อยกว่า $\lambda/2$ ที่ความถี่ใช้งานหนึ่งๆ จึงจัดได้ว่าสายอากาศแบบ LPD เป็นสายอากาศแบบแบ็คไฟร์ (Backfire Antenna) คือสายอากาศที่มีการ Radiation pattern ย้อนกลับไปทางด้านที่มีการ Feed สัญญาณเข้ามา [17]

ทำนองเดียวกันถ้าช่วงความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนไป ค่า $\lambda/2$ ย่อมเปลี่ยนตามทำให้ไดโพลที่มีค่าใกล้เคียง $\lambda/2$ มีการแพร่กระจายคลื่นออกมาสูง จะส่งผลให้ไดโพลที่เหลือจะแพร่กระจายคลื่นออกมาได้น้อยมาก ด้วยคุณสมบัตินี้เองที่ทำให้สายอากาศลอคพิริออดิกใช้งานได้ในช่วงความถี่กว้าง

2.2.4 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบลอคพิริออดิกเพื่อใช้งานจริง

ในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบลอคพิริออดิกนั้นต้องพิจารณาข้อกำหนดของสายอากาศ เพื่อให้ใช้งานได้ดีขึ้นโดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีส่วนในการประกอบสายอากาศอันได้แก่ ค่า τ (Scaling factor) และ σ (Spacing factor) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของสายอากาศและยังมีผลต่อมุมที่ทำกับแนวระนาบของสายอากาศ อาจทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ซึ่งจะทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ปัญหาในการเลือกค่า τ คือถ้าเลือกค่าที่ใกล้เคียงกับ 1.0 จะทำให้ได้อัตราขยายสูงแต่จำนวนของตัวประกอบ (Element) บนสายอากาศก็จะมีมากขึ้น แต่ถ้าหากเลือกค่าที่ต่ำเกินไปคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศก็มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้มาก



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Scaling factor และ Spacing factor [14]

สำหรับค่าคงที่ σ ก็ต้องพิจารณาเช่นเดียวกับ τ เพื่อให้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม พบว่าหากมีค่ามากเกินไปจะทำให้อัตราขยายต่ำลง นอกจากนี้จะพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งสองแล้วยังต้องพิจารณาถึงแบนด์วิดท์ เพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติสม่ำเสมอในความถี่ที่ต้องการใช้งาน ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่ออกแบบต้องมากกว่าแบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งานเสมอ แบนด์วิดท์ที่ทำการออกแบบหรือแบนด์วิดท์ที่ได้จากโครงสร้างนั้น คือช่วงความถี่ที่สายอากาศไดโพลตัวที่ยาวที่สุด และตัวที่สั้นที่สุดมีความยาวเป็น $1/2$ ของความยาวคลื่น

Carrel [18] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ที่ทำการออกแบบกับแบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งาน โดยนำแบนด์วิดท์ของบริเวณแอคทีฟ (Active region) คูณเข้าไปดังสมการที่ (2.6)

$$B_s = B \times B_a \quad (2.6)$$

เมื่อ

B_s คือ แบนด์วิดท์ที่ทำการออกแบบ

B คือ แบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งาน

B_a คือ แบนด์วิดท์ที่เป็นบริเวณแอคทีฟ

Carrel ได้นำผลการทดลองมาจัดความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของบริเวณแอคทีฟและค่าคงที่ของโครงสร้างซึ่งได้ผลตามสมการที่ (2.7) - (2.8) ดังนี้คือ

$$B_a = 1.1 + 7.7 (1-\tau)^2 \cot \alpha \quad (2.7)$$

จะได้

$$B_s = B [1.1 + 7.7 (1-\tau)^2 \cot \alpha] \quad (2.8)$$

สำหรับจำนวนตัวประกอบนั้น จะหาได้จากแบนด์วิดท์ที่ทำการออกแบบเป็นไปตามสมการที่ (2.10)

$$N = 1 + \left[\frac{\log B_s}{\log \left(\frac{1}{\tau} \right)} \right] \quad (2.9)$$

และความยาวของสายอากาศ (ความยาวของบูม) เป็นไปตามสมการที่ (2.10) - (2.11)

$$L = \frac{\lambda_{\max}}{4} \left(1 - \frac{1}{B_s} \right) \cot \alpha \quad (2.10)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} \quad (2.11)$$

ที่กล่าวมาเป็นการกำหนดค่าของ τ , σ และ α จากแบนด์วิดท์ที่ถูกกำหนดมา นอกจากค่าคงที่นี้แล้วการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ Z_a ก็จัดว่าสำคัญเช่นเดียวกัน Carrel ได้เสนอวิธีกำหนดค่า Z_a เป็นไปตามสมการที่ (2.13) ดังนี้

$$Z_a = 120 \left[\ln \left(\frac{l_n}{a_n} \right) - 2.25 \right] \Omega \quad (2.12)$$

โดย

l_n คือ ความยาวของตัวประกอบที่ n

a_n คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวประกอบที่ n

2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.3.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11})

การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์ซึ่งกัน การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตช์ซึ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ โดยการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13)

$$S_{11} = -20\log_{10}|\Gamma| \text{ (dB)} \quad (2.13)$$

สำหรับการแมตช์ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่าไม่มีกำลังสะท้อนกลับ

2.3.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง หมายถึง ค่าอัตราส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของแรงดันหรือกระแสบนสายนำสัญญาณ [19] ดังสมการที่ (2.14)

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{|I_{\max}|}{|I_{\min}|} \quad (2.14)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน ยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.15)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (2.15)$$

เมื่อ

Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน

V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ

V_i คือ แรงดันตกกระทบ

Z_L คือ โหลดอิมพีแดนซ์

Z_o คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ในกรณีที่ต่อไว้ด้วยแมตช์ซึ่งโหลดนั้น ค่า VSWR เป็น 1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด

2.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสภาพเจาะจงทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่สภาพเจาะจงทิศทางแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้นการคิดอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศที่ภาคส่ง คือกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กตามทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง

สายอากาศอ้างอิงมักจะใช้เป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) หรือแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ มีการกระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศทางในปริมาณที่เท่ากัน และอัตราขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นจะมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อ (หาร) กำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดดังสมการที่ 2.16

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$U(\theta, \phi)$ คือ ความแรงของการแพร่กระจายคลื่น

P_{in} คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

โดยทั่วไปอัตราขยายสัมพันธ์ เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางที่ป้อนเข้าสายอากาศ ทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย (G_g) ดังนั้น จึงได้ดังสมการที่ 2.17

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.17)$$

กำลังที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ดังสมการที่ 2.18

$$P_{rad} = e_t P_{in} \quad (2.18)$$

เมื่อ

e_t คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)

P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

ทำให้สมการที่ 2.18 และ 2.19 มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 2.20

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{[4\pi U(\theta, \phi)]}{P_{rad}} \quad (2.20)$$

และ มีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรกทิฟ ดังสมการที่ 2.21

$$G_g(\theta, \phi) = e_t D_g(\theta, \phi) \quad (2.21)$$

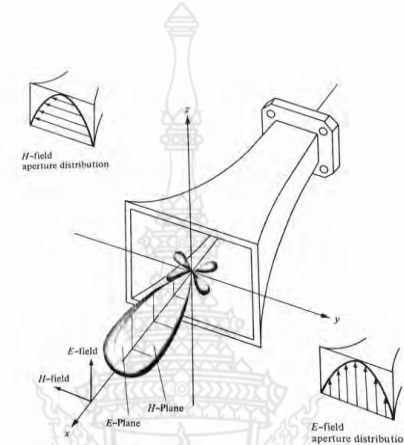
ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยาย (G_o) จะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี ดังสมการที่ 2.22

$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi)|_{\max} \\ &= e_t D_g(\theta, \phi)|_{\max} \\ &= e_t D_o \end{aligned} \quad (2.22)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงอัตราขยายหมายถึงอัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด ตามแสดง ดังสมการที่ 2.23

$$G_o = 10 \log_{10} [e_t D_o] \quad (2.23)$$

คุณสมบัติของสายอากาศในทอมของรูปแบบกระจายคลื่นหลัก (Principal pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly polarization) รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนรูปแบบกระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างแบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ดังรูปที่ 2.3 โดยมีระนาบ XZ เป็นระนาบ H หลัก



รูปที่ 2.3 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร [11]

ค่าอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปสามารถที่จะกำหนดค่าประสิทธิภาพของสายอากาศดังสมการที่ (2.24)

$$G = \eta D \quad (2.24)$$

เมื่อ

G คือ อัตราขยายของสายอากาศ

η คือ สภาวะการเจาะจงทิศทาง

D คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ในทางปฏิบัติการหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปนั้น จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.25) หรือ (2.26) ดังนี้

$$P_r = P_t + L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (2.25)$$

$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (2.26)$$

เมื่อ

- P_t คือ กำลังงานทางด้านส่ง (dBm)
- P_r คือ กำลังงานทางภาครับ
- L_{line} คือ กำลังงานที่สูญเสียในสายส่งทั้งด้านส่งและภาครับ
- L_f คือ กำลังงานที่สูญเสียในอากาศเท่ากับ $20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$
- G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาคส่ง
- G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาครับ

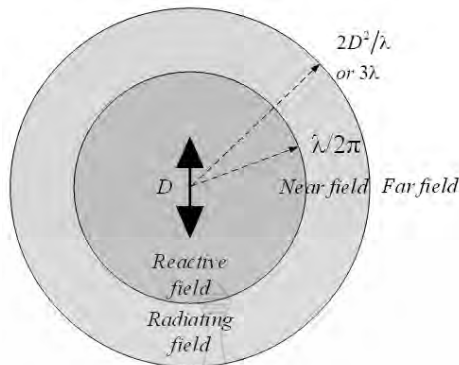
2.3.4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Wave radiation pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ตามพิกัดตำแหน่ง ซึ่งการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมี 3 ระยะ คือที่ระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near field) สนามการแผ่กระจายคลื่นระยะใกล้ (Radiating near field) และบริเวณการแผ่กระจายคลื่นสนามระยะไกล (Far-field) โดยแต่ละบริเวณจะพิจารณาจากระยะห่างจากสายอากาศออกไปรอบๆ เป็นรัศมีเท่าใด ซึ่งพิจารณาได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่างๆ

ขนาดของสายอากาศ (D)	$D \ll \lambda$	$D \approx \lambda$	$D \gg \lambda$
สนามรีแอกทีฟระยะใกล้	$r < \lambda/2\pi$	$r < \lambda/2\pi$	$r < \lambda/2\pi$
สนามการแผ่ระยะใกล้	$\lambda/2\pi < r < 3\pi$	$\lambda/2\pi < r < 3\lambda$ และ $2D^2/\lambda$	$\lambda/2\pi < r < 2D^2/\lambda$
สนามระยะไกล	$r > 3\lambda$	$r > 3\lambda$ และ $2D^2/\lambda$	$r > 2D^2/\lambda$

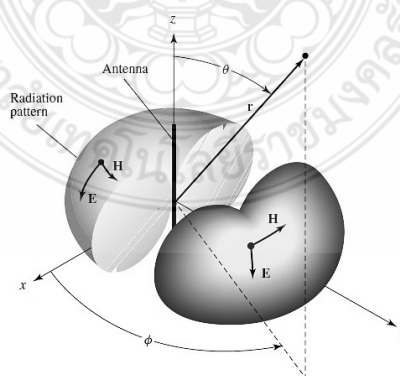
เมื่อ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ λ เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณา และ r เป็นรัศมีหรือระยะห่างจากสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงสนามแต่ละบริเวณจึงแสดงในรูปของการแผ่กระจายคลื่นในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของการสังเกตตลอดบริเวณรอบๆ สายอากาศ



รูปที่ 2.4 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ [19]

ดังนั้น เส้นการกวาดของการแผ่กระจายคลื่นที่ตำแหน่งรัศมีคงที่ และรอบสายอากาศ เรียกว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ในการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น สามารถแสดงได้ทั้งแบบสองมิติ และสามมิติ แต่มักนิยมรูปแบบสองมิติก็พอเพียงต่อการพิจารณา คุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ออกไปรอบตัวเท่ากันหมดหรือรอบทิศทางที่เท่ากันหมดเรียกว่า การแผ่กระจายกระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งเป็นแบบรูปในอุดมคติที่มีการพิจารณาจากสายอากาศไดโพลขนาดเล็กจิ๋ว ส่วนแบบรูปที่ได้จากสายอากาศไดโพลในอุดมคตินั้น จะเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional antenna) ดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ หากแบบรูปมีการเปลี่ยนหรือเบนไปก็จะพิจารณาแบบมีทิศทาง (Direction)



รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ [19]

2.3.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่างๆ หาได้จาก ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับจากการไม่แมตซ์ซึ่งระหว่างสายส่งกับสายอากาศ การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.27)

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.27)$$

เมื่อ

e_t คือ ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

e_r คือ $(1-|\Gamma|^2)$ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตซ์ซึ่ง

e_c คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ

e_d คือ ประสิทธิภาพของฉนวน (Dielectric)

โดยทั่วไป e_c และ e_d จะรวมเป็นตัวเดียวกันตามสมการที่ (2.28)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.28)$$

เมื่อ

R_r คือ ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

R_L คือ ความต้านทานที่โหลด

2.3.6 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

สภาพเจาะจงทิศทางเป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศเป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่พลังงานโดยเฉลี่ย เมื่อมีการแผ่พลังงานออกไปรอบทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน โดยไม่คิดกำลังส่วนที่สูญเสียไป ดังสมการที่ (2.29)

$$D = \frac{U}{U_t} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.29)$$

เมื่อ

D คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

U คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงาน

U_t คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงานเฉลี่ย

P_{rad} คือ กำลังงานที่สายอากาศแผ่ออกไป

ดีที่สุด

โดยทั่วไปไม่กำหนดทิศทางใช้สภาพเจาะจงทิศทางในทิศทางที่สายอากาศแผ่พลังงานได้

$$D_o = \frac{U_{\max}}{U_t} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.30)$$

2.3.7 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศที่ละน้อยเนื่องจากการต้านทานไหลของพลังงานที่เรียกว่า อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่ขั้วของสายอากาศ เรียกว่า อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Z_{in}) ดังสมการที่ (2.31)

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.31)$$

เมื่อ X_{in} คือความต้านทานเชิงจินตภาพที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานในบริเวณสนามใกล้สายอากาศโดยไม่แผ่กระจายออกไป และ R_{in} ประกอบด้วยสองส่วนคือ R_r หมายถึงความต้านทานพลังคลื่นที่แผ่ออกไปโดยสายอากาศ และ R_L หมายถึงความต้านทานที่ไหล ซึ่งรวมถึงความต้านทานจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความร้อน สารไดอิเล็กตริกและตัวนำ

2.3.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย $VSWR \cong 2$ หรือพิจารณาจากการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับย้อนกลับ (S_{11}) ที่ระดับ -10 dB ตามสมการดังนี้

$$BW = f_H - f_L \quad (2.32)$$

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L \quad (2.33)$$

$$BW_{\text{narrowband}} (\%) = \frac{f_H + f_L}{f_c} \times 100 \quad (2.34)$$

$$BW_{\text{broadband}} (\%) = \frac{f_H}{f_L} \times 100 \quad (2.35)$$

เมื่อ

BW คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

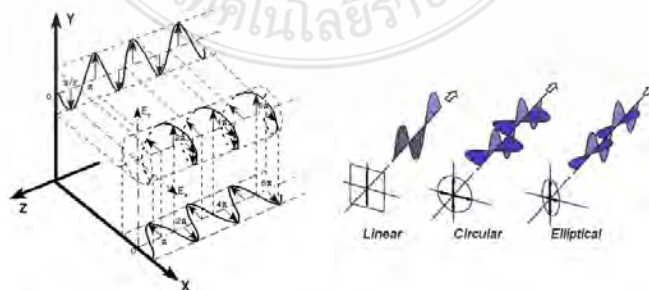
f_H คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่

f_L คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่

f_c คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

2.3.9 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่ออกจากสายอากาศ หมายถึง คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะอธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาจะยึดจุดสังเกตคงที่และมองเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป ดังนั้นโพลาริเซชันจึงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายเวกเตอร์สนามไฟฟ้า รูปทั่วไปของโพลาริเซชันมีอยู่ 3 แบบ คือ โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) และโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical polarization) โดยทิศทางหมุนของคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบวงกลมหรือวงรีนั้นอาจเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise : CW) หรือแบบทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise : CCW) ก็ได้ การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและโพลาริเซชันแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและการโพลาริเซชัน [19]

ดังนี้

ถ้าสมมติว่าคลื่นเคลื่อนที่ในทิศทาง $-z$ ดังนั้นสมการสนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้

$$E(z, t) = \hat{x} E_x(z, t) + \hat{y} E_y(z, t) \quad (2.36)$$

เมื่อองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และ y มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= \text{Re} \left[E_x^- e^{j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[E_{x0} e^{j(\omega t + kz + \phi_x)} \right] \\ &= E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} E_y(z, t) &= \text{Re} \left[E_y^- e^{j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[E_{y0} e^{j(\omega t + kz + \phi_y)} \right] \\ E &= E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \end{aligned} \quad (2.38)$$

เมื่อ E_{x0} และ E_{y0} เป็นขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าในแกน x และ y ตามลำดับ

1.) โพลาริซเซชันเชิงเส้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเมื่อความต่างเฟสขององค์ประกอบทั้งสองของสนามไฟฟ้าเป็นไปดังสมการที่ 2.39

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.39)$$

2.) โพลาริซเซชันแบบวงกลม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมเมื่อขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากัน นั่นก็คือ $E_{x0} = E_{y0}$ และค่าความต่างเฟสเป็นดังสมการที่ 2.40

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CW \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CCW \end{cases} \quad (2.40)$$

3) โพลาริซั่มแบบวงรี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีโพลาริซั่มแบบวงรี เมื่อขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าทั้งสองมีค่าต่างกัน นั่นก็คือ $E_{x0} \neq E_{y0}$ และค่าความต่างเฟสเป็นดังสมการที่ (2.41)

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CW \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CCW \end{cases} \quad (2.41)$$

หรือเมื่อความต่างเฟสของทั้งสององค์ประกอบมีค่าไม่เท่ากับจำนวนเท่าของ $\pi/2$ ดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi = \begin{cases} > 0 & CW \\ < 0 & CCW \end{cases} \quad (2.42)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

2.3.10 ตัวประกอบการสูญเสียจากโพลาริซั่ม [20]

โดยทั่วไปโพลาริซั่มของสายอากาศรับอาจจะมีการโพลาริซั่มที่แตกต่างกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับเข้ามาที่สายอากาศ ซึ่งเรียกว่า การไม่แมตซ์ของโพลาริซั่ม (Polarization mismatch) เป็นผลให้กำลังงานที่สายอากาศรับไปได้นั้นไม่ใช่ค่าสูงสุด กล่าวคือมีการสูญเสียกำลังงานขึ้นจากการไม่แมตซ์ของการโพลาริซั่ม ถ้าสมมติให้ค่าสนามไฟฟ้าที่เข้ามาที่สายอากาศรับมีค่าดังนี้

$$E_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.43)$$

เมื่อ $\hat{\rho}_w$ เป็นเวกเตอร์หน่วยของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และให้การโพลาริซั่มของคลื่นของสายอากาศรับเป็น

$$E_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.44)$$

เมื่อ $\hat{\rho}_a$ เป็นเวกเตอร์หน่วยของการโพลาไรซ์ของสายอากาศรับ ตัวประกอบของการสูญเสียจากการโพลาไรซ์ (Polarization loss factor) ซึ่งแสดงถึงค่าตัวประกอบการสูญเสียกำลังงานไปเนื่องจากการไม่แมตช์ของการโพลาไรซ์ จะนิยามได้ดังนี้

$$PLF = \left| \hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a \right|^2 \quad (2.45)$$

2.4 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

การสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra – wideband : UWB) นั้น จะใช้สัญญาณพัลส์วิทยุที่มีช่วงความกว้างของพัลส์ที่แคบมากในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้สัญญาณที่ส่งมีความกว้างแถบสัญญาณกว้างมาก ส่งผลให้มีความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก และทนทานต่อการถูกสัญญาณกวนหรือแจมมิง (Jamming)

2.4.1 นิยามของระบบอัลตราไวด์แบนด์

คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้ให้นิยามของระบบอัลตราไวด์แบนด์ เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ทั้งนี้หากเปรียบเทียบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับเทคโนโลยีแถบแคบแล้วจะพบว่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีแถบแคบทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ

ระบบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้เทคนิคการส่งคลื่นวิทยุในการติดต่อสื่อสาร โดยมีชื่อเรียกที่แตกต่างออกไปเช่น คลื่นวิทยุแบบอิมพัลส์ (Impulse radio) คลื่นพาหะแบบเสรี (Carrier-free radio) คลื่นวิทยุสัญญาณแถบความถี่ฐาน (Baseband radio) คลื่นวิทยุแบบโดเมนเวลา (Time domain radio) คลื่นวิทยุแบบไม่เป็นคลื่นไซน์ (Non-sinusoid radio) ฟังก์ชันวิทยุมุมฉาก (Orthogonal function radio) และคลื่นวิทยุที่มีแบนด์วิดท์กว้าง (Large relative bandwidth radio) ซึ่งความสัมพันธ์ของแบนด์วิดท์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.46) [22]

$$B_{f,3dB} = 2 \cdot \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \quad (2.46)$$

โดย f_h คือความถี่สูงสุดและ f_l คือความถี่ต่ำสุดของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งค่าความถี่สูงสุดและต่ำสุดของแถบความถี่นี้ได้พิจารณาจากตำแหน่งระดับต่ำสุดที่ -3 dB

ต่อมาในปีค.ศ. 2002 FCC ได้ขยายเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์เพิ่มอีก 20% และกำหนดตำแหน่งแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นที่ $B_{f,10dB}$ สำหรับการหาเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์และอัตราส่วนแบนด์วิดท์ในระบบอัลตราไวด์แบนด์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.47) และ (2.48) [22] ตามลำดับดังนี้

$$BW = \frac{f_h - f_l}{f_c} \times 100\% \quad (2.47)$$

$$BW = \frac{f_h}{f_l} : 1 \quad (2.48)$$

2.4.2 คุณสมบัติของระบบอัลตราไวด์แบนด์

จากคุณสมบัติต่างๆ ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ที่ได้กล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีความเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานในลักษณะของโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลแบบไร้สาย (WPAN) การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ในการรับส่งข้อมูลชนิดมัลติมีเดียที่มีขนาดใหญ่ซึ่งต้องการความเร็วสูงเช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ กล้องวิดีโอ กล้องถ่ายรูป เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีคุณสมบัติที่รองรับความต้องการดังกล่าวได้ เนื่องจากมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงถึง 480 Mb/s ในระยะทาง 2 m และ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 m และขนาดความจุของเทคโนโลยีแบบอัลตราไวด์แบนด์สามารถพิจารณาได้จากทฤษฎีของ Hartley-Shannon [22] ดังสมการที่ (2.49)

$$C_c = BW \log_2 (1 + SNR) \quad (2.49)$$

โดย

- C_c คือความจุของช่องสัญญาณสูงสุด (bit/s)
- BW คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ (Hz)
- SNR คืออัตราส่วนสัญญาณกำลังงานต่อสัญญาณรบกวน

ข้อแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และเทคโนโลยีแถบแคบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลักๆ คือ

- 1) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ใช้การส่งพัลส์ที่มีความกว้างแคบมาก โดยที่ไม่มี การมอดูเลตทางความถี่ของสัญญาณที่ต้องการส่งกับสัญญาณพาห์ ดังนั้นเครื่องรับและเครื่องส่ง

ในระบบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ จึงไม่มีภาคของการมอดูเลตสัญญาณเหมือนกับระบบเทคโนโลยีแถบแคบส่งผลให้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเทคโนโลยีแถบแคบมาก

2) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ได้ถูกกำหนดให้มีแบนด์วิดท์ (f_b) มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz [23] โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.50)

$$f_b = f_h - f_l \quad (2.50)$$

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีแบบต่างๆ [22]

เทคโนโลยี	ความเร็วของข้อมูล	ช่วงความถี่	การมอดูเลต	มาตรฐาน
UWB	≤ 500 Mbps	3.1-10.6 GHz	PPM, OFDM, CDMA...	IEEE 802.15.3a
Bluetooth	≤ 700 kbps	ISM 2.4 GHz	GMSK	IEEE 802.15.1
Wifi	≤ 54 Mbps	5 GHz	BPSK, 16-QAM, QPSK, 64-QAM	IEEE 802.11a
	≤ 11 Mbps	ISM 2.4 GHz	CCK, BPSQ, QPSK, DSS	IEEE802.11b
	≤ 54 Mbps	ISM 2.4G Hz	BPSK, 16-QAM, QPSK, 64-QAM, OFDM	IEEE 802.11g

2.4.3 ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์

ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์ในยุโรปนั้นปัจจุบันโครงสร้างของข้อกำหนดระบบอัลตราไวด์แบนด์อยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบกับระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ โดยบางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าทางสหรัฐอเมริกาเพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบต่อระบบเดิมที่มีอยู่ โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย International Telecommunication Union (ITU) หรือเป็น European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ดังในตารางที่ 2.3 [24] ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ใช้งานของระบบอัลตราไวด์แบนด์ระหว่าง FCC และ ETSI ทั้งภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ ITU

ความถี่ (GHz)	ภายในอาคาร (dBm)	ภายนอกอาคาร (dBm)
$f < 3.1$	$-51.3 + 87 \log(f/3.1)$	$-61.3 + 87 \log(f/3.1)$
$3.1 < f < 10.6$	-41.3	-41.3
$f > 10.6$	$-51.3 + 87 \log(10.6/f)$	$-61.3 + 87 \log(10.6/f)$

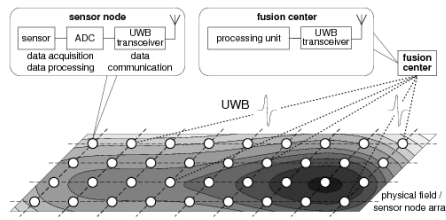
2.4.4 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราไวด์แบนด์

เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับคามนิยมสำหรับใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทไฮมอนด์เอนเตอร์เทนเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งในอนาคตการที่โทรศัพท์สามารถส่งรายการไปยังหน้าจอโทรทัศน์เครื่องอื่นๆ แบบไร้สายได้ที่ไม่มีปัญหาการกระตุกของสัญญาณภาพ การเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนภาพจากกล้องวิดีโอไปยังคอมพิวเตอร์แบบไร้สายและหากเป็นการใช้งานภายในสำนักงาน ระบบอัลตราไวด์แบนด์ก็จะเข้ามาช่วยลดความยุ่งยากในการติดตั้งสายเคเบิลต่างๆ ได้เป็นอย่างมาก [23]



รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในบ้านพักอาศัยหรือที่สำนักงาน [23]

นอกจากนี้ระบบอัลตราไวด์แบนด์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการค้นหาวัตถุ ดังในรูปที่ 2.8 ซึ่งให้ความแม่นยำในระดับเซนติเมตร สูงกว่าเทคโนโลยี GPS ที่ให้ความแม่นยำเพียงแค่หน่วยเมตรเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเครื่องเรดาร์ตรวจสอบได้ผิวดิน รวมไปถึงความสามารถในการจับภาพทะลุกำแพงที่อาจจะนำมาเป็นอุปกรณ์ของตำรวจที่ใช้ในการตรวจสอบก่อนเข้าจับกุมคนร้ายได้ [24]

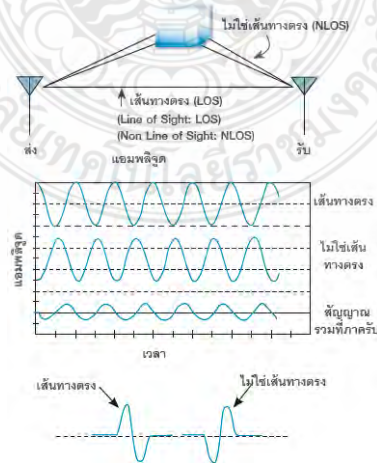


รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราไวด์แบนด์ในการหาตำแหน่งของวัตถุ [22]

2.4.5 คุณลักษณะเด่นของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์

การใช้สัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาของพัลส์แคบมากซึ่งใช้ในการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ ทำให้เกิดคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างจากการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ ดังนี้

1) มีความทนทานต่อปรากฏการณ์หลายเส้นทาง (Multipath phenomenon) เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการสื่อสารไร้สายที่สัญญาณคลื่นสามารถแพร่กระจายไปได้รอบทิศทาง ส่งผลให้สัญญาณการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะแบบแถบความถี่แคบ ที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การเดินทางของการกระจายคลื่นหลายเส้นทาง (Multipath radio propagation) ซึ่งสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์เป็นลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่แคบมาก เมื่อแพร่กระจายออกจากเครื่องส่งผ่านช่องสัญญาณหลายเส้นทางไปถึงเครื่องรับ จะทำให้ลูกพัลส์ลูกเดียวกันถูกแยกเป็นหลายพัลส์ โดยสัญญาณพัลส์หลายชุดที่เดินทางผ่านช่องสัญญาณมาถึงเครื่องรับจะมีโอกาสน้อยมากที่จะมีการคาบเกี่ยวกันทางเวลาหรือเกิดการรบกวนกันของพัลส์ เนื่องจากความกว้างทางเวลาของพัลส์มักจะใช้เวลาน้อยกว่าเวลาในการเดินทางผ่านช่องสัญญาณไร้สาย ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณจากปรากฏการณ์หลายเส้นทางน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลของปรากฏการณ์หลายเส้นทางต่อการสื่อสารความถี่แคบกับความถี่กว้าง [21]

2) ลดโอกาสในการถูกตรวจจับหรือดักสัญญาณ สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์นั้นยากต่อการตรวจจับและดักฟัง หากไม่ทราบว่าคุณลักษณะที่สัญญาณพัลส์นั้น จะถูกส่งมาที่เครื่องรับในช่วงเวลาใด ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับสัญญาณการแผ่สเปกตรัมที่ใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ คือหากไม่ทราบรหัสที่ใช้ในการกระจายคลื่นก็จะไม่สามารถทำการตรวจจับสัญญาณได้ และเนื่องจากการแพร่กระจายสัญญาณในช่วงของความถี่ที่กว้าง การทำการแจมมิ่ง (Jamming) สัญญาณในแถบความถี่ที่กว้างมากๆ นั้น จึงกระทำได้ง่าย ดังนั้นสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์จึงเหมาะสำหรับการสร้างระบบสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยต่อการแจมมิ่งหรือการถูกรบกวน

3) ความสามารถในการวัดพิสัยที่มีความเที่ยงตรงสูง ด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมาก ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่านาโนวินาที ทำให้สัญญาณของอัลตราไวด์แบนด์มีความละเอียดสูง (Very high resolution) ซึ่งความละเอียดดังกล่าวนี้เป็นคุณสมบัติที่นำมาใช้ในการวัดความแตกต่างของระยะทาง เช่น ในระบบเรดาร์เมื่อสัญญาณลูกคลื่นพัลส์ของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์สะท้อนกลับไปที่เครื่องรับก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางได้โดยการคำนวณจากสัญญาณพัลส์ที่ใช้เวลาในการเดินทางไปกลับ ได้อย่างเที่ยงตรงมาก

4) สามารถใช้แถบความถี่ทับซ้อนกับระบบอื่นได้ เนื่องด้วยระดับความหนาแน่นของระดับความแรงต่อความถี่ของสัญญาณมีค่าต่ำ (Low power spectral density) ทำให้ระบบสื่อสารที่ใช้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์สามารถทำงานทับซ้อนกับระบบสื่อสารแบบอื่นได้ เนื่องจากสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีการรบกวนต่อสัญญาณระบบอื่นต่ำ

5) การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการด้านการสื่อสาร หรือเอฟซีซี (FCC) ในเรื่องข้อจำกัดของกำลังส่ง ที่อนุญาตให้ใช้ได้ ส่งผลให้ระบบอัลตราไวด์แบนด์มีการใช้พลังงานที่ต่ำ เพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนระบบสื่อสารอื่น โดยระดับความแรงของสัญญาณเฉลี่ยอยู่ที่ระดับต่ำกว่า -40 dBm ต่อเมกกะเฮิรตซ์

6) ต้นทุนในการผลิตต่ำและลดความซับซ้อนในการสร้าง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการผสมสัญญาณ โดยการใช้สัญญาณคลื่นพาห์ ทำให้ภาคส่งและภาครับมีความซับซ้อนต่ำจึงทำให้มีราคาต้นทุนต่ำ

7) มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณผ่านวัตถุต่างๆ โดยการรวมสัญญาณคลื่นความถี่ต่ำในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมากของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ จึงทำให้สัญญาณสามารถทะลุผ่านวัตถุชนิดต่างๆ ได้ เช่น วัตถุที่ใช้ในการสร้างตึกและอาคาร หรือใต้ดินได้ดีกว่าระบบอื่น ที่จำเป็นต้องใช้สัญญาณที่มีความถี่สูงๆ เท่านั้น

2.5 มาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย

สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers เป็นสถาบันที่กำหนดมาตรฐานการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่สำคัญๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ

เทคโนโลยี	มาตรฐาน	เครือข่าย	อัตราความเร็ว	ระยะทาง	ความถี่
WiFi	IEEE802.11a	WLAN	สูงสุด 54 Mbps	100 m	5.1-5.2 GHz
	IEEE802.11b	WLAN	สูงสุด 11 Mbps	100 m	2.4-2.8 GHz
	IEEE802.11g	WLAN	สูงสุด 54 Mbps	100 m	2.4-2.8 GHz
	IEEE802.11n	WLAN	300-450 Mbps	70-250 m	2.4-5 GHz
WiMAX	IEEE802.16d	WMAN	สูงสุด 75 Mbps (20 MHz BW)	ปกติ 6.4-10 km	11 GHz
	IEEE802.16e	Mobile WMAN	สูงสุด 30 Mbps (10 MHz BW)	ปกติ 1.6-5 km	2-6 GHz
WCDMA/ UMTS	3G	WWAN	สูงสุด 2-10 Mbps (HSDPA)	ปกติ 1.6-8 km	1800,1900 2100 MHz
CDMA2001x EV-DO	3G	WWAN	สูงสุด 2.4 Mbps	ปกติ 1.6-8 km	400, 800,900,1700, 1800, 1900, 2100 MHz
EDGE	2.5G	WWAN	สูงสุด 348 kbps	ปกติ 1.6-8 km	2100 MHz
UWB	IEEE802.15.3a	WPAN	110-480 Mbps	10 m	7.5 GHz

2.5.1 มาตรฐาน IEEE 802.11

1) มาตรฐาน IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สาย เช่น สัญญาณอินฟราเรดหรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4-5 GHz

2) IEEE 802.11 b เป็นการส่งข้อมูลแบบไร้สาย โดยใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz ที่อัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่ 11 Mbps ซึ่งทำให้ส่งสัญญาณไปได้ไกลกว่า IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ที่ใช้ต่ำกว่า ซึ่งนิยมใช้กันเป็นอย่างมากในการสื่อสารแบบไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นวงการทหาร วงการอุตสาหกรรม วงการแพทย์ อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ ฯลฯ

3) IEEE 802.11g เป็นการติดต่อสื่อสารในระบบไร้สายที่นิยมการใช้งานอย่างแพร่หลายมากในปัจจุบันนี้ โดยใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลจะสูงกว่า IEEE 802.11b ที่ 54 Mbps ซึ่งใช้หลักการคือการเพิ่มเสาอากาศเข้าไปเพื่อเพิ่มระยะทางในการส่ง และเสาอากาศชนิด MIMO สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ในอัตรา 108 Mbps ถึง 240 Mbps

4) IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานของเครือข่ายไร้สายที่คาดการณ์ว่าจะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีอัตราความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลในระดับ 100 Mbps

2.5.2 มาตรฐาน IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานที่มีระยะทางการเชื่อมต่อในช่วงระยะสั้นๆ แค่ 1.6-4.8 Km เท่านั้น เป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุนการใช้งานในระดับสายตา หรือที่เรียกว่า Line of Sight (LoS) มีการใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 10-66 GHz

1) มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16a เป็นมาตรฐานที่แก้ไขข้อบกพร่องและปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิม โดยมีการปรับระดับความถี่ที่ใช้งานให้ครอบคลุมช่วงความถี่ 2 - 11 GHz และเพิ่มคุณสมบัติการรองรับระบบการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา Non Line of Sight (NLoS) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในส่วนของภาคขยายสัญญาณ เมื่อมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้น ตามสภาพแวดล้อมที่ขวางกั้น อาทิเช่น อาคาร ต้นไม้ ฯลฯ นอกจากนี้สามารถขยายระบบเครือข่ายและเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้กว้างกว่ามาตรฐานเดิม ด้วยรัศมีการทำงานที่ไกลเพิ่มขึ้นจากมาตรฐานแรกไปถึง 31 mile (ประมาณ 48-50 Km) และมีอัตราความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 Mbps ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายที่มีการใช้สายประเภทที่ 1 (T1-type) และการเชื่อมต่อแบบ ADSL : Asynchronous Digital Subscriber Line ตามที่פקอาศัยได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหาในการใช้งาน

2) มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาทุกประเภท เช่น สมาร์ทโฟน แล็ปท็อป เป็นต้น โดยมีรัศมีการทำงานที่ 1.6-4.8 Km มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานยังสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดี แม้ว่าจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา [24]

2.5.3 มาตรฐาน IEEE 802.15

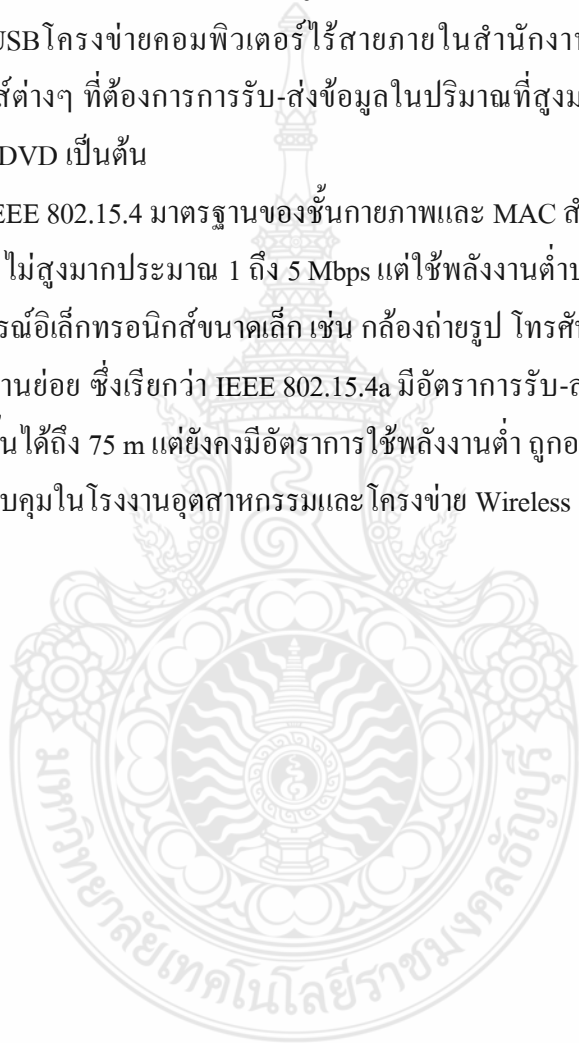
มาตรฐาน IEEE 802.15.3a Ultra - Wide Band (UWB) แบ่งออกเป็น 4 มาตรฐานได้แก่

1) IEEE 802.15.1 มาตรฐานชั้นกายภาพ (Physical layer) และ Media Access Control (MAC) สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบ Bluetooth

2) IEEE 802.15.1 การทำงานร่วมกันระหว่าง โครงข่าย WLAN กับ WPAN และระบบสื่อสารไร้สายอื่นๆ เช่น ระบบโทรศัพท์ CDMA GSM และ GPS เป็นต้น

3) IEEE 802.15.3 มาตรฐานของชั้นกายภาพและ MAC สำหรับโครงข่าย WPAN ที่มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลสูงมาก (11 Mbps ถึง 55 Mbps) ในระยะการรับ-ส่งข้อมูลไม่เกิน 20 m และมีการใช้พลังงานประมาณไม่เกิน 0.5 mW การประยุกต์ใช้โครงข่าย WPAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a นั้น คาดการณ์ว่าจะใช้กับโครงข่ายข้อมูลระยะใกล้ เช่น เป็นมาตรฐานของชั้นกายภาพและ MAC ของ Wireless USB โครงข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สายภายในสำนักงาน หรือที่พกพา หรือกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ต้องการการรับ-ส่งข้อมูลในปริมาณที่สูงมาก เช่น โทรศัพท์ที่มีความละเอียดสูง เครื่องเล่น DVD เป็นต้น

4) IEEE 802.15.4 มาตรฐานของชั้นกายภาพและ MAC สำหรับโครงข่าย WPAN ที่มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลไม่สูงมากประมาณ 1 ถึง 5 Mbps แต่ใช้พลังงานต่ำประมาณ 100 uW ซึ่งจะเป็นมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น กล้องถ่ายรูป โทรศัพท์มือถือ แลปท็อป เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานย่อย ซึ่งเรียกว่า IEEE 802.15.4a มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลไม่เกิน 1 Mbps แต่ระยะการส่งไกลมากขึ้นได้ถึง 75 m แต่ยังคงมีอัตราการใช้พลังงานต่ำ ถูกออกแบบสำหรับโครงข่ายไร้สายสำหรับอุปกรณ์ควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมและโครงข่าย Wireless sensor network



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงการดำเนินการ การออกแบบ การวิเคราะห์คุณลักษณะและรูปแบบ การวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลสี่อวกาศหรืออวกาศแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ โดยได้นำทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 มาเป็นแนวทางในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการออกแบบสร้างสายอากาศ โดยได้มีการนำซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และการออกแบบของสายอากาศที่ทำการสร้าง ซึ่งซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้คือ CST Microwave Studio ซึ่งซอฟต์แวร์ดังกล่าวมีฟังก์ชันที่สามารถวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ต่างๆ ออกมาได้อย่างครบถ้วน

3.1 การออกแบบและแนวทางการพัฒนาสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศไดโพลสี่อวกาศหรืออวกาศแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำแนวคิดและหลักการที่ผ่านมา มาประยุกต์ใช้งานสำหรับย่านความถี่แถบกว้างมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.8 GHz – 12 GHz ซึ่งสามารถรองรับมาตรฐาน ระบบ (Ultra-wideband, UWB) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3 a (3.1 GHz – 10.6 GHz), RFID (2.45 GHz และ 5.8 GHz) WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g (2.40 GHz – 2.82 GHz และ 5.1 GHz - 5.8 GHz) โดยทำการพัฒนาจากโครงสร้างของสายอากาศไดโพลสี่อวกาศหรืออวกาศแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ เพื่อขยายแบนด์วิดท์สำหรับการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้าง ได้การแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และได้โครงสร้างสายอากาศรูปแบบใหม่ โดยนำเทคนิคเชิงประสบการณ์มาใช้พัฒนาสายอากาศ โครงสร้างสายอากาศรูปแบบใหม่นี้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1.1 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ

หลังจากการจำลองแบบตามขั้นตอนข้างต้นแล้วจึงได้นำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไปสร้างชิ้นงานจริงแล้วนำไปทดสอบวัดค่าคุณลักษณะต่างๆ ต่อไป การออกแบบสายอากาศไดโพลสี่อวกาศหรืออวกาศแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ จะออกแบบบนโครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีคุณสมบัติดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	$\epsilon_r = 4.3$
ความหนาของวัสดุฐานรอง	$h = 0.8 \text{ mm.}$
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)	$\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m.}$
ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ	$t = 0.08 \text{ mm.}$

3.1.2 การออกแบบขนาดของสายนำสัญญาณ

สายอากาศสี่อศพิร็อคเป็นสายอากาศที่มีกราวด์ด้านหลัง โดยมีรูปร่างลักษณะอยู่ใน Planar Microstrip สามารถใช้สมการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยการคำนวณหาความกว้างของไมโครสตริปไลน์และค่าความยาวคลื่นบนไมโครสตริปในการป้อนสัญญาณ คำนวณได้ดังนี้

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (3.1)$$

คำนวณหาค่า A

$$A = 2\pi \frac{Z_o}{Z_f} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (3.2)$$

$$= 1.514$$

โดย

Z_f คือ อิมพีแดนซ์ในอากาศว่าง

$$= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376.8 \text{ โอห์ม}$$

μ_0 คือ Permeability in Vacuum $= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$

ϵ_0 คือ Permittivity in Vacuum $= 8.85418 \times 10^{-12} \text{ F / m}$

แทนค่า A

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$$

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{1.514}}{e^{(2 \times 1.514)} - 2} = 1.949$$

$$w = 1.488$$

ดังนั้น ค่าความกว้างของสายนำสัญญาณจะใช้ขนาด 1.488 มิลลิเมตร

3.1.3 การออกแบบขนาดของสายอากาศ

ในการออกแบบ โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศลวดหรืออดิกต้องพิจารณาข้อกำหนดของสายอากาศเพื่อให้ใช้งานได้ดีขึ้น โดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีส่วนในการประกอบสายอากาศ ได้แก่ ค่า τ (Scaling factor) และ σ (Spacing factor) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของสายอากาศและยังมีผลต่อการทำมุมกับแนวระนาบของสายอากาศ อาจทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ปัญหาในการเลือกค่า τ คือ ถ้าเลือกค่าใกล้เคียงกับ 1.0 จะทำให้ได้อัตราขยายสูงแต่จำนวนของตัวประกอบ (Element) บนสายอากาศมีมากขึ้น แต่ถ้าหากเลือกค่าที่ต่ำเกินไป คุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศก็มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้มาก

สำหรับค่าคงที่ σ ก็ต้องพิจารณาเช่นเดียวกับ τ เพื่อให้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม พบว่าหากมีค่ามากเกินไปจะทำให้อัตราขยายต่ำลง

นอกจากจะพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งสองแล้วยังพิจารณาถึงแบนด์วิดท์ เพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติสม่ำเสมอในความถี่ที่ต้องการใช้งาน ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่ออกแบบต้องมากกว่าแบนด์วิดท์ที่ต้องการเสมอ

τ คือ การปรับขนาดระยะห่าง (Scaling factor)

σ คือ ปัจจัยระยะห่าง (Spacing factor)

สายอากาศในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กเพื่อรองรับกับการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายขนาดพกพา และมีผลตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 1.8 – 12 GHz

และอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศตลอดย่านความถี่ใช้งานมีค่า 4 dBi เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ใน
ระบบอัลตราไวด์แบนด์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a จึงได้กำหนดค่า $\tau = 0.7$ และค่า $\sigma = 0.12$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1-\tau}{4\sigma} \right] \quad (3.3)$$

โดย

α คือ ค่ามุมของสายอากาศ (องศา)

จากนั้นทำการคำนวณหาค่า B_s , B และ B_a เพื่อแทนค่าลงในสมการ (3.4)

$$B_s = B \times B_a \quad (3.4)$$

แทนค่า

$$B = f_H / f_L = (12 \times 10^9 / 1.8 \times 10^9) = 6.67 \quad (3.5)$$

เมื่อ

f_H คือ ความถี่ที่สูงที่สุด

f_L คือ ความถี่ที่ต่ำที่สุด

หาค่า B_a จากสมการที่ (3.6)

$$B_a = 1.1 + 7.7(1-\tau)^2 (\cot \alpha) \quad (3.6)$$

เมื่อได้แบนด์วิดท์ที่ต้องการทำการออกแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ต้องคำนวณหาจำนวน
ของอิลิเมนต์ โดยการแทนค่า B_s ในสมการ (3.7)

$$N = 1 + \left[\frac{\log B_s}{\log \left(\frac{1}{\tau} \right)} \right] = 8.54 \quad (3.7)$$

ดังนั้นจำนวนอิลิเมนต์ที่ต้องใช้คือ 8 อิลิเมนต์

3.1.4 การออกแบบขนาดความยาวของอิลิเมนต์

การหาความยาวของอิลิเมนต์จำเป็นต้องทราบค่าความเร็ววิกฤต (v) เพื่อนำไปแทนค่าหาความยาวของอิลิเมนต์ สามารถคำนวณได้โดย

หาค่าความเร็วคลื่นในตัวกลาง

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} = 3.8 \times 10^{11} \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$c = 299,792,458,000 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right]$$

หาความยาวของอิลิเมนต์ สามารถหาค่าได้โดย

$$\frac{1}{\tau} = \frac{D_{n+1}}{D_n} = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{W_{n+1}}{W_n} \quad (3.9)$$

โดย

$$L_{n+1} = L_9 = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{f_{min}} \quad (3.10)$$

$$L_9 = \frac{3.80 \times 10^{11} / 1.8 \times 10^9}{2}$$

$$L_9 = 105.56 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาความยาวของแต่ละอิลิเมนต์ได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{1}{\tau} = \frac{L_{n+1}}{L_n} \quad (3.11)$$

หาค่า L_8

$$\frac{1}{0.7} = \frac{105.56}{L_8}$$

$$L_8 = 105.56 \times 0.7$$

$$L_8 = 73.89 \text{ มิลลิเมตร}$$

3.1.5 การออกแบบขนาดความกว้างของอิลิเมนต์

การคำนวณหาความกว้างของอิลิเมนต์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ ออกแบบสายอากาศ โดยใช้สมการเดียวกับสายอากาศลูปหรือดิกทั่วไป แต่มีการเปลี่ยนแปลงที่รัศมีของอิลิเมนต์ เป็นตัวแปร a แทน แล้วจึงสามารถนำไปหาความกว้างของอิลิเมนต์

คำนวณหาค่าตัวแปร a จากสมการ (3.12)

$$Z_a = 120 \left[\ln \left(\frac{l_n}{a_n} \right) - 2.25 \right] \Omega \quad (3.12)$$

$$\ln \frac{h}{a} = e^{\frac{50}{120} + 2.25} \quad (3.13)$$

$$\frac{h}{a} = 14.39 \Omega$$

แทนค่าตัวแปร h ซึ่งก็คือความยาวที่อิเลิเมนต์ที่ L_8 ลงสมการ จะได้

$$\frac{73.89}{a} = 14.39$$

$$a = 73.89 / 14.39$$

$$a = 5.134$$

คำนวณหาความกว้างอิเลิเมนต์โดยการแทนค่า a ลงในสมการดังต่อไปนี้

$$W_{n+1} = \pi \times a \quad (3.14)$$

$$W_{n+1} = W_9 = \pi \times 5.134$$

$$W_9 = 16.12 \text{ มิลลิเมตร}$$

สามารถคำนวณหาความกว้างของแต่ละอิเลิเมนต์ได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W_{n+1}}{W_n} \quad (3.15)$$

ดังนั้น ความกว้างที่ W_8 สามารถหาได้โดย

$$\frac{1}{0.7} = \frac{16.12}{W_8}$$

$$W_8 = 16.12 \times 0.7$$

$$W_8 = 11.28 \text{ มิลลิเมตร}$$

แทนค่าตัวแปรเดิมซ้ำจนครบทั้ง 8 อิเลิเมนต์ จะได้ค่าตามตารางที่ 3.1

3.1.6 การออกแบบระยะห่างระหว่างอิฐลิเมนต์

การคำนวณหาระยะห่างระหว่างอิฐลิเมนต์แต่ละตัว สามารถหาค่าได้โดย

$$\sigma = \frac{D_{n+1}}{4L_{n+1}} \quad (3.16)$$

จะได้

$$D_{n+1} = 4 \times L_{n+1} \times \sigma$$

$$D_{n+1} = D_9 = 4 \times 105.56 \times 0.12$$

$$D_9 = 50.66 \text{ มิลลิเมตร}$$

สามารถคำนวณหาความกว้างของแต่ละอิฐลิเมนต์ได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{1}{\tau} = \frac{D_{n+1}}{D_n}$$

(3.17)

ดังนั้น ความกว้างที่ D_8 สามารถหาได้โดย

$$\frac{1}{0.7} = \frac{50.66}{D_8}$$

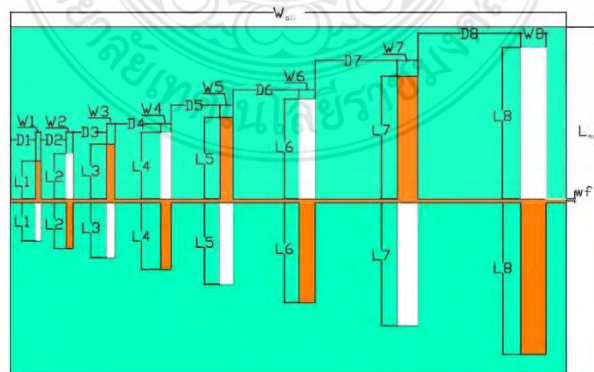
$$D_8 = 50.66 \times 0.7$$

$$D_8 = 35.46 \text{ มิลลิเมตร}$$

ตารางที่ 3.1 ขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ

ความกว้าง	ขนาด (mm.)	ความยาว	ขนาด (mm.)	ระยะห่าง	ขนาด (mm.)
W_1	3.03	L1	16.90	D1	8.33
W_2	3.74	L2	20.87	D2	10.28
W_3	4.62	L3	25.76	D3	12.69
W_4	5.70	L4	31.81	D4	15.67
W_5	7.04	L5	39.27	D5	19.35
W_6	8.69	L6	48.48	D6	23.89
W_7	10.72	L7	59.85	D7	29.49
W_8	13.24	L8	73.89	D8	36.41
W_{all}	270	L_{max}	200		
wf	1.488				

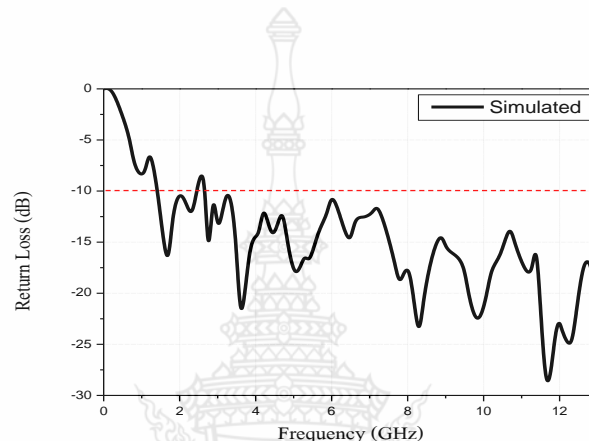
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่ ขนาดของสายนำสัญญาณเท่ากับ 1.488 ความยาวสูงสุดของอิลิเมนต์ไดโพล 73.89 mm. มีความกว้างมากที่สุดของอิลิเมนต์ไดโพลอยู่ที่ 13.24 mm. และมีระยะห่างของอิลิเมนต์ที่มากที่สุดเท่ากับ 36.41 mm. จึงส่งผลให้สายอากาศมีขนาดของวัสดุฐานรองชนิด FR4 เท่ากับ 270 x 200 mm. และได้ทำการสร้างแบบจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio ดังรูปที่ 3.1 ได้ทำการแทนวัสดุฐานรองด้วยสีเขียว สีส้มคือแทนอิลิเมนต์ไดโพลด้านหน้าและส่วนด้านหลังของอิลิเมนต์ไดโพลแทนด้วยสีขาว



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ

3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อสายอากาศ

จากการออกแบบและสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งทดสอบด้วยการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio ทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการข้างต้นนั้น เมื่อนำมาออกแบบสายอากาศแล้วผลการทำงานไม่ออกมาเป็นไปตามทฤษฎีเสมอไป และจากรูปที่ 3.1 จะสังเกตได้ว่าแสดงให้เห็นว่าขนาดของสายอากาศมีขนาดใหญ่เกินกว่าขนาดที่ต้องการไปมาก



รูปที่ 3.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio

และจากรูปที่ 3.2 แสดงผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio ซึ่งผลการจำลองแสดงการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่ไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.8 – 12 GHz ตามที่ต้องการ คิดจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ดังนั้นจึงทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับขนาดของสายอากาศโดยรวมก่อน เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการนำไปใช้งานในพื้นที่จำกัด และมีการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ตั้งแต่ 1.8 – 12 GHz ตรงตามขอบเขตที่ต้องการ จึงได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศในลำดับต่อไป

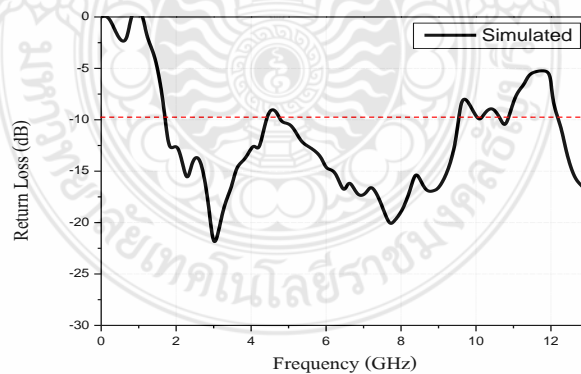
3.2.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของทุกอิลิเมนต์

เมื่อทำการออกแบบจากสมการ ขนาดของแต่ละอิลิเมนต์ย่อมส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศอย่างแน่นอน ซึ่งจากรูป 3.2 แสดงผลการจำลองสายอากาศจากโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio ที่ยังไม่ตอบสนองย่านความถี่ที่ต้องการ จึงมีการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อปรับลดขนาดต่างๆ ของอิลิเมนต์ลง 58% ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ ที่ทำการคำนวณได้หลังจากการปรับลดขนาด 27%

ความกว้าง	ขนาด (mm.)	ความยาว	ขนาด (mm.)	ระยะห่าง	ขนาด (mm.)
W1	9.80	L1	1.76	D1	4.83
W2	12.10	L2	2.17	D2	5.96
W3	14.94	L3	2.68	D3	7.36
W4	18.45	L4	3.31	D4	9.09
W5	22.78	L5	4.08	D5	11.22
W6	28.12	L6	5.04	D6	13.85
W7	34.71	L7	6.22	D7	17.10
W8	42.86	L8	7.68	D8	21.12
W_{all}	115	L_{max}	72.2	wf	0.4
W_{min}	10	L_{min}	14		
W_{max}	105				

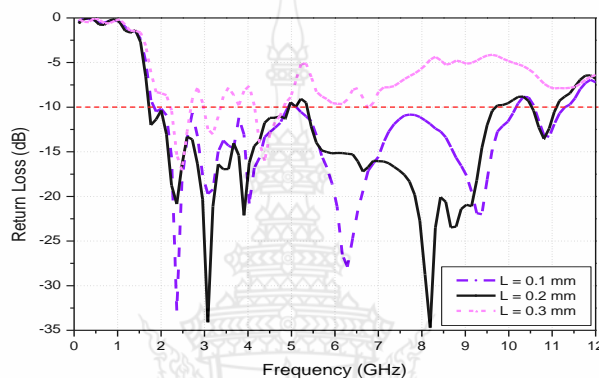
จากตารางที่ 3.2 ผลของการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST ทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเล็กตามที่ต้องการ แต่ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับยังไม่สามารถตอบสนองที่ครอบคลุมย่านความถี่ 1.8 – 12 GHz ได้ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบหลังการลดขนาดของทุกอิลิเมนต์

3.2.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางความยาวของอิลิเมนต์

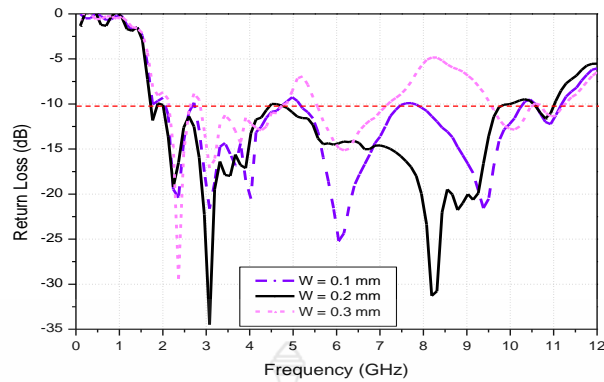
จากการศึกษาทฤษฎีการปรับขนาดความยาว จึงได้นำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยการเพิ่มขนาดให้กับความยาวของทุกอิลิเมนต์ ($L_1 - L_0$) โดยกำหนดให้ $L = 0.1$ mm, 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าที่ $L = 0.2$ mm นั้น มีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับใกล้เคียงกับขอบเขตที่ต้องการ แต่ช่วงความถี่ 4.7 GHz ถึง 5.3 GHz มีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับยังสูงกว่า 10 dB ดังรูปที่ 3.4 จึงทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางความกว้างของทุกอิลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการวิเคราะห์ความยาวของทุกอิลิเมนต์

3.2.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางความกว้างของอิลิเมนต์

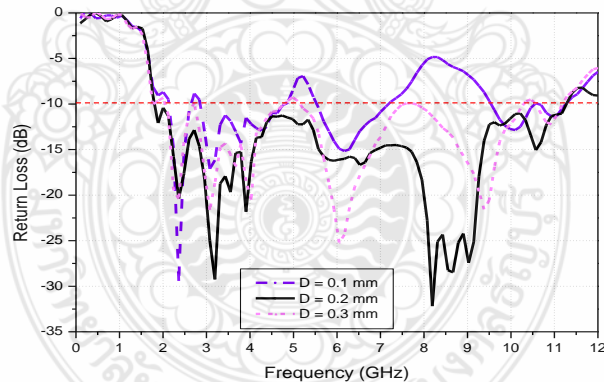
ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางความกว้างของอิลิเมนต์ โดยการลดขนาดให้กับความกว้างของทุกอิลิเมนต์ ($W_1 - W_0$) โดยการกำหนดค่า W ให้ลดลง 0.1 mm, 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าที่ $W = 0.2$ mm นั้น มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า 10 dB ใกล้เคียงกับขอบเขตที่ต้องการ แต่ช่วงความถี่ 4.2 GHz ถึง 4.3 GHz ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าสูงกว่า 10 dB ดังรูปที่ 3.5 จึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางด้านระยะห่างของอิลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการวิเคราะห์ความกว้างของทุกอิลิเมนต์

3.2.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางระยะห่างของอิลิเมนต์

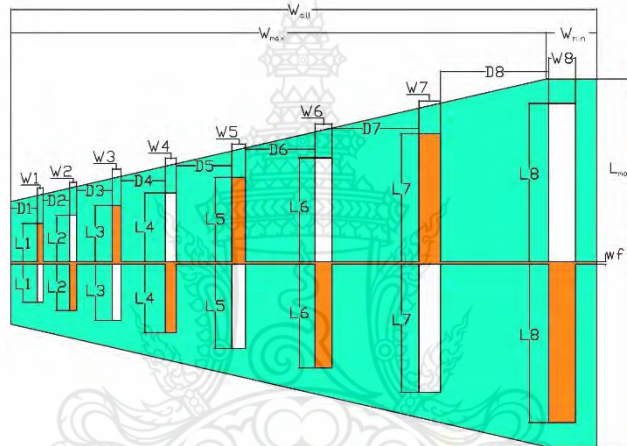
ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางระยะห่างเฉพาะอิลิเมนต์ D_4 โดยการกำหนดค่า D ให้ลดลง 0.1 mm, 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าที่ $D = 0.2$ mm นั้นมีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า 10 dB ตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 9.7 GHz



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการวิเคราะห์ระยะห่างของ D_4

3.2.5 การปรับโครงสร้างสายอากาศ

สายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์มีลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณคล้ายรูปสามเหลี่ยม แต่มีลักษณะโครงสร้างของวัสดุฐานรองเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งนอกจากจะเป็นการใช้งานพื้นที่ได้ไม่ทั่วถึงแล้ว ยังเป็นการสิ้นเปลืองวัสดุฐานรองโดยใช่เหตุ จึงได้ทำการปรับลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ให้คล้ายกับรูปสามเหลี่ยมแทน และจากการทดลองทำให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

3.3 การวัดและทดสอบสายอากาศ

3.3.1 โครงสร้างของสายอากาศ

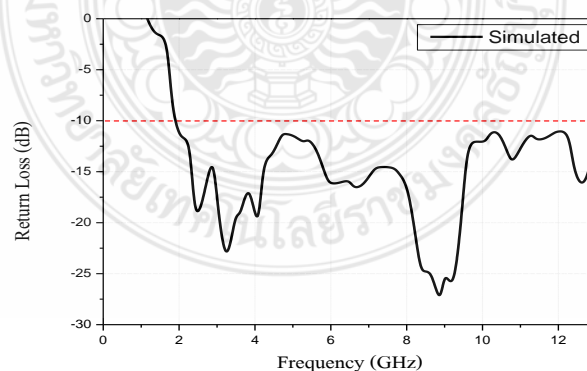
จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ขนาดทางด้านความยาว ความกว้างและระยะห่างของอิลิเมนต์ไดโพลแล้ว ทำให้ได้สายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่มีขนาด $115 \times 72.2 \text{ mm}^2$ และจากการปรับโครงสร้างของสายอากาศให้มีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยม จึงทำให้ได้สายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับที่มีค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขนาดของอิลิเมนต์ต่างๆ หลังจากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ความกว้าง	ขนาด (mm.)	ความยาว	ขนาด (mm.)	ระยะห่าง	ขนาด (mm.)
W_1	1.56	L1	10.00	D1	4.83
W_2	1.97	L2	12.30	D2	5.96
W_3	2.48	L3	15.14	D3	7.36
W_4	3.11	L4	18.65	D4	8.89
W_5	3.88	L5	22.98	D5	11.22
W_6	4.84	L6	28.32	D6	13.85
W_7	6.02	L7	34.91	D7	17.10
W_8	7.48	L8	43.06	D8	21.12
W_{all}	115	L_{max}	72.2	D_9	5.036
W_{min}	10	L_{min}	14		
W_{max}	105	wf	0.4		

3.3.2 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

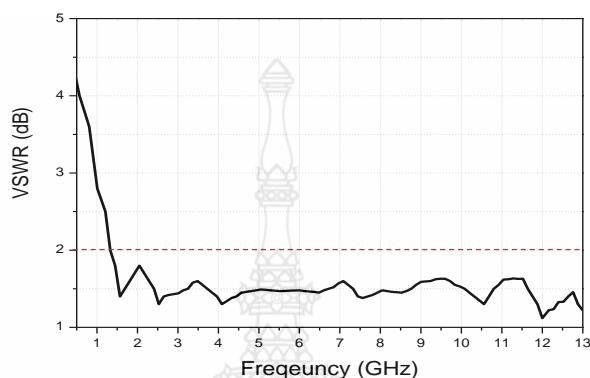
จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของอิลิเมนต์ต่างๆ แล้ว ทำให้ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไดโพลลอคฟิรูดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไดโพลลอคฟิรูดิกแบบแถวลำดับ สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

3.3.3 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่ได้จากการจำลองสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริ ออกแบบแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ มีการตอบสนองกับย่านความถี่ 1.8 – 12 GHz ดังรูปที่ 3.9

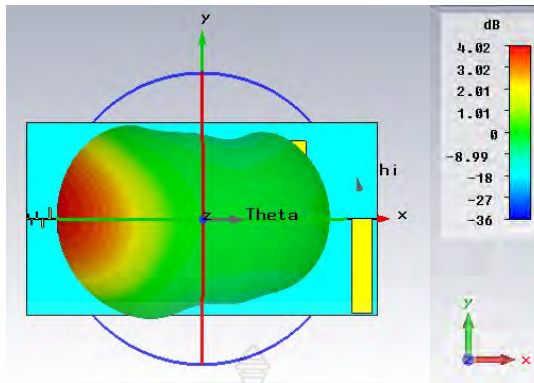


รูปที่ 3.9 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

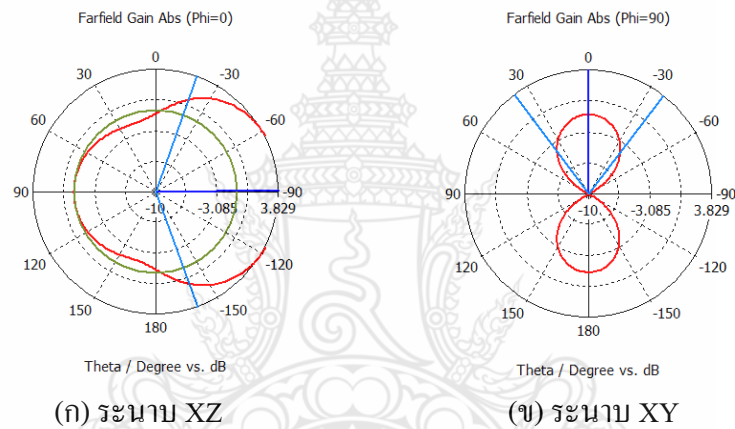
3.3.4 การแผ่พลังงานของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่จำเป็นของการออกแบบสายอากาศ เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศนั้นจะแสดงให้เห็นว่า การทำงานของสายอากาศที่ออกแบบมานั้นเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในช่วงความถี่ใด

ผลจากการจำลองสภาวะการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio เพื่อจะดูลักษณะการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้า (ระนาบ XZ) และลักษณะการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็ก (ระนาบ XY) ทั้งในแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองมิติและสามมิติที่ความถี่ 1.8 GHz, 2.45 GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz, 7 GHz, 9 GHz และ 11 GHz

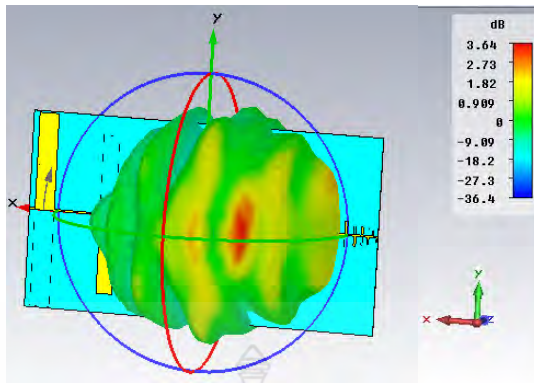


รูปที่ 3.10 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 1.8 GHz

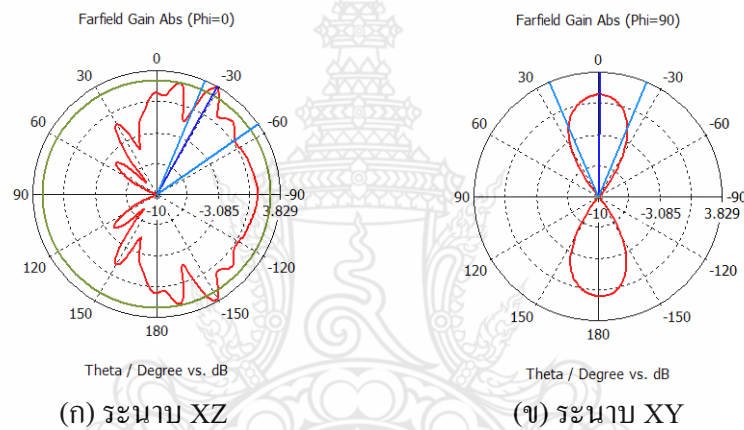


รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 1.8 GHz

จากรูปที่ 3.10 ที่ความถี่ 1.8 GHz แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ โดยมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นแบบทิศทางเดียว และแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลสองมิติของสายอากาศ ระนาบ XZ ดังรูปที่ 3.11(ก) แสดงให้เห็นที่มุม 90 องศา สายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นแบบทิศทางเดียว และอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 4.02 dBi

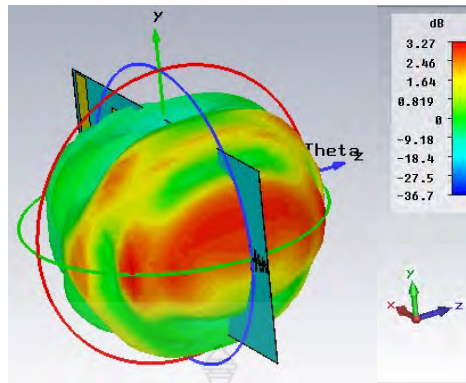


รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

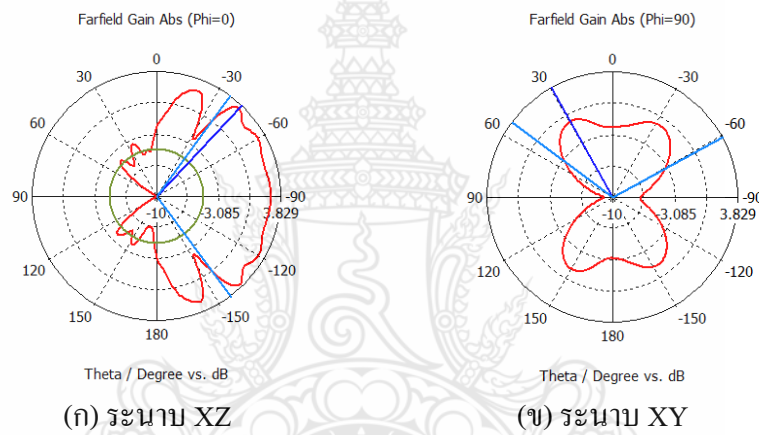


รูปที่ 3.13 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

ผลการทดสอบจำลองสถานะการทำงานของสายอากาศ แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติที่ความถี่ 2.45 GHz ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 จะสังเกตเห็นว่าในมุมที่ -30 องศา ถึง -60 องศา เป็นจุดที่สายอากาศมีการแผ่พลังงานดีที่สุด ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศรูปที่ 3.13 (ก) ก็ได้ผลไปในทิศทางเดียวกัน โดยสายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นทิศทางเดียว และอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 3.64 dBi

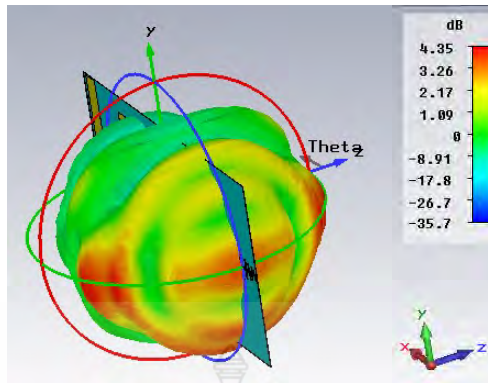


รูปที่ 3.14 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz

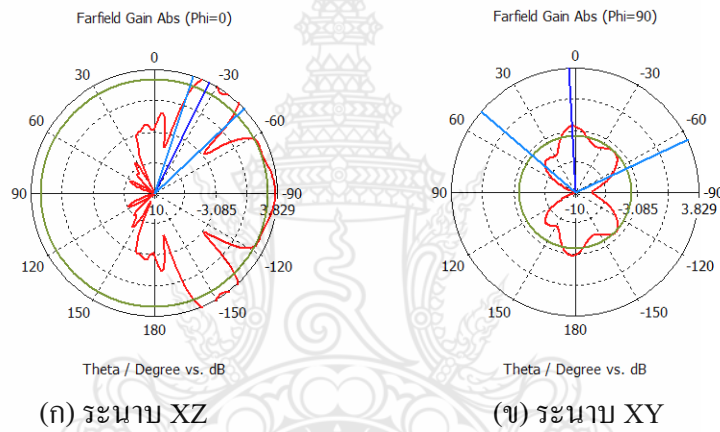


รูปที่ 3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 3.5 GHz

รูปที่ 3.14 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz และเมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับรูปที่ 3.15 (ก) ซึ่งแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ พบว่าในมุมที่ -30 องศาถึง -150 องศา สายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นทิศทางเดียว อัตราการขยาย (Gain) เท่ากับ 3.27 dBi

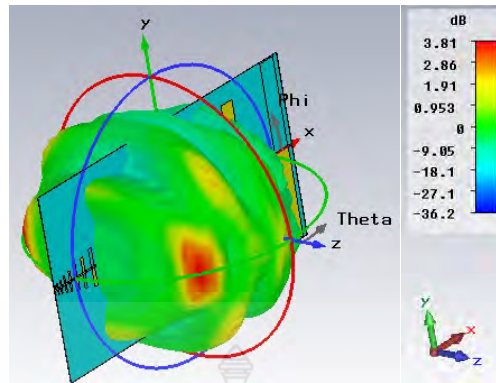


รูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz

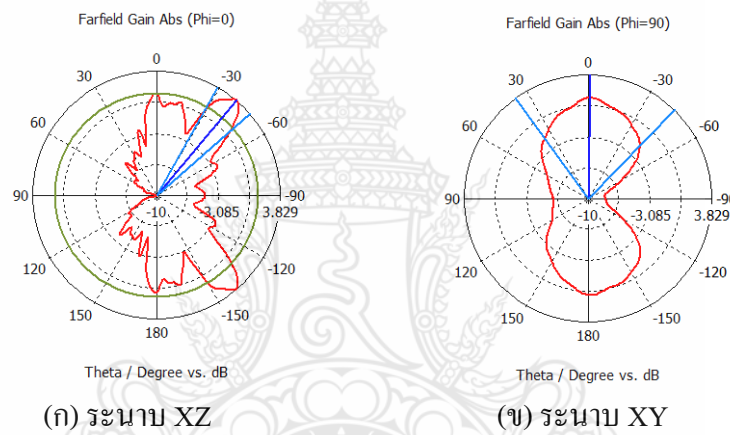


รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 5.2 GHz

ผลการทดสอบจำลองสถานการณ์การทำงานของสายอากาศ แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติที่ความถี่ 5.2 GHz ดังที่แสดงในรูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 5.2 GHz และ รูปที่ 3.17 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 5.2 GHz มีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นทิศทางเดียว อัตราการขยาย (Gain) เท่ากับ 4.35 dBi

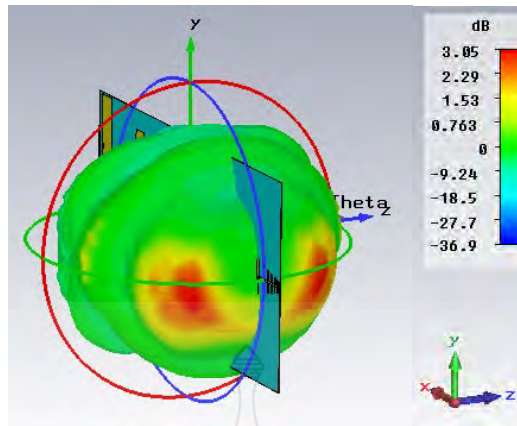


รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7 GHz

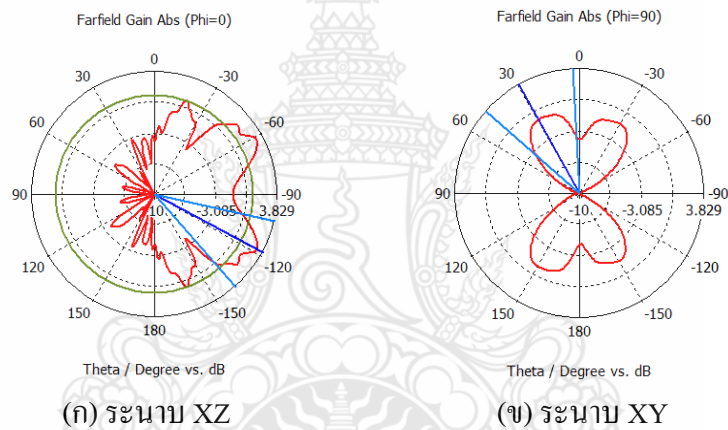


รูปที่ 3.19 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 7 GHz

จากรูป 3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7 GHz และ รูปที่ 3.19 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7 GHz สายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นแบบทิศทางเดียวในมุม 30 องศา ถึง -30 องศา อัตราการขยาย (Gain) เท่ากับ 3.81 dBi



รูปที่ 3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 9 GHz

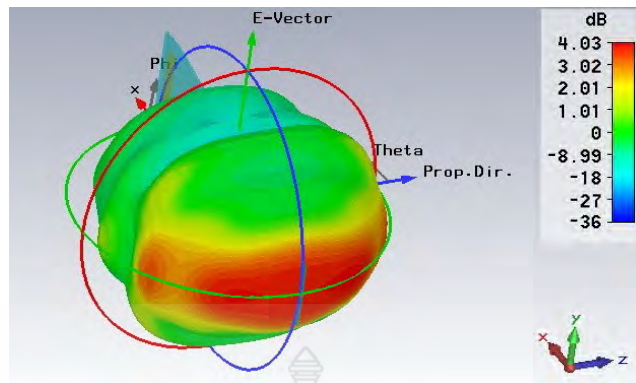


(ก) ระนาบ XZ

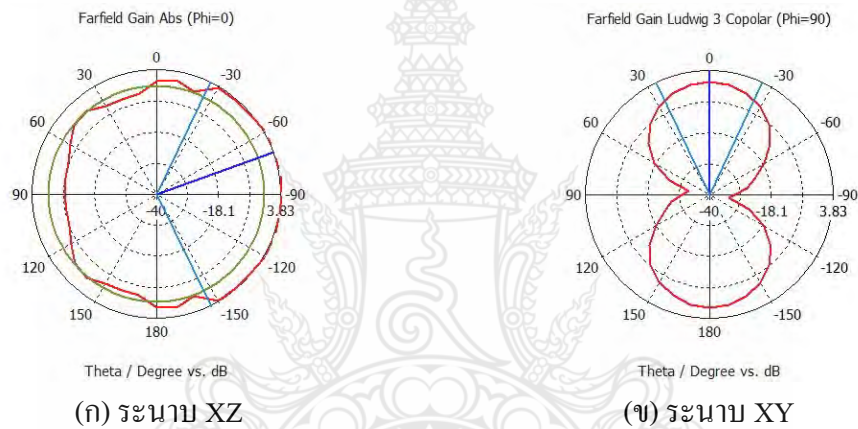
(ข) ระนาบ XY

รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 9 GHz

รูปที่ 3.20 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ ที่ความถี่ 9 GHz ซึ่งจากผลการทดสอบจำลองสถานะการทำงานของสายอากาศที่มุม -100 องศา ถึง -140 องศา สายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นทิศทางเดียว มีอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 3.05 dBi เช่นเดียวกับแบบรูปการแผ่พลังงาน ในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 9 GHz ในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 11 GHz



รูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศความถี่ 11 GHz

แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสามมิติสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 11 GHz ดังที่แสดงในรูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการแผ่พลังงานเป็นทิศทางเดียว ที่มุม -30 องศา ถึง -150 องศา เช่นเดียวกับรูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบสองมิติสนามระยะไกลของสายอากาศ และสายอากาศมีอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 4.02 dBi

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากบทที่ผ่านมา เป็นส่วนของทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศไดโพลลีดคัพรีออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ส่วนในบทนี้จะนำผลการทดลองจากการออกแบบการจำลองผลมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดทดสอบชิ้นงานจริง

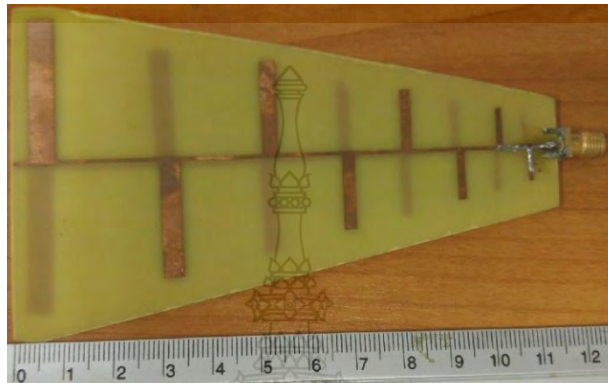
4.1 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ

ในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลลีดคัพรีออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B ทำการวัดทดสอบสายอากาศหลังจากที่ได้สร้างขึ้น เพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ เช่น ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล (Far-field radiation patterns) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B

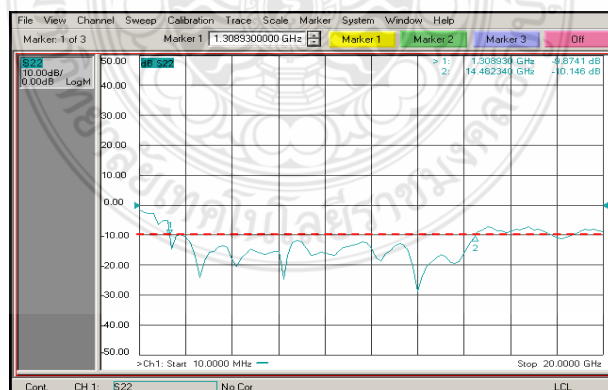
สายอากาศไดโพลสี่กพริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ถูกสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ขนาดเท่ากับ $115 \times 72.2 \text{ mm}^2$ ที่มีค่าไดอิเล็กทริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.3 ความสูงของฐานรอง $h = 0.8 \text{ mm}$ และความกว้างของสายส่งไมโครสตริป $wf = 0.5 \text{ mm}$ จากการคำนวณ ดังรูปที่ 4.2



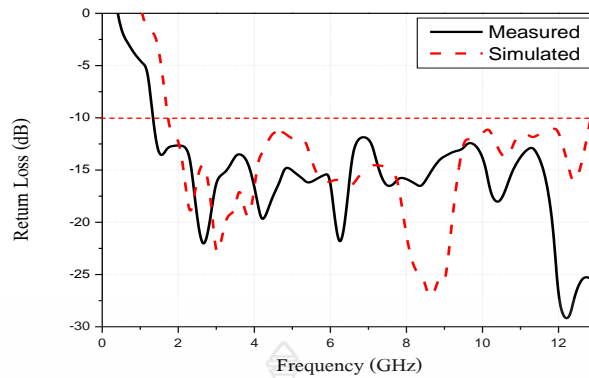
รูปที่ 4.2 สายอากาศไดโพลสี่กพริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

4.1.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

จากการวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลสี่กพริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B ทำให้ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่มีการตอบสนองกับย่านความถี่ 1.8 – 12 GHz ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดจริง

ในรูปที่ 4.4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลล้อยอดคพริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ระหว่างผลการจำลองและการวัดทดสอบสายอากาศจริง ด้วยโปรแกรม Origin 6.0 ซึ่งค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีการตอบสนองต่อความถี่ตั้งแต่ 1.8 - 12 GHz และสามารถนำค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมาคำนวณหาค่าความถี่กลาง (Frequency center: f_c) ค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth: f_b) และค่าอัตราส่วนแบนด์วิดท์ (Bandwidth ratio: BW) ได้จากสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ ดังนี้

การคำนวณหาค่าความถี่กลาง (Frequency center: f_c)

$$f_c = \left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{2} \right) + f_{\min} \quad (4.1)$$

$$f_c = \left(\frac{12 - 1.8}{2} \right) + 1.8$$

$$f_c = 6.9 \text{ GHz}$$

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ (f_b)

$$f_b = \left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \right) \times 100\% \quad (4.2)$$

$$f_b = \left(\frac{12 - 1.8}{6.9} \right) \times 100\%$$

$$f_b = 147\%$$

การคำนวณค่าอัตราส่วนแบนด์วิดท์ (Bandwidth ratio)

$$BW = \frac{f_h}{f_l} : 1 \quad (4.3)$$

$$BW = \frac{12}{1.8} : 1$$

$$= 6.67:1$$

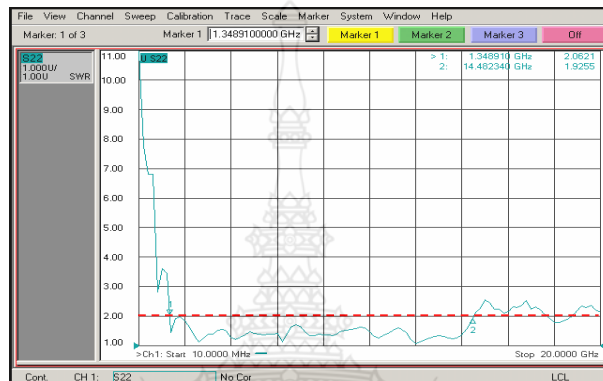
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดจริง

สายอากาศรูปแบบที่ 1	$f_l - f_h$ (GHz)	BW (GHz)	f_c (GHz)	%BW	BW Ratio
ผลการจำลอง	1.8 - 12	10.2	6.54	144 %	6.26:1
ผลการวัด	1.8 - 12	10.2	6.9	147 %	6.67:1

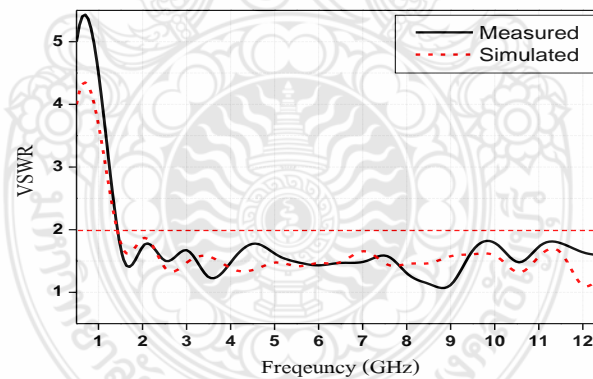
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ 1.8 - 12 GHz นั้นมีค่าความสูญเสียย้อนกลับมากกว่า -10dB แสดงว่าสายอากาศสามารถส่งและรับสัญญาณในช่วงความถี่ 1.8 - 12 GHz ได้ดี

4.1.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่ได้จากการวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลล้อยกพรีออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัตราไวด์แบนด์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B มีการตอบสนองกับย่านความถี่ 1.8 – 12 GHz ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดจริง

จากรูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดจริงที่มีการตอบสนองในช่วงความถี่ 1.8 – 12 GHz ซึ่งในการหาค่าแบนด์วิดท์จะต้องคิดจากช่วงความถี่ที่มีอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2

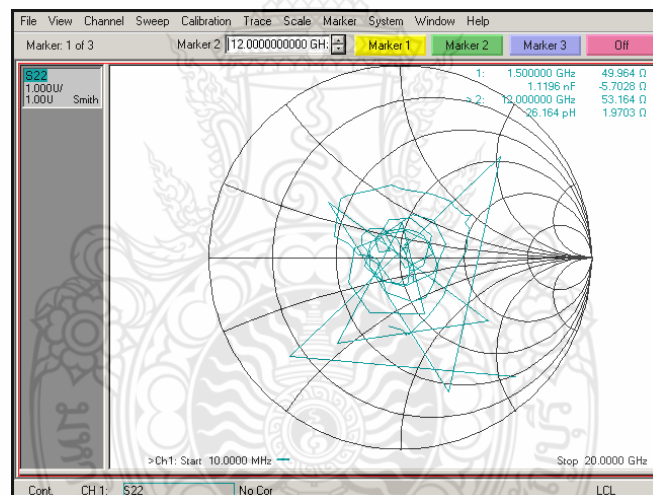
ในการทดสอบสามารถหาค่าแบนด์วิดท์ของค่าการสูญเสียเนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB หรือหาได้จากอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่งโดยจะคิดจากช่วงความถี่ที่มีอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2 ซึ่งสามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์ได้จากสมการที่ 4.4

$$\text{Bandwidth} = f_{\max} - f_{\min} \quad (4.4)$$

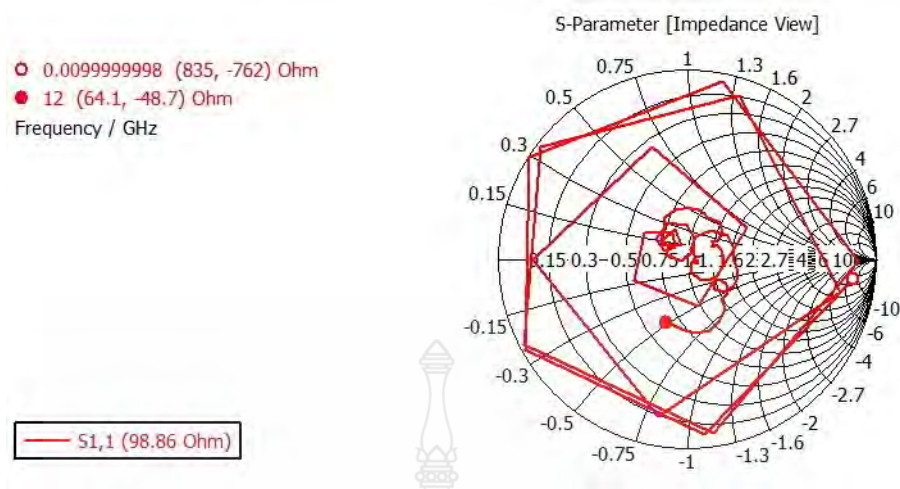
$$= 12 - 1.8 \text{ GHz}$$

$$= 10.2 \text{ GHz}$$

4.1.3 การวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance)



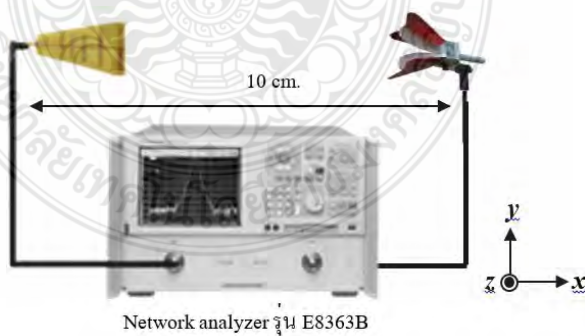
รูปที่ 4.7 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ

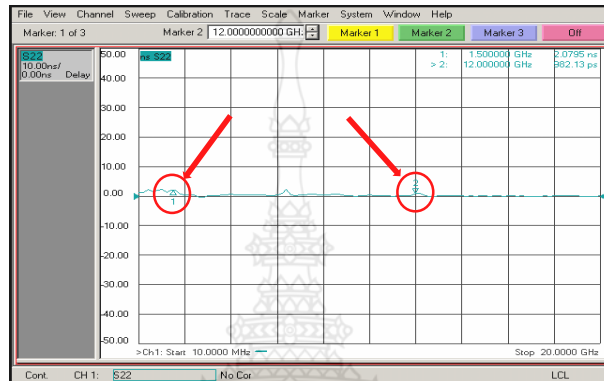
จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลการวัดและผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในรูปกราฟสมิทชาร์ต (Smith chart) ของสายอากาศไดโพลลอคฟิรูดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัตราไวด์แบนด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะอยู่ใกล้ค่า 50 Ω เป็นส่วนมาก ตัวอย่างเช่น ช่วงความถี่ที่ 1.5 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ $49.9 - j5.7 \Omega$ และมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ $53.16 + j1.9 \Omega$ ที่ช่วงความถี่ที่ 12 GHz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี

4.1.4 การวัดทดสอบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)



รูปที่ 4.9 วิธีวัดค่าประวิงกลุ่มของสายอากาศ

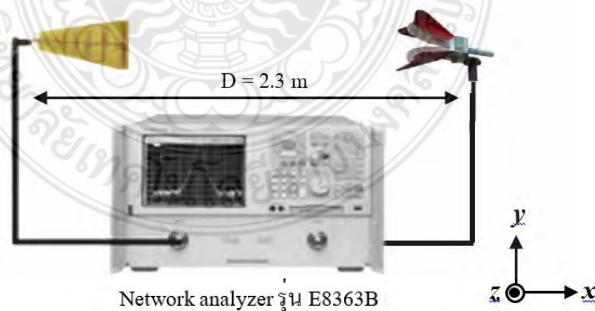
การรับส่งข้อมูลย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศจะต้องน้อยกว่า 2 ns จึงทำให้ข้อมูลมีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด โดยวิธีการวัดค่าประวิงกลุ่มใช้สายอากาศฮอร์นรุ่น 3117 Double ridged waveguide horn เป็นภาคส่งและใช้สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นเป็นตัวรับวางห่างกัน 10 cm ดังรูปที่ 4.9 ทำการวัดที่ละพอร์ต อีกพอร์ตหนึ่งที่เหลือต้องต่อเข้ากับโหลด 50 Ω เพื่อให้สายอากาศทั้งสองตัวสามารถทำงานพร้อมๆ กัน



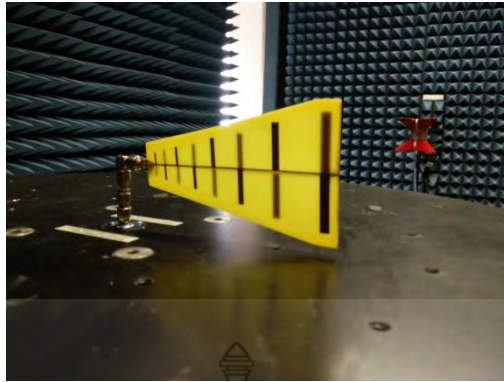
รูปที่ 4.10 ผลการวัดค่าประวิงกลุ่มของสายอากาศ

ในรูปที่ 4.10 แสดงถึงผลการวัดค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศไดโพลที่ออกแบบแบนด์สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 2 ns จะทำให้การรับส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพลัสส์น้อยที่สุด

4.2.5 การวัดทดสอบค่าอัตราขยาย



รูปที่ 4.11 การวัดทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ



รูปที่ 4.12 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

ในการวัดค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ได้ใช้สายอากาศรูปฮอร์นที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศไดโพลลอคฟิรูดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ และต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) โดยทำการวัดทดสอบที่สายอากาศและพอร์ตที่เหลือทำการต่อเข้ากับโหลด 50Ω ดังรูปที่ 4.12 และคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศจากสมการที่ (4.5) หรือ (4.6)

$$P_r = P_t - L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (4.5)$$

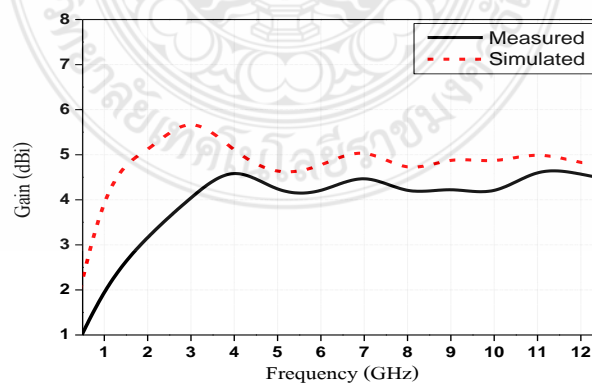
$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (4.6)$$

- โดย P_t คือ กำลังงานทางด้านส่ง (dBm)
 P_r คือ กำลังงานทางด้านรับ (dBm)
 L_{line} คือ กำลังงานที่สูญเสียทางด้านส่งและด้านรับ
 L_f คือ กำลังงานที่สูญเสียในอากาศเท่ากับ $20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$
 d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับเท่ากับ 2.3 m
 G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านส่ง
 G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านรับ

หลังจากการวัดกำลังงานของสายอากาศทางด้านรับที่ช่วงความถี่ 1.8 - 12 GHz สามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราขยายจากสมการที่ 4.6 โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งกับตัวรับเท่ากับ 2.3 m ซึ่งจะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศ และเปรียบเทียบกับผลการจำลองดังในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยายจากผลการจำลองและผลการวัดจริง

ความถี่ (GHz)	ผลการจำลอง (dBi)	ผลการวัด (dBi)
1	4.620	2.116
2	5.036	3.199
3	5.978	4.055
4	5.041	4.829
5	4.514	4.124
6	4.729	4.123
7	5.226	4.648
8	4.546	4.079
9	4.976	4.301
10	4.794	4.055
11	5.084	4.739
12	4.800	4.575
อัตราขยายเฉลี่ย	4.945	4.070

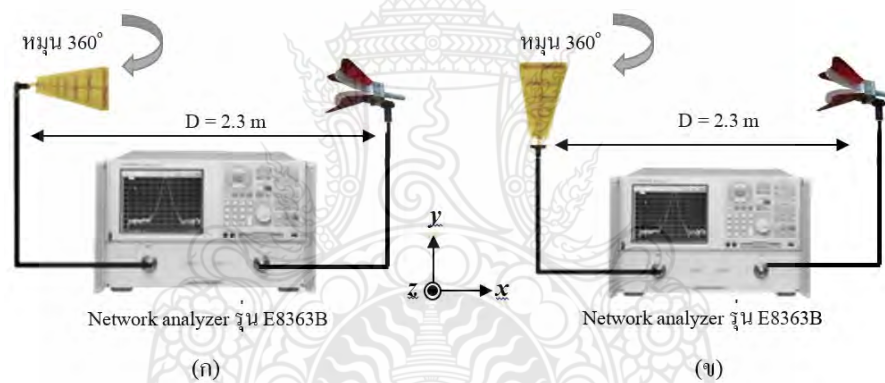


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบอัตราขยายจากผลการจำลองและผลการวัดจริง

จากผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดจริง ตั้งแต่ความถี่ 1.8 - 12 GHz จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายของผลการจำลองมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 5.98 dBi ที่ความถี่ 4 GHz และอัตราขยายจากการวัดจริงมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 4.83 dBi ที่ความถี่ 4 GHz ทั้งนี้ค่าอัตราขยายจากการวัดจริงมีค่าน้อยกว่า หรือติดลบ เนื่องจากอัตราขยายของผลการจำลองเป็นการวัดจากแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีค่าสูงสุดของผลแบบสามมิติ ทำให้มีค่าสูงกว่าผลการวัดจริงซึ่งเป็นการวัดจากแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติในระนาบที่ได้ระบุเท่านั้น (XZ และ YZ)

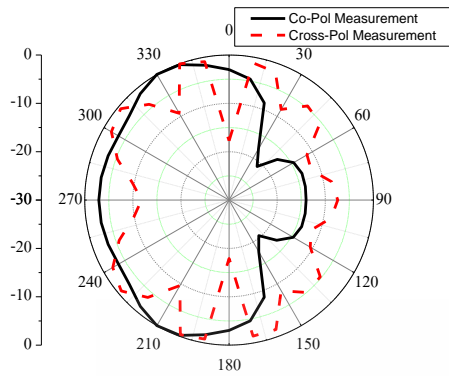
ในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 เป็นการวัดแบบ 2 มิติ ในระนาบ XZ และ YZ โดยกำหนดให้สายอากาศภาคส่งมีโพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{θ}) กับแบบแนวตั้ง (E_{ϕ}) ที่ความถี่ 1.8 GHz, 2.45GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz, 7 GHz, 9 GHz และ 11 GHz ดังต่อไปนี้

4.1.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

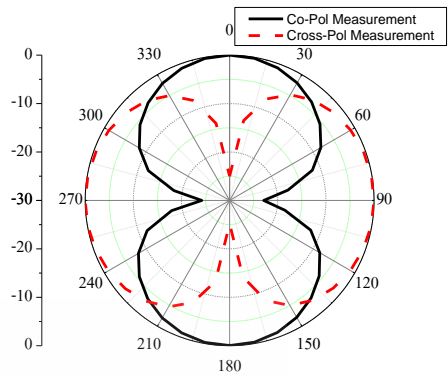


รูปที่ 4.14 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศฯ จัดวางแบบด้านข้างถึงข้าง

- (ก) การหมุนสายอากาศแบบโพลาไรเซชันร่วม (Co-Polarization)
- (ข) การหมุนสายอากาศแบบโพลาไรเซชันไขว้ (Cross-Polarization)

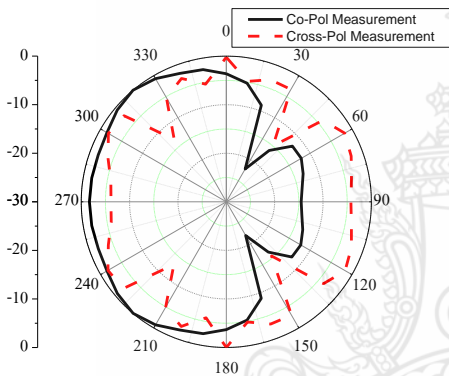


ระนาบ XZ

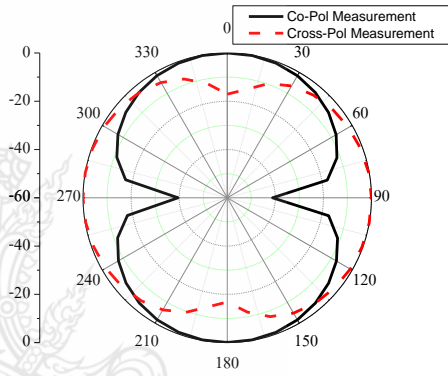


ระนาบ YZ

รูปที่ 4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 1.8 GHz

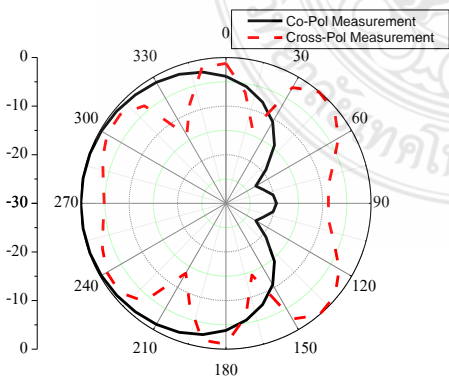


ระนาบ XZ

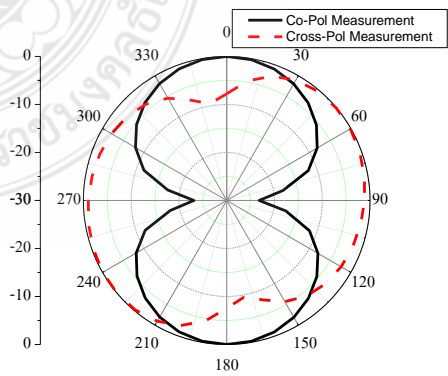


ระนาบ YZ

รูปที่ 4.1 6แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 2.45 GHz

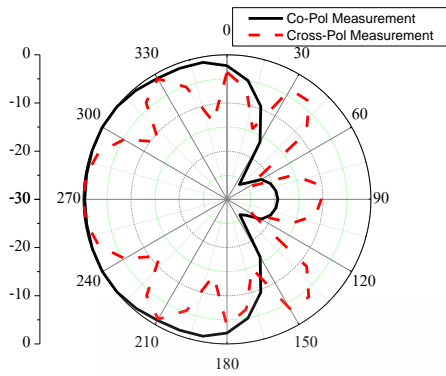


ระนาบ XZ

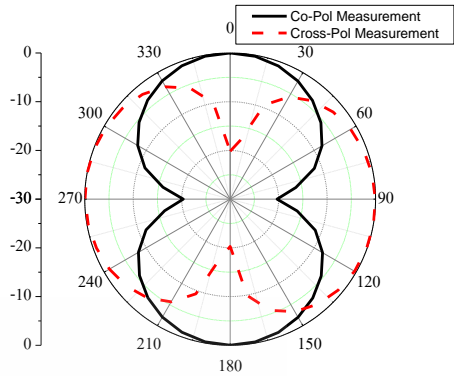


ระนาบ YZ

รูปที่ 4.17 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 3.5 GHz

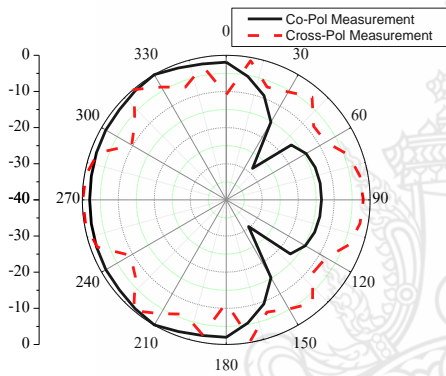


ระนาบ XZ

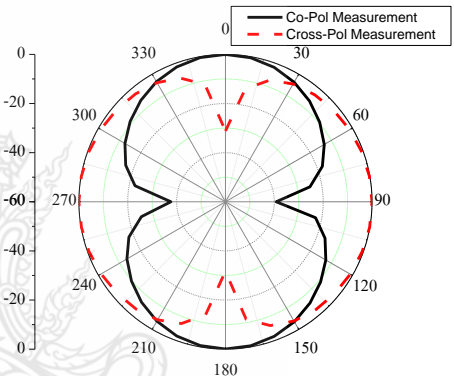


ระนาบ YZ

รูปที่ 4.18 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 5.2 GHz

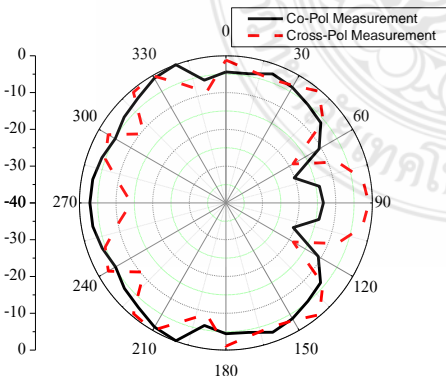


ระนาบ XZ

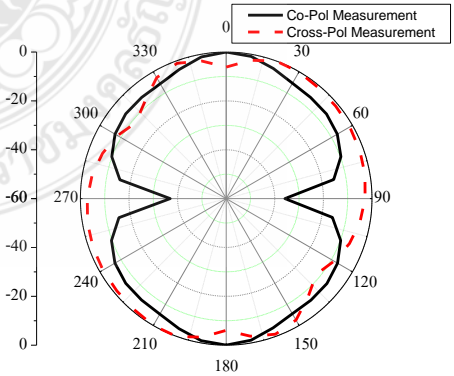


ระนาบ YZ

รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 7 GHz

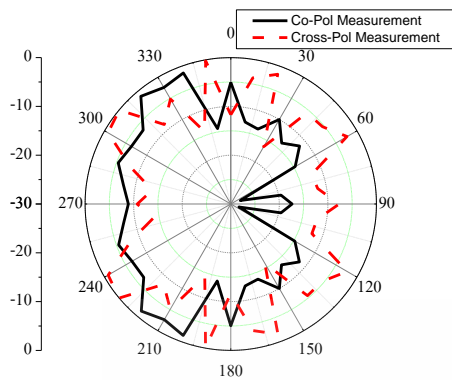


ระนาบ XZ

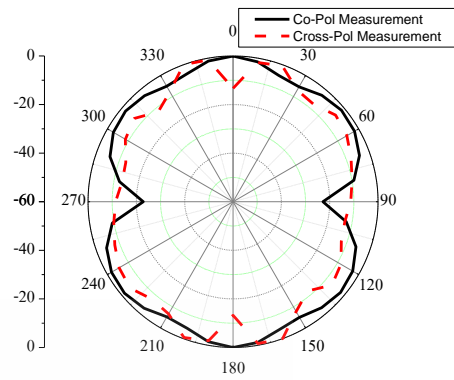


ระนาบ YZ

รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 9 GHz



ระนาบ XZ



ระนาบ YZ

รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลที่ความถี่ 11 GHz

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลสามารถวัดและทดสอบได้โดยการจัดวางแบบด้านข้างถึงข้าง ดังรูปที่ 4.14 (ก) การหมุนสายอากาศแบบโพลาไรเซชันร่วม (Co-Polarization) และรูปที่ 4.14 (ข) การหมุนสายอากาศแบบโพลาไรเซชันไขว้ (Cross-Polarization) และจากรูปที่ 4.15 – 4.21 แสดงให้เห็นว่า แบบรูปการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กระยะไกลที่ความถี่ตั้งแต่ 1.8 – 12 GHz นั้นเป็นการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว (Directional) และมีบีเอ็มวีดีซ์ไม่ต่ำกว่า 30 องศา

4.2 สรุปผลของการทดสอบวัดสายอากาศ

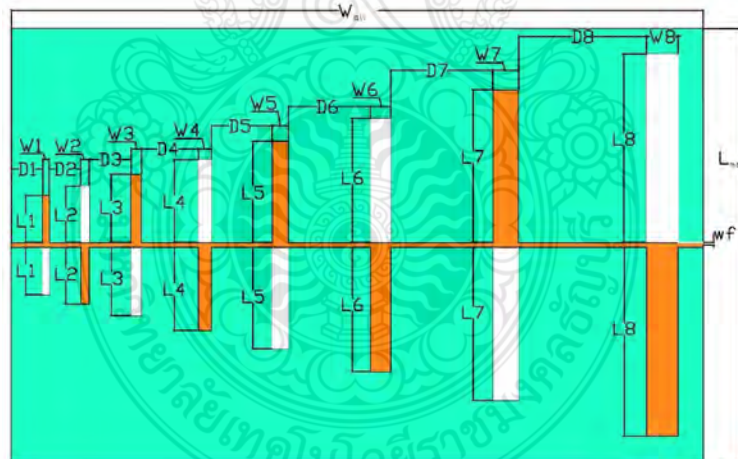
จากผลการวัดทดสอบสายอากาศไดโพลสี่ออคพิรูดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีขนาดเท่ากับ 115 x 72.2 mm² ตอบสนองต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1.8 - 12 GHz มีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์เท่ากับ 147% มีอัตราขยายสูงสุดที่ 4 GHz เท่ากับ 4.82 dBi อัตราขยายเฉลี่ยตลอดทั้งย่านความถี่เท่ากับ 4.07 dBi สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบทิศทางเดียว ค่าประวิงกลุ่มของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า 2 ns ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ได้เป็นอย่างดี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

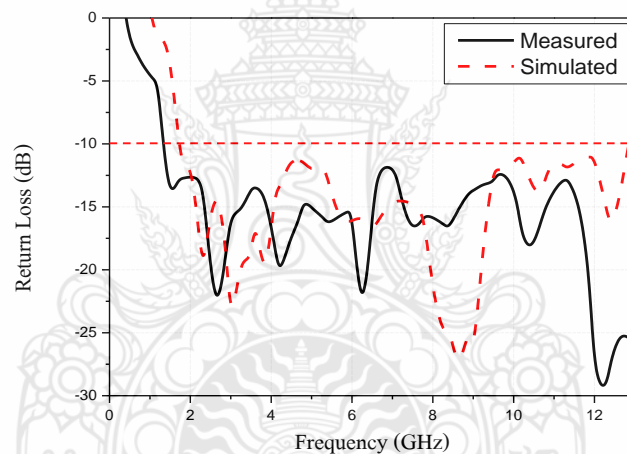
วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับจะถูกจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio ในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ โดยโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 สายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับถูกสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีขนาดความหนาของวัสดุฐานรองอยู่ที่ 0.8 มม. มีพื้นที่เท่ากับ 115 x 72.2 ตร.มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (ϵ_r) 4.3 และมีขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณ 0.5 มม. กำหนดค่า Scaling factor (τ) ที่ 0.7 และค่า Spacing factor (σ) เท่ากับ 1.12 ส่งผลให้ไดโพลของสายอากาศมีจำนวน 8 อิลิเมนต์ไดโพล



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลสี่ออคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ใน
ระบบอัลตราไวด์แบนด์

ตารางที่ 5.1 ผลการออกแบบสายอากาศไดโพลสี่กพริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

พารามิเตอร์	ผลการออกแบบสายอากาศ
วัสดุฐานรองชนิด	FR4
ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (ϵ_r)	4.3
ขนาดวัสดุฐานรอง	115 x 72.2 ตร.มม.
ความสูงของฐานรอง	0.8 มม.
ความกว้างของสายนำสัญญาณ	0.5 มม.
ค่า Scaling factor (τ) และค่า Spacing factor (σ)	(τ) = 0.7 และ (σ) = 1.12
จำนวนอิมพีแดนซ์	8 อิมพีแดนซ์



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดและทดสอบสายอากาศของค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

จากรูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และผลการวัดทดสอบผ่านเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงความถี่ 1.8 – 12 GHz ซึ่งคิดจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดและทดสอบสายอากาศไดโพลลอคพิริออดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้
ในระบบอัลตราไวด์แบนด์

พารามิเตอร์	ผลการวัดทดสอบ
ความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่	1.8 - 12 GHz
ค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์	147%
อัตราขยายเฉลี่ย	4.07 dBi
ค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า	2 ns
แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล	แบบทิศทางเดียว
ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	50 Ω

จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดสายอากาศแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 147% อัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ยตลอดย่านความถี่ไม่น้อยกว่า 4 dBi มีค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 2 ns มีแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียว และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 Ω จากผลการจำลองและวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอัลตราไวด์แบนด์

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากการศึกษา ออกแบบ พัฒนาและสร้างสายอากาศไดโพลลอคพิริออดิกแบบแถวลำดับ ทำให้ทราบว่า สายอากาศไดโพลลอคพิริออดิกสามารถพัฒนาให้ตอบสนองในช่วงความถี่สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาเป็นตัวกำหนด ไม่ว่าจะเป็นช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ค่า Scaling factor ค่า Spacing factor รวมไปถึงชนิดและขนาดของวัสดุฐานรอง ซึ่งพารามิเตอร์หลักเหล่านี้เป็นตัวกำหนดขนาดของสายอากาศและจำนวนอิลิเมนต์ไดโพลของสายอากาศ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและปัญหาที่สำคัญของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนี้

5.2.1 การใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย เป็นการใช้งานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความสามารถที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้ทุกที่ ทุกเวลา ดังนั้นการพัฒนาสายอากาศให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ให้ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นสิ่งแรกและควรที่จะต้องทำการพัฒนาสายอากาศไดโพลลอคพิริออดิกแบบแถว

ลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ให้มีการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่กว้างมากขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานมาตรฐานของเทคโนโลยี 5G

5.2.2 ในการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายจะเห็นว่าพื้นที่ให้บริการยังไม่ครอบคลุมตามที่ผู้ใช้งานต้องการ อาจเนื่องด้วยมีวัตถุมาบดบังสัญญาณและอีกสาเหตุหนึ่งคืออัตราขยายของสายอากาศต่ำ จึงส่งผลให้การตอบสนองที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรวิเคราะห์ออกแบบสายอากาศให้มีอัตราการขยายที่สูงกว่า 10 dBi และออกแบบแบบรูปในการแผ่พลังงานระยะไกลให้เป็นแบบกำหนดทิศทาง เพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพและครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการให้บริการได้สูงสุด



บรรณานุกรม

- [1] Y. Zhao and J. Qiu, "A novel wide band log-periodic dipole antenna," in *2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013)*, 2013, pp. 1-3: IEEE.
- [2] J. Rajendran and G. S. Sundaram, "Design and evaluation of printed log periodic dipole antenna for detection of radiolytic components," in *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 0032-0036: IEEE.
- [3] A. Khaleghi, H. S. Farahani, and I. Balasingham, "Impulse radiating log-periodic dipole array antenna using time-reversal technique," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 967-970, 2011.
- [4] G. Bozdag and A. Kustepeli, "Subsectional tapered fed printed LPDA antenna with a feeding point patch," *IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 15, pp. 437-440, 2016.
- [5] T. Limpiti and A. Y. Chantaveerod, "Design of a printed log-periodic dipole antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz band applications," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016 13th International Conference on*, 2016, pp. 1-4: IEEE.
- [6] M. Pehlivan, K. YeğİN, and Y. AŞci, "Design of 1–18 GHz parabolic reflector antenna with LPDA feed," in *2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2016, pp. 1-3: IEEE.
- [7] A. Kyei, D.-U. Sim, and Y.-B. Jung, "Compact log-periodic dipole array antenna with bandwidth-enhancement techniques for the low frequency band," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 5, pp. 711-717, 2016.
- [8] P. Wiid, K. Palmer, P. van der Merwe, and H. Reader, "A practical 50:1 bandwidth PCB-LPDA antenna for MeerKAT RFI studies," in *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2012 IEEE-APS Topical Conference on*, 2012, pp. 965-968: IEEE.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] M. J. Almalkawi, L. W. Cross, and K. A. Alshamaileh, "A transmission line circuit-oriented approach for miniaturization of a log-periodic dipole array (LPDA) antenna," in *Circuits and Systems (MWSCAS), 2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on*, 2014, pp. 73-76: IEEE.
- [10] X. Ding, B.-Z. Wang, and R. Zang, "Design and realization of a printed microstrip log-periodic antenna," in *Electromagnetics: Applications and Student Innovation (iWEM), 2012 IEEE International Workshop on*, 2012, pp. 1-3: IEEE.
- [11] M. C. Özgönül and M. Seçmen, "Size-reduced printed log periodic dipole antenna with single first order semi-circle iteration and feed point patches," in *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017 10th International Conference on*, 2017, pp. 995-999: IEEE.
- [12] S. K. Jain and S. S. Pawar, "Characterization of log periodic planar dipole array antenna," in *Industrial and Information Systems (ICIIS), 2016 11th International Conference on*, 2016, pp. 43-48: IEEE.
- [13] G. A. Casula, P. Maxia, G. Mazarella, and G. Montisci, "Design of a printed log-periodic dipole array for ultra-wideband applications," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 38, pp. 15-27, 2013.
- [14] เจษฎา มณฑาสวรรณ, เทพประทาน มุ่งนคร และ ยิวดี กริชาธร, "การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, 2552.
- [15] มนต์รี ชินานุปกรณ์, "การออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, 2555.
- [16] เก่งกาจ เนียมจิน, ลิขิต เสนาวงค์ และ อนุพนธ์ จาปาสาร, "การลดขนาดของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น (Straight) แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, 2556.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] กัลยกร ขุนเอียด, "การศึกษาสายอากาศชนิดช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำสำหรับสองแถบความถี่," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี . คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขา . วิศวกรรมไฟฟ้า, 2553.
- [18] R. Carrel, "Analysis and Design of the Log Periodic Antenna," ed: University of Illinois, 1961.
- [19] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [20] รัฐพล จินะวงศ์ และ สมศักดิ์ อรรถทิมากุล, "การพัฒนาสายอากาศไดโพลที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม สำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารไร้สาย," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 23, no. 3, pp. 594-606, 2013.
- [21] ไพศาล ทูมมาศ, "การออกแบบสายอากาศแบบปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับประยุกต์ใช้ในการสื่อสารไร้สายย่านอัลตราไวด์แบนด์," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, 2558.
- [22] P. Pagani, F. T. Talom, P. Pajusco, and B. Uguen, *Ultra-Wideband Radio Propagation Channels*. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [23] บุญฤทธิ์ คุ่มเขต, "สายอากาศไมโครสตริปแบบไม่ถ่วงฟิล์มสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [24] พรเทพ ทองชัย, "สายอากาศฟิล์มบางขนาดกะทัดรัดรูปคล้ายอักษรซีสำหรับเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สาย," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [25] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-Wideband Radio Technology*. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

รายละเอียดของ FR4

DS-7405A

(ANSI : FR-4) HIGH C.T.I

COPPER CLAD LAMINATES

FEATURES

- High C.T.I Value(above 400V)
- Good dimensional stability, soldering reliability has been bettered
- Good electrical properties
- High density automatic mounting can be carried out

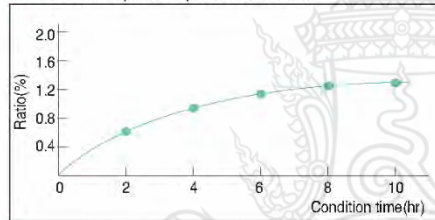
APPLICATIONS

Computer & peripherals, Instrumentation, VCR, Television, Electronic Toy, etc.,

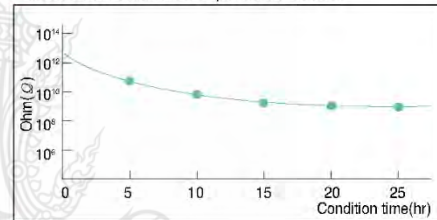
INTERNATIONAL STANDARD RECOGNITION

- BSI : 6741
- VDE : VDE-Reg-Nr. 4945
- UL : E103670

Water absorption at pressure cooker

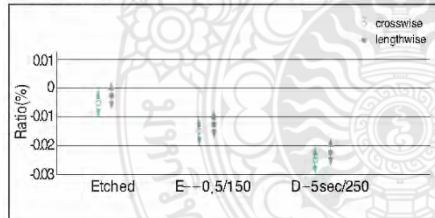


Insulation resistance at pressure cooker



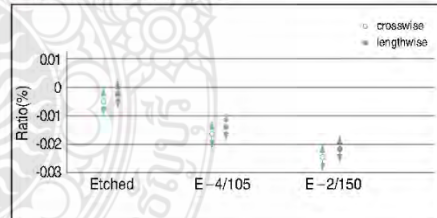
Dimensional stability

PCB process(size:360X310mm span310X254mm)

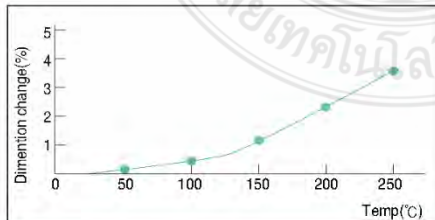


Dimensional stability

Test method(IEC TM.650 2.4.39)

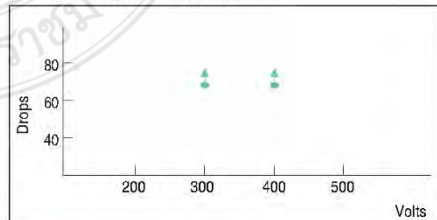


Thermal expansion of Z-direction(Test by TMA)



Anti-Tracking(IEC Method)

Electrode distance:4mm 0.1% NH₄Cl



The World Leader in Technology and Quality

COPPER CLAD LAMINATES

GENERAL PROPERTIES

Test Item	Unit	Treatment Condition	Designation	DS-7405A
			ANSI Grade	FR-4
			Property Data	
			Standard Value	Guaranteed Value
Tg	°C	DSC	135	above 130
		TMA	135	above 130
		DMA	165	above 160
CTE x-axis y-axis z-axis	ppm/°C	Ambient to Tg	18	less than 20
			13	less than 15
			55	less than 60
Flammability	-	UL-94	V-0	V-0
Insulation Resistance	ohm	C-96/20/65	1 x 10 ¹² - 1 x 10 ¹³	above 5 x 10 ¹³
		C-96/20/65+D-2/100	1 x 10 ¹⁰ - 1 x 10 ¹¹	above 1 x 10 ⁹
Volume Resistivity	ohm-cm	C-96/20/65	1 x 10 ¹⁴ - 1 x 10 ¹⁵	above 1 x 10 ¹³
		C-96/20/65+C-96/40/90	5 x 10 ¹³ - 5 x 10 ¹⁴	above 5 x 10 ¹²
Surface Resistance	ohm	C-96/20/65	5 x 10 ¹³ - 5 x 10 ¹⁴	above 1 x 10 ¹²
		C-96/20/65+C-96/40/90	1 x 10 ¹² - 1 x 10 ¹³	above 1 x 10 ¹¹
Arc Resistance	min.seconds		110	above 60
Dielectric Constant (1 MHz)	-	C-96/20/65	4.5 - 4.8	less than 5.5
		C-96/20/65+D-48/50	4.6 - 5.2	less than 5.8
Dissipation Factor (1 MHz)	-	C-96/20/65	0.015 - 0.020	less than 0.035
		C-96/20/65+D-48/50	0.018 - 0.023	less than 0.045
Comparative Tracking Index	volt	IEC Method	above 400	above 400
Solder Float(260 °C)	sec	A	above 180	above 120
Peel Strength Cu.foil 1oz (0.035mm)	kgf/cm	A	1.5 - 1.8	above 1.43
Flexural Strength	kgf/mm ²	A	40 - 50	above 32.7
Water Absorption	%	E-24/50+D-24/23	0.10 - 0.15	less than 0.25

Specimen Thickness : 1.6mm

PURCHASING INFORMATION

- Copper foil : 0.5 oz/ft²(0.018 mm), 1 oz/ft²(0.035 mm), 2 oz/ft²(0.070 mm) available.
- Thickness : 0.4mm to 3.2mm

Standard Size		Tolerance(mm)
1,020 X 1,220mm (40" X 48")	915 X 1,220mm (36" X 48")	+3
1,070 X 1,220mm (42" X 48")	970 X 1,220mm (38" X 48")	-0
1,020 X 1,020mm (40" X 40")		

※ Other sheet size and thickness could be available upon request.



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของสายอากาศส่ง

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

3-D Patterns
Available at
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

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

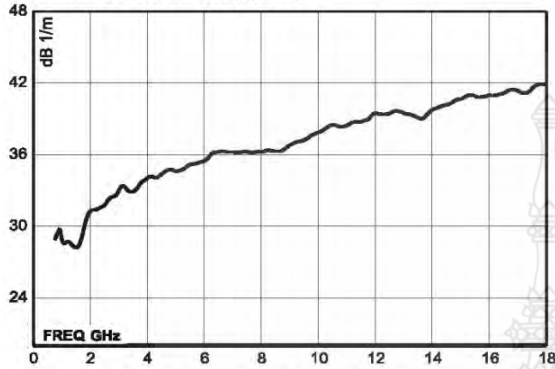
Electrical Specifications

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 Ω	Type N

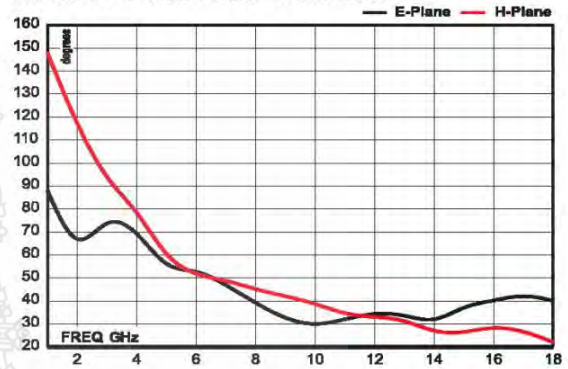
Physical Specifications

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

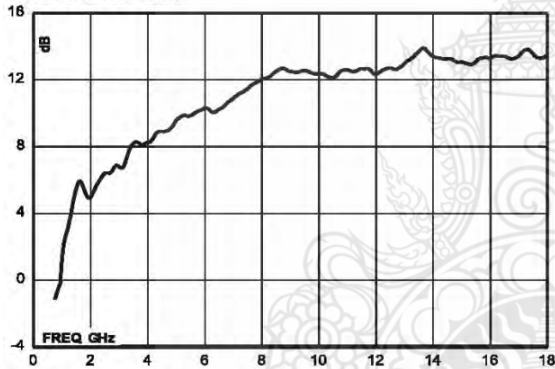
Model 3117 Antenna Factor



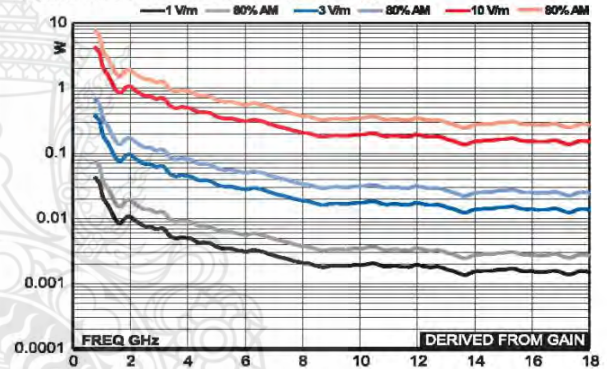
Model 3117 Half Power Beamwidth



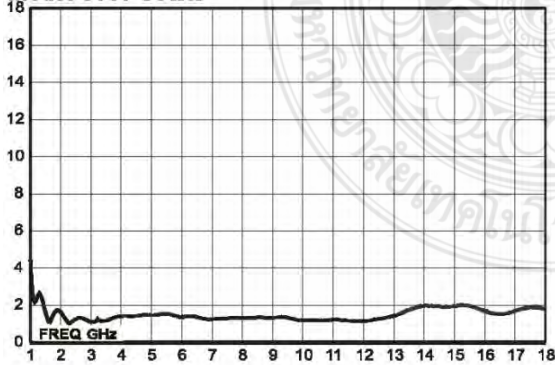
Model 3117 Gain



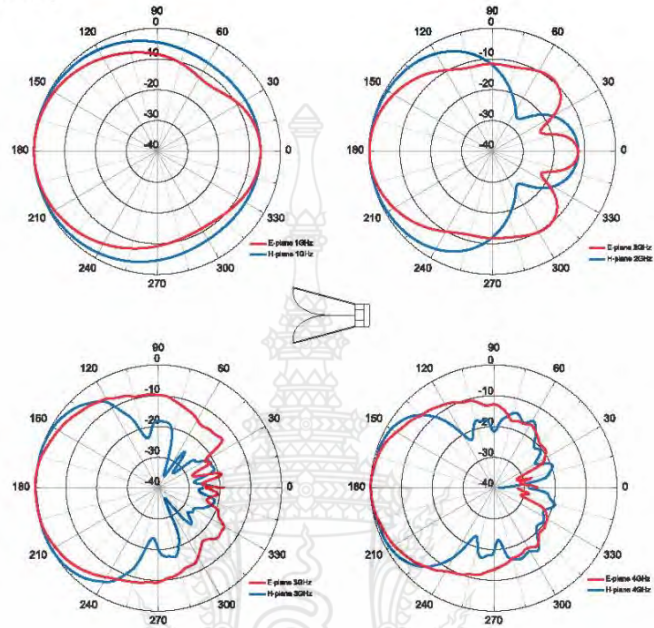
Model 3117 Forward Power @ 1 m



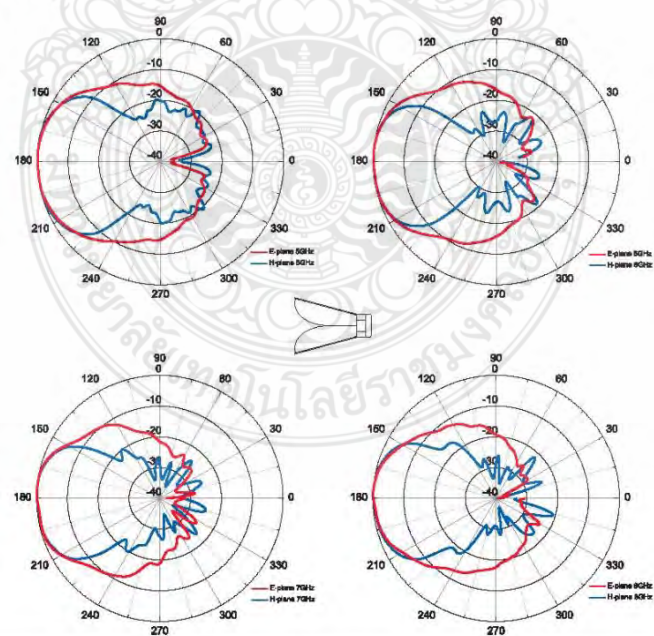
Model 3117 VSWR



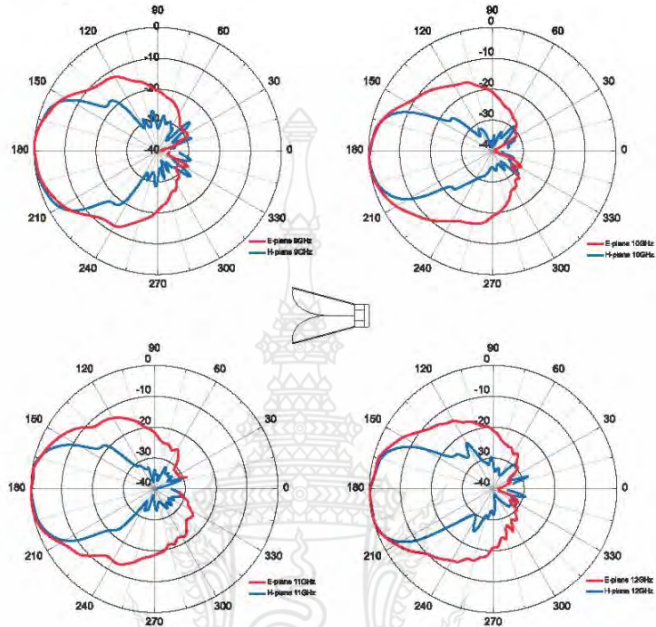
Model 3117 (1 GHz - 4 GHz)



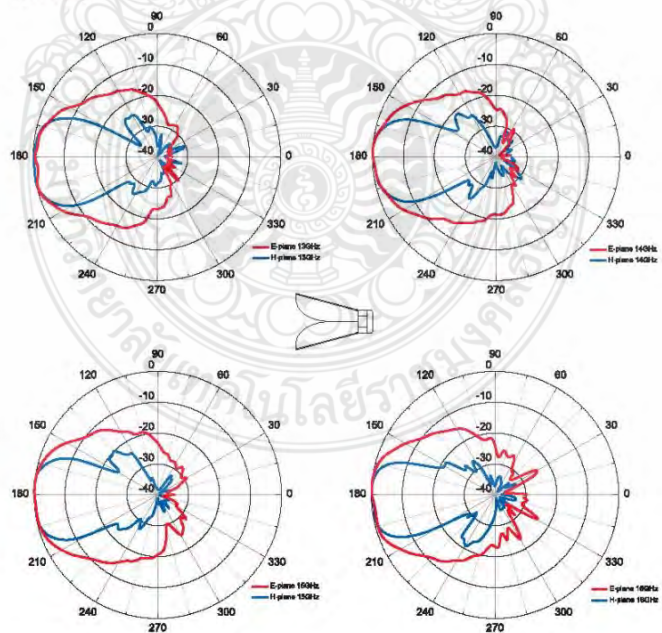
Model 3117 (5 GHz - 8 GHz)



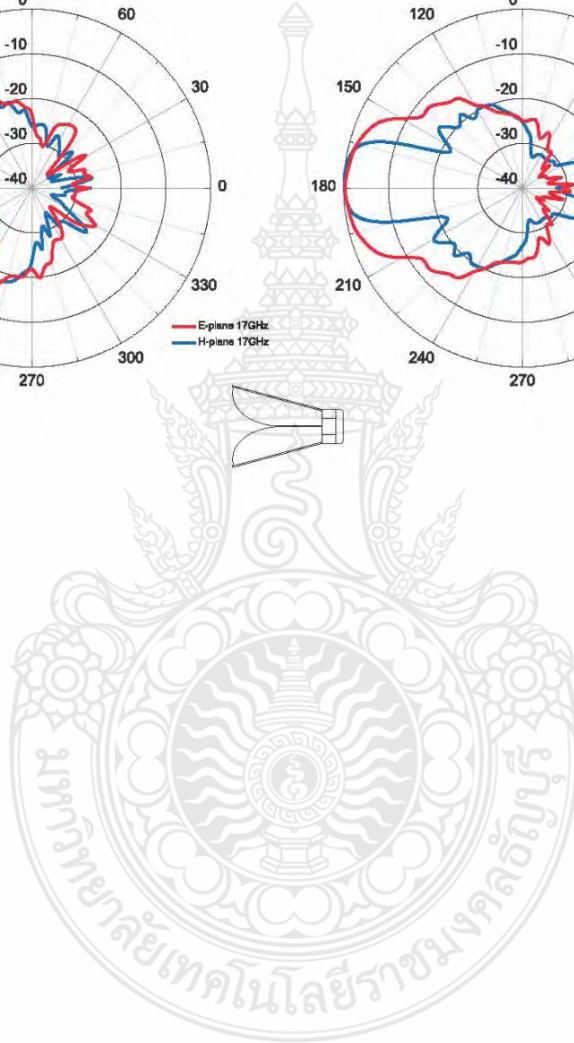
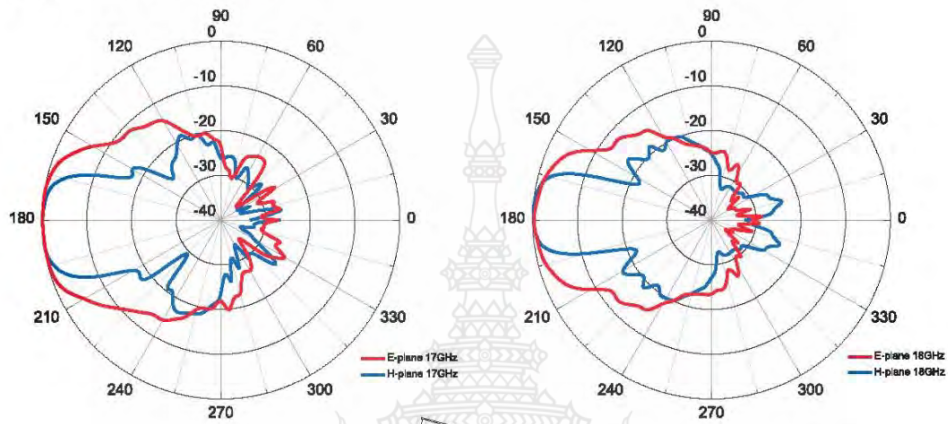
Model 3117 (9 GHz - 12 GHz)




Model 3117 (13 GHz - 16 GHz)



Model 3117 (17 GHz - 18 GHz)





ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของหัว SMA Connector



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



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 Cabled Connectors	Right Angle Cabled Connectors
RG-178 cable	1.20 + .025f	1.20 + .03f
RG-316, LMR-100 cable	1.15 + .02f	1.15 + .03f
RG-58, LMR-195 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f
RG-142 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f
LMR-200, LMR-240 cable	1.10 + .03f	1.10 + .06f
.086 semi-rigid	1.07 + .008f	1.18 + .015f
.141 semi-rigid (w/contact)	1.05 + .008f	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)[†]

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	\sqrt{f} (GHz), tested at 6 GHz
Right angle flexible cable connectors	0.15	\sqrt{f} (GHz), tested at 6 GHz
Straight semi-rigid cable connectors with contact	0.03	\sqrt{f} (GHz), tested at 10 GHz
Right angle semi-rigid cable connectors	0.05	\sqrt{f} (GHz), tested at 10 GHz
Straight semi-rigid cable connectors w/o contact	0.03	\sqrt{f} (GHz), tested at 16 GHz
Straight low loss flexible cable connectors	0.06	\sqrt{f} (GHz), tested at 1 GHz
Right Angle low loss flexible cable connectors	0.15	\sqrt{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 exceeds 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

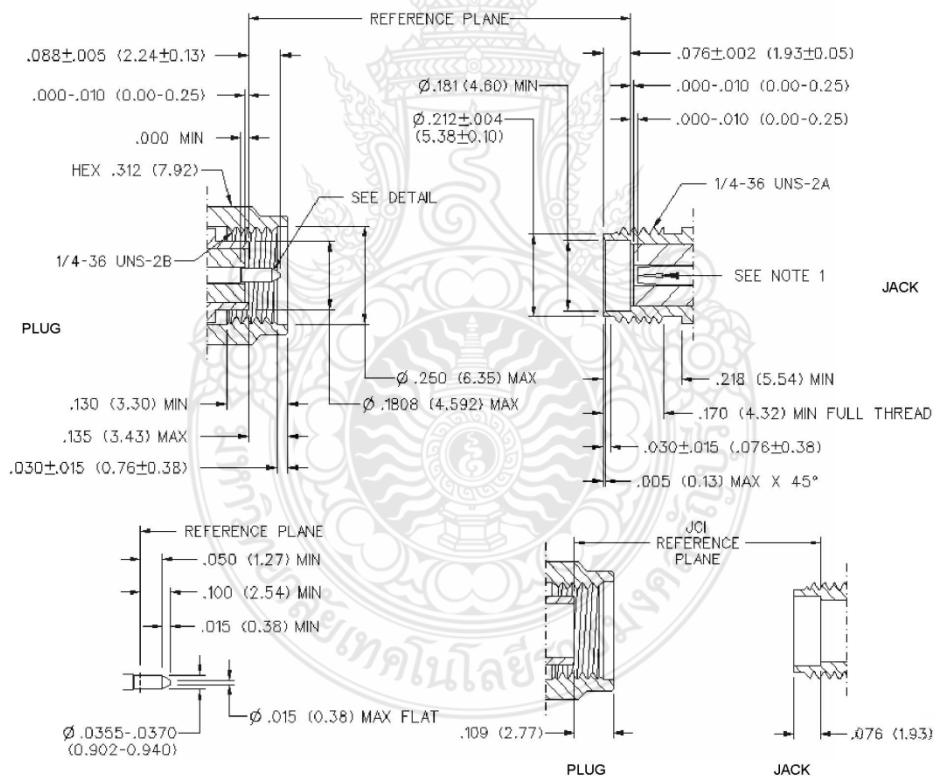
Mounting Hardware: Brass per QQ-B-626 or QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

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

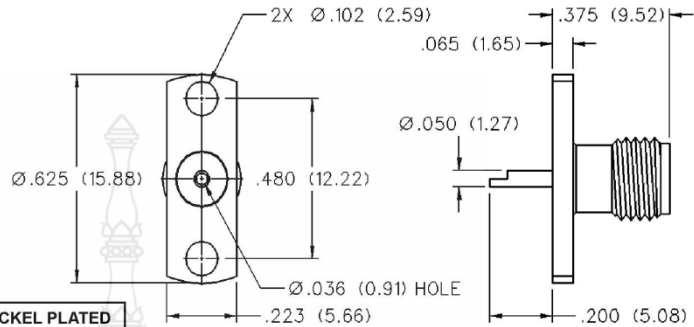
1. ID OF CONTACT TO MEET VSWR, CONTACT RESISTANCE AND INSERTION WITHDRAWAL FORCES WHEN MATED WITH DIA .0355-.0370 MALE PIN.

SMA - 50 Ohm Connectors



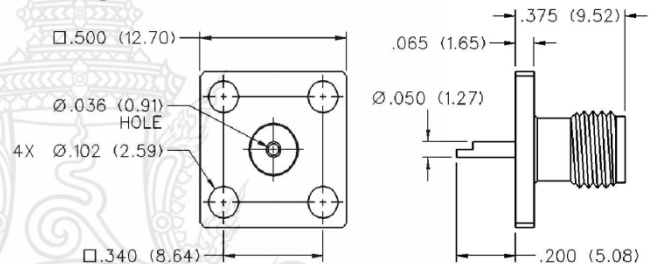
Panel Mount

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



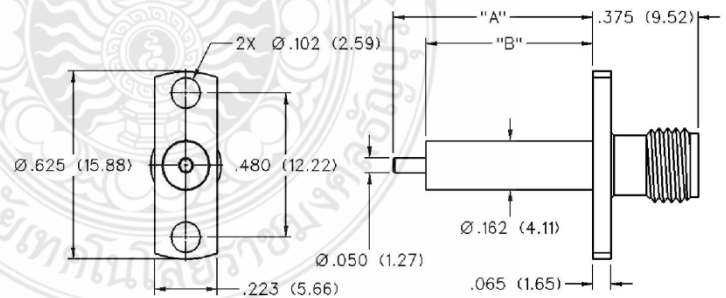
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-621	142-0701-626

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

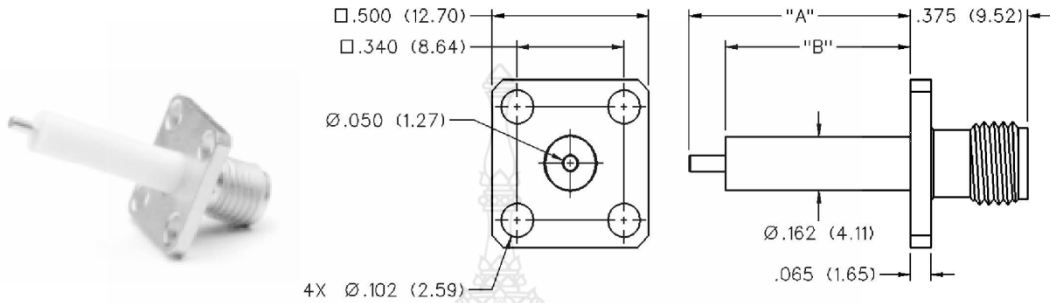
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



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)

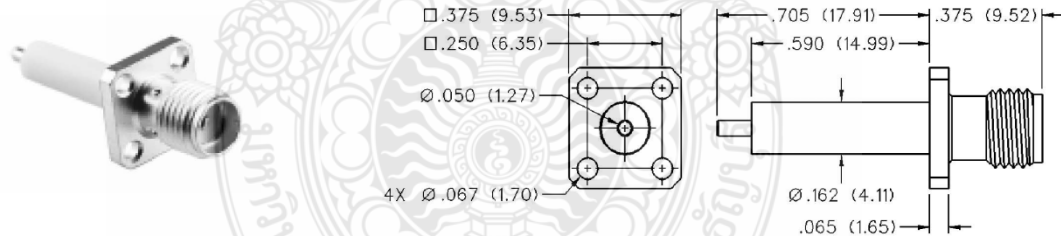
Johnson Components® • P.O. Box 1732 • Waseca, MN 56093-0832 • 1-800-247-8256 • Fax: 507-835-6287 • www.johnsoncomp.com

**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**



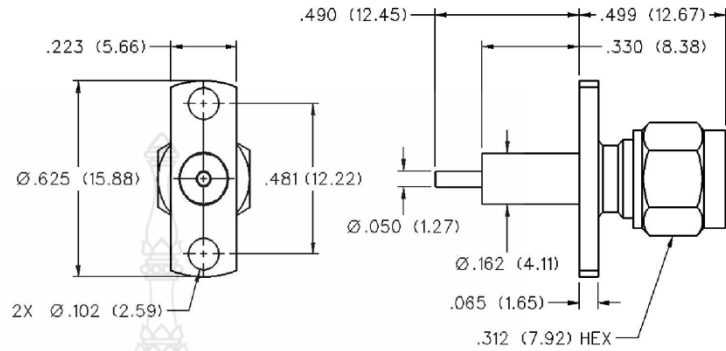
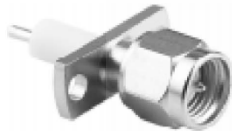
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1701-011	142-1701-016

SMA - 50 Ohm Connectors



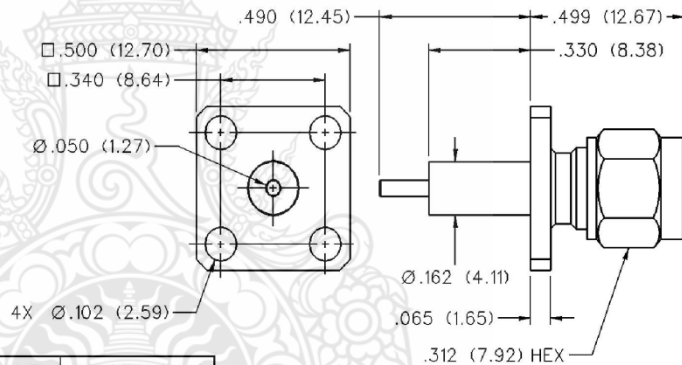
Panel Mount

2-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric



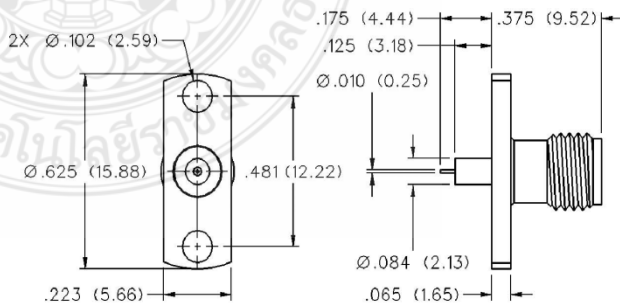
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1801-041	142-1801-046

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

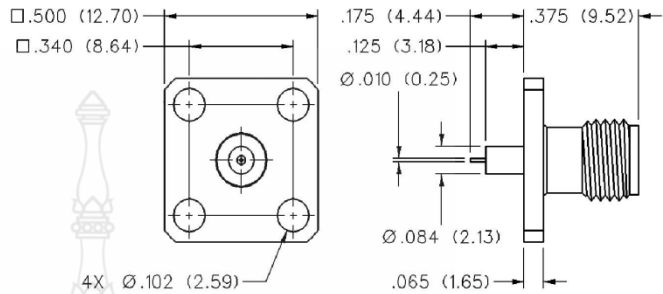
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



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

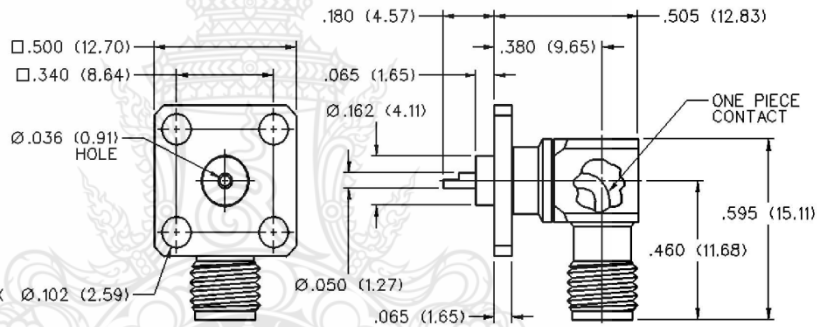
Johnson Components® • P.O. Box 1732 • Waseca, MN 56093-0832 • 1-800-247-8256 • Fax: 507-835-6287 • www.johnsoncomp.com

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



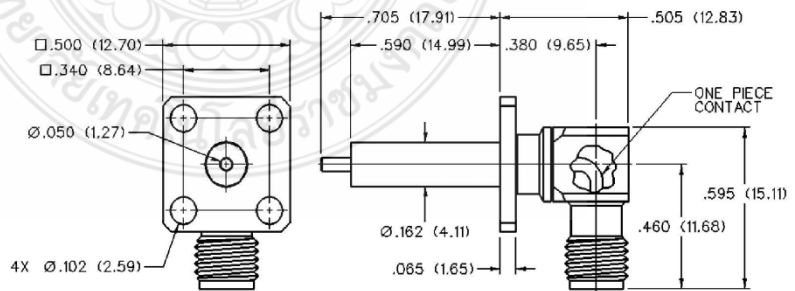
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1701-191	142-1701-196

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**



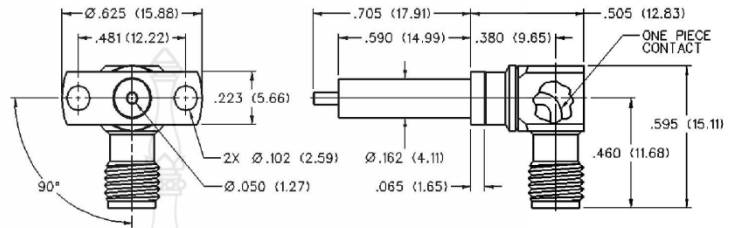
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-001	142-1711-006

SMA - 50 Ohm Connectors



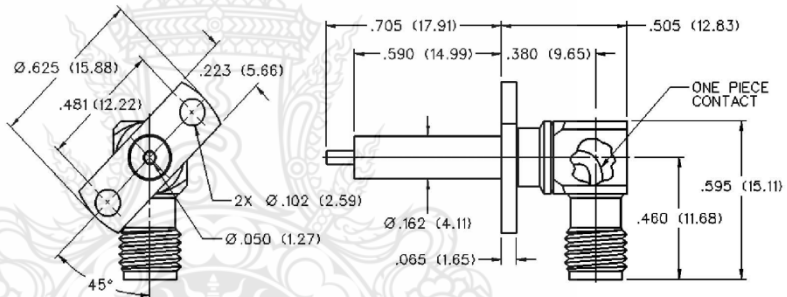
Panel Mount

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



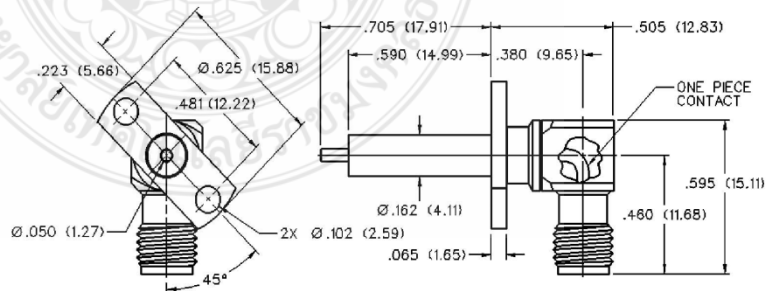
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-011	142-1711-016

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
ผลงานที่ได้ตีพิมพ์



ผลงานที่ได้ตีพิมพ์

- [1] ขวัญหทัย โพธิ์แจ้ และ ไพฑูรย์ รักเหลือ, “การออกแบบสายอากาศลวดพริวดิกสำหรับระบบ WLAN/HSPA/LTE/UWB,” การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8 (ECTI-CARD 2016), หัวหิน, 27-29 กรกฎาคม 2559
- [2] K. Pojang and P. Raklua, "The Design of Log Periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UWB Applications," in 2018 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2018, pp. 66-69: IEEE.





การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8
ECTI CARD 2016

การประชุมใช้เทคโนโลยีอย่างชาญฉลาด เพื่อตอบสนองภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน

วันที่ 27-29 กรกฎาคม พ.ศ.2559

ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ โฮเทล แอนด์ รีสอร์ท

อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

จัดโดย

สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคมและสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
สถาบันมาตรฐานแห่งชาติ

วันพุธที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2559		SESSION 2
Antenna Tech#2 ห้อง เขาเต่า ชั้น 1 ประธาน : รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์		
10:30 - 12:00 น.		
ID	เรื่อง / ผู้แต่ง	หน้า
1020	สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วย โมโนโพลแผ่นบาง ชานนท์ ปรางษา, ดวงอาทิตย์ ศรีมูล	285
1021	สายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์แถบความถี่กว้าง กัญญ์พิชญา ตั้งสกุลเดิม, ดวงอาทิตย์ ศรีมูล	289
1075	การออกแบบสายอากาศไดโพลล็อกฟริออดิกสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN/HSPA/LTE/UMB ขวัญทัย โพธิ์แข็ง, ไพฑูรย์ รักเหลือ	293
1077	สายอากาศโมโนโพลทรงกลมแถบความถี่กว้างยิ่งยวดกับเทคนิคการเจาะช่องกากบาท ปกรณเกียรติ์ เศรษฐนิกุล, ทวีศักดิ์ สุขเจริญทรัพย์, ชลดา ปานสง, กัทรวรรณ ชุ่มสายันต์, อนุวัฒน์ แสนทวีสุข, คัมภีร์ รุ่งกลิ่น	297
1092	การออกแบบและสร้างสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลอยด์ นพพล ปานมูล, สุธาสิณี นวี, นิพนธ์ เลิศมโนกุล, ระพีพัทธ์ ชัดมิก	301
1170	การศึกษารูปแบบโครงสร้างสายอากาศแบบโมโนโพลรูปลั๊กไฟสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย อำนาจ เวียงวารี, สาทิน จันระนาด, วัชรพล นาคทอง, ปิยะดิษฐ์ บุญโสมศรี	305
พักรับประทานอาหารกลางวัน 12:00 - 13:00 น.		

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8

๕ ECIT-CARD 2016, Hua Hin, Thailand

การออกแบบสายอากาศไดโพลล็อกพีริออดิกสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN/HSPA/LTE/UMB

Log – Periodic Dipole Antenna Design for WLAN/HSPA/LTE/UMB Applications

ขวัญชัย โทษะจั้ง และ ไพฑูรย์ รักเหลือ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก (คลองหก) อีเกอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ : 064-4923592 E-mail : kwanhatai@mail.mutt.ac.th, paitoon_r@mutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลล็อกพีริออดิกสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN/HSPA/LTE/UMB บนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีค่าไดอิเล็กทริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.3 โดยมีการเชื่อมต่ออินพุตแดนซ์ที่ 50 โอห์ม ผลที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศจริงสายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 1.4 GHz ถึง 12 GHz มีรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียว และมีอัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ย (Gain) 3.19 dBi สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra wideband, UWB) IEEE 802.15.3 a, HSPA (High Speed Packet Access) IEEE 802.16, LTE (Long Term Evolution) IEEE 802.16m, อาร์เอฟไอดี (RFID) IEEE 802.15.4, เครือข่ายไร้สาย (WLAN) IEEE 802.11 a/b/g, บลูทูธ (Bluetooth) และ ไวแมกซ์ (WiMAX) IEEE 802.16 a/d

คำสำคัญ: สายอากาศล็อกพีริออดิก, อัลตราไวด์แบนด์, เครือข่ายไร้สาย

Abstract

This paper, the log-periodic dipole antenna presented the serve in WLAN/HSPA/LTE/UMB. The antenna was fabricated on FR4 substrate with dielectric constant (ϵ_r) 4.3, excited through a microstrip line feed by 50 ohm of impedance matching. The measurement result shown that the proposed antenna achieved a wide impedance bandwidth of 1.4 GHz. to 12 GHz. The radiation pattern of this antenna was unidirectional and 3.19 dBi of Gain. Good agreement between simulated and measured result indicated that the proposed antenna is suitable to use in Ultra Wide Band (UWB) IEEE 802.15.3 a, High-Speed Packet Access (HSPA) IEEE 802.16, Long Term Evolution (LTE) IEEE 802.16m, Radio Frequency Identification (RFID) IEEE 802.15.4, Wireless Networks (WLAN) IEEE 802.11 a/b/g, Bluetooth and WiMAX IEEE 802.16 a/d.

Keywords: Log – Periodic dipole Antenna, Ultra Wideband, WLAN

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless communication System) ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก และอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการรับและส่งคลื่นวิทยุคือ สายอากาศ (Antenna) สายอากาศมีอยู่หลายประเภท และสายอากาศไดโพลแบบล็อกพีริออดิก (Log - periodic dipole, LPD Antenna) นิยมใช้กันอีกโครงสร้างหนึ่ง เนื่องจากมีช่วงการตอบสนองความถี่กว้างอีกทั้งมีอัตราการขยายสูง และมีความถี่ที่กว้าง จึงเป็นที่นิยมในงานสื่อสารที่ต้องใช้ความถี่กว้าง และเป็นสายอากาศที่น่าสนใจเพื่อนำมาใช้งานในชุดของกรรณีสถาปัตยกรรมไร้สาย [1]

จากการศึกษารววิจัย สายอากาศล็อกพีริออดิกที่มีขนาดใหญ่ และมีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่า [2 - 3] จึงได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศ โดยใช้วิธีเชิงประจักษ์ควบคู่กับการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) มาจำลองค่าขนาดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ UWB - Ultra wideband ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3 a (3.1 GHz – 10.6 GHz) [4], HSPA - High Speed Packet Access ตามมาตรฐาน IEEE 802.16 (850/900/1700/1900/2100 MHz), LTE - Long Term Evolution ตามมาตรฐาน IEEE 802.16m (1800 MHz), RFID - Radio frequency identification (2.45 GHz และ 5.8 GHz), WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g (2.40 GHz – 2.82 GHz และ 5.1 GHz - 5.8 GHz), Bluetooth และ WiMAX ตามมาตรฐาน IEEE 802.16 a/d (2.05 GHz – 6.52 GHz) [5]

2. การออกแบบสายอากาศล็อกพีริออดิก

การหาจำนวนอิลิเมนต์ของสายอากาศ (N) นั้นจะใช้สมการที่ (1) ซึ่งจากการคำนวณ จะได้ลิเนตส์รูปสี่เหลี่ยมคี่ด้านทั้งด้านบนและด้านล่างมีจำนวนรองด้านละ 8 อิลิเมนต์ (2) สมการที่ (2) และ (3) ใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอิลิเมนต์

$$N = 1 + \frac{\log B_s}{\log \left(\frac{1}{\tau} \right)} \quad (1)$$

$$L_{n+1} = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2 f_{\min}}, \quad \frac{1}{\tau} = \frac{L_{n+1}}{L_n} \quad (2)$$

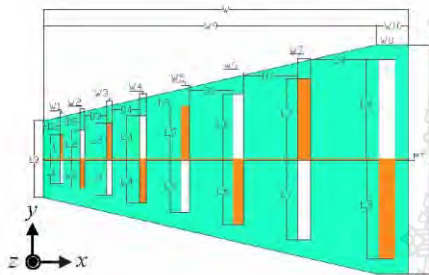
⁸ ECIT-CARD 2016 “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอย่างชาญฉลาดเพื่อตอบสนองภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน”

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8
 © ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W_{n+1}}{W_n} \cdot W_{n+1} - \pi x_a \quad (3)$$

2.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลล็อกฟริออดิก



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลล็อกฟริออดิก

โครงสร้างสายอากาศ ไดโพลล็อกฟริออดิกสำหรับการใช้งาน
 ในย่านความถี่ 1.4 GHz ถึง 12 GHz บนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มี
 ค่าไดอิเล็กทริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.3 ความสูงของฐานรอง $h = 0.8$ mm และ
 ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป $w_f = 0.8$ mm จากการคำนวณ
 สายอากาศจะมีความกว้าง $W = 115$ mm และมีความยาว $L = 72.2$ mm
 ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอิลิเมนต์ (Element) ทั้งด้านหน้า (สีเขียว)
 และด้านหลัง (สีชมพู) ตามตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ W, L
 และ $D_n - D_n$ (ระยะห่างระหว่างแต่ละอิลิเมนต์)

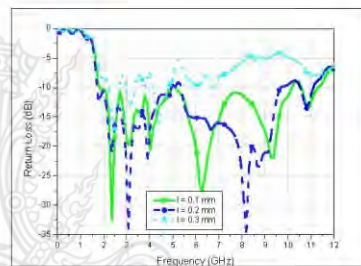
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของโครงสร้างสายอากาศไดโพลล็อกฟริออดิก

Parameter	length	Parameter	length	Parameter	length
W	115	L	72.2	D1	4.347
W1	1.107	L1	6.243	D2	5.222
W2	1.383	L2	7.805	D3	6.967
W3	1.728	L3	9.757	D4	8.708
W4	2.162	L4	12.190	D5	10.885
W5	2.702	L5	15.245	D6	13.608
W6	3.377	L6	19.057	D7	17.008
W7	4.222	L7	23.820	D8	21.261
W8	5.277	L8	29.760		
W9	105	L9	24		
W10	10				

2.2 ผลการจำลองแบบ

จากโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 1 ทำการวิเคราะห์
 โครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง
 ของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และอัตราการ
 ขยายของสายอากาศ พบว่าขนาดความกว้างและความยาวของอิลิเมนต์มี
 ผลต่อค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเป็นอย่างมาก
 ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์อิลิเมนต์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศมีความถี่เร
 โยซ์เนนซ์ที่สามารถรองรับย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานได้อย่างมี
 ประสิทธิภาพมากที่สุด

ซึ่งจากการวิเคราะห์อิลิเมนต์เพื่อการออกแบบสายอากาศ
 ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ
 ยังมีค่ามากกว่า 10 dB ที่ช่วงความถี่ 4 GHz - 5.5 GHz และช่วงความถี่ 9.5
 GHz - 10.5 GHz จึงต้องทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยการ
 วิเคราะห์อิลิเมนต์ต่างๆ เริ่มจากการวิเคราะห์ความยาวของอิลิเมนต์
 (L1 - L8)



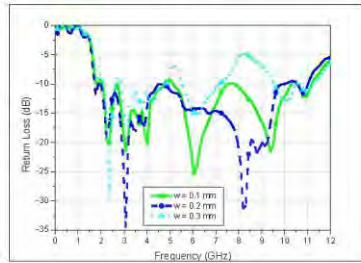
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ
 ในกรณีวิเคราะห์ความยาวของอิลิเมนต์

รูปที่ 2 แสดงการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียเนื่องจากการ
 ย้อนกลับโดยการเพิ่มความยาวให้อิลิเมนต์ (L1 - L8) โดยกำหนดค่า l
 เป็น 0.1 mm, 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าที่ l = 0.2 mm
 นั้น มีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับใกล้เคียงกับขอบเขตที่ต้องการ แต่
 ช่วงความถี่ 4.7 GHz ถึง 5.3 GHz มีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับยังสูง
 กว่า 10 dB จึงทำการวิเคราะห์ความกว้างของอิลิเมนต์ (W1 - W8)
 ต่อไป

8th ECTI-CARD 2016 “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอย่างชาญฉลาดเพื่อตอบสนองภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน”

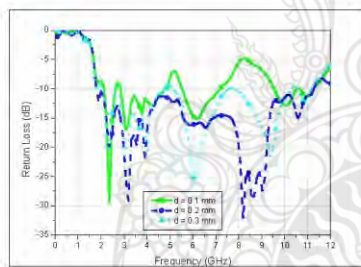
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8
 ๘^๑ ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand



รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ในการปรับความกว้างของอิลิมินต์

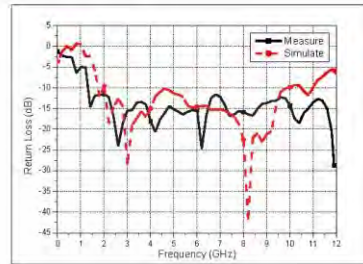
รูปที่ 3 แสดงการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเพิ่มความกว้างให้อิลิมินต์ (W1 - W8) โดยกำหนดค่า w ให้ลดลง 0.1 mm, 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าที่ w = 0.2 mm นั้น มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า 10 dB ใกล้เคียงกับขอบเขตที่ต้องการ แต่ช่วงความถี่ 4.2 GHz ถึง 4.3 GHz ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าสูงกว่า 10 dB จึงได้ทำการเพิ่มระยะห่างของอิลิมินต์ D4 ต่อไป



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ในการปรับระยะห่างของอิลิมินต์ D4

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในการปรับระยะห่างของอิลิมินต์ D4 โดยกำหนดค่า d ให้ลดลง 0.1 mm, 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าที่ d = 0.2 mm นั้นมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า 10 dB ตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 9.7 GHz หรือเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 140.35% มีอัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ย 4.18 dBi

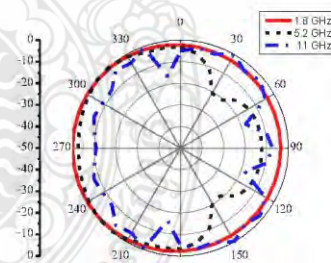
3. การทดสอบสายอากาศ



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบและการวัดทดสอบจริง

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบโดยโปรแกรม CST และผลการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจากเครื่อง PNA Network Analyzer จะเห็นว่าผลจากการวัดด้วยเครื่อง PNA Network Analyzer นี้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB ตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.4 GHz ถึง 12 GHz หรือเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 158.2% มีอัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ย 3.19 dBi

จากนั้นได้ทำการวัดรูปแบบการแผ่รังสีงานที่ความถี่ 1.8 GHz, 5.2 GHz และ 11 GHz และนำผลการวัดที่ได้ ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 9 มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ ดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 8 ซึ่งจากผลการวัดทดสอบจริงนี้จะเห็นว่ารูปแบบการแผ่รังสีงานของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียว

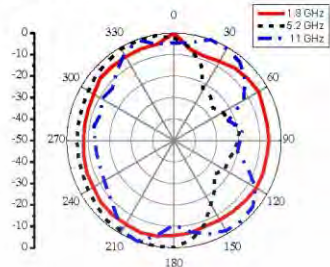


รูปที่ 6 ผลการจำลองในระนาบ X-Z ที่ความถี่ 1.8 GHz, 5.2 GHz และ 11 GHz.

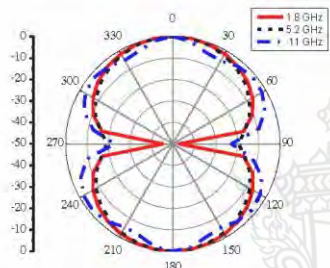
^๑ ECTI-CARD 2016 “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอย่างชาญฉลาดเพื่อตอบสนองภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน”

บทความวิจัย

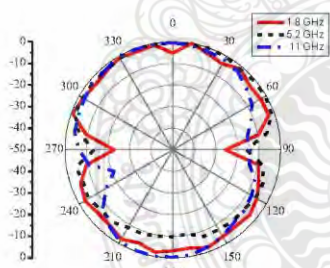
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8
 ๕^๙ ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand



รูปที่ 7 ผลการวัดทดสอบในระนาบ X-Z ที่ความถี่ 1.8 GHz, 5.2 GHz และ 11 GHz.



รูปที่ 8 ผลการจำลองในระนาบ Y-Z ที่ความถี่ 1.8 GHz, 5.2 GHz และ 11 GHz.



รูปที่ 9 ผลการวัดทดสอบในระนาบ Y-Z ที่ความถี่ 1.8 GHz, 5.2 GHz และ 11 GHz.

3. สรุป

สายอากาศไดโพลสี่กัหรือดิกอนแบนวงจรมีพี FR4 ที่นำเสนอในบทความนี้ ได้นำเทคนิคเชิงประสบการณ์มาออกแบบสายอากาศสำหรับ WLAN/HSPA/LTE/UWB ซึ่งลักษณะการแผ่กระจาย

เป็นแบบทิศทางเดียวในระนาบสามแนวหลัก (ระนาบ XZ) มีค่าไดโพลเกทริก 4.3 ความสูงของวัสดุฐานรอง 0.8 mm และเปลี่ยนสายส่งไมโครสตริปที่มีความหนา 0.8 mm: สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.4 GHz ถึง 12 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ย 3.19 dBi

เอกสารอ้างอิง

[1] Qiu Jinghui, Lin Sh Yaratng Cairian and You Qidi, "A Novel Printed Fractal Log - Periodic Dipole Antenna," International Conference on Microwave Electronics : Measurements, Identification, Applications, pp. 50 - 53, 2005.

[2] Ali Khaleghi, H. Sarbandi Farahani and I. Balasingham, "Impulse Radiating Log-Periodic Dipole Array Antenna Using Time -Reversal Technique," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol 10, pp. 967 - 970, 2011.

[3] Megha Dadel, K.P.Tiwary and S. Srivastava "Log Periodic Triangular Patch Array Antenna with Gap Coupled Feed," International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), pp.99 - 104, 2015.

[4] Grzegorz Adamiak, Thomas Zwick, and Werner Wiesbeck, "UWB Antennas for Communication Systems," Proceedings of the IEEE, Vol. 100, pp. 2308 - 2321, 2012.

[5] Giovanni A. Casula, Paolo Maxia, Giuseppe Mazzarella, and Giorgio Montisci, "Design Of A Printed Log - Periodic Dipole Array For Ultra - Wideband Applications," Electromagnetics Research C, Vol. 38, 15- 26, 2013.



นางสาววัฐหทัย โพธิ์นัง สำเร็จการศึกษา ว.ศ.บ. วิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร, มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ปัจจุบันกำลังศึกษามหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ และ โพรทอนานคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design



ดร. ไพฑูรย์ รักเหื้อ สำเร็จการศึกษา อ.ศ.บ. เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ (เทียบโอนอันดับ 2), ว.ศ. บ. วิศวกรรมสารสนเทศ และว.ศ.ด. วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และ โพรทอนานคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^๙ ECTI-CARD 2016 "การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีอย่างชาญฉลาดเพื่อตอบสนองภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน"

IS C IT
2018

"Communication and IT for Smart City"



Proceedings of The 18th International Symposium on Communications and Information Technologies

September 26-29, 2018
at Sukosol Hotel, Bangkok, Thailand



Table of Contents

Keynote			vi
Venue			xi
Schedule			xii
Circuit and Systems			
A1	1570449751	High-Accuracy Phase-Compensating System Design Using Successively Linearized Constraints	1
A2	1570456690	Switchable Triple-band Filter with Common Resonators and Hybrid Coupling Scheme	5
A3	1570457044	A New Method of Analysis of the Sign Algorithm Based on Gaussian Distributed Tap Weights	11
A4	1570462559	Low-complexity Digital Modem Implementation for High-Speed Point-to-Point Wireless Communications	16
A5	1570467659	Design high speed and low power hybrid full adder circuit	22
Wireless Communications			
B1	1570457170	Performance Analysis of MIMO CO-OFDM FSO System under Joint Effect Channel	26
B2	1570461281	Performance Analysis of Full Duplex D2D in Opportunistic Spectrum Access	32
B3	1570462667	Iterative Channel Estimation with Polar Codes for Short Block Transmission	38
B4	1570462689	Constant Modulus and Kurtosis based Blind Adaptive Array Interference Suppression: Comparisons and New Approach	43
B5	1570462754	Reduced Complexity Direction-of-Arrival Estimation for 2D Planar Massive Arrays: A Separation Approach	48
Wireless Networking and Internet of Things			
C1	1570462600	Develop An Indoor Space Ontology For Finding Lost Properties For Location-Based Service Of Smart City	54
C2	1570463036	A Software Cache Mechanism for Reducing the OpenSDB Query Time	60
C3	1570468820	The Design of Log Periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UWB Applications	66
C4	1570469621	Received Signal Strength Distribution Approximation for IEEE 802.15.4 Zigbee Smart Grid Networks	70
C5	1570471375	Efficiency Improvement in Wireless Power Transfer System at 2.45 GHz by Using Metamaterials	74
Computational Intelligence & Data Science			
D1	1570462091	Vehicle License Plate Recognition System Based on Deep Learning Deployed to PYNQ	79
D2	1570462953	A Deep Contractive Auto-encoding Network for Machinery Fault Diagnosis	85

The Design of Log Periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UWB Applications

Kwanhatai Pojang
 Department of Electronics and Telecommunications
 Engineering, Faculty of Engineering
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)
 39, Rangsit-Nakhonnayok Road, Pathumthani, Thailand
 kwanhatai@mail.rmutt.ac.th

Paitoon Raklua
 Department of Electronics and Telecommunications
 Engineering, Faculty of Engineering
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)
 39, Rangsit-Nakhonnayok Road, Pathumthani, Thailand
 paitoon_r@rmutt.ac.th

Abstract The Design of Log-periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UWB Applications was fabricated on FR4 substrate with dielectric constant (ϵ_r) 4.3, excited through a microstrip line fed by 50 ohm of impedance matching. The measurement result showed that the proposed antenna achieved a wide impedance bandwidth of 1.4 GHz to 12 GHz, giving the average efficiency of 75.32% and the average gain of 4.51 dBi. They showed the positive agreement between simulated and measured result which indicated that the proposed antenna is suitable to use in Ultra Wide Band (UWB) IEEE 802.15.3 a, Long Term Evolution (LTE) IEEE 802.16m, Wireless Networks (WLAN) IEEE 802.11 a/b/g, Bluetooth and WiMAX IEEE 802.16 a/d.

Keywords- Log-periodic dipole array antenna, WLAN, LTE, Ultrawideband.

I. INTRODUCTION

Modern communication system needs broadband, miniaturized and universal equipment [1]. The increasing demands of different protocols for different frequency spectrums to support high data rate wireless transmissions communications for antennas are to operate in different frequency bands simultaneously [2].

The findings of studies on various techniques to foreshorten the dipole have been considered by many researches and great achievements have been made [3]. The log-periodic dipole antenna structure is similar to a proximity coupled antenna which is a larger scale [4-6] limited of bandwidth frequency [7], the low frequency [8] and the narrow beam [9, 10].

This paper proposes the log-periodic dipole array antenna for WLAN/LTE/UWB applications fabricated on FR4 substrate with dielectric constant (ϵ_r) 4.3, excited through a microstrip line fed by 50 ohm of impedance matching. The measurement result showed that the proposed antenna achieved a wide impedance bandwidth of 1.4 GHz to 12 GHz. The average efficiency was 75.32% and the average gain was of 4.51 dBi. It is suitable to apply to the Ultra wide band, UWB (IEEE 802.15.3 a (3.1 GHz - 10.6 GHz)), RFID (2.45 GHz and 5.8 GHz), WLAN (IEEE 802.11 a/b/g (2.40 GHz - 2.82 GHz and 5.1 GHz - 5.8 GHz)), Bluetooth and WiMAX (IEEE 802.16 a/d (2.05 GHz - 6.52 GHz)).

II. STRUCTURE AND DESIGNING PRINCIPLES

The designing principles of antenna structure must be calculating the length of elements parameter. Due to the size of the component, it has a significant impact on the frequency band. The length of parameter capable calculated the geometric scaling factor (τ) and spacing factor (σ) as shown in Fig.1.

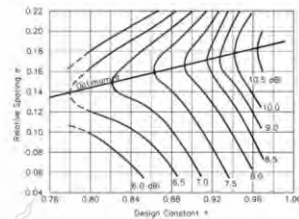


Fig.1 Design variable σ , τ and Gain in log-periodic dipole array

A. Antenna Design and Simulation Results

The ultimate goal of any antenna configuration is the design that meets certain specifications. The step by step design procedure of the log-periodic dipole array started by finding τ , σ , and α related by

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1-\tau}{4\sigma} \right] \quad (1)$$

In this section, the number of equations are introduced in order to design a log-periodic dipole array. The bandwidth of the system determines the lengths of the shortest and the longest elements of the structure, the width of the active region depends on the specific design as well. Carrel has introduced a semi empirical equation to calculate the bandwidth of the active region Bar related to α and τ by

$$B_a = 1.1 + 7.7(1-\tau)^2 \cot \alpha \quad (2)$$

In practice a slightly larger bandwidth (B_s) is usually designed than that which is required (B). The two are related [11] by

$$B_s = BB_a = 1.1 + 7.7(1-\tau)^2 \cot \alpha \quad (3)$$

where

$$B = f_H - f_L \quad (4)$$

From the geometry of the system, the number of elements are determined by

$$N = 1 + \frac{\log B_s}{\log \left(\frac{1}{\tau} \right)} \quad (5)$$

In addition to mentioned parameters, there is one more important point must be considered for designing any printed antenna. It is the width of characteristic impedance of feed line. It can be calculated from the formula given. L is length of feed line, W is distance between feed line L_n to L_{n+1} , D is width feed line

$$L_n = \frac{\lambda_{fc}}{4} \left[1 - \frac{1}{B_z} \right] \cot \sigma \quad (6)$$

Where

$$\lambda_{fc} = \frac{C}{f_L} \quad (7)$$

And

$$L_{n+1} = \tau L_n + 1 \quad (8)$$

$$W_n = \sigma 2L_n \quad (9)$$

$$D_n = \sigma 2W_n \quad (10)$$

B. Simulation Results

The structure of the antenna was designed as equation (1-10). The analysis of optimized parameter was done by using the empirical and the simulation methods with computer simulated technology (CST) program. The result of simulated the voltage standing wave ratio (VSWR) was found that the operated frequency ranges from 1.14 GHz - 4.2 GHz and 5.5 GHz - 9.5 GHz as shown in Fig.2. (Calculated) but the bandwidth frequency was not covering WLAN, LTE and UWB. Therefore, from the study in literature review, there are 2 steps to optimize in this session in order to improve bandwidth frequency of 4.2 GHz - 5.5 GHz.

Firstly, adjusted the width (W) [12] from calculated, 1.0 mm and 2.0 mm. It was observed that the appropriated width of 1 mm. The dual frequency ranges from 1.4 GHz - 5.1 GHz and 5.5 GHz - 12 GHz as shown in Fig.2 ($W = 1.0$ mm).

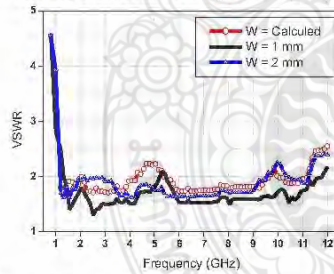


Fig.2 The simulation results of VSWR when adjust W .

Secondly, used technique adjusting the distance (D) [13] from 0.5 mm, 1.0 mm and 1.5 mm. It was noticed that the appropriated distance was of $D = 1.0$ mm. While the operated frequency was of 1.4 GHz - 12 GHz as shown in Fig. 3.

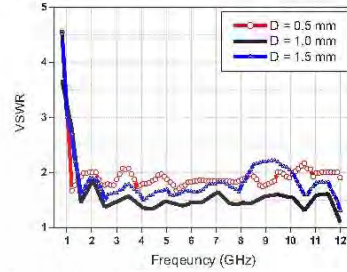


Fig.3 The simulation results of VSWR when adjust D .

Thereafter the current distribution from CST program at frequency 1.8 GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz and 11 GHz respectively, after adjusting parameter in every element seen in Fig.4.

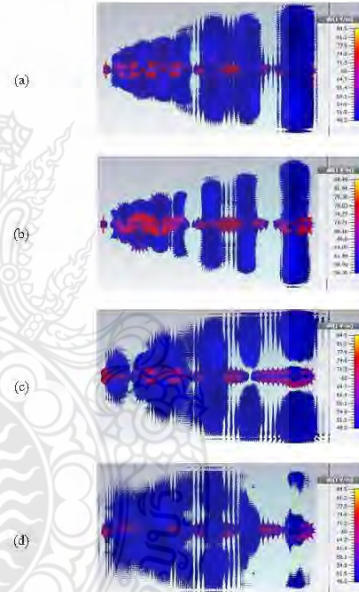


Fig.4 Current distribution at frequency 1.8 GHz (a), 3.5 GHz (b), 5.2 GHz (c) and 11 GHz (d) after adjust parameter every element.

C. Antenna Structure

This paper proposes The Design of Log-periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UBW Applications which was fabricated on FR4 substrate with dielectric constant (ϵ_r) 4.3 and substrate width (W) 115 mm and length (L) 72.2 mm excited through a microstrip line feed by 50 ohm of impedance matching. The proposed antenna structure was shown in Fig.5. The parameter of the proposed antenna are show in TABLE I.

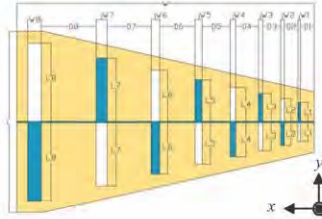


Fig.5 The proposed antenna structure.

TABLE I. THE PARAMETERS OF THE PROPOSED ANTENNA.

n	1	2	3	4	5	6	7	8
W_n (mm)	1.107	1.383	1.728	2.162	2.702	3.377	4.222	5.277
L_n (mm)	6.243	7.805	9.757	12.19	15.245	19.057	23.82	29.76
D_n (mm)	4.347	5.222	6.967	8.708	10.885	13.608	17.008	21.261

III. FABRICATION AND MEASUREMENT RESULTS

The prototype fabricated of The Design of Log-periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UBW Applications shown in Fig.6. The measurement results of VSWR less than 2 at frequency range of 1.4 GHz - 12 GHz. The comparison between the simulation and the measurement are shown in Fig.7. The measurement result of average gain of 4.51 dBi as shown in Fig.8. The Comparison between simulated and measured of radiation pattern at 1.8 GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz and 11 GHz on E-plane and H-Plane as seen in Fig.9 - 12 respectively.



Fig.6 The prototype of fabricated antenna.

In addition, the efficiency is the important parameter and is related to antenna efficiency comparing between the simulated and the measurement. It can be observed that the measurement of the average efficiency was 75.32% as seen in Fig. 13.

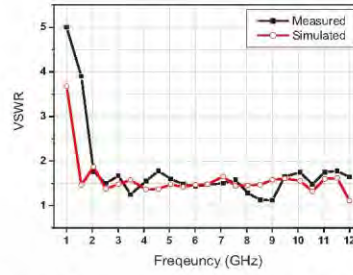


Fig.7 Comparison between simulated and measured results for the proposed antenna.

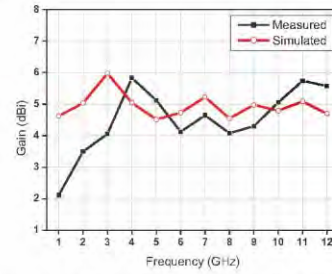


Fig.8 Comparison between simulated and measured results of Gain (dBi)

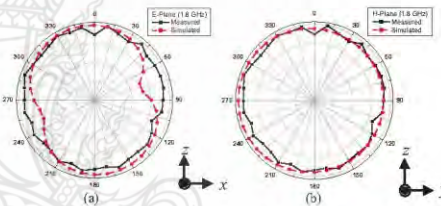


Fig.9 Comparison between simulated and measured of radiation pattern at 1.8 GHz on E-plane (a) and H-plane (b).

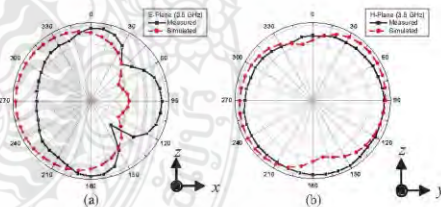


Fig.10 Comparison between simulated and measured of radiation pattern at 3.5 GHz on E-plane (a) and H-plane (b).

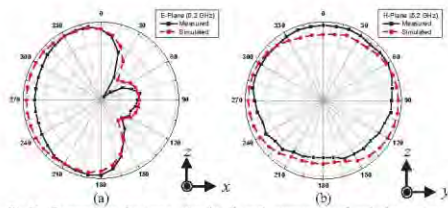


Fig.11 Comparison between simulated and measured of radiation pattern at 5.2 GHz on E-plane (a) and H-plane (b).

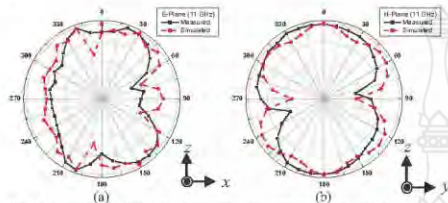


Fig.12 Comparison between simulated and measured of radiation pattern at 11 GHz on E-plane (a) and H-plane (b).

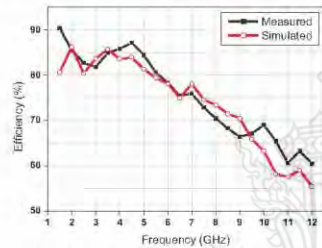


Fig.13 Comparison between simulated and measured results of the efficiency.

IV. CONCLUSION

The Design of Log-periodic Dipole Array Antenna for WLAN/LTE/UWB Applications was fabricated on FR4 substrate with dielectric constant (ϵ_r) 4.3 excited through a microstrip line feed by 50 ohm of impedance matching. The variation of parameter of width and distance were used to improve the bandwidth frequency for WLAN, LTE and UWB. The measurement result shown that the VSWR coverage of the frequency range from 1.4 GHz to 12 GHz, average gain of 4.51 dBi and moreover the average efficiency of 75.32%.

ACKNOWLEDGMENT

Thank you the department of electronics and telecommunication engineering, the Faculty of Engineering, the Rajamangala University of Technology Thanyaburi for supporting the CST Microwave Studio and supporting the equipment.

REFERENCES

- [1] L. Shan, L. Xiaofeng, and Q. Jinghui, "A novel miniaturized ultra wideband log-periodic antenna," in *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (URBUSIS), 2010 3th International Conference on*, 2010, pp. 246-248: IEEE.
- [2] G. A. Casula and P. Maxia, "A multiband printed log-periodic dipole array for wireless communications," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 2014.
- [3] M. Penhvan, K. Yeğin, and Y. Aşci, "Design of 1.8 GHz parabolic reflector antenna with LPDA feed," in *Telecommunications Forum (TELFOR), 2016 24th*, 2016, pp. 1-3: IEEE.
- [4] T. Limpitri and A. Y. Chantaveerod, "Design of a printed log-periodic dipole antenna (LPDA) for 0.8-2.5 GHz band applications," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016 13th International Conference on*, 2016, pp. 1-4: IEEE.
- [5] A. Kyei, D.-U. Sim, and Y.-B. Jung, "Compact log-periodic dipole array antenna with bandwidth-enhancement techniques for the low frequency band," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 5, pp. 711-717, 2016.
- [6] H. Tanaka, H. Shinano, M. Yoshitani, and H. Muramatsu, "A LPDA free-space factor calibration," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, 2018, pp. 664-667: IEEE.
- [7] M. J. Almatkawi, L. W. Cross, and K. A. Alshamsi, "A transmission line circuit-oriented approach for miniaturization of a log-periodic dipole array (LPDA) antenna," in *Circuits and Systems (MASCAS), 2014 IEEE 37th International Midwest Symposium on*, 2014, pp. 73-76: IEEE.
- [8] J. Rajendran and G. S. Sundaram, "Design and evaluation of printed log periodic dipole antenna for detection of radiolytic components," in *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 0032-0036: IEEE.
- [9] P. Wiid, K. Palmer, P. van der Merwe, and H. Reader, "A practical 50- Ω bandwidth PCB-LPDA antenna for MeerKAT RFI studies," in *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2012 IEEE-APS Topical Conference on*, 2012, pp. 965-968: IEEE.
- [10] M. C. Ozgenel and M. Seymen, "Size-reduced printed log periodic dipole antenna with single first order semi-circle iteration and feed point patches," in *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017 10th International Conference on*, 2017, pp. 995-999: IEEE.
- [11] O. Shcherbina and R. Zadrozny, "The log-periodic dipole array antenna for monitoring," in *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018 14th International Conference on*, 2018, pp. 583-586: IEEE.
- [12] X. Ding, B.-Z. Wang, and R. Zang, "Design and realization of a printed microstrip log-periodic antenna," in *Electromagnetics: Applications and Student Innovation (IWEM), 2012 IEEE International Workshop on*, 2012, pp. 1-3: IEEE.
- [13] M. Bontempo, P. Marques, C. Martins, and C. S. Acrimar, "A printed log-periodic antenna based on fractal tree elements," in *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MIT-S International*, 2015, pp. 1-5: IEEE.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	ขวัญหทัย โพธิ์แจ้ง
วัน เดือน ปีเกิด	23 เมษายน 2531
ที่อยู่	50/490 ซอย 22 หมู่บ้านสถาพร หมู่ 2 ตำบลบึงยี่โก อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี
การศึกษา	
พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี
พ.ศ. 2554	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ประสบการณ์ทำงาน	ปัจจุบันตำแหน่งช่างเทคนิค บริษัท ทีไอที จำกัด (มหาชน)
เบอร์โทรศัพท์	(+66) 6-4492-3592
อีเมลล์	kwanhatai@mail.rmutt.ac.th

