

สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้
กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

UWB HEXAGONAL SHAPED TEXTILE ANTENNA FOR
WBAN APPLICATION

พาโชค โสภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้
กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

พาโชค โสภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

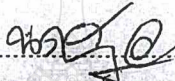
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

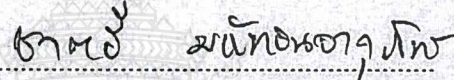
ปีการศึกษา 2563

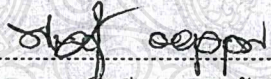
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับโครงข่ายไร้สาย
บนร่างกายมนุษย์
UWB Hexagonal Shaped Textile Antenna for WBAN Application
ชื่อ - นามสกุล นายพาโชค โสภา
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา 2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชาติรี มัทธอนจาทูภัทร, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์วิเชียร อุบแก้ว, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 19 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์
ชื่อ-นามสกุล	นายพาโชค โสภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยใช้วัสดุฐานรองแบบผ้าฝ้ายที่ทอแบบลายก้างปลาเฮอริ่ง (Herringbone Twill Uniform: HBT) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 2.25 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.03 และความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.43 มม. โดยจะจำลองและวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST Microwave Studio) เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2 – 15 GHz และมีการนอตซ์ความถี่ 1 ย่านความถี่ โดยมีแถบแบนด์วิดท์กว้าง 400 MHz

งานวิจัยนี้เริ่มจากการออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบ 1 พอร์ต และใช้เทคนิคการเจาะร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์สำหรับรองรับช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ทำการเจาะร่องที่สายอากาศโดยใช้เทคนิค Split Ring Resonator (SRR) เพื่อให้ได้ช่วงนอตซ์ความถี่และได้ทำการพัฒนาสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบไมโม 2 พอร์ต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณของสายอากาศ ใช้เทคนิคการวางสายอากาศทั้งสองตัวห่างกันโดยประมาณ $\lambda_g/4$ ร่วมกับการใช้สลับที่ระนาบกราวด์ เพื่อลดปรากฏการณ์เชื่อมร่วม (Mutual coupling) โดยค่าคุณลักษณะที่นำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราขยายของสายอากาศ ค่าประวิงกลุ่ม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลตามลำดับ โดยที่สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบ 1 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ 42×58 มม² และสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบไมโม 2 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ 94×58 มม²

จากการวัดทดสอบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบ 1 พอร์ต พบว่ามีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.76 – 17.78 GHz หรือความกว้างแถบ 163.97% และมีช่วงนอตซ์ความถี่ที่ 2.53 – 2.81 GHz ค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 1.5 ns. มีแบบรูปการแผ่พลังงานของ

สายอากาศแบบรอบทิศทางในย่านความถี่ต่ำและมีอัตราการขยายเท่ากับ 0.85 – 3.26 dBi สำหรับสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบไมโม 2 พอร์ต มีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 1.69 – 17.85 GHz หรือมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 165.40% ช่วงนอตช์ความถี่ตั้งแต่ 4.65 – 5.61 GHz ค่าประวิงกลุ่มต่ำกว่า 2 ns. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ตลอดช่วงการใช้งาน มีแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรอบทิศทางในย่านความถี่ต่ำและมีอัตราการขยายเท่ากับ 1.23 – 5.77 dBi

คำสำคัญ : สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยม อัลตราไวด์แบนด์ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ไมโม



Thesis Title	UWB Hexagonal Shaped Textile Antenna for WBAN Application
Name - Surname	Mr. Pachoke Sopa
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Paitoon Rakluea, D.Eng.
Academic Year	2020

ABSTRACT

This thesis presents an ultra-wideband (UWB) hexagonal shaped textile antenna for wireless body area network (WBAN) application, using the herringbone twill uniform (HBT) substrate with dielectric constant (ϵ_r) of 2.25, tangent loss ($\tan \delta$) 0.03 and thickness of 0.43 mm. Simulation and analysis of the antenna, using Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST Microwave Studio) were conducted in order to achieve wideband antennas with return loss (S_{11}) of less than -10 dB, within the frequency range of 2 – 15 GHz, and with a single notch bandwidth of 400 MHz.

A one-port, hexagonal shaped textile antenna was implemented using a small rectangular etched ground plane to enlarge bandwidth that can support the UWB frequency range. The split ring resonator (SRR) technique was employed to etch the antenna notch range. A two-port, multiple-input multiple-output (MIMO) hexagonal shaped textile antenna was developed to enhance antenna reception and transmission efficiency. The common technique of stub matching between the two ground planes, with the distance of $\lambda_g/4$, was applied in order to decrease mutual coupling. The parametric analysis included return loss, antenna gain, group delay, correlation coefficient and far-field radiation pattern. It is noted that the size of the one-port hexagonal shaped antenna is $42 \times 58 \text{ mm}^2$, while the size of the two-port MIMO hexagonal shaped textile antenna is $94 \times 58 \text{ mm}^2$.

Test results of the one-port, hexagonal shaped textile antenna showed that the return loss was lower than -10 dB at a frequency range of 1.76 – 17.78 GHz, or a bandwidth of 163.97%, notched bandwidth of 2.53 – 2.81 GHz, group delay minimized

to 1.5 ns, omnidirectional pattern in lower frequency bands, and gain range of 0.85 – 3.26 dBi. The two-port, MIMO hexagonal shaped textile antenna had a frequency range of 1.69 – 17.85 GHz an impedance bandwidth of 165.40%, a notched bandwidth of 4.65 – 5.61 GHz, group delay below 2 ns and a correlation coefficient lower than 0.5, all through the operating session. The antenna radiation pattern has an omnidirectional pattern in lower frequency bands, and antenna gain of 1.23 – 5.77 dBi.

Keywords: hexagonal shaped textile antenna, ultra-wideband, wireless body area network, multiple-input-multiple-output



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจาก ผศ.ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. นรกมล วงษ์ศิลป์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้าและได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำงาน ทั้งนี้ยังรวมถึงคณาจารย์ประจำห้องวิจัย “กลุ่มวิจัยสื่อสารไร้สาย” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้ความรู้และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดและสถานที่ทำงาน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณแก่พระคุณของ บิดา มารดา และครอบครัว รวมไปถึงญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ามอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

พาโชค โสภา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(11)
สารบัญรูป	(12)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(19)
บทที่ 1 บทนำ.....	22
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	22
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	23
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	23
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	23
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	24
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.1 ความหมายของสายอากาศ.....	25
2.2 ทฤษฎีสายอากาศโมนอโพล	25
2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ.....	26
2.4 สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	38
2.5 สายอากาศแบบไมโครสตริป	40
2.6 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์	43
2.7 มาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย.....	49
2.8 เทคโนโลยีโมโม.....	52
2.9 การแยกช่องสัญญาณแบบขนานในระบบโมโม	53
2.10 ปรัชญาการเชื่อมต่อร่วม.....	55
2.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	55
2.12 อิมพีแดนซ์เมตริกซ์.....	56
2.13 ทบทวนวรรณกรรม.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ.....	65
3.1 บทนำ	65
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม	65
3.3 การพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม	74
3.4 ผลการจำลองสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ- ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	81
3.5 การออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ- ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	89
3.6 ผลการจำลองสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ- ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	103
3.7 สรุปผลการออกแบบ	112
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดลอง	113
4.1 บทนำ	113
4.2 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์ สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต.....	114
4.3 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์ สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	120
4.4 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศขณะประยุกต์ใช้งาน.....	128
บทที่ 5 บทสรุป	132
5.1 สรุปผลการวิจัย	132
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	134
บรรณานุกรม.....	135
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของสายอากาศภาคส่ง.....	140
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของหัว SMA Connector.....	147
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของ ShieldIt Super Conductive Textile.....	149
ภาคผนวก ง ผลงานที่ได้ตีพิมพ์	151

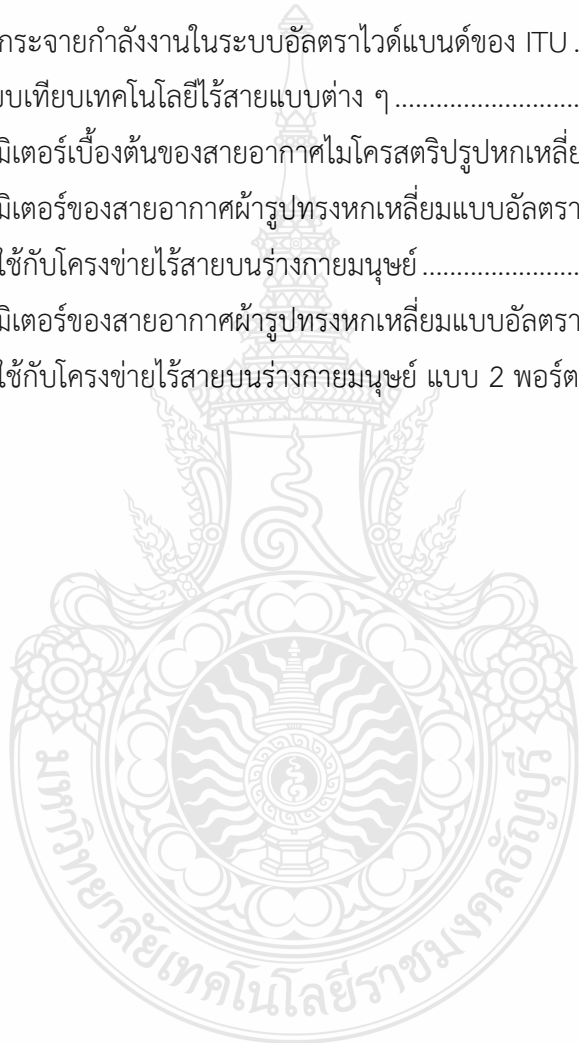
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ประวัติผู้เขียน.....	160



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่าง ๆ	28
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีแบบต่าง ๆ	46
ตารางที่ 2.3 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ FCC	47
ตารางที่ 2.4 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ ITU	48
ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่าง ๆ	51
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม	73
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	82
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต	104



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพล	26
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพล	26
รูปที่ 2.3 การเกิดการย้อนกลับของสัญญาณ	27
รูปที่ 2.4 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ	28
รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ	29
รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	33
รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและการโพลาริซ.....	36
รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	39
รูปที่ 2.9 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป $W/h > 1$	39
รูปที่ 2.10 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป $W/h < 1$	40
รูปที่ 2.11 แบบจำลองโพรงการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	41
รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น	43
รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบความเร็วการรับส่งข้อมูลของระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น...	45
รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ระหว่าง FCC และ ETSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร	48
รูปที่ 2.15 การรับส่งข้อมูลของเทคโนโลยีโมโม	52
รูปที่ 2.16 การเข้ารหัสที่ภาคส่งและสัญญาณที่รับได้	53
รูปที่ 2.17 การเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทางของระบบโมโม	54
รูปที่ 2.18 ระบบมัลติพอร์ต.....	56
รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม	65
รูปที่ 3.2 โครงสร้างและพารามิเตอร์จากสมการที่ (3.1)	68
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	69
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริป รูปหกเหลี่ยมค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	69
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ A	70
รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมหลังจากปรับขนาดรูปทรงหกเหลี่ยม..	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริป	
รูปหกเหลี่ยมหลังจากปรับขนาดรูปทรงหกเหลี่ยม	71
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_f	72
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_g	72
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมและการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์	74
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ Wg_1 ..	75
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ Ls_1	75
รูปที่ 3.13 โครงสร้างสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมที่ทำการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์	76
รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเจาะร่อง	
1, 3, 5 และ 7 จุด.....	77
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_1	79
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_2	80
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_3	80
รูปที่ 3.18 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_4	81
รูปที่ 3.19 โครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	82
รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	83
รูปที่ 3.21 ผลการจำลองอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง VSWR ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	83
รูปที่ 3.22 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	84
รูปที่ 3.23 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.9 GHz....	85
รูปที่ 3.24 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	85
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2 GHz.....	86
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.4 GHz.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.9 GHz.....	87
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz.....	87
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.2 GHz.....	87
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 7.25 GHz	88
รูปที่ 3.31 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 9.0 GHz.....	88
รูปที่ 3.32 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 12.5 GHz	88
รูปที่ 3.33 รูปแบบโครงสร้างขั้นต้นของการสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์ สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	89
รูปที่ 3.34 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ d	90
รูปที่ 3.35 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ d..	90
รูปที่ 3.36 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys1$.	91
รูปที่ 3.37 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys1$	91
รูปที่ 3.38 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys2$.	92
รูปที่ 3.39 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys2$	92
รูปที่ 3.40 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Xs1$.	93
รูปที่ 3.41 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Xs1$	93
รูปที่ 3.42 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Xs2$.	94
รูปที่ 3.43 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Xs2$	94
รูปที่ 3.44 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys3$.	95
รูปที่ 3.45 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys3$	95
รูปที่ 3.46 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R1 ...	97
รูปที่ 3.47 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R1	97
รูปที่ 3.48 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R2 ...	98
รูปที่ 3.49 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R2	98
รูปที่ 3.50 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R3 ...	99
รูปที่ 3.51 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R3	99
รูปที่ 3.52 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R4 ...	100

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.53 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R4	100
รูปที่ 3.54 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ F.....	101
รูปที่ 3.55 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ F..	101
รูปที่ 3.56 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ DGr.	102
รูปที่ 3.57 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ DGr	102
รูปที่ 3.58 โครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต	103
รูปที่ 3.59 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	105
รูปที่ 3.60 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	105
รูปที่ 3.61 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	106
รูปที่ 3.62 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	107
รูปที่ 3.63 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	108
รูปที่ 3.64 ผลการจำลองค่าความหนาแน่นของกระแส (Current density) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ที่ความถี่ 5.4 GHz.....	108
รูปที่ 3.65 ผลการจำลองค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต..	109

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.66 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2 GHz.....	110
รูปที่ 3.67 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz	110
รูปที่ 3.68 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz	111
รูปที่ 3.69 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 8 GHz.....	111
รูปที่ 3.70 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 11 GHz	111
รูปที่ 3.71 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 15 GHz	112
รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B.....	113
รูปที่ 4.2 การวัดทดสอบสายอากาศที่มีจำนวน 1 พอร์ต.....	113
รูปที่ 4.3 การวัดทดสอบสายอากาศที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	114
รูปที่ 4.4 สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่าย ไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต.....	114
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงาน- จริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต.....	115
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงาน- จริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต.....	116
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้น- งานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต.....	117
รูปที่ 4.8 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์- แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต...	117
รูปที่ 4.9 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz.....	118
รูปที่ 4.10 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz.....	118
รูปที่ 4.11 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz.....	119
รูปที่ 4.12 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 9.0 GHz.....	119
รูปที่ 4.13 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 12.5 GHz	119

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	120
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต	121
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต	121
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต	122
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต..	123
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต	124
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	125
รูปที่ 4.21 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต.....	125
รูปที่ 4.22 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2 GHz.....	126
รูปที่ 4.23 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz	126
รูปที่ 4.24 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz	126
รูปที่ 4.25 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 8 GHz.....	127

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.26 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 11 GHz.....	127
รูปที่ 4.27 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 15 GHz.....	127
รูปที่ 4.28 การติดตั้งสายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์.....	128
รูปที่ 4.29 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศ เข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์	129
รูปที่ 4.30 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศ เข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์	130
รูปที่ 4.31 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ได้จากการติดตั้ง สายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์	130



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c	Wave velocity
D	Directivity
dB	Decibel
dB _i	Decibel Isotropic
dB _m	Decibel milli watt
e_t	Total efficiency
e_r	Reflection efficiency
e_c	Conduction efficiency
e_d	Antenna radiation efficiency
f	Frequency
f_c	Center frequency
f_H	High frequency
f_n	Notched frequency
f_L	Low frequency
f_r	Resonance frequency
G	Gain
G_o	Maximum gain
GHz	Giga Hertz
h	Thickness of substrate
m	Metter
Mbps	Mega Bit Per Second
MHz	Mega Hertz
mm	Millimeter
mW	Milli watt
P_i	Input Power
P_r	Reflection Power
P_o	Output Power
P_{rad}	Power density

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Q	Quality Factor
Rx	Receiver
R_r	Radiation resistance of the antenna
R_L	Loss resistance of the antenna
S_{11} , S_{22}	Return Loss
S_{12} , S_{21}	Insertion Loss
t	Thickness of microstrip
Tx	Transceiver
W	Wide
U	Radiation intensity
U_i	Radiation intensity of isotropic source
U_{\max}	Maximum radiation intensity
V_p	Phase velocity
Z_o	Characteristic impedance
Z_L	Load impedance
Z_{in}	Input impedance
ϵ	Absolute permittivity
ϵ_r	Relative dielectric constant
ϵ_{eff}	Effective dielectric constant
λ	Wavelength of free space
λ_g	Wavelength of material
σ	Electric conductivity
ω	Angular frequency
Γ	Reflection coefficient
BW	Bandwidth
CDMA	Code Division Multiple Access
CST	Computer Simulation Technology
DCS	Digital Cellular System

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

DSS	Direct-sequence Spread Spectrum
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communication Commission
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
HSPDA	High Speed Downlink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT2000	International Mobile Telecommunications for the year 2000
ISM	Industrial Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
SNR	Signal to Noise Ratio
TEM	Transverse Electric-Magnetic
TM	Transverse Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra-Wideband
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์จะแสดงในบทถัดไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้รับความนิยมและแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาประเทศและการดำเนินชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ การสื่อสารแบบไร้สายมีความจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีความเร็วสูงในการรับส่งข้อมูล เทคโนโลยีในระบบอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra Wideband: UWB) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเป็นเทคโนโลยีที่มีวิธีการรับส่งสัญญาณในรูปของพัลส์แคบ ๆ ผ่านแบนด์วิดท์ที่กว้าง อยู่ในช่วงระหว่าง 3.1 – 10.6 GHz ใช้กำลังงานต่ำ และสามารถรับส่งข้อมูลได้ในปริมาณมาก โดยการใช้งานนั้นไม่จำเป็นต้องขอใบอนุญาต การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในระบบอัลตราไวด์แบนด์นั้นสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบอาทิเช่น การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายภายในอาคารสำนักงาน การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายภายในบ้านพักอาศัย การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ไร้สาย การประยุกต์ใช้งานการหาตำแหน่งและการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายไร้สายทางการแพทย์ เป็นต้น

สิ่งที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในระบบการสื่อสารไร้สายคือสายอากาศ เป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นออกไปในอากาศ โดยใช้ในทั้งภาคส่งและภาครับให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ในระบบการสื่อสารไร้สาย สายอากาศจะถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ดังนั้นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสารจะเป็นสายอากาศแบบโมโนโพล เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยสายอากาศมีการใช้เทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์และการเซาะร่องที่ตัวสายอากาศ เพื่อศึกษาผลตอบสนองของค่าความสูญเสีย เนื่องจากการย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล อัตราการขยาย แบนด์วิดท์ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม เพื่อให้สายอากาศมีความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักเบา สายอากาศนี้จึงใช้วัสดุฐานรอง

เป็นแบบผ้า ในการออกแบบสายอากาศได้มีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายแบบไร้สายที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 ออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์
- 1.2.2 จำลองพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio
- 1.2.3 วิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมมีขนาดกะทัดรัด โดยใช้วัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.25 ความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.43 มม.
- 1.3.2 สายอากาศระบบอัลตราไวด์แบนด์มีความถี่แถบกว้างยิ่ง ตั้งแต่ 2 – 15 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB
- 1.3.3 สายอากาศมีการนอตซ์ความถี่ 1 ย่านความถี่ โดยมีแถบแบนด์วิดท์กว้าง 400 MHz

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio เพื่อทำการออกแบบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.3 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio
- 1.4.4 สร้างสายอากาศจริงลงบนวัสดุฐานรองแบบผ้า และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เกี่ยวกับสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง
- 1.4.5 จัดทำบทความสำหรับนำเสนอผลการวิจัยและส่งตีพิมพ์
- 1.4.6 สรุปลงงานวิจัยและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจทฤษฎีและคุณสมบัติของสายอากาศโมโนโพลที่นำไปประยุกต์ใช้งาน

1.5.2 มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ

1.5.3 มีความเข้าใจและมีความชำนาญในการใช้เครื่องมือวัดค่าสายอากาศ

1.5.4 สามารถพัฒนาสายอากาศแบบโมโนโพลประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารไร้สายความถี่แถบกว้าง

1.5.5 นำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาสายอากาศรูปแบบอื่น ๆ ได้



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง สายอากาศไมโครสตริป โดยมีรายละเอียดแสดงถึงลักษณะทางกายภาพของสายอากาศโครงสร้างสายอากาศ วิธีการป้อนสัญญาณ วิธีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศและเนื้อหางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

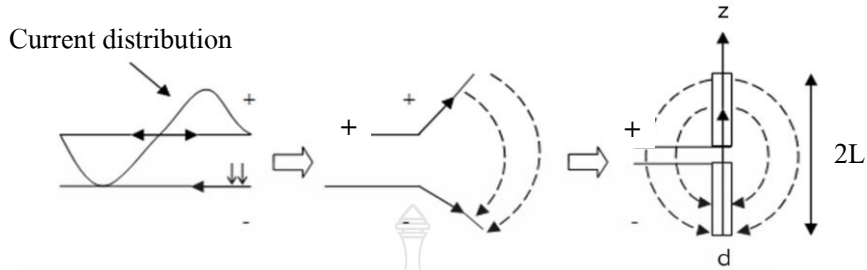
2.1 ความหมายของสายอากาศ

สายอากาศ คืออุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่น ความถี่วิทยุ (Radio Frequency) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและในทางกลับกันก็เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้าเช่นกัน โดยจะส่งข้อมูลไปยังที่ต้องการข้อมูล โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางหรือที่เรียกว่าการเชื่อมต่อแบบไร้สาย อาจกล่าวได้ว่าการเชื่อมต่อที่ไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีสายอากาศไว้ใช้งานเสมอ

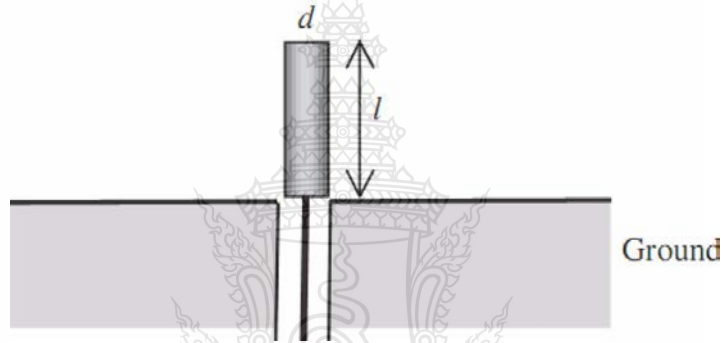
2.2 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพล เป็นการพัฒนารูปแบบและการทำงานจากสายอากาศไดโพลที่ทำงานแบบสองขั้ว พื้นฐานการทำงานของสายอากาศไดโพลดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างจะเป็นสายส่งสองตัวนำปลายเปิดสองเส้น จุดที่มีความยาวจากปลายสุดเท่ากับ $\lambda/4$ เมื่อโค้งหรือหักงอให้ปลายสายมีลักษณะบานออกหรือหันไปทางตรงข้าม จะทำให้สายตัวนำเกิดการแผ่กระจายคลื่นออกไป ซึ่งเรียกว่าสายอากาศไดโพล ความยาวทั้งหมดของสายอากาศไดโพลเท่ากับ $\lambda/2$ ของความถี่ที่ใช้งาน ส่วนสายอากาศโมโนโพลจะใช้ตัวนำด้านบนเพียงตัวเดียวที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่น เท่ากับ $\lambda/4$ แต่สายอากาศไดโพลจะเป็นเท่ากับ $\lambda/4$ ทั้งสองข้าง สามารถพิจารณาได้ว่าสายอากาศโมโนโพลอาศัยหลักการทำงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลและมีระนาบกราวด์เข้ามาทดแทน อีกครึ่งหนึ่งเพื่อให้กระบวนการทำงานสมบูรณ์ จากรูปที่ 2.2 สายอากาศโมโนโพล จะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียวและจะใช้ระนาบกราวด์แทนขั้วที่เหลือ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลจะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ซึ่งในทางอุดมคติแล้วระนาบกราวด์ของสายอากาศโมโนโพลจะเป็นระนาบกราวด์สมบูรณ์แบบและเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะพบว่าไม่สามารถออกแบบระนาบกราวด์ได้ตามอุดมคติ ดังนั้นระนาบกราวด์สายอากาศโมโนโพลในทางปฏิบัติจึงเล็กกว่าทางทฤษฎีมาก ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเกิดการเปลี่ยนทิศทางออกไปทางด้านหลังของระบบกราวด์ด้วย หากออกแบบให้สายอากาศโมโนโพล มีระนาบกราวด์ขนาดเล็กมาก ๆ จะพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะ

คล้ายกับสายอากาศไดโพล ซึ่งมักจะเรียกกันว่า แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางระนาบเดียว (Omnidirectional)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพล [6]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพล [4]

2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.3.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง หมายถึง ค่าอัตราส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของแรงดันหรือกระแสบนสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.1)

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{|I_{\max}|}{|I_{\min}|} \quad (2.1)$$

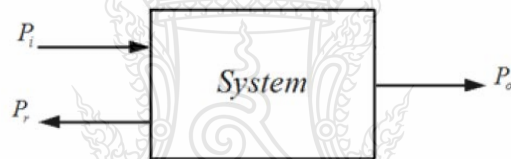
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน ยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโวลต์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.2)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (2.2)$$

เมื่อ	Γ	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน
	V_r	คือ แรงดันสะท้อนกลับ
	V_i	คือ แรงดันตกกระทบ
	Z_L	คือ โหลดอิมพีแดนซ์
	Z_o	คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

2.3.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์ซึ่งกัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตช์ซึ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการที่ (2.3) และ (2.4) โดยค่าพารามิเตอร์การสูญเสียย้อนกลับหรือ S_{11} นิยมบอกเป็นหน่วย dB ค่าที่ยอมรับได้ในการออกแบบสายอากาศคือจะต้องมีค่า S_{11} น้อยกว่า -10 dB หรือ พิจารณาจากค่า VSWR ที่ต่ำกว่า 2 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 2.3 การเกิดการย้อนกลับของสัญญาณ [4]

$$S_{11} \text{ (dB)} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (2.3)$$

$$S_{11} \text{ (dB)} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ	P_i	คือ กำลังของสัญญาณอินพุต
	P_r	คือ กำลังของสัญญาณที่สะท้อนกลับ
	P_o	คือ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต

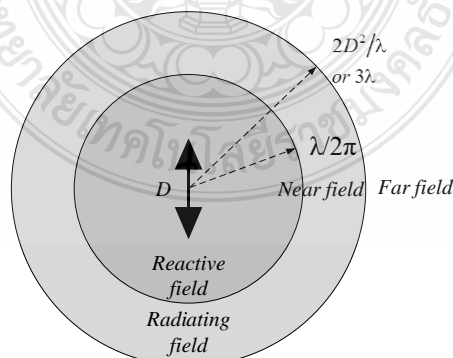
2.3.3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Wave radiation pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ตามพิกัดตำแหน่ง (Space coordination) การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมี 3 ระยะ คือที่ระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near field) สนามการแผ่กระจายคลื่นระยะใกล้ (Radiating near field) และบริเวณการแผ่กระจายคลื่นสนามระยะไกล (Far field) โดยแต่ละบริเวณจะพิจารณาจากระยะห่างจากสายอากาศออกไปรอบ ๆ เป็นรัศมีเท่าใด ซึ่งพิจารณาได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่าง ๆ [6]

Antenna size (D)	$D \ll \lambda$	$D \approx \lambda$	$D \gg \lambda$
Reactive near field	$r < \lambda/2\pi$	$r < \lambda/2\pi$	$r < \lambda/2\pi$
Radiating near field	$\lambda/2\pi < r < 3\lambda$	$\lambda/2\pi < r < 3\lambda$ and $2D^2/\lambda$	$\lambda/2\pi < r < 2D^2/\lambda$
Far field	$r > 3\lambda$	$r > 3\lambda$ and $2D^2/\lambda$	$r > 2D^2/\lambda$

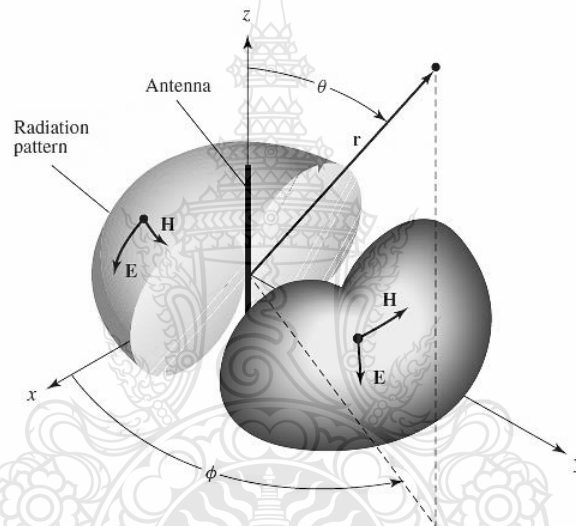
เมื่อ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ λ เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณา และ r เป็น รัศมีหรือระยะห่างจากสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงสนามแต่ละบริเวณจึงแสดงในรูปของการแผ่กระจายคลื่นในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของการสังเกตตลอดบริเวณรอบ ๆ สายอากาศ



รูปที่ 2.4 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ [1]

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

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



รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ [1]

2.3.4 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่าง ๆ หาได้จาก ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับจากการไม่แมตซ์ซึ่งระหว่างสายส่งกับสายอากาศ การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.5)

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.5)$$

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 (2.6)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.6)$$

เมื่อ	R_r	คือ ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป
	R_L	คือ ความต้านทานที่โหลด

2.3.5 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

สภาพเจาะจงทิศทางเป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศเป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่พลังงานโดยเฉลี่ย เมื่อมีการแผ่พลังงานออกไปรอบทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน โดยไม่คิดกำลังส่วนที่สูญเสียไปดังสมการที่ (2.7)

$$D = \frac{U}{U_t} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	D	คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ
	U	คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงาน
	U_t	คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงานเฉลี่ย
	P_{rad}	คือ กำลังงานที่สายอากาศแผ่ออกไป

โดยทั่วไปไม่กำหนดทิศทางใช้สภาพเจาะจงทิศทางในทิศที่สายอากาศแผ่พลังงานได้ดีที่สุด

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_t} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.8)$$

2.3.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสภาพเจาะจง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่สภาพเจาะจงทิศทางแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้นการคิดอัตราขยายของสายอากาศ วัดเทียบเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศส่ง คือกำลังส่งอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน ณ จุดเดียวกัน ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คืออัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน อัตราขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้จะมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากหัวต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดดังสมการที่ 2.9

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

เมื่อ $U(\theta, \phi)$ คือ ความแรงของการแพร่กระจายคลื่น
 P_{in} คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

โดยทั่วไปอัตราขยายสัมพันธ์ เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือ สายอากาศอื่น ๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย (G_g) ดังนั้น จึงได้ดังสมการที่ 2.10

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.10)$$

กำลังที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ดังสมการที่ 2.11

$$P_{rad} = e_i P_{in} \quad (2.11)$$

เมื่อ e_i คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
 P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

ทำให้สมการที่ 2.11 และ 2.12 มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 2.12

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.12)$$

และ มีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรกทิฟ ดังสมการที่ 2.13

$$G_g(\theta, \phi) = e_i D_g(\theta, \phi) \quad (2.13)$$

ในการทำงานเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยาย (G_o) จะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี ดังสมการที่ 2.14

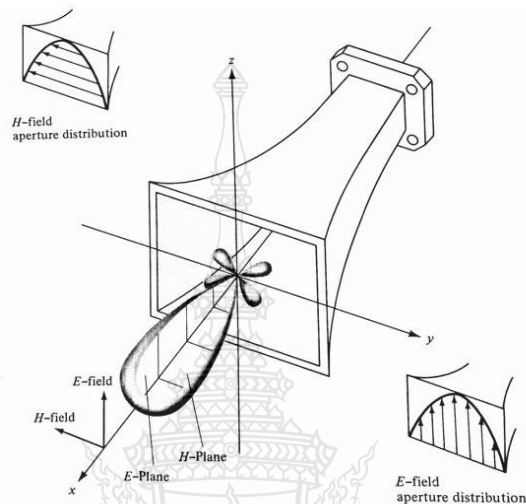
$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi)|_{\max} \\ G_o &= e_i D_g(\theta, \phi)|_{\max} \\ G_o &= e_i D_o \end{aligned} \quad (2.14)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงอัตราขยายหมายถึงอัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด ตามแสดงดังสมการที่ 2.15

$$G_o = 10 \log_{10}(e_i D_o) \quad (2.15)$$

คุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของรูปแบบกระจายคลื่นหลัก (Principal pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly

polarization) รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างแบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ดังรูปที่ 2.6 โดยมีระนาบ XZ เป็นระนาบ H หลัก



รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร [1]

ค่าอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปสามารถที่จะกำหนดค่าประสิทธิภาพของสายอากาศดังสมการที่ (2.16)

$$G = \eta D \quad (2.16)$$

- เมื่อ G คือ อัตราขยายของสายอากาศ
 η คือ สภาพการเจาะจงทิศทาง
 D คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ในทางปฏิบัติการหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปนั้น จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.17) หรือ (2.18) ดังนี้

$$P_r = P_t + L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (2.17)$$

$$G_r = P_r - P_t - L_f + L_{line} - G_t \quad (2.18)$$

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

2.3.7 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศที่ละน้อยเนื่องจากการต้านการไหลของพลังงานที่เรียกว่า อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่หัวของสายอากาศ เรียกว่า อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Z_{in}) ดังสมการที่ (2.19)

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.19)$$

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

2.3.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

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

$$BW = f_H - f_L \quad (2.20)$$

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L \quad (2.21)$$

$$BW(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \quad (2.22)$$

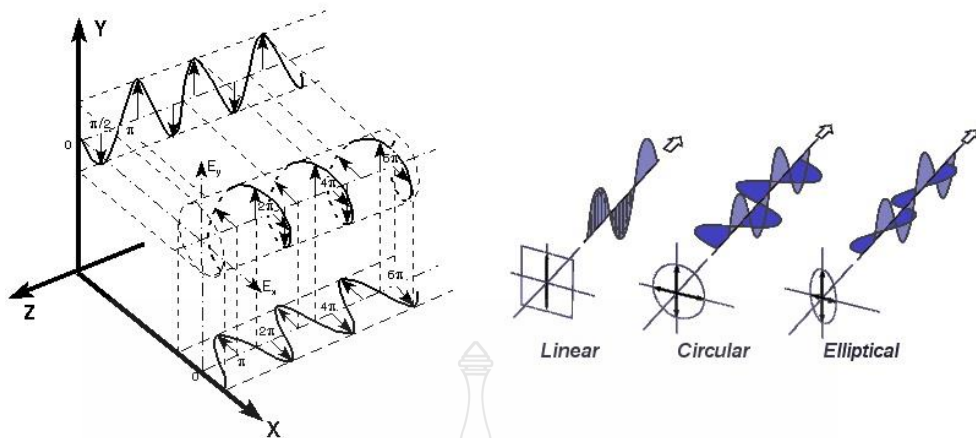
$$BW(\%) = \frac{BW}{f_c} \times 100 \quad (2.23)$$

$$BW = \frac{f_H}{f_L} : 1 \quad (2.24)$$

เมื่อ	BW	คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ
	f_H	คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่
	f_L	คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่
	f_c	คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

2.3.9 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่ออกจากสายอากาศ หมายถึง คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะอธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษาจะยึดจุดสังเกตคงที่และมองเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป ดังนั้นโพลาริเซชันจึงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายเวกเตอร์สนามไฟฟ้า รูปทั่วไปของโพลาริเซชันมีอยู่ 3 แบบ คือ โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) และ โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical polarization) โดยทิศทางหมุนของคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบวงกลมหรือวงรีนั้นอาจเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) หรือแบบทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise: CCW) ก็ได้ การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและการโพลาไรซ์ [6]

ถ้าสมมติว่าคลื่นเคลื่อนที่ในทิศทาง $-z$ ดังนั้นสมการสนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E(z, t) = \hat{x}E_x(z, t) + \hat{y}E_y(z, t) \quad (2.25)$$

เมื่อองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และ y มีค่าเป็น

$$E_x(z, t) = \text{Re} \left[E_x e^{-j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[E_{x0} e^{-j(\omega t + kz + \phi_x)} \right]$$

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.26)$$

$$E_y(z, t) = \text{Re} \left[E_y e^{-j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[E_{y0} e^{-j(\omega t + kz + \phi_y)} \right]$$

$$E_y(z, t) = E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.27)$$

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

1) โพลาไรซ์เชิงเส้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเมื่อความต่างเฟสขององค์ประกอบทั้งสองของสนามไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.28

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.28)$$

2) โพลาริซแบบวงกลม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการโพลาริซแบบวงกลมเมื่อขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากันนั่นก็คือ $E_{x0} = E_{y0}$ และค่าความต่างเฟสเป็นดังสมการที่ 2.29

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} \left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CW \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CCW \end{cases} \quad (2.29)$$

3) โพลาริซแบบวงรี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการโพลาริซแบบวงรี เมื่อขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าทั้งสองมีค่าต่างกันนั่นก็คือ $E_{x0} \neq E_{y0}$ และค่าความต่างเฟสเป็นดังสมการที่ (2.30)

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} \left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CW \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CCW \end{cases} \quad (2.30)$$

เมื่อความต่างเฟสของทั้งสององค์ประกอบมีค่าไม่เท่ากับจำนวนเท่าของ $\pi/2$ ดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n\pi}{2} = \begin{cases} > 0 & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CW \\ < 0 & n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad CCW \end{cases} \quad (2.31)$$

2.3.10 ตัวประกอบการสูญเสียจากโพลาริซ

โดยทั่วไปโพลาริซของสายอากาศรับอาจจะมีการโพลาริซที่แตกต่าง กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับเข้ามาที่สายอากาศ ซึ่งเรียกว่า การไม่แมตซ์ของโพลาริซ (Polarization mismatch) เป็นผลให้กำลังงานที่สายอากาศรับได้้นั้นไม่ใช่ค่าสูงสุด กล่าวคือมีการสูญเสียกำลังงานขึ้นจากการไม่แมตซ์ของการโพลาริซ ถ้าสมมติให้ค่าสนามไฟฟ้าที่เข้ามาที่สายอากาศรับมีค่าดังนี้

$$E_i = \hat{p}_w E_i \quad (2.32)$$

เมื่อ \hat{p}_w เป็นเวกเตอร์หน่วยของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และให้การโพลาไรซ์ของคลื่นของสายอากาศรับเป็น

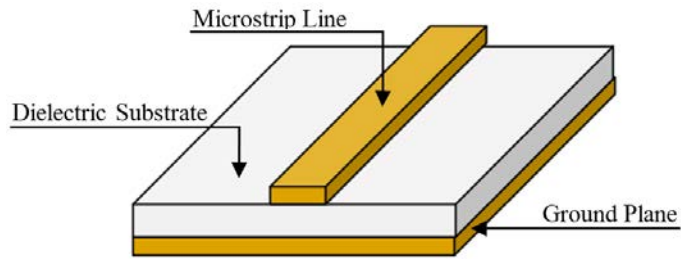
$$E_a = \hat{p}_a E_a \quad (2.33)$$

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

$$PLF = |\hat{p}_w \cdot \hat{p}_a|^2 \quad (2.34)$$

2.4 สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip Line) ที่ใช้งานโดยทั่วไปประกอบด้วยสตริปหรือแผ่นโลหะแคบ ๆ วางอยู่บนวัสดุฐานรอง ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองนั้นจะเป็นระนาบกราวด์ โดยมีรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับระนาบกราวด์ โดยความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของแผ่นสตริปนั้น จะมีผลต่อค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ที่ต้องการ สำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดและคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศว่า ค่านี้จะส่งผลทำให้คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีการเปลี่ยนแปลงค่า Loss tangent ที่ความถี่ 10 GHz คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำและกระแสสเปคตูลอสเมตส์ ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยที่มีค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดี ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี ค่าความขรุขระของผิวและความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งความขรุขระของผิวจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน เพราะจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริป เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ

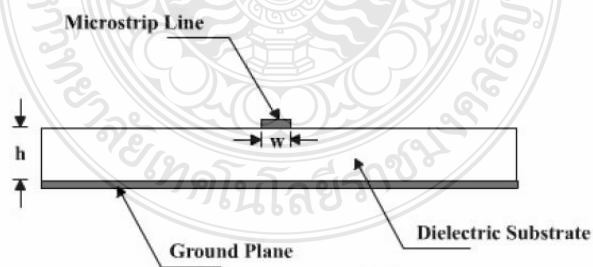


รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป [6]

ในการออกแบบสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้น จะทำการพิจารณาใน 2 กรณี เมื่อทำการเปรียบเทียบตามความกว้างของแผ่นไมโครสตริปกับความหนาของวัสดุฐานรอง กรณีแรกคือ กรณีที่ $W/h < 1$ และกรณีที่สองคือ กรณีที่ $W/h > 1$ โดยทั้งสองกรณีจะมีการวิธีคำนวณดังนี้
 ในกรณีที่ $W/h < 1$ จะได้สมการที่ (2.35) และ (2.36) ดังรูปที่ 2.9

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (2.35)$$

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} + \ln \left[8 \left(\frac{h}{W} \right) + 0.25 \left(\frac{W}{h} \right) \right] \quad (2.36)$$

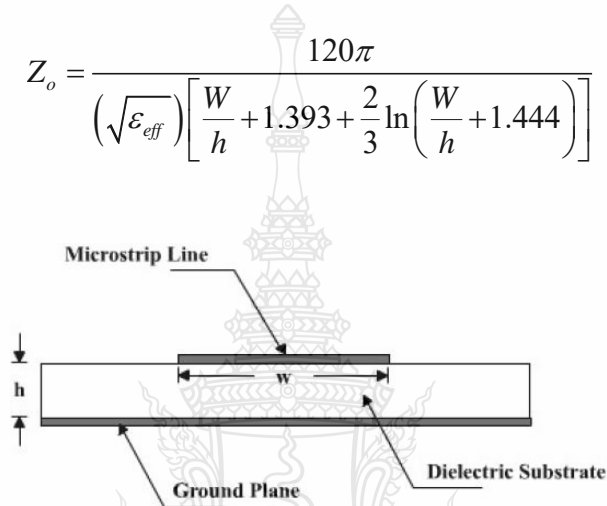


รูปที่ 2.9 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป $W/h < 1$ [5]

ในกรณีที่ $W/h > 1$ จะได้สมการที่ (2.37) และ (2.38) ดังรูปที่ 2.10

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[\frac{\epsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right] \quad (2.37)$$

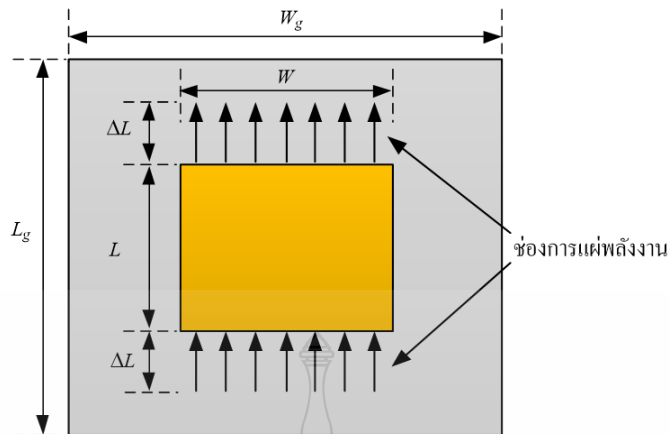
$$Z_o = \frac{120\pi}{\left(\sqrt{\epsilon_{eff}} \right) \left[\frac{W}{h} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad (2.38)$$



รูปที่ 2.10 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป $W/h > 1$ [5]

2.5 สายอากาศแบบไมโครสตริป

การออกแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยช่องการแผ่พลังงานทั้งสองมีระยะห่าง L แบบของเส้นแนวสนามไฟฟ้าที่อยู่ในฉนวนวัสดุฐานรองและบางส่วนของเส้นที่อยู่ในอากาศมีผลต่อความไม่สมบูรณ์ของโหมด Transverse electric-magnetic (TEM) ความเร็วเฟสที่ระยะต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันออกไปทั้งที่อยู่ในอากาศและที่อยู่ในวัสดุฐานรอง เมื่อนำมาแทนในโหมดพื้นฐานของการแพร่กระจายด้วยโหมด Quasi-TEM ฉะนั้นค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ϵ_{eff}) จะต้องคำนวณหาใหม่เพื่อความถูกต้องสำหรับสนามฟรินจิง (Fringing) และการกระจายคลื่นในเส้นสนามไฟฟ้า ค่า ϵ_{eff} ที่ถูกต้องนั้นจะต้องน้อยกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) เนื่องจากสนามฟรินจิงรอบ ๆ เส้นรอบวงของตัวสายอากาศจะไม่มีขอบเขตในฉนวนของวัสดุฐานรองแต่ยังแพร่กระจายในอากาศ โดยที่ค่า ϵ_{eff} แสดงดังนี้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองโพรงการแผ่พลังงานของสายอากาศ [6]

ค่าความกว้างของตัวสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังนี้

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.39)$$

ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

เมื่อสนามพริ้นจิงก์ตามแบบจำลองที่ขอบตัวสายอากาศทั้งสองด้านได้ดังนี้

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.41)$$

โดยที่ความยาวประสิทธิผล L ของตัวสายอากาศได้ดังนี้

$$L = \frac{c}{2f_r (\sqrt{\epsilon_{eff}})} - 2\Delta L \quad (2.42)$$

หรือ

$$L = \frac{c}{2f_r(\sqrt{\epsilon_r})} - 2\Delta L \quad (2.43)$$

ค่าความกว้างของกราวด์สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงดังนี้

$$W_g = 6h + W \quad (2.44)$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) แสดงได้ดังนี้

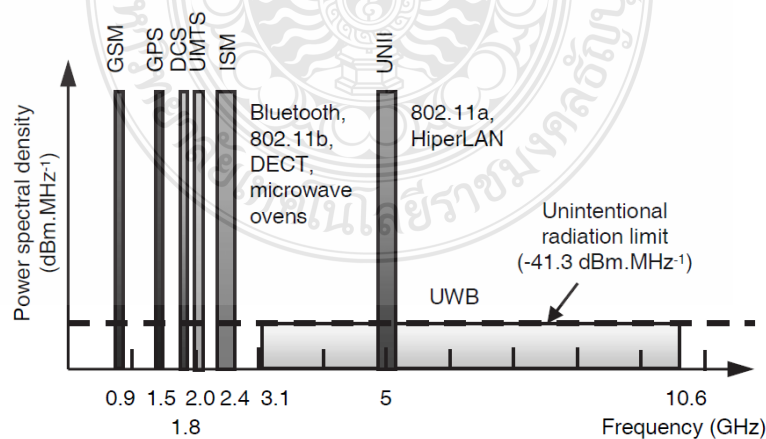
$$\lambda_g = \frac{c}{f_r(\sqrt{\epsilon_{eff}})} \quad (2.45)$$

เมื่อ	c	คือ ความเร็วของสนามไฟฟ้าในอากาศ (3×10^8 m/s)
	ΔL	คือ ค่าความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า
	ϵ_{eff}	คือ ค่าไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผล
	ϵ_r	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
	f_r	คือ ความถี่เรโซแนนซ์
	h	คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง
	L	คือ ความยาวของสายอากาศ
	L_g	คือ ความยาวของกราวด์สายอากาศ
	W	คือ ความกว้างของสายอากาศ
	W_g	คือ ความกว้างของกราวด์สายอากาศ

2.6 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

ในปลายศตวรรษที่ 20 การศึกษาทางด้านการสื่อสารโทรคมนาคมมีความก้าวหน้าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการถือกำเนิดของระบบเทคโนโลยีโทรคมนาคมใหม่ทำให้ระบบโทรศัพท์ได้รับการเปลี่ยนจากการรับส่งข้อมูลแบบโทรเลขไปเป็นการรับส่งด้วยใช้คลื่นวิทยุแทนและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานทั้งในเชิงความเร็วการถ่ายโอนข้อมูลและปริมาณของข้อมูลที่มีจำนวนมาก โดยเฉพาะความท้าทายทางด้านวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันที่พยายามให้มีการใช้อัตราการโอนถ่ายข้อมูลที่สูงมากในระยะทางไกล ๆ ซึ่งในบริบทนี้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (UWB) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีใช้กันครั้งแรกในระบบเรดาร์ ก็จะเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดของการสื่อสารไร้สายในอนาคตอันใกล้

เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) ได้กำหนดมาตรฐานเชิงเทคนิคและข้อจำกัดสำหรับอุปกรณ์อัลตราไวด์แบนด์ โดยแบ่งตามศักยภาพที่ทำให้เกิดการแทรกสอดต่อกัน 3 ชนิดประกอบไปด้วย ระบบการสร้างภาพ ระบบเรดาร์ยานพาหนะและระบบการสื่อสารและการวัด โดยการประยุกต์ใช้งานระบบการสร้างภาพอัลตราไวด์แบนด์ ได้รวมถึงระบบเรดาร์ทะลุพื้น (Ground Penetrating Radar: GPR) ระบบการสร้างภาพทะลุกำแพง ระบบระแวดระวังภัยและระบบทางการแพทย์ เนื่องจากระบบอัลตราไวด์แบนด์เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิธกว้างมากและมีสเปกตรัมไปทับซ้อนกับระบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่น ระบบเครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) ดังนั้น FCC จึงได้กำหนดให้ใช้ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมมีระดับที่ต่ำมากไว้ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และได้กำหนดแบนด์วิดท์ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริง



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น [6]

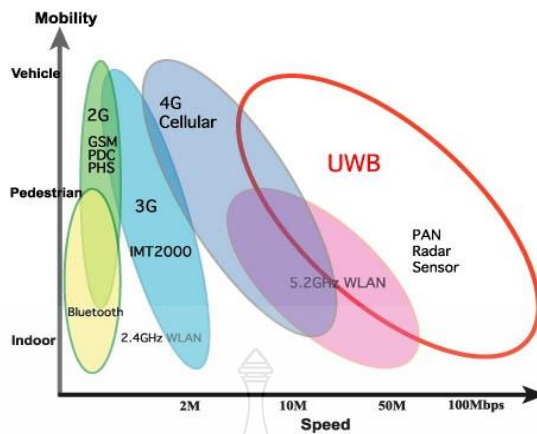
2.6.1 นิยามของระบบอัลตราไวด์แบนด์

คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้ให้นิยามของระบบอัลตราไวด์แบนด์เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ทั้งนี้หากเปรียบเทียบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับเทคโนโลยีแถบแคบแล้วจะพบว่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีแถบแคบทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ 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 (2.45)

$$B_{f,3dB} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.46)$$

2.6.2 คุณสมบัติของระบบอัลตราไวด์แบนด์

จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ที่ได้กล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีความเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานในลักษณะของโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลแบบไร้สาย (WPAN) การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการรับส่งข้อมูลชนิดมัลติมีเดียที่มีขนาดใหญ่ซึ่งต้องการความเร็วสูงเช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ กล้องวิดีโอ กล้องถ่ายรูป เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีคุณสมบัติที่รองรับความต้องการดังกล่าวได้ เนื่องจากมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงถึง 480 Mb/s ในระยะทาง 2 m และ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 m ซึ่งการเปรียบเทียบความจุของช่องสัญญาณในระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบความเร็วการรับส่งข้อมูลของระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น [6]

ขนาดความจุของเทคโนโลยีแบบอัลตราไวด์แบนด์สามารถพิจารณาได้จากทฤษฎีของ Hartley-Shannon ดังสมการที่ (2.46)

$$C_c = BW \log_2 (1 + SNR) \quad (2.47)$$

- เมื่อ BW คือ แบนด์วิธของช่องสัญญาณ (Hz)
 C_c คือ ความจุของช่องสัญญาณสูงสุด (bit/s)
 SNR คือ อัตราส่วนสัญญาณกำลังงานต่อสัญญาณรบกวน

ข้อแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และเทคโนโลยีแถบแคบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลัก ๆ คือ

1) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ใช้การส่งพัลส์ที่มีความกว้างแคบมาก โดยที่ไม่มีการมอดูเลตทางความถี่ของสัญญาณที่ต้องการส่งกับสัญญาณพาห้ ดังนั้นเครื่องรับและเครื่องส่งในระบบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ จึงไม่มีภาคของการมอดูเลตสัญญาณเหมือนกับระบบเทคโนโลยีแถบแคบ ส่งผลให้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเทคโนโลยีแถบแคบมาก

2) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ได้ถูกกำหนดให้มีแบนด์วิธ (BW) มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.47)

$$BW = f_H - f_L \quad (2.48)$$

เมื่อ	BW	คือ แบนด์วิดท์
	f_H	คือ ความถี่สูงสุด
	f_L	คือ ความถี่ต่ำสุด

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีแบบต่าง ๆ [6]

เทคโนโลยี	ความเร็วของข้อมูล	ช่วงความถี่	กำลังงาน (EIRP)	การมอดูเลต	มาตรฐาน
อัลตราไวด์แบนด์	≥ 100 Mbps	3.1 – 10.6 GHz	-43.3 dBm/MHz	PPM, OFDM, CDMA...	IEEE 802.15.3a
	≥ 500 kbps	3.1 – 10.6 GHz	-43.3 dBm/MHz	PPM, OFDM, CDMA...	IEEE 802.15.3a
Bluetooth	≤ 700 kbps	ISM 2.4 GHz	type1: 20 dBm type2: 0 dBm	GMSK	IEEE 802.15.1
WiFi	≤ 54 Mbps	5 GHz	0.2 – 1 W	BPSK,16-QAM, QPSK,64-QAM	IEEE 802.11a
	≤ 11 Mbps	ISM 2.4 GHz	0.1 – 2 W	CCK, BPSQ, QPSK, DSS	IEEE802.11b
	≤ 54 Mbps	ISM 2.4G Hz	0.1 – 1 W	BPSK,16-QAM, QPSK, OFDM, 64-QAM,	IEEE 802.11g

2.6.3 ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์

ในปีค.ศ. 1998 ทางคณะกรรมการกิจการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบ (Notice of Inquiry: NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณที่มีระดับต่ำมาก ๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่ใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบอัลตราไวด์แบนด์มาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งข้อเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิเช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) โดยองค์การบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration: FAA) ได้แสดงความเห็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบอัลตราไวด์แบนด์ด้วยเช่นกัน จึงในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2002 ทาง

FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบ อัลตราไวด์แบนด์และการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของ FCC ได้แสดงดังในตารางที่ 2.3 สำหรับการใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

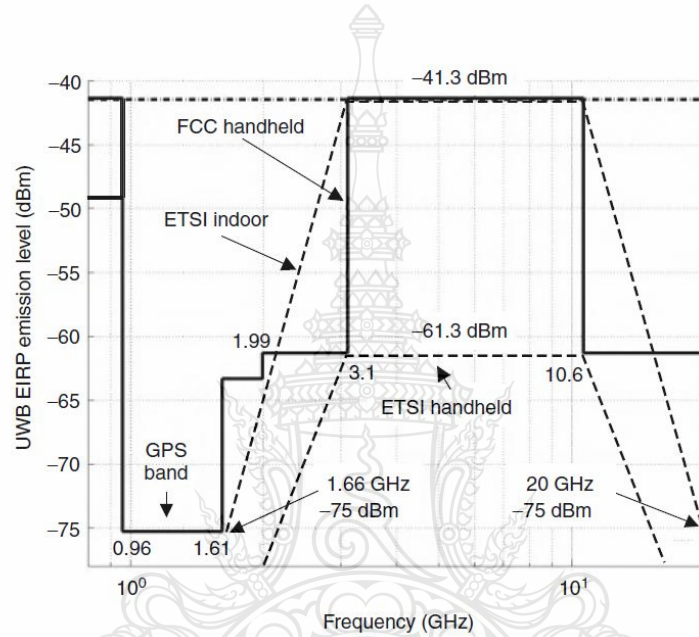
ตารางที่ 2.3 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ FCC [6]

ความถี่ (MHz)	ภายในอาคาร (dBm)	ภายนอกอาคาร (dBm)
960 – 1610	-75.3	-75.3
1610 – 1990	-53.3	-63.3
1990 – 3100	-51.3	-61.3
3100 – 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	61.3

ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์ในยุโรปนั้นปัจจุบันโครงสร้างของข้อกำหนดระบบอัลตราไวด์แบนด์อยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบต่อระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ โดยบางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าทางสหรัฐอเมริกาเพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบต่อระบบเดิมที่มีอยู่ โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย International Telecommunication Union (ITU) หรือเป็น European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ดังตารางที่ 2.4 และดังรูปที่ 2.14 ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ใช้งานของระบบอัลตราไวด์แบนด์ระหว่าง FCC และ ETSI ทั้งภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ ITU [6]

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
$f > 10.6$	$-51.3 + 87 \log(10.6/f)$	$-61.3 + 87 \log(10.6/f)$



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ระหว่าง FCC และ ETSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร [6]

2.6.4 แอปพลิเคชันต่าง ๆ ของเทคโนโลยีอัลตราไวน์แบนด์ [3]

- 1) โครงข่ายไร้สายความเร็วสูง (High Data Rate-Wireless Personal Area Network : HOR) คือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายปานกลาง มีอัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็ว 100 – 150 Mb/s. ภายในระยะ 1 – 10 m.
- 2) การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wireless Ethernet Interface Link: WEIL) สามารถทำได้ภายในระยะสั้นมากหรือภายในรัศมี 1 – 2 m.
- 3) โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ (Intelligent Wireless Area Network: IWAN) คือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายสูง ที่เป็นพื้นที่ภายในหรือพื้นที่สำนักงานทั่วไป ภายในระยะ 30 เมตร

4) โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์ (Outdoor Peer to Peer Network: OPPN) เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร UWB ที่อยู่บริเวณภายนอก

5) โครงข่ายเซ็นเซอร์ การหาตำแหน่งและการหาตำแหน่งและการพิสูจน์อุปกรณ์ (Sensor, Position and Identification Network: SPIN) เป็นโครงข่ายของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเช่น เซ็นเซอร์ที่มีความหนาแน่นที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงเก็บสินค้า ที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงและสามารถส่งสัญญาณข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของตัวอุปกรณ์เพื่อใช้หาตำแหน่งได้ด้วย โดยมีความแม่นยำในการบอกตำแหน่งผิดพลาดไม่เกิน 1 m.

2.7 มาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย

สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) เป็นสถาบันที่ได้กำหนดมาตรฐานการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่สำคัญ ๆ ดังนี้

2.7.1 มาตรฐาน IEEE 802.11

1) IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานที่ใช้ทำการรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายไม่ว่าจะเป็นคลื่นอินฟราเรดหรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 – 5 GHz

2) IEEE 802.11 b เป็นการส่งข้อมูลแบบไร้สายโดยใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz ที่อัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่ 11 Mbps. ซึ่งทำให้ไปได้ไกลกว่า IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ที่ใช้ต่ำกว่า ซึ่งนิยมใช้กันเป็นอย่างมากแพร่หลายมากในการสื่อสารแบบไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นวงการอุตสาหกรรมการแพทย์คอมพิวเตอร์ ฯลฯ

3) IEEE 802.11g เป็นการติดต่อสื่อสารในระบบไร้สายที่ความถี่ 2.4 GHz แต่อัตราการรับ-ส่งข้อมูลจะสูงกว่า IEEE 802.11b ที่ 54 Mbps. ทำให้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากในปัจจุบัน และมีเทคโนโลยีที่เข้ามาพัฒนาคือ MIMO ซึ่งใช้หลักการคือการเพิ่มสายอากาศเข้าไปเพื่อเพิ่มระยะทางในการส่ง โดยการส่งข้อมูลแบบไร้สายนั้นในขณะที่ทำการส่งข้อมูลมักจะมีสัญญาณรบกวนสัญญาณสะท้อนซึ่ง MIMO นำตรงส่วนนั้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์โดยการเสริมเข้ากันเพื่อให้การรับสัญญาณสมบูรณ์ยิ่งขึ้นซึ่งสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ในอัตรา 108 – 240 Mbps.

4) IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดหมายกันว่า จะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 Mbps.

2.7.2 มาตรฐาน IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานที่ให้ระยะทางการเชื่อมโยงในช่วงระยะสั้น ๆ แค่ 1.6 – 4.8 km. เท่านั้นเป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุนรูปแบบการใช้งานในระดับสายตา หรือที่เรียกว่า Line of Sight (LoS) แต่มาตรฐานนี้ก็กลับมีการเปิดใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 10 – 66 GHz

1) มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16a เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิมโดยมีการปรับลดระดับความถี่ที่ใช้งานให้ลงมาที่ย่าน 2 – 11 GHz ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับ การแก้ไขข้อบกพร่องจากมาตรฐาน 802.16 เดิมคือเพิ่มคุณสมบัติการรองรับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ใน ระดับสายตา Non Line of Sight (NLoS) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติการทำงานในส่วนของภาคขยายสัญญาณ เมื่อมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้น ตามสภาพแวดล้อมขวางกั้น อาทิเช่น ต้นไม้ อาคาร ฯลฯ นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้ สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้กว้างกว่ามาตรฐานเดิม ด้วยวิธีนี้ ทำให้การที่ไกลเพิ่มขึ้นจากมาตรฐานแรกประมาณ 48 – 50 km. และมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูล สูงสุดถึง 75 Mbps. ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อการใช้งานกับระบบเครือข่ายของบริษัทที่มีการใช้ สายประเภทที่ 1 (T1-type) มากกว่า 60 ราย และการเชื่อมต่อแบบ Asynchronous Digital Subscriber Line (ADSL) ตามบ้านเรือนที่พักอาศัยอีกหลายร้อยครัวเรือนได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหา ในการใช้งาน

2) มาตรฐาน WiMax แบบ IEEE 802.16e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุน การใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ โน้ตบุ๊ก มือถือ เป็นต้น โดยให้รัศมี ทำงานที่ 1.6 – 4.8 km. ได้มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานยังสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดี และมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้จะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา

2.7.3 มาตรฐาน IEEE 802.15

มาตรฐาน IEEE 802.15.3a Ultra Wideband (UWB) แบ่งออกเป็น 4 มาตรฐานได้แก่

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

2) IEEE 802.15.1 ศึกษาผลกระทบการใช้งานและการทำงานร่วมกันระหว่าง โครงข่าย WPAN กับ WLAN และระบบสื่อสารไร้สายอื่น ๆ เช่นระบบโทรศัพท์ GSM CDMA และ GPS เป็นต้น

3) IEEE 802.15.3 ศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้นกายภาพและ MAC สำหรับ โครงข่าย WPAN ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงมากประมาณ 11 – 55 Mbps. ในระยะการรับส่งข้อมูลไม่ เกิน 20 m. และมีการใช้พลังงานประมาณไม่เกิน 0.5 mW. โดยมีการจัดทำร่างมาตรฐานย่อยเรียกว่า IEEE 802.15.3a สำหรับการรับส่งข้อมูลที่มีอัตราสูงมากกว่า 100 Mbps. สำหรับโครงข่าย WPAN ที่มี

ระยะใกล้ไม่เกิน 10 m. ซึ่งร่างมาตรฐานของผู้เสนอหลายรายมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดมากกว่า 1 Gbps. การประยุกต์ใช้งานของโครงข่าย WPAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a นั้นคาดว่าจะใช้กับโครงข่ายข้อมูลระยะใกล้เช่น เป็นมาตรฐานของชั้นกายภาพและ MAC ของ Wireless USB โครงข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สายภายในบ้าน หรือสำนักงาน หรือกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการการรับส่งข้อมูลในปริมาณที่สูงมาก เช่น เครื่องเล่น DVD โทรทัศน์ที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น

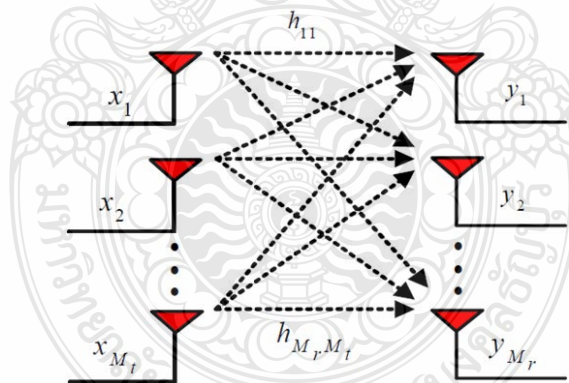
4) IEEE 802.15.4 ศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้นกายภาพและ MAC สำหรับโครงข่าย WPAN ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลไม่สูงมากประมาณ 1 – 5 Mbps. แต่ใช้พลังงานต่ำเป็นพิเศษประมาณ 100 uW. ซึ่งจะเป็นมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือกล้องถ่ายรูป เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาและเครื่องเล่นเพลง MP3 เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีร่างมาตรฐานย่อยซึ่งเรียกว่า IEEE 802.15.4a สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลไม่เกิน 1 Mbps. แต่มีระยะการส่งไกลมากขึ้นได้ถึง 75 m. แต่ยังคงมีอัตราการใช้พลังงานต่ำมากถูกออกแบบมาสำหรับโครงข่าย Wireless sensor network และโครงข่ายไร้สายสำหรับอุปกรณ์ควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่าง ๆ [6]

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

2.8 เทคโนโลยี MIMO

เทคโนโลยี MIMO (MIMO Technology) เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและมีความน่าเชื่อถือในการสื่อสารไร้สายที่ปราศจากการใช้ความถี่เพิ่มเติม โดยเทคโนโลยี MIMO เป็นระบบที่มีการใช้สายอากาศแบบหลายองค์ประกอบในการรับ-ส่งสัญญาณ ทั้งในภาคส่งและภาครับซึ่งจะแตกต่างจากเทคโนโลยีเดิมที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายประเภทสายอากาศฉลาด (Smart antenna system) ที่จะใช้ที่จะใช้สายอากาศหลายต้นแค่เพียงด้านเดียวไม่ว่าจะเป็นที่ภาคส่งหรือที่ภาครับ โดยที่เทคโนโลยี MIMO นี้สามารถถึงความสามารถทั้งการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) หรือพัฒนาคุณลักษณะด้วยไดเวอร์ซิตี (Diversity) ในเทคโนโลยีนี้สายอากาศส่งและรับช่วยในการเพิ่มอัตราขยายไดเวอร์ซิตี การมัลติเพล็กซ์จะส่งเสริมในด้านโครงสร้างอัตราขยายของช่องสัญญาณ ซึ่งจะมีความเป็นอิสระในแต่ละทิศทางการเดินทาง โดยระบบจะมีส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แบ่งสัญญาณข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ เพื่อส่งไปยังระบบสายอากาศภาคส่งพร้อม ๆ กันและสัญญาณที่ส่งในแต่ละสายอากาศ จะผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปยังสายอากาศภาครับ จากนั้นจึงผ่านหน่วยประมวลผลข้อมูลเพื่อแยกสัญญาณข้อมูลแต่ละชุดที่ได้รับจากสายอากาศภาครับแต่ละตัวแล้วทำการรวมข้อมูลที่ได้ออกมาที่ปลายทางซึ่งจะเปรียบเทียบได้กับการแบ่งข้อมูลออกเป็นหลาย ๆ เส้นทางแล้วส่งไปพร้อม ๆ กัน



รูปที่ 2.15 การรับส่งข้อมูลของเทคโนโลยี MIMO [6]

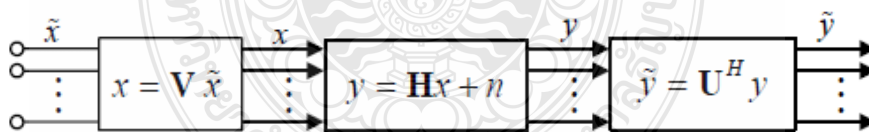
2.9 การแยกช่องสัญญาณแบบขนานในระบบไมโม

เมื่อสายอากาศภาคส่งและภาครับมีจำนวนมากกว่า 1 ตัว การทำงานในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า การมัลติเพล็กซ์อัตราขยาย ซึ่งจะสามารถแยกช่องสัญญาณได้เป็นค่าคงที่ R โดยจะมีความเป็นอิสระของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ เมื่อมีการใช้สายอากาศส่งและรับมากกว่า 1 ตัว จะทำให้อัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาจากระบบไมโมที่มี H เป็นช่องสัญญาณ M_r เป็นจำนวนของสายอากาศภาคส่ง M_t เป็นจำนวนของสายอากาศภาครับ และ R_H เป็นลำดับชั้นของช่องสัญญาณ ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าน้อยสุดของจำนวนสายอากาศส่งและรับ $R_H \leq \min(M_t, M_r)$ โดยสามารถแยกช่องสัญญาณ H จากการวิเคราะห์ค่าเฉพาะตัวคือ

$$H = U \Sigma V^H \quad (2.49)$$

โดยที่ U คือ เมทริกซ์ยูนิแทรีขนาด $M_r \times M_r$
 V คือ เมทริกซ์ยูนิแทรีขนาด $M_t \times M_t$
 Σ คือ เมทริกซ์เฉียง (Diagonal Matrix) ที่สมาชิกไม่มีค่าติดลบขนาด $M_r \times M_t$
 H คือ การทรานสโพสคอนจูเกต

จากสมการที่ (2.49) เป็นวิธีการของ SVD (Singular Value Decomposition) เช่น เมื่อมี $\text{diac}(A)$ เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าในแกนทแยงมุมของเมทริกซ์ A นี้และค่า $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ คือค่าไอเกน (Eigen value) จะได้ว่า $\Sigma = \text{diac}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n, 0, \dots, 0)$



รูปที่ 2.16 การเข้ารหัสที่ภาคส่งและสัญญาณที่รับได้ [6]

จากรูปที่ 2.16 จะสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\tilde{y} = U^H (Hx + n)$$

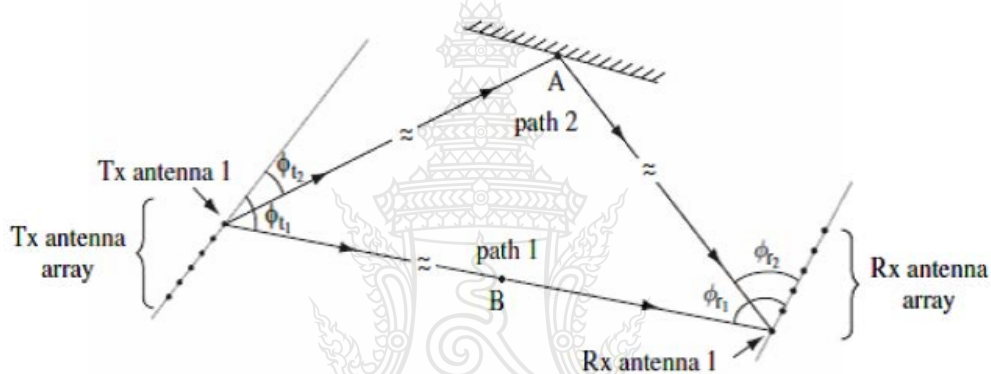
$$\tilde{y} = U^H (U \Sigma V^H x + n)$$

$$\tilde{y} = U^H (U \sum V^H V \tilde{x} + n)$$

$$\tilde{y} = U^H U \sum V^H V \tilde{x} + U^H n$$

$$\tilde{y} = \sum \tilde{x} + \tilde{n} \quad (2.50)$$

ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า การประมวลผลช่องสัญญาณโดเมนแถวลำดับในระบบไมโม (Array domain processing)



รูปที่ 2.17 การเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทางของระบบไมโม [6]

จากรูปที่ 2.17 ได้แสดงถึง รูปแบบการเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทาง เมื่อมีการรับรู้สถานะช่องสัญญาณ โดยมีอัตราการลดทอนที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางแทนด้วย a_i มุมส่งแทนด้วย ϕ_{ti} ($\Omega_{ti} = \cos \phi_{ti}$) และมุมรับแทนด้วย ϕ_{ri} ($\Omega_{ri} = \cos \phi_{ri}$) ดังนั้นช่องสัญญาณหาได้จาก

$$H = \sum_i a_i^b e_r(\Omega_{ri}) e_t(\Omega_{ti})^H \quad (2.51)$$

โดยที่

$$a_i^b = a_i \sqrt{M_t M_r} \left(\frac{-j2\pi d_i}{\lambda_c} \right) \quad (2.52)$$

$$e_t(\Omega_i) \frac{1}{M_t} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_t\Omega_i)] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_t-1)(2\pi\Delta_t\Omega_i)] \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$e_r(\Omega_i) \frac{1}{M_r} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_r\Omega_i)] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_r-1)(2\pi\Delta_r\Omega_i)] \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

- โดยที่
- d_i คือ ระยะทางระหว่างภาคส่งไปยังภาครับในแต่ละทิศการเดินทางของคลื่น
 - λ_c คือ ความยาวคลื่นของความถี่กลาง
 - Δ_t คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีการนอล์มอลไลซ์ที่ภาคส่ง
 - Δ_r คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีการนอล์มอลไลซ์ที่ภาครับ
 - $e_t(\Omega_i)$ คือ เวกเตอร์ใช้แทนการกระจายตัวในทิศทาง Ω_i
 - $e_r(\Omega_i)$ คือ เวกเตอร์ใช้แทนการกระจายตัวในทิศทาง Ω_i

2.10 ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม

ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม หรือ (Mutual coupling) เกิดขึ้นจากการกระทำกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศที่อยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบสายอากาศไมโม ซึ่งสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ซึ่งปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมนั้น จะต้องมีการส่งผ่านที่น้อยกว่า -15 dB จึงจะเป็นค่าที่ยอมรับได้ การลดค่าปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมนั้นสามารถทำได้โดยการออกแบบระยะห่างระหว่างสายอากาศไมโมแต่ละตัวให้มีระยะห่างออกจากกันในระยะที่เหมาะสม

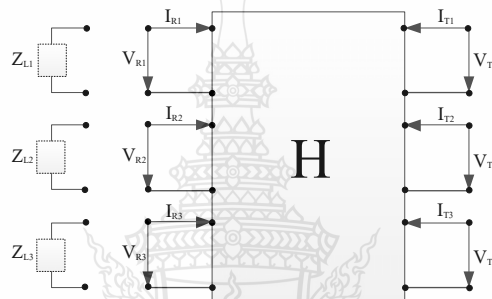
2.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ (Correlation coefficient) เป็นค่าที่มีความสำคัญอีกตัวแปรหนึ่งในการพิจารณาประสิทธิภาพของสายอากาศในระบบไมโม ซึ่งการวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศมีค่าที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.5 ตามมาตรฐาน เป็นการนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณดังสมการที่ 2.55

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)][1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)]} \quad (2.55)$$

2.12 อิมพีแดนซ์เมตริกซ์

เพื่อทำการศึกษารากฏการณ์เชื่อมต่อระหว่างสายอากาศในระบบไมโม ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาระบบทั้งหมดเป็นระบบมัลติพอร์ตขนาดใหญ่โดยสายอากาศแต่ละต้นที่เชื่อมโยงกันจะเรียกว่า i พอร์ตโดยจะพิจารณาช่องสัญญาณที่ติดต่อสื่อสารเข้าด้วยกัน ด้วยรูปแบบของ Z-parameter



รูปที่ 2.18 ระบบมัลติพอร์ต [6]

จากรูปที่ 2.18 เป็นระบบมัลติพอร์ตโดยจะจัดวางสายอากาศภาคส่งอยู่ทางด้านขวามือและบอกถึงสายอากาศภาครับที่อยู่ด้านซ้ายมือ โดยกำหนดให้ $V_T = [V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TN}]^T$ และ $i_T = [i_{T1}, i_{T2}, \dots, i_{TN}]^T$ คือแรงดันและกระแสของภาคส่ง ในทำนองเดียวกัน $V_R = [V_{R1}, V_{R2}, \dots, V_{RN}]^T$ และ $i_R = [i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RN}]^T$ คือแรงดันและกระแสของภาครับระบบมัลติพอร์ตจะสามารถอธิบายผ่าน Z-parameter ดังสมการที่ 2.56

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{RT} \\ Z_{TR} & Z_{TT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_T \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

เมตริกซ์ขนาด $N \times N$ ของ Z_{TT} และ Z_{RR} คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่บรรจุด้วยอิมพีแดนซ์ของตัวเองและอิมพีแดนซ์ที่กระทำร่วมกันของภาคส่งและภาครับตามอันดับและเมตริกซ์ Z_{RT} แทนค่าโดยอิมพีแดนซ์การส่งผ่านจากภาคส่งแวลลำดับไปยังภาครับแวลลำดับเช่นเดียวกับ Z_{TR} แทนค่าโดยอิมพีแดนซ์การส่งผ่านจากภาครับแวลลำดับไปยังภาคส่งแวลลำดับโดยสมมุติให้แรงดันที่ภาคส่งและภาครับมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของโหลดโดยกำหนดให้เมตริกซ์ทะแยงมุม (Diagonal

matrix) ของโหลดที่ภาครับมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของโหลดโดย $Z_T = \text{diag}[Z_{L1}, Z_{L2}, \dots, Z_{LN}]$ ภายใต้สถานการณ์ของกระแสและแรงดันที่ภาครับผ่านความสัมพันธ์โหลด $V_R = -Z_L I_R$ โดยแทนในสมการที่ 2.57 ซึ่งจะได้

$$V_R = (I_R + Z_{RR}Z_L^{-1} - Z_{RT}Z_{TT}^{-1}Z_{RR}Z_L^{-1})^{-1} Z_{RT}Z_{TT}^{-1}V_T \quad (2.57)$$

โดยกำหนด I_R หมายถึงเมตริกซ์เอกลักษณ์ขนาด R มิติ โดยเมตริกซ์ Z_{TT} , Z_{RT} , Z_{TR} และ Z_{RR} เกี่ยวข้องกับระยะทางระหว่างสายอากาศ ดังนั้นระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับโดยทั่วไปมีขนาดใหญ่มากกว่าระยะทางระหว่างสายอากาศแถวอันดับดังนั้นจึงมีเหตุผลที่สามารถละเลย Z_{RT} และ Z_{TR} ดังนั้น

$$V_R = Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} Z_{RT} Z_{TT}^{-1} V_T \quad (2.58)$$

$$V_R = Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} Z_{RT} V_T \quad (2.59)$$

ดังนั้นรูปแบบของช่องสัญญาณที่ง่ายและสะดวกโดยพิจารณาด้วยการแบบสายอากาศแถวลำดับ

$$H = Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} Z_{RT} Z_{TT}^{-1} \quad (2.60)$$

โดย H คือรูปแบบช่องสัญญาณการแผ่กระจายคลื่นทางกายภาพหรือทางสถิติ ซึ่งสะท้อนให้เป็นถึงความสัมพันธ์ของภาคส่งและภาครับที่กำหนดโดย Z_{RT} ดังนั้นความจุช่องสัญญาณที่ถูกอธิบายโดยเงื่อนไขการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของระบบช่องสัญญาณไม่โมโนลักษณะและการสร้างแบบจำลองของระบบโมโนสำหรับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจึงเป็นปัญหาสำคัญ ดังนั้นรูปแบบของช่องสัญญาณควรจะมีความถูกต้องเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบโดยวิธานิพนธ์นี้ โดย H สามารถพิจารณาโดยใช้ช่องสัญญาณแบบกำหนดขึ้นเอง (Deterministic channel) โดยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอนและได้มีการกำหนดเวลาที่แน่นอนโดยช่องสัญญาณที่พิจารณาการเชื่อมต่อรวมจะแทนด้วย H_{mc} โดย

$$H_{mc} = Z_L (Z_L + Z_{RR})^{-1} H Z_{RR} Z_{TT}^{-1} \quad (2.61)$$

$$Z_{RR}Z_{TT} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdots \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

2.13 ทบทวนวรรณกรรม

ในด้านงานวิจัยที่ผ่านมา มีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการสร้างสายอากาศ บนวัสดุต่าง ๆ เพื่อให้รองรับการสื่อสารไร้สายได้หลากหลาย ซึ่งที่ผ่านมาผู้วิจัยหลายท่านได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันออกไปบนวัสดุฐานเช่น แผ่น FR-4, แผ่น Roger RT/Rudoid 5880 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งมีความคงทนสูงแต่ไม่ยืดหยุ่น จึงมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้นคือ แผ่นฟิล์มใส (Mylar Thin Film) ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาประยุกต์ใช้วัสดุที่อยู่ใกล้ตัวมนุษย์ซึ่งใช้ในชีวิตประจำวันคือสายอากาศที่ทำการออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้า โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

N. Manshouri, A. Yazgan, และ M. Maleki [7] ได้นำเสนอสายอากาศโมนโพลสำหรับใช้ในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ใช้โปรแกรม HFSS และ CST Microwave Studio ในการออกแบบโดยสายอากาศถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปวงกลม มีการใช้เทคนิคการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างขึ้น พร้อมด้วยเทคนิคการเจาะร่องที่ตัวสายนำสัญญาณไมโครสตริปพร้อมกับการเจาะร่องที่ตัวสายอากาศเพื่อตัดช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานออกไปในช่วง 5.5 – 5.9 GHz และ 7.4 – 8.9 GHz สายอากาศมีขนาดเท่ากับ 20×26 มม² สามารถตอบสนองต่อความถี่ในช่วง 3.1 – 11 GHz ได้

M. Akbari, N. Rojhani, M. Saberi, และ R. Movahedinia [8] ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมนโพลรูปทรงแปดเหลี่ยมใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศถูกออกแบบและจำลองจากโปรแกรม HSFF ทำการสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองเท่ากับ 4.4 ความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1 มม. สายอากาศที่ได้มีขนาด 25×18 มม² สามารถตอบสนองต่อความถี่ 2.55 – 21.65 GHz ที่ระนาบกราวด์มีการใช้เทคนิคการเจาะร่องคล้ายชั้นบันไดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในย่านความถี่สูง เทคนิคการเจาะร่องคล้ายตัว E ที่ระนาบแผ่นพลังงานนั้น ทำให้สายอากาศสามารถตัดความถี่ในย่าน 5.5 GHz และเทคนิคสุดท้ายคือทำการเพิ่ม สดับแมตซ์ซึ่งรูปตัว E ที่ด้านบนของระนาบกราวด์เพื่อตัดสัญญาณความถี่ย่าน 3.5 GHz

S. Tripathi, A. Mohan, และ S. Yadav [9] ได้นำเสนอสายอากาศขนาดกระทัดรัดรูปทรงเรขาคณิตสำหรับประยุกต์ใช้ในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ โดยออกแบบสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ 50Ω ความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.6 มม. สายอากาศมีขนาด 31×27 มม² ใช้เทคนิคการเซาะร่องคล้ายรูปตัว C ที่ระนาบแผ่นพลังงาน เพื่อตัดสัญญาณช่วงความถี่ 3.5 GHz ที่ใช้งานในระบบ WiMAX และ 5.5 GHz ที่ใช้งานกับระบบ WLAN

M. G. N. Alsath, และ M. Kanagasabai [10] ออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 สำหรับย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศที่ทำการออกแบบมีขนาด $24 \times 16 \times 0.8$ มม³ ใช้เทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์และเทคนิคการใช้สตัดรูปตัวแอลที่ระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ให้กับสายอากาศ ซึ่งสายอากาศสามารถตอบสนองต่อช่วงความถี่ 3.1 – 10.9 GHz และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางรอบตัว บรรลุวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้งานกับยานพาหนะ

M. Sharma, Y.K. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, และ S. Kumari [11] นำเสนอการออกแบบสายอากาศบนแผ่น Roger RT/Duroid สำหรับย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ได้ใช้รูปแบบเบื้องต้นในการออกแบบเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมร่วมกับเทคนิคการเซาะร่องบนสายอากาศสามรูปแบบ ซึ่งได้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ตอบสนองสำหรับย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่ความถี่ 2.49 – 19.41 GHz สายอากาศนี้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ $20 \times 20 \times 0.787$ มม³ เทคนิคการเซาะร่องทั้งสามรูปแบบนั้นทำให้ได้ช่วงความถี่แถบหยุดที่มีค่าสูงสุด 3 ช่วงที่ความถี่ได้แก่ 3.6 GHz, 5.64 GHz และ 7.64 GHz

M. Elhabchi, M. N. Srifi, และ R. Touahni [12] นำเสนอสายอากาศสำหรับย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ทำการออกแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio และ HFSS สายนำสัญญาณของสายอากาศเป็นแบบ Coplanar Waveguide (CPW) แผ่นแผ่นพลังงานมีรูปแบบคล้ายหกเหลี่ยม ซึ่งได้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ตอบสนองสำหรับย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศนี้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 23×25 มม² ถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีความหนาเท่ากับ 1.6 มม. มีการใช้เทคนิคการเซาะร่องคล้ายตัว Y เพื่อตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการในช่วง 5.72 – 5.825 GHz และทำการเพิ่มสตัดรูปทรงคล้ายตัว L เพื่อให้สายอากาศสามารถรับสัญญาณในช่วงความถี่ 1.3 – 1.6 GHz ของระบบ GPS ได้

T. Ranadkaew, และ P. Raklua [13] นำเสนอการออกแบบบนแผ่นฟิล์มบาง (Mylar Polyester Film) สำหรับย่านความถี่ของระบบซูเปอร์ไวด์แบนด์ ได้ใช้สายนำสัญญาณแบบ Co-Planar Waveguide (CPW) ร่วมกับแผ่นแผ่นพลังงานลักษณะรูปพระจันทร์ครึ่งเสี้ยว ได้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ตอบสนองสำหรับย่านความถี่ของระบบซูเปอร์ไวด์แบนด์ ที่ความถี่ 3 – 40

GHz สายอากาศนี้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 45×34 มม² ข้อดีคือ สายอากาศนี้มีความยืดหยุ่นสามารถโค้งงอได้ เนื่องจากใช้วัสดุที่เป็นแผ่นฟิล์มบางและสายอากาศนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากสามารถรองรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายช่วงความถี่

N. Singh, A. K. Singh, และ V. K. Singh [14] ได้นำเสนอการออกแบบและประสิทธิภาพของสายแบบผ้าสำหรับใช้งานทางการแพทย์ สายอากาศมีความกว้างและความยาวขนาด 60×60 มม² ใช้ผ้ายีนส์เป็นวัสดุฐานรอง มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.7 ความหนา 1 มม. ใช้แผ่นเทปทองแดงเป็นวัสดุตัวนำ สายอากาศนี้ประยุกต์ใช้ในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 13.08 GHz และนำเสนอการประยุกต์ใช้งานช่วงความถี่ 9.7 GHz ในทางการแพทย์

S. Yan, L. A. Y. Poffelie, P. J. Soh, X. Zheng, และ G. A. E. Vandenbosch [15] ได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศโมนโพลสำหรับใช้ในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบ สายอากาศมีขนาดเท่ากับ $80 \times 61 \times 4.51$ มม³ โดยสายอากาศถูกสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้าสักหลาด โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่มีระนาบกราวด์อยู่ด้านหลัง มีการใช้เทคนิคการลดกำลังงานที่มีต่อร่างกายด้วยการเพิ่มแผ่นสะท้อนสัญญาณอยู่ด้านหลังของระนาบกราวด์อีกหนึ่งชั้น สามารถตอบสนองต่อความถี่ในช่วง 3.1 – 11 GHz ในขั้นตอนการออกแบบ คณะผู้จัดทำได้นำเสนอการวัดค่าเมื่อสายอากาศมีลักษณะโค้งงอและทำการเปรียบเทียบการวัดผลเมื่อนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้ที่บริเวณต้นแขนและหน้าอก ค่าที่ทำการวัดได้มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม CST

S. Li, และ J. Li [16] ได้นำเสนอสายอากาศบนผ้ายีนส์สำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยวัสดุฐานรองมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.54 ใช้วัสดุตัวนำแบบแผ่นเทปทองแดง สายอากาศมีขนาด 20×45 มม² ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบ โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายในช่วงความถี่ต่ำที่ 2.37 – 2.98 GHz และ ช่วงความถี่สูงที่ 5.69 – 6.08 GHz จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศไว้ใกล้กับผิวหนังของมนุษย์พบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

K. Wang, และ J. Li [17] ได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศสำหรับใช้ในย่านการสื่อสารไร้สาย ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบโดยที่สายอากาศถูกสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้ายีนส์มีขนาดเท่ากับ 16×46 มม² สามารถใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายในช่วงความถี่ต่ำที่ 2.42 – 2.484 GHz และช่วงความถี่สูงที่ 5.75 – 5.85 GHz จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อทำการติดตั้งสายอากาศไว้ใกล้กับผิวหนังของมนุษย์พบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับร่างกายมนุษย์

K. Shikder, และ F. Arifin [18] ได้ทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศผ้าที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.17 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.0035 และใช้วัสดุตัวนำที่เรียกว่า ตัวนำทางไฟฟ้าสมบูรณ์ PEC (Perfect Electric Conductor) ในขั้นตอนเริ่มต้นคณะผู้จัดทำได้ใช้สูตรในการคำนวณเพื่อออกแบบสายอากาศที่มีรูปทรงหกเหลี่ยม มีสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเท่ากับ ใช้เทคนิคการเซาะร่องที่ตัวสายอากาศและที่ระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศ โดยสายอากาศมีขนาดเท่ากับ $38 \times 32 \times 2.05$ มม³ สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.85 – 29.85 GHz ซึ่งรองรับกับระบบอัลตราไวด์แบนด์

S. Yan, V. Volskiy, และ G. A. E. Vandenbosch [19] ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศที่ประยุกต์ใช้กับช่วงความถี่ ISM Bands ที่ความถี่ 433 MHz และ 2.4 GHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบ สายอากาศมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้าสักหลาดหนา 6 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.044 และใช้ผ้าตัวนำที่มีความหนาเท่ากับ 0.17 มม. มีค่าความนำเท่ากับ 1.18×10^5 S/m. สายอากาศมีการใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัวแอลที่ตัวสายอากาศเพื่อรองรับย่านความถี่ 2.4 GHz และทำการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มความยาวสำหรับรองรับย่านความถี่ 433 MHz จากการติดตั้งสายอากาศไว้ที่จุดต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ปรากฏว่า จุดที่ดีที่สุดที่ค่า S_{11} มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคือ ที่หัวไหล่และแขน โดยโค้งงอไปในทิศทางแกน Y ของสายอากาศ

S. Yan, P. J. Soh, และ G. A. E. Vandenbosch [20] ทำการออกแบบสายอากาศผ้าที่ใช้เทคนิคการปักเส้นด้ายตัวนำ MCEY (Metal Composite Embroidery Yarn) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 มม. ลงบนวัสดุฐานที่เป็นผ้าทอโพลีเอสเตอร์ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.15 โดยใช้เครื่องจักรเย็บผ้า จากการออกแบบสายอากาศ Five-Folded Dipole ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการใช้งานกับย่านความถี่วิทยุ FM ที่ช่วงความถี่ 87.5 – 108 MHz โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -5 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน มีขนาดโดยรวมเท่ากับ 144×10 cm² จากการวัดผลเมื่อติดตั้งสายอากาศต้นแบบเข้ากับร่างกายมนุษย์พบว่า สายอากาศมีประสิทธิภาพต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดผลในสภาวะปกติ

S. Yan, และ G. A. E. Vandenbosch [21] ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองเป็นผ้าสักหลาดที่มีความหนาเท่ากับ 6 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.044 และใช้ผ้าตัวนำที่มีความหนาเท่ากับ 0.17 มม. มีค่าความนำเท่ากับ 1.18×10^5 S/m. โดยออกแบบโครงสร้างให้เป็นอภิวัดสุ (Metamaterial) เพื่อรองรับช่วงความถี่ ISM Band 2.4 GHz โดยที่สายอากาศมีขนาด 100×100 มม² สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบคือ แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวเมื่อเปิดสวิตช์และแบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบมีทิศทางเมื่อปิดสวิตช์ ผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศเมื่อโค้งงอในแนวแกน X และแกน Y เปรียบเทียบกับสถานะปกติ ค่าที่ได้มีคลาดเคลื่อนจากกันเพียงเล็กน้อย

I. Martinez, C. Mao, D. Vital, H. Shahariar, D. H. Werner, J. S. Jur, และ S Bhardwaj [22] นำเสนอการออกแบบสายอากาศบนวัสดุที่เป็นผ้าที่สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ ISM Band 2.4 GHz โดยใช้โปรแกรม HFSS วัสดุผ้าฐานรองมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 1.7 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) 0.008 วัสดุตัวนำมีความหนาเท่ากับ $45 \mu\text{m}$. มีค่าความนำเท่ากับ $1.3 \times 10^6 \text{ S/m}$. ทำการวิเคราะห์ค่าที่วัดได้โดยสายอากาศผ้าที่สร้างจากเทคนิคการพิมพ์ (Screen-printing) มีค่าการสูญเสียย้อนกลับใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้มากกว่าการสร้างสายอากาศผ้าที่ใช้เทคนิคการปัก (Embroidery) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของค่าการสูญเสียย้อนกลับมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการออกแบบไว้

D. Sipal, M. P. Abegaonkar, และ S. K. Koul [23] นำเสนอสายอากาศรูปวงกลมที่มีขนาดกระทัดรัดสำหรับการใช้งานในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศมีขนาด $14 \times 39 \text{ มม}^2$ ใช้วัสดุฐานเป็นแผ่นพิมพ์วงจร Neltec หนา 0.762 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 3.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.0024 ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานในระบบไมโม สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ต่ำกว่า -20 dB ที่ช่วงความถี่ 3 – 10.6 GHz มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional)

S. Yan, P. J. Soh, และ G. A. E. Vandenbosch [24] นำเสนอสายอากาศผ้ารูปทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้เทคนิค SIW (Substrate-Integrated Waveguide) มีวัสดุฐานรองเป็นผ้าสักรัดหนา 3 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 1.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.044 ใช้วัสดุตัวนำเป็นผ้า ShieldIt Super Conductive Textile หนา 0.17 มม. มีค่าความนำเท่ากับ $1.18 \times 10^5 \text{ S/m}$. สำหรับย่านความถี่ใช้งานที่ 2.4 GHz และ 5 GHz รองรับระบบไมโม จากการศึกษาจากการจำลองผลพบว่า การจัดเรียงทิศทางของสายอากาศที่ 1 และ 2 รวมถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2 อัน มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) โดยค่าที่นำไปใช้งานจะได้รับการจัดรูปของสายอากาศที่ 1 และ 2 หันไปในทิศทางตรงข้ามกันและสายอากาศทั้งสองมีระยะห่างกันอยู่ที่ 10 มม. เพื่อความยืดหยุ่นในการโค้งงอ

J. Ren, W. Hu, Y. Yin, และ R. Fan [25] นำเสนอสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมขนาดกระทัดรัดสำหรับใช้งานย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบไมโม โดยสร้างบนวัสดุแผ่นพิมพ์วงจร FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 4.4 หนา 0.8 มม. สายอากาศมีขนาดเพียง $32 \times 32 \text{ มม}^2$ เทคนิคการเจาะร่องรูปตัว L ที่ระนาบกราวด์ทั้งสองด้านที่สายอากาศที่ 1 และ 2 ช่วยให้สายอากาศสามารถรองรับย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ได้และทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $\lambda_g/4$ ที่จุดกึ่งกลางของระนาบกราวด์ระหว่างสายอากาศที่ 1 และ 2 ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศดีขึ้น

Y. K. Choukiker, S. K. Sharma, และ S. K. Behera [26] นำเสนอสายอากาศโมโนโพล รูปทรงแปดเหลี่ยมสำหรับระบบโมโนโพลประยุกต์ใช้งานกับระบบ LTE, WiFi, WiMAX และ WLAN โครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบและจำลองผลโดยใช้โปรแกรม HFSS บนวัสดุฐานรองแผ่นพิมพ์ วงจร FR-4 หนา 1.54 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 4.4 สายอากาศมีขนาด 100×50 มม² เทคนิคการใช้สัดับรูปตัว T ที่ระนาบกราวด์ซึ่งจัดวางอยู่กึ่งกลางระกวางสายอากาศที่ 1 และ 2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศและลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) จากการวัดผลสายอากาศสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่ 1 คือ 1.65 – 1.9 GHz และช่องความถี่ที่ 2 คือ 2.68 – 6.25 GHz โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ 1 และ ต่ำกว่า -15 dB ในช่วงความถี่ที่ 2

L. Kang, H. Li, X. Wang, และ X. Shi [27] ทำการนำเสนอสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ ช่องเปิดขนาดกะทัดรัดสำหรับใช้งานในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบโมโนโพล โดยสายอากาศถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองแผ่นพิมพ์วงจร FR-4 หนา 1.6 มม. มีขนาด 38.5×38.5 มม² ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 4.4 สายนำสัญญาณถูกออกแบบให้มีขนาดที่ไม่เท่ากัน มีผลทำให้สายอากาศสามารถรองรับช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ได้ จากนั้นทำการใช้เทคนิคการวางสัดับรูปตัว T ระหว่างสายอากาศทั้ง 2 เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ให้ต่ำกว่า -15 dB และทำการเจาะร่องรูปตัว L ที่ระนาบกราวด์เพื่อทำการนอตซ์ความถี่ 5 – 5.9 GHz จากการวัดผลสายอากาศสามารถตอบสนองต่อช่วงความถี่ 3.1 – 10.6 GHz มีช่วงความถี่นอตซ์ที่ 5.03 – 5.97 GHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านต่ำกว่า -15 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน

L. Liu, S. W. Cheung, และ T. I. Yuk [28] นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปขนาดกะทัดรัด สำหรับการใช้งานย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบโมโนโพล รูปแบบของสายอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยม ออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานรอง Roger R4350B หนา 1.6 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 3.5 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.004 มีขนาด 22×36 มม² สายอากาศถูกออกแบบให้ใช้เทคนิคการวางสัดับรูปตัว T ที่ระนาบกราวด์ด้านหลังเพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ทำการเจาะร่องแนวตั้งยาวที่จุดกึ่งกลางของสัดับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวสัดับให้ดีขึ้น และทำการใช้สตริปยาววงข้าง T สัดับเพื่อให้ได้ช่วงนอตซ์ความถี่ 5.15 – 5.85 GHz จากการวัดผลสายอากาศค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.6 – 11 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ต่ำกว่า -15 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3.1 GHz ขึ้นไป และมีช่วงความถี่นอตซ์ตั้งแต่ 5.15 – 5.85 GHz มีค่า S_{11} สูงสุด -1.4 dB ที่ความถี่นอตซ์กึ่งกลาง

Z. Li, C. Yin, และ X. Zhu [29] นำเสนอสายอากาศวิวลติสำหรับการใช้งานย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบโมโนโพล โดยสายอากาศมีขนาดเท่ากับ 26×26 มม² ออกแบบและสร้างบน

วัสดุฐานแผ่น Taconic RF-35 ที่มีความหนา 0.762 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.0018 คณะผู้จัดทำได้นำเสนอเทคนิคการเซาะร่องรูปตัว T ที่ระนาบกราวด์ระหว่างพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 จากนั้นทำการใช้เทคนิคการวางนอตช์ความถี่แบบ Split ring resonator (SSR) ที่มีขนาดไม่เท่ากันขนานข้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป เพื่อให้ได้ช่วงความถี่นอตช์ตามที่ต้องการ จากการวัดผลสายอากาศวิวลดมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.9 – 11.6 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ต่ำกว่า -15 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน มีช่วงความถี่นอตช์ที่ย่าน WLAN ตั้งแต่ 5.3 – 5.8 GHz และที่ย่านความถี่ X-band ตั้งแต่ 7.85 – 8.55 GHz



บทที่ 3

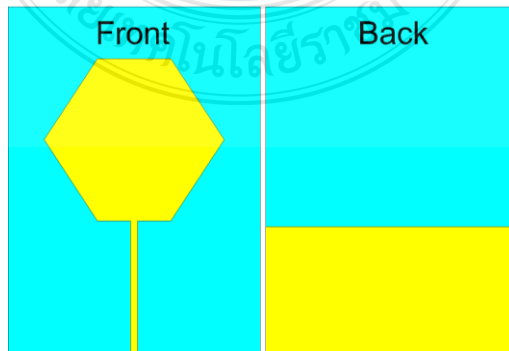
การออกแบบสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศโมโนโพลโดยใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป ทำการออกแบบและจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ซึ่งจะเป็นค่าพารามิเตอร์หลักที่บ่งบอกถึงความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ ในขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างในจุดต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimize) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ จึงเป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบเท่านั้น ผลที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายจากโปรแกรมจำลองผลจึงอาจจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ต่างออกไปจากค่าที่ได้ในขั้นตอนการคำนวณ

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม

จากการศึกษาทฤษฎีที่ผ่านมาในบทที่ 2 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้จัดทำจึงตั้งสมมติฐานและวางแผนที่จะทำการออกแบบสายอากาศที่มีความยืดหยุ่น โค้งงอได้ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งยังให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศที่ดี จากคุณลักษณะดังกล่าวมาทางผู้จัดทำจึงเลือกที่จะออกแบบสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานเป็นผ้า ทำการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยรูปแบบโครงสร้างตัวแผ่นสัญญาณจะเป็นรูปเลขาคณิตหกเหลี่ยม มีข้อดีที่ทำให้สายอากาศสามารถตอบสนองต่อช่วงความถี่ที่กว้าง เหมาะกับการประยุกต์ใช้กับช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศเบื้องต้นจะเป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม

ในเบื้องต้นการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปหกเหลี่ยม จะทำการใช้วัสดุฐานที่เป็นผ้าและในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำมีความสนใจที่จะใช้ผ้าที่ใช้กับชุดนักศึกษาวิชาทหารหรือผ้าลายก้างปลา (Herringbone Twill: HBT) สำหรับวัสดุตัวนำทางผู้จัดทำเลือกที่จะใช้วัสดุผ้าตัวนำแบบพิเศษ ShieldIt Super Conductive Textile ที่ผลิตโดยบริษัท LessEMF Inc. ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถใช้เตารีดรีดให้แผ่นผ้าตัวนำติดกับแผ่นผ้าวัสดุฐานได้ วัสดุทั้งสองอย่างที่นำมาใช้ออกแบบมีคุณสมบัติดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r)	= 2.25
ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)	= 0.03
ความหนาของวัสดุฐาน (h)	= 0.43 มม.
ความหนาของวัสดุตัวนำ (t)	= 0.17 มม.
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (σ)	= 1.18×10^5 S/m.

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม สิ่งที่ต้องการหาในเบื้องต้นคือ การหาขนาดของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง 50Ω ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในระบบสื่อสาร โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.37) และ สมการ (2.38) ตามลำดับดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)^2}}$$

$$Z_o = \frac{120\pi}{(\sqrt{\epsilon_{eff}}) \left[\frac{W}{h} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]}$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.45)

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r (\sqrt{\epsilon_{eff}})}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.37) และ (2.38) จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{2.25+1}{2} + \left[\frac{2.25-1}{\sqrt{1+12\left(\frac{0.43}{1.2}\right)}} \right]$$

$$\epsilon_{eff} = 1.896$$

$$Z_o = \frac{120\pi}{(\sqrt{1.896}) \left[\frac{1.2}{0.43} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{1.2}{0.43} + 1.444 \right) \right]}$$

$$Z_o = 53.20 \ \Omega$$

เมื่อได้ขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 1.2 มม. ขั้นตอนต่อไปจะทำการออกแบบความยาวของสายนำสัญญาณ นำค่าที่ได้จากสมการที่ (2.37) แทนค่าในสมการที่ (2.45) เพื่อหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ในขั้นตอนเริ่มต้นของการออกแบบนั้น จะทำการออกแบบให้สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ตั้งแต่ที่ช่วงความถี่ 2.4 GHz โดยจะใช้ช่วงความถี่ดังกล่าวในการออกแบบความยาวของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งของสายอากาศ

$$\lambda_g = \frac{(3 \times 10^8)}{(2.4 \times 10^9)(\sqrt{1.896})}$$

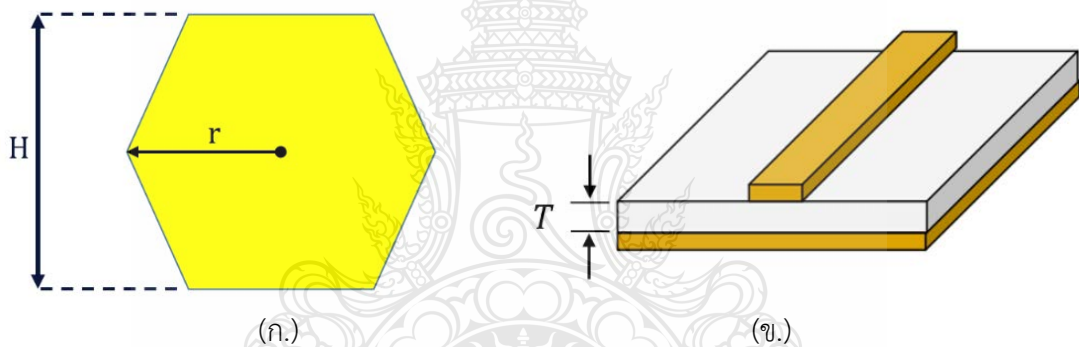
$$\lambda_g = 90.78 \text{ มม.}$$

สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้น จะใช้ค่าความยาวของสายนำสัญญาณประมาณ $\lambda_g/4$ หรือมีความยาวโดยประมาณ 22.69 มม.

ทำการออกแบบตัวแพทช์สายอากาศที่มีรูปทรงหกเหลี่ยมโดยใช้สมการที่ (3.1) คำนวณหาพื้นที่ของรูปทรงหกเหลี่ยม โดยสมการมีที่มาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [18] ซึ่งมีรูปแบบของการแทนค่าในสมการดังรูปที่ 3.2 และมีรายละเอียดดังนี้

$$f_l = \frac{72}{H+r+T} \quad (3.1)$$

โดยที่ f_l คือ ความถี่ต่ำของสายอากาศ (GHz)
 r คือ รัศมีของรูปทรงหกเหลี่ยม (มม.)
 T คือ ระยะห่างจากระนาบกราวด์ถึงแพทช์ หรือ ความหนาของวัสดุฐาน (มม.)
 H คือ ระยะจากด้านหนึ่งถึงอีกด้านหนึ่งของรูปหกเหลี่ยม (มม.)



รูปที่ 3.2 โครงสร้างและพารามิเตอร์จากสมการที่ (3.1)

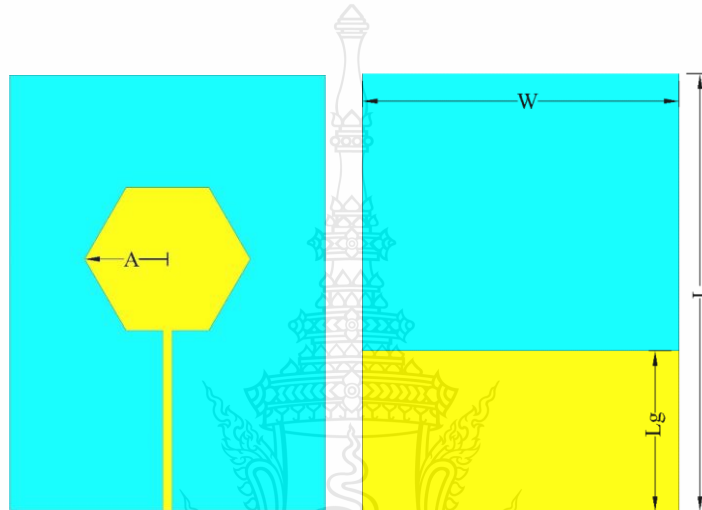
(ก.) พารามิเตอร์ r และพารามิเตอร์ H และ (ข.) พารามิเตอร์ T

ทำการคำนวณออกแบบโดยแทนค่าลงในสมการที่ (3.1) จะได้

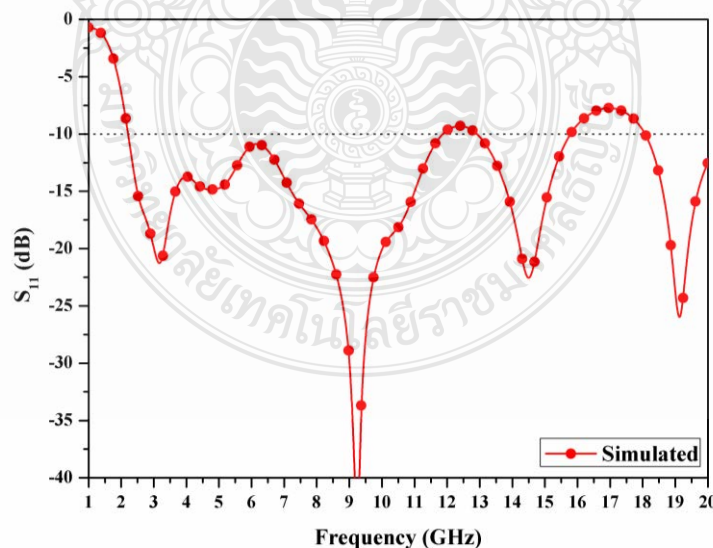
$$f_l = \frac{72}{(11\sqrt{3})+11+0.43}$$

$$f_l = 2.36 \text{ GHz}$$

ดังนั้นค่าความยาวรัศมีของรูปทรงหกเหลี่ยมด้านเท่าจะมีค่าเท่ากับ 11 มม. โดยช่วงความถี่ต่ำที่สายอากาศรูปทรงหกเหลี่ยมสามารถตอบสนองได้ที่ช่วงความถี่ประมาณ 2.36 GHz ซึ่งจะใช้งานในขั้นตอนการจำลองค่าเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ดังรูปที่ 3.3 โดยมีค่าพารามิเตอร์ $W = 42$ มม. , $L = 58$ มม. , $W_f = 1.2$ มม. , $L_f = 23$ มม. และ $L_g = 22$ มม. สายอากาศที่ทำการจำลองผล จะแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ดังรูปที่ 3.4 โดยที่สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.21 – 11.86 GHz

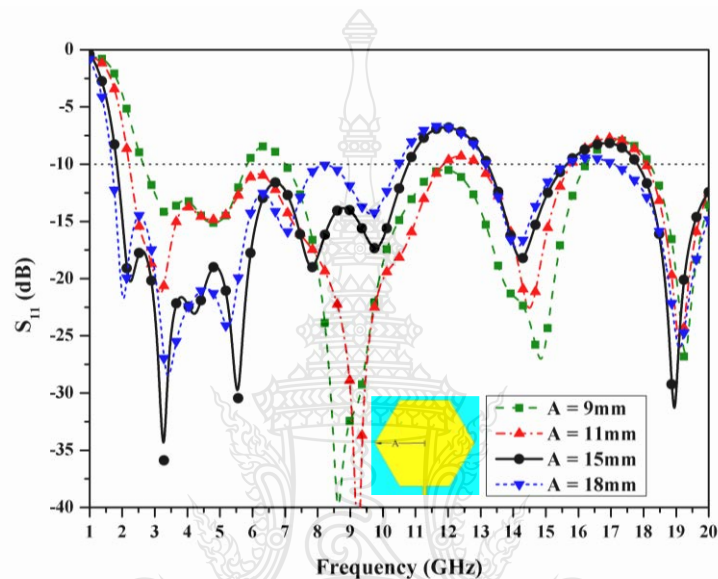


รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น



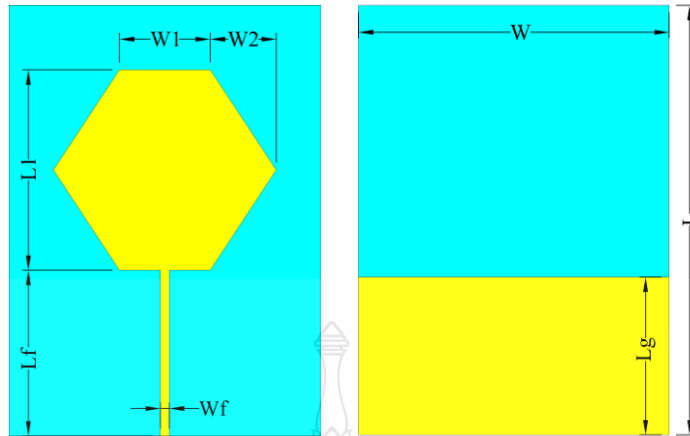
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

ต่อมาทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ A รัศมีของรูปทรงหกเหลี่ยม โดยจะทำการปรับเพิ่มและลดค่าของพารามิเตอร์ A ซึ่งจะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ดังรูปที่ 3.5 หลังจากการทำการศึกษาผลกระทบจากการปรับเพิ่มและลดค่าพารามิเตอร์ A พบว่า พารามิเตอร์นี้มีความเกี่ยวข้องกับแบนด์วิดท์และค่าอิมพีแดนซ์แมชซิ่งของสายอากาศ โดยเมื่อแผ่นหกเหลี่ยมมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น สายอากาศจะตอบสนองต่อความถี่ต่ำได้ดีขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ A = 15 มม. คือค่าเหมาะสม โดยที่สายอากาศจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.83 – 10.78 GHz

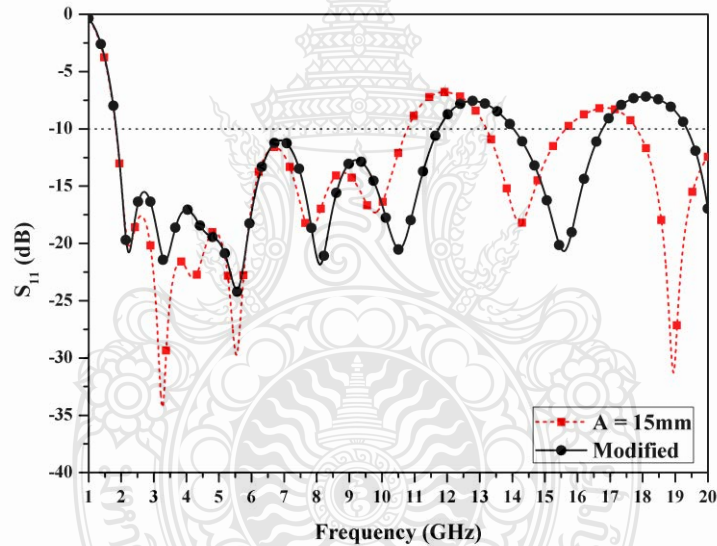


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ A

ขั้นตอนต่อมา ทำการปรับขนาดและรูปทรงหกเหลี่ยมให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยเริ่มจากแปลงขนาดของรูปทรงเหลี่ยมด้านเท่าให้มีพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.6 โดยสายอากาศโมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีค่าพารามิเตอร์ A = 15 มม. จะมีขนาดพารามิเตอร์ $W1 = 15$ มม. , $W2 = 7.5$ มม. , $L1 = 25.98$ มม. จากนั้นทำการจำลองผลและปรับค่าพารามิเตอร์ $W1$, $W2$ และ $L1$ โดยใช้กรรมวิธีเชิงประสภการณ์จนได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศโมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (Modified) โดยที่สายอากาศมีขนาดพารามิเตอร์ $W1 = 13$ มม. ลดลงจากค่าเดิม 2 มม. พารามิเตอร์ $W2 = 8.5$ มม. เพิ่มขึ้น 1 มม. และ พารามิเตอร์ $L1 = 27$ มม. เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.02 มม.

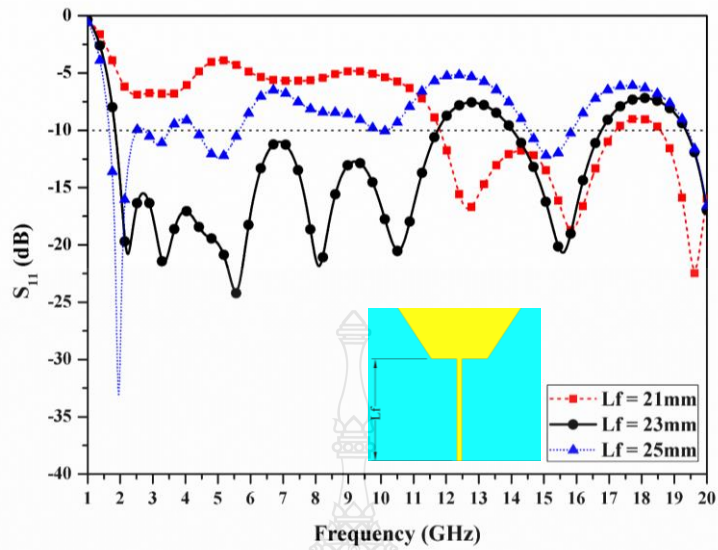


รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมหลังจากปรับขนาดรูปทรงหกเหลี่ยม

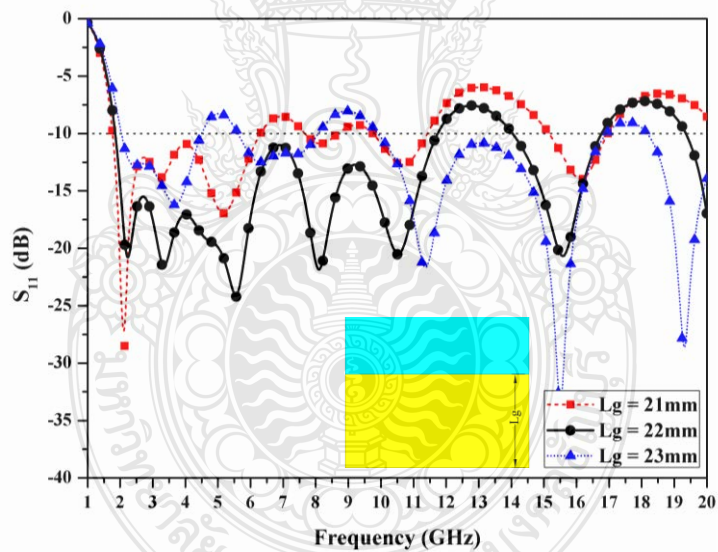


รูปที่ 3.7 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมหลังจากปรับขนาดรูปทรงหกเหลี่ยม

ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ความยาว ของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (L_f) และความยาวของระนาบกราวด์ (L_g) ที่มีผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยจะทำการเพิ่มและลดค่าของพารามิเตอร์ (L_f) , (L_g) สลับกัน ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_f



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_g

จากผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของพารามิเตอร์ L_f และ L_g พบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ $L_f = 23$ มม. และ $L_g = 22$ มม. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองจะมีระยะห่างกับอยู่ 1 มม. ซึ่งจะได้ค่าความสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 1.85 – 11.72 GHz

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกับสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจะถูกนำมาแสดงดังตารางที่ 3.1 และสายอากาศจะรูปแบบดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม

ชื่อพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	ชื่อพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	42	L	58
Wf	1.2	Lf	22.3
W1	13	Lg	21.3
W2	8.5	L1	27
h	0.43	t	0.17

การคำนวณหาแบนด์วิดท์ (Bandwidth) สามารถหาได้จากสมการ (2.20) ซึ่งจะคำนวณจากกราฟค่าความสูญเสียย้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่ได้จากการจำลองผล ดังตัวอย่าง

$$\begin{aligned}
 BW &= f_H - f_L \\
 &= 11.72 - 1.85 \\
 &= 9.85 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

คำนวณค่าความถี่กลางดังสมการที่ (2.21)

$$\begin{aligned}
 f_c &= \frac{f_H - f_L}{2} + f_L \\
 &= \frac{11.72 - 1.85}{2} + 1.85 \\
 &= 6.785 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ดังสมการที่ (2.22)

$$BW(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\%$$

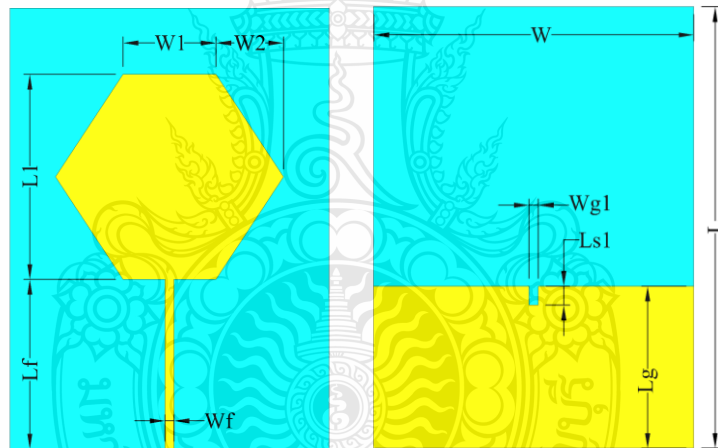
$$= \left(\frac{11.72 - 1.85}{6.785} \right) \times 100\%$$

$$= 145.46\%$$

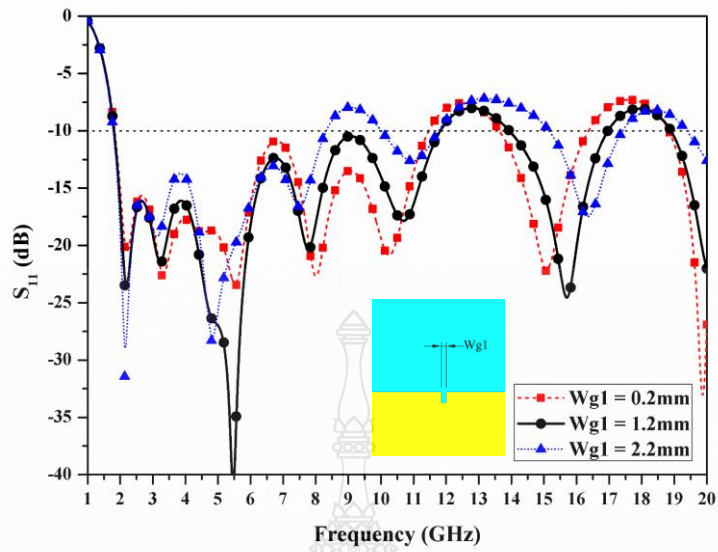
3.3 การพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม

3.3.1 วิธีการเซาะร่องบนระนาบกราวด์

ผู้จัดทำได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาได้พบว่าวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นนั้นมีหลากหลายวิธี แต่จะเลือกวิธีที่น่าสนใจจากงานวิจัย [8], [10] โดยจะทำการเซาะร่องเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่ระนาบกราวด์ ช่วงระหว่างรอยต่อจากระนาบกราวด์ไปยังตัวแพทช์รูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นทำการศึกษาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้รับผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Wg1$ และ $Ls1$

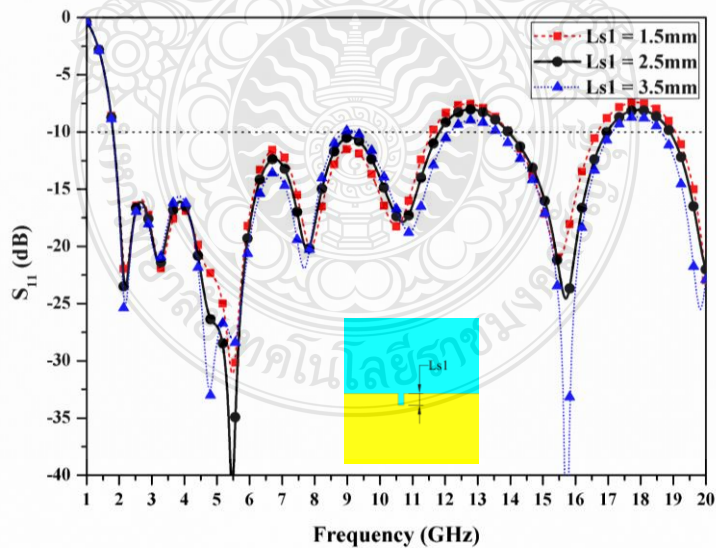


รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมและการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์



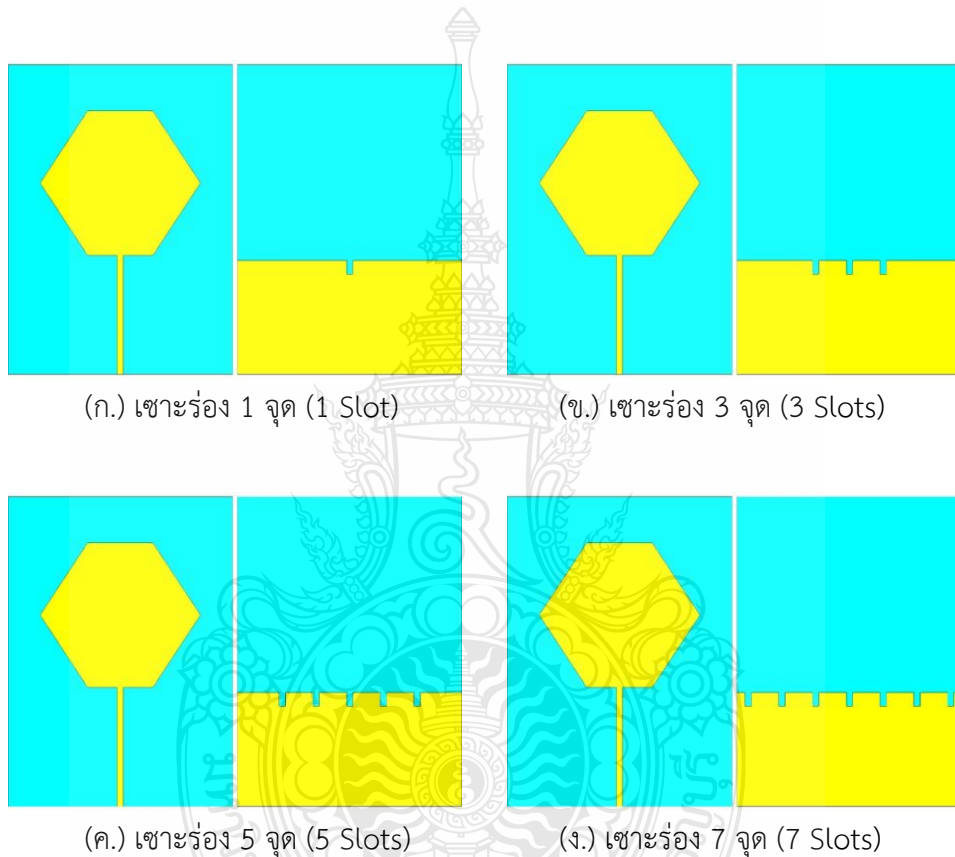
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $Wg1$

ในรูปที่ 3.11 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) หลังจากการปรับขนาดความกว้างของร่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กบนระนาบกราวด์ ($Wg1$) จาก 0.2 มม. , 1.2 มม. และ 2.2 มม. ซึ่งขนาดที่เหมาะสมที่สุดคือ $Wg1 = 1.2$ มม. ทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น จากช่วงความถี่ 1.85 – 11.82 GHz เป็น 1.81 – 11.80 GHz

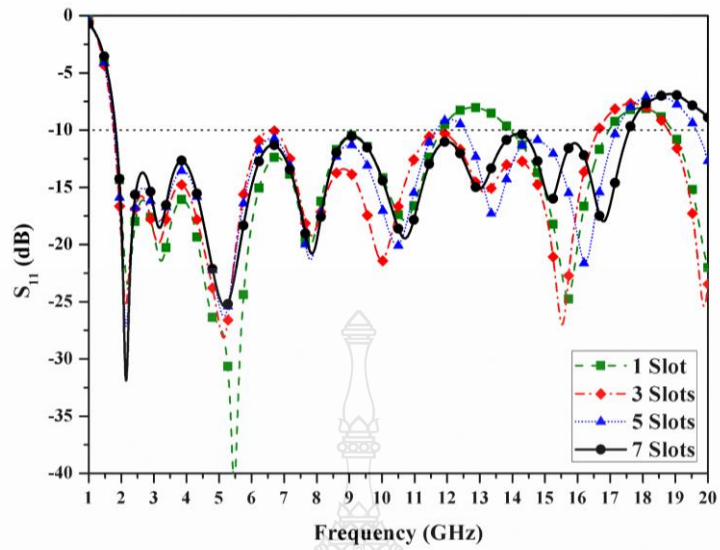


รูปที่ 3.12 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $Ls1$

ในรูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) หลังจากการปรับขนาดความยาวของร่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กบนระนาบกราวด์ L_{g1} จาก 1.5 มม. , 2.5 มม. และ 3.5 มม. ซึ่งขนาดที่เหมาะสมที่สุด คือ $L_{g1} = 2.5$ มม. ทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้นและในช่วงความถี่ประมาณ 9 GHz ยังมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ยังต่ำกว่า -10 dB ทำการศึกษาผลกระทบจากการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ โดยเปรียบเทียบการเจาะร่องจาก 1 จุด , 3 จุด , 5 จุด และ 7 จุด ดังโครงสร้างในรูปที่ 3.13 ซึ่งจะได้ผลการเปรียบเทียบค่าดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 โครงสร้างสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมที่ทำกราะร่องที่ระนาบกราวด์
 (ก.) เจาะร่อง 1 จุด (1 Slot) , (ข.) เจาะร่อง 3 จุด (3 Slots) ,
 (ค.) เจาะร่อง 5 จุด (5 Slots) และ (ง.) เจาะร่อง 7 จุด (7 Slots)



รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเจาะร่อง 1, 3, 5 และ 7 จุด

จากรูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบผลการจำลองผลค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อทำการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์จาก 1 จุด , 3 จุด , 5 จุด และ 7 จุด พบว่าสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น รองรับช่วงความถี่ที่กว้างมากขึ้น จากรูปแบบของสายอากาศที่ไม่มีการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์จะสามารถตอบสนองในช่วงความถี่ 1.85 – 11.72 GHz มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 9.87 GHz หลังจากการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ 7 จุดแล้ว สายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยมสามารถตอบสนองในช่วงความถี่ 1.83 – 17.58 GHz ซึ่งจะทำให้การคำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศจากสมการที่ (2.20)

$$\begin{aligned}
 BW &= f_H - f_L \\
 &= 17.58 - 1.83 \\
 &= 15.75 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

คำนวณค่าความถี่กลางดังสมการที่ (2.21)

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L$$

$$= \frac{17.58 - 1.83}{2} + 1.83$$

$$= 9.705 \text{ GHz}$$

คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ดังสมการที่ (2.22)

$$\begin{aligned} BW(\%) &= \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \\ &= \left(\frac{17.58 - 1.83}{9.705} \right) \times 100\% \\ &= 162.28\% \end{aligned}$$

3.3.2 วิธีการเซาะร่องบนแพทช์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและวิธีการที่จะได้คุณลักษณะนอตซ์ความถี่ [7 – 9] , [11 – 12] โดยรูปแบบที่นิยมใช้จะมีด้วยกัน 2 แบบคือ การเซาะร่องบนวัสดุตัวนำและการเพิ่มสตัปแมตซ์ซึ่งในรูปแบบต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำมีความสนใจที่จะออกแบบนอตซ์ความถี่ที่ใช้การเซาะร่องบนแพทช์ของสายอากาศ รูปแบบที่จะใช้นั้นจะมีลักษณะคล้ายกับตัว C หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า SRR (Split Ring Resonator) [7] , [9] ซึ่งจะทำให้การออกแบบเพื่อให้ใช้งานในช่วงความถี่ 2.485 – 3.1 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการที่จะใช้งาน โดยใช้สมการจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [9] มาใช้ในการคำนวณออกแบบเบื้องต้นตามสมการที่ (3.2) โดยค่าพารามิเตอร์ที่น่าสนใจจะมีดังนี้

$$L_n = \frac{c}{2f_n \left(\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \right)} \quad (3.2)$$

โดยที่	L_n	คือ ความยาวของนอตซ์ (มม.)
	f_n	คือ ความถี่กึ่งกลางของนอตซ์ (GHz)
	c	คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s.)

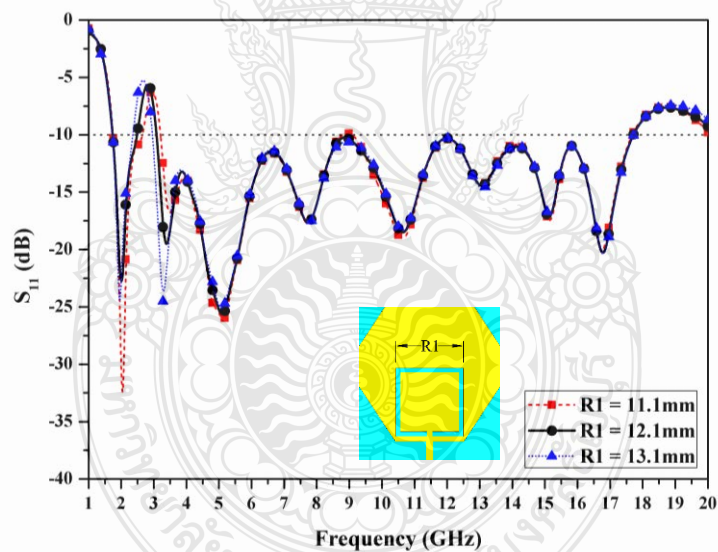
ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

ทำการคำนวณออกแบบโดยแทนค่าลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$L_n = \frac{3 \times 10^8}{2(2.9 \times 10^9) \left(\sqrt{\frac{2.25+1}{2}} \right)}$$

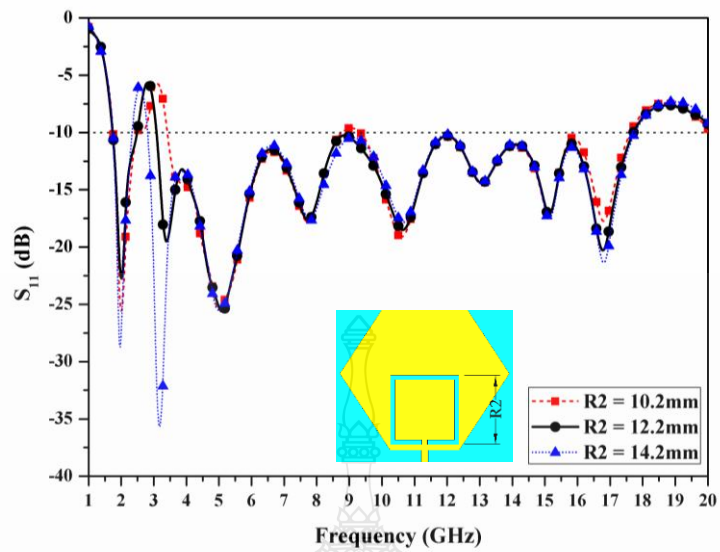
$$L_n = 57.38 \text{ มม.}$$

ดังนั้นค่าความยาวโดยรวมในการเซาะร่องจะมีค่าประมาณ 57.38 มม. ซึ่งจะใช้งานในขั้นตอนการจำลองค่าเบื้องต้น จากนั้นจะทำการปรับระยะความยาวการเซาะร่อง เพื่อให้ได้ช่วงนอตช์ความถี่ตามที่ต้องการ



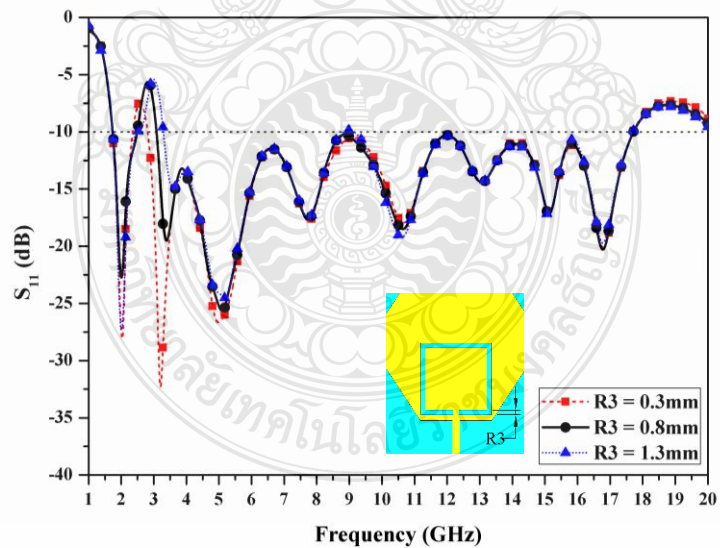
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R1

จากการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ในรูปที่ 3.15 เมื่อทำการเพิ่มขนาดความกว้างของร่องมากขึ้น จะทำให้ช่วงนอตช์ความถี่นั้นขยับไปในด้านความถี่ต่ำ ซึ่งจะต่ำกว่าขอบเขตที่กำหนดไว้ที่ 2.485 GHz ค่าพารามิเตอร์ R1 ที่เหมาะสมที่สุดคือ 12.1 มม.



รูปที่ 3.16 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R2

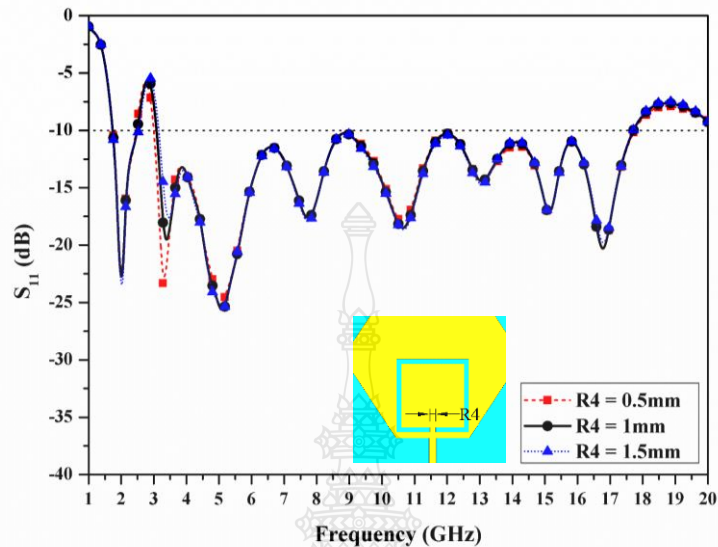
จากรูปที่ 3.16 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อขนาดค่าความสูงของพารามิเตอร์ R2 เปลี่ยนแปลงจาก 10.2 มม. , 12.2 มม. และ 14.2 มม. ทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับค่าพารามิเตอร์ R1 ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R3

จากรูปที่ 3.17 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อค่าพารามิเตอร์ R3 ความกว้างของร่องที่ทำการเซาะ เปลี่ยนแปลงจาก 0.3 มม. , 0.8 มม. และ 1.3 มม. จะทำให้ค่าการสูญเสีย

ย้อนกลับในช่วงแบนด์นอตช์มีกว้างมากยิ่งขึ้นเมื่อร่องที่ทำการเซาะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อร่องมีขนาดเล็ก
 ลงช่วงแบนด์นอตช์ก็จะแคบลงตามไปด้วย

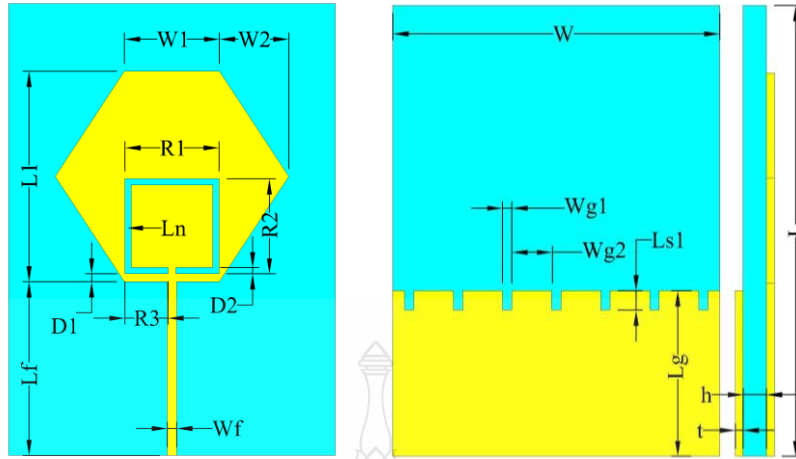


รูปที่ 3.18 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R4

จากรูปที่ 3.18 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อค่าพารามิเตอร์ R4 เปลี่ยนแปลง
 จาก 0.5 มม. , 1 มม. และ 1.5 มม. เมื่อค่าพารามิเตอร์ลดลงจะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วง
 แบนด์นอตช์มีขนาดแคบลงเล็กน้อย ซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้มีความคล้ายคลึงกับค่าพารามิเตอร์ R3

3.4 ผลการจำลองสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับ ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

เมื่อทำการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์
 สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ด้วยโปรแกรม CST จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่
 เหมาะสมแล้ว จึงทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ,
 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) , ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ความหนาแน่นกระแส (Current
 density) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ซึ่งมี
 รายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.19 โครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

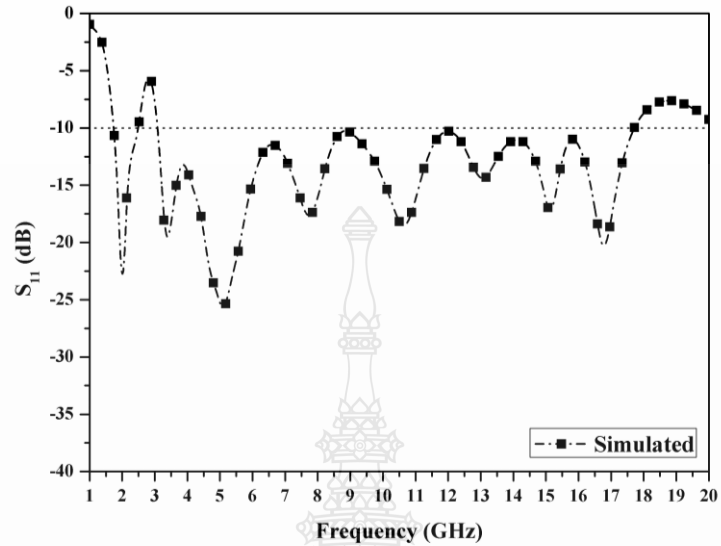
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ชื่อพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	ชื่อพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	42	L	58
Wf	1.2	Lf	22.3
W1	13	Lg	21.3
W2	8.5	L1	27
Wg1	1.2	Ls1	2.5
Wg2	5.1	F	1
R1	12.1	R2	12.2
R3	0.8	R4	1
h	0.43	t	0.17

3.4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

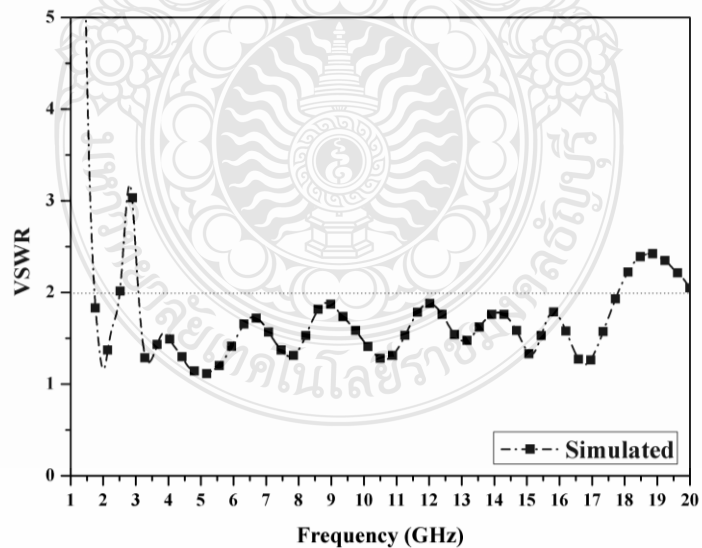
ในรูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งในการหาแบนด์วิธของสายอากาศจะคิดจากช่วงที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ $1.74 - 17.71$ GHz หรือความกว้างแถบ 164.21% และช่วงนอตช์ความถี่ตั้งแต่ $2.48 - 3.08$

GHz ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของระบบอัลตราไวด์แบนด์



รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

3.4.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

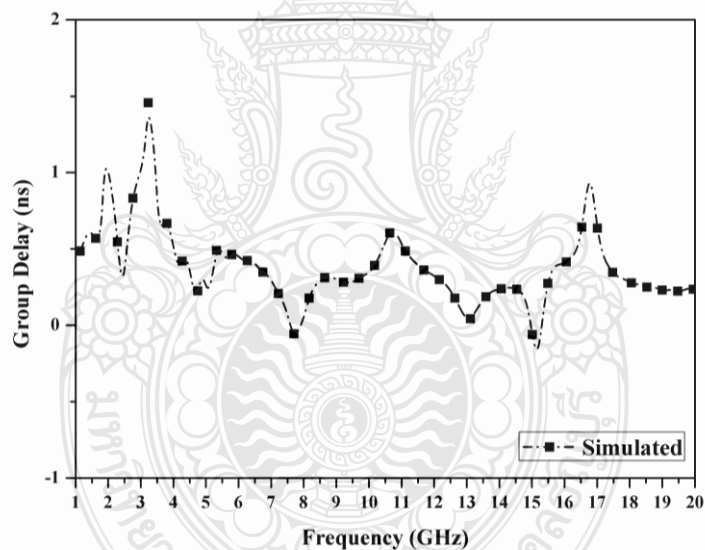


รูปที่ 3.21 ผลการจำลองอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง VSWR ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

จากรูปที่ 3.21 แสดงผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศฟ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งสายอากาศที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้นั้น ค่า VSWR จะต้องอยู่ต่ำกว่า 2 ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ จากรูปความถี่ที่มีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 ตั้งแต่ 1.74 – 17.71 GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แต่ค่า VSWR จะมีค่ามากกว่า 2 เนื่องจากการออกแบบให้มีช่วงนอตช์ความถี่ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.48 – 3.08 GHz

3.4.3 ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

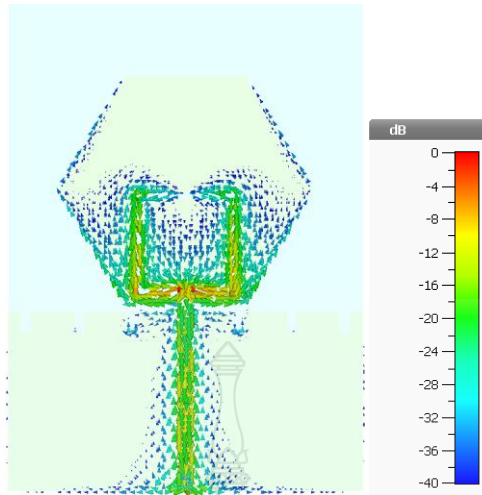
จากรูปที่ 3.22 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศฟ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า 1.5 ns. หรือน้อยกว่าค่ามาตรฐาน 2 ns. ซึ่งทำให้การรับ-ส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศฟ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

3.4.4 ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

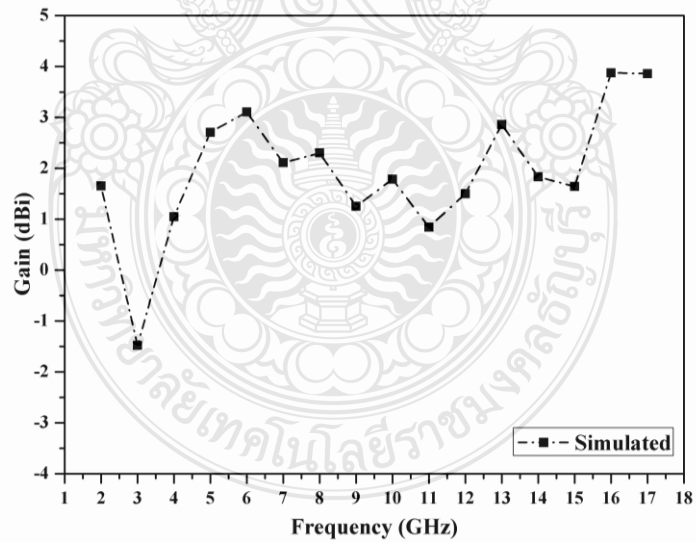
จากรูปที่ 3.23 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.9 GHz ของสายอากาศฟ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยสายอากาศได้รับคุณสมบัติของช่วงนอตช์ความถี่ เพราะมีปริมาณกระแสจำนวนมากรวมตัวกันอยู่ในบริเวณที่ทำการเจาะร่องไว้บนตัวแพทช์ของสายอากาศ



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.9 GHz

3.4.5 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยทำการจำลองผลในช่วงความถี่ 2 – 17 GHz ค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 1.05 – 3.87 dBi ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

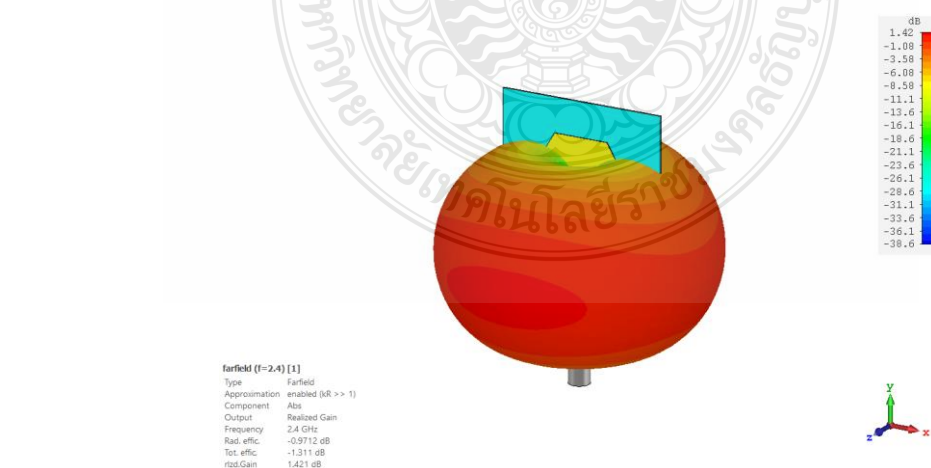
3.4.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ด้วยโปรแกรม CST แบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 2 GHz , 2.4 GHz , 2.9 GHz , 3.5 GHz , 5.2 GHz , 7.25 GHz , 9 GHz และ 12.5 GHz ซึ่งจะมีผลการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศดังรูปที่ 3.24 ถึง 3.31

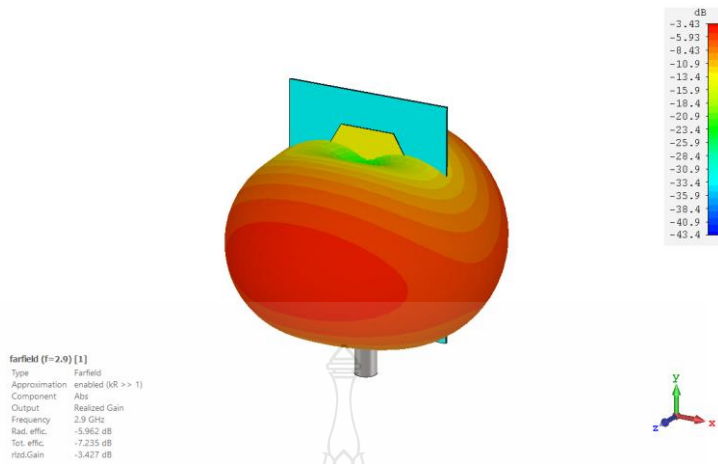
จากรูปที่ 3.25 ถึง 3.29 ที่ช่วงความถี่ 2 GHz , 2.4 GHz , 2.9 GHz , 3.5 GHz และ 5.2 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบรอบทิศทาง มีอัตราขยายโดยเฉลี่ยเรียงตามลำดับเท่ากับ 1.65 dBi , 1.42 dBi , -3.43 dBi , 2.22 dBi และ 3.2 dBi โดยที่ช่วงความถี่ 2.9 GHz จะเป็นช่วงความถี่ที่มีค่าอัตราขยายที่น้อยมาก เนื่องจากเป็นช่วงกึ่งกลางของช่วงนอตซ์ความถี่หรือการลดสัญญาณรบกวนที่มาจากช่วงความถี่ดังกล่าว



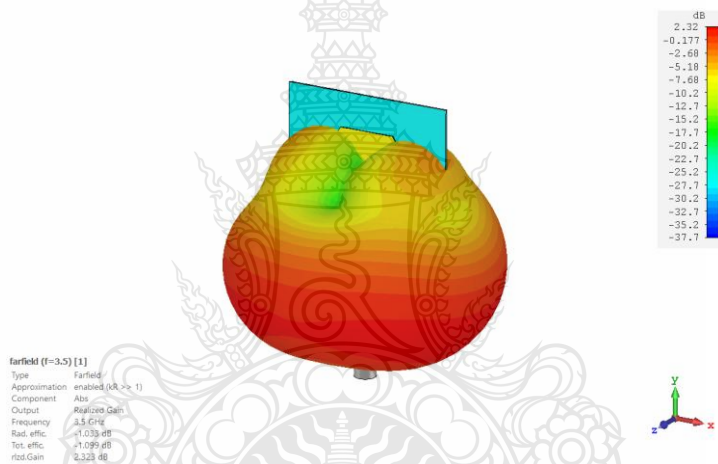
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2 GHz



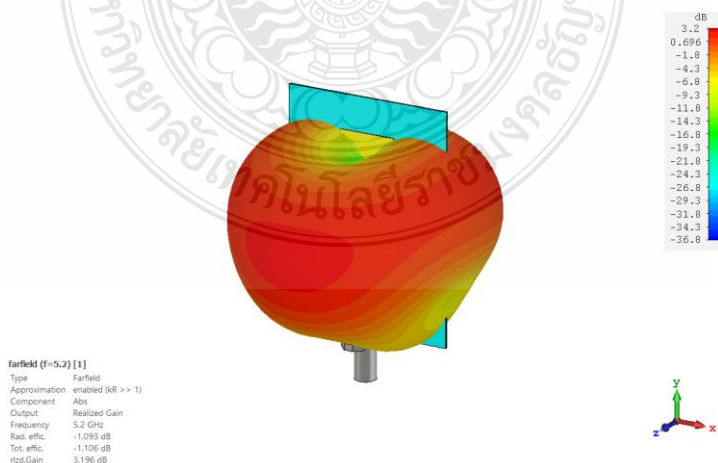
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.4 GHz



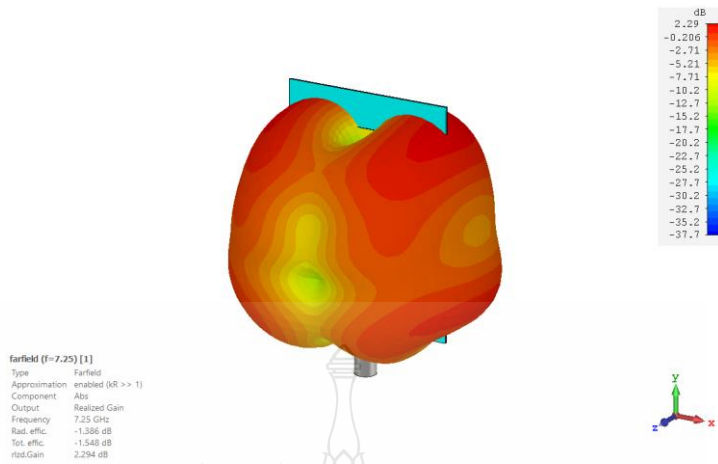
รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.9 GHz



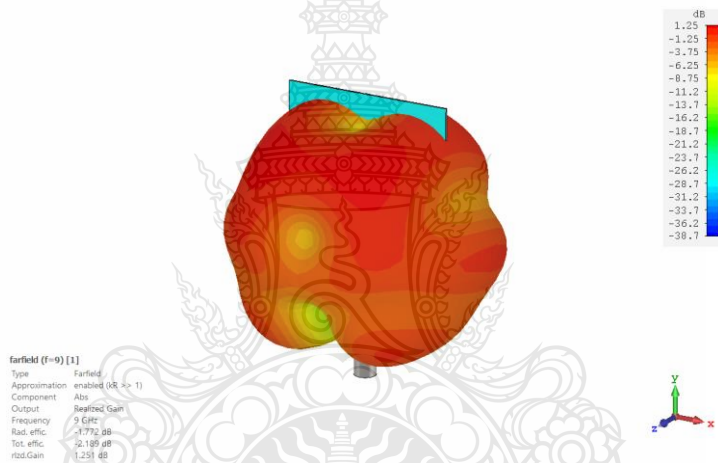
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz



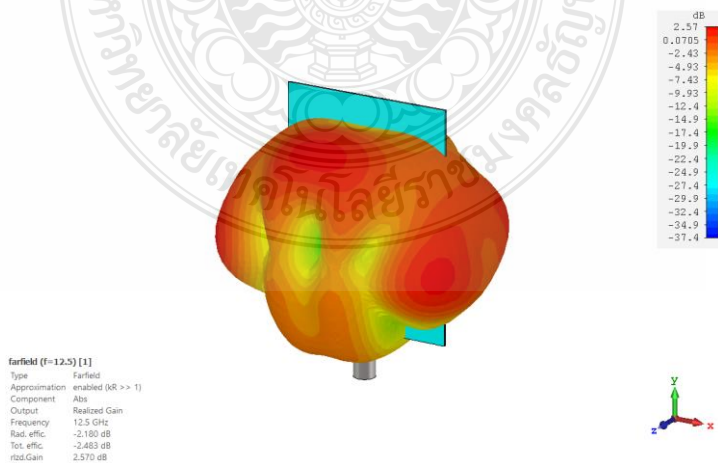
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.2 GHz



รูปที่ 3.30 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 7.25 GHz



รูปที่ 3.31 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 9 GHz

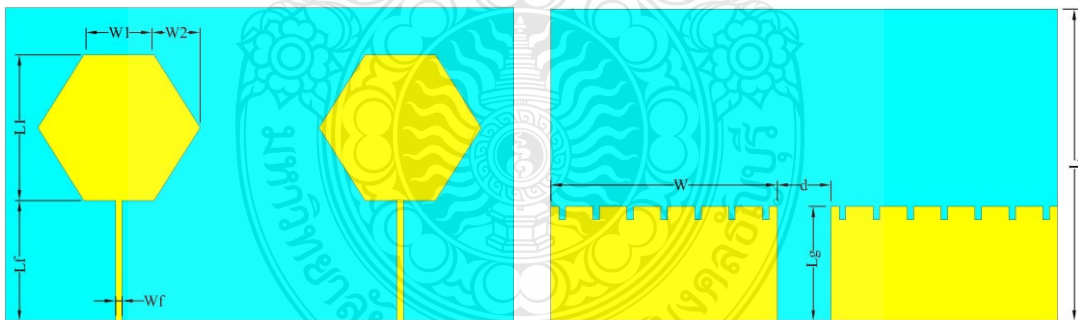


รูปที่ 3.32 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 12.5 GHz

จากรูปที่ 3.30 ถึง 3.32 ที่ ช่วงความถี่ 7.25 GHz , 9.0 GHz และ 12.5 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของช่วงความถี่หรือการใช้งานสายอากาศในย่านความถี่สูง ค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยของสายอากาศในช่วงความถี่นี้ จะมีค่าเท่ากับ 2.29 dBi , 1.25 dBi และ 2.57 dBi ตามลำดับ

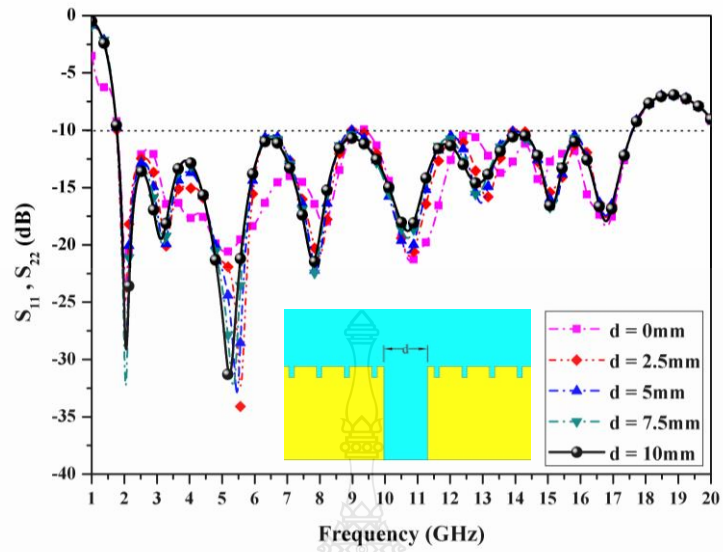
3.5 การออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

จากการออกแบบสายอากาศสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ในขั้นต้นนั้น ประสิทธิภาพของสายอากาศยังไม่เป็นที่พึงพอใจนัก ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาสายอากาศให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น หนึ่งในวิธีที่น่าสนเป็นอย่างยิ่งคือการเพิ่มสายอากาศออกเป็น 2 พอร์ต ซึ่งจะทำให้สายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น ในการออกแบบจะทำได้โดยการจัดวางสายอากาศที่รูปแบบเดียวกัน อยู่ในระนาบเดียวกันและให้ระนาบกราวด์อยู่ห่างกันที่ระยะ (d) พร้อมกับการวางสตัดับคั่นกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองอัน เพื่อช่วยลดปรากฏการณ์เชื่อมร่วม (Mutual coupling) ของสายอากาศทั้งสองอัน ในการออกแบบขั้นต้นจะใช้รูปแบบของสายอากาศในรูปที่ 3.13 ที่ใช้เทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์แบบ 7 จุด เป็นรูปเริ่มต้น และจะมีโครงสร้างสายอากาศแบบไมโม ดังรูปที่ 3.33

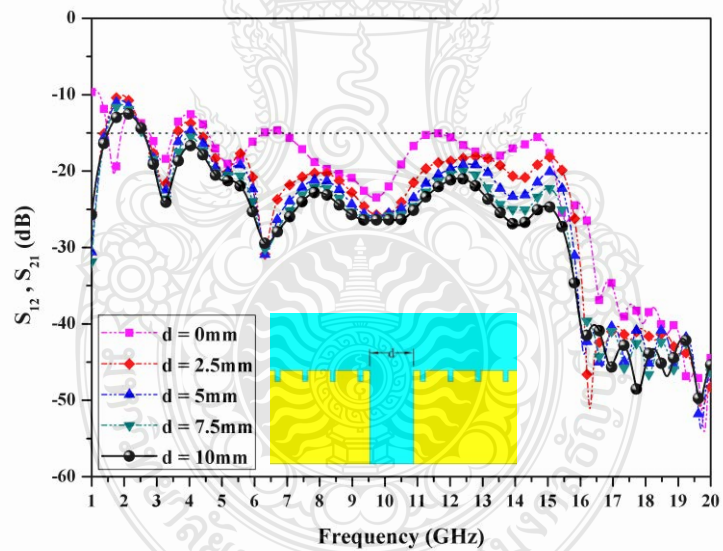


รูปที่ 3.33 รูปแบบโครงสร้างขั้นต้นของการสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

ทำการศึกษาค่าระยะ d ที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ จากกราฟที่ 3.34 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ของสายอากาศเมื่อค่าพารามิเตอร์ d มีการเปลี่ยนแปลงระยะจาก 0 มม. , 2.5 มม. , 5 มม. , 7.5 มม. และ 10 มม. จากการจำลองผลพบว่าเมื่ออากาศทั้ง 2 อันถูกจัดวางอยู่ในระยะที่ห่างกันมากกว่า 0 มม. ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



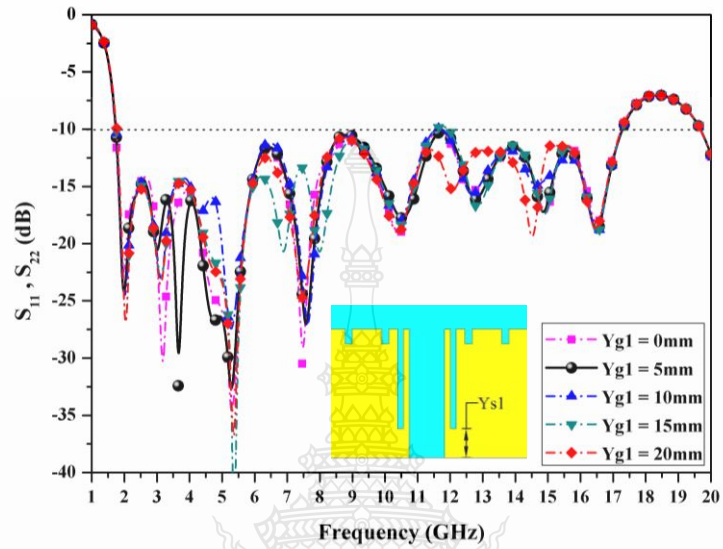
รูปที่ 3.34 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ d



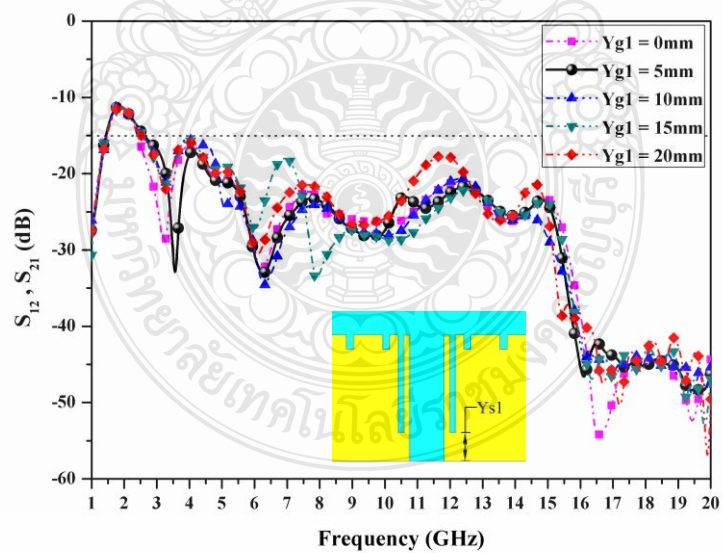
รูปที่ 3.35 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ d

แต่จากกราฟที่ 3.35 การจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศจะพบว่า เมื่อระยะ d เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลง โดยค่าที่ยอมรับได้นั้นจะต้องมีค่าที่ต่ำกว่า -15 dB ซึ่งระยะที่เหมาะสมคือ $d = 10$ มม. แต่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 2.6 GHz ยังมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สูงกว่า -15 dB อยู่

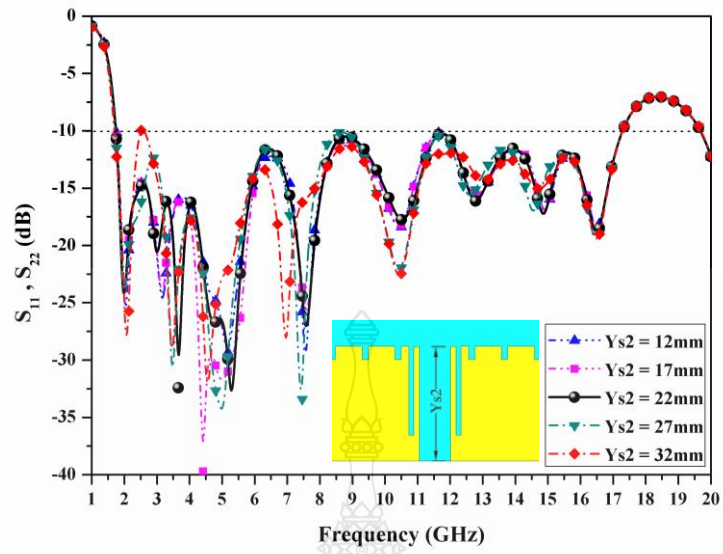
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบและเพิ่มสลับรูปตัว L เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ที่ต่ำ 2.6 GHz ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์มาเกี่ยวข้องเพิ่มเติมคือ Y_{s1} , Y_{s2} , X_{s1} , X_{s2} ดังรูปที่ 3.36 ถึง 3.43



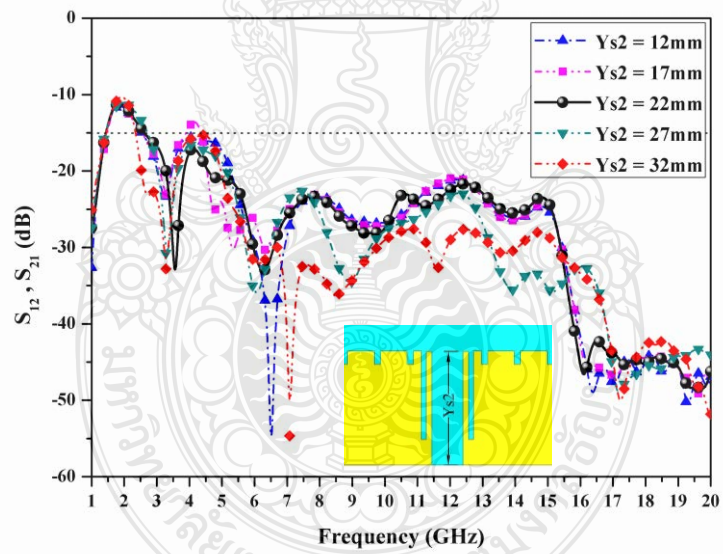
รูปที่ 3.36 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ Y_{s1}



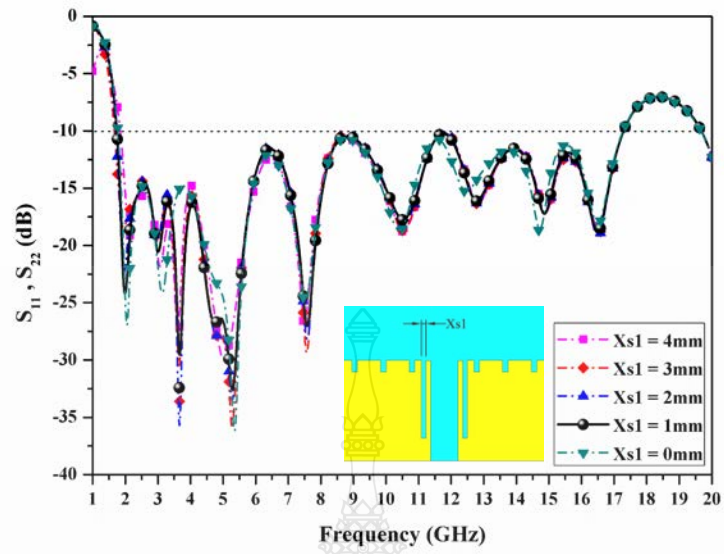
รูปที่ 3.37 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ Y_{s1}



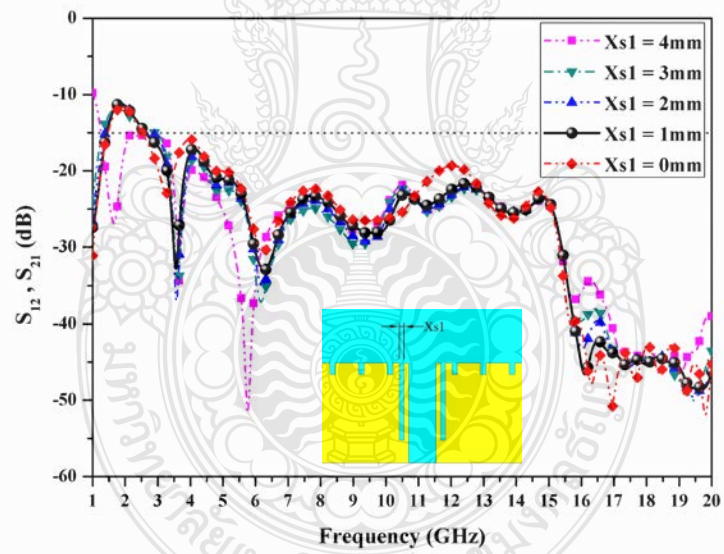
รูปที่ 3.38 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ Y_{s2}



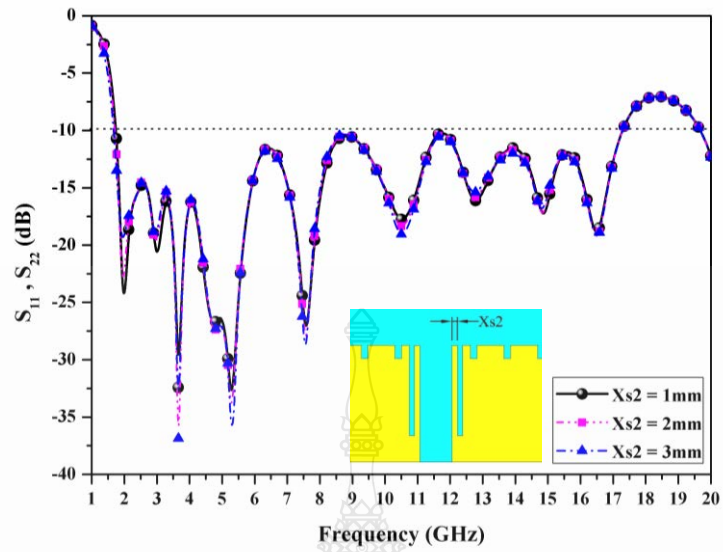
รูปที่ 3.39 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ Y_{s2}



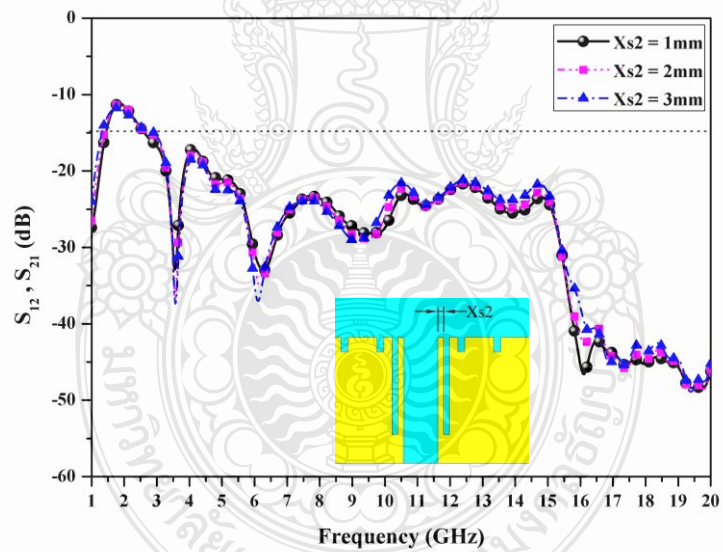
รูปที่ 3.40 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ X_{s1}



รูปที่ 3.41 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ X_{s1}



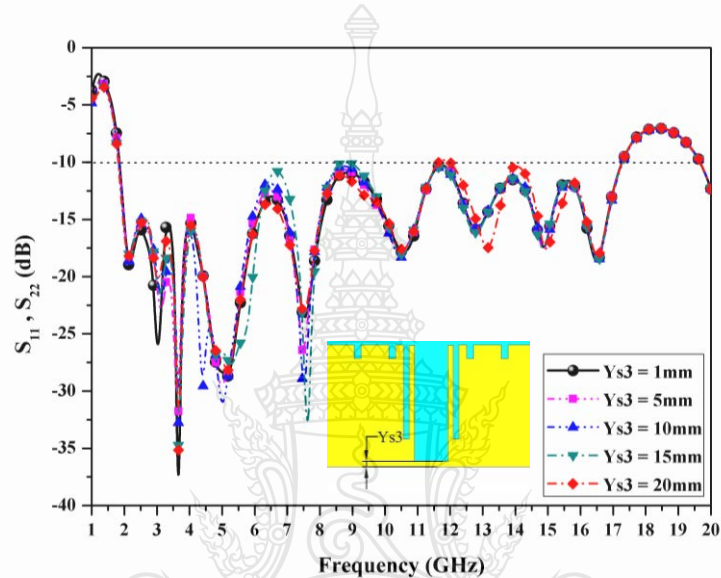
รูปที่ 3.42 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ X_{s2}



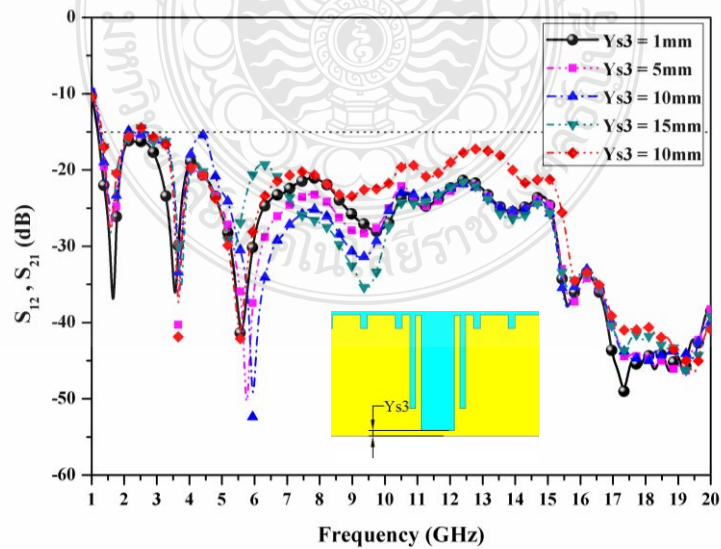
รูปที่ 3.43 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ X_{s2}

จากรูปที่ 3.36 ถึง 3.43 แสดงการศึกษาพารามิเตอร์ Y_{s1} , Y_{s2} , X_{s1} , X_{s2} พบว่า เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความสูงของสตัป Y_{s2} พบว่า เมื่อสตัปมีความยาวมากขึ้นจนยาวกว่าระยะของระนาบกราวด์ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) มีค่าลดลง แต่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จะมีค่าสูงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกลับของสัญญาณบางส่วนและจากการปรับค่าความกว้างของพารามิเตอร์ X_{s1} จะพบว่า เมื่อความของสตัปมีความกว้างมากขึ้นจนทำให้สตัป

ทั้งสองด้านเชื่อมต่อกันจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศในช่วงความถี่ต่ำกว่า 2.6 GHz นั้นมีค่าที่ต่ำกว่า -15 dB และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากรูปที่ 3.35 ถึง 3.42 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ $Ys1 = 5$ มม. , $Ys2 = 22$ มม. , $Xs1 = 1$ มม. , $Xs2 = 1$ มม. ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการออกแบบสแต็คเพิ่มเติมโดยใช้ตัวสแต็คขนาดเล็กจัดวางกึ่งกลางระหว่างระนาบกราวด์ทั้งสองเพื่อเชื่อมต่อระนาบกราวด์เข้าด้วยกัน ทำการศึกษาระยะเวลาความสูงของพารามิเตอร์ $Ys3$ ดังรูปที่ 3.44 และ 3.45



รูปที่ 3.44 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys3$



รูปที่ 3.45 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ys3$

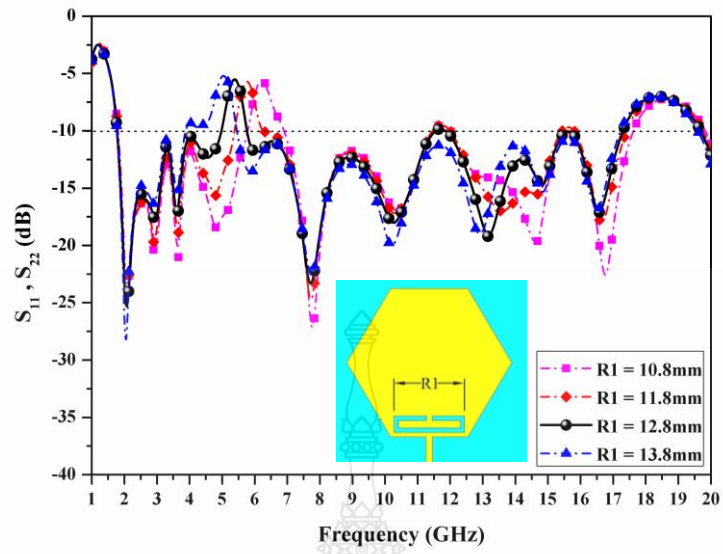
จากรูปที่ 3.44 และ 3.45 แสดงถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของพารามิเตอร์ Ys3 พบว่าเมื่อมีระยะความสูงที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) มีค่าที่สูงขึ้น ตามการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) โดยค่าที่เหมาะสมคือ $Ys3 = 1$ มม. จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB อยู่ในช่วงความถี่ 1.85 – 17.27 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ต่ำกว่า -15 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.19 GHz เป็นต้นไป

ทำการออกแบบบอดี้ความถี่โดยใช้เทคนิคการเซาะร่องบนแพทช์ของสายอากาศ รูปแบบที่จะใช้งานนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับตัว C หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า SRR (Split Ring Resonator) ซึ่งจะทำการออกแบบเพื่อให้ใช้งานในช่วงความถี่ 5.0 – 5.9 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการที่จะใช้งาน และเป็นการลดสัญญาณรบกวนจากช่วงความถี่ดังกล่าว โดยการคำนวณออกแบบเบื้องต้นและค่าพารามิเตอร์ที่น่าสนใจจะมีดังต่อไปนี้ โดยทำการคำนวณออกแบบโดยแทนค่าลงในสมการที่ (3.2) จะได้ว่า

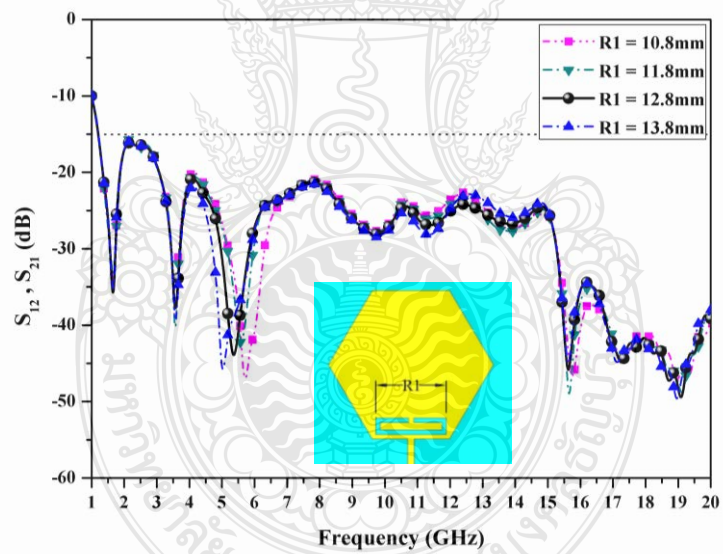
$$L_n = \frac{3 \times 10^8}{2(5.45 \times 10^9) \left(\sqrt{\frac{2.25 + 1}{2}} \right)}$$

$$L_n = 30.53 \text{ มม.}$$

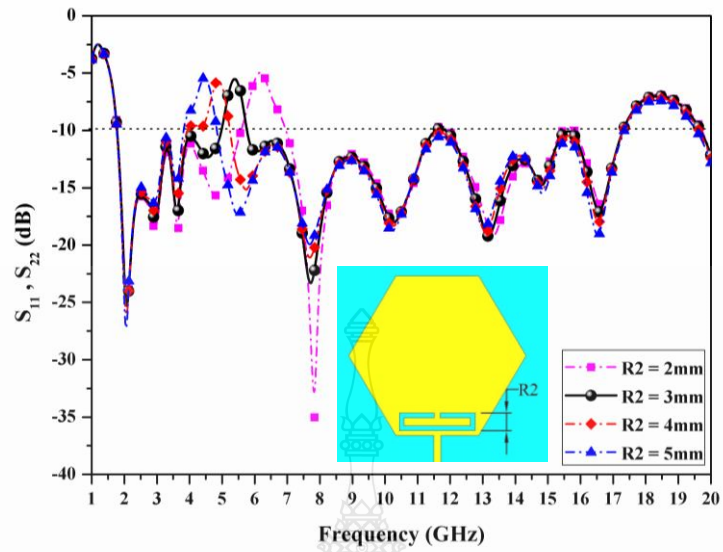
ดังนั้นค่าความยาวโดยรวมในการเซาะร่องจะมีค่าประมาณ 30.53 มม. ซึ่งจะใช้งานในขั้นตอนการจำลองค่าเบื้องต้น จากนั้นจะทำการปรับระยะความยาวการเซาะร่อง เพื่อให้ได้ช่วงบอดี้ความถี่ตามที่ต้องการ



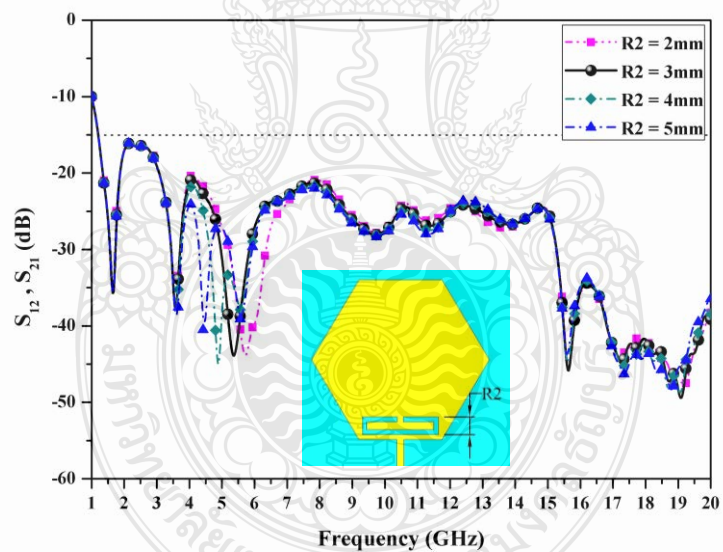
รูปที่ 3.46 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $R1$



รูปที่ 3.47 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $R1$



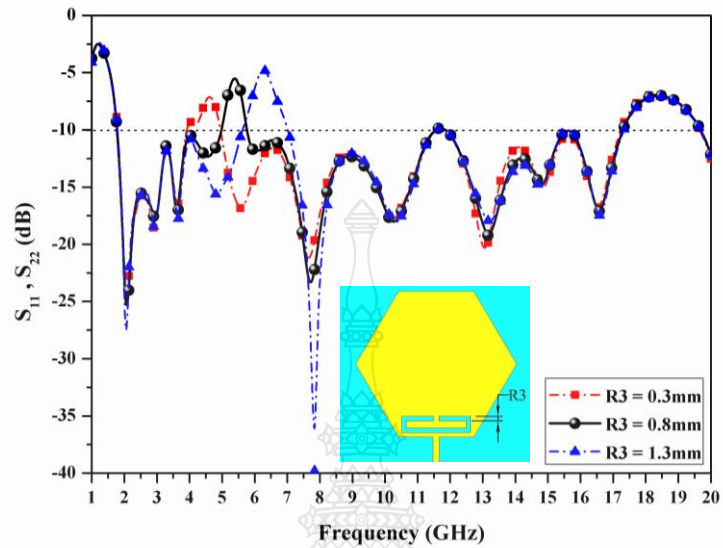
รูปที่ 3.48 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R_2



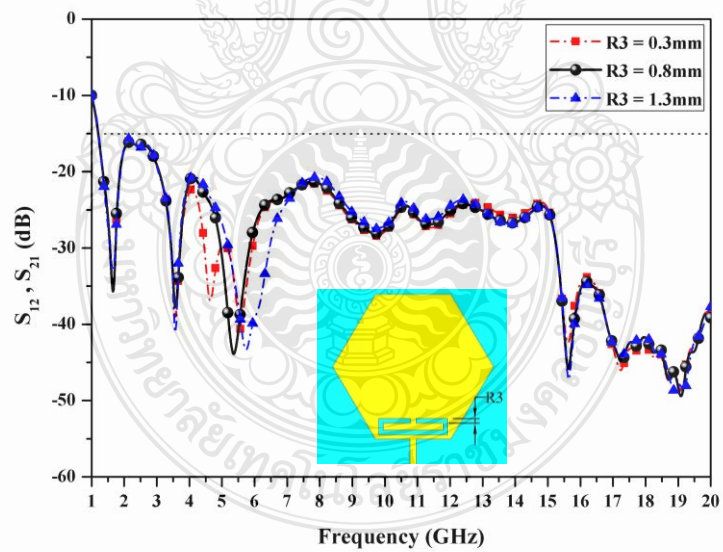
รูปที่ 3.49 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R_2

จากรูปที่ 3.46 ถึง 3.49 จะพบว่าเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 เพิ่มขึ้น ระยะของการเซาะร่องมีความยาวเพิ่ม จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ตอบสนองไปในทิศทางของช่วงความถี่ต่ำ ในทางกลับกันเมื่อค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 ลดลง จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ตอบสนองไปในทิศทางของช่วงความถี่สูง เมื่อค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่า

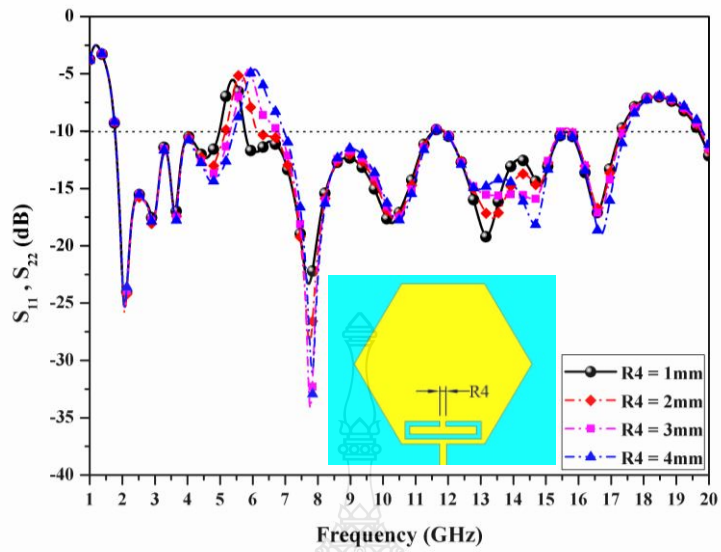
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ $R1 = 12.8$ มม. และ $R2 = 3$ มม.



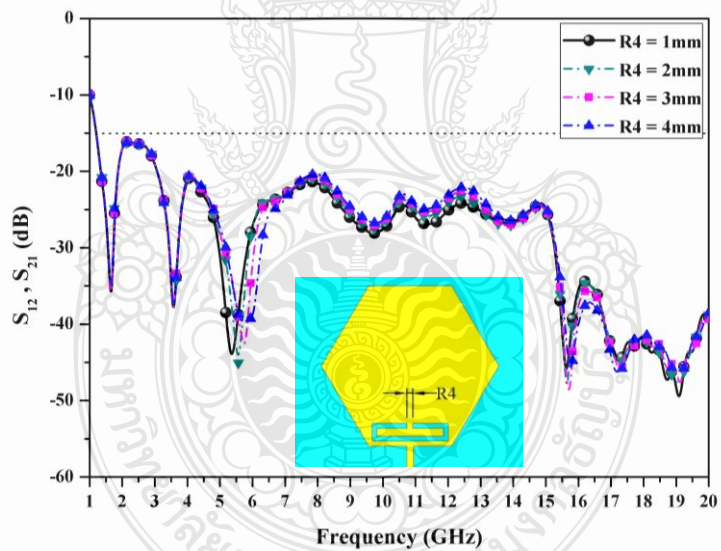
รูปที่ 3.50 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $R3$



รูปที่ 3.51 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ $R3$



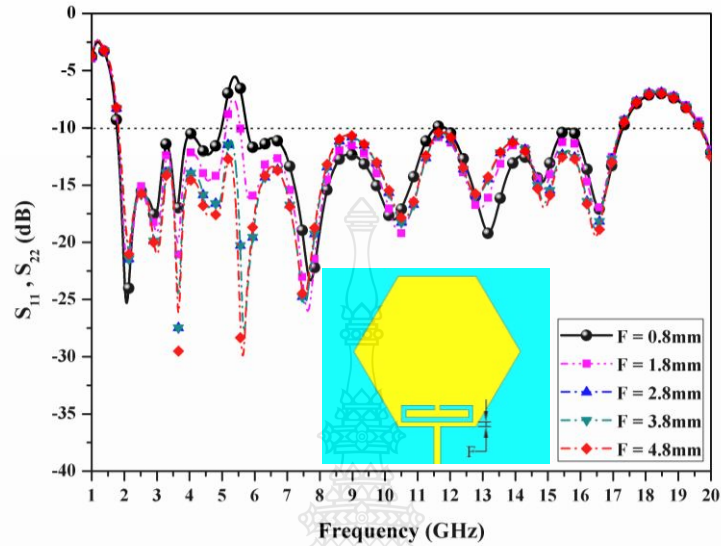
รูปที่ 3.52 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R_4



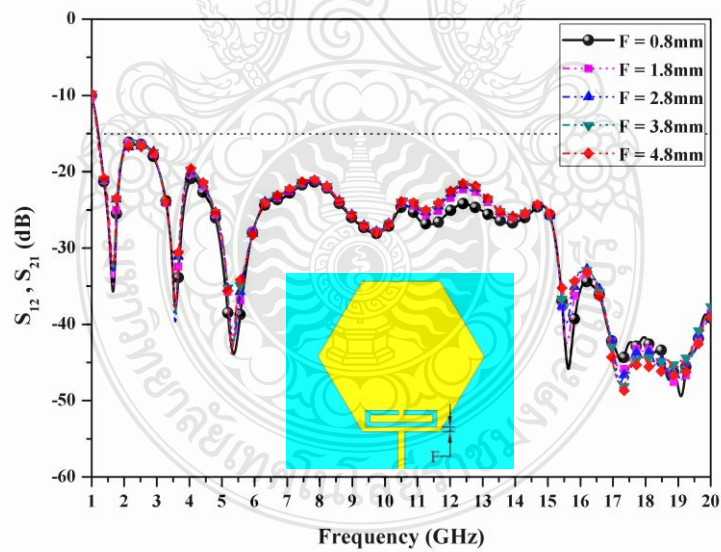
รูปที่ 3.53 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ R_4

จากรูปที่ 3.50 ถึง 3.53 จะพบว่าเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ R_3 , R_4 เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ตอบสนองไปในทิศทางของช่วงความถี่สูงและทำให้ช่วงนอตซ์ความถี่มีความกว้างมากยิ่งขึ้น ในทางกลับกันเมื่อค่าพารามิเตอร์ R_3 , R_4 ลดลง จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ตอบสนองไปในทิศทางของช่วงความถี่ต่ำและทำให้ช่วงนอตซ์ความถี่มีความแคบลง เมื่อ

ค่าพารามิเตอร์ R3 , R4 มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ R3 = 0.8 มม. และ R4 = 1 มม.



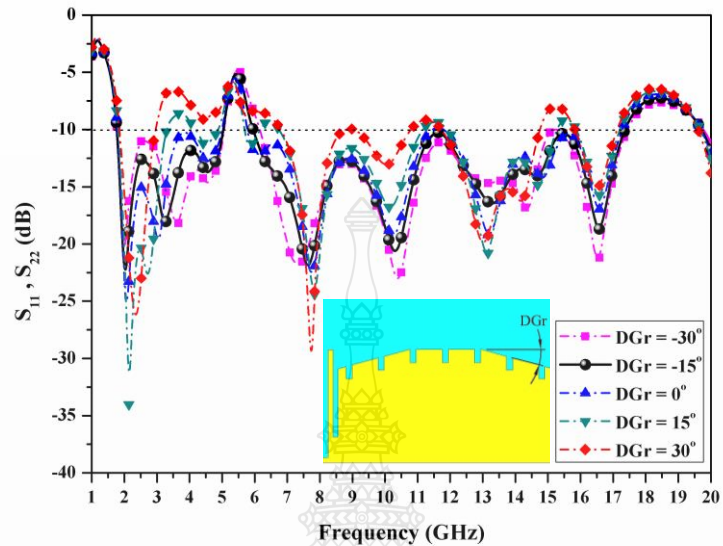
รูปที่ 3.54 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ F



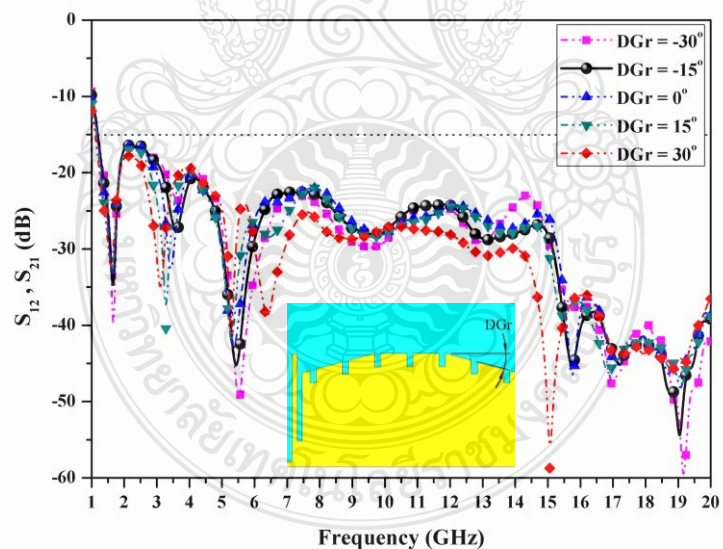
รูปที่ 3.55 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ F

ในรูปที่ 3.54 และ 3.55 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จะเห็นได้ว่าระยะห่างจากขอบด้านล่างของสายอากาศกับนอตซ์ (F) มีผลทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากเมื่อทำการเพิ่มหรือลดระยะห่าง ใน

ขณะเดียวกันการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของพารามิเตอร์ F ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงเล็กน้อย ค่าที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า -15 dB ซึ่งระยะห่างที่เหมาะสมคือ $F = 0.8$ มม.



รูปที่ 3.56 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ DGr



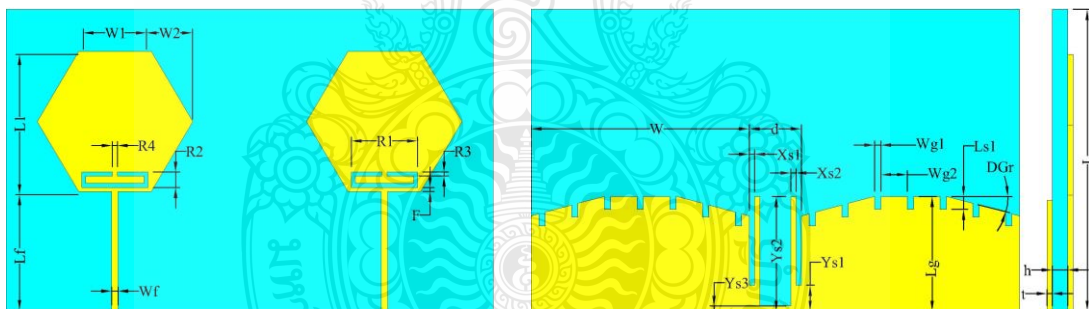
รูปที่ 3.57 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากการปรับค่าพารามิเตอร์ DGr

จากรูปที่ 3.56 และ 3.57 ทำการศึกษาและจำลองค่าพารามิเตอร์ DGr คือการลดหรือเพิ่มความชันของระนาบกราวด์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) จากผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น

อย่างมาก เมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ $DGr = 30^\circ$ หมายถึงพื้นที่ของระนาบกราวด์จะเพิ่มขึ้นไปอีกทำมุม 30 องศา จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับเพิ่มขึ้น เมื่อทำการลดค่าพารามิเตอร์ $DGr = -30^\circ$ ค่าการสูญเสียย้อนกลับในบางช่วงความถี่มีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ DGr นั้นส่งผลต่อการแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน แต่ที่ได้ยังต่ำกว่า -15 dB ซึ่งค่าที่เหมาะสมคือ $DGr = -15^\circ$

3.6 ผลการจำลองสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

เมื่อทำการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศเช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}), ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}), อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR), ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient), ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay), ความหนาแน่นของกระแส (Current density), ค่าอัตราขยาย (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) เป็นต้น



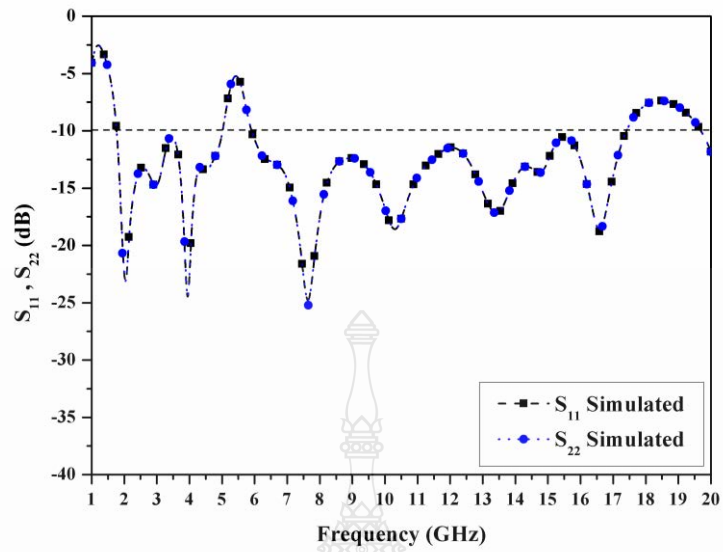
รูปที่ 3.58 โครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่รูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต

ชื่อพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	ชื่อพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	42	L	58
Wf	1.2	Lf	22.85
W1	14	Lg	22.05
W2	8	L1	27
Wg1	1.2	Ls1	2.5
Wg2	5.1	F	0.8
R1	12.8	R2	3
R3	0.8	R4	1
d	10	Xs1	1
Xs2	1	Ys1	5
Ys2	22	Ys3	1
h	0.43	t	0.17
DGr	-15°		

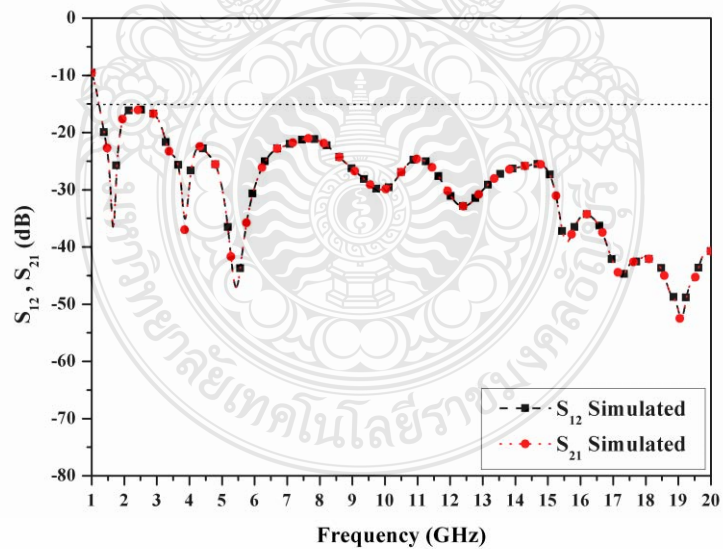
3.6.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22})

จากรูปที่ 3.59 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ของสายอากาศแผ่รูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ในการหาแบนด์วิธของสายอากาศจะคิดจากช่วงที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.77 – 17.39 GHz หรือความกว้างแถบ 163.04% และมีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 5.01 – 5.90 GHz ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดช่วงแบนด์วิธของระบบอัลตราไวด์แบนด์



รูปที่ 3.59 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

3.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21})

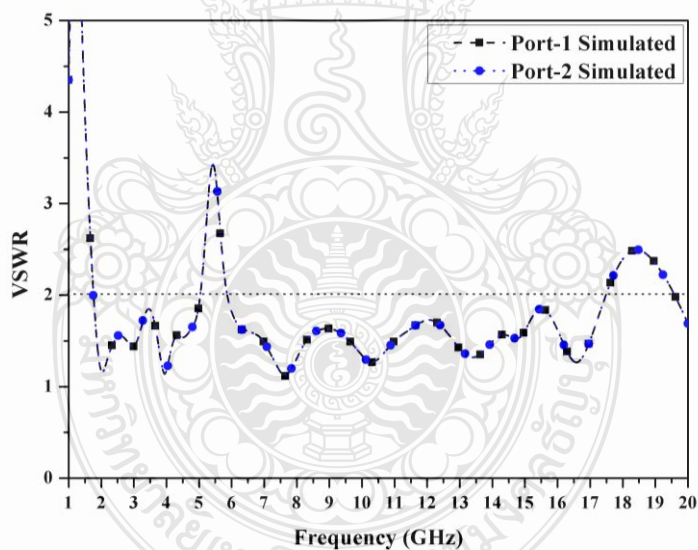


รูปที่ 3.60 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

จากรูปที่ 3.60 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ผลจากการจำลองสายอากาศที่ทำการออกแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ต่ำกว่า -15 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.23 GHz เป็นต้นไป ซึ่งมีความสอดคล้องกับช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศ

3.6.3 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

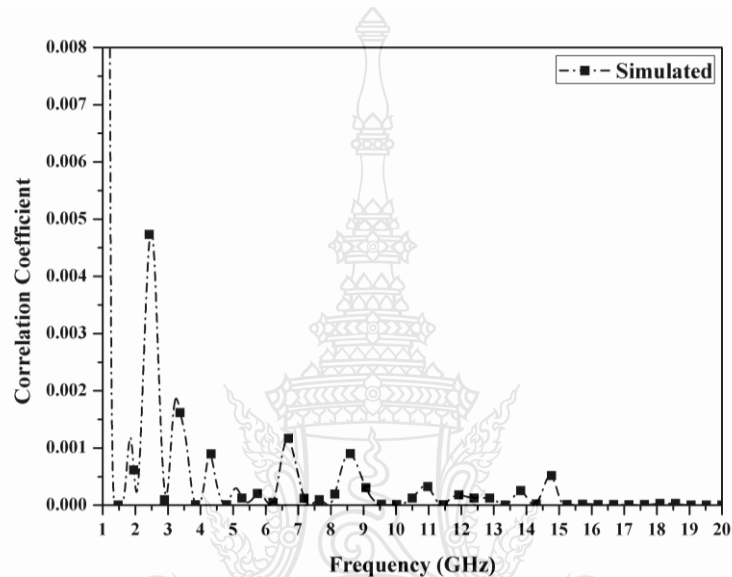
จากรูปที่ 3.61 แสดงผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ซึ่งสายอากาศที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีนั้น จะมีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จากรูปความถี่ที่มีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 ตั้งแต่ 1.75 – 17.46 GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) แต่ค่า VSWR จะมีค่ามากกว่า 2 เนื่องจากการออกแบบให้มีช่วงนอตซ์ความถี่ตั้งแต่ช่วงความถี่ 5.03 – 5.85 GHz



รูปที่ 3.61 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

3.6.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

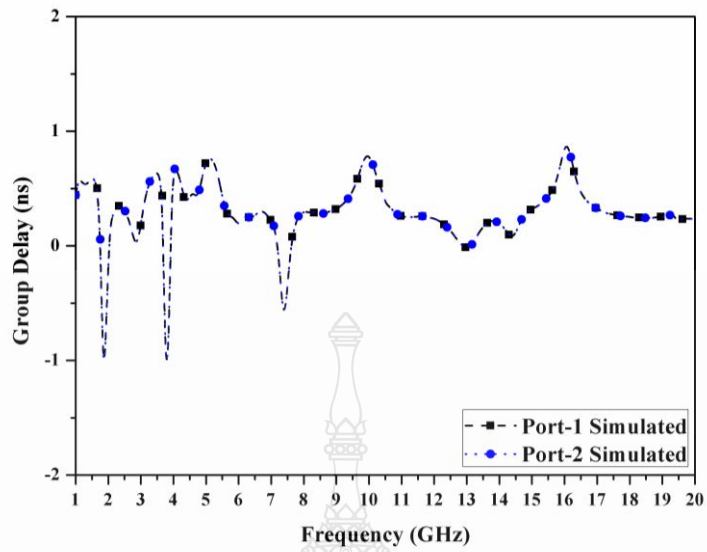
จากรูปที่ 3.62 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต โดยค่าที่ยอมรับได้นั้นจะต้องต่ำกว่า 0.5 สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้สายอากาศทั้งสองตัวนั้น สามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกันและไม่ส่งผลกระทบต่อกัน



รูปที่ 3.62 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

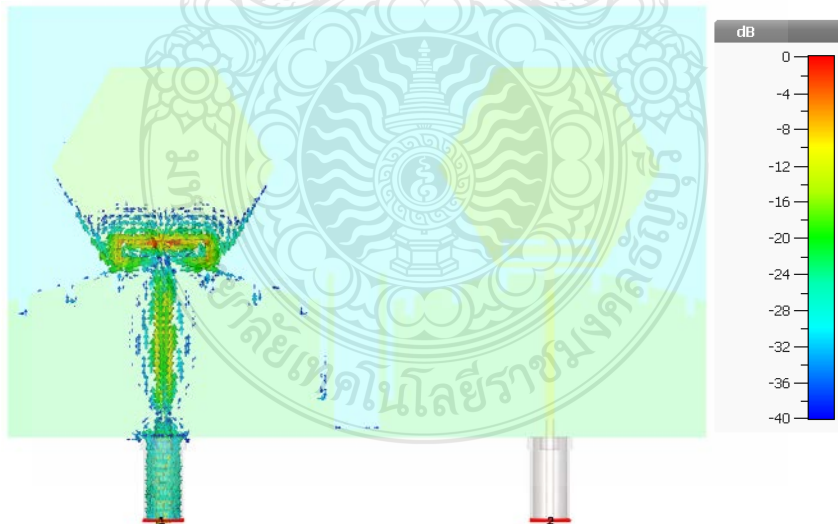
3.6.5 ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

จากรูปที่ 3.63 แสดงผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นมีค่าประวิงกลุ่มที่ต่ำกว่า 1.5 ns. ตลอดช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งจะทำให้สายอากาศรับส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพลัสน้อยที่สุด ซึ่งเป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กำหนดให้สายอากาศที่ใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ต้องมีค่าประวิงกลุ่มต่ำกว่า 2 ns.



รูปที่ 3.63 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

3.6.6 ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

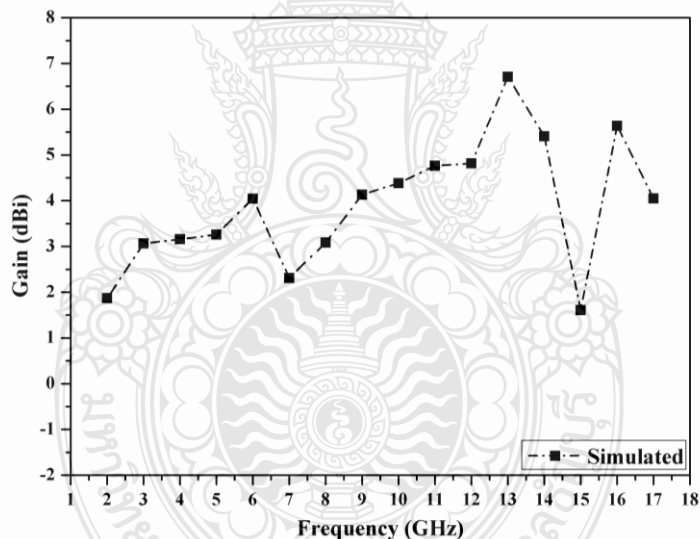


รูปที่ 3.64 ผลการจำลองค่าความหนาแน่นของกระแส (Current density) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ที่ความถี่ 5.4 GHz

จากรูปที่ 3.64 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต โดยสายอากาศได้รับคุณสมบัติของช่วงนอตซ์ความถี่ เพราะมีปริมาณกระแสจำนวนมากรวมตัวกันอยู่ในบริเวณที่ทำการเจาะร่องไว้บนตัวแพทช์ของสายอากาศ

3.6.7 ค่าอัตราขยาย (Gain)

จากรูปที่ 3.65 แสดงค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ที่ได้จากการจำลองผลในช่วงความถี่ 2 – 17 GHz โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้น โดยมีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 1.6 – 6.7 dBi ที่ช่วงความถี่ 15 GHz จะเป็นช่วงที่สายอากาศมีค่าอัตราขยายต่ำที่สุดและที่ช่วงความถี่ 13 GHz จะเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีค่าอัตราขยายมากที่สุด



รูปที่ 3.65 ผลการจำลองค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

3.6.8 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

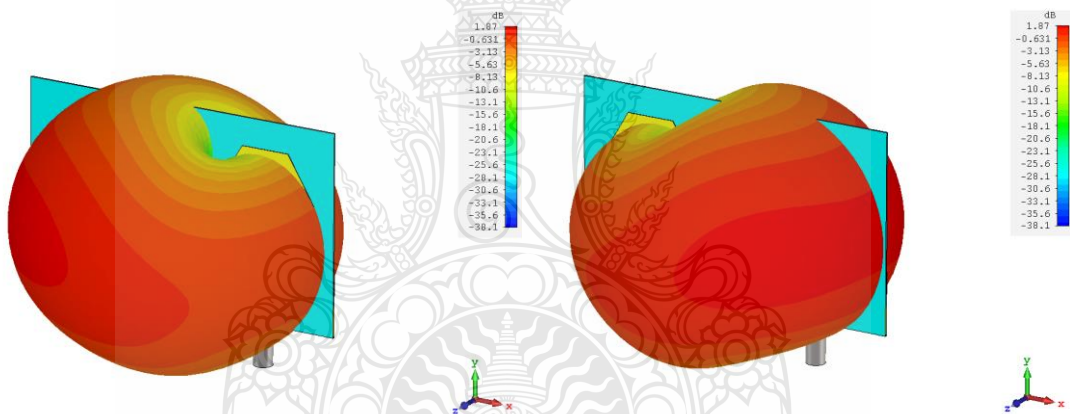
จากรูปที่ 3.66 ถึง 3.71 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) แบบ 3 มิติ ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ที่ความถี่ 2 GHz , 3.5 GHz , 5.2 GHz , 8 GHz , 11 GHz และ 15

GHz ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงความถี่

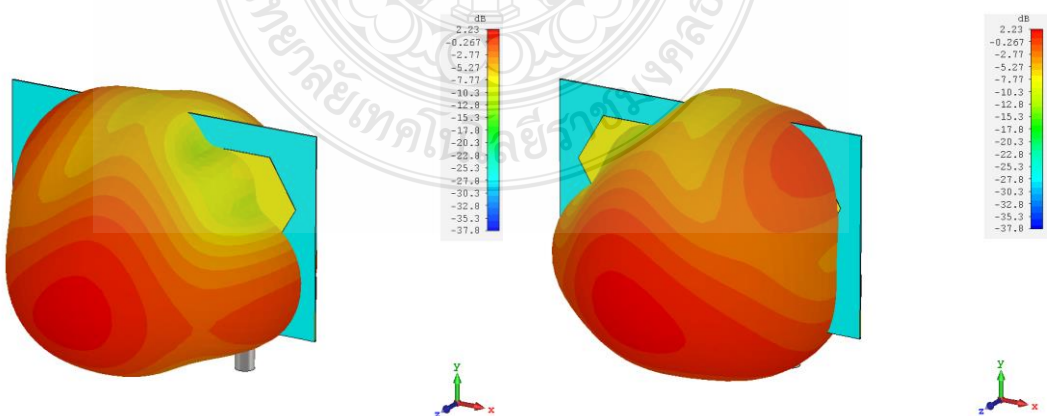
จากรูปที่ 3.66 ช่วงความถี่ 2 GHz แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศคล้ายคลื่นแบบรอบทิศทาง แต่จะมีการแผ่พลังงานออกไปด้านข้างมากกว่า มีอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.87 dBi

จากรูปที่ 3.67 และ 3.68 ที่ช่วงความถี่ 3.5 GHz และ 5.2 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยของสายอากาศเรียงตามลำดับเท่ากับ 2.23 dBi และ 1.42 dBi โดยที่ช่วงความถี่ 5.2 GHz อัตราขยายของสายอากาศจะมีค่าค่อนข้างน้อยเนื่องจากถูกออกแบบให้เป็นช่วงนอตซ์ความถี่

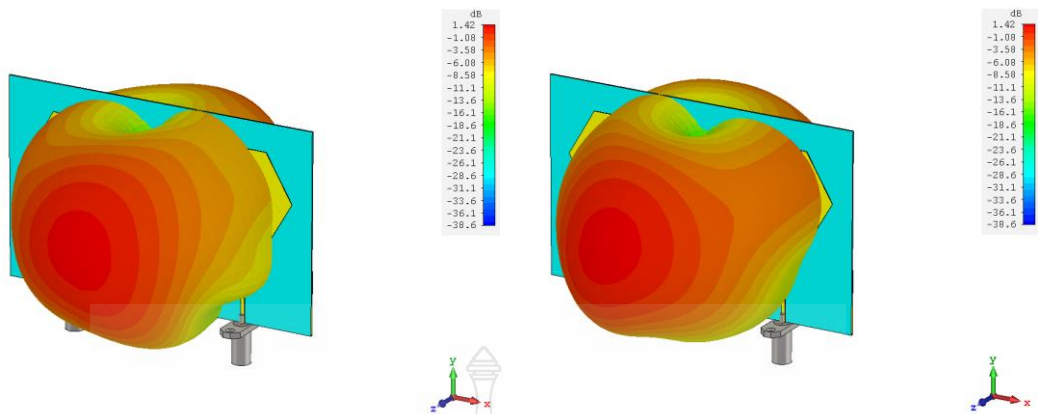
จากรูปที่ 3.69 ถึง 3.71 ที่ช่วงความถี่ 8 GHz , 11 GHz และ 15 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.08 dBi , 4.78 dBi และ 1.61 dBi ตามลำดับ



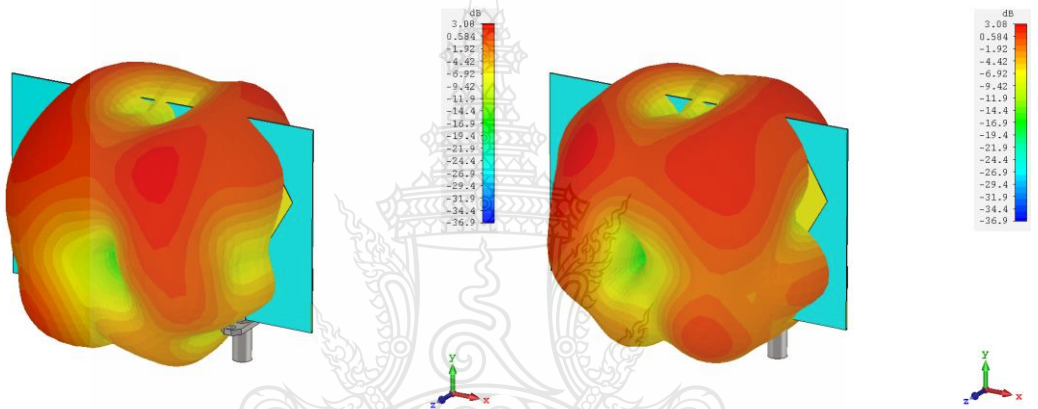
รูปที่ 3.66 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2 GHz



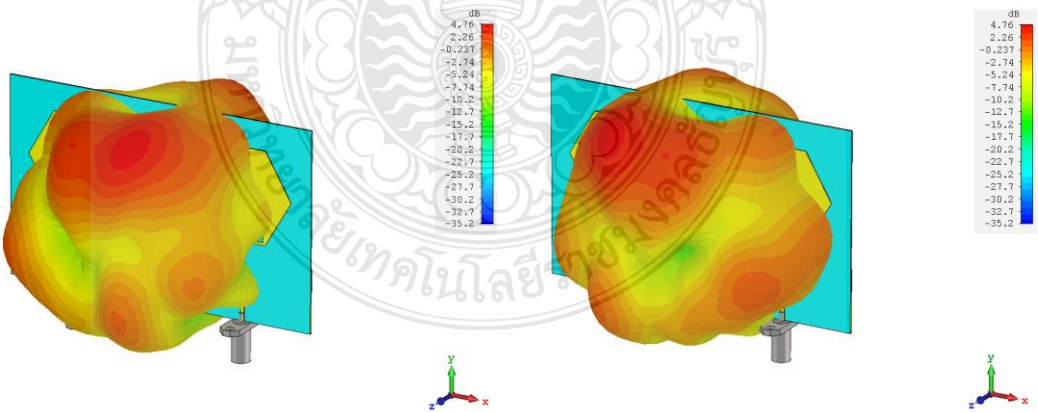
รูปที่ 3.67 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz



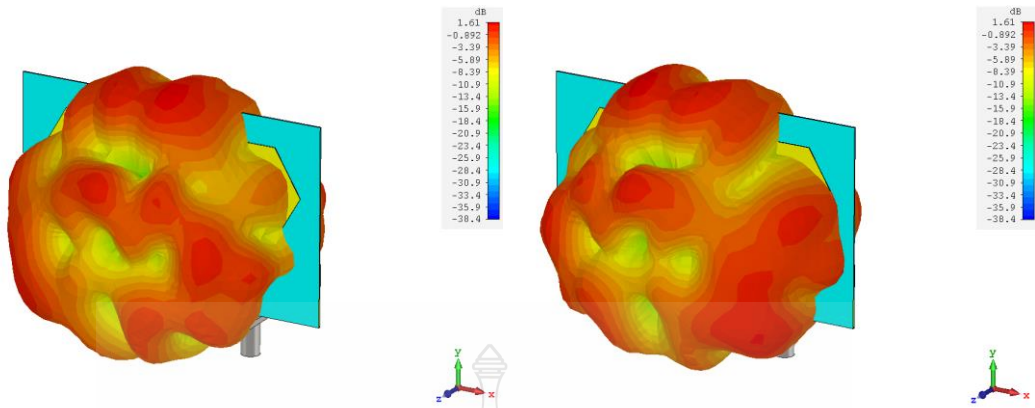
รูปที่ 3.68 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz



รูปที่ 3.69 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 8 GHz



รูปที่ 3.70 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 11 GHz



รูปที่ 3.71 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 15 GHz

3.7 สรุปผลการออกแบบ

สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ เริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปหกเหลี่ยม ต่อเนื่องไปถึงการใช้เทคนิคการเซาะร่องระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์รองรับช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ โดยใช้วิธีเชิงประสบการณ์ร่วมกับการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST จนได้โครงสร้างสายอากาศดังรูปที่ 3.19 โครงสร้างสายอากาศถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองเป็นชุดนักศึกษาวิชาทหารหรือผ้าลายก้างปลา (Herringbone Twill: HBT) ซึ่งมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 42×58 มม² มีขนาดความกว้างและความยาวของส่วนอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.2 มีตอบสนองต่อช่วงความถี่ 1.74 – 17.71 GHz และช่วงนอตช์ความถี่ตั้งแต่ 2.48 – 3.08 GHz มีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 1.05 – 3.87 dBi

จากนั้นจึงทำการออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต รองรับระบบโมโม โดยใช้โครงสร้างสายอากาศจากรูปที่ 3.13 ที่มีการเทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ 7 จุด นำไปวางเรียงแบบแถวลำดับที่มีสององค์ประกอบ ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศในระบบโมโมเทคนิคในการลดปรากฏการณ์เชื่อมร่วม (Mutual coupling) จากนั้นจึงทำการออกแบบจัดวางสายอากาศทั้งสองอันให้มีระยะห่างเท่ากับ d มีการเพิ่มสตัปและเชื่อมต่อระนาบกราวด์เข้าหากัน จากนั้นทำการออกแบบนอตช์ที่ช่วงความถี่ 5 – 5.9 GHz โดยใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัว C หรือ SRR (Split Ring Resonator) โครงสร้างของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่มีจำนวน 2 พอร์ต ดังรูปที่ 3.58 มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 94×58 มม² และมีขนาดความกว้างและความยาวในส่วนอื่น ๆ ดังตารางที่ 3.3 ตอบสนองต่อช่วงความถี่ที่ 1.77 – 17.39 GHz หรือความกว้างแถบ 163.04% และมีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 5.01 – 5.90 GHz มีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 1.6 – 6.7 dBi

บทที่ 4

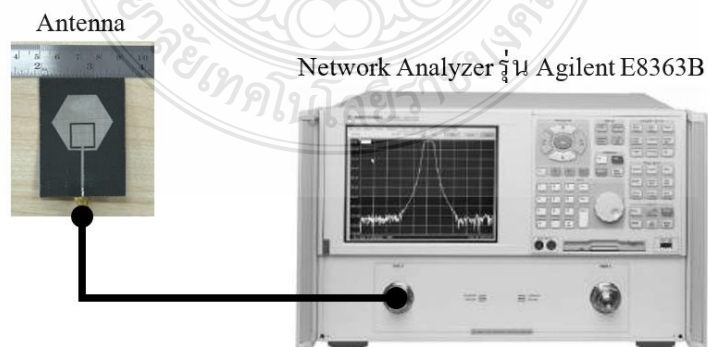
การทดสอบและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

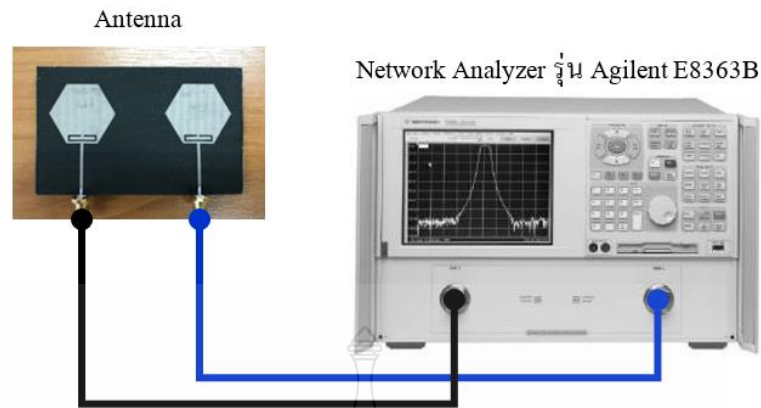
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation pattern) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ดังที่แสดงในรูป 4.1 , 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B



รูปที่ 4.2 การวัดทดสอบสายอากาศที่มีจำนวน 1 พอร์ต



รูปที่ 4.3 การวัดทดสอบสายอากาศที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.2 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์ สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต

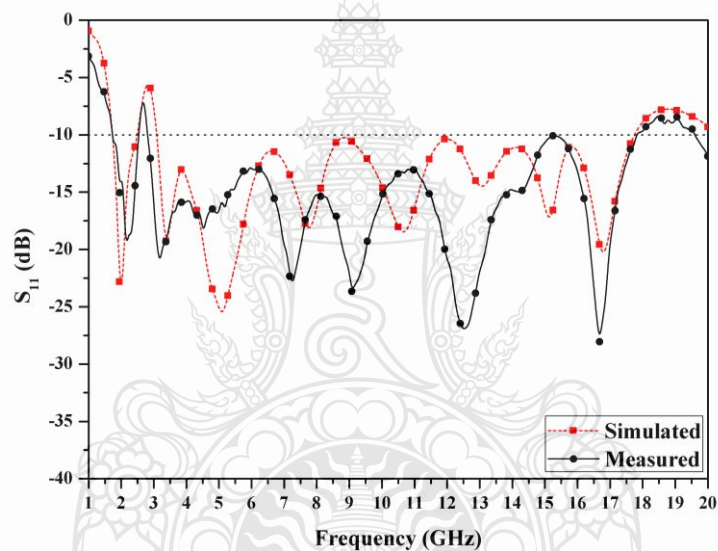
สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ 42×58 มม² ถูกสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นชุดนักศึกษาวิชาทหารหรือผ้าลายก้างปลา (Herringbone Twill: HBT) ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต

4.2.1 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 1 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการจำลองจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.74 – 17.71 GHz หรือความกว้างแถบ 164.21% และมีช่วงนอตซ์ความถี่ที่ 2.48 – 3.08 GHz จากการวัดผลจะพบว่า สายอากาศที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้น มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.76 – 17.78 GHz หรือความกว้างแถบ 163.97% และมีช่วงนอตซ์ความถี่ที่ 2.53 – 2.81 GHz โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่มีความใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบ แต่มีความแตกต่างกันอยู่มากในช่วงนอตซ์ความถี่

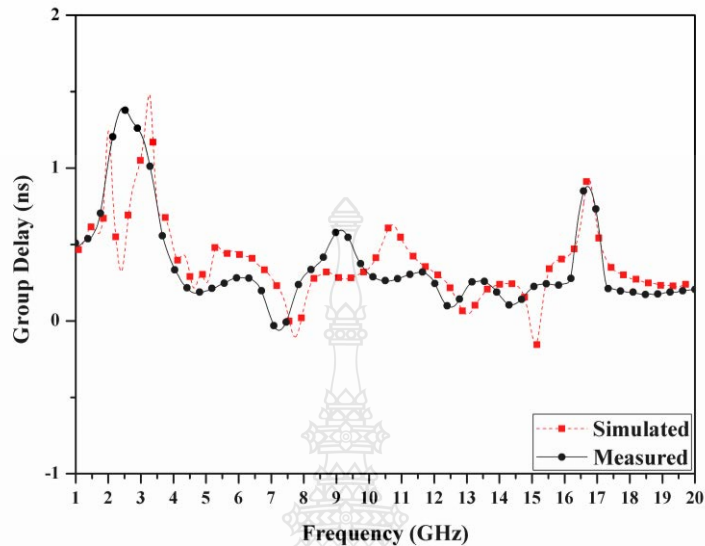


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต

4.2.2 ผลการวัดทดสอบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

การรับส่งข้อมูลในช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ อีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 2 ns. จึงจะทำให้ข้อมูลมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ในการวัดค่าจะใช้ฟังก์ชันของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ในการวัดผล จากรูปที่ 4.6 ผลการวัดค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มี

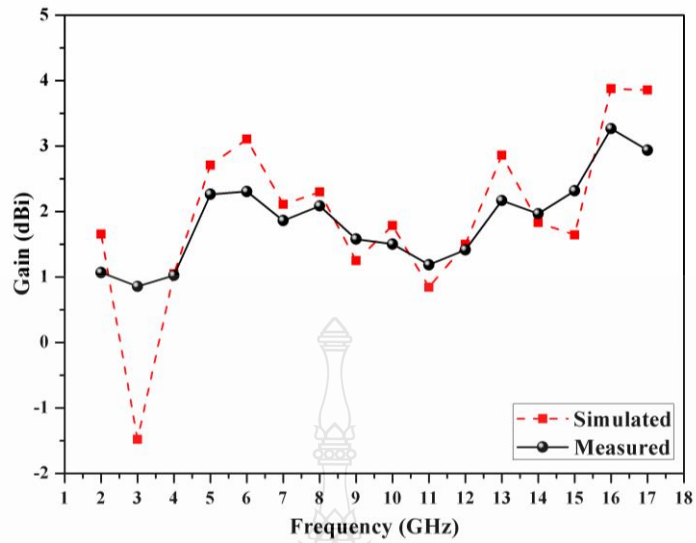
จำนวน 1 พอร์ต นั้นมีค่าต่ำกว่า 1.5 ns. ซึ่งจะทำให้การรับส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพล็ลส์น้อยที่สุด



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต

4.2.3 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

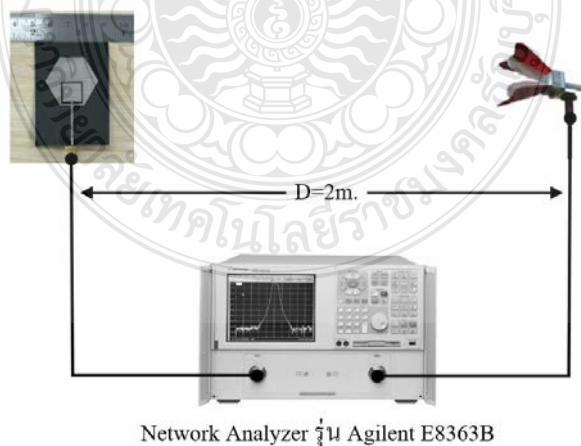
ในการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) สายอากาศสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต จะใช้สายอากาศต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ดังรูปที่ 4.8 และนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศจากสมการที่ (2.17) หรือ (2.18) จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองผลและการวัดค่าชิ้นงานจริงในช่วงความถี่ 2 – 17 GHz โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในช่วงความถี่สูง แต่ในช่วงนอตซ์ความถี่จะมีค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ต่ำมากเช่นเดียวกัน สายอากาศมีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 0.85 – 3.26 dBi



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต

4.2.4 ผลของการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation Pattern)

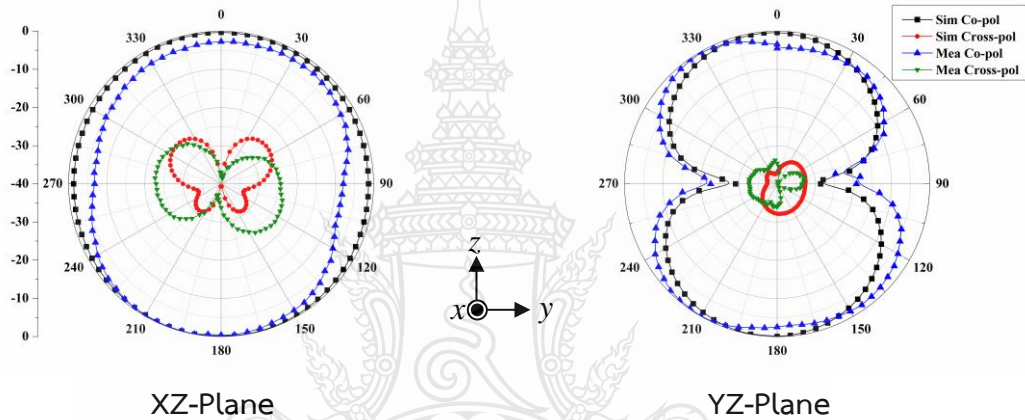
ในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ตนั้น จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ในการวัดผล ดังรูปที่ 4.8



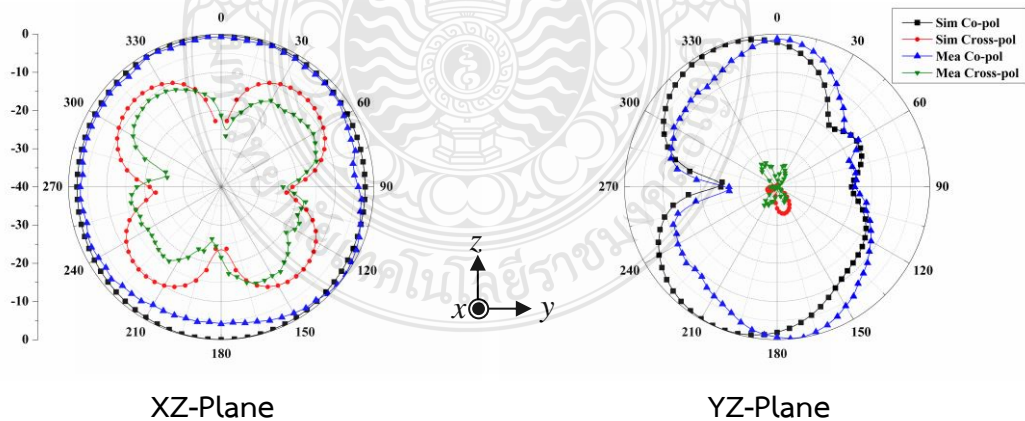
รูปที่ 4.8 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต

ทำการเชื่อมต่อพอร์ตที่ 1 จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเข้ากับสายอากาศที่จะทำการวัดผลและเชื่อมต่อพอร์ตที่ 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเข้ากับสายอากาศรูปปากแตร (Horn Antenna)

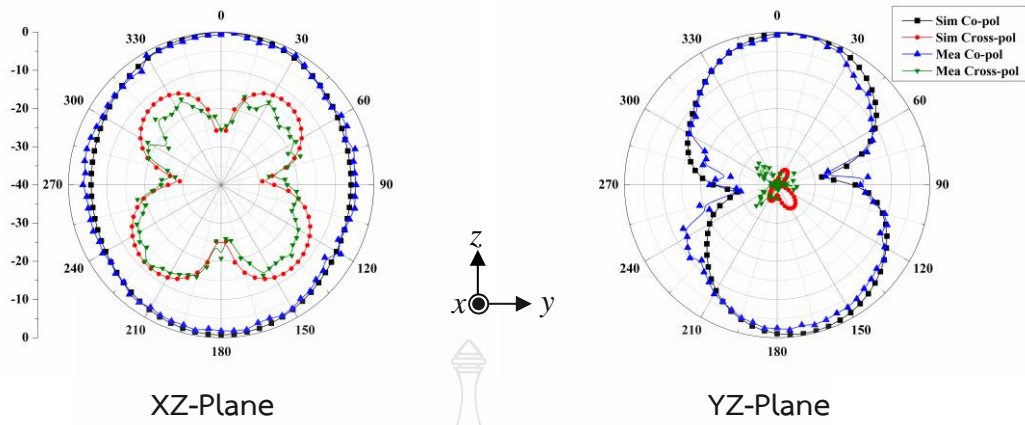
จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.13 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 1 พอร์ต ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 2.4 GHz , 3.5 GHz และ 5.2 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ในย่านความถี่ที่สูงกว่า 5.2 GHz ขึ้นไป สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบกระจายหลากหลายทิศทาง



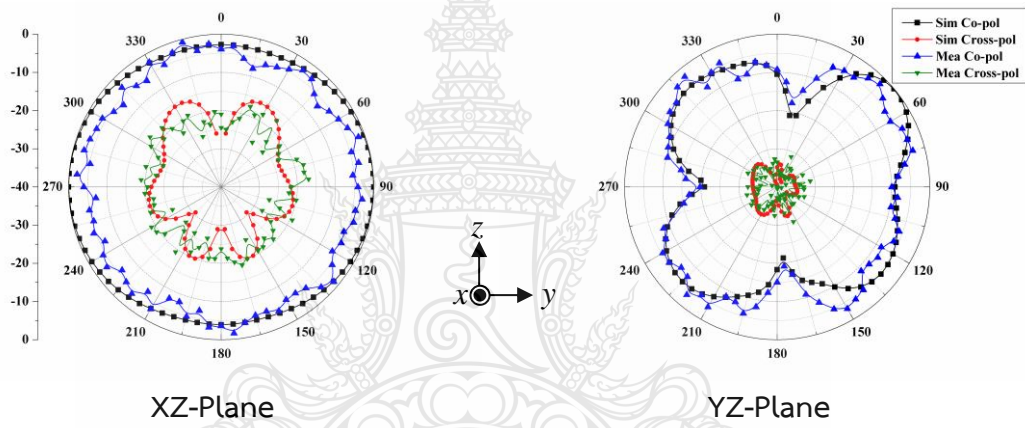
รูปที่ 4.9 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz



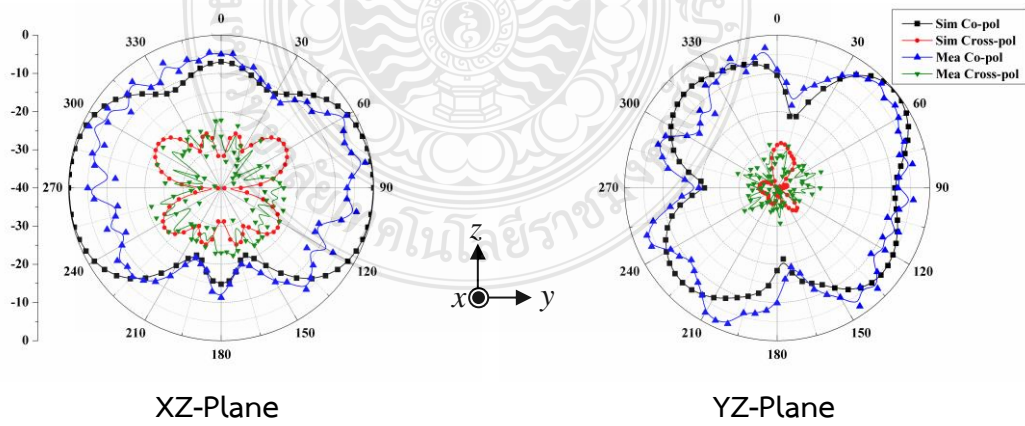
รูปที่ 4.10 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz



รูปที่ 4.11 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz



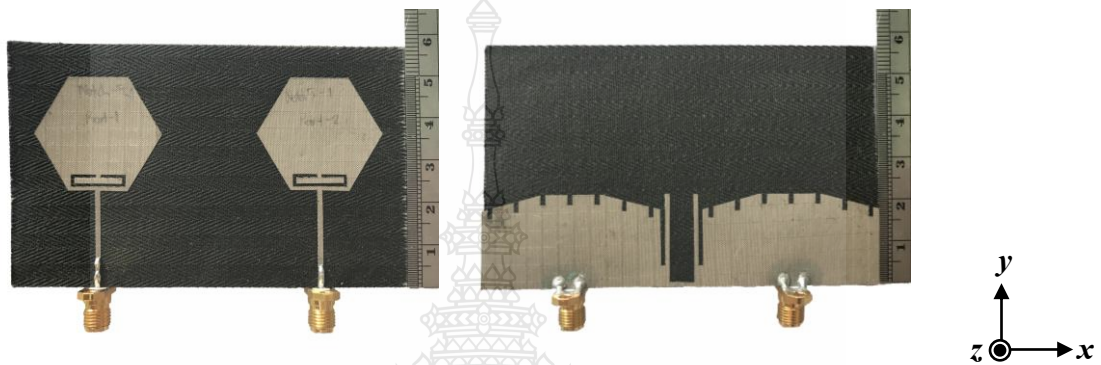
รูปที่ 4.12 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 9.0 GHz



รูปที่ 4.13 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 12.5 GHz

4.3 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์ สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ 94×58 มม² ถูกสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นผ้าที่ใช้กับชุดนักศึกษาวิชาทหารหรือผ้าลายก้างปลา (Herringbone Twill: HBT) ดังแสดงในรูปที่ 4.14

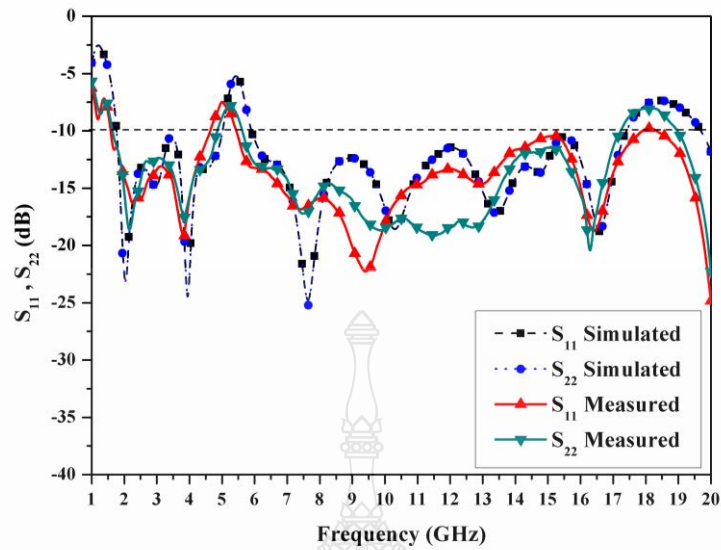


รูปที่ 4.14 สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.3.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22})

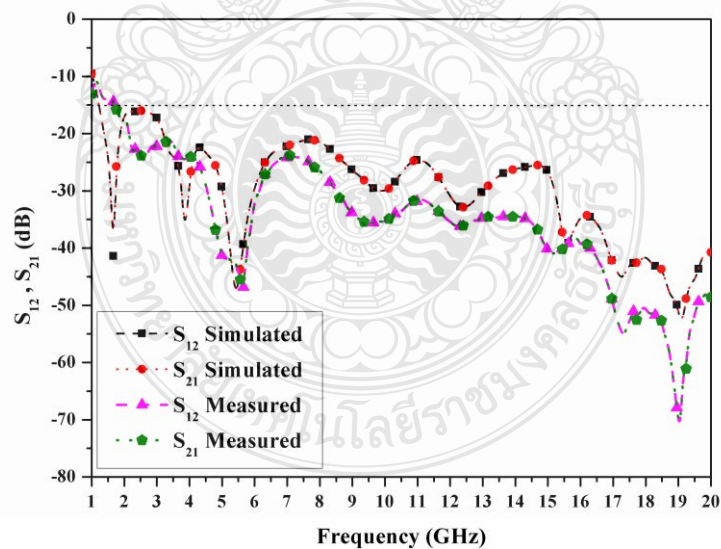
จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการจำลองจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.77 – 17.39 GHz หรือความกว้างแถบ 163.04% และมีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 5.01 – 5.90 GHz จากการวัดผลจะพบว่า สายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นนั้น มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.61 – 17.85 GHz หรือความกว้างแถบ 166.90% และมีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 4.65 – 5.44 GHz

สำหรับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22}) มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.63 – 17.22 GHz หรือความกว้างแถบ 165.41% และมีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 4.85 – 5.61 GHz โดยรวมแล้ว การตอบสนองต่อความถี่มีความคล้ายคลึงกับค่าที่ทำการออกแบบ แต่มีความแตกต่างกันอยู่มากที่ช่วงนอตช์ความถี่และช่วงความถี่สูง



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.3.2 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21})

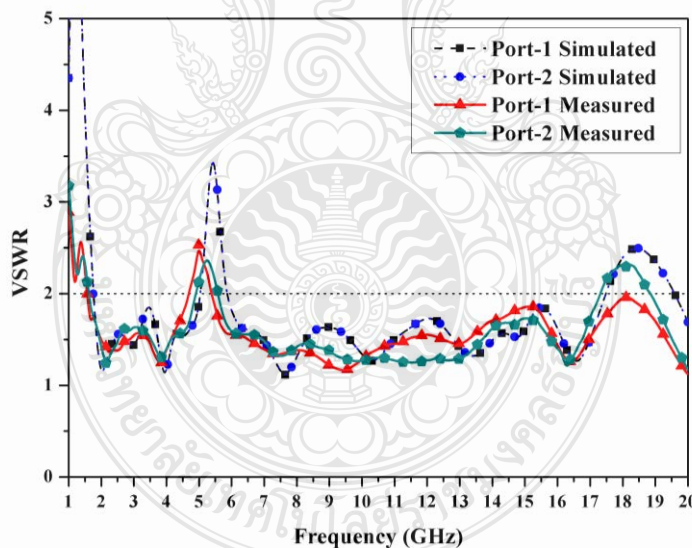


รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการจำลองจะค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ต่ำกว่า -15 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.23 GHz เป็นต้นไป จากการวัดผลจะพบว่า สายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ต่ำกว่า -15 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.69 GHz เป็นต้นไป โดยรวมแล้วค่าที่วัดได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบไว้

4.3.3 ผลของการวัดทดสอบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลจากการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต พบว่าค่าจากการจำลองและวัดค่าจริงมีความสอดคล้องเป็นไปตามค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ในช่วงความถี่ที่มีการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ต่ำกว่า -10 dB ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) จะมีค่าต่ำกว่า 2 ในทางกลับกัน ในช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับสูงกว่า -10 dB จะค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมากกว่า 2 ขึ้นไป



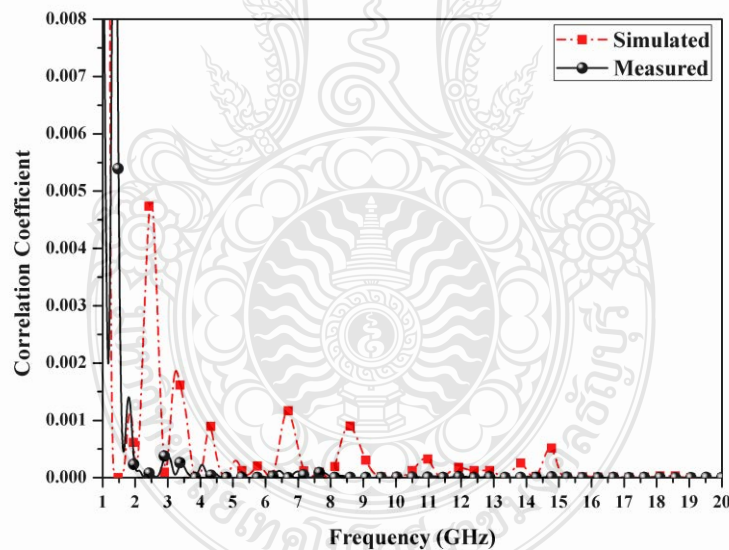
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.3.4 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้น จะสามารถคำนวณจากสมการ (2.55) โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศนี้จะมีค่าต่ำกว่า 1.0 ตลอดย่านการใช้งาน แต่ค่าที่ยอมรับนั้นจะต้องต่ำกว่า 0.5 ซึ่งจะทำให้สายอากาศทั้งสองตัวนั้นสามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระและไม่ส่งผลกระทบต่ออีก

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)][1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)]}$$

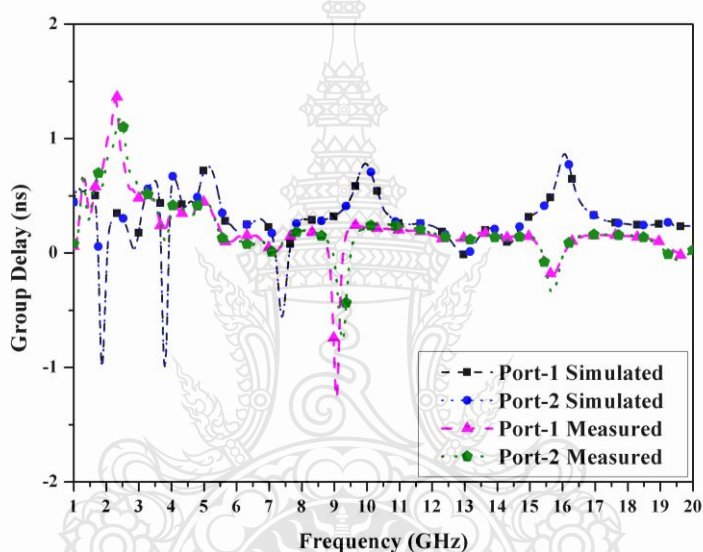
จากรูปที่ 4.18 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต มีค่าน้อยกว่า 0.5 ตลอดย่านการใช้งาน ทำให้สายอากาศทั้งสองตัวนั้นสามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระและไม่ส่งผลกระทบต่ออีก



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.3.5 ผลของการวัดทดสอบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

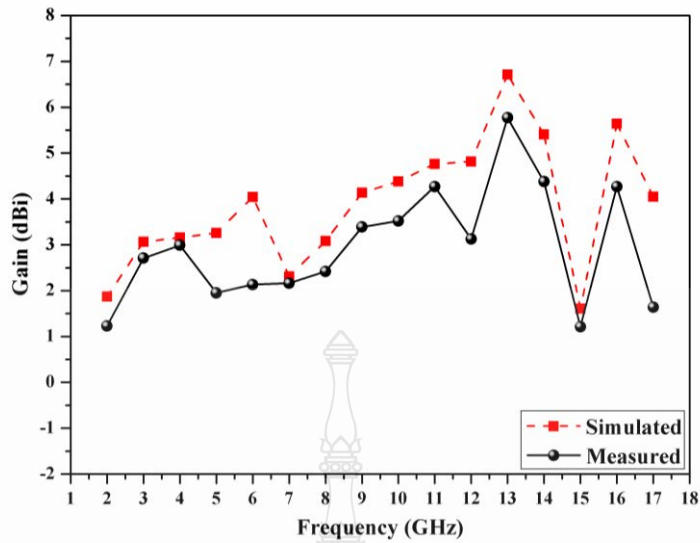
ในขั้นตอนการรับส่งข้อมูลในช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ อีกพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญคือ ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 2 ns. จึงจะทำให้ข้อมูลมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ในการวัดค่าจะใช้ฟังก์ชันของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ในการวัดผล จากรูปที่ 4.19 ผลการวัดค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต นั้นมีค่าต่ำกว่า 2 ns. ทั้ง 2 ตัว ซึ่งจะทำให้การรับส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดพลาดของสัญญาณพัลส์น้อยที่สุด



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.3.6 ผลของการวัดทดสอบค่าอัตราขยาย (Gain)

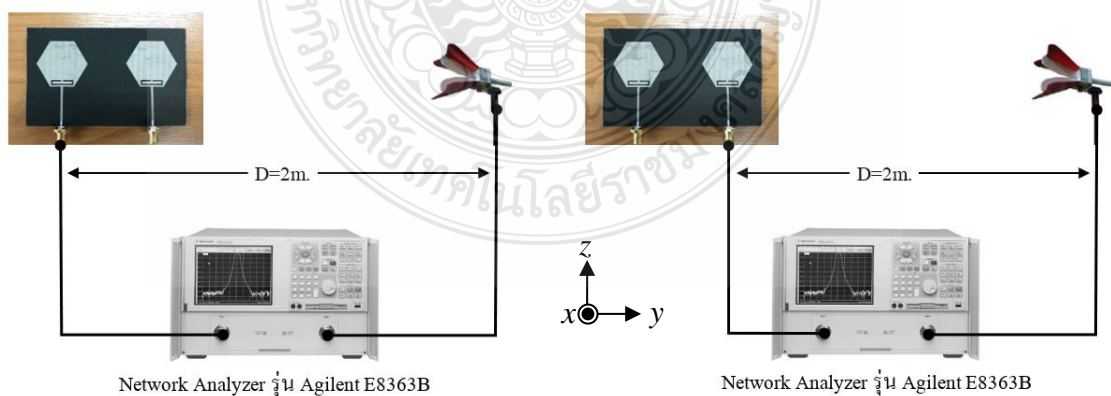
ในการวัดทดสอบค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต จะทำการติดตั้งสายอากาศเข้าต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) โดยจะทำการวัดทดสอบครั้งละหนึ่งพอร์ตและนำอีกหนึ่งพอร์ตที่เหลือต่อเข้ากับโหลด 50Ω ดังรูปที่ 4.21 และจะทำการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศจากสมการที่ (2.17) หรือ (2.18)



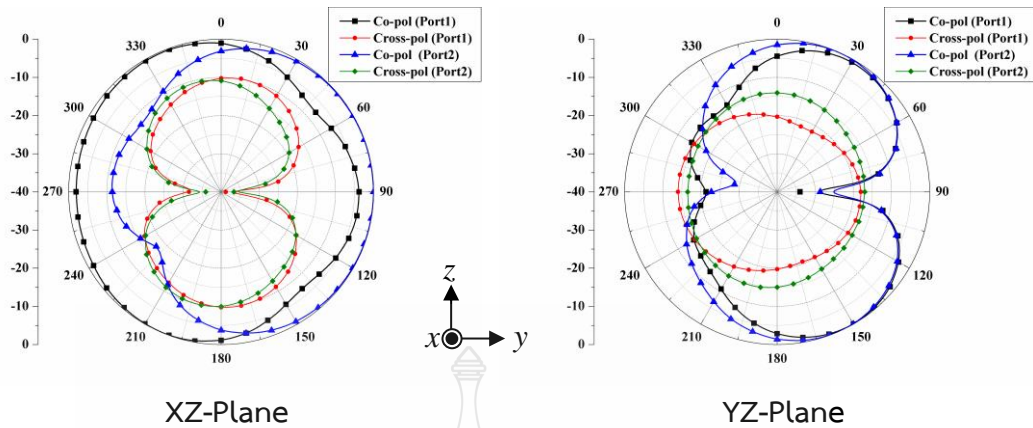
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต

4.3.7 ผลของการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation Pattern)

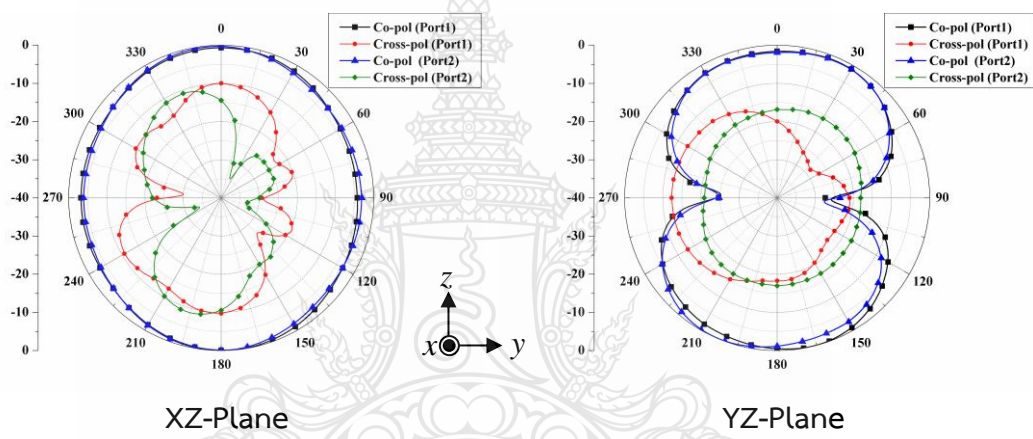
ในขั้นตอนการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้น จะทำการติดตั้งสายอากาศและเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ดังรูปที่ 4.21 โดยจะทำการวัดสายอากาศครั้งละหนึ่งพอร์ตและต่อโหลด $50\ \Omega$ เข้ากับพอร์ตที่เหลือ จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane)



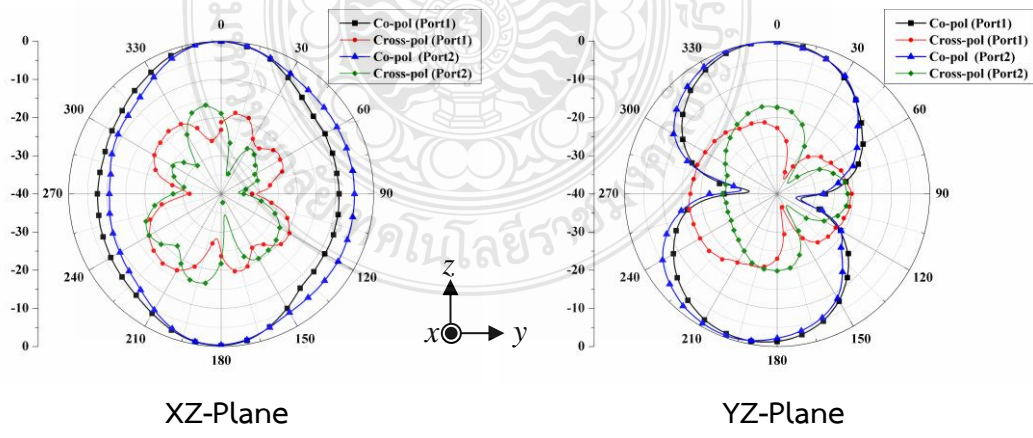
รูปที่ 4.21 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต



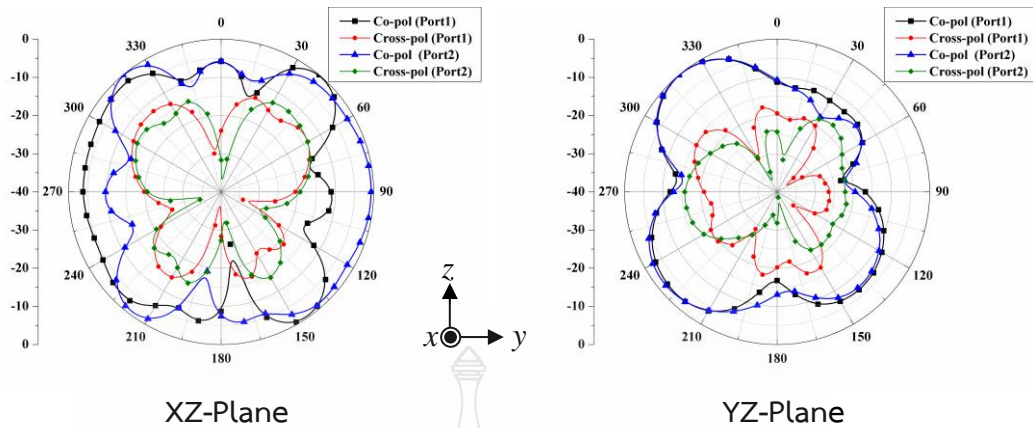
รูปที่ 4.22 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2 GHz



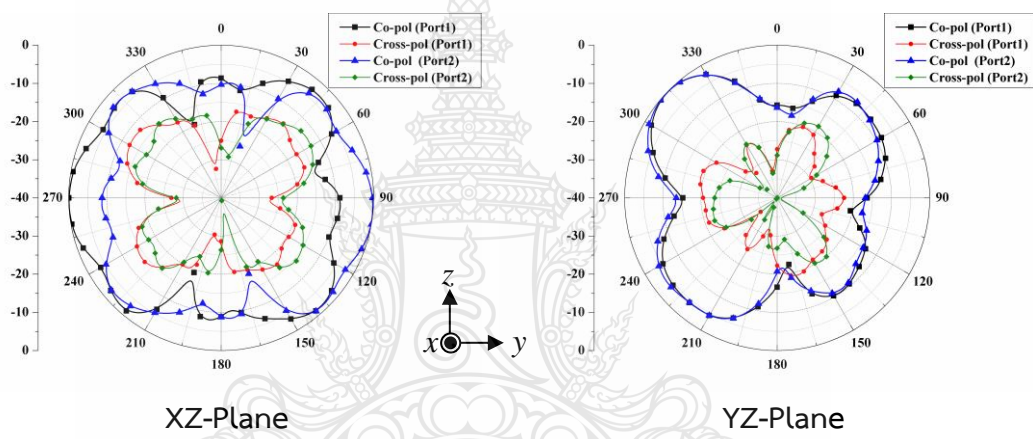
รูปที่ 4.23 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz



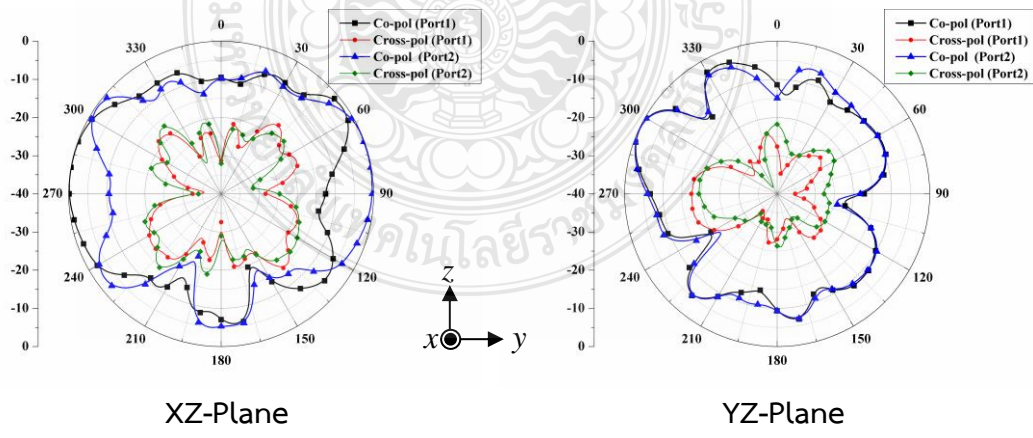
รูปที่ 4.24 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz



รูปที่ 4.25 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 8 GHz



รูปที่ 4.26 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 11 GHz



รูปที่ 4.27 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 15 GHz

จากรูปที่ 4.22 ถึง 4.27 ได้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) ที่ความถี่ 2 GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz, 8 GHz, 11 GHz และ 15 GHz ในช่วงความถี่เริ่มต้นที่ช่วง 2 GHz และ 3.5 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง จากนั้นที่ช่วงความถี่ 5.2 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง ในช่วงความถี่สูงตั้งแต่ 8 GHz เป็นต้นไป สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง

4.4 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศขณะประยุกต์ใช้งาน



(ก.) หน้าอก (On chest)



(ข.) เอว (On waist)



(ค.) แขนท่อนบน (On upper-arm)



(ง.) ข้อมือ (On wrist)

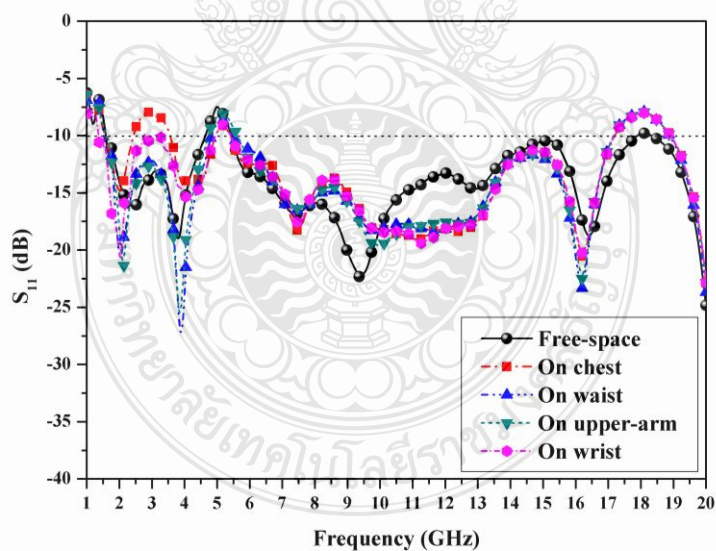
รูปที่ 4.28 การติดตั้งสายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์

(ก.) หน้าอก (On chest) , (ข.) เอว (On waist) , (ค.) แขนท่อนบน (On upper-arm) และ (ง.) ข้อมือ (On wrist)

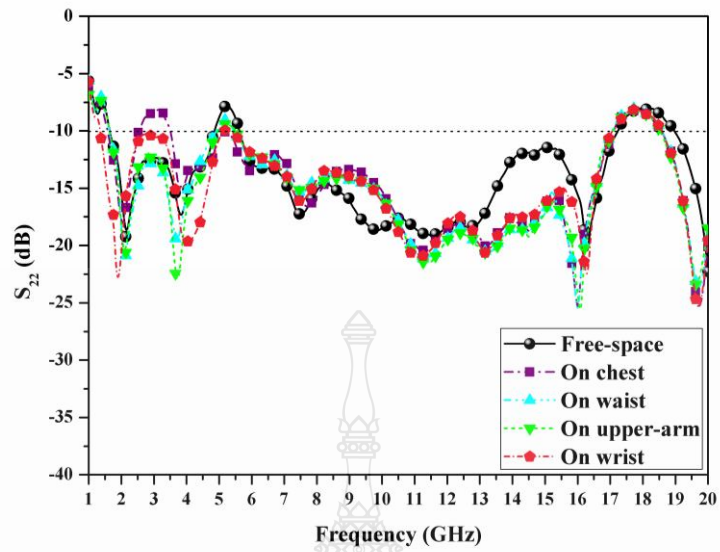
สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ที่มีจำนวน 2 พอร์ต จะถูกติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง ขณะทำการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.28 โดยจะทำการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) และ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ของสายอากาศเป็นหลัก

4.4.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22})

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์ ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต จากทั้ง 2 รูปจะพบว่า ผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศเข้ากับ หน้าอก (On chest), เอว (On waist), แขนท่อนบน (On upper-arm) และ ข้อมือ (On wrist) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) แต่โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่ที่มีความคล้ายคลึงกันกับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.61 – 17.85 GHz และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22}) ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.63 – 17.22 GHz แต่ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันคือ ระยะห่างจากตัวสายอากาศถึงผิวหนัง ความโค้งงอของแต่จุดที่ทำการติดตั้ง

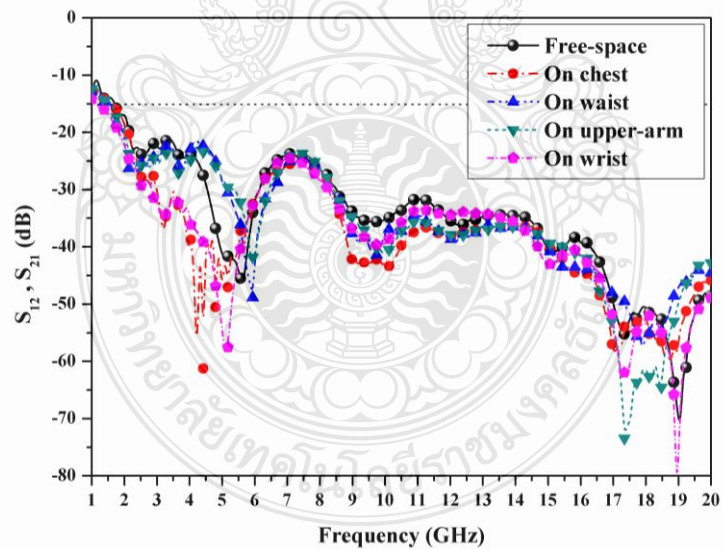


รูปที่ 4.29 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์



รูปที่ 4.30 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับ ส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์

4.4.2 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21})



รูปที่ 4.31 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศ เข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์

จากรูปที่ 4.31 แสดงผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ได้ จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์ ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยม

แบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบ 2 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเมื่อทำการติดสายอากาศเข้ากับ หน้าอก (On chest) , เอว (On waist) , แขนท่อนบน (On upper-arm) และ ข้อมือ (On wrist) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าในวิธีการปกติ (Free-space) แต่โดยรวมแล้วค่าที่ได้ยังมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ต่ำกว่า -15 dB เมื่อทำการวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) จะเริ่มตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.69 GHz เป็นต้นไป



บทที่ 5

บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้าง การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio การสร้างชิ้นงานจริงและการวัดทดสอบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ สายอากาศสามารถรองรับระบบการสื่อสารไร้ เช่น WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/n (2.4 – 2.4835) , ระบบ WiMax , ระบบ Ultra-Wideband (UWB) และระบบ Wireless Body Area Network (WBAN)

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาและออกแบบสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ สายอากาศถูกออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานรองแบบผ้า มีความหนาเท่ากับ 0.43 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 2.25 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.03 ใช้วัสดุตัวนำที่เป็นผ้าแบบพิเศษ ShieldIt Super Textile ที่มีความหนาเท่ากับ 0.17 มม. มีค่าความนำของวัสดุตัวนำเท่ากับ 1.18×10^5 S/m. ทำการจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio สายอากาศไมโครสตริปในรูปแบบเริ่มต้นมีรูปทรงหกเหลี่ยมรองรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ทำการใช้เทคนิคการเจาะร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระนาบกราวด์และสายอากาศ ซึ่งสามารถขยายค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จาก 145.46% เป็น 162.28% หลังจากการใช้เทคนิคนี้ จากนั้นทำการออกแบบนอตช์ของสายอากาศโดยใช้เทคนิคการเจาะรูวงแหวนสี่เหลี่ยมจนได้ช่วงนอตช์ความถี่ที่ 2.48 – 3.08 GHz สามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ 1.74 – 17.71 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 164.21% สายอากาศที่ได้ในขั้นต้นมีขนาด 42×58 มม²

จากนั้นทำการออกแบบและทำการพัฒนาสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ให้สามารถรองรับระบบโมโม เริ่มต้นจากการเลือกรูปแบบของสายอากาศที่ไม่มีนอตช์ความถี่มาใช้งานในการออกแบบ ใช้เทคนิคการวางสายอากาศทั้งสองตัวห่างกันโดยประมาณ $\lambda_g/4$ ร่วมกับการใช้สตัปที่ระนาบกราวด์ เพื่อลดปรากฏการณ์เชื่อมร่วม (Mutual coupling) จึงทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศดีขึ้น จากนั้นจึงทำการเจาะรูวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตัวสายอากาศเพื่อนอตช์ความถี่ในช่วง 5.01 – 5.90 GHz สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ 1.77 – 17.39 GHz หรือความกว้างแถบ 163.04% มีขนาดโดยรวมเท่ากับ 94×58 มม²

จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์แบบ 1 พอร์ตพบว่า สายอากาศสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 1.76 – 17.78 GHz หรือความกว้างแถบ 163.97% มีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 2.48 – 2.81 GHz มีค่าประวิงกลุ่มที่ต่ำกว่า 1.5 ns. ตลอดย่านการใช้งาน มีอัตราขยายอยู่ในช่วงระหว่าง 0.85 – 3.26 dBi ที่ช่วงความถี่ต่ำตั้งแต่ 2.4 – 5.2 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง จากนั้นที่ความถี่สูงตั้งแต่ 7.25 GHz เป็นต้นไป สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง

จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์แบบโมโม 2 พอร์ตพบว่า สายอากาศสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 1.69 – 17.85 GHz หรือความกว้างแถบ 165.40% มีช่วงนอตช์ความถี่ที่ 4.65 – 5.61 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 และมีค่าประวิงกลุ่มที่ต่ำกว่า 2 ns. ตลอดย่านการใช้งาน มีอัตราขยายอยู่ในช่วงระหว่าง 1.23 – 5.77 dBi สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) ที่ความถี่ 2 GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz, 8 GHz, 11 GHz และ 15 GHz ในช่วงความถี่เริ่มต้นที่ 2 GHz และ 3.5 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง จากนั้นที่ความถี่ 5.2 GHz สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทางและในช่วงความถี่สูงตั้งแต่ 8 GHz เป็นต้นไป สายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง

จากการวัดทดสอบค่าที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์ ของสายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์แบบโมโม 2 พอร์ตพบว่า ผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเมื่อทำการติดสายอากาศเข้ากับ หน้าอก (On chest) , เอว (On waist) , แขนท่อนบน (On upper-arm) และข้อมือ (On wrist) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) แต่โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่มีความคล้ายคลึงกันกับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.61 – 17.85 GHz ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22}) ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.63 – 17.22 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{12} , S_{21}) ที่ช่วงความถี่ 1.69 GHz เป็นต้นไป แต่ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันคือ ระยะห่างจากตัวสายอากาศถึงผิวหนัง ความโค้งงอของแต่ละจุดที่ทำการติดตั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

5.2.1 ในขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ ควรใช้รูปแบบที่ใกล้เคียงกับงานจริงให้มากที่สุด เพื่อให้เกิดค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด

5.2.2 สายอากาศที่ใช้วัสดุเป็นผ้า่นั้นมีความแปรปรวนเป็นอย่างมาก ควรใช้ความระมัดระวังในการสัมผัสหรือการใช้งาน

5.2.3 ควรใช้วิธีหรือวัสดุเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตและสายอากาศที่มีความแข็งแรง ยึดหยุ่น เนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุผ้าตัวนำ Shieldt Super Conductive Textile

5.2.4 ควรเลือกใช้พอร์ต SMA ที่มีคุณภาพดี สามารถรองรับการใช้งานที่ครอบคลุมย่านความถี่สูงได้

5.2.5 พัฒนาให้สายอากาศมีขนาดเล็กลง กะทัดรัดมากยิ่งขึ้น

5.2.6 พัฒนาให้สายอากาศสามารถรองรับย่านความถี่ที่สูงขึ้นและมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากยิ่งขึ้น

5.2.7 พัฒนาให้สายอากาศมีจำนวนพอร์ตสำหรับรับ-ส่งสัญญาณมากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [2] ศราวุธ ชัยมูล, *วิศวกรรมสายอากาศ*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556.
- [3] อีสริยา ไทยเนียม, “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์แบบมีเส้นสายตา,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2552.
- [4] นิพนธ์ ทางทอง, “สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2554.
- [5] กิตติศักดิ์ ทองดา, “การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2555.
- [6] อีระชัย รัตนแก้ว, “สายอากาศไมโมแบบฟิล์มบางขนาดกะทัดรัดรูปคล้ายพระจันทร์สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบอัลตราไวด์แบนด์และซูเปอร์ไวด์แบนด์,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2561.
- [7] N. Manshouri, A. Yazgan, and M. Maleki, “A Microstrip-fed Ultra-Wideband Antenna with Dual Band-Notch Characteristics,” in *2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2016, pp. 231–234.
- [8] M. Akbari, N. Rojhani, M. Saberi, and R. Movahedinia, “Dual band-notched monopole antenna with enhanced bandwidth for ultra-wideband wireless communications,” *The Journal of Engineering*, vol. 8, pp. 415-419, Aug 2014.
- [9] S. Tripathi, A. Mohan, and S. Yadav, “A compact dual band-notched fractal antenna for UWB application”, in *2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2014, pp. 205-207.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] M. G. N. Alsath, and M. Kanagasabai, “Compact UWB Monopole Antenna for Automotive Communications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 4204-4208, Sep 2015.
- [11] M. Sharma, Y.K. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, and S. Kumari, “Compact printed high rejection triple band-notch UWB antenna with multiple wireless applications”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, pp. 1626-1634, Sep 2016.
- [12] M. Elhabchi, M. N. Srifi, and R. Touahni, “A Modified Hexagonal UWB Antenna Loaded with Multiple L-shaped Stubs for GPS Band Integration and Like Y-Shaped Slot for Single Band Rejection”, in *2019 International Conference on Wireless Technologies Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2019, pp. 1-5.
- [13] T. Ranadkaew, and P. Rakluea, “A compact Moon Shaped Super-Wideband Thin-Film Antenna”, in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-4.
- [14] N. Singh, A. K. Singh, and V. K. Singh, “Design & Performance of Wearable Ultra Wide Band Textile Antenna for Medical Applications”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, pp. 1553–1557, Feb 2015.
- [15] S. Yan, L. A. Y. Poffelie, P. J. Soh, X. Zheng, and G. A. E. Vandenbosch, “On-Body Performance of Wearable UWB Textile Antenna with Full Ground Plane”, in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1-4.
- [16] S. Li, and J. Li, “Smart patch wearable antenna on Jeans textile for body wireless communication”, in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2018, pp. 1-4.
- [17] K. Wang, and J. Li, “Jeans Textile Antenna for Smart Wearable Antenna”, in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2018, pp. 1-3.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] K. Shikder and F. Arifin, "Extended UWB wearable logo textile antenna for body area network applications," in *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, 2016, pp. 484-489.
- [19] S. Yan, V. Volskiy and G. A. E. Vandenbosch, "Compact Dual-Band Textile PIFA for 433-MHz/2.4-GHz ISM Bands," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2436-2439, Jul 2017.
- [20] J. Roh, Y. Chi, J. Lee, Y. Tak, S. Nam and T. J. Kang, "Embroidered Wearable Multiresonant Folded Dipole Antenna for FM Reception," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 803-806, Aug 2010.
- [21] S. Yan and G. A. E. Vandenbosch, "Radiation Pattern-Reconfigurable Wearable Antenna Based on Metamaterial Structure," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1715-1718, Feb 2016.
- [22] I. Martinez, C. Mao, D. Vital, H. Shahariar, D. H. Werner, J. S. Jur, and S Bhardwaj, "Compact Low-Profile and Robust Textile Antennas With Improved Bandwidth for Easy Garment Integration", *Access IEEE*, vol. 8, pp. 77490-77500, Apr 2020.
- [23] D. Sipal, M. P. Abegaonkar, S. K. Koul, "UWB MIMO USB dongle antenna for personal area network application", in *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2016, pp. 1-4.
- [24] S. Yan, P. J. Soh and G. A. E. Vandenbosch, "Dual-Band Textile MIMO Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 4640-4647, Nov 2015.
- [25] J. Ren, W. Hu, Y. Yin and R. Fan, "Compact Printed MIMO Antenna for UWB Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1517-1520, Jul 2014.
- [26] Y. K. Choukiker, S. K. Sharma and S. K. Behera, "Hybrid Fractal Shape Planar Monopole Antenna Covering Multiband Wireless Communications With MIMO Implementation for Handheld Mobile Devices," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, pp. 1483-1488, Mar 2014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

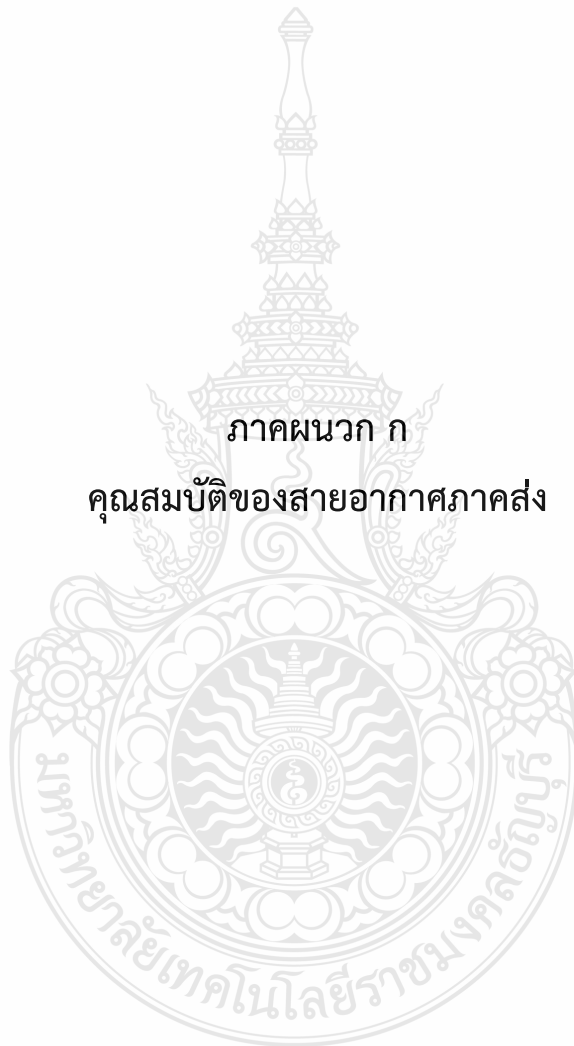
- [27] L. Kang, H. Li, X. Wang and X. Shi, "Compact Offset Microstrip-Fed MIMO Antenna for Band-Notched UWB Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1754-1757, Apr 2015.
- [28] L. Liu, S. W. Cheung and T. I. Yuk, "Compact MIMO Antenna for Portable UWB Applications With Band-Notched Characteristic," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 1917-1924, May 2015.
- [29] Z. Li, C. Yin and X. Zhu, "Compact UWB MIMO Vivaldi Antenna With Dual Band-Notched Characteristics," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38696-38701, Mar 2019.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
คุณสมบัติของสายอากาศภาคส่ง



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

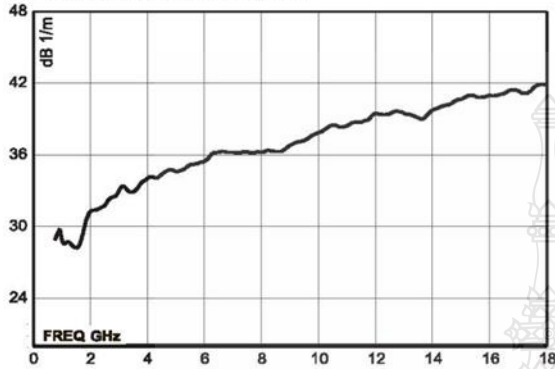
Electrical Specifications

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

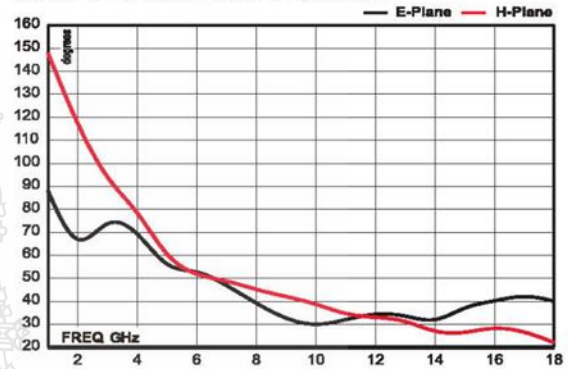
Physical Specifications

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

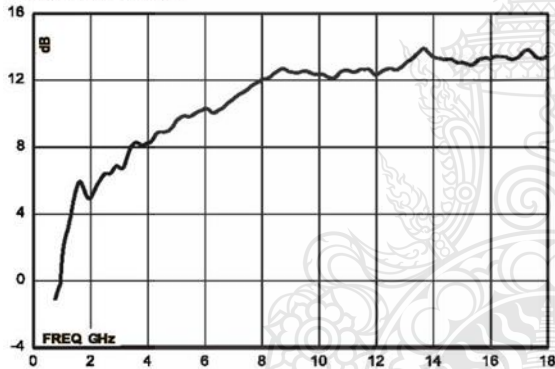
Model 3117 Antenna Factor



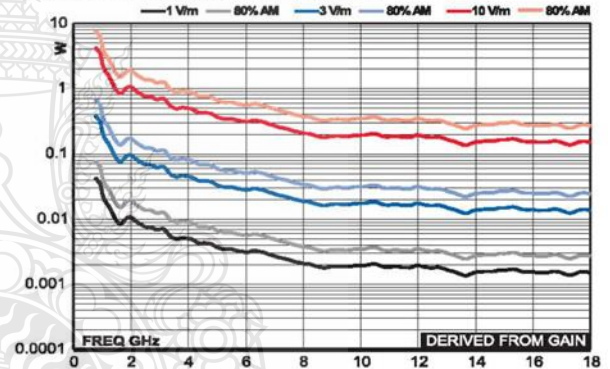
Model 3117 Half Power Beamwidth



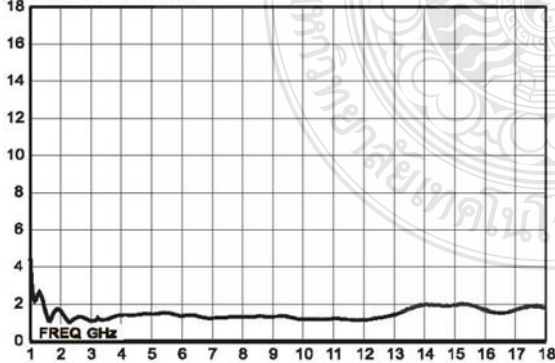
Model 3117 Gain



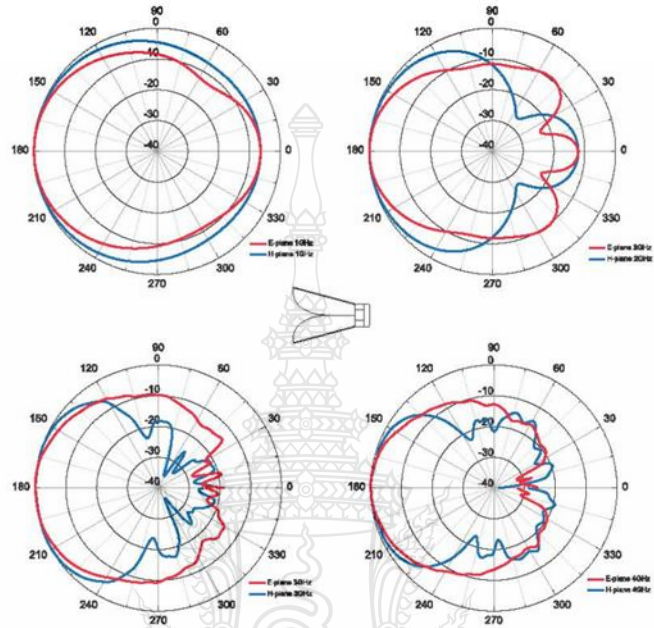
Model 3117 Forward Power @ 1 m



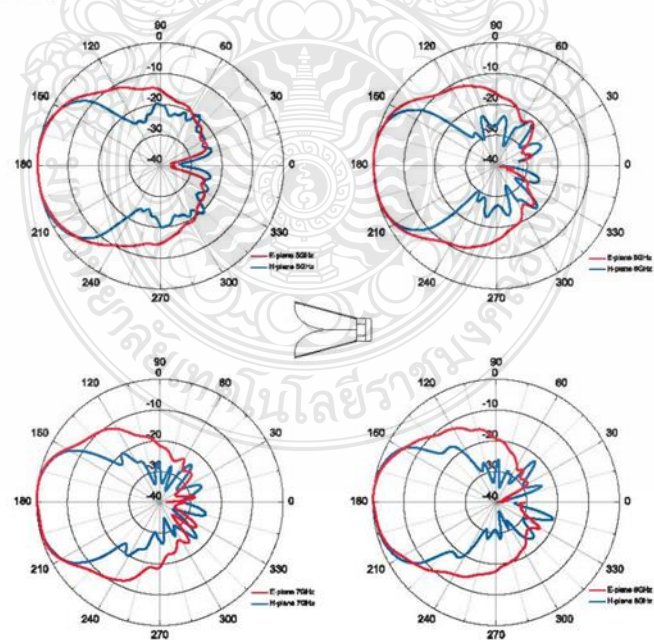
Model 3117 VSWR



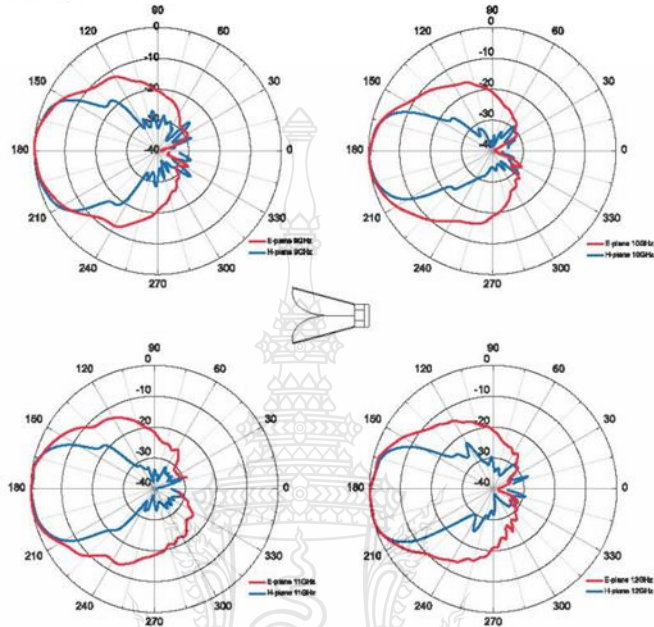
Model 3117 (1 GHz - 4 GHz)



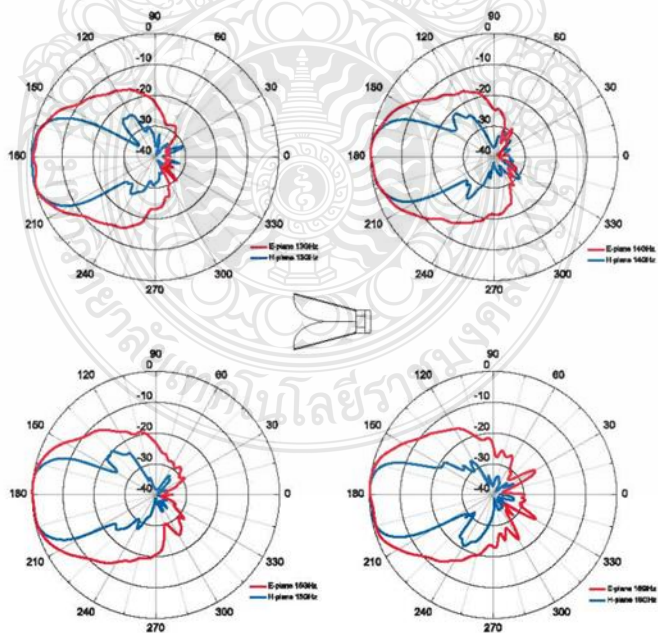
Model 3117 (5 GHz - 8 GHz)



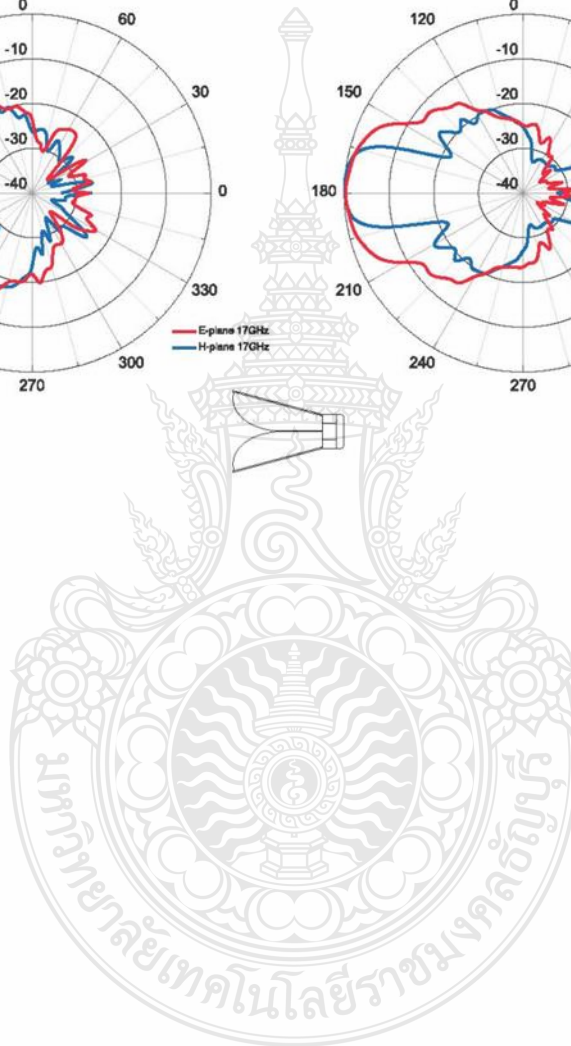
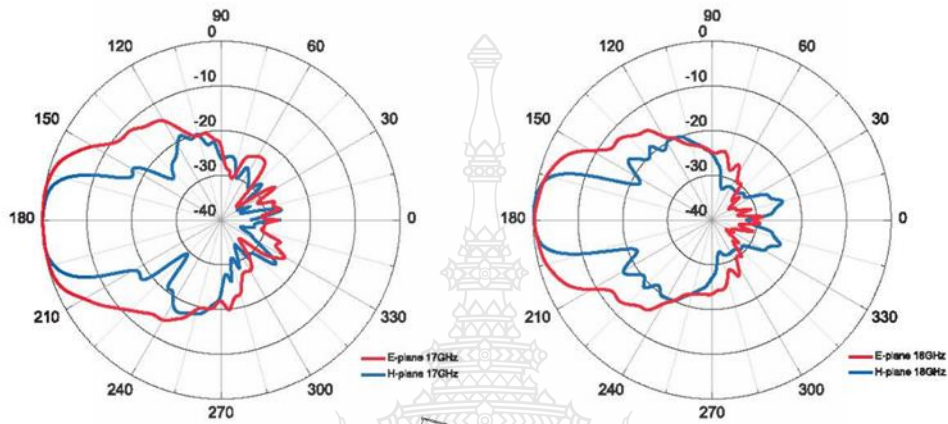
Model 3117 (9 GHz - 12 GHz)



Model 3117 (13 GHz - 16 GHz)



Model 3117 (17 GHz - 18 GHz)



ภาคผนวก ข
คุณสมบัติของหัว SMA Connector



Data Sheet

Coaxial Panel Connector 23_SMA-50-0-12/111_N

Description

Straight panel receptacle jack, flange mount

Interface standards
IEC 60169-15_MIL-STD-348A/310_CECC 22110



Technical Data

Electrical Data

Impedance 50 Ω
Interface frequency max. 18 GHz

Mechanical Data

Number of matings 500
Weight 0.0021 kg

Environmental Data

Operating temperature -65 °C to 125 °C
2011/65/EU (RoHS) compliant

Material Data

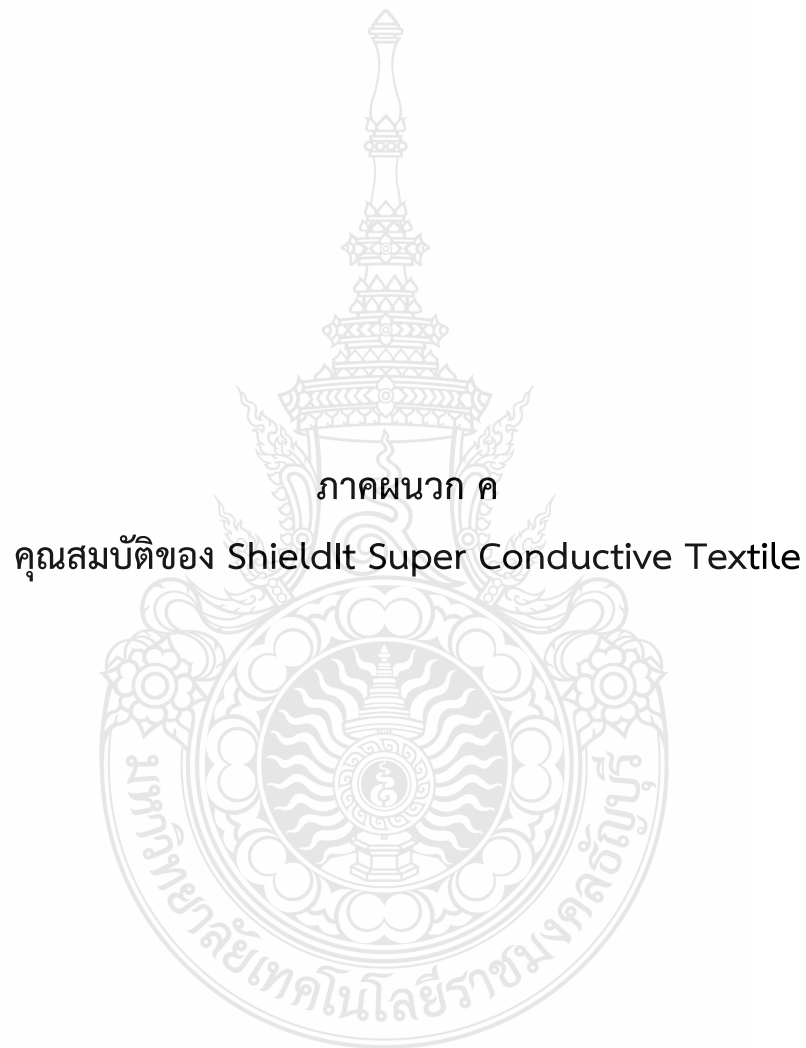
Piece Parts	Material	Surface Plating
Centre contact	Copper Beryllium Alloy	Gold Plating (Nickel underplated)
Outer contact	Copper Beryllium Alloy	Gold Plating (Nickel underplated)
Body	Copper Beryllium Alloy	Gold Plating (Nickel underplated)
Insulator	PFA / PTFE	

Related Documents

Catalogue drawing DCA-00010325

Ordering Information

Single package 23_SMA-50-0-12/111_NE



ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของ ShieldIt Super Conductive Textile

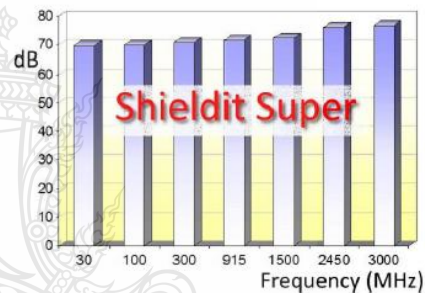


SHIELDIT™ SUPER

"With Hot Melt Adhesive Backing"

High quality flame retardant fabric for radiofrequency and microwave shielding. Rugged rip-stop polyester substrate (for superior strength and handling), conductive Nickel and Copper plated (for excellent shielding and low corrosion), then coated on one side with a non-conductive hot melt adhesive (activates at 130°C = 266°F) so you can iron it on to cotton, wood, glass or paper, or roll it into a tube and heat seal the seam! Maximum temperature is 200°C (=392°F). One side surface resistivity <0.07 Ohm/sq. Can also be cut and sewn like ordinary fabric.

This fabric offers an amazing shielding performance: **>60 dB from 30 MHz to 3+ GHz**. Will also block virtually all ELF & VLF electric fields when grounded. Great for shielding extension cords and computer cables. Connect strips of it to make a sheet shield under your



bed, or hang it on the wall. Makes a great liner for drapes too! Line a vest or a hat to protect your vital organs from radiowaves and electric fields. It doesn't breathe well, and Nickel may cause skin irritation, so plan to line it with cotton if you will be using it against the skin. 230 g/m², 0.17 mm thick. UL 94V-0 level flame retardant. RoHS Compliant. Remove paper backing before heating! Gray, **14 inch wide**.

Washing Instructions: Do not machine wash or dry clean. Dry brush, wipe with damp cloth, or rinse in plain water. Hang dry. Do not iron.

Available from:

LessEMF.com
+1 (518) 608-6479
www.lessemf.com

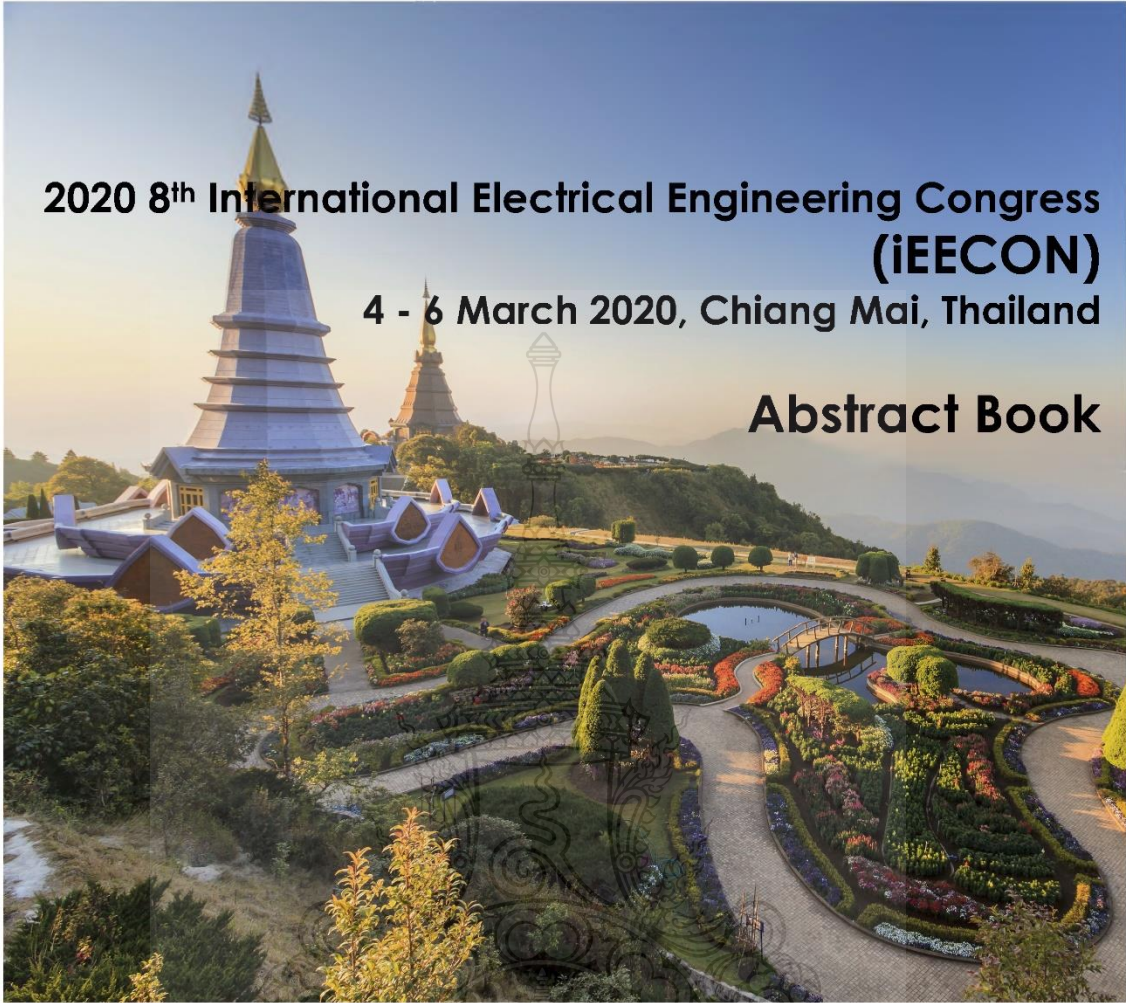
ภาคผนวก ง
ผลงานที่ได้ตีพิมพ์



ผลงานที่ได้ตีพิมพ์

- [1] P. Sopa and P. Rakluea, "The Hexagonal Shaped UWB Wearable Textile Antenna with Band-Notched Characteristics," in *2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Chiang Mai, Thailand, 2020, pp. 1-4.





**2020 8th International Electrical Engineering Congress
(IEEECON)**

4 - 6 March 2020, Chiang Mai, Thailand

Abstract Book

**Organized & Technical
Co-sponsored by**

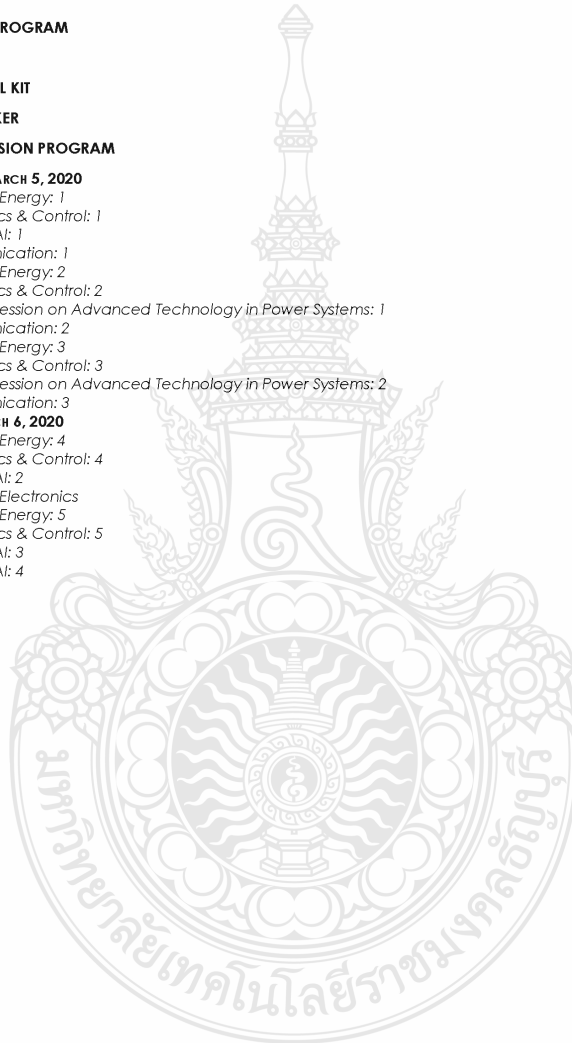


Sponsored by



Table of Contents

MESSAGE FROM NPU PRESIDENT	I
MESSAGE FROM EEAAT PRESIDENT	II
MESSAGE FROM DEAN OF FACULTY OF ENGINEERING AND GENERAL CHAIR	III
COMMITTEES	IV
CONFERENCE PROGRAM	V
VENUE	VII
PRESENTER TOOL KIT	VIII
KEYNOTE SPEAKER	IX
TECHNICAL SESSION PROGRAM	1
THURSDAY, MARCH 5, 2020	1
Power & Energy: 1	1
Electronics & Control: 1	4
COM & AI: 1	7
Communication: 1	11
Power & Energy: 2	15
Electronics & Control: 2	19
Special Session on Advanced Technology in Power Systems: 1	24
Communication: 2	28
Power & Energy: 3	31
Electronics & Control: 3	35
Special Session on Advanced Technology in Power Systems: 2	39
Communication: 3	42
FRIDAY, MARCH 6, 2020	46
Power & Energy: 4	46
Electronics & Control: 4	50
COM & AI: 2	53
Power & Electronics	57
Power & Energy: 5	60
Electronics & Control: 5	64
COM & AI: 3	68
COM & AI: 4	72
AUTHOR INDEX	76



Committees

Honorary General Chair

Pattanapong Wanchantuek (NPU, Thailand)

General Chair

Sanun Srisuk (NPU, Thailand)

International Steering Committee

Andrea Bonfiglio (UNIGE, Italy)
Athikom Roeksbutr (MUT, Thailand)
Christof Humpert, (H-KOELN, Germany)
Hiroshi Matsuno (Yamaguchi Univ., Japan)
Ian Grout, (UL, Ireland)
Koichi KUZUME (NIT, Japan)
Mithulan Nadarajah, (UQ, Australia)
Prayoot Akkaraekthalin (KMUTNB, Thailand)
Sri Niwas Singh, (IITK, India)
Tsai-fu Wu, (NTHU, Taiwan)
Tim Mews (University of Alabama, USA)

Technical Program Chairs

Komkrit Chooruang (NPU, Thailand)
Pantree Kompittaya (NPU, Thailand)

Technical Program Committee

Apirat Sirtaratiwat (KKU, Thailand)
Chaiwut Chat-uthai (KMUTL, Thailand)
Issa Batarseh, (UCF, USA)
Kosin Chamnongthai (KMUTT, Thailand)
Mark Re (Seagate Technology, USA)
Ming Dong, (XJTU, China)
Nosrat Granpayeh, (KNTU, Iran)
Phillip N. Ji, (NECLab, USA)
Sarah Thompson (University of York, UK)
Somchai Hiranvarodom (RMUTT, Thailand)
Thas A Nirmalathas, (UNIMELB, Australia)
Vichate Ungvichian (FAU, USA)

Local Organizing Committee

Kitchanut Ruamboon (NPU), Publicity
Apiwut Kaewsong (NPU), Publicity
Damrongsak Arunyagool (NPU), Finance
Chanwit Suwannapong (NPU), Publication
Nutthaphong Sonard (NPU), Exhibition

The Hexagonal Shaped UWB Wearable Textile Antenna with Band-Notched Characteristics

Pachoke Sopa
Department of Electronics and Telecommunication
Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pathumthani, Thailand
E-Mail: pachoke_s@mail.rmutt.ac.th

Paitoon Raklua
Department of Electronics and Telecommunication
Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pathumthani, Thailand
E-Mail: paitoon_r@rmutt.ac.th

Abstract— In this paper, the hexagonal shaped UWB wearable textile antenna with band-notched characteristic has been presented. The proposed antenna was designed and analyzed by Computer Simulation Technology (CST). Moreover, the antenna designed in hexagonal geometry for the radiating patch and the C-shaped slot capable with band-notched characteristics from 2.5-3.1 GHz. The ground plane is designed in rectangular geometry and has technique etching small rectangular between the transmission line to the antenna junction that improved antenna performance. The substrate of proposed antenna made from the military cotton with dielectric constant 2.25. Both of front and backside have usability ShieldIt Super conductive textile and antenna dimensions size is $58 \times 42 \times 0.77$ mm. The experimental result indicated that a prototype had operated bandwidth from 1.76 to 17.78 GHz and the group delay is a significant parameter for the communications system less than 1.25 ns, in essential several ranges. The proposed antenna can be operated on Wireless Body Area Network (WBAN), Industrial Scientist Medical (ISM) and Ultra-Wideband (UWB) applications for future wireless systems.

Keywords— Hexagonal Wearable Textile Antenna, Band-Notched, Wireless Body Area Network (WBAN), Ultra-Wideband (UWB)

I. INTRODUCTION

The ultra-wideband (UWB) system in frequency bands 3.1 up to 10.6 GHz was approved by the Federal Communication Commission (FCC) in 2002 to be used without the license. The ultra-wideband communications provided high data rate transmission capability at low power, high gain, and stable radiation pattern with a compact dimension. The fractal design help to enhance wideband frequency because of the multiple resonances property. However, the operating range of ultra-wideband nearly importance communications system such as Industrial, Scientist, and Medical (ISM) bands of 2.45 GHz and 5.8 GHz, Wireless Body Area Network (WBAN) in IEEE 802.15.6 standard, the WiMAX services in European and Asian countries from 3.3-3.6 GHz, C-band satellite communication range 3.7-4.2 GHz and WLAN IEEE802.11a (5.15-5.825 GHz). Nowadays, A wearable antenna has been various of advantages such as low cost, lightweight, flexible and simply integrate to clothing. In general requirement for the wearable antenna basis from textile material and integrate to smart clothes. Most of textile materials have a less dielectric constant that reduced the surface wave losses and enhance the impedance bandwidth of antenna. The speedy development of wearable antenna that needs to merge ultra-wideband applications with textile technology. The features of the wearable textile antenna are made, such as a wearable health monitoring system that capability improves the quality of life by providing and real-time health status

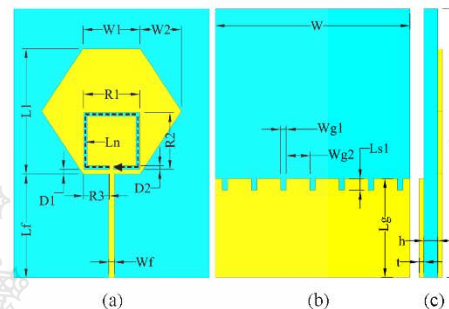


Fig.1. The proposed antenna parameter with final design (a) Front view, (b) Back view and (c) Left side.

sensing, alerting in emergency cases.

Recently, The ultra-wideband antenna were studied by several researchers [1]-[7]. The band notched has been reviewed and reported in our technique such as Split ring slot on radiating patch [1], U-shaped slot [1] and C-shaped slot [2],[3] In addition, a rectangular small slot on partial ground between the junction of transmission line and radiation patch for bandwidth improvement and additional high frequency resonance bandwidth [4],[5]. The radiating fractal geometry has reported such as Square geometry [1], Circular geometry [3], Hexagonal geometry[2] and Octagonal geometry [4],[7]. At present, the antenna progress has been applying for wearable communications. These designs of the wearable antenna were operated in frequency band of WLAN [8]-[9] and Ultra-Wideband [6],[7]. The most of substrate material made from various kinds of Textiles such as Felt textile [7]-[8], Jean textile[9].

In this paper has presented the hexagonal shaped ultra-wideband wearable textile antenna. The antenna was designed and develop to implement with ISM band, WBAN, and UWB applications in frequency range 1.73-17.76 GHz as shown in section II. The hexagonal shaped structure applied on textile substrate to utilized various resonance appearance of the fractal design and achieved wideband characteristic. The C-shaped slot was implemented on the hexagonal radiating element to notched the frequency range 2.5-3.1 GHz which unoccupied between WLAN to UWB range. Both with substrates and conductive patch made from textile material in order to applied integrate with clothes. The proposed of the hexagonal shaped ultra-wideband wearable textile antenna was successfully fabricated and measured, the result were shown in section III. The lightweight, low profile, thinner, flexible material are suitable for wearable applications.

II. ANTENNA DESIGN

In this matter, We provided the Military textile as material substrate because we are interested and popularly used in the Military Service Training of Territorial Course in Thailand. At first, we measured the substrate dielectric constant by Split cylinder resonator fixture to find dielectric constant value. Then, we had been using the dielectric constant of a Military textile is 2.25, thickness 0.43 mm. and loss tangent ($\tan\delta$) 0.03 to design proposed antenna. The metallic component is using ShieldIt conductive textile product from LessEMF Inc. with the estimated conductivity 1.18×10^5 S/m. thickness 0.17 mm. The antenna was connected with SMA connector by soldering at temperature maximum of 250°C to protected the textile conductor. The antenna structure were simulated by Computer Simulation Technology (CST). This principle UWB textile antenna in Fig.2(a) were designed radiating plane like a hexagonal shaped on a rectangular substrate and ground plane with dimension $58 \times 42 \times 0.77$ mm³. to obtain UWB. ISM, WBAN applications. The hexagonal shaped antenna patch was designed and optimized in length around $0.24\lambda_g$ at first resonance frequencies follow the monopole antenna design theory. Fig.2(b), The rectangular slot of size 2.3×1.2 mm². on a ground plane between connection point area of transmission line and radiation patch are technique to improved impedance matching over the band of UWB range. The C-shaped notched in Fig.2(c) to operate in order to the band rejection from 2.5-3.1 GHz. This frequency range is the connection band from WLAN to UWB not required in the proposed antenna. The notched length is calculated follow equation (1).

$$L_n = \frac{c}{2f_n \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

Where L_n parameter is the approximate length of notch in mm. f_n parameter is center notched frequency in GHz. The c parameter is the speed of light (3×10^8). The ϵ_r parameter is dielectric constant of textile substrate material. The result of calculation L_n length at notched frequency 2.85 GHz is around 41.28 mm. and the actual notched length is $0.49\lambda_g$ follow the final optimized parameter. The antenna difference characteristics structures as shown in Fig.3 and the comparison of simulated return loss characteristics for the different antenna as shown in Fig.3. Fig.2(a), the original antenna structure design that can operating in range 1.8-11.7 GHz from graph in Fig.3(UWB Antenna). Fig.2(b), the UWB antenna were implemented small rectangular slot on the top of ground plane that effective to improved bandwidth over the UWB frequency range from the graph in Fig.3(UWB antenna add slot).

TABLE I. PARAMETERS AND DIMENSION OF PROPOSED ANTENNA

Parameter	Value (mm.)	Parameter	Value (mm.)	Parameter	Value (mm.)
W1	14	L	58	R3	5.55
W2	8	Lf	22.3	r	0.17
L1	27	Lg	21.3	W	42
D1	1	Ls	1.5	Wf	1.2
D2	0.8	R1	12.1	Wg1	1.2
h	0.43	R2	12.2	Wg2	5.1

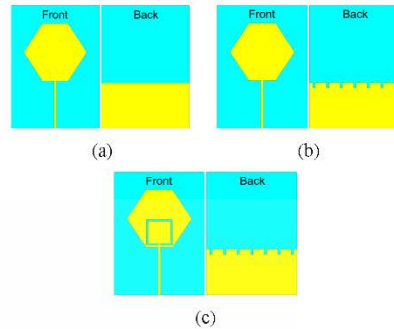


Fig.2. Structures of UWB antenna (a) UWB Antenna, (b) UWB Antenna add slot gnd and (c) UWB Antenna add slot gnd and notch.

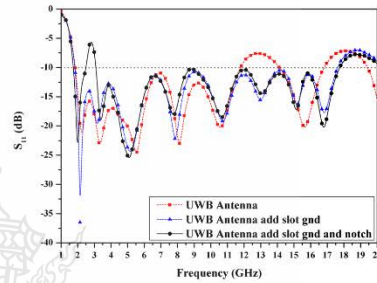


Fig.3. Simulated return loss of UWB antenna with our configurations (a), (b) and (c).

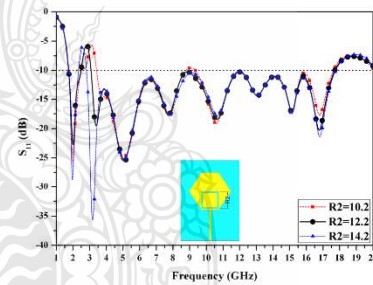


Fig.4. Simulated return loss for variation value R2.

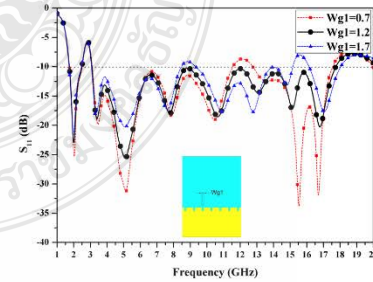


Fig.5. Simulated return loss for variation value Wg1.

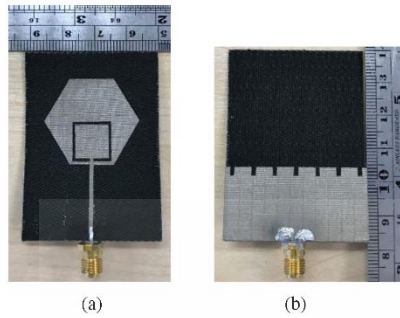


Fig.6. A picture of proposed antenna prototype (a) Front view and (b) Back view.

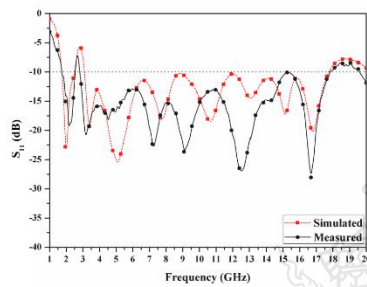


Fig.7. Return loss of proposed antenna between simulated and measured.

Fig.2(c), the notched technique was distributed on the antenna design in Fig.2(b) obtained notch characteristic from graph as Fig.3(UWB antenna add slot gnd and notch). To define the antenna parameter in influence, there are essential to study the return loss effect to the antenna design and optimization. The impact of a notched band was presented in Fig.4 with a different value of R_2 . The band-notched was moved toward low frequency when an increasing value. Fig.5 depicts the effect of $Wg1$ in the ground plane and the width slot was concerned with a bandwidth of UWB and over the range. The suitable value for both parameters (R_2 , $Wg1$) is 12.2 mm, and 1.2 mm, to employ well matching, respectively. From Fig.7 the simulated return loss result as shown proposal antenna meet satisfy frequency range from 1.73-17.76 GHz and notched bandwidth 2.49-3.09 GHz. Fig.1 was presented the final designed antenna from CST program and the optimized dimension design parameters of proposed antenna are defined as Table I.

III. RESULT AND DISCUSSIONS

The proposed antenna prototype has presented in Fig.6. The comparison results from simulation and measurement return loss of proposed antenna with notched as appear on Fig.7. The measured result expression that the proposed antenna has been operating frequency band of 1.76-17.78 GHz and notched bandwidth is around 2.53-2.81 GHz. Respectively, it might notice that the simulation and measurement results showed good agreement. Therefore, the different points from simulation and measurement maybe claim from the loss from SMA connector, conductor, substrate and handmade manufacturing process. The radiation pattern at 2.4 GHz, 3.5 GHz, 5.2 GHz, 7.25 GHz, 9 GHz and 12.5 GHz are shown-

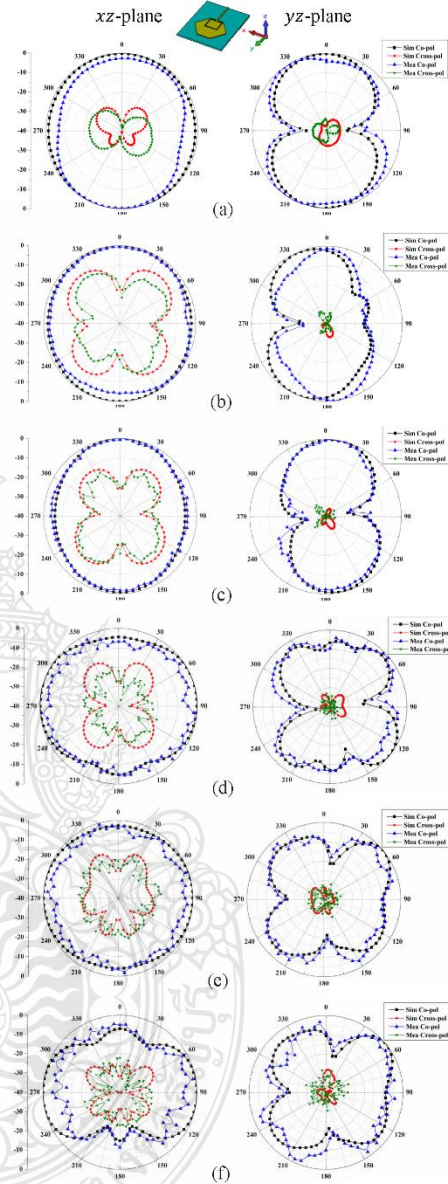


Fig.8. Simulated and measured radiation pattern in xz -plane and yz -plane at (a) 2.4 GHz (b) 3.5 GHz (c) 5.2 GHz (d) 7.25 GHz (e) 9 GHz (f) 12.5 GHz

in Fig.8. The pictures are shown simulated and measured result of radiation pattern in Co-polarization and Cross-polarization on xz -plane and yz -plane. In the xz -plane, the direction pattern is nearly omnidirectional pattern and directional pattern in yz -plane is the bi-directional pattern.

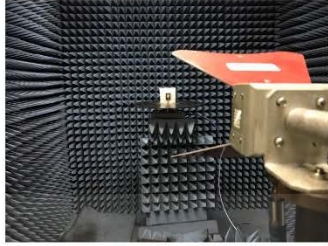


Fig.9. The proposed antenna measurement setting.

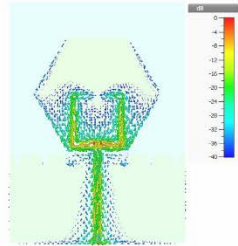


Fig.10. Current density distribution at 2.9 GHz.

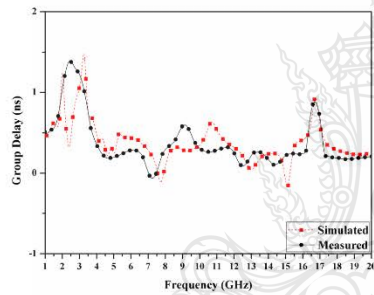


Fig.11. Simulated and measured group delay result of proposed antenna.

TABLE II. THE COMPARISON OF THE PROPOSED ANTENNA MAXIMUM GAIN FROM SIMULATED AND MEASURED

Antenna Gain (dBi)	Frequency (GHz)						
	1.8	2.4	3.5	5.2	7.25	9.0	12.5
Simulated	0.95	1.43	2.36	3.2	2.27	1.24	2.47
Measured	1.12	1.36	2.38	3.06	2.31	1.37	2.32

The different results between simulated and measured radiation pattern due to reflection of equipment inside the anechoic chamber and the effect of coaxial cable, adapter and antenna alignment during measurement. Fig.9 as shown the proposed antenna setting during measurement radiation pattern in anechoic chamber room. As illustrated in Fig.10 for the band-notched current density was concentrated at C-shaped slot. The active current distribution around the C-slot that made the proposed antenna achieved band-notched characteristic, due to which energy was reflected to the input

port. Fig.11 illustrates the simulated and measured in group delay there is an essential parameter of time-domain characteristic for UWB antenna designed application. The proposed antenna was measured group delay by the application in the ZVB Vector Network Analyzer and variation of the result less than 1.25 ns. in operating band. The antenna gain was depicted in Table II. We have measured the proposed antenna gain by sample the significant frequency range. From the result, the antenna gain consistency meets expectation agreement between simulated and measured. The aim of proposed antenna has completely perfect, which able to apply for UWB applications.

IV. CONCLUSION

The ultra-wideband wearable textile antenna was designed with the hexagonal fractal. The notched characteristic was obtained by added C-shaped slot on the radiating patch. The ground patch was etched slot between the junction of transmission line and radiation patch for increased higher bandwidth over 11 GHz and improvement return loss in ultra-wideband applications. The proposed antenna was operated from 1.76-17.78 GHz and also satisfactory return loss less than -10 dB that coverage in WBAN, ISM, and UWB range. Finally, the performance of antenna has good gain that over 2dBi in significant frequency ranges, excellent radiation pattern was liked omnidirectional through simulation and measurement. The group delay was lower than 1.25 ns. there is a necessary and right choice for the wearable textile antenna with UWB applications.

REFERENCES

- [1] Bo Tong, Xianliang Wu, Long Xiao, Zhixiang Huang, "Dual band-notched ultra-wideband antenna based on U-shaped slit and split ring slot", Microwave Conference (APMC) Asia-Pacific, vol. 2, pp. 1-3, 2015.
- [2] Shrivishal Tripathi, Akhilesh Mohan, Sandeep Yadav, "A compact dual band-notched fractal antenna for UWB application", Microwave Conference (APMC) 2014 Asia-Pacific, pp. 205-207, 2014.
- [3] N. Manshouri, A. Yazgan, M. Maleki, "A microstrip-fed Ultra-Wideband Antenna with Dual Band-notch Characteristics", 2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), pp. 231-234, June 2016.
- [4] Mohammad Akbari, Neda Rojhani, Mehdi Saberi, Reza Movahedinia, "Dual band notched monopole antenna with enhanced bandwidth for ultra-wideband wireless communications", the journal of engineering, no. 8, pp. 415-419, 2014.
- [5] D. Sipal, M. P. Abegaonkar, S. K. Koul, "UWB MIMO USB dongle antenna for personal area network application", 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 1-4, 2016.
- [6] N. Singh, A. K. Singh, V. K. Singh, "Design & Performance of Wearable Ultra Wide Band Textile Antenna for Medical Applications," Microwave and Optical Technology Lett., 57(7), 1553-1557, 2015.
- [7] Linda A. Yimdoj Pollelie, Ping Jack Soh, Sen Yan, Guy A. E. Vandebosch, "A High-Fidelity All-Textile UWB Antenna With Low Back Radiation for Off-Body WBAN Applications", Antennas and Propagation IEEE Transactions on, vol. 64, no. 2, pp. 757-760, 2016.
- [8] Sen Yan, Ping Jack Soh, Guy A. E. Vandebosch, "Wearable Dual-Band Magneto-Electric Dipole Antenna for WBAN/WLAN Applications", Antennas and Propagation IEEE Transactions on, vol. 63, no. 9, pp. 4165-4169, 2015.
- [9] Shao-He Li, Jiu-sheng Li, "Smart patch wearable antenna on Jeans textile for body wireless communication", Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE) 2018 12th International Symposium on, pp. 1-4, 2018.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	พาโชค โสภา
วัน เดือน ปีเกิด	27 เมษายน 2536
ที่อยู่	60/2 หมู่ 12 ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12130 ประเทศไทย
การศึกษา	
พ.ศ. 2553	สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ โรงเรียนช่างฝีมือทหาร
พ.ศ. 2558	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม-โทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	พ.ศ. 2559 - 2562 วิศวกรทดสอบ (Test Engineer) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บริษัท โซนี่ เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2562 - ปัจจุบัน วิศวกรทดสอบ (Test Engineer) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บริษัท เบนซ์มาร์ค อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
เบอร์โทรศัพท์	085-2329285
อีเมล	pachoke_prism@outlook.co.th