



**การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สาย
อากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น**

(Enhancement of WLAN System Performance using Switch-Beam Smart Antenna)

โดย

- 1. นางสาวรวมพร นุกูลโรจน์ รหัสประจำตัว B4710783**
- 2. นายอภิธาน คงเจริญ รหัสประจำตัว B4713463**

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม

และวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2550

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการ	การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศ เก่งแบบสวิตช์ล่าคลื่น		
โดย	1. นางสาวรวมพร	นุญตโรจน์	รหัสประจำตัว B4710783
	2. นายอภิธาน	คงเจริญ	รหัสประจำตัว B4713463
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม		
ภาคการศึกษา	1/2550 2/2550		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายกำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเป็นอย่างมากทั้งในสำนักงานขนาดเล็ก บ้านเรือน รวมทั้งสถานที่ซึ่งการเดินสายส่งสัญญาณมีความยุ่งยากหรือไม่อาจกระทำได้ แต่ปัญหาหนึ่งที่มีมักจะพบเห็นได้บ่อยคือ การอับสัญญาณในบางพื้นที่ทำให้ต้องติดตั้งจุดเข้าถึงเครือข่ายเพิ่มเติมซึ่งก่อให้เกิดความสิ้นเปลือง ดังนั้นโครงการนี้จึงมีความสนใจที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วยการติดตั้งสายอากาศเก่งไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์แทนสายอากาศที่ใช้อยู่

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร.มนต์ทิพย์ภา อูทาสกุล ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลากลื่น ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนช่วยฝึกฝนและให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำให้มีความสามารถในการทำโครงการตลอดจนเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอกวิศวกรรมโทรคมนาคม และเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบคุณโครงการ IRPUS ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำโครงการวิจัยและทุนการศึกษาในครั้งนี้

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงการชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

นางสาวรวมพร	นุกุลโรจน์
นายอภิธาน	คงเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 สายอากาศเก่ง (Smart Antenna)	3
2.2.1 สายอากาศเก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น (switched beam system)	4
2.2.2 สายอากาศเก่งชนิดปรับตัวได้ (adaptive antenna system)	5
2.3 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix	9
2.3.1 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°)	12
2.3.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover)	14
2.3.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°)	15
2.4 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	17
2.5 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna)	19
2.5.1 สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน	20
2.5.2 สายอากาศโมโนโพลแบบครูปั้ง (Drooping Monopole)	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ทฤษฎีแวลวลำดับของสายอากาศ (Antenna Arrays)	22
2.6.1 ตัวประกอบแวลวลำดับ (Array Factor)	23
2.6.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแวลวลำดับ (Gain of Array Antennas)	25
2.7 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	28
2.7.1 วิชาการของมาตรฐาน IEEE 802.11	29
2.7.2 ระยะทางการเชื่อมต่อของระบบ Wireless LAN	32
2.8 สรุป	33
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบ	34
3.1 บทนำ	34
3.2 ภาพรวมของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ	34
3.3 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น	36
3.3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (hybrid coupler 90°)	36
3.3.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover)	42
3.3.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifter 45°)	47
3.4 สายอากาศ	56
3.5 สรุป	59
บทที่ 4 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ	60
4.1 บทนำ	60
4.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยใช้สายอากาศแ่ง	60
4.2.1 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในห้องปฏิบัติการ	60
4.2.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในการใช้งานจริง	61
4.3 สรุป	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ข้อสรุปของโครงการ	68
5.1 บทนำ	68
5.2 ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข	68
5.3 ข้อเสนอแนะ	69
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	69
5.5 บทสรุป	69
เอกสารอ้างอิง	70
ประวัติผู้เขียน	71

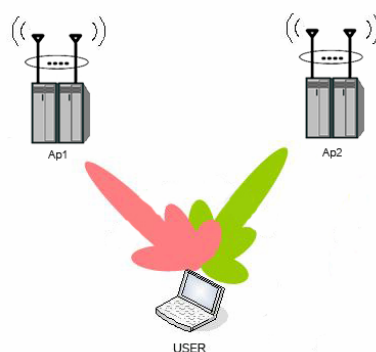
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) คือระบบเครือข่ายเฉพาะบริเวณที่คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องในระบบนั้นใช้อุปกรณ์โมเด็ม (modem) ไร้สายและสายอากาศเพื่อใช้ในการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆ ในปัจจุบันสายอากาศที่ใช้ที่คอมพิวเตอร์ถูกขยับเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทาง ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในทิศทางที่ไม่จำเป็นจะต้องให้พลังงานแผ่ไปถึง ด้วยเหตุนี้อัตราขยายของเครื่องรับเช่นคอมพิวเตอร์ถูกขยับจึงมีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายดังกล่าวต่ำไปด้วยและยังทำให้เกิดการอับสัญญาณขึ้นในบางพื้นที่อีกด้วย ทางแก้ปัญหในปัจจุบันทำได้โดยติดตั้งจุดเข้าถึงเครือข่าย (access point) เพิ่มเติมซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณเป็นอย่างมาก

จากการเล็งเห็นปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ผู้เสนอโครงการจึงมีความสนใจที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยการใช้ระบบของสายอากาศเก่ง (smart antenna system) ที่คอมพิวเตอร์ถูกขยับ เนื่องจากสายอากาศเก่งมีความสามารถในการก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ของพหุหลักไปในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงในขณะที่หันจุดศูนย์ (nulls) และพหุรองไปในทิศทางอื่นๆ ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้อัตราขยายของระบบเพิ่มสูงขึ้นแล้วยังทำให้ลดสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งอื่นได้อีกด้วย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการนำเอาสายอากาศเก่งเข้ามาในระบบจึงสามารถลดปัญหาในเรื่องของจุดอับสัญญาณ และยังเพิ่มความแรงของสัญญาณให้กับระบบได้อีกด้วย



รูปที่ 1: ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายใช้งานร่วมกับสายอากาศเก่ง
(WLAN System Performance using Smart Antenna)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้หลักการของการก่อรูปลำคลื่นในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงแทนระบบเดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีวงจรก่อรูปลำคลื่นเพื่อใช้ในการออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network)
2. ศึกษาและออกแบบตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (hybrid coupler 90°) ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) และ ตัวเลื่อนเฟส (phase shifter)
3. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบทั้งหมดและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
4. นำอุปกรณ์ทั้งหมดมาประกอบเข้ากันเป็นตัวต้นแบบ
5. ทดสอบตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล
2. ศึกษาเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น
3. กั๊คลายวงจรเพื่อให้ได้เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ออกแบบไว้
4. ทดสอบลายวงจรที่ออกแบบ
5. ทดสอบสายอากาศ
6. นำอุปกรณ์ทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกันและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
7. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงานและนำเสนอผลงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โครงการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้ได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) ร่วมกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ซึ่งมีการใช้สายอากาศแถวลำดับวางตัวเรียงกันแบบเชิงเส้นเป็นระยะทาง 6.25 เซนติเมตร จำนวน 4 ต้น และนำมาเชื่อมต่อเข้ากับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ซึ่งในวงจร Butler matrix นี้จะประกอบไปด้วยตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) จำนวน 4 ตัว, ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) จำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส (phase shifter) จำนวน 2 ตัว ซึ่งทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

2.2 สายอากาศเก่ง (Smart Antenna)

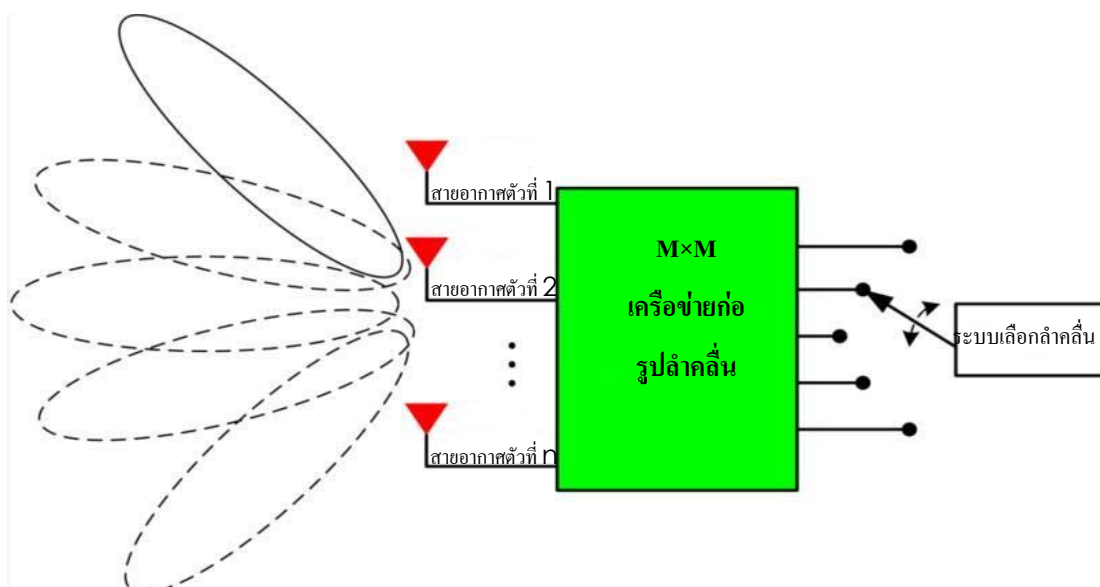
สายอากาศเก่ง หรือ smart antenna โดยทั่วไปมักจะหมายถึงระบบซึ่งสามารถแก้ไข หรือดัดแปลงรูปแบบลำคลื่นเพื่อให้ชี้ไปในทิศทางที่สนใจ และสามารถลดสัญญาณรบกวนได้

สายอากาศเก่งโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สายอากาศแถวลำดับ และส่วนที่เป็นระบบก่อรูปลำคลื่นให้เหมาะสม ข้อกำหนดพื้นฐานคือการเลือกที่จะสร้างลำคลื่นในการเชื่อมต่อแต่ละจุดในเวลาเดียวกัน ส่วนระบบก่อรูปลำคลื่นให้เหมาะสมจะกำหนดให้สายอากาศส่งลำคลื่นหลักไปในทิศทางที่สนใจ ในขณะที่เดียวกันก็จะส่งจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณรบกวนหรือลำคลื่นรอง ซึ่งจะทำให้สัญญาณแทรกสอดจะมีค่าน้อยมาก [1]

สายอากาศเก่งมีลักษณะพื้นฐานอยู่สองชนิดดังนี้

1. สายอากาศเก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น (switched beam systems)
2. สายอากาศเก่งชนิดปรับตัวได้ (adaptive antenna systems)

2.2.1 สายอากาศเก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น (switched beam system)



รูปที่ 2.1 สายอากาศเก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น (switched beam systems) [2]

ในระบบสายอากาศเก่งจะใช้เฉพาะเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบเป็นระเบียบ การสับเปลี่ยนลำคลื่น จะใช้วิธีการเลือกลำคลื่นที่สัญญาณที่ได้รับมีความแรงมากที่สุด สายอากาศเก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น (switched beam systems) สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอุปกรณ์แบบง่ายๆ เช่น เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น, RF สวิตช์ และระบบควบคุมการเลือกลำคลื่นเฉพาะ โดยเลือกจากผลขาออก ซึ่ง M คือตัวกำหนดน้ำหนักของเวกเตอร์ที่ใช้ในสมการ 2.1 การแยกเลือกลำคลื่นเฉพาะนี้ มาจากตัวรับสัญญาณแต่ละตัว กลไกการทำงานสำหรับการเลือกลำคลื่นเฉพาะจะใช้วิธีการแบบ FDMA, TDMA หรือ CDMA แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาวิธีที่เป็นไปได้มากที่สุดในการเลือกลำคลื่นจะใช้วิธีการเลือกลำคลื่นที่ใกล้ที่สุดจากแต่ละจุดเข้าถึงเครือข่าย

ระบบสวิตช์ลำคลื่นเป็นวิธีที่หนึ่งที่ทำให้ก้าวหน้าสำหรับในการเลือกลำคลื่นอย่างละเอียดสำหรับระบบสายอากาศเก่งอย่างสลับซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบสวิตช์ลำคลื่นก็มีเช่นกัน อย่างแรกคือระบบจะไม่สามารถป้องกันการเกิดองค์ประกอบมัลติพาร์ตซึ่งเป็นของทิศทางของการส่งมาถึง (DOAs) ในบริเวณใกล้ของส่วนประกอบที่ต้องการ ระบบพื้นฐานของวงจรก่อรูปลำคลื่นส่วนมากจะมีความไวต่อมุมของการกระจายของส่วนประกอบของมัลติพาร์ตมากกว่าระบบพื้นฐานของตัวควบคุมแถวลำดับปรับตัวได้ อย่างที่สองคือผลเสียของ

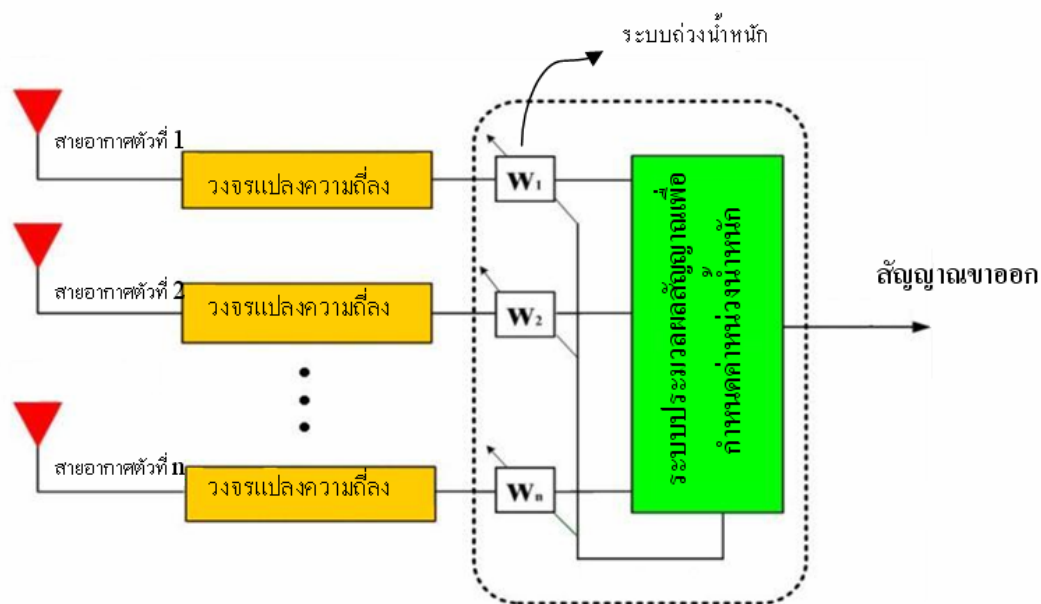
ระบบสวิตช์ลำคลื่นอีกอย่างคือไม่สามารถใช้ประโยชน์ในเส้นทางที่มีความแตกต่างกัน โดยมีเหตุผลรวมหลายประการ และสุดท้ายระดับกำลังงานที่ได้รับจากผู้ใช้งานมีการเปลี่ยนแปลงเสมอ เมื่อผู้ใช้งานการเดินทางในส่วนโค้งที่นอกเหนือจากข้อกำหนดของสถานี โดยทั่วไปวงจรก่อรูปลำคลื่นจะมีการให้ลำคลื่นที่มีการไขว้ของแต่ละจุด 4 dB ดังนั้นความแรงของสัญญาณจะแตกต่างเมื่อผู้ใช้งานย้ายจากศูนย์กลางของลำคลื่นไปที่ขอบของลำคลื่นแทน

ทั้งที่ระบบสวิตช์ลำคลื่นมีข้อเสีย แต่ระบบสวิตช์ลำคลื่นก็ได้รับความนิยมในหลายเหตุผลด้วยกัน ระบบสวิตช์ลำคลื่นจะให้แนวการเพิ่มประโยชน์ของระบบที่ละเอียด ระบบสวิตช์ลำคลื่นจะมีความสามารถที่จะลดกำลังของระบบในสายอากาศที่มีน้ำหนักมาก ระบบสวิตช์ลำคลื่นต้องมีการกระทำซึ่งกันและกันในปริมาณที่ปานกลางโดยสถานีฐานภาครับเท่านั้น

วงจรก่อรูปลำคลื่นจะเป็นลักษณะพิเศษของแถว M เมตริกซ์ T เมื่อเวกเตอร์ของสัญญาณขาออกคือเมตริกซ์ $y(t)$ ซึ่งบอกเวกเตอร์ของสัญญาณที่สัญญาณขาเข้าแถวลำดับ $u(t)$ โดย

$$y(t) = T^H u(t) \quad (2.1)$$

2.2.2 สายอากาศเก่งชนิดปรับตัวได้ (adaptive antenna systems)



รูปที่ 2.2 สายอากาศเก่งชนิดปรับตัวได้ (adaptive antenna systems) [3]

การเพิ่มความซับซ้อนในการผลิตสัญญาณแถวลำดับ ที่เป็นไปได้จากการใช้ระบบสวิตช์ลำคลื่น ในแบบแถวลำดับสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.2 น้ำหนักเวกเตอร์ คือ การแก้ไขให้

เหมาะสม หรือปรับตัว คุณภาพที่มากที่สุดของสัญญาณคือ การถอดรหัสสัญญาณของ สัญญาณ k ที่เริ่มขึ้นที่ i

ในวิธีที่ดีที่สุดของการสร้างลำดับขึ้น น้ำหนักของเวกเตอร์คือการตัดสินใจโดยค่าที่ใช้มีน้อยที่สุด โดยทั่วไปค่าที่ใช้คือความสัมพันธ์ที่สลับกันโดยระดับสัญญาณที่แวลลำดับที่ขาออก เมื่อค่าที่ใช้มีค่าน้อยที่สุด คุณภาพของสัญญาณก็จะน้อยด้วยเช่นกันที่แวลลำดับที่ขาออก วิธีที่สองที่นิยมใช้กันคือการพัฒนาในระบบการติดต่อสื่อสาร โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (MMSE) และค่ากำลังสองที่น้อยที่สุด (LS) เป็นเกณฑ์ ในสองวิธีนี้ กำลังสองของความแตกต่างของแวลลำดับที่ขาออก $z(t) = w_k^H u_i(t)$ และ $d_k(t)$ การวิเคราะห์การก่อกำเนิดเฉพาะที่ของสัญญาณที่ต้องการสำหรับ k^{th} คือค่าที่น้อยที่สุดโดยการหาเวกเตอร์น้ำหนักที่เหมาะสม (w_k) MMSE เป็นการแก้ปัญหาที่ตั้งในพจน์ของค่าเฉลี่ยรวมและการก่อกำเนิดน้ำหนักเวกเตอร์สัญญาณ (w_k)

ใน MMSE ที่ใกล้ ค่าที่ใช้ที่น้อยที่สุดคือ

$$J(w_k) = E \left[\left| w_k^H u_i - d_{k,i} \right|^2 \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ $d_{k,i} = d_k(iT_s)$ และ $u_i = u(iT_s)$ เมื่อ T_s คือคาบของการแซมปลิง

ค่าที่ใช้คือปริมาณที่คาดหวังของค่าผิดพลาดกำลังสองระหว่างแวลลำดับขาออกที่สัญญาณ k^{th} และต้องการสัญญาณทางเวลาที่เริ่มขึ้นที่ i ดังสมการ 2.2

$$J(w_k) = w_k^H E \left[u_i u_i^H \right] w_k - E \left[d_{k,i} u_i^H \right] w_k - w_k^H E \left[u_i d_{k,i}^* \right] + E \left[d_{k,i} d_{k,i}^* \right] \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปจะทำให้เวกเตอร์ที่ใช้มีค่าน้อยที่สุดโดยกำหนดที่ตั้งทางลาดจากค่าที่ใช้ไปสู่ศูนย์ ค่าที่ลาดลงของค่าที่ใช้จะเป็นคอมเพล็กซ์เวกเตอร์ สามารถหาได้โดย

$$\nabla f(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_0} f(w) \\ \dots \\ \frac{\partial}{\partial a_{M-1}} f(w) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial b_0} f(w) \\ \dots \\ \frac{\partial}{\partial b_{M-1}} f(w) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เมื่อ $w_i = a_i + jb_i$ จะใช้เมื่อต้องการหาค่าต่อไปนี้

$$\nabla(w^H A w) = 2Aw \quad (2.5)$$

$$\nabla(w^H c) = 2c \quad (2.6)$$

$$\nabla(c^H w) = 0 \quad (2.7)$$

ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla J(w_k) = 2E \left[u_i u_i^H \right] w_k - 2E [u_i d_{k,i}^*] = 2Rw_k - 2p \quad (2.8)$$

เมื่อ R คือความสัมพัทธ์เมตริกซ์ของเวกเตอร์ข้อมูล

$$R = E \left[u_i u_i^H \right] \quad (2.9)$$

และ p คือความสัมพัทธ์ระหว่างเวกเตอร์ข้อมูลและสัญญาณที่ต้องการ

$$p = E [u_i d_{k,i}^*] \quad (2.10)$$

กำหนดให้ค่าความลาดของค่าที่ใช้เท่ากับศูนย์ สามารถที่จะแก้ปัญหสำหรับ w_k ซึ่งน้อยที่สุด $J(w_k)$ คือ

$$w_k = R^{-1}p \quad (2.11)$$

การแก้ปัญหสมการที่ 2.10 คือนำน้ำหนักเวกเตอร์ของสายอากาศแถวลำดับที่ดีที่สุดใน MMSE

การแก้ปัญหในสมการที่ 2.11 เป็นวิธีที่ตรงไปตรงมา เทคนิคการปรับตัวจะถูกใช้บ่อยเกี่ยวกับการไล่เข้ามาซ้ำๆ ซึ่งเป็นการปรับปรุงน้ำหนักเวกเตอร์ให้ทันสมัย ($w_{k,i}$) หลังจากคำนวณโดยทั่วไปวิธีการนี้มีความซับซ้อนต่อระดับชั้น ซึ่งน้อยกว่าการแก้ปัญหโดยตรงในสมการที่ 2.11 และสามารถติดตามช่องสัญญาณที่ไม่คงที่

การแก้ปัญหแบบปรับตัวโดยใช้ค่าที่น้อยที่สุดคือ

$$w_{k,i+1} = w_{k,i} - \frac{1}{2} \mu \nabla J(w_{k,i}) \quad (2.12)$$

เมื่อ μ คือ ตัวประกอบรวม ซึ่งควบคุมอัตราการปรับตัว ขั้นตอนของวิธีนี้ดังเช่นในสมการ 2.12 เรียกว่าเทคนิค Stochastic Gradient เพราะว่าใช้ค่าความลาดของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเพื่อปรับน้ำหนักของเวกเตอร์ เอาสมการที่ 2.8 มาแทนในสมการ 2.12 จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} w_{k,i+1} &= w_{k,i} - \mu (Rw_{k,i} - p) \\ &= w_{k,i} - \mu \left(E \left[u_i u_i^H \right] w_{k,i} - E [u_i d_{k,i}^*] \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

ถ้าเอาผลกระทำออกจากสมการที่ 2.13 จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} w_{k,i+1} &= w_{k,i} - \mu u_i \left(u_i^H w_{k,i} - d_{k,i} \right)^* \\ &= w_{k,i} - \mu u_i e_{i,k}^* \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ $e_{i,k} = w_{k,i}^H u_i - d_{k,i}$ เป็นค่าผิดพลาดนับพลันระหว่างแถวลำดับขาออกและผลตอบสนองที่ต้องการ สมการที่ 2.14 เรียกว่าขั้นตอนค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด และเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการปรับตัวแถวลำดับที่ซ้ำ

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันคือการปรับตัวแบบกรอง ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดระหว่างผลขาออกของแถวลำดับและผลการตอบสนองที่สูงกว่า ตัวนำนี้เป็นกำลังสองที่น้อยที่สุด กำหนด P คือ เวกเตอร์ข้อมูล, u_i เป็นตัวรวม สามารถอธิบายค่ากำลังสองที่น้อยที่สุดได้ดังนี้

$$J(w_k) = \left| \sum_{m=0}^{P-1} w_k^H u_m - d_{k,m} \right|^2 \quad (2.15)$$

$$\nabla J(w_k) = 2 \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{P-1} u_m u_n^H w_k - 2 \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{P-1} u_m d_{k,n}^* \quad (2.16)$$

สามารถหาเมตริกซ์ข้อมูลโดย

$$A = [u_0 u_1 \dots u_{P-1}] \quad (2.17)$$

และหาเวกเตอร์สัญญาณ

$$d_k = [d_{k,0} d_{k,1} \dots d_{k,P-1}]^T \quad (2.18)$$

วิธีการแก้หาค่าแรงความลาด LS สู่ศูนย์ คือ

$$w_k = (A^H A)^{-1} A^H d_k \quad (2.19)$$

ปัญหาของ LS และ MMSE คือต้องมีความรู้, การประมาณ, การกรองเกี่ยวกับช่องว่างที่ขาออก สำหรับ LS และ MMSE ต้องมีความรู้การฝึกฝนขั้นต้นอย่างต่อเนื่อง โดยต้องมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องรับและเครื่องส่ง

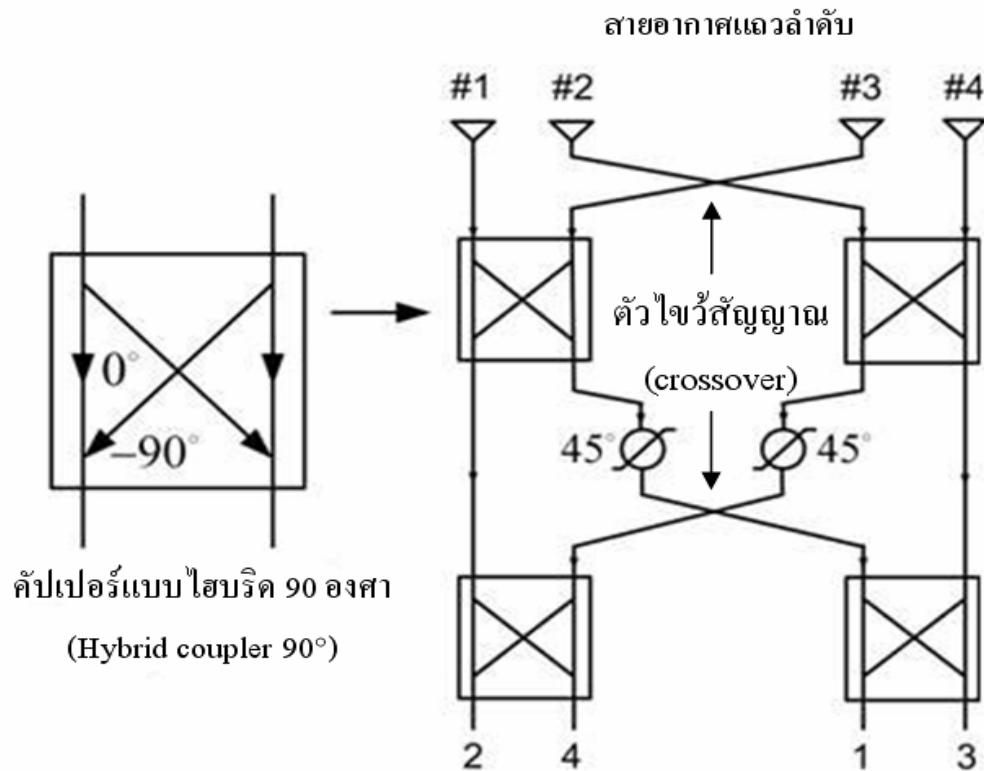
อีกทางเลือกในการฝึกฝนลำดับความต้องการใน MMSE และ LS จะใช้การเรียนรู้การตัดสินใจที่มีทิศทาง ในการตัดสินใจเลือกทิศทางในการปรับตัวจะเลือกสัญญาณตัวอย่างที่ต้องการ ($d_{k,i}$) คือการสร้างฐานบนขาออกของแถวลำดับและการถอดรหัสสัญญาณ ทั้งนี้สัญญาณที่ต้องการคือ การเกิดเฉพาะที่ นอกจากนี้ก่อนอื่นจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับข้อมูลที่ต้องการส่งอย่างไรก็ตามเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นที่การถอดรหัสสัญญาณจะมีการสร้างสัญญาณที่ต้องการและปรับวิธีการในการกะประมาณตัวนำไปยังการแก้ปัญหานี้หากไม่ถูกต้อง นอกจากนี้คุณภาพที่เสื่อมถอยของการถอดรหัสสัญญาณ การรวมกันของลำดับการฝึกฝนสามารถใช้สำหรับการปรับตัวแรกเริ่ม ขอมให้รูปร่างน้ำหนักเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนลดลง หลังจากการปรับตัวตั้งแต่แรกเริ่ม การตัดสินใจเลือกทิศทางสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงทางเวลาในช่องสัญญาณวิทยุ

นอกจากนี้ความกว้างของชั้นวิธีการปรับตัวที่มองไม่เห็น ขอมให้การทำงานไม่มีการฝึกฝนตามลำดับ ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างสัญญาณเกี่ยวกับกระบวนการเวกเตอร์น้ำหนักช่องว่างที่ทันสมัย

ก่อนการดำเนินการจะมีประโยชน์ในการบันทึกความสามารถของโครงสร้างตามรูปที่ 2.2 ในการเทียบน้ำหนักเวกเตอร์ K ถ้าสาขอากาศ M ดันตั้งฉากกับน้ำหนักเวกเตอร์ น้ำหนักเวกเตอร์แต่ละตัวสามารถบอกรูปร่างที่เป็นอิสระหรือทำงานร่วมกัน แต่ถ้าจุดเชื่อมต่อการปรับตัวเกิดการเบี่ยงจะทำให้น้ำหนักเวกเตอร์ไม่เป็นอิสระต่อกัน ใช้วิธีการปรับตัวแบบมองไม่เห็น ในกรณีการจำกัดน้ำหนักเวกเตอร์แต่ละตัว คือการตั้งฉากกับน้ำหนักเวกเตอร์อื่นสำหรับการเกิดสัญญาณในแถวลำดับ [4]

2.3 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

จากหัวข้อที่ 2.2.1 ได้กล่าวถึงโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นของระบบสาขอากาศแก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น (switched beam system) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับวงจร Butler matrix ในการเลือกใช้ลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณมากที่สุด



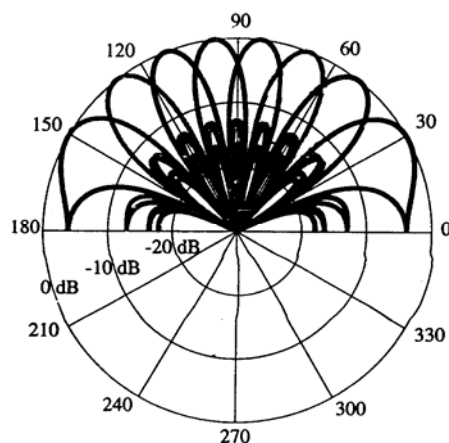
รูปที่ 2.3 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix [5]

จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงเมตริกซ์ 4×4 อย่างง่ายในการก่อรูปลำคลื่น ประกอบไปด้วยตัวไขว้สัญญาณ 2 ตัว, ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา 4 ตัว และสายอากาศโมโนโพลอีก 4 ต้น เมตริกซ์ที่ยึดลำคลื่นนี้จะมีสองทิศทาง นั่นคือแต่ละพอร์ตที่เหมือนกันจะรับรูปแบบลำคลื่นเฉพาะที่สามารถใช้ส่งต่อได้ ซึ่งจะใช้รูปแบบเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสของสายอากาศ, ทิศทางของลำคลื่น และเฟสที่มาจาก Butler Matrix ในรูปที่ 2.3 [6]

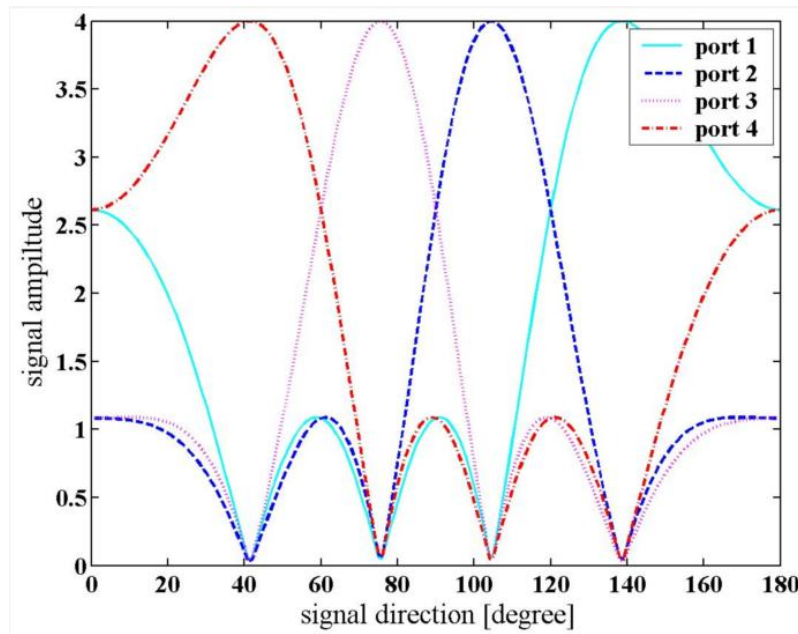
	Element #1	Element #2	Element #3	Element #4	Beam Direction	Inter- Element Phasing
Port 1	-45 °	-180°	45°	-90°	138.6°	-135°
Port 2	0°	-45°	-90°	-135°	104.5°	-45°
Port 3	-135°	-90°	-45°	0°	75.5°	45°
Port 4	-90°	-45°	-180°	-45°	41.4°	135°

ตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงเฟสของสายอากาศแต่ละต้น, ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler matrix ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศต้นที่ 1 จะมีค่าเฟส -45°, 0°, -135°, -90° จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จะมีค่าทิศทางของลำคลื่นเป็น 138.6°, 104.5°, 75.5°, 41.4° จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และมีเฟสที่มาจากแต่ละต้นเป็น -135°, -45°, 45°, 135° จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับเช่นกัน



รูปที่ 2.4 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix [7]

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงการสร้างรูปแบบลำคลื่นโดยใช้วิธีโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะสำหรับการใช้วิธีการโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ใช้ไฮบริดจ์แบบคาตเคส 90 องศา ในวงจรก่อรูปลำคลื่น



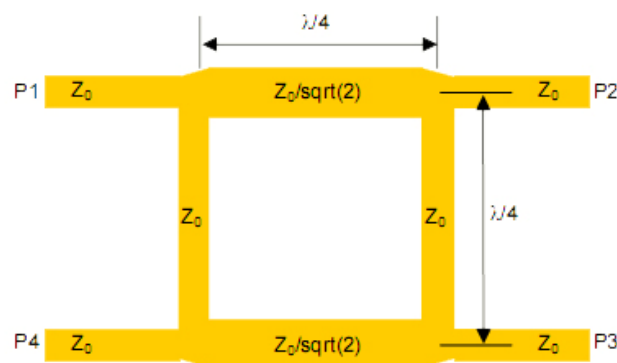
รูปที่ 2.5 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix [8]

จากรูปวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix แบ่งลักษณะการออกแบบของวงจรได้ดังนี้

- 2.3.1 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) 4 ตัว
- 2.3.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) 1 ตัว
- 2.3.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°) 2 ตัว

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

2.3.1 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°)



รูปที่ 2.6 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) [9]

จากการอ้างอิง รูปที่ 2.6 โดยการดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมระหว่าง พอร์ต P2 และ พอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และ พอร์ต P3 จะล่าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกไปที่ พอร์ตที่ P4 (พอร์ต โคดเคียว) ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการ [S] เมตริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.20)

$$[S] = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

จากวงจรและสมการค่า [S] เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

$$P_1 = 0 \quad (\text{พอร์ตเข้าของพลังงาน})$$

$$P_2 = -\frac{j}{\sqrt{2}} \quad (\text{พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 และมีเฟส}$$

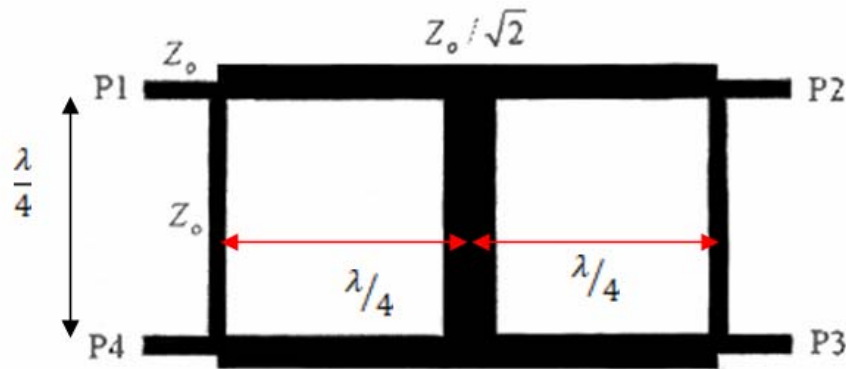
ล่าหลังอยู่ -90 องศาจาก พอร์ต P1 ถึงพอร์ต P2)

$$P_3 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 และมีเฟส}$$

ล่าหลังอยู่ -180 องศาจาก พอร์ต P1 ถึงพอร์ต P3)

$$P_4 = 0 \quad (\text{ไม่มีพลังงานออกจาก พอร์ต P4})$$

2.3.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover)



รูปที่ 2.7 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) [10]

จากรูปที่ 2.7 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) เป็นวงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกันโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความต้านทานระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือ เมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P3 และ เมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P2 ดังนั้น ค่า [S] เมตริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.21)

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

จากวงจรและสมการค่า [S] เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

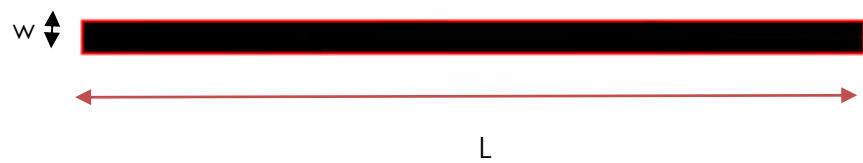
$$P_1 = 0 \quad (\text{พอร์ตเข้าของพลังงาน})$$

$$P_2 = -j \quad (\text{พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P4 และมีเฟสต้านอยู่ 0 องศาจาก พอร์ต P4 ถึงพอร์ต P2})$$

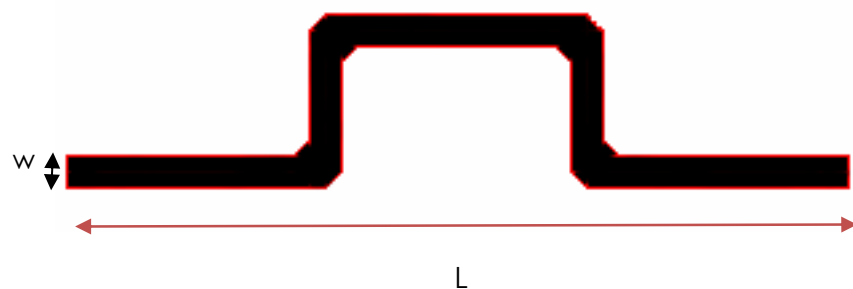
$P_3 = -j$ (พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 และมีเฟสล่าหลังอยู่ 0 องศาจาก พอร์ต P1 ถึงพอร์ต P3)

$P_4 = 0$ (พอร์ตเข้าของพลังงาน)

2.3.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°)



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 2.8 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°)

จากวงจรระยะห่าง 45 องศา สร้างมาจากการออกแบบสายส่ง โดยที่มี W คือความกว้างตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป และมีความยาวเท่ากับ L ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (2.22)$$

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (2.23)$$

โดยที่ $\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.24)$

เมื่อ L คือความยาว

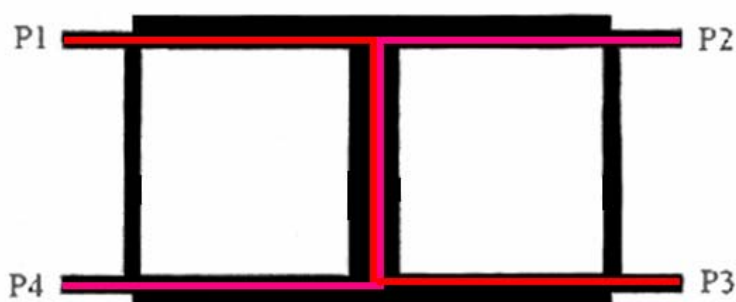
θ คือมุม

λ คือค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของสายส่ง

λ_0 คือค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของอากาศ

W คือความกว้างตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป[11]

จากรูป (ก.) เป็นตัวเลื่อนเฟสที่เป็นเส้นตรงซึ่งมีการเลื่อนเฟส 45 องศาโดยการสร้างรวมในวงจรมานั้น จะเป็นการสร้างโดยการนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 ในการสร้างเฟสด้านล่างและนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 ในการสร้างเฟสด้านบนเพื่อให้มีการเพิ่มเฟสโดยเส้นทางของตัวไขว้สัญญาณดังรูป



รูปที่ 2.9 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

(ก) โดยสีแดงเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

(ข) โดยสีชมพูเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2

ดังนั้นค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 มีความยาว เท่ากับความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 รวมกับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา มีค่าเท่ากันกับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

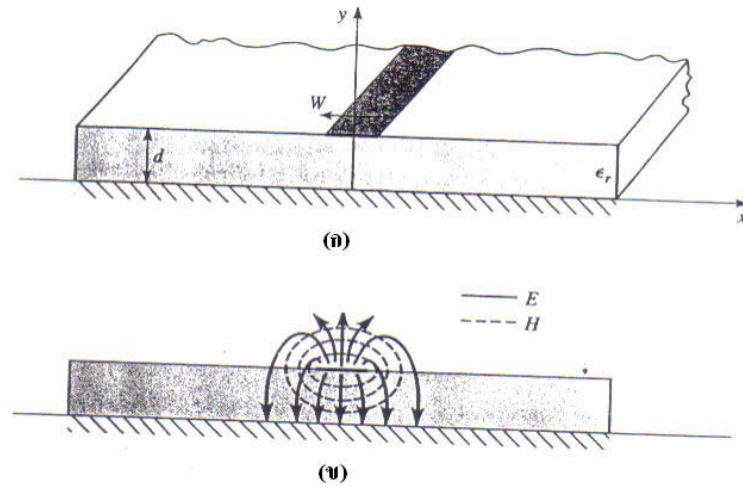
ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่าย มีค่าเท่ากับ 95.49 มิลลิเมตร เนื่องจากมีความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงมีการคดงอขึ้นโดยการคดงอนั้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่าย ลบออกจาก ค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้วค่าที่เหลือให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงามโดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ ดังรูปที่ 2.9 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้

ซึ่งวิธีเลื่อนเฟสนี้เป็นการทำให้ก่อรูปลำคลื่นได้ตามทิศทางที่ต้องการภายในโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ซึ่งจากรูปที่ 2.3 นั้นมีการนำตัวเลื่อนเฟส 45 องศา อยู่ระหว่างพอร์ต 1 กับ พอร์ต #3 และอยู่ระหว่างพอร์ต 4 กับ พอร์ต #2 เพื่อทำให้เกิดการก่อรูปลำคลื่นเลื่อนเฟสไป 45 องศา และเมื่อรวมทั้งวงจรแล้วจะทำให้ได้ค่าดังตารางที่ 2.1 จะได้การก่อรูปลำคลื่นดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 เพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีของสายอากาศเก่ง

2.4 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

ไมโครสตริปที่เป็นที่นิยมกันมาก คือชนิดที่เป็นสายส่งแบบแบน เพราะสามารถสร้างเป็นระบบรูปภาพ และง่ายที่จะรวมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟอื่นๆ ตัวควบคุมไมโครสตริปได้แก่ ความกว้าง (W), ความหนาของฐาน (d), อัตราความจุกระแสไฟฟ้า (ϵ_r) ถ้าสายเป็นแบบ two-wire line จะประกอบด้วย ตัวนำราบเรียบ 2 แผ่น จะมีความกว้าง (W) จะแบ่งเป็นระยะทาง $2d$ ในกรณีนี้สามารถใช้ $V_p = c$ และ $\beta = k_0$

ถ้าเป็นฉนวน และฉนวนไม่อยู่ในอากาศเหนือแผ่น ($y > d$) จะทำให้มีความยากลำบากในการวิเคราะห์ไมโครสตริป ซึ่งจะแตกต่างจากสตริป เมื่อภายในบรรจุด้วยฉนวน ไมโครสตริปจะเป็นเส้นในบริเวณฉนวน ซึ่งจะจับกลุ่มกันระหว่างแผ่นตัวนำและระนาบพื้น จะมีส่วนบริสุทธิ์ของคลื่นแบบ TEM ความเร็วเฟสของ TEM ในบริเวณฉนวน จะมีค่าเป็น $c/\sqrt{\epsilon_r}$ แต่ความเร็วเฟสของ TEM ในบริเวณอากาศจะมีค่าเป็น c [12]



รูปที่ 2.10 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป [13]

ความเร็วเฟสและค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.25)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (2.26)$$

เมื่อ ϵ_e เป็นค่าคงที่ฉนวนของไมโครสตริป

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{(1 + 12d/W)}} \quad (2.27)$$

ขนาดของไมโครสตริปและค่าความต้านทานภายในสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]} \end{cases} \quad \text{เมื่อ } W/d \geq 1 \quad (2.28)$$

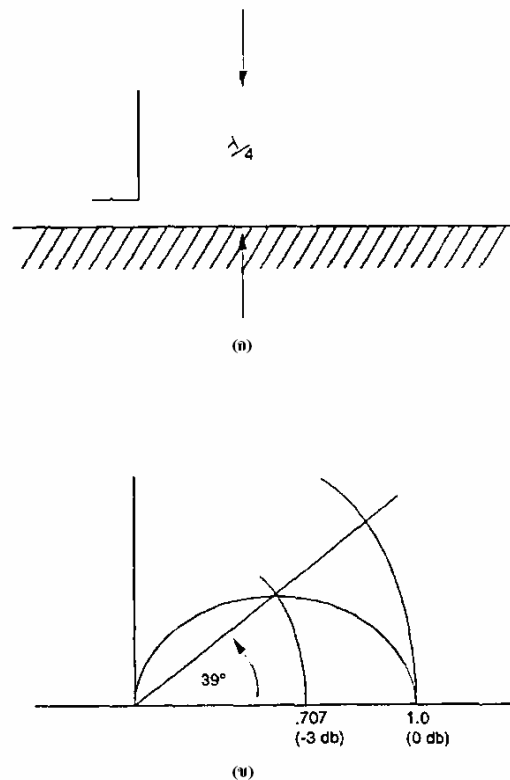
$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{เมื่อ } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{เมื่อ } W/d > 2 \end{cases} \quad (2.29)$$

$$\text{เมื่อ } A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

2.5 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna)

รูปที่ 2.11 แสดงสายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความยาว 1 ใน 4 ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) ที่คิดจากความถี่ที่ต้องการ วางอยู่บนแผ่นตัวนำสมบูรณ์ซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$)



รูปที่ 2.11 สายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$ ที่วางอยู่บนแผ่นตัวนำสมบูรณ์

(ก) ลักษณะทางกายภาพ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

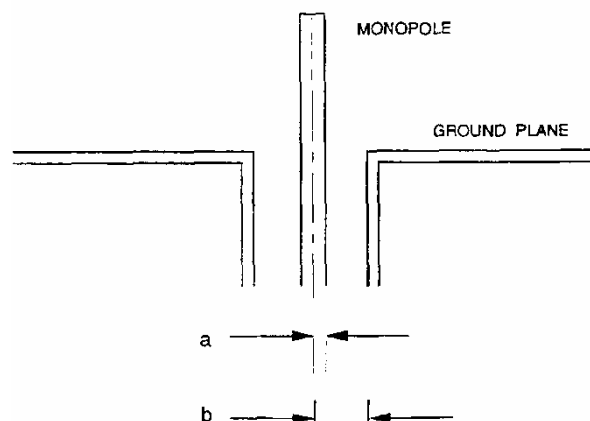
การที่การแจกแจงของกระแสไฟฟ้าในสายอากาศโมโนโพลมีลักษณะเหมือนกับสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ ดังนั้นกำลังงานที่แผ่กระจาย ออกไปจึงมีลักษณะเหมือนกับของสายอากาศไดโพลด้วย แต่เนื่องจากแผ่นระนาบกราวด์ได้ตัดผ่านจุดกึ่งกลางของแบบรูปการกระจายกำลังงาน ความกว้าง ลำคลื่นจึงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของไดโพล ดังนั้นค่าสภาพจะจกทิศทางและค่าอัตราขยาย จึงมีค่าเป็น สองเท่าของสายอากาศไดโพล

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$ ซึ่งอยู่ที่ผิวของแผ่นระนาบ กราวด์จะมีรูปร่างเหมือนกับของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ ที่มุมเหนือจากศูนย์กลางขึ้นไป แบบ รูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้จากทฤษฎีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 (ข) ซึ่งหาได้จากสมการ (2.30) ซึ่งเป็นของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$

$$F(\theta)_{\lambda/4 \text{ monopole}} = \frac{1}{2} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}, \quad \theta > 0 \quad (2.30)$$

2.5.1 สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน

สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน ที่ใช้ในการปฏิบัติการได้แสดงไว้ รูปที่ 2.12 ซึ่งจะมีการ ป้อนสัญญาณโดยผ่านสายโคแอกเซียล 50Ω ผ่านช่องของแผ่นระนาบกราวด์ขนาดใหญ่เข้าไปที่ ขั้วอินพุตของสายอากาศโมโนโพล



รูปที่ 2.12 สายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยสายโคแอกเซียลและระนาบกราวด์

แผ่นระนาบกราวด์ คือ ส่วนที่จำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศโมโนโพล ในทางอุดมคตินั้นจะต้องมีขนาดเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติจะกำหนดให้มีรัศมีเท่ากับ 5λ ก็เพียงพอที่จะให้เกิดเงื่อนไขใกล้เคียงกับขนาดในอุดมคติได้ หรือจะใช้ขนาดที่ต่ำที่สุดซึ่งจะให้เงื่อนไขใกล้เคียงอุดมคติได้เช่นกัน ก็คือที่ 0.5λ ซึ่งสายอากาศโมโนโพลที่ใช้ในปฏิบัติการ จะใช้แผ่นระนาบกราวด์ที่มีขนาดดังกล่าวนี้

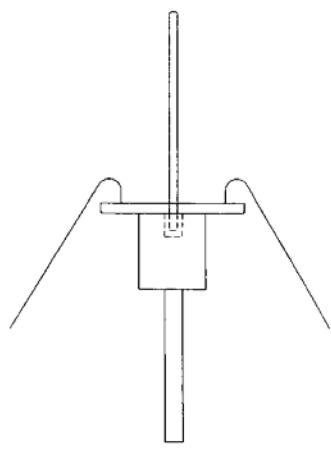
สายเคเบิลที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณให้กับตัวสายอากาศจะเป็นสายโคแอกเชียลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega$ ซึ่งจะต้องมีการแปลงค่าอิมพีแดนซ์นี้ให้ลดลงไปอยู่ที่ $37.5\ \Omega$ เพื่อให้เกิดการแมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพล ในกรณีนี้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จะเปลี่ยนไปจะเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่อยู่ตรงกลางกับระยะห่าง b ระหว่างตัวนำตรงกลางกับขอบของช่องวงกลมในแผ่นระนาบกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์นี้ ได้แสดงไว้ในสมการ (2.31)

$$Z_0 = 60 \log \left(\frac{b}{a} \right) \quad (2.31)$$

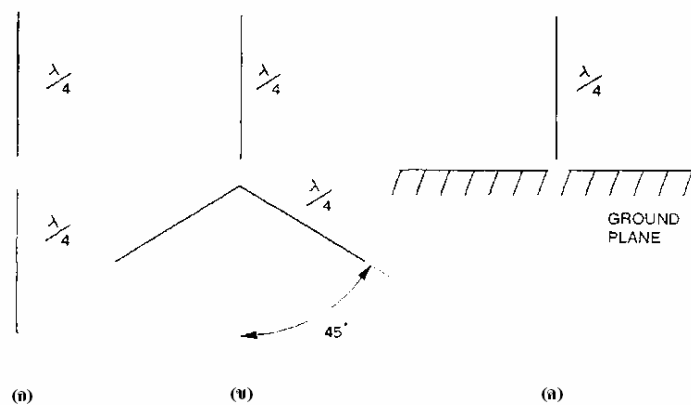
เมื่อ $a = 0.159$ ซม. และ $b = 0.317$ ซม. อิมพีแดนซ์ที่ได้จะเท่ากับ $41.5\ \Omega$ ซึ่งเป็นค่าตรงกลางระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียลและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพล $37.5\ \Omega$

2.5.2 สายอากาศโมโนโพลแบบครูป้าง (Drooping Monopole)

นอกจากสายอากาศโมโนโพลแบบมาตรฐานแล้ว ในระบบของสายอากาศชนิดเดียวกันนี้ ยังมีสายอากาศที่ เรียกว่า สายอากาศโมโนโพลแบบครูป้างด้วย หรืออาจจะเรียกว่าสายอากาศแบบระนาบกราวด์ (Ground Plane Antenna) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการสร้างสายอากาศโมโนโพลให้มีความง่ายยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.13 สายอากาศโมโนโพลแบบครูป้าง (Drooping Monopole)



รูปที่ 2.14 (ก) สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น
(ข) สายอากาศโมโนโพลครูป้าง
(ค) สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน

เพื่ออธิบายคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลครูป้าง ให้พิจารณาลักษณะของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 73Ω ในรูปที่ 2.14(ก) ถ้าเราจัดเส้นลวดที่อยู่ด้านล่างของตัวไดโพลให้แยกออกจากกัน โดยให้ทางออกไป 180 องศา ดังรูปที่ 2.14(ค) เราก็จะได้สายอากาศโมโนโพลแบบมาตรฐานที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์ 37.5Ω แต่เมื่อปรับมุมของลวดลงมาด้านละ 45 องศา (ลวดทั้งสองจะทำมุมซึ่งกันและกัน 90 องศา) ดังรูปที่ 2.14(ข) จะทำให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียง 50Ω เราเรียกรูปแบบของสายอากาศแบบนี้ว่า สายอากาศโมโนโพลแบบครูป้าง ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแมตช์กับค่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายโคแอกเซียล

2.6 ทฤษฎีแถวลำดับของสายอากาศ (Antenna Arrays)

แถวลำดับของสายอากาศ หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลายๆ ตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จะให้สมรรถนะ คล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นจะสามารถจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆ อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่เทอะทะของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะเหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้ การเปลี่ยนเฟสอย่างต่อเนื่องของสายอากาศเมื่อเทียบกับเวลาจะทำให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นออกไปในทิศทางต่างๆ ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกแถวลำดับแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบปรับเฟส (phased array)

แถวลำดับแบบปรับเฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายๆ ประเภท โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้ในงานระบบเรดาร์ การปรับเฟสของแถวลำดับจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกระดับหนึ่ง เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทางการแผ่กระจายกำลังงานสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

เราสามารถแบ่งการจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่าง ได้หลายประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (planar array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้ อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่ เมื่อพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงแถวลำดับมีลักษณะไม่แบนราบ เช่น ที่ส่วนหัวของจรวดหรือเครื่องบิน การจัดเรียงแถวลำดับก็ต้องมีรูปร่างเป็นไปตามลักษณะของพื้นที่ดังกล่าวด้วย แถวลำดับแบบนี้จะถูกเรียกว่า แถวลำดับแบบคงรูป (conformal array)

ถ้าทิศทางของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดมีทิศทางตั้งฉากหรือเกือบจะตั้งฉากกับเส้นหรือระนาบของแถวลำดับ แถวลำดับแบบนี้จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบบรอดไซด์

(broadside array) แต่ถ้าทิศทางการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดมีทิศทางที่ขนานกับระนาบของแถวลำดับ จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (end-fire array)

2.6.1 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor)

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่แตกต่างกันบางตัวประกอบ ได้แก่ ชนิดขององค์ประกอบที่ใช้และการวางตัวขององค์ประกอบในแถวลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นส่วนเฉพาะขององค์ประกอบ ดังนั้นจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบเท่านั้น ตัวประกอบตัวอื่นๆ จะเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแถวลำดับนั้นคือ จำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ตำแหน่งขององค์ประกอบ รวมทั้งขนาดแอมพลิจูดและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบนั้นๆ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาในทางทฤษฎีของแถวลำดับที่กำหนดในเบื้องต้น เราจะไม่พิจารณาผลของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากต้องการพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของแถวลำดับเท่านั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณาให้แต่ละองค์ประกอบที่นำมาทำเป็นแถวลำดับเป็นตัวแทนแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) ที่เป็นมีลักษณะจุด ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุดแบบไอโซทรอปิก จะเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (array factor) ของแถวลำดับภายใต้การวิเคราะห์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบแถวลำดับซึ่งมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน สามารถทำได้เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลักษณะของแถวลำดับเท่านั้น

เมื่อหาค่าตัวประกอบแถวลำดับได้แล้ว ต่อไปจะพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบ จากนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดของแถวลำดับจะสามารถหาได้ โดยใช้หลักการคูณแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (pattern multiplication) ซึ่งเป็นการคูณกันระหว่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแถวลำดับ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราพิจารณาสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นซึ่งประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ $\lambda/2$ และมีการแผ่กระจายกำลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดจะเท่ากับ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลัง งานของสายอากาศแบบร่อง บนท่อนำคลื่นที่ ประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง	=	แบบรูปการแผ่ กระจายกำลังงาน ของแต่ละ องค์ประกอบ	×	ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 6 องค์ประกอบที่วางห่างกัน $\lambda/2$ และ มีการแผ่กระจายกำลังงานที่มีขนาด และเฟสเท่ากัน
--	---	--	---	--

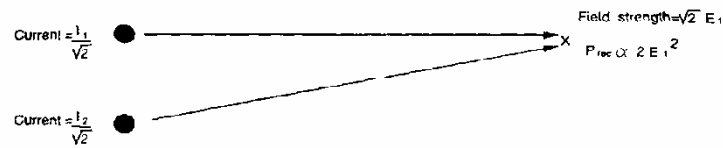
ตัวประกอบแถวลำดับในกรณีนี้จะเป็นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ ไอโซทรอปิก 6 ตัว ซึ่งวางห่างกัน $\lambda/2$ และแผ่กระจายคลื่นด้วยขนาดและเฟสเท่ากัน

2.6.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ (Gain of Array Antennas)

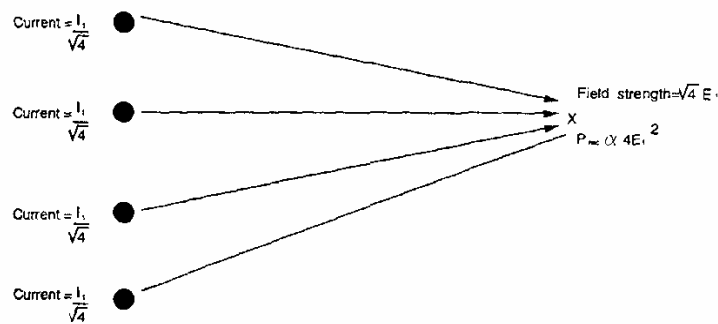
ค่าสภาพจะจกทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพจะจกทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับจุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากทิศทางอื่นๆ

เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยวของสายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไปกำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะสร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E_1 ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ

รูปที่ 2.15 สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_1



รูปที่ 2.16 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1



รูปที่ 2.17 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนาม ทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = E_1^2 \quad (2.32)$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแถวลำดับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมด คือ P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $P_1/2$ แต่เนื่องจากค่าของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของกำลังงาน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจึงเท่ากับ $I_1/\sqrt{2}$

ความเข้มของสนามที่จุด X ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบนั้น ดังนั้นความเข้มของสนามที่จุด X จากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $E_1/\sqrt{2}$ และถ้าคลื่นจากทั้งสององค์ประกอบมาถึงที่จุด X โดยมีเฟสตรงกันอย่างสมบูรณ์ ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่จุด X จะเป็นผลรวมของความเข้มของสนามดังนี้

$$E_T = \frac{2E_1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}E_1 \quad (2.33)$$

กำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{2}E_1)^2 = 2E_1^2 \quad (2.34)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสมการ (2.32) และสมการ (2.33) จะเห็นว่ากำลังสองของค่าความเข้มของสนามทั้งหมด (E_T^2) ที่จุด X จะมีค่าเป็นสองเท่า ด้วยเหตุผลนี้สามารถแสดงได้ว่ากำลังงานที่รับได้ที่จุด X ก็จะมีค่าเป็นสองเท่า ดังนั้นเมื่อใช้แถวลำดับที่มีองค์ประกอบสององค์ประกอบ แทนองค์ประกอบเดียวจะทำให้ได้ค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานมีค่าเป็นสองเท่า

สมมติว่าเราเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นสองเท่าดังแสดงในรูปที่ 2.17 ก็จะได้แถวลำดับที่มีขนาด 4 องค์ประกอบ ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดเป็น P_1 กระแสในแต่ละองค์ประกอบจะมีค่าเป็น $I_1/\sqrt{4}$ ดังนั้นความเข้มของสนามที่ถูกสร้างขึ้นจากแต่ละองค์ประกอบที่จุด X จึงกลายเป็น $E_1/\sqrt{4}$

ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่เกิดจากแถวลำดับซึ่งประกอบด้วย 4 องค์ประกอบจะเท่ากับ

$$E_T = \frac{4E_1}{\sqrt{4}} = \sqrt{4}E_1 \quad (2.35)$$

และกำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะมีค่าเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{4}E_1)^2 = 4E_1^2 \quad (2.36)$$

ดังนั้นค่าของ E_T^2 และค่ากำลังงานที่รับได้ทั้งหมดก็จึงมีค่าเป็นสองเท่า
ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของสายอากาศทุกตัวจะต้องมีลักษณะเหมือนกันและมีกระแสเท่ากัน
2. สนามที่แผ่กระจายออกจากองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมดจะต้องมีเฟสตรงกันที่จุดรับ
3. กระแสที่เหนี่ยวนำในแต่ละองค์ประกอบจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

เงื่อนไขที่สองจะเป็นจริงได้ถ้าเฟสของกระแสแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และจุดสังเกต X ซี่ไปในทิศทางที่ตั้งฉากโดยตรงกับสายอากาศแถวลำดับ และให้สมมุติว่าที่สนามระยะไกลซึ่งมีระยะห่างจากจุด X ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน ส่วนเงื่อนไขที่สามจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นสำคัญ สำหรับสายอากาศแถวลำดับในทางปฏิบัติ เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น แม้ว่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณและจากตัวประกอบอื่นๆ จะมีส่วนในการจำกัดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยาย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าค่าอัตราขยายของแถวลำดับจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB) ทุกๆ ครั้งที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบถูกกำหนดไว้ให้คงที่[14]

2.8 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ปัจจุบันเทคโนโลยีเครือข่าย LAN (Local Area Network) แบบไร้สาย หรือ WLAN (Wireless Local Area Network) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากประโยชน์ของ WLAN มีอยู่มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง WLAN สร้างความสะดวก และอิสระในการใช้งานและติดตั้งเครือข่าย เทคโนโลยี WLAN ทำให้การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในบ้านหรือสำนักงานเข้าด้วยกัน หรือต่อเข้ากับเครือข่ายไม่จำเป็นจะต้องใช้สายนำสัญญาณให้ยุ่งยากและดูเกะกะอีกต่อไป อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั้งแบบตั้งโต๊ะและพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายจากตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ในระยะของสัญญาณได้อย่างอิสระ เทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ผ่านสื่อไร้สายที่รู้จักกันมีอยู่หลายเทคโนโลยีเช่น [Bluetooth](#) , [IEEE 802.11](#), [IrDA](#) , [HiperLAN](#), [HomeRF](#), และ [GPRS](#) เป็นต้น แต่เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับ WLAN คือเทคโนโลยีตามมาตรฐาน IEEE 802.11 เนื่องจากอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN มีราคาไม่แพงนักและถูกลงเรื่อยๆ อีกทั้งมีสมรรถนะในการรับส่งข้อมูลค่อนข้างสูง ง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน IEEE 802.11 WLAN ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ และมีแนวโน้มว่าในอนาคตอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่างๆ จะมีอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ติดตั้งจากโรงงานหรือ Built-in มาด้วย มาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปีพ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ WLAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนด (Specification) สำหรับอุปกรณ์ WLAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของ PHY Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 และ 5 GHz, และ อินฟราเรด (Infrared) (1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่าย LAN แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) และการตรวจสอบผู้ใช้ (Authentication) ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) ด้วย

2.7.1 วิวัฒนาการของมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2540 ซึ่งอุปกรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าวจะมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 และ 2 Mbps ด้วยสื่อ อินฟราเรด (Infrared) หรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz และมีกลไก WEP ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย WLAN ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงาน (Task Group) ขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g, และ IEEE 802.11i

- **IEEE 802.11b**

คณะทำงานชุด IEEE 802.11b ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz (เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น IEEE 802.11, Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สาย, และเตาไมโครเวฟ) ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b นี้และใช้เครื่องหมายการค้าที่รู้จักกันในนาม Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่นๆที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้

- **IEEE 802.11a**

คณะกรรมการชุด IEEE 802.11a ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ที่มีขนาดประมาณ 100 เมตร สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b WLAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b WLAN มาก

- **IEEE 802.11g**

คณะกรรมการชุด IEEE 802.11g ได้ใช้นำเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้ (backward-compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด ตามแผนการแล้วมาตรฐาน IEEE 802.11g จะได้รับการตีพิมพ์ประมาณช่วงกลางปี พ.ศ. 2546

- **IEEE 802.11e**

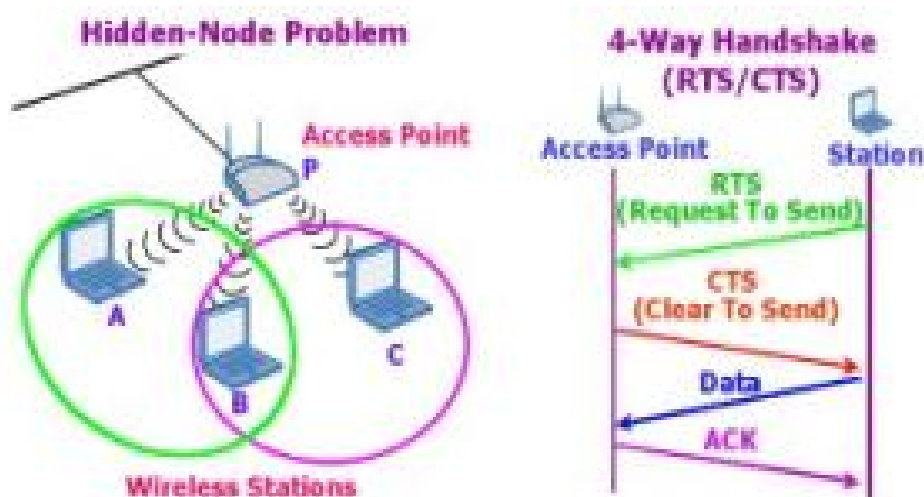
คณะกรรมการชุดนี้ได้รับมอบหมายให้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ Quality of Service สำหรับ application เกี่ยวกับมัลติมีเดีย (Multimedia) เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถ

นำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้ แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของคณะทำงานชุดนี้ยังไม่แล้วเสร็จในขณะนี้ (พฤษภาคม พ.ศ. 2546)

- **IEEE 802.11i**

คณะทำงานชุดนี้ได้รับมอบหมายให้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN มีช่องโหว่อยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) ด้วย key ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คณะทำงานชุด IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้ แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของคณะทำงานชุดนี้ยังไม่แล้วเสร็จในขณะนี้ (พฤษภาคม พ.ศ. 2546) [13]

ซึ่งในประเทศไทยได้กำหนดให้ใช้มาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g



รูปที่ 2.18 แสดงการทำงานของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) [15]

2.7.2 ระยะทางการเชื่อมต่อของระบบ Wireless LAN

ภายในอาคาร

ระยะ 5 เมตร ได้ความเร็วประมาณ 11 Mbps

ระยะ 80 เมตร ได้ความเร็วประมาณ 5.5 Mbps

ระยะ 120เมตร ได้ความเร็วประมาณ 2 Mbps
 ระยะ 150เมตร ได้ความเร็วประมาณ 1 Mbps
 ภายนอกอาคาร
 ระยะ 250เมตร ได้ความเร็วประมาณ 11 Mbps
 ระยะ 350เมตร ได้ความเร็วประมาณ 5.5 Mbps
 ระยะ 400เมตร ได้ความเร็วประมาณ 2 Mbps
 ระยะ 500เมตร ได้ความเร็วประมาณ 1 Mbps[16]

2.8 สรุป

โดยสรุปแล้วสายอากาศเก่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ สายอากาศเก่งและส่วนที่เป็นระบบ
 ก่อรูปลำคลื่นให้เหมาะสม สายอากาศเก่งจะมีลักษณะพื้นฐานอยู่ 2 ชนิด คือ 1.สายอากาศเก่งชนิด
 สวิตซ์ลำคลื่น (switched beam systems) 2.สายอากาศเก่งชนิดปรับตัวได้ (adaptive antenna
 systems) ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกใช้สายอากาศเก่งชนิดสวิตซ์ลำคลื่น (switched beam systems)
 ซึ่ง ประกอบด้วย วงจร Butler matrix และสายอากาศโมโนโพลแถวลำดับ 4 ตัว และภายในวงจร
 Butler matrix ประกอบด้วยคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) จำนวน 4 ตัว, ตัว
 ขั้วสัญญาณ (crossover) จำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส (phase shifters) จำนวน 2 ตัว

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

3.1 บทนำ

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้ได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) ร่วมกับวงจรกลุ่มล่าคลื่นแบบ Butler matrix นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบในแต่ละส่วน โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนวงจรกลุ่มล่าคลื่นแบบ Butler matrix และ ส่วนสายอากาศแถวลำดับ โดยภายในแบบ Butler matrix นั้นจะประกอบไปด้วยตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) 4 ตัว, ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) 1 ตัว และ ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°) 2 ตัว ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวจะออกแบบเป็นสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยใช้วัสดุชนิดแผ่นปรินต์สองหน้า FR4 ที่หาได้ทั่วไปในประเทศไทย และการออกแบบและสร้างสายอากาศแถวลำดับนั้นประกอบไปด้วยสายอากาศชนิดโมโนโพล 4 ต้นมาเรียงต่อกันตามทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับโดยสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศ จากบริษัท ASUS โดยมีการเชื่อมต่อชนิด R-SMA มีอัตราขยาย 5 dBi อยู่ในช่วง

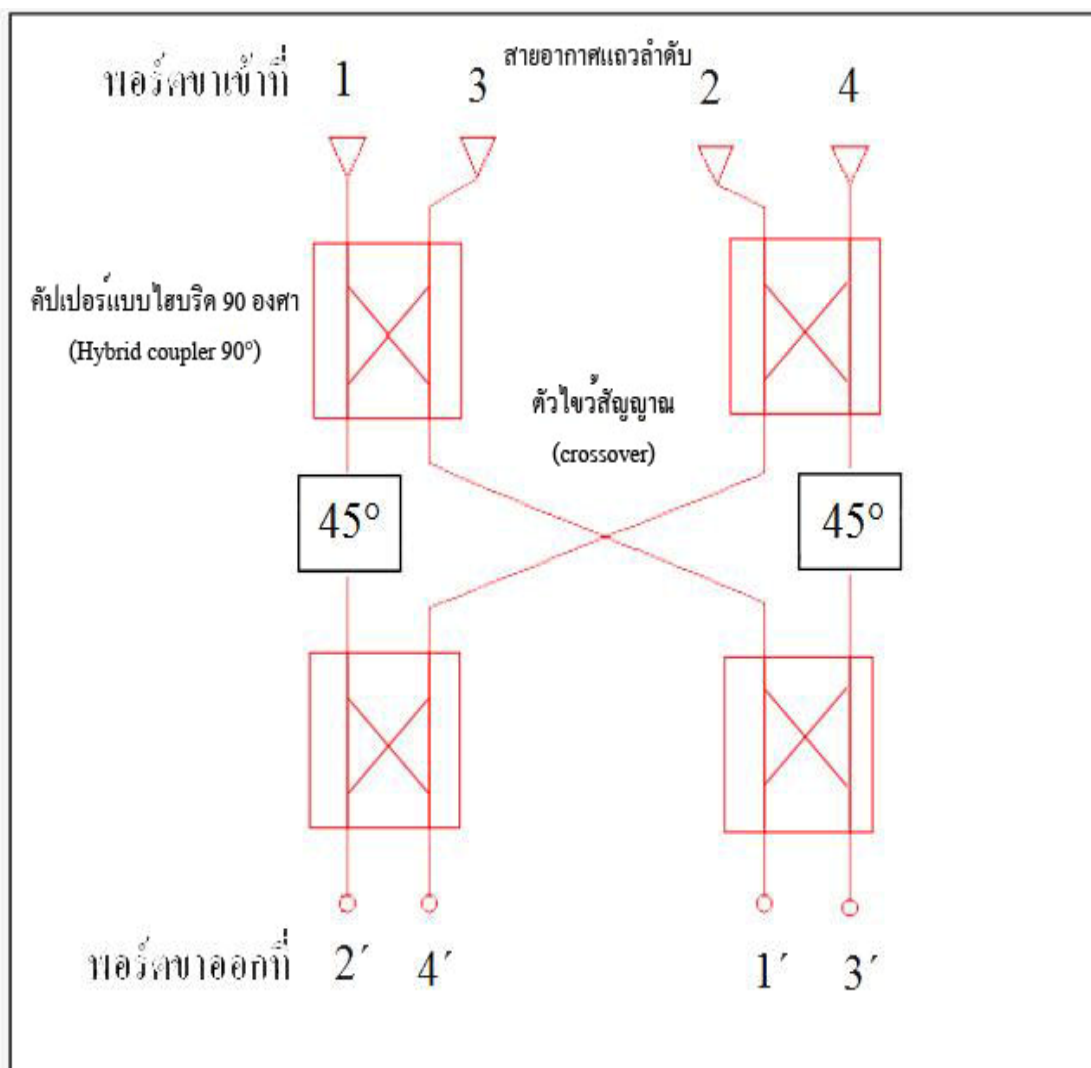
ความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz และเป็นสายอากาศชนิดรอบตัว ซึ่งจะทำให้การคำนวณออกแบบและสร้างขึ้นมาทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ

3.2 ภาพรวมของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

อุปกรณ์ต้นแบบนี้จะประกอบไปด้วยวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix และสายอากาศแถวลำดับ จากทฤษฎีของวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับ 4 ต้น สามารถออกแบบลักษณะของอุปกรณ์ต้นแบบได้ดังรูปที่ 3.1 (ข) พบว่าภายในอุปกรณ์ต้นแบบลักษณะการออกแบบเป็น 4 ส่วนคือ

1. ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) 4 ตัว
2. ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) 1 ตัว
3. ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°) 2 ตัว
4. สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) 1 ตัว

โดยเราจะทำการคำนวณการออกแบบและสร้างเพื่อทดสอบภายในห้องปฏิบัติการที่ละส่วน โดยการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการนั้นเราจะใช้อุปกรณ์ในการทดสอบและผลการทดสอบด้วยเครื่องมือวัด โดยการวัดค่าการทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆจะใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8722D ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ค่าการทดสอบเป็นไปตามทฤษฎีเปรียบเทียบได้ดังรูป 3.1 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.1(ก) แสดงภาพรวมของอุปกรณ์ต้นแบบที่ออกแบบตามทฤษฎี



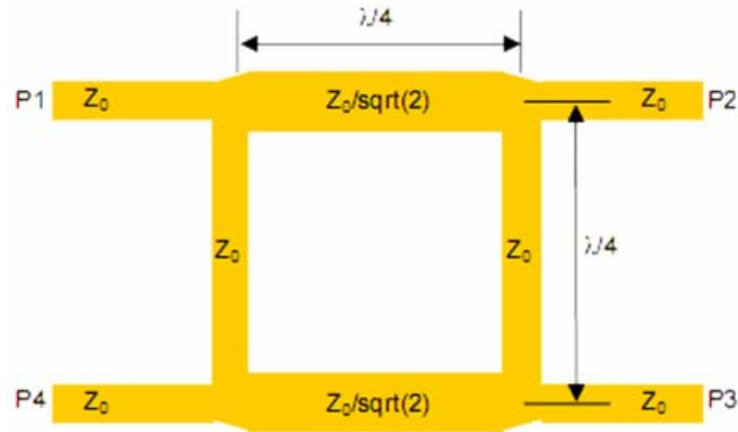
รูปที่ 3.1(ข) แสดงภาพรวมของอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างตามที่ออกแบบจากทฤษฎี

3.3 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น

สำหรับวงจรเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ชนิด คือ คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (hybrid coupler 90°), ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) และตัวเลื่อนเฟส (phase shifter) ซึ่งจะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

3.3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (hybrid coupler 90°)

คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา จะทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมระหว่างพอร์ต P2 และพอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และ P3 จะล่าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ตที่ P4 (พอร์ตโดดเดี่ยว)



รูปที่ 3.2 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากรูปได้ดังต่อไปนี้

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{เมื่อ } W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]} & \text{เมื่อ } W/d \geq 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{เมื่อ } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{เมื่อ } W/d > 2 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.3)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (3.5)$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.6)$$

$$l = \frac{90^\circ \left(\pi/180^\circ \right)}{\sqrt{\varepsilon_e} k_0} \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}} \times \frac{1}{f} \quad (3.8)$$

กำหนดค่า $Z_0 = 50\Omega$

$$Z_0/\sqrt{2} = 35.355\Omega$$

$$\varepsilon_r = 4.8$$

$$f = 2.4GHz$$

$$d = 1.67 \text{ mm.}$$

$$c = 3 \times 10^8$$

ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการดังกล่าวจะได้ดังต่อไปนี้

-ที่ Z_0 $A = 1.584$ สามารถนำไปใช้ได้ตามสมการที่ 3.2

$$W = 2.992 \text{ mm.}$$

$$- \text{ที่ } \frac{Z_0}{\sqrt{2}}$$

$$A = 1.169$$

$$W/d = 3.0799 > 2 \quad \text{ไม่สามารถใช้ได้ตามเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2}$$

$$B = 7.645$$

$$W/d = 3.0807 \quad \text{สามารถใช้ได้ตามเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2}$$

$$\therefore W = 5.144 \text{ mm.}$$

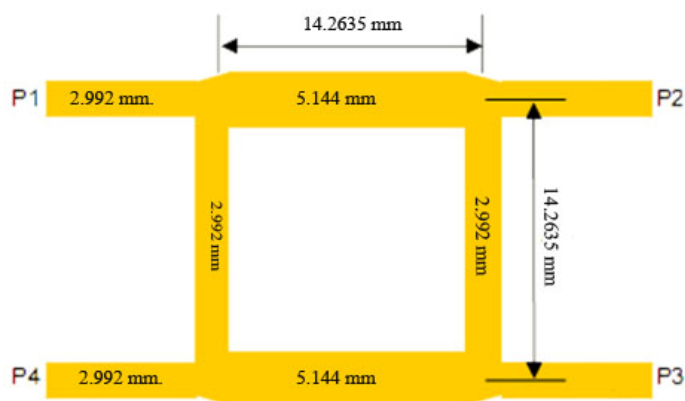
$$\varepsilon_e = 3.758$$

$$k_0 = 50.265 \text{ m}^{-1}$$

$$l = 16.12 \text{ mm.}$$

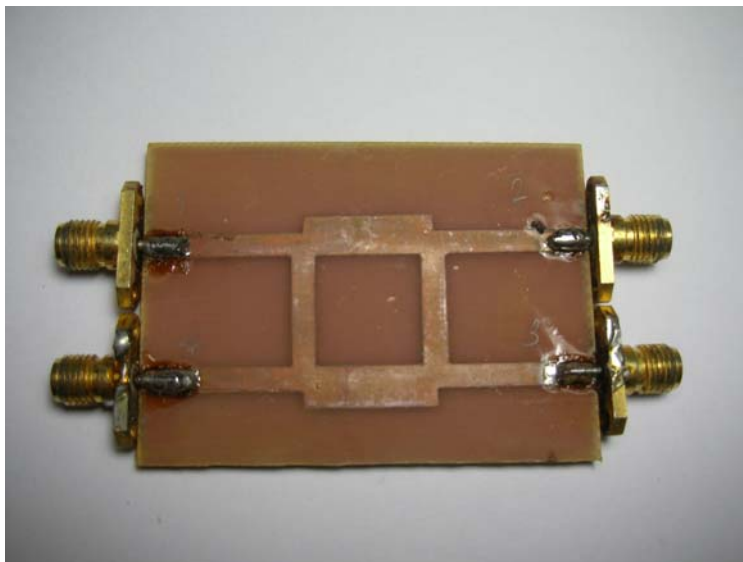
$$\therefore \lambda/4 = 14.2635 \text{ mm.}$$

ผลการคำนวณออกแบบของคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา



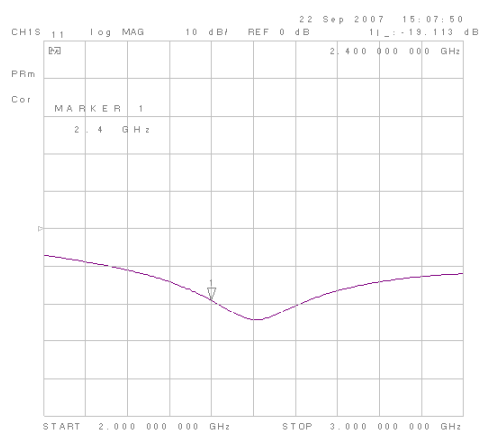
รูปที่ 3.3 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาที่ออกแบบเสร็จ

ผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ

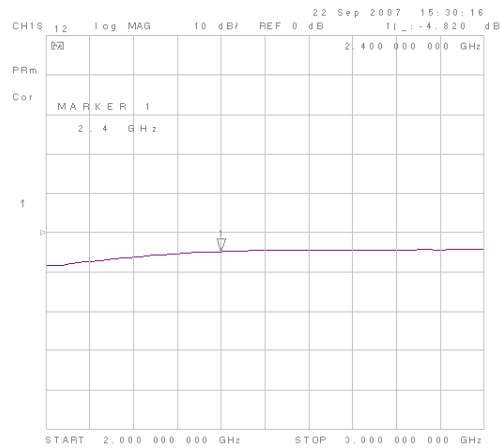


รูปที่ 3.4 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาที่สร้างจากที่ออกแบบเสร็จ

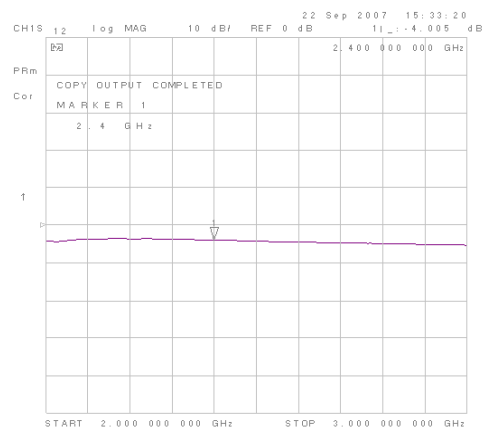
ซึ่งผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) ค่าของพลังงาน ได้ดังรูปที่ 3.5, 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.5 วัดค่าพลังงานของพอร์ตขาเข้าของพลังงาน (S_{11}) มีค่าเท่ากับ -19.113 dB

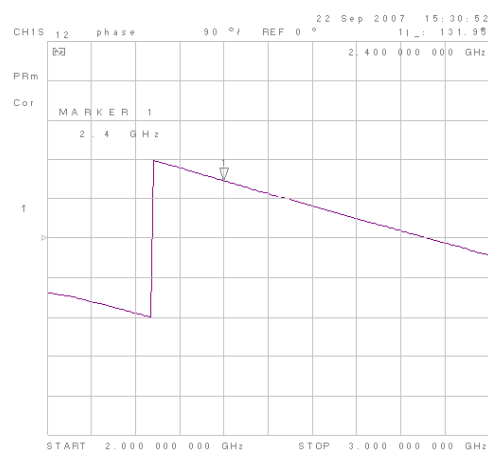


รูปที่ 3.6 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต์ P1 กับพอร์ต์ P2 (S_{12}) มีค่าเท่ากับ - 4.82 dB

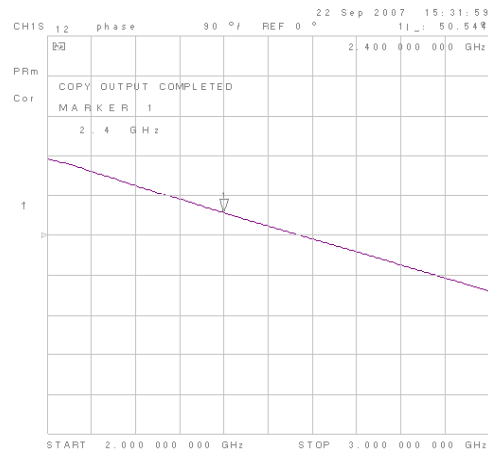


รูปที่ 3.7 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต์ P1 กับพอร์ต์ P3 (S_{13}) มีค่าเท่ากับ - 4.005 dB

ผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการค่าเปลี่ยนแปลงเฟสได้ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต์ P1 กับพอร์ต์ P2 (S_{12}) มีค่าเท่ากับ 131.96 องศา

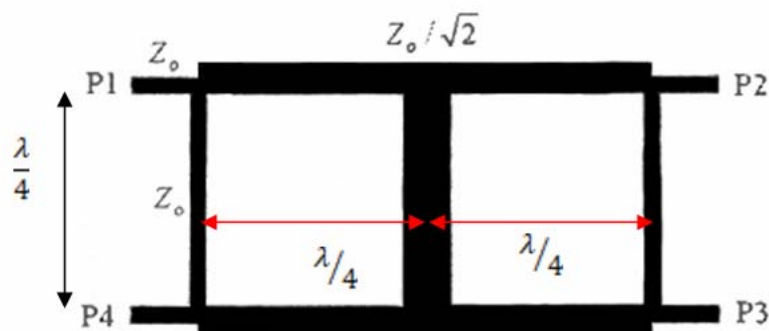


รูปที่ 3.9 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 (S_{13}) มีค่าเท่ากับ 50.544 องศา

จากค่าที่ทำการทดสอบเมื่อเราสังเกตที่ค่า S_{11} ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 ในส่วนของ S_{12} และ S_{13} นั้น ตามทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า พอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณควรมีค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์มากที่สุดและมีค่าพลังงานที่ลดลงจากพลังงานที่เข้ามา 3 dB ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบของวงจรคัปเลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาของเรานั้นก็ถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.3.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover)

ตัวไขว้สัญญาณเป็นวงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกันโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล่าช้าระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P3 และเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P2 ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวไขว้สัญญาณ

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าตัวไขว้สัญญาณจะมีรูปร่างคล้ายกับตัวคัปเปอร์ 2 ตัวมาต่อรวมกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวไขว้สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาต่อไปนี้

-ที่ Z_0 $A = 1.584$ สามารถนำไปใช้ได้ตามสมการที่ 3.2

$$W = 2.992 \text{ mm.}$$

-ที่ $Z_0/\sqrt{2}$

$$A = 1.169$$

$W/d = 3.0799 > 2$ ไม่สามารถใช้ได้ตามเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2

$$B = 7.645$$

$W/d = 3.0807$ สามารถใช้ได้ตามเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2

$$\therefore W = 5.144 \text{ mm.}$$

-ที่ $2Z_0/\sqrt{2}$

จาก $W = 5.144 \text{ mm.}$

$$2W = 5.144 \times 2$$

$$= 10.288 \text{ mm.}$$

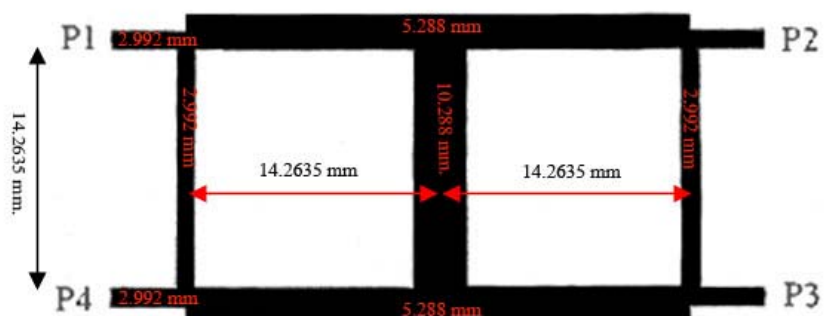
$$\varepsilon_e = 3.758$$

$$k_0 = 50.265 \text{ m}^{-1}$$

$$l = 16.12 \text{ mm.}$$

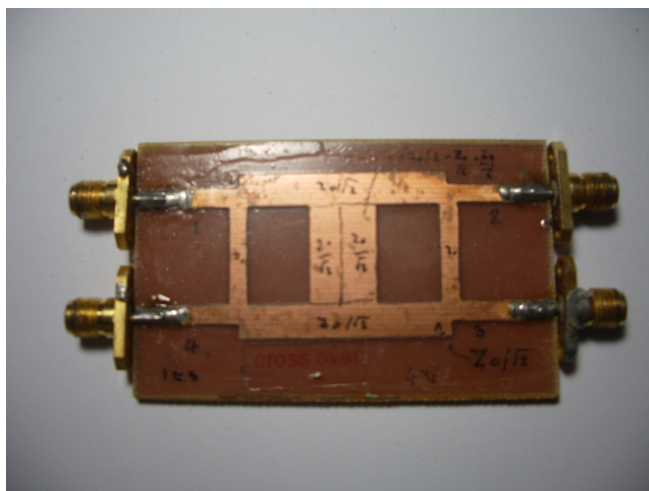
$$\therefore \lambda/4 = 14.2635 \text{ mm.}$$

ผลการคำนวณออกแบบของตัวไขว้สัญญาณ



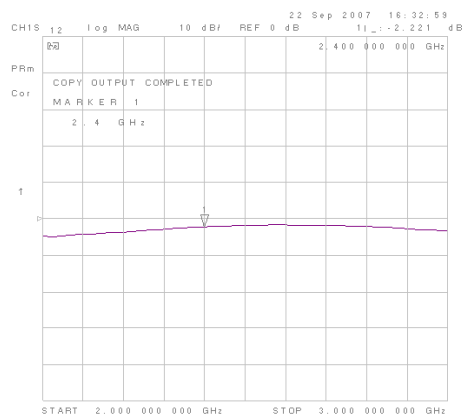
รูปที่ 3.11 ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบเสร็จ

ผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ

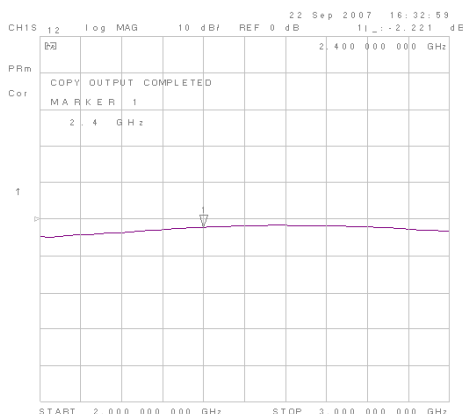


รูปที่ 3.12 ตัวไขว้สัญญาณที่สร้างจากการออกแบบเสร็จ

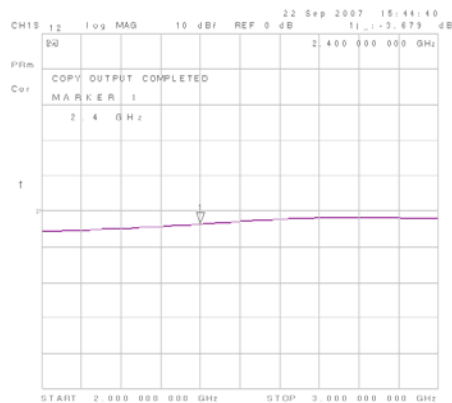
ซึ่งผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) ค่าของพลังงานได้ดังรูปที่ 3.13, 3.14, 3.15และ3.16



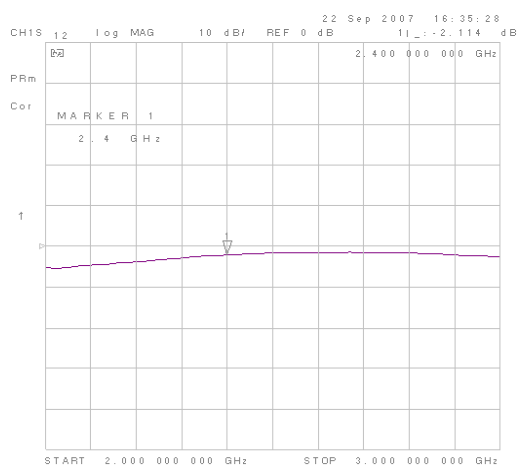
รูปที่ 3.13 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P2 (S_{12}) มีค่าเท่ากับ -21.157 dB



รูปที่ 3.14 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 (S_{13}) มีค่าเท่ากับ -2.221 dB

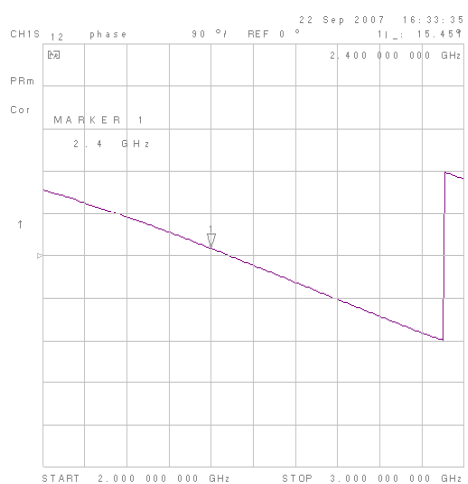


รูปที่ 3.15 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P4 (S_{24}) มีค่าเท่ากับ -3.679 dB

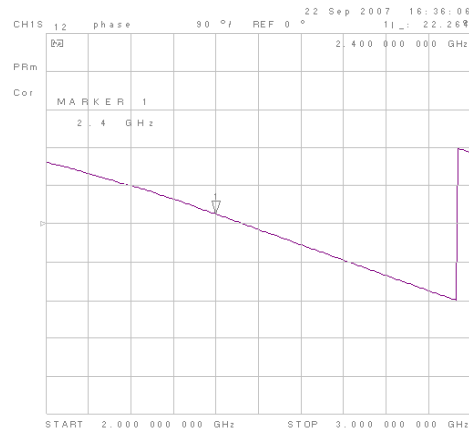


รูปที่ 3.16 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2 (S_{42}) มีค่าเท่ากับ -2.114 dB

และผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการค่าเปลี่ยนแปลงเฟสได้ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.17 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 (S_{13}) มีค่าเท่ากับ 15.459 องศา



รูปที่ 3.18 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2 (S_{42}) มีค่าเท่ากับ 22.264 องศา

จากค่าที่ทำการทดสอบเมื่อเราสังเกตที่ค่า S_{12} ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, แต่เนื่องจากวงจร Crossover นั้นมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวก็คือ จะมีสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปพอร์ต 3 และพอร์ต 4 ไปพอร์ต 2 ซึ่งตามทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า พอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณควรจะมีค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์มากที่สุด และค่าในตารางก็แสดงให้เห็นว่า S_{13} , S_{24} และ S_{42} นั้นจะมีค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์ แต่ในส่วนของสัญญาณที่ไหลจากพอร์ต 1 ไปพอร์ต 2 และพอร์ต 4 ไปพอร์ต 3 นั้นไม่ได้เป็นเส้นทางการไหลของสัญญาณ ซึ่งจากทฤษฎีนั้นควรจะมีค่าต่ำกว่า -10 มากๆ และค่าในตารางก็แสดงให้เห็นว่า S_{12} มีค่าต่ำกว่า -10 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบวงจร Crossover ของเรานั้นก็ถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.3.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifter 45°)

การคำนวณค่าตัวเลื่อนเฟส 45 องศา จะได้จากผลการคำนวณออกแบบของตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สามารถทำให้ทราบค่าของ λ เนื่องจากใช้วัสดุในการสร้างและความถี่เดียวกัน



รูปที่ 3.19 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

$$\text{จากสมการ } \theta = \frac{360^\circ l}{\lambda}$$

$$\text{โดยเราทราบค่า } \theta = 45^\circ$$

$$\lambda = 57.054 \text{ mm.}$$

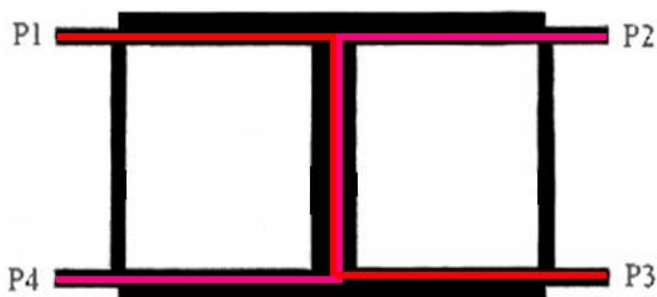
ทำการหาค่า L โดยแทนค่า θ และ λ ในสมการ จะได้

$$L = \frac{\theta \times \lambda}{360^\circ}$$

$$\text{จะได้ } L = \frac{45 \times 57.054}{360^\circ}$$

$$L = 7.13 \text{ mm.}$$

โดยการสร้างรวมในวงจรนั้นจะเป็นการสร้างโดยการนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 ในการสร้างเฟสด้านล่างและนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 ในการสร้างเฟสด้านบนเพื่อให้มีการเพิ่มเฟสโดยเส้นทางของตัวไขว้สัญญาณดังรูป



รูปที่ 3.20 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

(ก) โดยสีแดงเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

(ข) โดยสีชมพูเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2

จากรูป 3.20 ความยาวระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 มีค่าดังนี้

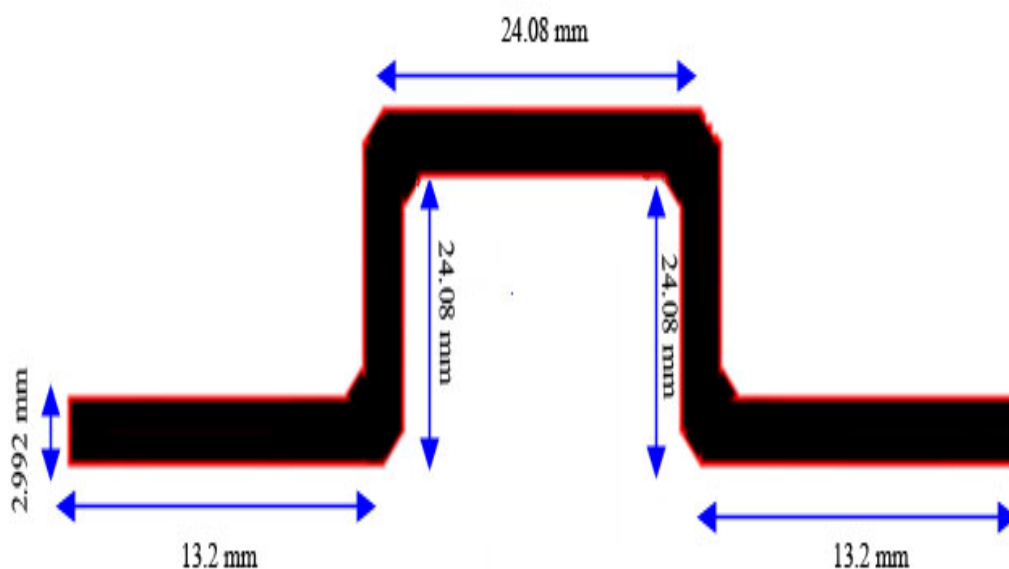
$$\text{มีค่าเท่ากับ } 20 + 16.12 + 16.12 + 16.12 + 20 = 88.36 \text{ mm}$$

ดังนั้นค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 มีความยาวเท่ากับ

$$L = 88.36 + 7.13 = 95.49 \text{ mm.}$$

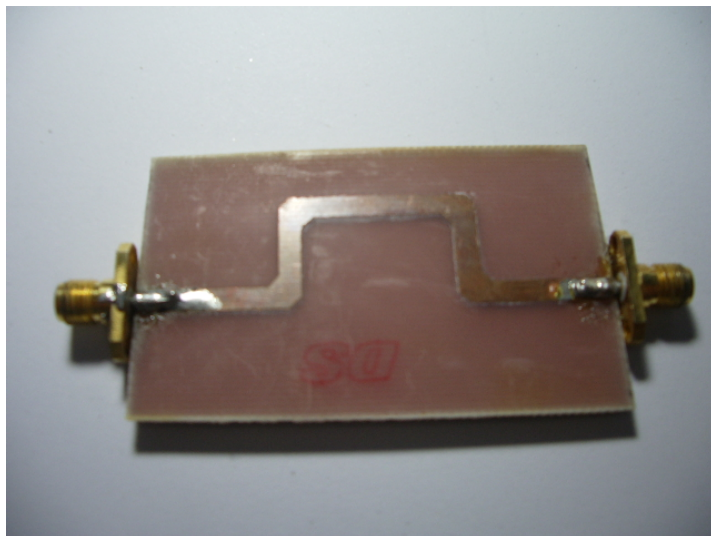
และความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 รวมกับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา มีค่าเท่ากับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45°ภายในโครงข่าย มีค่าเท่ากับ 95.49 mm. เนื่องจากมีความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงมีการคงอขึ้นโดยการคงอขึ้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45°ภายในโครงข่าย ลบออกจาก ค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45°ภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้ว ค่าที่เหลือให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงามโดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ ดังรูปที่ 3.21 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้



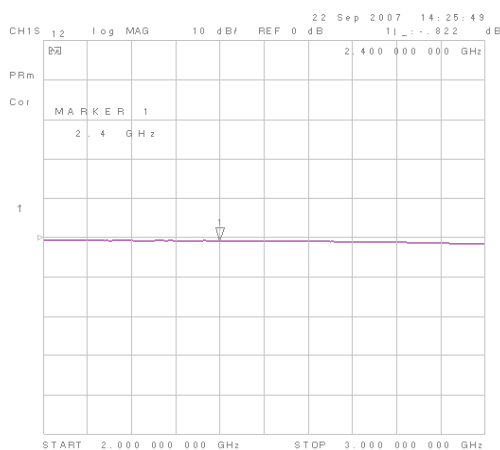
รูปที่ 3.21 ค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายที่ออกแบบเสร็จ

ผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ



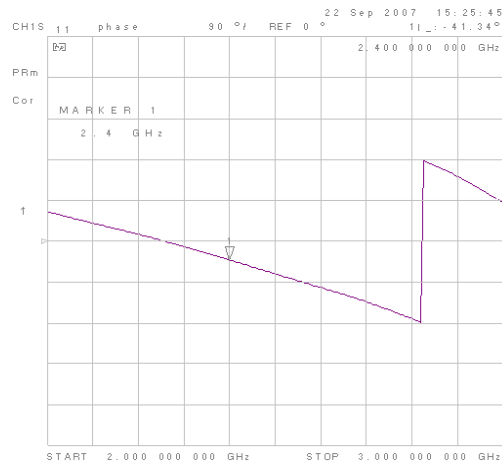
รูปที่ 3.22 ค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายที่สร้างจากออกแบบเสร็จ

ซึ่งผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) ค่าของพลังงานได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P2 (S_{22}) มีค่าเท่ากับ -0.822 dB

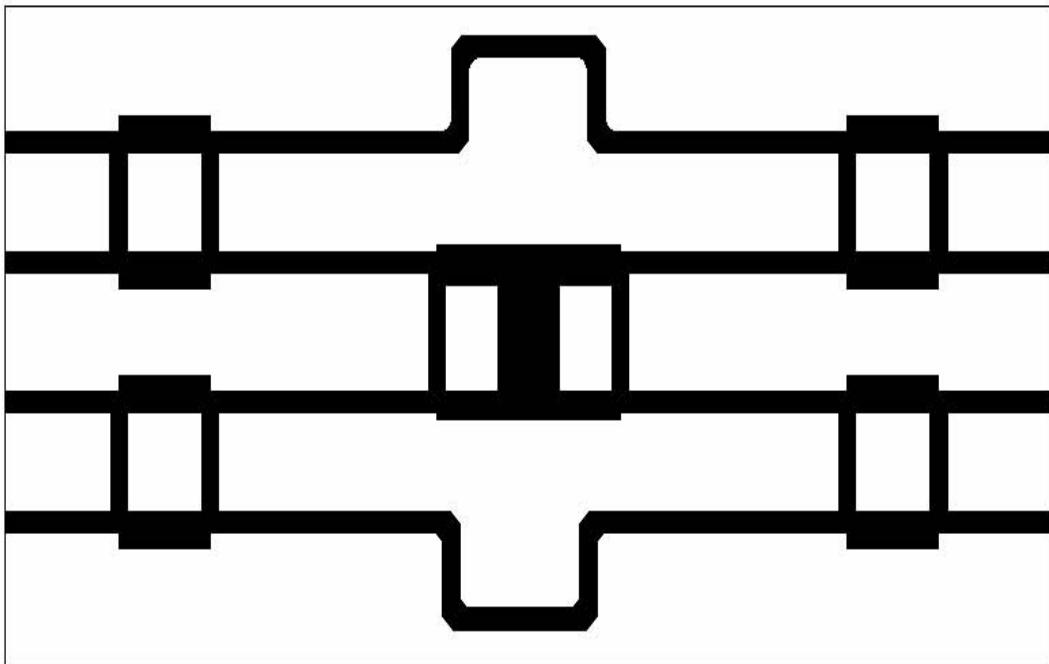
และผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการค่าเปลี่ยนแปลงเฟสได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P2 (S_{12}) เทียบกับความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 หรือความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2 ของตัวไขว้สัญญาณมีค่าเท่ากับ -41.34 องศา

จากค่าที่ทำการทดสอบเมื่อเราสังเกตที่ค่า S_{12} ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1

จากการคำนวณออกแบบทั้งหมดสามารถออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นได้ดังรูปที่ 3.25



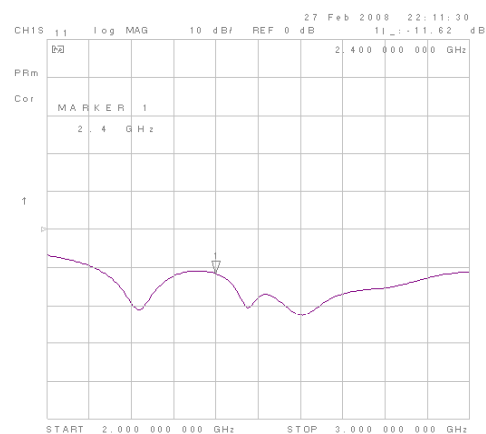
รูปที่ 3.25 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ออกแบบจากการคำนวณ



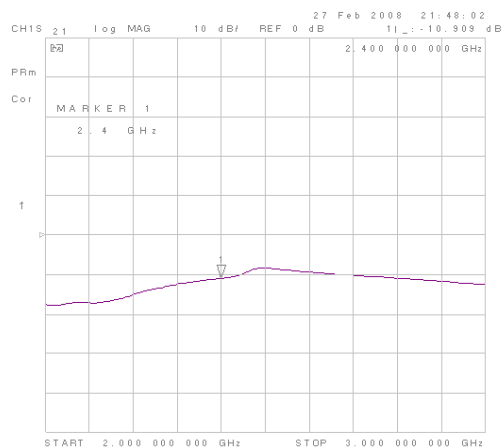
รูปที่ 3.26 เครื่องมือรูปจำลองที่สร้างจากออกแบบและการคำนวณ

ซึ่งผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) ความถี่ที่ออกแบบคือ 2.4 GHz ได้ผลการทดสอบดังนี้

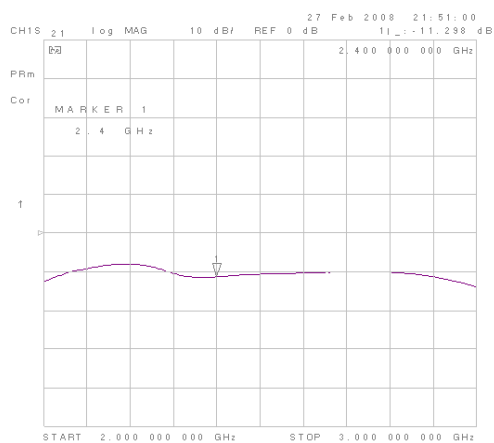
ผลการทดสอบค่าการไหลของพลังงาน



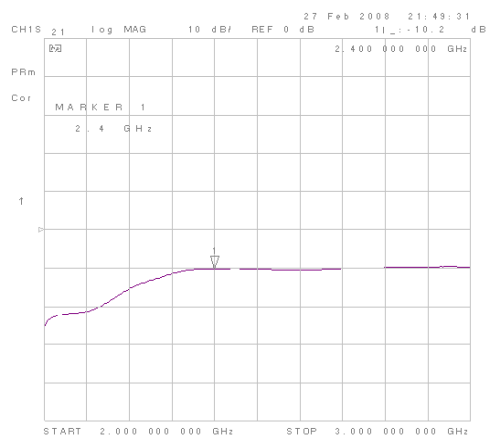
รูปที่ 3.27 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P1 (S_{11}) มีค่าเท่ากับ -11.62 dB (Return loss)



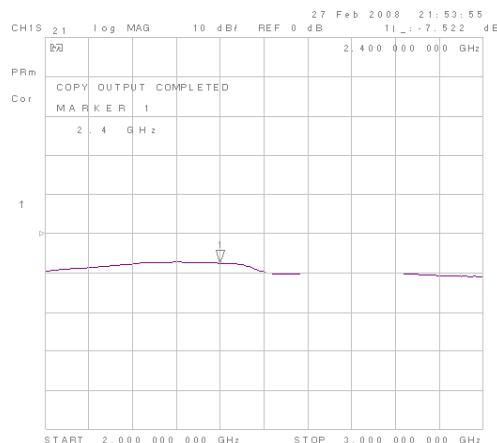
รูปที่ 3.28 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 1 มีค่าเท่ากับ - 10.909 dB



รูปที่ 3.29 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 2 มีค่าเท่ากับ - 11.298 dB



รูปที่ 3.30 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 3 มีค่าเท่ากับ - 10.2 dB



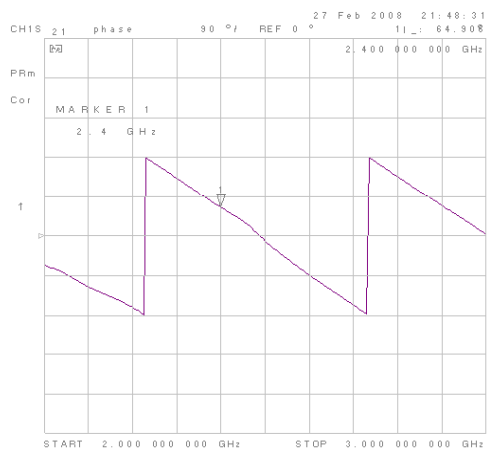
รูปที่ 3.31 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 4 มีค่าเท่ากับ -7.522 dB

ตารางที่ 1 ตารางการเปรียบเทียบค่าพลังงานการทดสอบผลการออกแบบวงจร โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

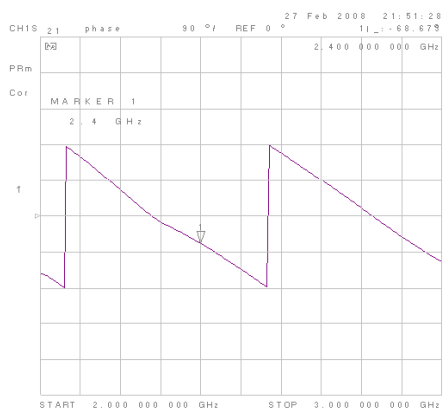
ลักษณะการไหลของ พลังงาน(พอร์ต/ สายอากาศ)	ลักษณะพลังงาน	ค่าพลังงาน(dB)
P1/P1	ค่าการสูญเสีย พลังงานการสะท้อน	-11.62
P1/A1	เชื่อมต่อ	-10.909
P1/A2	เชื่อมต่อ	-11.298
P1/A3	เชื่อมต่อ	-10.2
P1/A4	เชื่อมต่อ	-7.522

จากค่าพลังงานที่ได้พบว่าการไหลของพลังงานนั้นสามารถแพร่กระจายพลังงานออกไปได้เป็นที่ยอมรับ

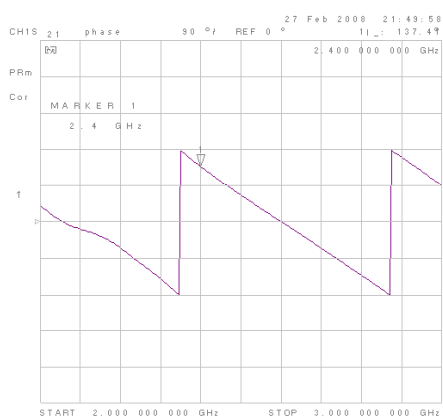
ผลการทดสอบค่าการเลื่อนเฟส



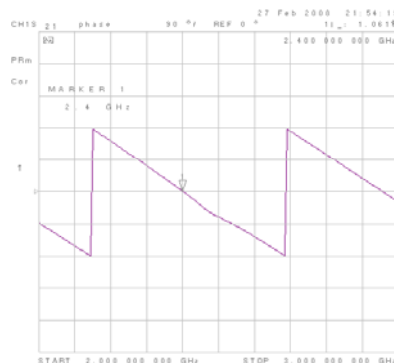
รูปที่ 3.32 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 1 มีค่าเท่ากับ 64.948 องศา



รูปที่ 3.33 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 2 มีค่าเท่ากับ 78.089 องศา



รูปที่ 3.34 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 3 มีค่าเท่ากับ -3.715 องศา



รูปที่ 3.35 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต สายอากาศที่ 4 มีค่าเท่ากับ 17.43 องศา

ซึ่งผลที่ได้สามารถยอมรับได้ตามทฤษฎีดังนั้นจึงนำผลการทดสอบผลการออกแบบวงจร
โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix นี้ไปใช้งานและพัฒนาต่อไป

3.4 สายอากาศ

โครงการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้ได้เลือกใช้สายอากาศ
ชนิดโมโนโพล (monopole antenna) จากบริษัท Asus โดยมีการเชื่อมต่อชนิด R-SMA มีอัตราขยาย
5 dBi อยู่ในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz และเป็นสายอากาศชนิดรอบตัว ซึ่งมีแบบรูปการแผ่
พลังงานรอบทิศทางวางเรียงกันแบบแถวลำดับจำนวน 4 ต้น ซึ่งระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่
วางเรียงกัน (d) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (3.9)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.10)$$

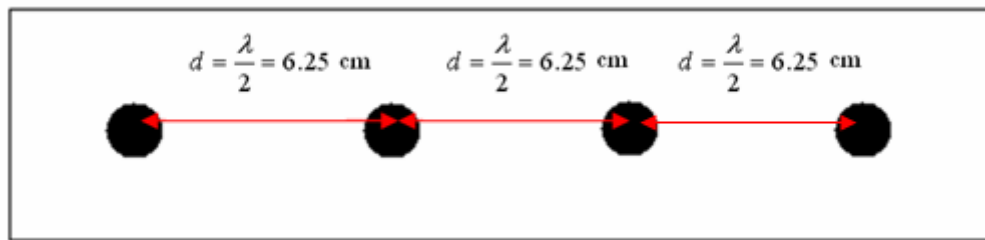
ซึ่ง

$$v = 3 \times 10^8$$

$$f = 2.4 \text{ GHz}$$

$$\therefore d = 6.25 \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อทำการคำนวณจากสมการ 3.1 แล้วจะได้ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับ 6.25 เซนติเมตร วางห่างกันดังรูป



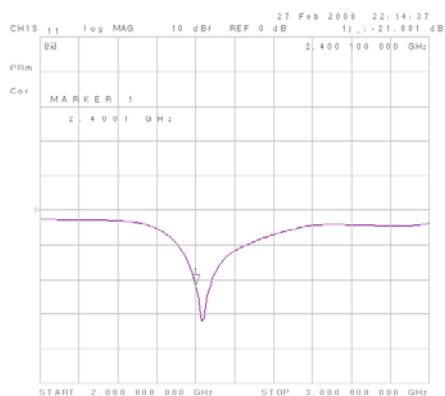
รูปที่ 3.36 แสดงระยะห่างของสายอากาศโมนิโพลจำนวน 4 ต้น



รูปที่ 3.37 แสดงระยะห่างของสายอากาศโมนิโพลจำนวน 4 ต้นที่สร้างขึ้นจริง

ค่าการทดสอบ

ค่าการทดสอบค่าพลังงานของสายอากาศโมนิโพลแต่ละต้นซึ่งมีค่าเหมือนกันโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) ความถี่ที่ออกแบบคือ 2.4 GHz



รูปที่ 3.38 ค่าการทดสอบค่าพลังงานของสายอากาศโมโนโพลแต่ละต้นโดยของพลังงาน (S_{11}) มีค่าเท่ากับ -21.881 dB

ภาพรวมของอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างตามที่ออกแบบและคำนวณจากทฤษฎี



รูปที่ 3.39 ภาพรวมของอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างตามที่ออกแบบและคำนวณจากทฤษฎี

3.5 สรุป

การนำสายอากาศเก่ง และวงจรก่อรูปลาค์ลิ้นมาใช้คู่กันนั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยสายอากาศที่ใช้จะเป็นสายอากาศชนิดโมโนโพล ซึ่งจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทาง จำนวน 4 ต้นมาวางเรียงกันโดยห่างกันต้นละ 6.25 เซนติเมตร ต่อเชื่อมเข้ากับวงจรก่อรูปลาค์ลิ้น ที่ประกอบไปด้วยตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา จำนวน 4 ตัว, ตัวไขว้สัญญาณจำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส จำนวน 2 ตัว แล้วนำมาเชื่อมต่อกับตัวรับสัญญาณ ซึ่งตัวรับสัญญาณนี้อีกด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ดูข่าย

บทที่ 4

ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

4.1 บทนำ

จากการสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบโดยอ้างอิงจากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ บทที่ 3 นั้น ได้ชุดอุปกรณ์ต้นแบบที่สมบูรณ์หลังจากนั้นนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการและทดสอบใช้งานจริง ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบต่อไป

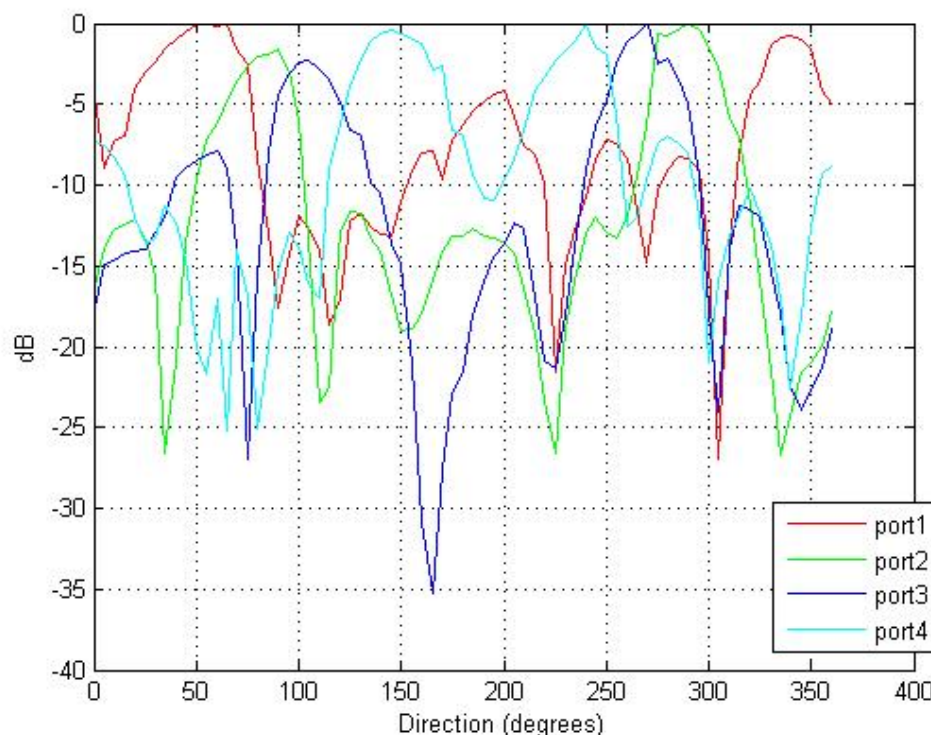
4.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศเก่ง

4.2.1 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

หลังจากประกอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบเสร็จสมบูรณ์ และทำการวัดผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบด้วยเครื่อง network analyzer ในการวัดค่าพลังงานในแต่ละพอร์ตดังตารางที่ 4.1 และ ภายในห้อง chamber room สามารถนำผลการทดสอบนี้มา plot กราฟแบบรูปการแผ่กระจายลำคลื่นด้วยโปรแกรม MATLAB มีผลดังรูปที่ 4.1

สายอากาศ พอร์ต	1	3	2	4
2	-16.127 dB	-8.855 dB	-8.585 dB	-11.304 dB
4	-7.50 dB	-10.429 dB	-10.387 dB	-11.416 dB
1	-10.909 dB	-10.2 dB	-11.298 dB	-7.522 dB
3	-10.277 dB	-9.72 dB	-9.427 dB	-18.406 dB

ตารางที่ 4.1 ค่าพลังงานระหว่างสายอากาศและพอร์ต



รูปที่ 4.1 แบบรูปการแผ่กระจายลำคลื่น

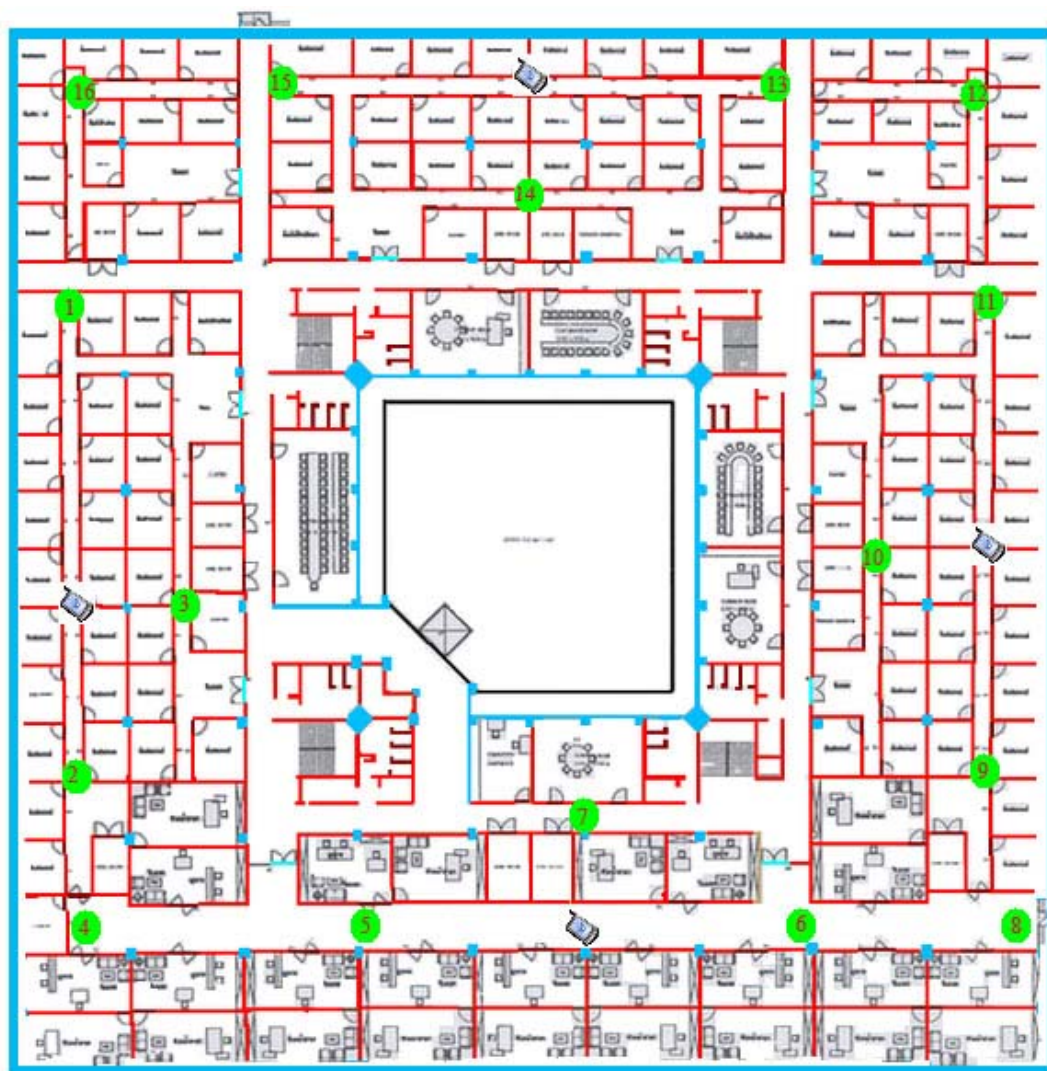
4.2.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในการใช้งานจริง

หลังจากทำการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายลำคลื่นภายในห้องปฏิบัติการเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นก็ทำการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในการใช้งานจริง โดยสถานที่ในการทดสอบคือชั้น 4 อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนในการทดสอบ

1. กำหนดตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ

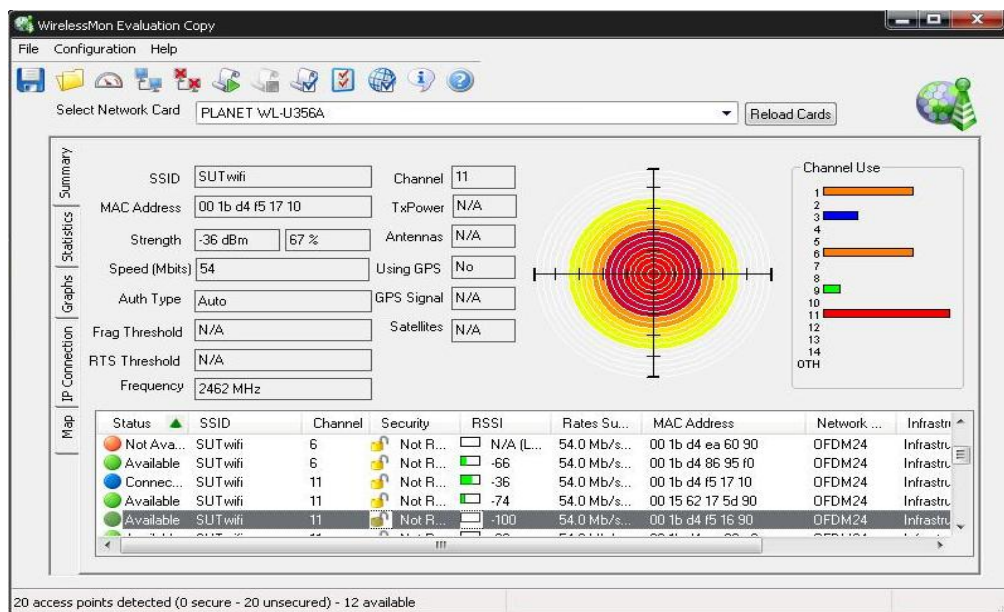
การกำหนดตำแหน่งของการทดสอบลงในแผนที่ของตัวอาคารวิชาการ ซึ่งการทดสอบในครั้งนี้ได้กำหนดตำแหน่งของการทดสอบไว้ ณ ตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.1 และมีเกณฑ์ในการกำหนดตำแหน่งของการทดสอบลงในแผนที่โดยให้มีความสมมาตรมากที่สุด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งจุดสีเขียวจะเป็นตำแหน่งต่างๆที่ทำการทดสอบ



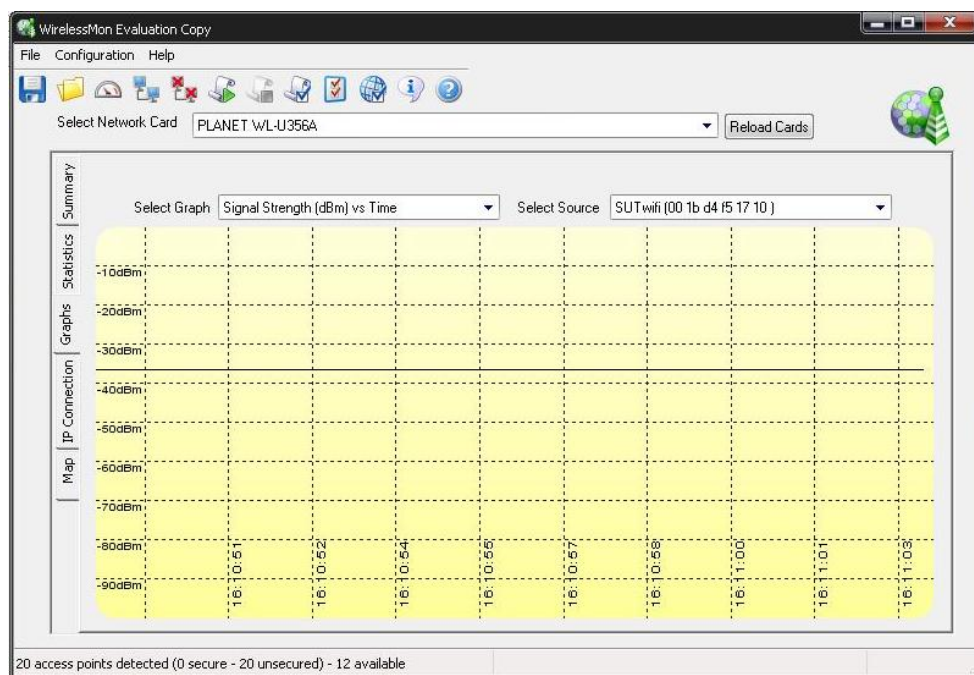
รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งในการทดสอบการใช้งานจริงชั้น 4 อาคารวิชาการ

2. ทำการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในทิศทางเหนือ และตะวันออกแล้วบันทึกค่า

ในการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในการใช้งานจริงผู้ดำเนินโครงการได้เก็บข้อมูลในแนวทิศเหนือ และตะวันออก เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศกึ่ง ซึ่งการเก็บข้อมูลในครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม WirelessMon by PassMark™ Software Overview ในการวัดค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนั้นๆ



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม WirelessMon by PassMark™ Software Overview
ในการวัดค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนั้นๆ



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม WirelessMon by PassMark™ Software Overview
ในการวัดค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนั้นๆ

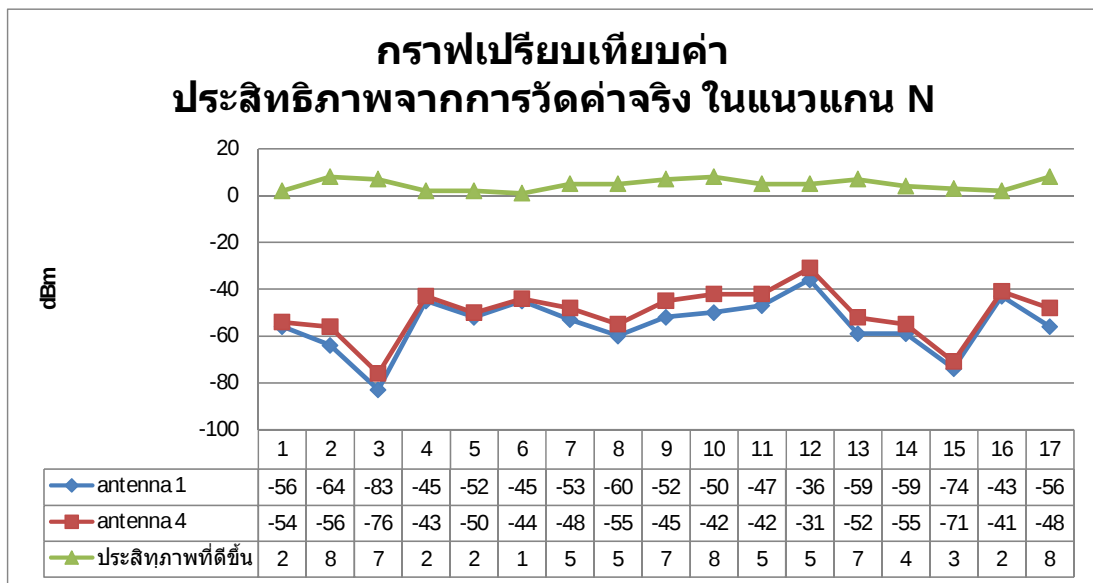
ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในการใช้งานจริง ณ อาคารวิชาการ

จุดที่	ทิศทาง	ช่องสัญญาณ	สายอากาศ 1 ต้น (dBm)	สายอากาศเก่ง				AP
				พอร์ต 1 (dBm)	พอร์ต 2 (dBm)	พอร์ต 3 (dBm)	พอร์ต 4 (dBm)	
1	ตะวันออก	11	-60	-55	-57	-60	-53	41
	เหนือ	11	-56	-56	-59	-54	-60	41
4	ตะวันออก	11	-50	-57	-47	-54	-42	41
	เหนือ	11	-45	-48	-44	-43	-60	41
	ตะวันออก	11	-50	-48	-58	-49	-62	44
	เหนือ	11	-52	-60	-54	-50	-50	44
3	ตะวันออก	11	-41	-46	-39	-37	-38	41
	เหนือ	11	-32	-43	-36	-34	-35	41
2	ตะวันออก	11	-60	-65	-60	-58	-63	41
	เหนือ	11	-64	-60	-65	-56	-70	41
	ตะวันออก	11	-77	-78	-76	-75	-81	42
	เหนือ	11	-83	-80	-76	-80	-80	42
15	ตะวันออก	11	-53	-55	-59	-50	-58	42
	เหนือ	11	-51	-56	-54	-56	-48	42
13	ตะวันออก	11	-36	-38	-32	-34	-40	42
	เหนือ	11	-43	-42	-41	-50	-53	42
16	ตะวันออก	11	-41	-39	-40	-39	-40	42
	เหนือ	11	-38	-51	-56	-50	-46	42
14	ตะวันออก	11	-37	-49	-42	-53	-47	42
	เหนือ	11	-37	-43	-45	-39	-42	42
11	ตะวันออก	11	-58	-55	-54	-54	-58	43
	เหนือ	11	-59	-53	-58	-56	-52	43

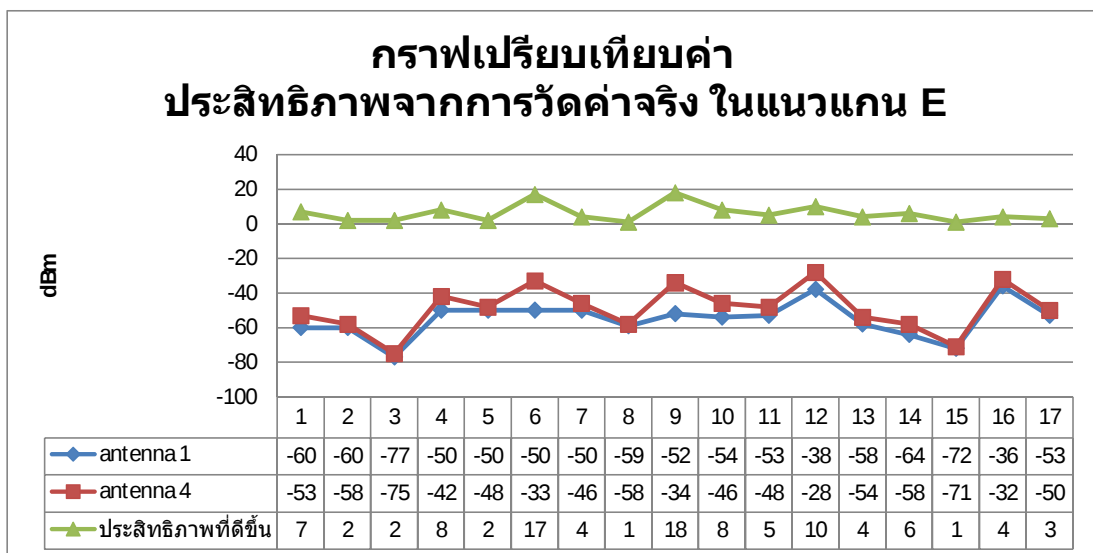
ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบในการใช้งานจริง ณ อาคารวิชาการ(ต่อ)

จุดที่	ทิศทาง	ช่องสัญญาณ	สายอากาศ 1 ต้น (dBm)	สายอากาศเก่ง				AP
				พอร์ต 1 (dBm)	พอร์ต 2 (dBm)	พอร์ต 3 (dBm)	พอร์ต 4 (dBm)	
12	ตะวันออก	1	-64	-60	-58	-61	-60	43
	เหนือ	1	-59	-55	-56	-58	-57	43
	ตะวันออก	11	-72	-79	-71	-79	-76	42
	เหนือ	11	-74	-81	-73	-81	-76	442
10	ตะวันออก	1	-38	-39	-43	-28	-35	43
	เหนือ	1	-36	-34	-50	-31	-36	43
9	ตะวันออก	1	-54	-58	-46	-54	-58	43
	เหนือ	1	-50	-42	-53	-50	-53	43
	ตะวันออก	11	-53	-63	-48	-53	-54	44
	เหนือ	11	-47	-84	-42	-55	-50	44
7	ตะวันออก	11	-59	-74	-58	-66	-58	44
	เหนือ	11	-60	-55	-61	-65	-66	44
8	ตะวันออก	11	-52	-37	-36	-34	-37	44
	เหนือ	11	-52	-49	-45	-50	-48	44
6	ตะวันออก	11	-50	-39	-46	-48	-53	44
	เหนือ	11	-53	-34	-51	-49	-48	44
5	ตะวันออก	11	-50	-40	-33	-50	-50	44
	เหนือ	11	-45	-57	-44	-54	-48	44

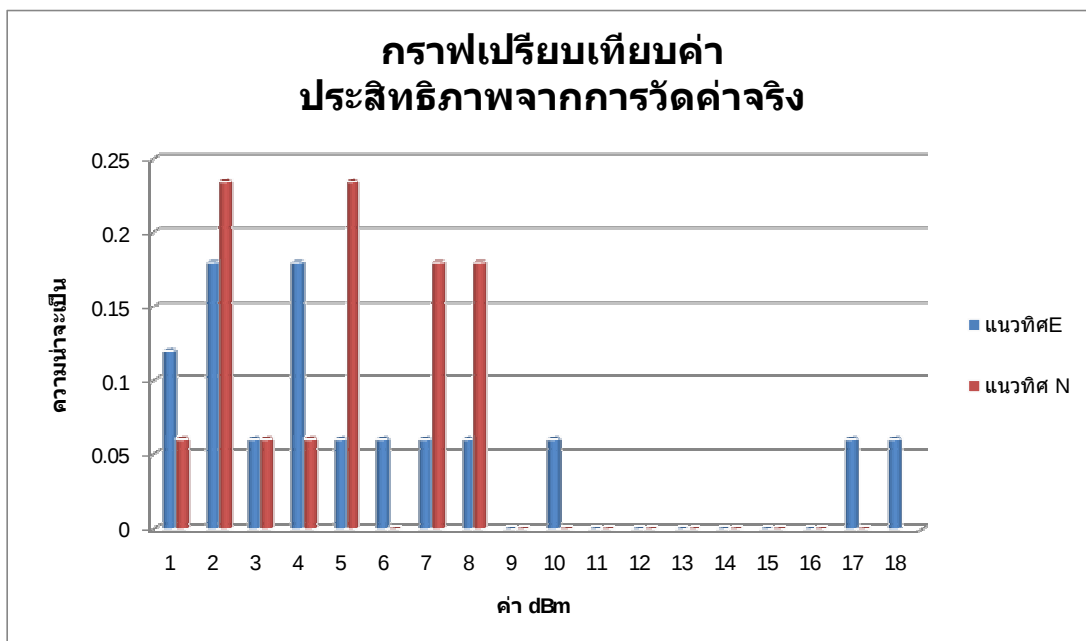
3. ทำการ plot กราฟจากข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับการใช้งานจริงที่ไม่ได้ใช้สายอากาศเก่งช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณทั้งแนวทิศเหนือ และตะวันออก



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบในทิศเหนือ



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบในทิศตะวันออก



รูปที่ 4.7 ความน่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของผลการออกแบบ

4.3 สรุป

จากการทดสอบการใช้สายอากาศทั้งในห้องปฏิบัติการและการใช้งานจริง ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าสายอากาศทั้งสองสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้มากยิ่งขึ้น และยังสามารถพัฒนาสายอากาศให้มีประสิทธิภาพได้มากกว่าเดิม โดยการทำให้มีขนาดเล็กลง และเป็นสวิตช์แบบอัตโนมัติได้อีกด้วย

บทที่ 5

ข้อสรุปของโครงการ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของโครงการการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศเก่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และวิธีพัฒนาโครงการต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1. ค่า S พารามิเตอร์ และแบบรูปลำคลื่นของ วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix มีความผิดเพี้ยนจากการคำนวณที่ได้ออกแบบไว้	สาเหตุ เกิดจากการออกแบบและกัลดายวงจรที่ไม่ ประณีต วิธีการแก้ไข ควรมีความประณีตในการออกแบบและกัลดายวงจรให้มีความสวยงาม
2. อุปกรณ์บางรายการต้องสั่งจากต่างประเทศ ทำให้มีความล่าช้าในการดำเนินการเกิดขึ้น	สาเหตุ อุปกรณ์บางรายการไม่มีภายในประเทศไทย วิธีการแก้ไข ควรมีการวางแผนในการดำเนินงานที่รวดเร็ว เพื่อประหยัดเวลาในการสั่งอุปกรณ์จากต่างประเทศ
3. ผู้ดำเนินโครงการไม่มีความชำนาญในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ	สาเหตุ เนื่องจากผู้ดำเนินโครงการมีความรู้ในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการน้อย วิธีการแก้ไข ผู้ดำเนินโครงการควรศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการกับผู้เชี่ยวชาญทางด้านเครื่องมืออื่นๆ
4. ข้อมูลทางทฤษฎีเกี่ยวกับโครงการมีน้อย	สาเหตุ เนื่องจากการเป็นารประยุกต์สายอากาศเก่งกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ butler matrix ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่อยู่ วิธีการแก้ไข ผู้ดำเนินโครงการจะต้องค้นหาข้อมูลจากบทความภาษาอังกฤษจากอินเทอร์เน็ตเป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการคัดลายวงจรจะต้องมีความประณีตมาก ไม่ควรเร่งรีบ และควรคัดในสถานะที่ไม่มีปฏิกิริยากับน้ำยาคัดลายวงจร

5.3.2 อุปกรณ์เครื่องมือในห้องปฏิบัติการมีราคาแพง และเสี่ยงง่าย ควรมีความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์นั้นๆ และระมัดระวังในการใช้งาน

5.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบบางอย่างมีขนาดเล็ก เช่น ตัวแปลงที่ใช้ในการเชื่อมต่อ, ตัวแมทพอร์ตที่ไม่ได้ใช้งาน ดังนั้นผู้ทำการทดสอบควรมีความระมัดระวังในการเก็บรักษา

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงการเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศเก่งนั้นยังใช้สวิตซ์ในการควบคุมพอร์ตการทำงานแบบควบคุมโดยมนุษย์ ซึ่งถ้าได้พัฒนาโครงการในส่วนของสวิตซ์นี้ให้กลายเป็นสวิตซ์แบบอัตโนมัติ และลดขนาดของชุดอุปกรณ์ต้นแบบให้มีขนาดเล็กลง สามารถพกพาได้สะดวก ก็จะทำให้โครงการนี้มีความน่าสนใจและมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

5.5 บทสรุป

โครงการเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศเก่งจะมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ 1) สายอากาศแถวลำดับ 2) วงจรก่อรูปลำดับแบบ Butler matrix มีหลักการทำงานก็คือ เมื่อมีสัญญาณส่งมาให้กับสายอากาศแถวลำดับ สายอากาศแถวลำดับก็จะส่งสัญญาณต่อไปที่วงจรก่อรูปลำดับแบบ Butler matrix ซึ่งวงจรก่อรูปลำดับแบบ Butler matrix จะเป็นตัวประมวลผลว่าทิศทางใดมีความแรงของสัญญาณมากที่สุด โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม WirelessMon by PassMark™ Software Overview ในการวัดค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนั้นๆ

จากผลการทดลองในตารางต่างๆ และกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศแสดงให้เห็นว่าสายอากาศเก่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Frank B. Gross, PhD. Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB, McGraw-Hill, New York, 2005.
- [2], [3], [8] <http://www.wel.atr.jp/~sun/SmartAntennas.html>
- [4], [5], [6], [7] Joseph C. Liberti; Theodore S. Rappaport Smart Antennas for Wireless Communications IS-95 and Third Generation CDMA Applications, Prentice Hall PTR Upper saddle River, New Jersey, 1990.
- [9] Jean-Sébastien N?ron and Gilles-Y. Delisle Microstrip EHF Butler Matrix Design and Realization ETRI Journal, Volume 27, Number 6, December 2005
- [10] Siti Rohaini Ahmad and Fauziahanim Che Seman 4-Port Butler Matrix for Switched Multibeam Antenna Array IEEE. 2005 0-7803-9431-3/05
- [11], [12], [13] David M. Pozar Microwave Engineering Second Edition, JOHN WILEY & SONS, INC., USA, 1998.
- [14] ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ Antenna engineering <http://www.sut.ac.th/e-texts/eng/Antenna> ,2004
- [15] <http://alpha.fdu.edu/~kanaksri/IEE80211b.html>
- [16] <http://blog.eduzones.com/banny/3481>

ประวัติผู้เขียน

นางสาวรวมพร นุศลโรจน์ เกิดวันที่ 3 กันยายน พ.ศ.2528 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 220 หมู่ 5 ถนนสุขาภิบาล ตำบลพรหมโลก อำเภอพรมคีรี จังหวัดนครศรีธรรมราช จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนพรหมคีรีพิทยาคม ปีการศึกษา 2546 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นายอภิธาน คงเจริญ เกิดวันที่ 26 เมษายน พ.ศ.2528 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 315/1 หมู่ 6 ตำบลบ้านหลุม อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสุโขทัยพิทยาคม ปีการศึกษา 2546 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา