



รายงานการวิจัย

ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติสำหรับชุดอุปกรณ์ไวไฟ

Automatic Switched-Beam System for Wi-Fi Compatability

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติสำหรับชุดอุปกรณ์ข่ายฟาย
Automatic Switched-Beam System for Wi-Fi Compatibility

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2553

ก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับ โครงการวิจัยนี้

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2553

บทคัดย่อ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านระบบสื่อสารไร้สายได้มีการเติบโตอย่างรวดเร็วตัวอย่างที่เห็นได้ชัดได้แก่ ระบบวิทยุ เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นดังกล่าว ผู้ให้บริการระบบสื่อสารไร้สายจำเป็นต้องทำให้ระบบมีการส่งรับสัญญาณไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สายได้แก่ ระบบสายอากาศเก่ง ประเภทหนึ่งของสายอากาศเก่งที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากไม่มีความซับซ้อน และต้นทุนต่ำได้แก่ สายอากาศแบบสวิทช์ลำคลื่น จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ยังไม่เคยมีงานวิจัยใดที่นำเอาสายอากาศแบบสวิทช์ลำคลื่นไปทดสอบสมรรถนะภายใต้สิ่งแวดล้อมจริง และยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแบบสวิทช์ลำคลื่นที่ได้เคยนำเสนอมาไม่ใช่ระบบที่ทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นรายงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอระบบสวิทช์ลำคลื่นที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติสำหรับระบบวิทยุ การทดสอบระบบที่นำเสนอจะทดสอบผ่านการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ จากนั้นชุดระบบต้นแบบจะถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบในสถานการณ์จริงที่มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วิทยุ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบวิทยุเมื่อใช้ระบบสวิทช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

Abstract

As the demand of wireless communication has been dramatically increased over the last two decades e.g. WiFi systems, wireless system operator needs efficiency in data transmission in term of signal quality. One technique that is capable of increasing the wireless system capacity and quality without additional frequency spectrum is a smart antenna technique. Switched-beam antennas are one typical type of smart antenna systems as they are not complex and low of cost. From literatures, switched-beam systems have not been demonstrated under real circumstances. Also, the systems proposed in literatures are not practical as they do not provide automatic operation. Therefore, this report proposes a switched-beam antennas concept capable of automatic operation for WiFi systems. The beam switching capability of the proposed systems is demonstrated through simulation and experimental results. Furthermore, the system prototype is tested under real circumstances of existing WiFi infrastructure. The measured signal strength is considered as enhancing indicator. The results indicate that the proposed switched-beam antennas provide hihger received signal strength over using omni-directional antenna. Hence, performance of WiFi systems can be enhanced.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสายอากาศแก่ง	4
2.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นและสายอากาศแบบปรับตัว	8
2.4 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	9
2.5 ทฤษฎีสายส่งไมโครสตริป	13
2.6 สายอากาศไมโครสตริป	15
2.7 สายอากาศแถวลำดับ	17
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์	27
2.9 กล่าวสรุป	42
บทที่ 3 ชุดระบบต้นแบบ	43
3.1 กล่าวนำ	43
3.2 ชุดระบบต้นแบบของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติ	43

	หน้า
3.3 ชุดระบบต้นแบบของสายอากาศแบบสวิตช์ลากลื่นอัตโนมัติแบบพกพา	64
3.4 กล่าวสรุป	79
บทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบในสถานการณ์จริง	80
4.1 กล่าวนำ	80
4.2 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ	80
4.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ	82
4.4 กล่าวสรุป	123
บทที่ 5 สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อ	124
5.1 สรุป	124
5.2 ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาต่อ	124
บรรณานุกรม	125
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	126
ประวัติผู้วิจัย	128

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 โครงสร้างของระบบสายอากาศแก่ง	5
รูปที่ 2-2 โครงสร้างของสายอากาศแบบสวิทช์ลำคลื่น	6
รูปที่ 2-3 โครงสร้างของ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix	7
รูปที่ 2-4 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับลำคลื่น	8
รูปที่ 2-5 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว	10
รูปที่ 2-6 การเชื่อมต่อแบบกลุ่ม โครงสร้าง	10
รูปที่ 2-7 เครื่องหมายวายฟาย	12
รูปที่ 2-8 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	13
รูปที่ 2-9 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	14
รูปที่ 2-10 โครงสร้างต่างๆ ไปของสายอากาศไมโครสตริป	16
รูปที่ 2-11 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ	19
รูปที่ 2-12 (ก) ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ (ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น $d = \frac{\lambda}{2}$	21
รูปที่ 2-13 สายอากาศสององค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_1	22
รูปที่ 2-14 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1	23
รูปที่ 2-15 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1	23
รูปที่ 2-16 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น	25
รูปที่ 2-17 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระยะห่าง (d) ของสายอากาศที่แตกต่างกัน	26
รูปที่ 2-18 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	26
รูปที่ 2-19 กราฟความต่างเฟสที่สายอากาศแต่ละตัว	27
รูปที่ 2-20 โครงสร้างของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128	29
รูปที่ 2-21 การเปิดโปรแกรม CodeVisionAVR C Compiler	31
รูปที่ 2-22 การเลือก File Type	31
รูปที่ 2-23 การบันทึกใน โปรแกรมซี	33
รูปที่ 2-24 การเลือกสร้างโปรเจกใหม่	33

	หน้า
รูปที่ 2-25 หน้าต่างแสดงการไม่เลือกใช้ตัวช่วยในการสร้างโปรเจก	34
รูปที่ 2-26 การตั้งชื่อโปรเจก	34
รูปที่ 2-27 การเพิ่มไฟล์ภาษาซี	35
รูปที่ 2-28 แสดงการเสร็จสิ้นเมื่อกดปุ่ม OK	35
รูปที่ 2-29 การตั้งค่าโปรเจก	36
รูปที่ 2-30 การแปลงโปรแกรม	37
รูปที่ 2-31 วงจรส่วนที่เชื่อมต่อกับ ISP LOAD	40
รูปที่ 3-32 การจัดเรียงขาสัญญาณของ Character LCD มาตรฐาน	41
รูปที่ 3-33 วงจรส่วนที่เชื่อมต่อกับ RS232	41
รูปที่ 3-1 ภาพรวมของชุดระบบสวิตช์ดักคลื่นอัตโนมัติต้นแบบ	44
รูปที่ 3-2 ภาพหลังจากการประกอบชุดระบบต้นแบบ	44
รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบต่างๆของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	47
รูปที่ 3-4 พอร์ตอนุกรม	47
รูปที่ 3-5 การจัดเรียงสัญญาณของพอร์ต I/O ต่างๆของบอร์ด ET-BASE51 V2.0	48
รูปที่ 3-6 แผนผังการทำงานของโปรแกรม Automatic Switched-Beam	50
รูปที่ 3-7 โปรแกรม Automatic Switched-Beam	51
รูปที่ 3-8 สวิตช์ ZSDR-425	53
รูปที่ 3-9 โครงข่ายก่อรูปลวดคลื่นที่พัฒนาขึ้นสำหรับสายอากาศแถวลำดับ 2x2	56
รูปที่ 3-10 โครงสร้างของไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 90°	56
รูปที่ 3-11 ขนาดของไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 90°	58
รูปที่ 3-12 ขนาดของไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 68°	58
รูปที่ 3-13 โครงสร้างของตัวไขว้สัญญาณ	59
รูปที่ 3-14 ขนาดของตัวไขว้สัญญาณ	60
รูปที่ 3-15 โครงสร้างของตัวเลื่อนเฟส 45°	60
รูปที่ 3-16 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ	61
รูปที่ 3-17 ขนาดของตัวเลื่อนเฟส	62
รูปที่ 3-18 วงจรก่อรูปลวดคลื่นที่ได้สร้างขึ้น	62

	หน้า
รูปที่ 3-19 สายอากาศโมโน โพลที่วางเรียงกันแบบเชิงเส้นจำนวน 4 ต้น	63
รูปที่ 3-20 ประกอบอุปกรณ์ต้นแบบของตัวสวิตช์ล้าคลื่นออต โนมัติแบบพกพา	64
รูปที่ 3-21 นำอุปกรณ์ต้นแบบของตัวสวิตช์ล้าคลื่นออต โนมัติแบบพกพาลงในกล่อง	65
รูปที่ 3-22 กราฟของเฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัว	66
รูปที่ 3-23 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	66
รูปที่ 3-24 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	67
รูปที่ 3-25 โครงสร้างของโครงข่ายก่อรูปล้าคลื่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับ 2x2	69
รูปที่ 3-26 โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริด 68°	70
รูปที่ 3-27 ขนาดของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริด 68°	71
รูปที่ 3-28 โครงสร้างของตัวไขว้สัญญาณรูปที่ 3-29 ขนาดของตัวไขว้สัญญาณ	71
รูปที่ 3-30 การประกอบกันของสายอากาศและโครงข่ายก่อรูปล้าคลื่น	72
รูปที่ 4-1 โครงสร้างของอาคารวิชาการ ชั้น 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา	81
รูปที่ 4-2 โครงสร้างของอาคารศูนย์เครื่องมือ 4 ชั้น 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา	81
รูปที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ อาคารวิชาการชั้น 4	102
รูปที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4	102
รูปที่ 4-5 ความน่าจะเป็นของการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ ณ อาคารวิชาการชั้น 4	103
รูปที่ 4-6 ความน่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4	103
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของสัญญาณกับตำแหน่งที่ทำการวัด ณ อาคารวิชาการชั้น 4	103
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของสัญญาณกับตำแหน่งที่ทำการวัด ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4	104
รูปที่ 4-9 ความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4	113
รูปที่ 4-10 ความแรงของสัญญาณ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4	113

	หน้า
รูปที่ 4-11 ความน่าจะเป็นของการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ (พกพา) ณ อาคารวิชาการชั้น 4	114
รูปที่ 4-12 ความน่าจะเป็นของการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ (พกพา) ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4	115
รูปที่ 4-13 ภาพการทดสอบความเร็วในการเข้าใช้อินเตอร์เน็ตจากเวป www.speedtest.net	115
รูปที่ 4-14 ค่าความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4 (upload)	121
รูปที่ 4-15 ค่าความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4 (download)	121
รูปที่ 4-16 ค่าความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (upload)	122
รูปที่ 4-17 ค่าความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (download)	122

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายของสายอากาศเก่งทั้งสองแบบ	9
ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงบิตควมของสวิตช์	54
ตารางที่ 3-2 ASCII ที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่า	54
ตารางที่ 4-1 ความแรงของสัญญาณที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (ทิศตะวันออก E)	82
ตารางที่ 4-2 ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารเครื่องมือ 4 (ทิศเหนือ N)	86
ตารางที่ 4-3 ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)	90
ตารางที่ 4-4 ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)	96
ตารางที่ 4-5 ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการชั้น 4 (แบบพกพา)	105
ตารางที่ 4-6 ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารเครื่องมือ 4 (แบบพกพา)	109
ตารางที่ 4-7 ความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการชั้น 4	116
ตารางที่ 4-8 ความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4	119

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) คือระบบที่เชื่อมโยงคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ไร้สายเข้าด้วยกันโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถือกำเนิดมาจากความยากลำบากจากการเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ด้วยสายส่งสัญญาณในบางพื้นที่ องค์ประกอบหลักของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้แก่ จุดเข้าถึงเครือข่าย (access point) และอุปกรณ์ลูกข่ายซึ่งเป็นชุดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้งานอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.11 หรือที่มีชื่อทางการค้าว่า วิทยุฟาย (Wireless Fidelity: Wi-Fi) ตัวอย่างของอุปกรณ์ดังกล่าวที่เห็นกันอยู่ทั่วไปได้แก่ คอมพิวเตอร์พกพา และเครื่องช่วยงานส่วนบุคคลแบบดิจิทัลหรือที่เรียกว่า พีดีเอ (Personal Digital Assistant: PDA) ซึ่งมีผู้ใช้งานมากในปัจจุบัน

ในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายของชุดอุปกรณ์วิทยุฟาย สายอากาศ (antenna) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ อุปกรณ์หนึ่งที่เป็นตัวกำหนดความสำเร็จในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างจุดเข้าเครือข่ายและอุปกรณ์ลูกข่าย ซึ่งในปัจจุบันสายอากาศที่ใช้ในชุดอุปกรณ์วิทยุฟายมีคุณสมบัติที่แผ่พลังงานได้รอบทิศทาง (omni-directional) ซึ่งทำให้เกิดผลเสียหลายประการได้แก่ ความล่าช้าของการส่งข้อมูล (delay spread) และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference) ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานไม่สามารถใช้งานระบบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวยังทำให้อัตราขยายของระบบต่ำอีกด้วย ซึ่งทำให้ต้องติดตั้งจุดเข้าถึงเครือข่ายเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมผู้ใช้บริการได้ทั่วถึง ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองงบประมาณ

จากการศึกษางานวิจัยในเรื่องระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ซึ่งพบว่าเป็นระบบสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงในแง่ของการเพิ่มอัตราขยายให้กับระบบสื่อสารไร้สาย และความสามารถในการลดความล่าช้าของการส่งข้อมูล ซึ่งทำให้ความจุของระบบสูงขึ้น โดยใช้หลักการก่อรูปลำคลื่น (beamforming) และสวิตช์ลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นโครงการวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำระบบสายอากาศเก่งที่มีความสามารถในการสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ในการสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์วิทยุฟายเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์วิทยุ โดยใช้ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติ
- 1.2.2 เพื่อสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาและออกแบบ โครงสร้างของสายอากาศแ่งที่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้แบบอัตโนมัติ
- 1.3.2 สร้างต้นแบบของสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ ทดสอบและแก้ไขจนบรรลุวัตถุประสงค์
- 1.3.3 ศึกษาและออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อใช้ในการสวิตช์ลำคลื่นไปในทิศทางที่กำหนด
- 1.3.4 สร้างตัวต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ในข้อ 1.3.3 และทดสอบจนบรรลุวัตถุประสงค์
- 1.3.5 ประกอบสายอากาศเข้ากับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นต้นแบบ และเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์พกพา
- 1.3.6 ศึกษาการทำงานของบอร์ดประมวลผลสัญญาณ
- 1.3.7 ประกอบระบบต้นแบบเข้ากับบอร์ดประมวลผลสัญญาณ และทดสอบสมรรถนะในสถานการณ์จริง
- 1.3.8 แก้ไขและปรับปรุงจนได้ชุดอุปกรณ์ต้นแบบที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์วิทยุในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและออกแบบระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติและเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น
- 1.4.2 สร้างต้นแบบของระบบในข้อ 1.4.1 ทดสอบและแก้ไขจนบรรลุวัตถุประสงค์
- 1.4.3 ศึกษาการทำงานของบอร์ดประมวลผลสัญญาณ
- 1.4.4 เชื่อมต่อระบบต้นแบบเข้ากับบอร์ดประมวลผลสัญญาณ
- 1.4.5 ทดสอบระบบในสถานการณ์จริง
- 1.4.6 ปรับปรุง และแก้ไข จนได้ระบบต้นแบบที่มีสมรรถนะตามที่ได้กำหนดไว้
- 1.4.7 สรุปผลสำเร็จของโครงการและจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการอย่างน้อย 1 บทความ ซึ่งเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้

บทที่ 2

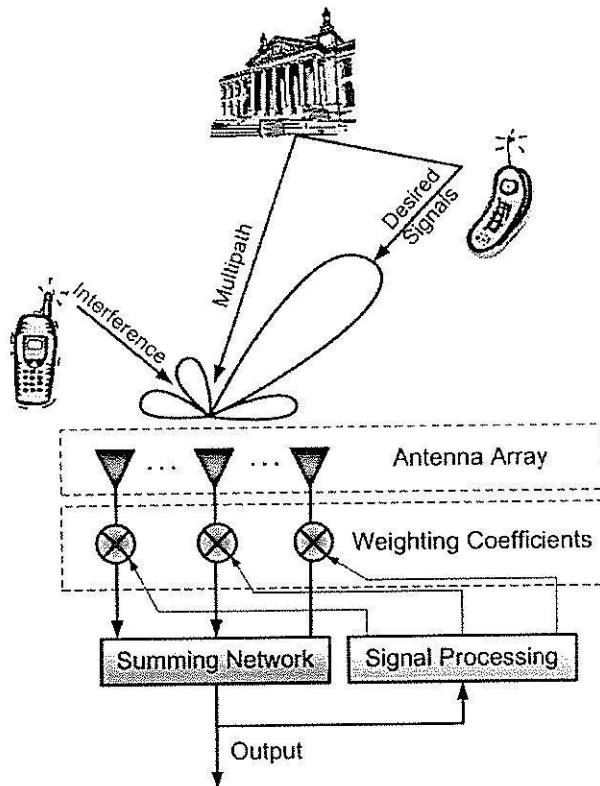
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา ระบบการส่งสัญญาณแบบไร้สายได้เติบโตเป็นอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้จากวิฤตติตามตัว โทรศัพท์มือถือ จนถึงคอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วดังกล่าวมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและชีวิตประจำวันของประชากรโลกเป็นอย่างมาก จากการพัฒนาดังกล่าว ปัญหาอย่างหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ได้แก่ ความไม่เพียงพอของทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งการนำเอาทรัพยากรความถี่กลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำนั้นเป็นสิ่งที่กระทำไม่ได้โดยตรง เนื่องจากจะมีผลของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ใช้ความถี่เดียวกัน การใช้ระบบสายอากาศเก่งเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากเป็นระบบสามารถสวิตช์ลำคลื่นให้มีอัตราขยายสูงสุดในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถหันจุดศูนย์หรือหุรอง ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเอาระบบสายอากาศเก่งเข้ามาใช้กับระบบส่งสัญญาณวิทยุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้แก่ ทฤษฎีพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่ง ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ และในส่วนท้ายจะกล่าวถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของชุดระบบสวิตช์ลำคลื่น

2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่ง

ระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) เป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และส่วนการประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ระบบสายอากาศเก่งนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณเป้าหมาย (desired signal) ที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ด้วยการหันลำคลื่นหลัก (mainbeam) ไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมาย ในขณะที่ยังสามารถหันจุดศูนย์ (null) หรือหุรอง (sidelobe) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-1 [1-4] กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระบบสายอากาศเก่งสามารถกำหนดอัตราขยายสูงสุดให้กับสัญญาณที่มาจากทิศทางเป้าหมาย ในเวลาเดียวกันก็สามารถลดอัตราขยายของสัญญาณที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ กระบวนการที่ได้กล่าวมานั้นเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) นั่นเอง ดังนั้นสัญญาณขาออกจาก



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของระบบสายอากาศเก่ง

ระบบจึงเป็นสัญญาณเป้าหมายเท่านั้นซึ่งปราศจากสัญญาณแทรกสอดที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่น ซึ่งความสามารถดังกล่าวทำให้ระบบสามารถใช้ความถี่ซ้ำเดิมได้ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยปราศจากปัญหาจากการแทรกสอดของสัญญาณที่มีช่องสัญญาณร่วมกัน (co-channel interference) จึงทำให้เราสามารถใช้อัตราขยายความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

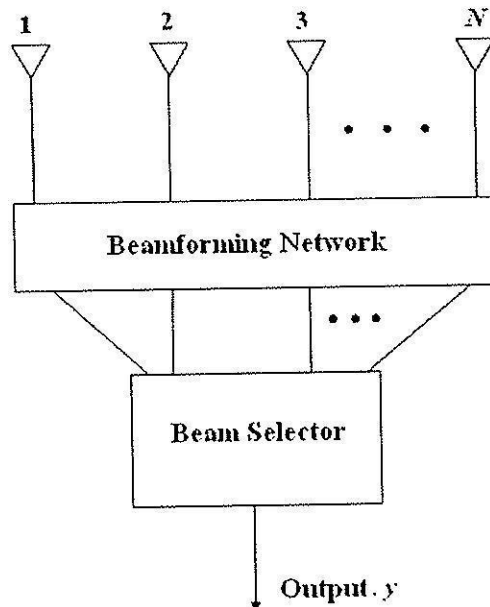
การทำงานของระบบสายอากาศเก่งในรูปที่ 2-1 อธิบายได้ดังนี้ ในกรณีที่พิจารณาให้ระบบเป็นภาครับ เมื่อสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเป้าหมายรวมถึงสัญญาณแทรกสอดที่มีความถี่เดียวกันมาตกกระทบเข้ากับสายอากาศแถวลำดับ สัญญาณที่รับมาได้นี้จะถูกถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น การถ่วงน้ำหนักดังกล่าวหมายถึง การปรับค่าขนาดและเฟสของสัญญาณที่สายอากาศรับได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้นจะถูกคูณเข้ากับสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็นเชิงซ้อน (complex number) เพื่อที่จะทำให้ขนาดและเฟสของสัญญาณเปลี่ยนไป ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะถูกเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) จากนั้นสัญญาณจากสายอากาศทุกๆ ต้นที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักแล้วจะรวมกันออกมาเป็นสัญญาณขาออก โดยที่สัญญาณขาออกจะถูกนำกลับเข้ามาประมวลผลในส่วนของการประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณค่าน้ำหนักที่เหมาะสม และเพื่อป้อนกลับไปควบคุมน้ำหนักที่สัญญาณในสายอากาศแต่ละต้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการป้อนกลับดังกล่าวจะกระทำในลักษณะอัตโนมัติและตลอดเวลา

ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถติดตามสัญญาณเป้าหมายไม่ว่าจะเคลื่อนที่ไปที่ทิศทางใดก็ตาม รวมถึงสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อนำเอาระบบสายอากาศเก่งไปใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ไร้สายแบบเซลลูลาร์จะทำให้สามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมได้กว้างขึ้น เนื่องจากอัตราขยายของระบบสูงขึ้น ซึ่งยังส่งผลให้เราสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้อีกด้วย โดยทั่วไประบบสายอากาศเก่งแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น และสายอากาศแบบปรับตัว ซึ่งมีรายละเอียดรวมถึงจุดเด่นจุดด้อยดังต่อไปนี้

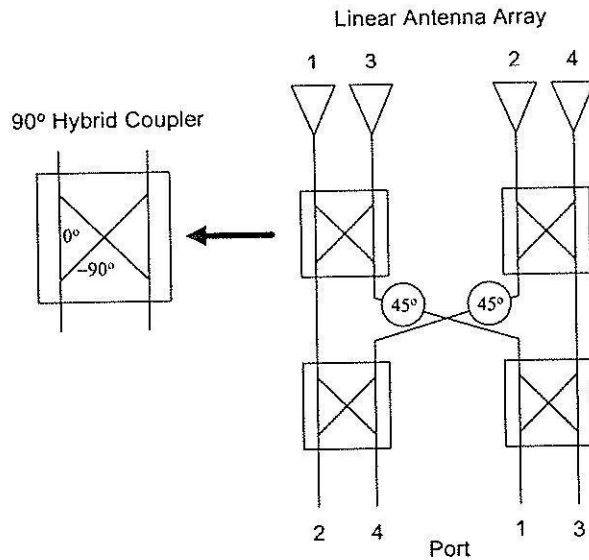
2.2.1 สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น

รูปที่ 2-2 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น (switched-beam antennas) ซึ่งประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับจำนวน N ต้น โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) และตัวเลือกลำคลื่น เมื่อพิจารณาให้ระบบเป็นภาครับ สัญญาณที่ตกกระทบกับสายอากาศแถวลำดับจะถูกส่งต่อไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ที่ได้กำหนดเอาไว้ก่อนล่วงหน้า หลังจากนั้นตัวเลือกลำคลื่นจะทำหน้าที่ในการเลือกลำคลื่นที่มีขนาดของสัญญาณแรงที่สุด ตามความเป็นจริงที่ว่าลำคลื่นที่ให้ขนาดของสัญญาณที่แรงที่สุดนั้น คือลำคลื่นที่ชี้ไปในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ หรือที่เราเรียกว่าสัญญาณเป้าหมาย และเป็นลำคลื่นที่มีผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดน้อยที่สุด

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-3 เป็นหัวใจหลักที่ทำให้ระบบสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางต่างๆ ได้ ซึ่งโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ Butler matrix [5-7] ดังที่แสดง



รูปที่ 2-2 โครงสร้างของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น



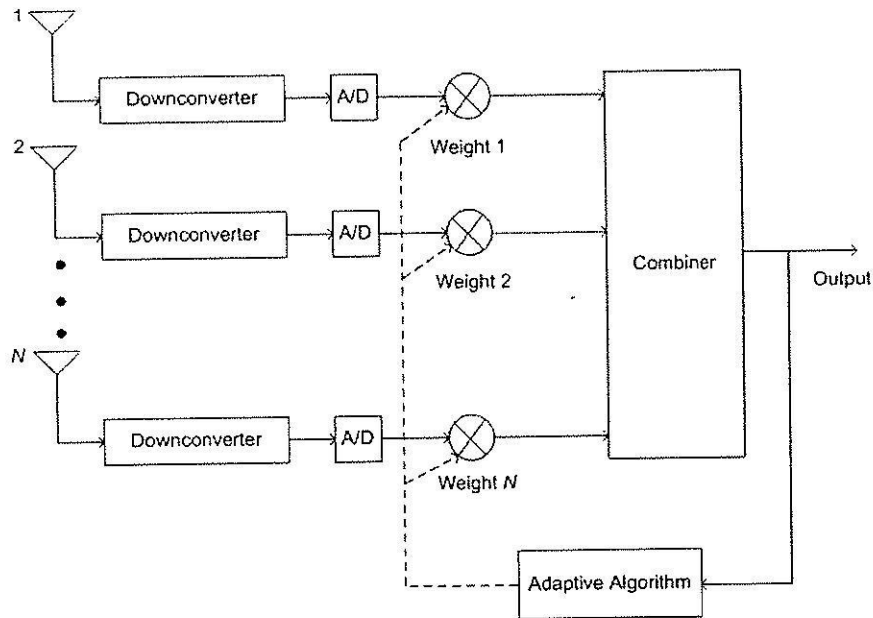
รูปที่ 2-3 โครงสร้างของโครงข่ายท่อรูปปลาคลิ้นแบบ Butler matrix

ไว้ในรูปที่ 2-3 ซึ่งประกอบด้วย ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° (90° hybrid coupler) 4 ตัว วงจรตัดข้าม (crossover) 2 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45° (45° phase shifter) 2 ตัว โครงข่ายท่อรูปปลาคลิ้นชนิดนี้จะท่อรูปปลาคลิ้นไปยังทิศทาง 4 ทิศทางในเวลาเดียวซึ่งได้แก่ทิศ 138.6° 104.5° 75.5° และ 41.4°

ระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นนี้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำและมีความซับซ้อนน้อย แต่จะเห็นได้ว่าทิศทางของลำคลื่นหลักรวมถึงทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้นั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในลักษณะที่มีการเคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการ เนื่องจากจะให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal-to-Interference Ratio: SIR) ก่อนข้างต่ำ ในกรณีที่สัญญาณเป้าหมายไม่ได้อยู่ในทิศทางของลำคลื่นหลัก หรือสัญญาณแทรกสอดไม่ได้อยู่ในทิศทางของจุดศูนย์นั่นเอง

2.2.2 สายอากาศแบบปรับตัว

สายอากาศแบบปรับตัว (adaptive antennas) ที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2-4 เป็นอีกประเภทหนึ่งของระบบสายอากาศแบบปรับตัวนี้จะมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนลำคลื่นหลักให้หันไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมายถึงแม้ว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณจะเคลื่อนที่ก็ตาม ในขณะเดียวกันระบบก็สามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอดที่ความถี่เดียวกันได้ การกระทำดังกล่าวกระทำผ่านการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักให้กับสายอากาศแต่ละต้นในสายอากาศแถว ลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากอัลกอริทึมที่หลากหลายเช่น LMS (Least Mean Square) RLS (Recursive Least Square) หรือ Bussgang Algorithm [5] ซึ่งต้องอาศัยป้อนข้อมูลผลสัญญาณเชิง



รูปที่ 2-4 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

ลิจิตอลที่มีความสามารถในการประมวลผลขั้นสูง และยังคงมีอัตราการประมวลผลสัญญาณที่สูงอีกด้วย เพื่อให้สามารถติดตามผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งต่างจากสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยการใช้อัลกอริทึมแต่อย่างใด จึงกล่าวได้ว่าสายอากาศแบบปรับตัวมีความซับซ้อนมากกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น แต่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงกว่าในกรณีที่แหล่งกำเนิดสัญญาณมีการเคลื่อนที่

2.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นและสายอากาศแบบปรับตัว

จากที่ได้กล่าวถึงหลักการทํางานและทฤษฎีเบื้องต้นของระบบสายอากาศแก่งทั้งแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัวในหัวข้อที่แล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบความซับซ้อนของสายอากาศแก่งทั้งสองแบบดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 จากตารางจะเห็นว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นจะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างและการติดตั้งที่ต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว เนื่องจากระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต้องการเพียงโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ไม่มีความซับซ้อน ซึ่งสร้างได้จากแผงวงจรมิมพ์สองหน้าทั่วไป และข่ายการสวิตช์ที่ไม่จำเป็นต้องมีความเร็วสูงมากนัก อย่างไรก็ตามการหาทิศทางของสัญญาณด้วยระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้นจะมีความถูกต้องค่อนข้างต่ำ เนื่องจากระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดสำหรับทิศทาง

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายของสายอากาศเก่งทั้งสองแบบ

	สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น	สายอากาศแบบปรับตัว
ค่าใช้จ่ายในการสร้างและการติดตั้ง	ต่ำ	สูง
ความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่น	ต่ำ	สูง
การหาทิศทางของสัญญาณ	ต่ำ	สูง

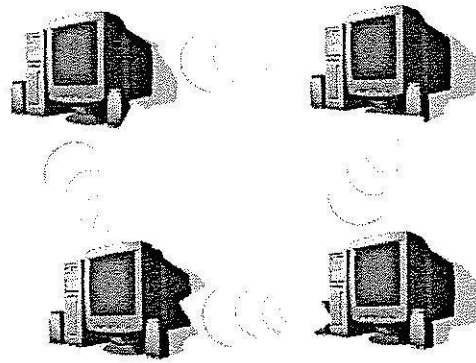
ก่อนรูปลำคลื่น จากตารางยังเห็นอีกว่าระบบสายอากาศแบบปรับตัวมีความซับซ้อนในการสร้างและติดตั้ง และยังมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น เนื่องมาจากระบบดังกล่าวต้องการการประมวลผลขั้นสูง และระบบประมวลผลสัญญาณต้องมีความเร็วมากพอที่จะตามให้ทันการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ด้วยความที่ไม่มีขีดจำกัดในการก่อรูปลำคลื่นไปยังทุกทิศทางจึงทำให้ระบบสายอากาศแบบปรับตัวมีความสามารถในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้แม่นยำกว่าระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น

2.4 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

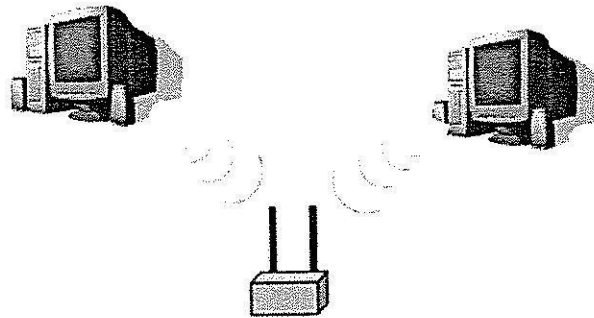
เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) [8-10] เป็นระบบที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง หรือ กลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นตัวกลางหรือช่องทางการสื่อสารระหว่างกัน ซึ่งเป็นการแทนที่ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบมีสายระบบเคเบิล (Local Area Network: LAN) ที่ใช้สายในการเชื่อมต่อกัน ทำให้ไม่ต้องมีการเดินสายส่งสัญญาณ และยังส่งผลไปยังผู้ใช้งานให้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่าย 2 รูปแบบได้แก่ การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว และการเชื่อมต่อแบบโครงสร้าง

การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว (Peer-to-Peer หรือ Ad Hoc Mode) เป็นการเชื่อมต่อกันโดยตรงระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์โดยไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) เหมาะในการใช้งานเกี่ยวกับงานที่ต้องการความรวดเร็ว และความง่ายในการติดตั้งเมื่อไม่มีโครงสร้างพื้นฐานรองรับในสถานที่นั้นๆ เช่น การประชุมนอกสถานที่ ในรูปที่ 2-5 เป็นการเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว ประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกข่ายที่ทำกรติดต่อสื่อสารกัน โดยไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึงเครือข่าย ข้อดีคือ ติดตั้งง่าย และ

สะดวกต่อการบริหารจัดการ แต่การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัวมีข้อเสียในด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล เนื่องจากไม่มีระบบการป้องกันในรูปแบบของ บัญชีผู้ใช้ และรหัสผ่าน



รูปที่ 2-5 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว



รูปที่ 2-6 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง

การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง (Infrastructure) เป็นการเชื่อมต่อกันผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวกลางทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่ายไร้สายไปยังเครือข่ายมีสาย โดยที่จุดเข้าถึงสัญญาณหนึ่งตัวมีขีดจำกัดในการรองรับจำนวนผู้ใช้งาน หากมีจำนวนผู้ใช้งานมากจะมีผลทำให้ความเร็วของการสื่อสารเครือข่ายไร้สายช้าลง แต่ปัจจุบันนี้การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้างเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากจุดเด่นในด้านความเร็วของการสื่อสารตลอดจนความปลอดภัยในการสื่อสารที่แสดงในรูปที่ 2-6 เป็นการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง โดยในการติดต่อสื่อสารของเครื่อง

คอมพิวเตอร์ลูกข่าย จะต้องผ่านจุดเชื่อมต่อสัญญาณเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ข้อดีคือ มีความปลอดภัยในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีระบบป้องกันในรูปแบบบัญชีผู้ใช้ และการเข้ารหัส

2.4.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แบบที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ แบ่งเป็น และแบบที่ใช้สัญญาณอินฟราเรด

สำหรับแบบที่ใช้คลื่นวิทยุยังสามารถแบ่งออกเป็นเทคโนโลยีเรียกว่า narrow band technology ซึ่งเป็นการรับ-ส่งที่ความถี่ 902 MHz ถึง 928 MHz 2.14 MHz ถึง 2.484 MHz และ 5.725 MHz ถึง 5.850 MHz ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล ระหว่างต้นทางกับปลายทางเพียงหนึ่งคู่เท่านั้น และอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีชื่อว่า spread spectrum technology ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มาก ใช้ความถี่ที่กว้างกว่า narrow band technology โดย spread spectrum technology จะใช้ช่วงความถี่ระหว่าง 902-928 MHz และ 2.4 – 2.484 GHz

สำหรับแบบที่ใช้สัญญาณอินฟราเรดในการติดต่อ รับ-ส่งข้อมูล ถ้าแสงอินฟราเรด (Infrared:IR) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราไม่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากอยู่ในย่านความถี่ของแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงที่เรามองเห็นได้ ถูกนำมาใช้เพื่อการสื่อสารระยะใกล้ จุดเด่นคือ คลื่นเดินทางเป็นแนวตรง ราคาถูก และง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้

2.4.3 มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

องค์กรที่กำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineer) ได้กำหนดมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย โดยใช้การกำหนดตัวเลข 802.11 แล้วตามด้วยตัวอักษร เช่น 802.11a 802.11b 802.11g และ 802.11n เป็นต้น ตัวอักษรต่อท้ายจะหมายถึงกลุ่มที่กำหนดมาตรฐาน โดยในแต่ละกลุ่มจะทำการพัฒนาขีดความสามารถของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม

มาตรฐาน IEEE 802.11b เรียกว่า Wi-Fi หรือการสื่อสารไร้สายความเร็วสูงที่ใช้เทคโนโลยี CCK (Complimentary Code Keying) ผวนกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz (เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM: Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้สำหรับการใช้งานในด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และ การแพทย์ โดยไม่ต้องขออนุญาตก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้งานในย่านความถี่นี้ได้แก่ Bluetooth โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ทุกวันนี้จะ

เป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในนามอุปกรณ์ไวไฟ ซึ่งเป็นเครื่องหมายการค้าที่ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าว หากผ่านการตรวจสอบแล้วพบว่าปฏิบัติตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่นๆ ได้จะมีเครื่องหมายดังแสดงในรูปที่ 2-7 ติดอยู่ที่อุปกรณ์ตัวนั้นซึ่งแสดงถึงสัญลักษณ์ Wireless Fidelity: Wi-Fi หมายถึง ชุดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่สามารถใช้ได้กับมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย (WLAN) ซึ่งอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.11



รูปที่ 2-7 เครื่องหมายไวไฟ

มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยี OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) โดยมีการปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นประมาณ 54 Mbps แต่จะใช้งานที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะที่ใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่าน 2.4 GHz ข้อเสียของมาตรฐานนี้คือ ในบางประเทศยังไม่มีใบอนุญาตให้ใช้งานย่านความถี่ดังกล่าว เช่นประเทศไทย เนื่องจากย่านความถี่ 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้รัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร) ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11b อีกทั้งราคาของอุปกรณ์ค่อนข้างสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11b ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อยกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11g สนับสนุนความเร็วในช่วงเดียวกันกับ IEEE 802.11a แต่มีคุณสมบัติ backward compatibility โดยใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณแบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) อุปกรณ์ IEEE 802.11g นี้สามารถทำงานร่วมกันกับอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b ได้ ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตจึงได้ผลิตอุปกรณ์ IEEE 802.11g ให้สามารถทำงานร่วมกับ IEEE 802.11a IEEE 802.11b ส่งผลให้ปัจจุบันนี้อุปกรณ์ IEEE 802.11g ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

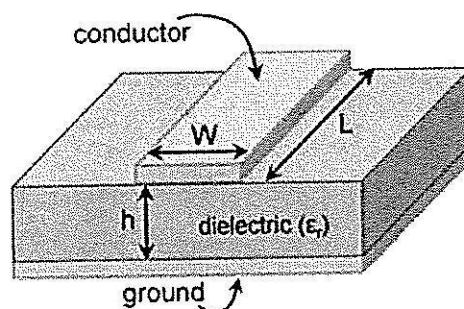
2.4.4 ข้อดีของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

- สามารถเข้าถึงบทเรียน Online ต่างๆ ได้ สามารถสืบค้นข้อมูลบนอินเทอร์เน็ตจากจุดใดจุดหนึ่งของมหาวิทยาลัยได้ และไม่จำเป็นต้องรอเข้าใช้ห้องบริการคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัย สามารถใช้จากจุดใดก็ได้ที่สัญญาณเครือข่ายไร้สายไปถึง ช่วยให้เราสามารถใช้งานได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น
- ลดค่าใช้จ่ายในการเดินสายสัญญาณให้เข้าถึงจุดบริการต่างๆ มากขึ้นและสามารถให้บริการในจุดบริการที่สายสัญญาณไม่สามารถเข้าถึงได้
- สามารถเฝ้าตรวจสอบระบบ และปรับเปลี่ยนแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบเครือข่ายจากจุดก็ได้ ทำให้สะดวกและรวดเร็วต่อการจัดการมากขึ้น

2.4.5 ข้อเสียของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

- เกิดจุดอับสัญญาณบางจุดที่สัญญาณไร้สายเข้าไปไม่ถึง
- ปัญหาทางด้านความปลอดภัยในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
- สัญญาณแทรกสอดจากคลื่นหลายวิถี และสัญญาณรบกวน

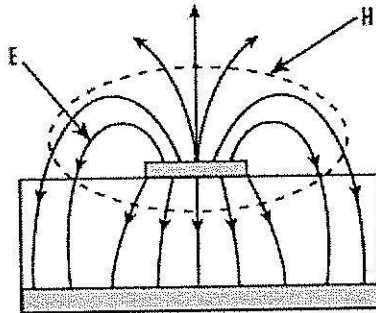
2.5 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณไมโครสตริป



รูปที่ 2-8 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณไมโครสตริปประกอบไปด้วย ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และระนาบกราวด์โดยมีไดอิเล็กตริก อยู่ตรงกลาง ดังรูปที่ 2.12 โดยค่าไดอิเล็กตริกนี้จะอยู่ตรงกลางระหว่าง ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และ

ระนาบกราวด์ในการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และค่าของสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุ (ϵ_r) เป็นต้น



รูปที่ 2-9 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปแสดงไว้ในรูปที่ 2-9 ซึ่งไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นของฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายคลื่นจะแผ่ออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ดังนั้นการแผ่กระจายในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะไม่ใช่โหมด TEM แต่จะเป็น Quasi-TEM ความเร็วเฟสของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2-1)$$

เมื่อ ค่าของ c คือ ความเร็วแสง และค่า ϵ_{re} คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลของวัสดุ

การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปมีดังนี้

เมื่อ $w/h \leq 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln(8h/w + 0.25w/h) \quad (2-2)$$

และที่

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[(1 + 12h/w)^{-1/2} + 0.04(1 - w/h)^2 \right] \quad (2-3)$$

และเมื่อ $w/h \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} (w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44))} \quad (2-4)$$

และที่

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_{re} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{re} - 1}{2} (1 + 12h/w)^{-1/2} \quad (2-5)$$

ผลที่ได้จากการคำนวณ คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น สามารถนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้

2.6 สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศแบบไมโครสตริป (microstrip antenna) ได้เริ่มถูกใช้งานครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2513 แม้ว่าแนวความคิดครั้งแรกจะเกิดขึ้นโดย G.A. Deschamps ตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2496 และถูกจดสิทธิบัตรไปตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2498 สาเหตุที่ในช่วงแรกไม่มีการพัฒนาไปใช้งาน เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำมาก แต่มีข้อดีตรงที่ขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะกับงานด้านความถี่สูง UHF ขึ้นไป กล่าวได้ว่าสายอากาศชนิดนี้เป็นการพัฒนาแบบหนึ่งของสายอากาศเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ ลักษณะอุปกรณ์จึงแบนคล้ายกับแผ่นทองแดงทั่วไปและเนื่องจากถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับความถี่ใดความถี่หนึ่ง โดยเฉพาะรูปร่างจึงอิงตามความเหมาะสมของความถี่ใช้งานเป็นหลักและรูปร่างจะแตกต่างกันไป เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้ออกแบบได้ง่ายที่สุด จึงมีนักวิจัยให้ความสนใจออกแบบเป็นอย่างมาก สายอากาศไมโคร

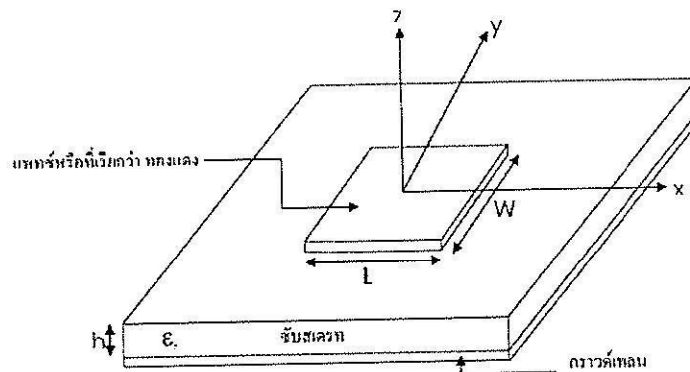
สายอากาศไมโครสตริปจะประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เราเรียกว่า แพทช์ (patch) ซึ่งเป็นตัวนำ ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่า ชั้นสเตรท (substrate) ของสาร ไดอิเล็กทริก ดังที่ได้แสดงไว้ในดังที่แสดงในรูปที่ 2-10

โดยที่ W คือ ความยาวของแพทช์

L คือ ความกว้างของแพทช์

h คือ ความสูงของชั้นสเตรท

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของชั้นสเตรท



รูปที่ 2-10 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

คุณสมบัติที่พิเศษกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ มีดังนี้

- น้ำหนักเบา
- ขนาดเล็ก
- สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างให้สมคูลย์ได้
- ราคาถูก
- การผลิตง่าย
- สามารถทำให้บางได้
- มีค่า scattering cross section ต่ำ
- ไม่ต้องมี cavity backing
- ติดตั้งได้ง่ายกว่า

ข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป

- แบนด์วิดท์แคบ (narrow bandwidth)
- มีการสูญเสียมากซึ่งส่งผลให้ได้อัตราขยาย (gain) ต่ำ
- สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายคลื่นเพียงครึ่งระนาบ

ซึ่งกล่าวต่อไปในอนาคตจะมีการนำสายอากาศไมโครสตริปมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น เนื่องจากความหนาของ ไมโครสตริปบางมาก คลื่นที่เกิดขึ้นภายในสาร ไดอิเล็กตริก (คือสารที่อยู่ระหว่างสายอากาศแบบแพทช์และกราวด์เพลน) สามารถพิจารณาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่น เมื่อคลื่น เคลื่อนที่มาถึงขอบของสตริปซึ่งเป็นเพียงกลุ่มเล็กๆที่แสดงถึง พลังงานที่ถูกแผ่กระจาย (fringing field) ดังนั้น สายอากาศที่พิจารณาจึงมีประสิทธิภาพต่ำ สายอากาศแบบไมโครสตริปมีหลายประเภทแบ่งตามการใช้งานได้สามประเภทดังนี้

1. สายอากาศแบบแผ่กระจายคลื่นตามแนวกว้าง เพื่อการสื่อสาร ตามแนวกว้างของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตั้งฉากกับแผ่นทองแดง
2. สายอากาศที่แผ่กระจายคลื่นตามแนวยาวเพื่อการสื่อสาร ในทิศทางตัดขวางของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตามแนวเดียวกับแผ่นทองแดง
3. สายอากาศอื่นๆเป็นสายอากาศที่ออกแบบมาเฉพาะการใช้งานชนิดหนึ่งๆ อาจมีมากกว่าสองทิศทางหรืออาจปรับเปลี่ยนทิศทางได้ตามความถี่ที่ใช้งาน

2.7 สายอากาศแถวลำดับ

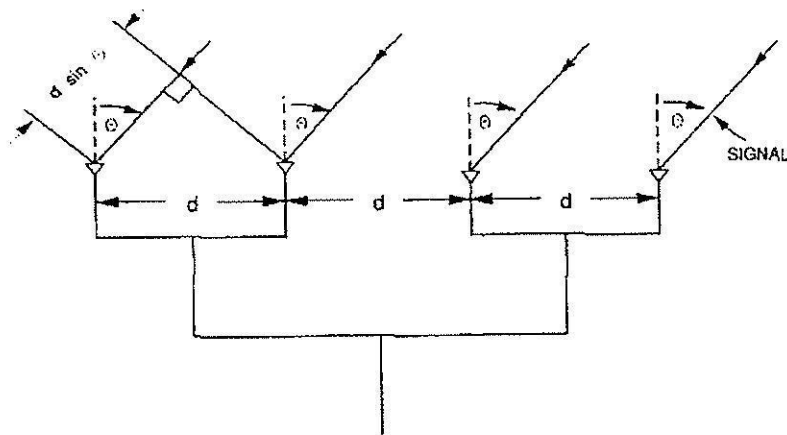
แถวลำดับของสายอากาศ (antenna arrays) หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลายๆตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดวางเรียงเป็นแถวลำดับนั้น จะให้สมรรถนะคล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การจัดเรียงแบบแถวลำดับนั้นจะสามารถขจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆอันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่เกินไปของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำให้ได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกัน หลากๆองค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดียว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับนั้นยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้ การเปลี่ยนเฟสอย่างต่อเนื่องของสายอากาศเมื่อเทียบกับเวลาจะทำให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นออกไปในทิศทางต่างๆได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกแถวลำดับแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบปรับเฟส (phased array) แถวลำดับแบบปรับเฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายๆประเภท โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้ในงานระบบเรดาร์ การปรับเฟสของแถวลำดับนั้นจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกระดับหนึ่ง เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทางแผ่กระจายกำลังงานสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่างๆได้อย่างรวดเร็ว เราสามารถแบ่งจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่าง ได้หลายๆประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างกันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (planar array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่ เมื่อพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงแถวลำดับมีลักษณะไม่แบนราบ เช่น ที่ส่วนหัวของจรวดหรือเครื่องบิน การจัดเรียงแถวลำดับก็จะต้องมีรูปร่างเป็นไปตามลักษณะของพื้นที่ดังกล่าวด้วย แถวลำดับแบบนี้ จะมีชื่อเรียกว่า แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (end-fire array) สายอากาศแบบแถวลำดับ สามารถออกแบบได้โดยอาศัยคุณลักษณะการรวมของสนามที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาทำเป็นแถวลำดับ ซึ่งสายอากาศเหล่านี้จะประกอบด้วยสายอากาศแบบพื้นฐานที่มีลักษณะเหมือนกันมาจัดวางเรียงกัน โดยมีตำแหน่งที่แน่นอนและมีการแผ่กระจายกำลังงานออกมาในแต่ละตัว อนึ่งลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ จะมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งขึ้นอยู่กับแบบการจัดเรียงแถวลำดับนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor:AF)

2.7.1 ตัวประกอบแถวลำดับ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่แตกต่างกัน บางตัวประกอบได้แก่ ชนิดขององค์ประกอบที่ใช้ และการวางตัวขององค์ประกอบในแถวลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นเฉพาะขององค์ประกอบ ดังนั้นจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบเท่านั้น ตัวประกอบตัวอื่นๆ จะเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแถวลำดับนั้นคือ จำนวน

องค์ประกอบของแถวลำดับ ตำแหน่งขององค์ประกอบ รวมทั้งขนาดแอมพลิจูดและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบนั้นๆ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาในทางทฤษฎีของแถวลำดับที่กำหนดในเบื้องต้น เราจะไม่พิจารณาผลของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากต้องการพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของแถวลำดับเท่านั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณาให้แต่ละองค์ประกอบที่นำมาทำเป็นแถวลำดับเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) ที่เป็นมีลักษณะจุด ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุดแบบไอโซทรอปิก จะเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับภายใต้การวิเคราะห์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบแถวลำดับซึ่งมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน สามารถทำได้เพียงแค่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลักษณะของแถวลำดับเท่านั้น เพื่อความเข้าใจในการคำนวณตัวประกอบของแถวลำดับให้มากขึ้นนั้นเราจะพิจารณาในกรณีของแถวลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ d ดังแสดงในรูปที่ 2-11 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบซึ่งสัญญาณที่รับได้จะเป็นสนามระยะไกลและชี้ในทิศทางบรอดไซด์ (broadside; $= 0$) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบไปยังแหล่งกำเนิดถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจะเสริมกันเมื่อมีเฟสเหมือนกัน



รูปที่ 2-11 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ

ในรูปที่ 2-11 เมื่อ θ มีค่ามากกว่าศูนย์ ระยะห่างจะไม่เท่ากัน ซึ่งองค์ประกอบขวามือจะมีระยะมากกว่าองค์ประกอบซ้ายมือที่อยู่ติดกันเป็นระยะ $d \sin \theta$ ซึ่งความแตกต่างของระยะห่างดังกล่าวจะมีผลให้เกิดความแตกต่างของเฟสของกระแสในแต่ละองค์ประกอบนั้น โดยความต่างเฟส ψ จะมีค่าเท่ากัน

$$\psi = \beta d \sin \theta \quad (2-6)$$

ตัวประกอบแถวลำดับ AF สำหรับแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่ประกอบไปด้วย N องค์ประกอบ สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

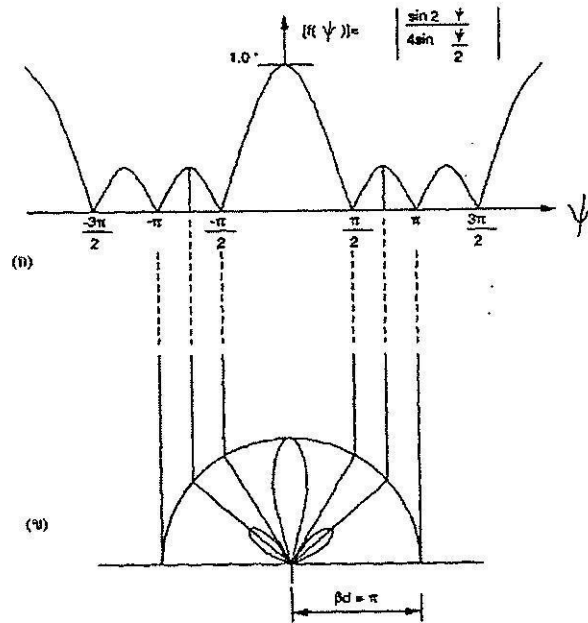
$$AF = e^{j(N-1)\psi/2} \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2-7)$$

ตัวประกอบ $e^{j(N-1)\psi/2}$ จะแสดงถึงการเลื่อนเฟสของแถวลำดับจากจุดศูนย์กลางเมื่อเทียบกับจุดกำเนิดเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งตัวประกอบเฟสสามารถตัดทิ้งได้ ผลที่ได้จะกลายเป็น

$$AF = A_0 \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2-8)$$

เมื่อสมการ (2-8) มีค่าสูงสุดเป็น $A_0 N$ และเมื่อหารสมการ (2-8) ด้วยค่าสูงสุดดังกล่าว ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ถูกนอร์มัลไลซ์ของตัวประกอบแถวลำดับที่ประกอบด้วย N องค์ประกอบที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากัน และมีการป้อนแหล่งกำเนิดที่มีเฟสเดียวกัน โดยมีจุดศูนย์กลางของแถวลำดับอยู่ที่จุดกำเนิดจะมีค่าดังสมการ

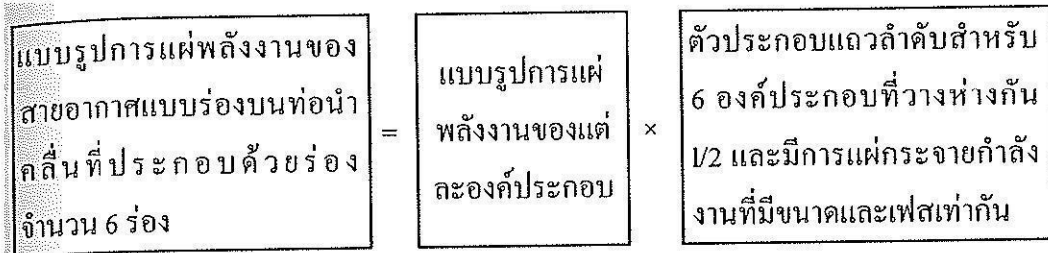
$$f(\psi) = \frac{\sin(N\psi/2)}{N \sin(\psi/2)} \quad (2-9)$$



รูปที่ 2-12 (ก) ตัวประกอบแฉวลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ (ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น $d = \frac{\lambda}{2}$

กราฟของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้วได้แสดงรูปที่ 2-12 (ก) ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงการตอบสนองของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความต่างเฟสระหว่างองค์ประกอบที่อยู่ติดกันของแฉวลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองจะมีค่าสูงสุดเมื่อความแตกต่างเฟสเป็นศูนย์ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้ชี้ไปในทิศทางบรอดไซด์ ด้วยวิธีเชิงกราฟ เราจะได้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2-12 (ข) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบเชิงขั้ว แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนี้สามารถสร้างได้โดยการวาดครึ่งวงกลมที่มีรัศมี ดังแสดงถัดลงมาจากรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากตัวอย่างเช่นถ้าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นค่ารัศมีจะเป็น

เมื่อหาค่าตัวประกอบแฉวลำดับได้แล้ว ต่อไปจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบ จากนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดของแฉวลำดับจะสามารถหาได้ โดยใช้หลักการคูณแบบรูปการแผ่พลังงาน (pattern multiplication) ซึ่งเป็นการคูณกันระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแฉวลำดับ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราพิจารณาสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นซึ่งประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างร่องและมีการแผ่พลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดจะเท่ากับ



ตัวประกอบแอมพลิจูดในกรณีนี้จะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก 6
 ตัว ซึ่งวางห่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ และแผ่พลังงานคลื่นด้วยขนาดและเฟสเท่ากัน

2.7.2 อัตราขยายของสายอากาศแอมพลิจูด

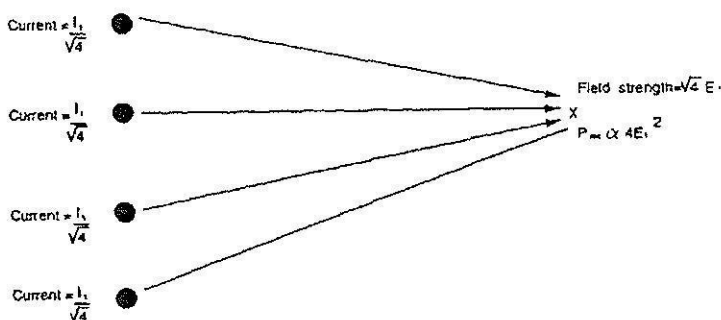
ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแอมพลิจูด (Gain of Array Antennas) มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้ง
 ในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวม
 กำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงาน
 ให้กับจุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาใน
 ทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากในทิศทางอื่นๆ เพื่อ
 ความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแอมพลิจูด ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยว
 ของสายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2-13 โดย
 กระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไป กำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะ
 สร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E_1 ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบ
 ของสายอากาศ



รูปที่ 2-13 สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_1



รูปที่ 2-14 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1



รูปที่ 2-15 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนามทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = E_1^2 \tag{2-10}$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแฉกลำดับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมดคือ P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2-14 ค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $P_1/2$ แต่เนื่องจากค่าของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของกำลังงาน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจึงเท่ากับ $I_1/\sqrt{2}$

ความเข้มของสนามที่จุด X ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบนั้น ดังนั้นความเข้มของสนามที่จุด X จากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ E_1 และถ้าคลื่นจากทั้งสององค์ประกอบมาถึงที่จุด X โดยมีเฟสตรงกันอย่างสมบูรณ์ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่จุด X จะเป็นผลรวมของความเข้มของสนามดังนี้

$$E_T = \frac{2E_1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}E_1 \quad (2-11)$$

และกำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะมีค่าเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{4}E_1)^2 = 4E_1^2 \quad (2-12)$$

ดังนั้นค่าของ E_T^2 และค่ากำลังงานที่รับได้ทั้งหมดก็จึงมีค่าเป็นสองเท่า

หากทำการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นสองเท่า ดังแสดงในรูปที่ 2-15 ก็จะได้แถวลำดับที่มีขนาด 4 องค์ประกอบ ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่พลังงานทั้งหมดเป็น P_1 กระแสในแต่ละองค์ประกอบจะมีค่าเป็น $\frac{I_1}{\sqrt{4}}$ ดังนั้นความเข้มของสนามที่ถูกสร้างขึ้นจากแต่ละองค์ประกอบจึงกลายเป็น $\frac{E_1}{\sqrt{4}}$

ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของสายอากาศทุกตัวจะต้องมีลักษณะเหมือนกันและมีกระแสเท่ากัน
2. สนามที่แผ่กระจายออกจากองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมดจะต้องมีเฟสตรงกันที่จุดรับ
3. กระแสที่เหนี่ยวนำในแต่ละองค์ประกอบจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

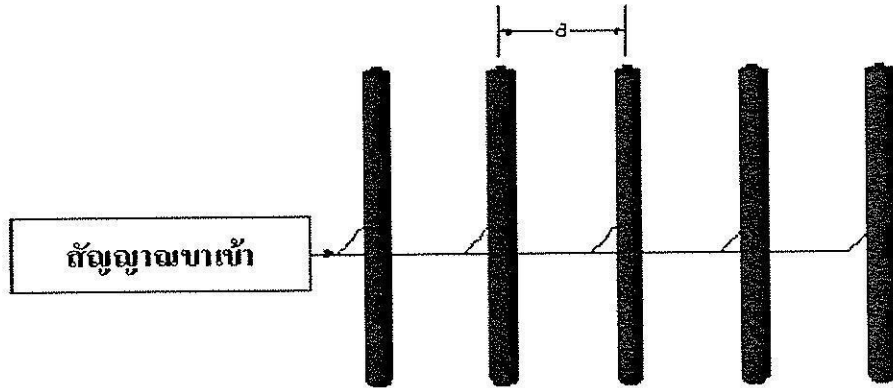
2.7.3 แถวลำดับเชิงเส้น

แถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้

ในกรณีที่องค์ประกอบห่างเท่าๆ กันทุกองค์ประกอบ จะมีการป้อนแอมพลิจูดที่เท่ากัน แต่เฟสที่ป้อนให้มันจะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2-16 เรียกว่า แถวลำดับแบบสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน กระแสที่ป้อนให้กับทุกๆ องค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่าๆ กัน โดยจะมีองค์ประกอบตัวแรกวางที่จุดกำเนิด ซึ่งการหาจุดกำเนิดในการวางองค์ประกอบนั้นจะหาได้จากสมการที่ (2-13)

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2-13)$$

$$\text{เมื่อ } \psi = kd \cos \theta + \beta$$

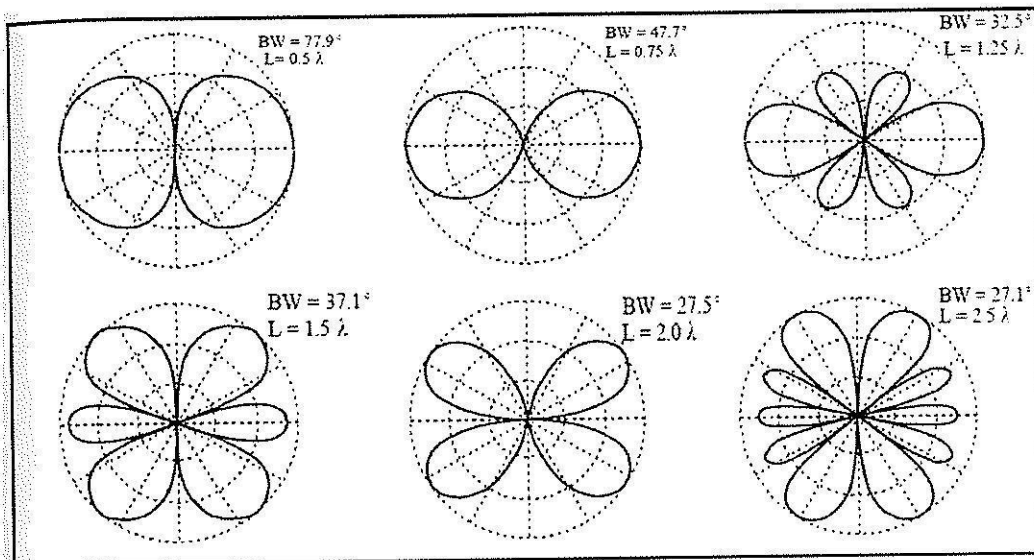


รูปที่ 2-16 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

จากรูปที่ 2-16 ในการวางองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นขององค์ประกอบ ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่ (2-13)

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

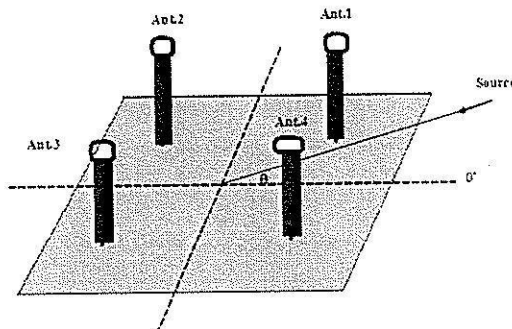
$$\text{เมื่อ } v = f\lambda ; \quad \lambda = \frac{v}{f}$$



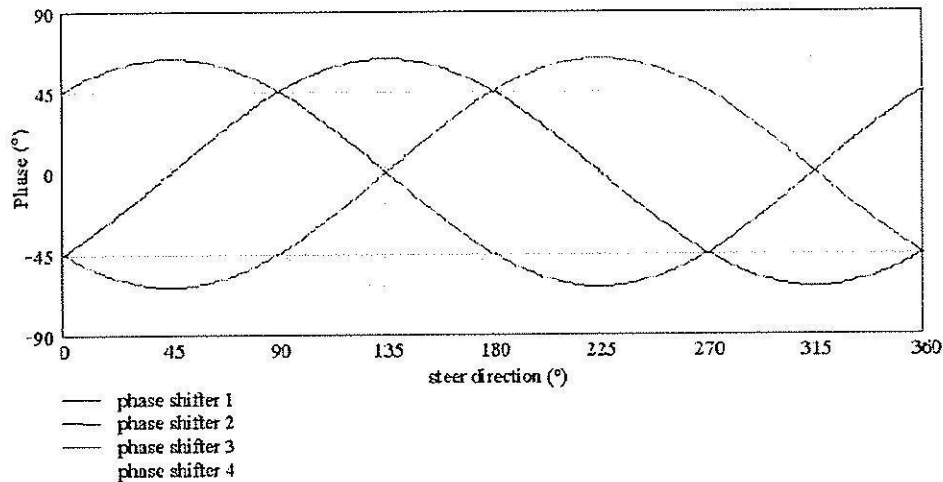
รูปที่ 2-17 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระยะห่างของสายอากาศที่แตกต่างกัน

2.7.4 แแถวลำดับเชิงระนาบ

แถวลำดับเชิงระนาบ (planar array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้ อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้ จากรูปที่ 2-18 เมื่อมีสัญญาณออกมาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเข้ามาที่มุม θ สายอากาศแต่ละต้นนั้นจะสามารถรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณได้เหมือนกันทุกต้น แต่จะแตกต่างกันที่เวลาของสายอากาศแต่ละต้นเมื่อได้รับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ดังนั้นเราจึงสามารถพลอตกราฟของเฟสที่ต่างกันของสัญญาณในแต่ละสายอากาศที่ตำแหน่งมุม θ ตั้งแต่ 0° ถึง 360° ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-18 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ



รูปที่ 2-19 กราฟความต่างเฟสที่สายอากาศแต่ละตัว

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

2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของระบบสวิทช์ลำดับเส้นซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 ภาพรวมของ MCS-51

ET-BASE AVR ATmega64/128 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR ของบริษัท Atmel ซึ่งบอร์ดนี้เลือกใช้ MCU เบอร์ ATmega64 และ ATmega128 ขนาด 64 Pin โดยในบอร์ด ET-BASE

AVR ATmega64/128 นี้จะเน้นจะเน้นการใช้งานทรัพยากรของตัว MCU เองเป็นหลัก คุณสมบัติของบอร์ดมีดังนี้

- เลือกใช้ MCU ตระกูล AVR เบอร์ ATmega64 , ATmega128 ของ Atmel ซึ่งเป็น MCU ขนาด 8-Bit โดยเลือกใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบ XTAL ค่า 16 MHz ซึ่งคุณสมบัติเด่น ๆ ของ MCU ได้แก่

- มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรม 64 KBytes สำหรับ ATmega64 และ 128K Bytes สำหรับ ATmega128 และมี RAM 4 KBytes

- มีหน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 2K Bytes สำหรับ ATmega64 และ 4 K Byte สำหรับ ATmega128 ซึ่งสามารถลบและเขียนซ้ำได้กว่า 100,000 ครั้ง

- จำนวน I/O สูงสุดถึง 53 I/O Pins

- มีวงจรสื่อสาร SPI จำนวน 1 ช่อง , I2C จำนวน 1 ช่อง , Programmable Serial USARTs จำนวน 2

ช่อง

- มี ADC ขนาด 10-Bit จำนวน 8 ช่อง

- มี Timers/Counters 8-Bit จำนวน 2 ช่อง , Timers/Counters 16-Bit จำนวน 2 ช่อง , 8-Bit PWM 2

ช่อง , Watchdog Timer , Real Time Counter

- I/O PORT 10 PIN จำนวน 6 PORT ดังนี้ PA,PB,PC,PD,PE,PF

- พอร์ต ISP LOAD สำหรับโปรแกรม MCU (ต้องใช้ร่วมกับ ET-AVR ISP หรือเครื่องโปรแกรม ISP อื่นที่มีการจัดเรียงขาสัญญาณเหมือนกัน)

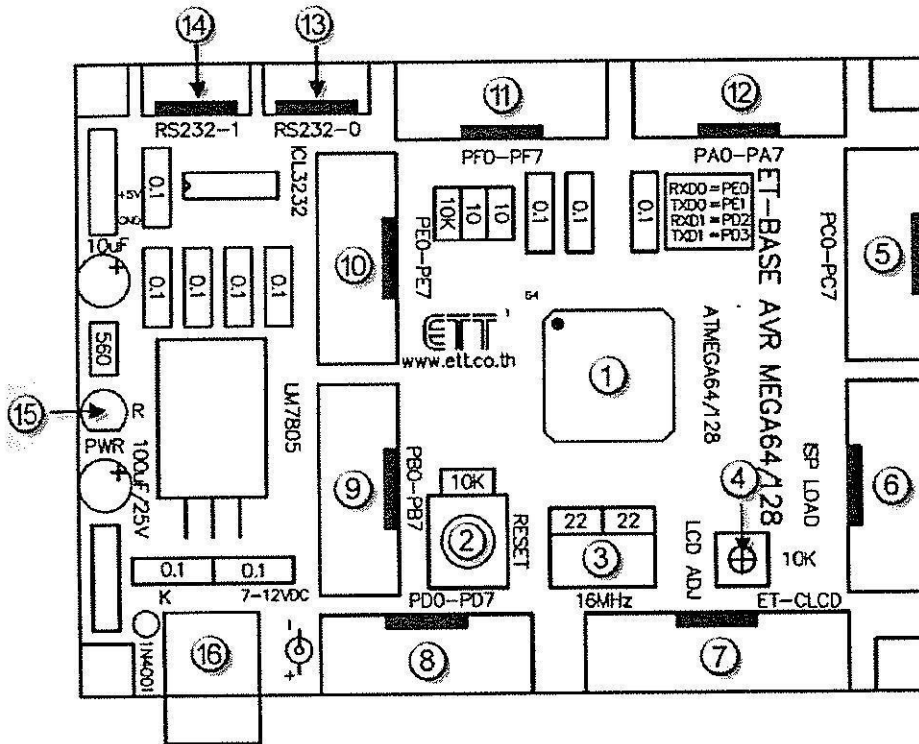
- วงจร Line Driver สำหรับพอร์ตสื่อสารอนุกรม RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่อง จะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถต่อทดลองการติดต่อสื่อสาร RS232

- วงจรเชื่อมต่อจอแสดงผล LCD แบบ Character (ET-CLCD) พร้อม VR ปรับความสว่างของ LCD ซึ่งใช้การเชื่อมต่อวงจรกับ LCD แบบ 4 Bit Interface

- วงจร Regulate ขนาด +5V / 1A สำหรับใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรให้กับจอแสดงผล LCD และอุปกรณ์ I/O ต่างๆที่ใช้กับแหล่งจ่ายขนาด +5V พร้อม LED แสดงสถานะสีแดง

- ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 X 6 cm

โครงสร้างของบอร์ดแสดงในรูปที่ 2-20



รูปที่ 2-20 โครงสร้างของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128

- หมายเลข 1 คือ MCU เบอร์ ATmega64 หรือ ATmega128 ซึ่งเป็น MCU ตระกูล AVR จาก ATMEL
- หมายเลข 2 คือ Switch RESET ใช้สำหรับ Reset การทำงานของ MCU
- หมายเลข 3 คือ Crystal ค่า 16 MHz
- หมายเลข 4 คือ ตัวต้านทานสำหรับปรับค่าความสว่างให้ LCD
- หมายเลข 5 คือ PORTC มีขนาด 8 Bit คือ PC0-PC7
- หมายเลข 6 คือ พอร์ต ISP LOAD ใช้สำหรับดาวน์โหลด Hex File ให้กับ MCU
- หมายเลข 7 คือ พอร์ต ET-CLCD สำหรับเชื่อมต่อกับ LCD ชนิด Character Type ซึ่งใช้การเชื่อมต่อแบบ 4 Bit
- หมายเลข 8 คือ PORTD มีขนาด 8 Bit คือ PD0-PD7
- หมายเลข 9 คือ PORTB มีขนาด 8 Bit คือ PB0-PB7
- หมายเลข 10 คือ PORTE มีขนาด 8 Bit คือ PE0-PE7
- หมายเลข 11 คือ PORTF มีขนาด 8 Bit คือ PF0-PF7
- หมายเลข 12 คือ PORTA มีขนาด 8 Bit คือ PA0-PA7
- หมายเลข 13 และ 14 คือ ขั้วต่อ RS232 สำหรับใช้งานทั่วไป

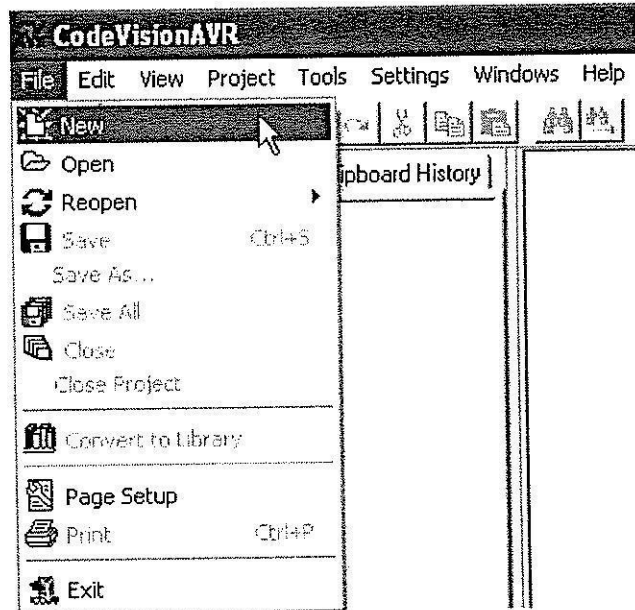
- หมายเลข 15 คือ LED Power ใช้สำหรับแสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟ +5VDC
- หมายเลข 16 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟสำหรับเลี้ยงวงจรของบอร์ด

สำหรับขั้วต่อสัญญาณของพอร์ต I/O จาก MCU นั้นจะถูกออกแบบและจัดเตรียมไว้ผ่านทางขั้วต่อแบบ IDC-Header ขนาด 10 Pin (2X5) จำนวน 6 ชุด คือ PA,PB,PC,PD,PE,PF ตามลำดับ โดยที่ขั้วต่อสัญญาณแต่ละชุด จะประกอบไปด้วยสัญญาณของ I/O ที่เชื่อมต่อมาจากขาสัญญาณของ MCU โดยตรงทั้งหมด โดยจุดเชื่อมต่อกับสัญญาณภายนอกบอร์ดมีดังนี้

- ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟสำหรับเลี้ยงวงจรของบอร์ด
- ขั้วต่อ PORTA มีขนาด 8 Bit คือ PA0-PA7
- ขั้วต่อ PORTB มีขนาด 8 Bit คือ PB0-PB7
- ขั้วต่อ PORTC มีขนาด 8 Bit คือ PC0-PC7
- ขั้วต่อ PORTD มีขนาด 8 Bit คือ PD0-PD7
- ขั้วต่อ PORTE มีขนาด 8 Bit คือ PE0-PE7
- ขั้วต่อ PORTF มีขนาด 8 Bit คือ PF0-PF7
- ขั้วต่อ ET-CLCD สำหรับเชื่อมต่อกับ LCD ชนิด Character Type
- ขั้วต่อ RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่อง จะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถต่อทดลองการติดต่อสื่อสาร RS232
- ขั้วต่อ ISP LOAD ใช้สำหรับดาวน์โหลด Hex File ให้กับ MCU

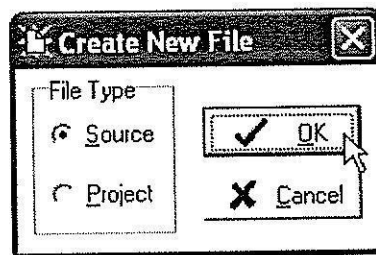
2.8.2 การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C

1. เปิดโปรแกรม CodeVisionAVR C Compiler และคลิกเลือกที่เมนูคำสั่ง File → New ดังรูปที่ 2-21



รูปที่ 2-21 การเปิดโปรแกรม CodeVisionAVR C Compiler

2. เลือก File Type เป็น Source เพื่อสร้างไฟล์ภาษาซีใหม่และคลิกปุ่ม OK ดังรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 การเลือก File Type

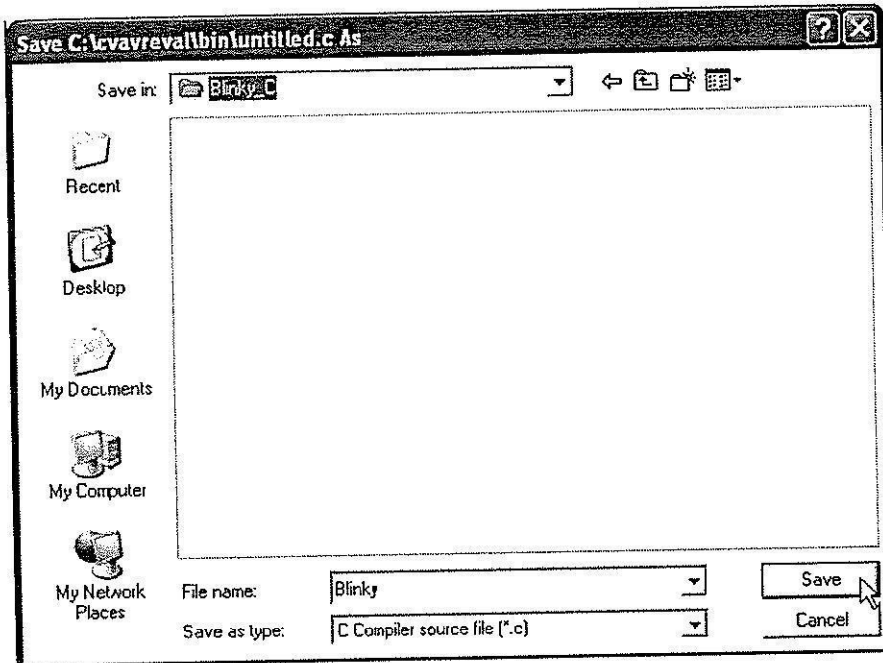
3. จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Editor ให้ทำการเขียนโปรแกรมดังตัวอย่าง

```

//*****
// Hardware = AT-AVR STAMP (Atmega64) //
// CPU = ATMEGA-Atmega64 //
// F_CPU = 16.00 MHz //
// #define _MAIN_ //
// Compiler = CodeVisionAVR V4.70 //
// Last Update = 9-02-2006 (EWH CO TH) //
// E = WWW.EWH.CO.TH //
// Description = Example: LED Blink on PortB.0 //
//*****
// CodeVisionAVR Compiler Option Setting //
// Chip type = Atmega64 //
// Program type = Application //
// Clock frequency = 16.000000MHz //
// Memory model = Small //
// External SRAM size = 0 //
// Data Stack size = 1024 //
//*****
#include <mega64.h> // Atmega64 MCU
#include <delay.h> // Delay functions
void main(void)
{
    PORTB=0x00; // PBT = 0
    DDRE=0x01; // PEO = Output
    //loop: Blink LED on PEO
    while (1)
    {
        PORTB |= 0x01; // PEO = 1 (ON LED)
        delay_ms(200); // Delay, LED Delay
        PORTB &= 0xFF; // PEO = 0 (OFF LED)
        delay_ms(200); // Delay, LED Delay
    }
}

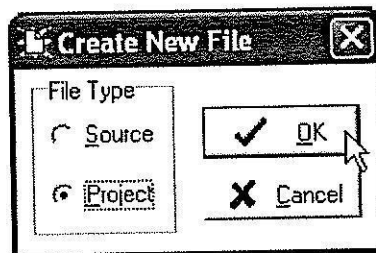
```

4. ทำการบันทึกโปรแกรมภาษาซีที่เขียนโดยเลือกเมนู File → Save ทำการตั้งชื่อไฟล์และกดปุ่ม Save ดังรูปที่ 2-23



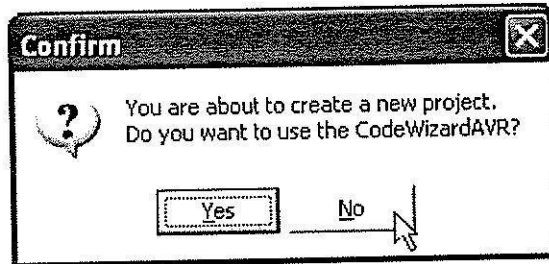
รูปที่ 2-23 การบันทึกใน โปรแกรมซี

5. เลือกที่เมนู File New และเลือก File → Type เป็น Project เพื่อสร้าง โปรเจกต์ใหม่และคลิกปุ่ม OK ดังรูปที่ 2-24



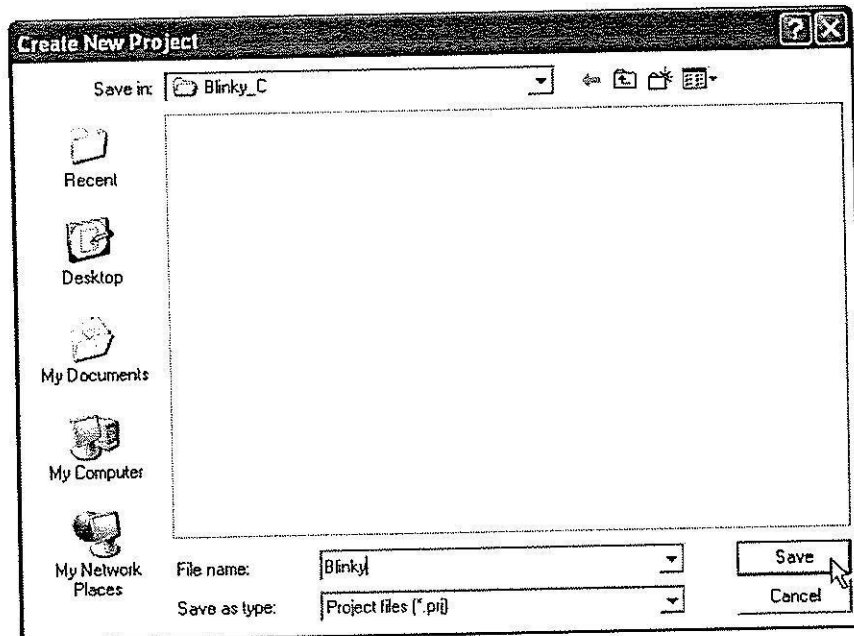
รูปที่ 2-24 การเลือกสร้างโปรเจกต์ใหม่

6. คลิกปุ่ม No เพื่อไม่ใช้ตัวช่วยในการสร้างโปรเจก (CodeWizard) ดังที่แสดงในรูปที่ 2-25



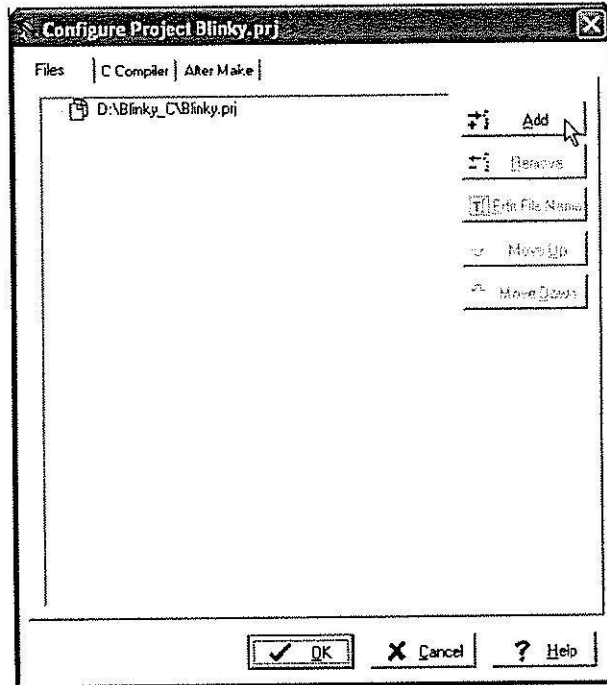
รูปที่ 2-25 หน้าต่างแสดงการไม่เลือกใช้ตัวช่วยในการสร้างโปรเจก

7. ทำการตั้งชื่อโปรเจกต์ตามต้องการและคลิกปุ่ม Save ดังรูปที่ 2-26



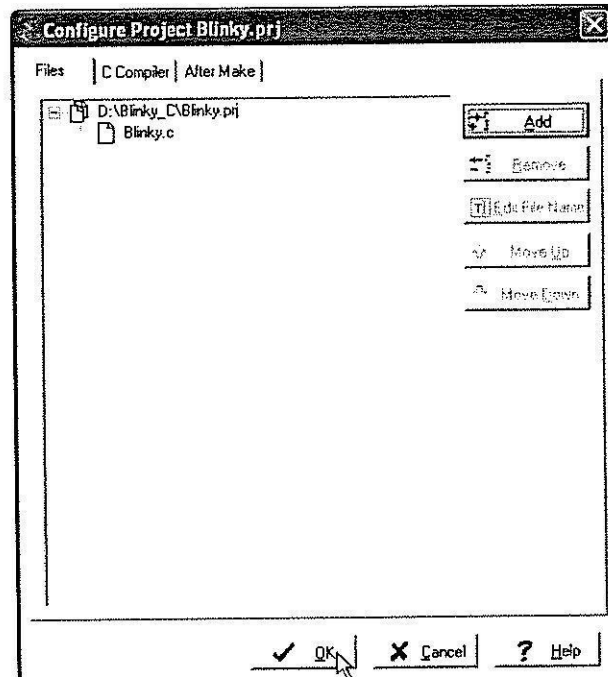
รูปที่ 2-26 การตั้งชื่อโปรเจก

8. ทำการเพิ่มไฟล์ภาษาซีที่เขียนไว้ก่อนหน้านี้เข้ามาในโปรเจกต์โดยการคลิกปุ่ม Add ดังรูปที่ 2-27



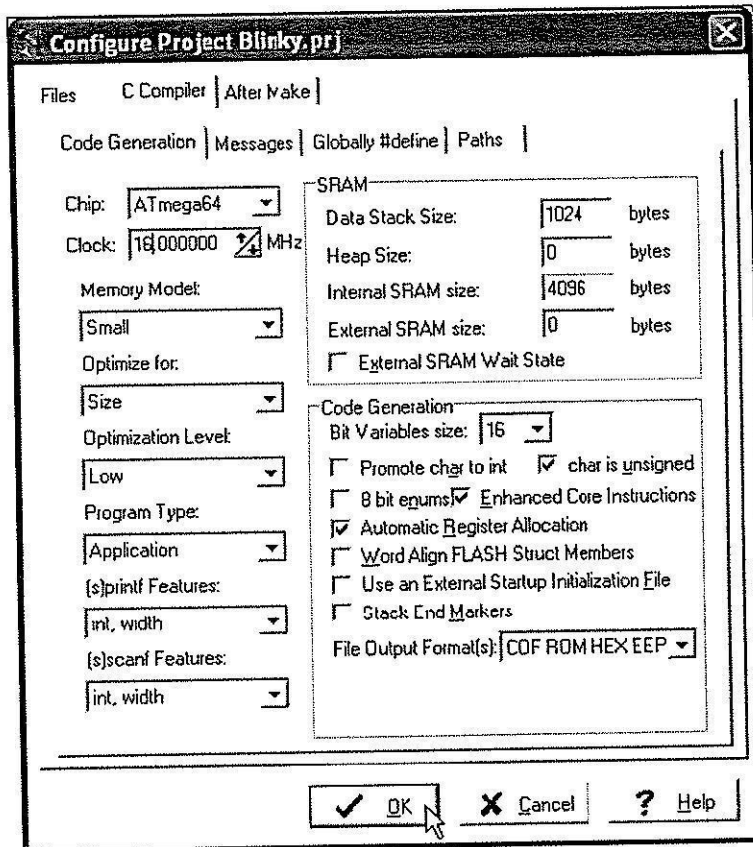
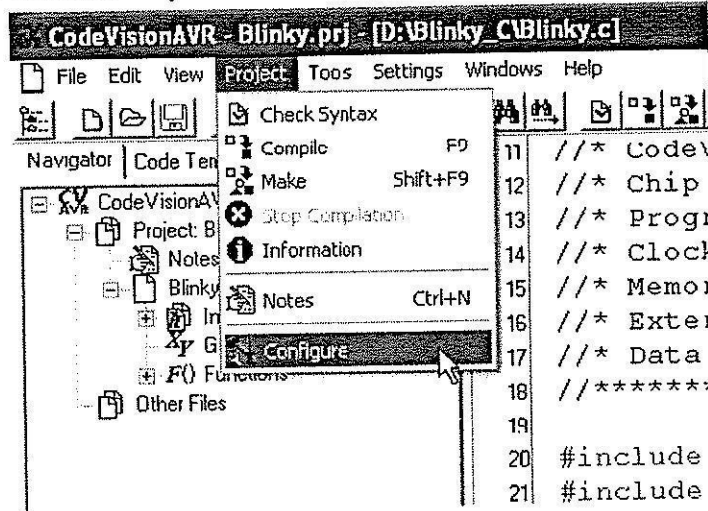
รูปที่ 2-27 การเพิ่มไฟล์ภาษาซี

9. เมื่อทุกอย่างเรียบร้อยคลิกปุ่ม OK ดังรูปที่ 2-28



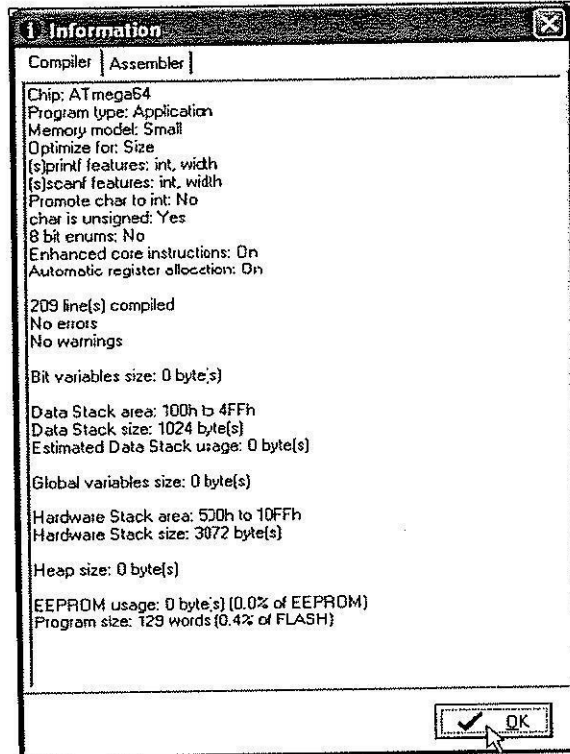
รูปที่ 2-28 แสดงการเสร็จสิ้นเมื่อกดปุ่ม OK

10. ทำการตั้งค่าต่างของโปรเจกต์โดยการคลิกเมาส์ที่เมนูคำสั่ง Project → Configure จากนั้น ทำการกำหนดเบอร์ MCU เป็น ATmega64 ค่าคริสตอลเท่ากับ 16.000000 MHz และ File Output Format(s) เป็น COF ROM HEX EEP ดังที่แสดงในรูปที่ 2-29



รูปที่ 2-29 การตั้งค่าโปรเจกต์

11. ให้ทำการสั่งแปลโปรแกรมที่เราเขียนขึ้น โดยการคลิกเมาส์ที่เมนูคำสั่ง Project → Make ซึ่งหลังจากแปลโปรแกรมแล้วได้ผลถูกต้องและไม่เกิดข้อผิดพลาดใด ๆ จะปรากฏข้อความ No errors, No warnings ต่อจากนี้ผู้ใช้ก็สามารถนำ Hex File ที่ได้จากสั่งแปลโปรแกรมนี้ไปทำการ Download ลง MCU ได้ทันทีดังที่แสดงในรูปที่ 2-30

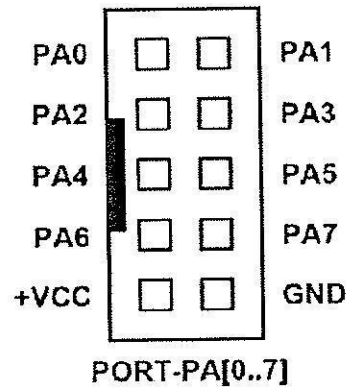


รูปที่ 2-30 การแปลโปรแกรม

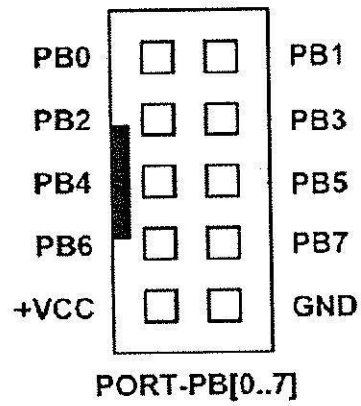
2.8.3 การโปรแกรมพอร์ตอินพุต เอาต์พุต

ส่วนมากนิยมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมอุปกรณ์หรือวงจรรีเลย์หรือทรานซิสเตอร์ภายนอกการที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้จะต้องติดต่อผ่านทางพอร์ตต่างๆ ของ Atmega 128 ซึ่งจะมีการต่อขาสัญญาณ I/O ออกมาจัดเรียงให้เป็นพอร์ต PA,PB,PC,PD,PE,PF และพอร์ต ET-CLCD เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน พร้อมทั้งพอร์ตสำหรับควาน์โพลดโปรแกรม นอกจากนี้ยังได้เพิ่มวงจรไคร์ฟเวอร์ RS-232 เข้าไปด้วยเพื่อให้สามารถใช้งานทางด้านพอร์ตอนุกรม RS-232 ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น

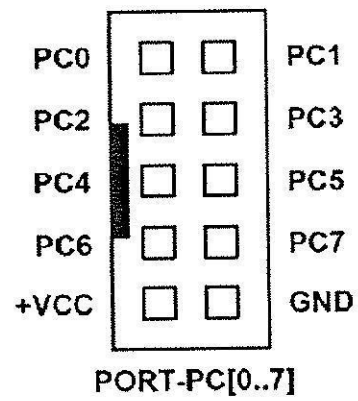
พอร์ต PA มีขนาด 8 บิต



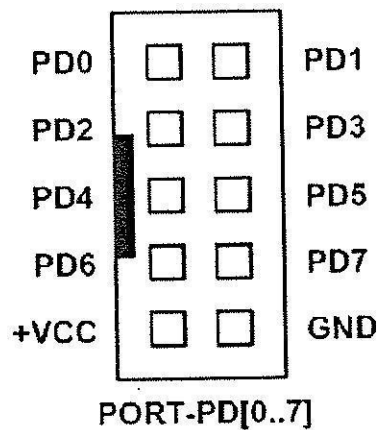
พอร์ต PB มีขนาด 8 บิต



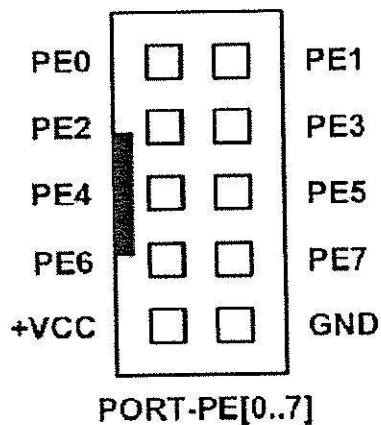
พอร์ต PC มีขนาด 8 บิต



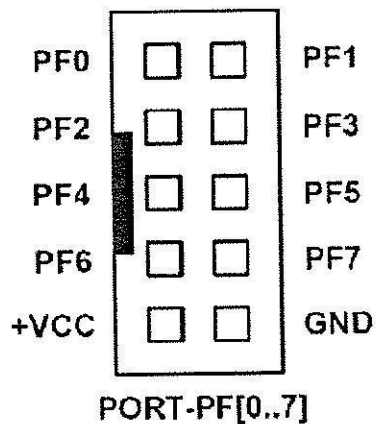
พอร์ต PD มีขนาด 8 บิต



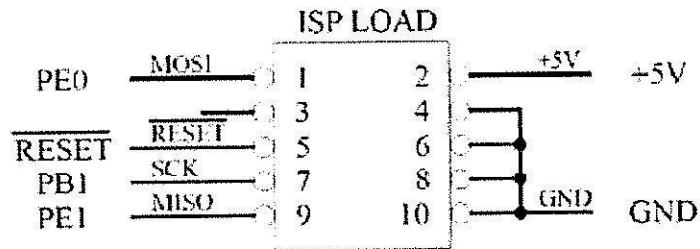
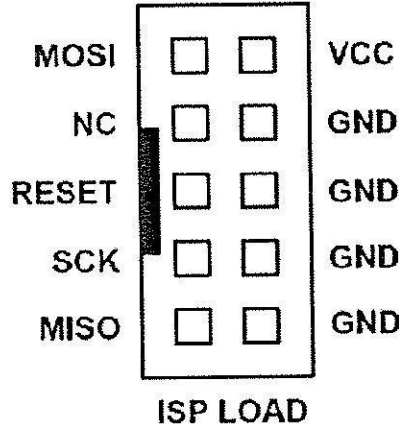
พอร์ต PE มีขนาด 8 บิต



พอร์ต PF มีขนาด 8 บิต

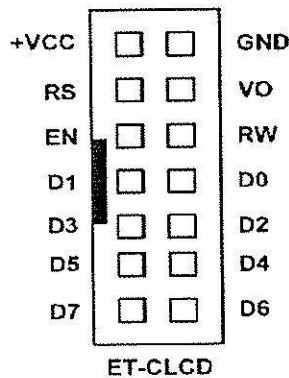


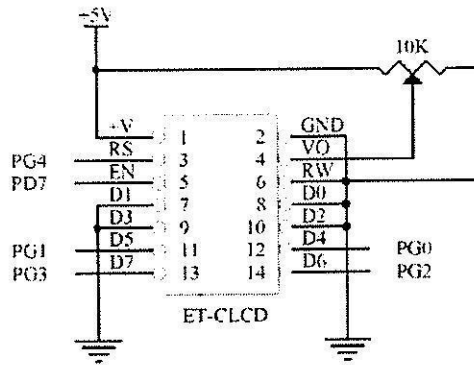
พอร์ต ISP LOAD



รูปที่ 2-31 วงจรส่วนที่เชื่อมต่อกับ ISP LOAD

พอร์ต ET-CLCD ใช้กับ Character Type LCD โดยใช้การเชื่อมต่อแบบ 4 บิต โดยสัญญาณที่ใช้เชื่อมต่อกับ LCD จะเป็นสัญญาณจากพอร์ต PG และ PD (PD7) โดยในการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากขั้วต่อของพอร์ต LCD ไปยังจอแสดงผล LCD นั้นให้ยึดชื่อขาสัญญาณเป็นจุดอ้างอิง โดยให้ต่อสัญญาณที่มีชื่อตรงกันเข้าด้วยกันให้ครบทั้ง 14 เส้น

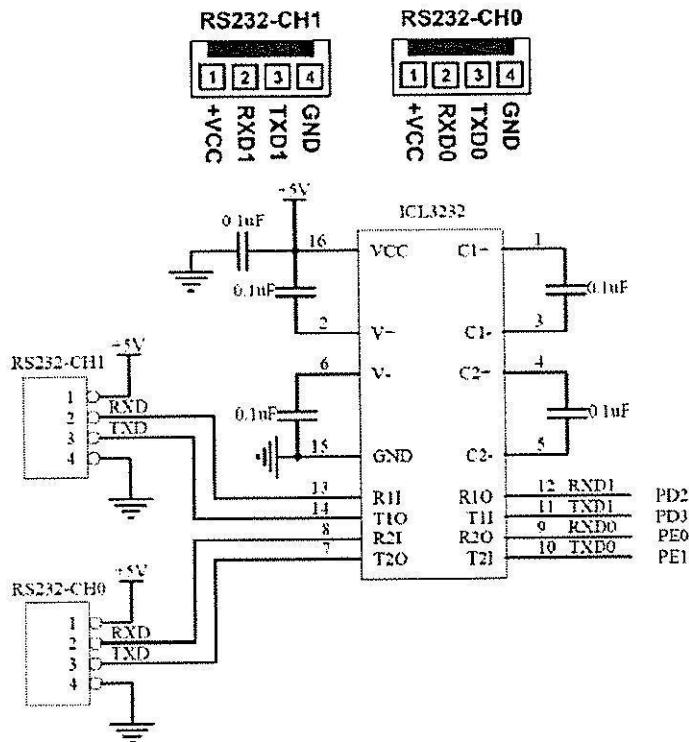




1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
GND	+VCC	VO	RS	RW	EN	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7

รูปที่ 3-32 การจัดเรียงขาสัญญาณของ Character LCD มาตรฐาน

พอร์ต RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่อง จะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1)



รูปที่ 3-33 วงจรส่วนที่เชื่อมต่อกับ RS232

2.9 กล่าวสรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ เริ่มด้วยหลักการพื้นฐานของระบบสายอากาศ
แก่งซึ่งกล่าวถึงทั้งแบบสวิตช์ลาคัสสันและแบบปรับตัวพร้อมกับการเปรียบเทียบสมรรถนะทั้งสองระบบ และ
ชี้ให้เห็นถึงข้อดีของสายอากาศแบบสวิตช์ลาคัสสันที่มีเหนือกว่าสายอากาศแบบปรับตัว จากนั้นได้กล่าวถึง
ข้อมูลพื้นฐานของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ตามด้วยหลักการพื้นฐานของสายส่งสัญญาณ
ไมโครสตริป สายอากาศอากาศไมโครสตริป และสายอากาศแฉวลำดับ สุดท้ายบทนี้จบลงด้วยการกล่าวถึง
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

บทที่ 3

ชุดระบบต้นแบบ

3.1 กล่าวนำ

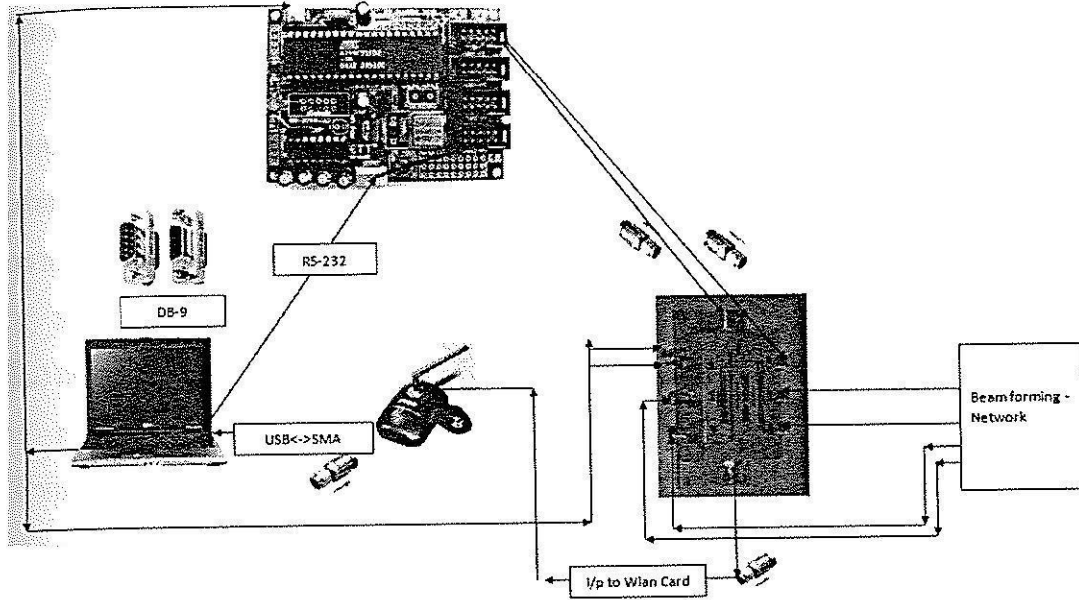
จากแรงจูงใจที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 และทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในบทนี้จะกล่าวถึงชุดระบบต้นแบบของระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งได้พัฒนาชุดระบบต้นแบบใน 2 ลักษณะด้วยกันได้แก่ แบบอัตโนมัติธรรมดา และแบบอัตโนมัติแบบพกพา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2 ชุดระบบต้นแบบของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติ

ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับร่วมกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix และสวิตช์ โดยมีการควบคุมสวิตช์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในส่วนของวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix จะประกอบด้วยตัวเก็บเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90° (90° Hybrid coupler) 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45° (45° phase shifter) 2 ตัว ซึ่งในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ภาพรวมของชุดระบบต้นแบบ

ภาพรวมของชุดระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติต้นแบบแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทำหน้าที่ในการควบคุมการรับสัญญาณจากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ผ่าน RS-232 การควบคุมดังกล่าวหมายถึงการเลือกลำคลื่นที่มีทั้งหมด 4 ลำคลื่น ซึ่งจะเลือกผ่านสวิตช์ ZSDR-425 ส่วนการรับสัญญาณจากสายอากาศจะรับผ่านการ์ดรับสัญญาณไร้สาย WL-U356A module จากบริษัท PLANET Technology Corporation ซึ่งเมื่อประกอบกันเป็นกล่องสำเร็จรูปดังที่แสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-1 ภาพรวมของชุดระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติต้นแบบ



รูปที่ 3-2 ภาพหลังจากการประกอบชุดระบบต้นแบบ

คำอธิบายชุดระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติต้นแบบจากรูปที่ 3-1

1. ในส่วนของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix สัญญาณขาเข้าจะเป็นสัญญาณที่มาจากสายอากาศแถวลำดับซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งสัญญาณชนิดแกนร่วม RG-316 และส่วนที่เป็นขาออกจะเชื่อมต่อกับสวิตช์ ZSDR-425 ด้วยสายชนิดเดียวกัน สัญญาณขาออกมีทั้งหมด 4 สัญญาณซึ่งเป็นสัญญาณที่รับมาจากลำคลื่นที่มีทิศทางที่แตกต่างกัน (ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4)
2. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 จะทำหน้าที่เรียงลำดับของลำคลื่น (ขาออกของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น) เพื่อส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม
3. สายแปลง USB พอร์ตขนาดไปเป็นพอร์ตอนุกรม โดยต้นสาย (USB) เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องคอมพิวเตอร์และปลายสายเชื่อมต่อไปยังพอร์ตอนุกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51
4. สายเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมเชื่อมต่อกับสายแปลง USB พอร์ตไปเป็นพอร์ตอนุกรม
5. สาย RG-316 เป็นสายที่ใช้เชื่อมต่อกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix โดยผ่าน SMA-Connector
6. การ์ดรับสัญญาณไร้สายแบบภายนอก WL-U356A module รับสัญญาณขาเข้าจากสวิตช์ ZSDR-425 แล้วส่งค่าที่รับได้ไปคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณ โดยการ์ดรับสัญญาณไร้สายดังกล่าวจะอาศัยไฟเลี้ยงจากเครื่องคอมพิวเตอร์
7. SMA-Connector เป็นตัวต่อของสาย RG-316 ที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์กับ สวิตช์ ZSDR-425 กับการ์ดรับสัญญาณไร้สาย
8. สายอากาศโมโนโพลที่มีอัตราขยายเท่ากับ 5-dBi ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz จำนวน 4 ต้นวางเรียงกันเป็นแถวลำดับโดยมีระยะห่างของสายอากาศที่แน่นอนเท่ากับ 6.25 เซนติเมตร และเชื่อมต่อกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix โดยผ่าน SMA-Connector
9. สวิตช์ ZSDR-425 50 SP4T Pin Diode, TTL Driver 10 to 2500 MHz เชื่อมต่อกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix โดยผ่าน SMA-Connector

3.2.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำภาษาแอสเซมบลีมาใช้ควบคู่กับ Visual C# ในการจัดการควบคุมสวิตช์ โดยที่ Visual C# สามารถส่งบิตควบคุมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณ ในการเขียนโปรแกรมนั้นเราใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ET-BASE51 V2.0 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 ขนาด 40 Pin ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C51ED2 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดย MCU รุ่นนี้จะบรรจุ

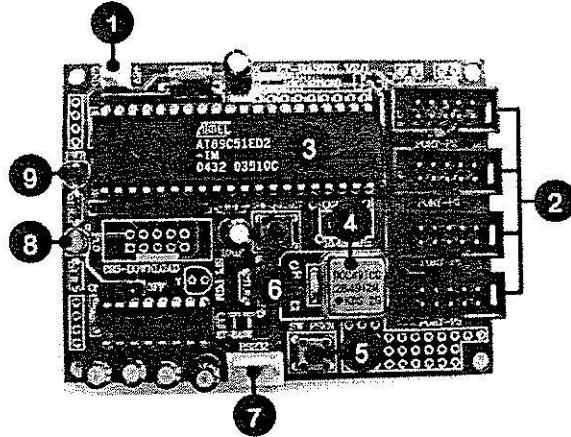
อยู่ภายในตัวถังแบบ DIP40 โดย MCU ตัวนี้จะมีจุดเด่น คือ เรื่องในการประมวลผลซึ่งสามารถทำงานได้ด้วย ความถี่สูงสุด 60 MHz ที่ 12 Clock / 1 Machine Cycle นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นพร้อมด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน ต่างๆที่จำเป็นต่อการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 2 KByte หรือหน่วยความจำใช้งานแบบ RAM ซึ่งมีมากถึง 1792 Byte เป็นต้น

- คุณสมบัติของบอร์ด

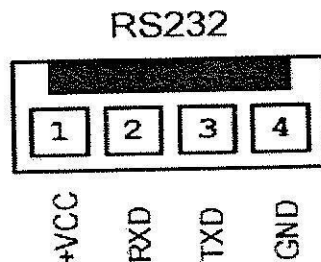
1. เลือกใช้ MCU ตระกูล MCS-51 เบอร์ AT89C51ED2 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยเลือกใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบ Oscillator Module ค่า 29.4912 MHz ซึ่งสามารถกำหนดการทำงานของ MCU ให้ทำงานในโหมดความเร็ว 2 เท่า (X2 Mode) ได้ ทำให้ MCU สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 58.9824 MHz โดยคุณสมบัติเด่นๆ ได้แก่
 - มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรมขนาด 64 Kbyte
 - มี EEPROM ขนาด 2Kbyte สำหรับเก็บข้อมูล และสามารถเขียนซ้ำได้กว่า 1 ล้านครั้ง
 - มีพอร์ตขนาน I/O ขนาด 8 บิต จำนวน 4 พอร์ต (P0 P1 P2 P3)
 - มี RAM ใช้งาน 1792 Byte เพียงพอต่อการใช้งาน
 - มีวงจรสื่อสารอนุกรม UART จำนวน 1 พอร์ต และวงจรสื่อสาร SPI จำนวน 1 พอร์ต
 - มีวงจร Timer/Counter ขนาด 16 บิต จำนวน 3 ชุด
 - มีวงจร Watchdog Power-ON Reset Capture/Compare PWM
2. มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมแบบ RS 232 จำนวน 1 ช่อง สำหรับใช้ในการ Download โปรแกรมให้กับบอร์ด และประยุกต์ใช้งานทั่วไป
3. มีขั้วต่อสัญญาณ I/O แบบ TTL แบบ Header ขนาด 2 5 จำนวน 4 ชุด (P0 P1 P2 P3)
4. มี LED แสดงสถานะแหล่งจ่าย Power และ Self-Test สำหรับใช้ทดสอบการทำงานของบอร์ด
5. ใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด +5VDC
6. ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 x 6 cm.

โครงสร้างบอร์ด ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2)

รูปที่ 3-3 แสดงถึงส่วนประกอบต่างๆของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ รวมทั้งพอร์ตเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถใช้งานร่วมกับบอร์ด ET-BASE51 V2.0 (AT89C51ED2) ได้



รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบต่างๆของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3-4 พอร์ตอนุกรม

- หมายเลข 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรของบอร์ด ใช้กับแหล่งจ่ายไฟตรง +5VDC
- หมายเลข 2 คือ PORT-P2, PORT-P0, PORT-P1 และ PORT-P3 ตามลำดับ
- หมายเลข 3 คือ MCU เบอร์ AT89C51ED2 ซึ่งเป็น MCU ตระกูล MCS51 จาก ATMEL
- หมายเลข 4 คือ Oscillator Module ค่า 29.4912 MHz
- หมายเลข 5 คือ SW PSEN ใช้สำหรับกำหนดสถานะลอจิก "0" ให้ขา PSEN ใช้สำหรับใน

ขั้นตอนของการ Download HEX File ให้กับหน่วยความจำ Flash ของ MCU ในบอร์ด

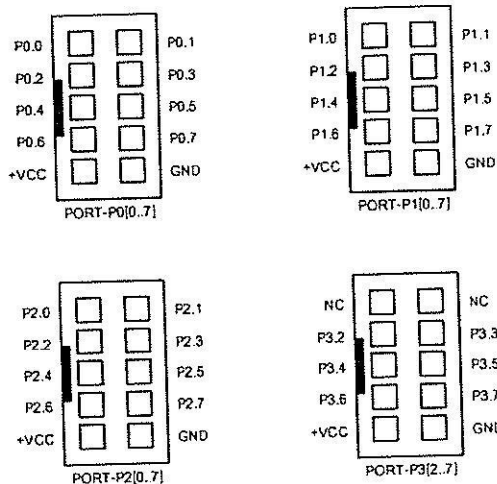
หมายเลข 6 คือ SW RESET ใช้สำหรับรีเซ็ตการทำงานของ MCU ภายในบอร์ด

อุปกรณ์มาตรฐาน RS232 และใช้เป็น ISP Download Connector สำหรับ Download HEX File ให้กับ MCU ของบอร์ด

หมายเลข 8 คือ LED แสดงสถานะของ P1.0 ในกรณีที่เลือก Jumper ไว้ทางด้าน ON เพื่อ Test

หมายเลข 9 คือ LED Power สีแดง ใช้แสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรของบอร์ด
ขั้วต่อสัญญาณต่างๆ

สำหรับขั้วต่อของ I/O จาก MCU นั้น จะถูกออกแบบและจัดเตรียมไว้ผ่านทางขั้วต่อแบบ IDE Header ขนาด 2.5 จำนวน 4 ชุด คือ PORT-P0, PORT-P1, PORT-P2 และ PORT-P3 ตามลำดับ โดยที่ ขั้วต่อของสัญญาณแต่ละชุด จะประกอบไปด้วยสัญญาณของ I/O ที่เชื่อมต่อมาจากขาสัญญาณของ MCU โดยตรงทั้งหมด โดยแต่ละพอร์ตจะมีสัญญาณพอร์ตละ 8 บิต ยกเว้น PORT-P3 ซึ่งจะมีเพียง 6 บิต คือ P3.2-P3.7 เท่านั้น ส่วน P3.0 และ P3.1 จะถูกสงวนไว้ใช้งานเป็นขาของสัญญาณ RXD และ TXD สำหรับรับส่งข้อมูลของ RS232 ซึ่งสัญญาณทั้ง 2 เส้น (P3.0 P3.1) จะถูกเชื่อมต่อผ่านวงจร Line Driver (MAX232) สำหรับแปลงระดับสัญญาณจากระดับลอจิก TTL ของ MCU ให้เป็นสัญญาณแรงดันตามมาตรฐานของ RS 232 โดยสัญญาณที่ได้รับการแปลงเป็นแบบ RS232 จะถูกเชื่อมต่อไปรอไว้ที่ขั้วต่อแบบ CPA ขนาด 4 PIN (RS232) โดยการจัดเรียงสัญญาณของแต่ละชุดจะเป็นดังรูปที่ 3-5 ซึ่งแสดงการจัดเรียงสัญญาณของพอร์ตต่างๆ ที่สามารถอ้างอิงในระดับบิตได้

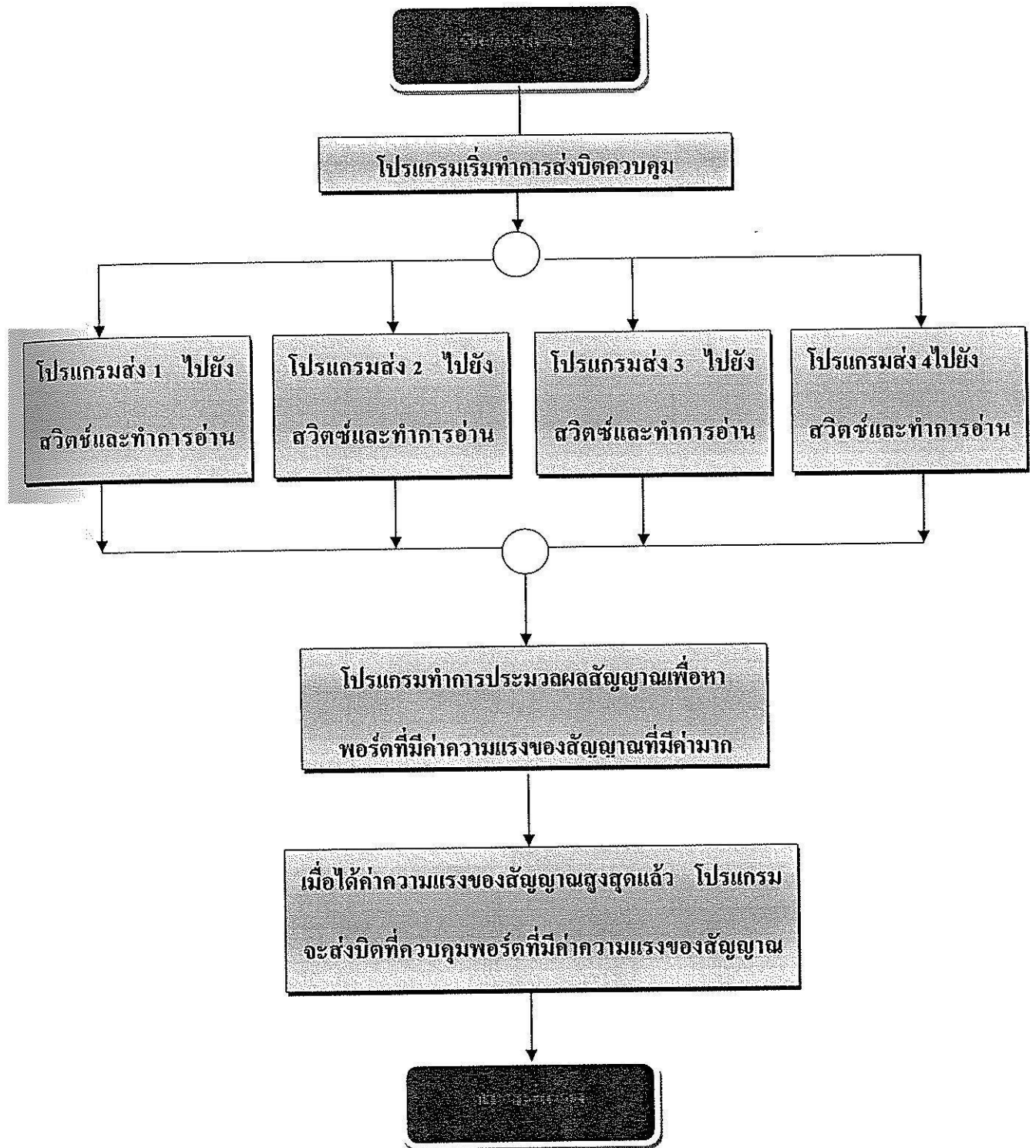


รูปที่ 3-5 การจัดเรียงสัญญาณของพอร์ต I/O ต่างๆของบอร์ด ET-BASE51 V2.0

3.2.3 โปรแกรมควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติ

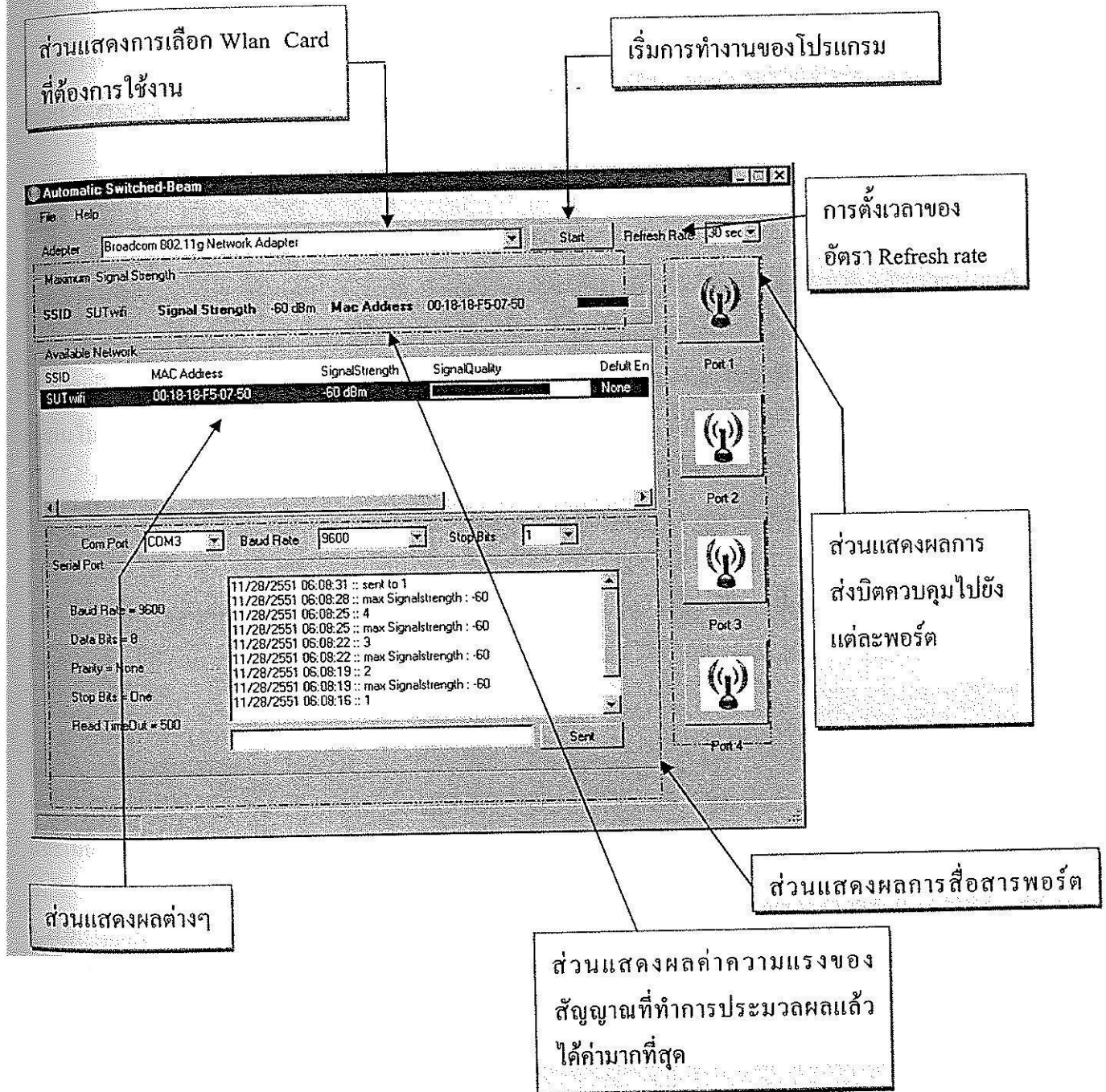
โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้นถูกสร้างและพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยชิ้นนี้จากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C# ผ่านทางโปรแกรม Microsoft Visual C# 2005 Express Edition ในส่วนของโปรแกรมได้ผนวกการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 กับตัวโปรแกรมผ่านทางพอร์ตอนุกรม เพื่อส่งบิตควบคุมจากตัวโปรแกรมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ และจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังสวิตช์ หลังจากที่โปรแกรมทำการส่งบิตควบคุมในแต่ละครั้ง โปรแกรมจะทำการอ่านค่าความแรงของสัญญาณจากแต่ละพอร์ตนำมาเก็บค่าไว้ เมื่อจบกระบวนการนี้ถือว่า โปรแกรมทำการประมวลผลสัญญาณในแต่ละพอร์ตครบ 1 รอบ ตัวโปรแกรมจะทำงานเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทั้ง 4 พอร์ต (4 ลำคลื่น) สุดท้ายจะนำค่าของความแรงของสัญญาณที่ได้เก็บไว้ในแต่ละรอบของการประมวลผลสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ว่าสัญญาณที่รับมาจากพอร์ตไหนมีค่าความแรงของสัญญาณมากที่สุด จากนั้น โปรแกรมจะส่งบิตควบคุมไปยังสวิตช์เพื่อสั่งให้สวิตช์สับลงไปยังพอร์ตนั้น ถือเป็นการทำงานครบ 1 รอบของการประมวลผลสัญญาณของโปรแกรม ทั้งนี้ในตัวโปรแกรมยังสามารถปรับเวลาหน่วงในการทำงานในแต่ละรอบของการประมวลผลสัญญาณได้โดยการปรับตั้งค่าบริเวณ Refresh Rate ซึ่งอยู่บริเวณมุมขวาสุดของหน้าต่างโปรแกรม

รูปที่ 3-6 แสดงแผนผังลำดับการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะเริ่มทำการอ่านค่าอินเตอร์เฟซต่างๆ ได้แก่ การ์ดรับสัญญาณไร้สายที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และพอร์ตอนุกรมที่ถูกเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มตั้งค่าอัตราเร็วของการสื่อสารข้อมูล และเริ่มส่งบิตควบคุม โปรแกรมนี้ถูกตั้งชื่อว่า Automatic Switched-Beam ซึ่งส่งอักขระ 1 ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบกับโค้ดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีว่า อักขระ 1 ที่ส่งมานั้น คือพอร์ต 1 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่ง 1 ไปยังขาคอนโทรล 1 และจะทำการส่ง 0 ไปยังขาคอนโทรล 2 สวิตช์ก็จะสับลงที่พอร์ตที่ 1 หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มรับค่าความแรงของสัญญาณมาเก็บไว้ และโปรแกรมจะทำงานดังข้างต้นไปจนครบทั้งหมด 4 พอร์ต เมื่อทำการรับค่าความแรงของสัญญาณจนครบทั้ง 4 พอร์ตแล้ว โปรแกรมจะเริ่มเปรียบเทียบค่าและหาค่าความแรงของสัญญาณที่สูงสุด เมื่อหาค่าความแรงของสัญญาณสูงสุดได้แล้ว โปรแกรมจะทำการส่งบิตควบคุมประจำพอร์ตไปยังพอร์ตที่มีค่าความแรงของสัญญาณสูงสุดนั้นถือเป็นการจบโปรแกรม



รูปที่ 3-6 แผนผังการทำงานของโปรแกรม Automatic Switched-Beam


รูปที่ 3-7 แสดงหน้าต่าง โปรแกรมพร้อมคำอธิบายส่วนต่างๆ ที่สำคัญของโปรแกรม อาทิเช่น การตั้งค่าของ refresh rate ของ โปรแกรม การแสดงสถานะของสัญญาณที่มีความแรงของสัญญาณสูงสุด การสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม เป็นต้น



รูปที่ 3-7 โปรแกรม Automatic Switched-Beam

คำอธิบายส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม

ส่วนแสดงการเลือก Wlan Card
ที่ต้องการใช้งาน

ในส่วนนี้เราสามารถเลือก Wlan Card ที่ต้องการใช้งาน ในการอ่านค่า
ความแรงของสัญญาณได้ โดยโปรแกรมจะทำการตรวจหา Wlan card ทุกตัวที่ถูกติดตั้งในคอมพิวเตอร์แต่
ละเครื่อง เราสามารถเลือกได้โดยทำการคลิกที่ปุ่ม Drop down list 

ส่วนแสดงผลต่างๆ

ในส่วนนี้โปรแกรมจะแสดงผลค่าต่างๆดังนี้

Service Set Identifier (SSID) ทำหน้าที่เป็นชื่อเรียกของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN แต่ละ
เครือข่าย โดยการตั้งชื่อ SSID นั้นต้องไม่เกิน 32 ตัวอักษร และ ตัวพิมพ์ใหญ่ตัวพิมพ์เล็กก็มีค่าต่างกันด้วย

MAC Address เป็นแอดเดรสที่มาพร้อมกับการ์ด LAN ซึ่งเป็นแอดเดรสที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลง
ได้ และเป็นแอดเดรสที่ไม่มีโอกาสซ้ำกันไม่ว่าจะอยู่ในเครือข่ายใดก็ตาม เนื่องจากเป็นแอดเดรสที่ถูกบรรจุ
อยู่บนไมโครชิป และถูกกำหนดไว้เรียบร้อยแล้วจากบริษัทผู้ผลิตการ์ด LAN

Signal Strength เป็นค่าความแรงของสัญญาณ โดยทำการวัดในหน่วย dBm

Signal Quality เป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพในการรับสัญญาณ

Default Authentication เป็นค่าที่ใช้ระบุมาตรฐาน มาตรฐานของเครือข่ายในการพิสูจน์บุคคลใช้
งาน Channel เป็นค่าที่บอกถึงช่องสัญญาณที่ใช้ ซึ่งในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้จะมีการใช้ทั้งหมด 11
ช่องสัญญาณ ส่วนมากนิยมใช้ช่องสัญญาณที่ 1,6 และ 11 เพื่อป้องกันการรบกวนกันของช่องสัญญาณ

การตั้งเวลาของอัตรา Refresh

ในส่วนนี้จะเป็นการตั้งเวลาหน่วงในการประมวลผลของโปรแกรมใน
แต่ละรอบ เช่น หากตั้งไว้ที่ 30 sec โปรแกรมจะทำงานดังฟังก์ชันงานเป็นจำนวน 1 รอบ
และเมื่อปล่อยทิ้งไว้สัก 30 sec ตามที่ตั้งไว้โปรแกรมจะเริ่มทำงานใหม่อีกครั้ง ทุกๆ 30 วินาที

เริ่มการทำงานของโปรแกรม

ให้เริ่มทำงาน

ในส่วนนี้ เมื่อทำการคลิกที่ปุ่ม

Start

เป็นการสั่งโปรแกรม

ส่วนแสดงผลการส่งปิดควบคุม

ไปยังแต่ละพอร์ต

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลว่าโปรแกรมได้ทำการส่ง
ปิดควบคุมสวิตช์ไปยังพอร์ตใดบ้างแล้ว



โดย ลักษณะนี้ จะบ่งบอกว่าโปรแกรมกำลังส่งบิตควบคุมให้กับพอร์ตนี้



โดย ลักษณะนี้ จะบ่งบอกว่าโปรแกรมได้ส่งบิตควบคุมไปแล้ว

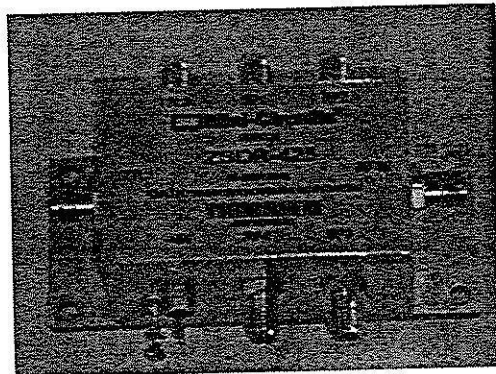
ส่วนแสดงผลการสื่อสารพอร์ต

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนแสดงผลเกี่ยวกับการสื่อสารพอร์ต

อนุกรมโดยจะมีรายละเอียดดังนี้

- Com port บ่งบอกว่าพอร์ตที่เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นพอร์ตอนุกรมว่าเป็นพอร์ตอนุกรมหมายเลขใด
- Baud rate เป็นค่าที่ใช้บอกอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับพอร์ตอนุกรม

สวิตช์ ZSDR-425 50Ω SP4T Pin Diode, TTL Driver 10 to 2500 MHz



รูปที่ 3-8 สวิตช์ ZSDR-425

เป็นสวิตช์ 1 อินพุต 4 เอาท์พุต ทำงานที่ความถี่ 10 MHz ถึง 2.5GHz โดยการทำงานของสวิตช์ที่แสดงในรูปที่ 3-8 ต้องอาศัยไฟเลี้ยง 5 V (DC) พร้อมทั้งบิตควบคุมที่ขาคอนโทรลของสวิตช์ทั้ง 2 ขา แต่ใน

การใช้งานในระบบสวิตช์ล้าสมัยแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้น จะทำการใช้งานสวิตช์ โดยเปลี่ยนเป็น 4 อินพุต 1 เอาท์พุตแทน เพื่อทำการรับค่าสัญญาณไร้สายจากวงจรต่อรูปล้าสมัยซึ่งมีทั้งหมด 4 พอร์ต และนำค่าเอาท์พุตที่ได้ ไปเป็นอินพุตของการ์ดรับสัญญาณไร้สาย

- บิตที่ใช้ควบคุมขาคอนโทรลของสวิตช์

ในการควบคุมสวิตช์นั้นจะต้องทำการควบคุมสวิตช์ทั้งหมด 2 ขา โดยมีการอ้างอิงตามบิตควบคุมของสวิตช์ดังตารางที่ 3-1 เช่น พอร์ต 1 บิตควบคุมคือ 10 หากทำการส่งค่า 10 ไปยังสวิตช์ สวิตช์จะสับลงที่พอร์ตที่ 1 ในส่วนตารางที่ 3-2 นั้นแสดงถึงค่าอักขระพิเศษที่จะต้องทำการส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า และส่งบิตควบคุมไปยังสวิตช์เพื่อให้สวิตช์ทำงานตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงบิตควบคุมของสวิตช์

Port	TTL1	TTL2
1	1	0
2	1	1
3	0	1
4	0	0

ตารางที่ 3-2 ASCII ที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่า

ฐานสอง	ฐานสิบหก	อักขระ
0011 0001	31	1
0011 0010	32	2
0011 0011	33	3
0011 0100	34	4

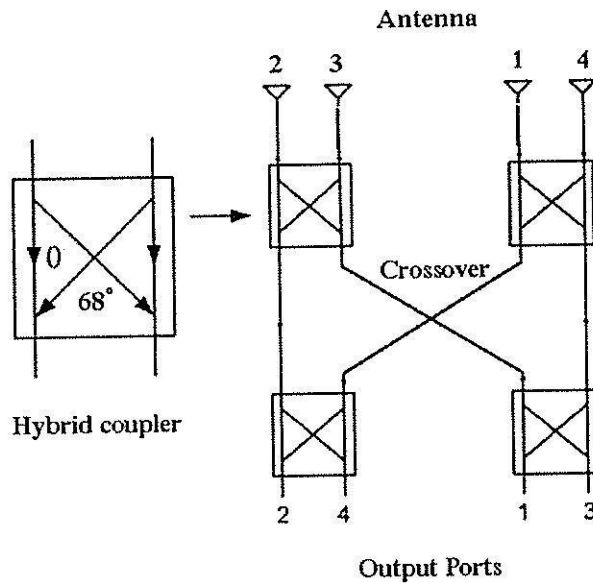
การทำงานของโปรแกรมร่วมกับสวิทช์และไมโครคอนโทรลเลอร์

เมื่อผู้ใช้งานคลิกที่ปุ่ม โปรแกรมจะเริ่มทำการอ่านค่าอินเทอร์เฟซต่างๆ ได้แก่การ์ดรับสัญญาณไร้สายที่ถูกติดตั้งอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ พอร์ตอนุกรมที่ถูกต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มทำการตั้งค่าอัตราเร็วของการสื่อสารข้อมูล และเริ่มทำการส่งบิตควบคุม โปรแกรม Automatic Switched-Beam ทำการส่งอักขระ 1 ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบกับโค้ดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีว่า อักขระ 1 ที่ส่งมานั้นคือพอร์ต 1 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่ง 1 ไปยังขาคอนโทรล 1 และจะทำการส่ง 0 ไปยังขาคอนโทรล 2 สวิทช์ก็จะสับลงที่พอร์ตที่ 1 หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มรับค่าความแรงของสัญญาณมาเก็บไว้ ขั้นตอนต่อไปโปรแกรม Automatic Switched-Beam ทำการส่งอักขระ 2 ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบกับโค้ดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีว่า อักขระ 2 ที่ส่งมานั้นคือพอร์ต 2 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่ง 1 ไปยังขาคอนโทรล 1 และจะทำการส่ง 1 ไปยังขาคอนโทรล 2 สวิทช์ก็จะสับลงที่พอร์ตที่ 2 หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มรับค่าความแรงของสัญญาณมาเก็บไว้ ขั้นตอนต่อไปโปรแกรม Automatic Switched-Beam ทำการส่งอักขระ 3 ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบกับโค้ดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีว่า อักขระ 3 ที่ส่งมานั้นคือพอร์ต 3 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่ง 0 ไปยังขาคอนโทรล 1 และจะทำการส่ง 1 ไปยังขาคอนโทรล 2 สวิทช์ก็จะสับลงที่พอร์ตที่ 3 หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มรับค่าความแรงของสัญญาณมาเก็บไว้ ขั้นตอนต่อไปโปรแกรม Automatic Switched-Beam ทำการส่งอักขระ 4 ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบกับโค้ดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีว่า อักขระ 4 ที่ส่งมานั้นคือพอร์ต 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่ง 0 ไปยังขาคอนโทรล 1 และจะทำการส่ง 0 ไปยังขาคอนโทรล 2 สวิทช์ก็จะสับลงที่พอร์ตที่ 4 หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มรับค่าความแรงของสัญญาณมาเก็บไว้ และขั้นตอนต่อไปโปรแกรมจะเริ่มเปรียบเทียบค่าและหาค่าความแรงของสัญญาณสูงสุด เมื่อหาค่าความแรงของสัญญาณสูงสุดได้แล้วโปรแกรมจะทำการส่งบิตควบคุมประจำพอร์ตไปยังพอร์ตที่มีค่าความแรงของสัญญาณสูงสุดนั้น ถือเป็นการจบโปรแกรม

3.2.4 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น

สำหรับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้มี 2 แบบด้วยกัน แบบแรกจะใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งใช้ได้กับสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น 4×1 เท่านั้น แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้พัฒนาระบบสวิทช์ลำคลื่นแบบพกพาที่ต้องการให้ชุดต้นแบบมีขนาดเล็ก ดังนั้นสายอากาศที่ใช้จึงเปลี่ยนเป็นแบบสายอากาศแถวลำดับ 2×2 ซึ่งไม่สามารถใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

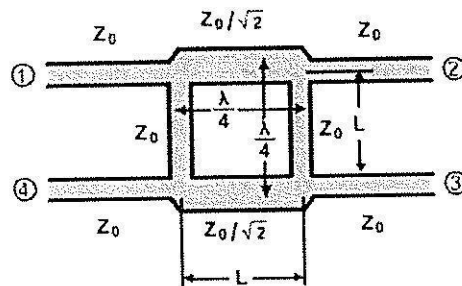
ให้คั้งนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบโครงข่ายก่อร์ูปปลาคัสขึ้นใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3-9 จากรูปจะเห็นได้ว่ามีการใช้ตัวไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 68° แทนไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 90° รายละเอียดในแต่ละองค์ประกอบของโครงข่ายก่อร์ูปปลาคัสทั้งสองแบบมีดังนี้



รูปที่ 3-9 โครงข่ายก่อร์ูปปลาคัสที่พัฒนาขึ้นสำหรับสายอากาศแถวลำดับ 2x2

-ไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 90°

คัปเปิลเลอร์แบบไฮบริดจ็ 90° ดังที่แสดงในรูปที่ 3-10 จะทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อเราใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต 1 พลังงานก็จะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมกันระหว่างพอร์ต 2 และพอร์ต 3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต 1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต 2 และพอร์ต 3 จะล้าหลังกันอยู่ 90° และจะไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ต 4 (พอร์ต โคดเดี่ยว)



รูปที่ 3-10 โครงสร้างของไฮบริดคัปเปิลเลอร์ 90°

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right); & \frac{W}{d} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]}; & \frac{W}{d} \geq 1 \end{cases} \quad (3-1)$$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^{-A}}{e^{2A} - 2}; & \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]; & \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (3-2)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3-3)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-4)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (3-5)$$

$$l = \frac{90^\circ \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{\epsilon_e} k_0} \quad (3-6)$$

$$k_0 = 2\pi f/c \quad (3-7)$$

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

กำหนดให้ $Z_0 = 50\Omega \rightarrow Z_0/\sqrt{2} = 35.355\Omega$

$\epsilon_r = 4.8$

$f = 2.4\text{GHz}$

$d = 1.67\text{mm}$.

นำค่าที่กำหนดให้มาทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการข้างต้นจะได้ค่าดังต่อไปนี้

- ที่ Z_0 : $A=1.584$ นำค่า A ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้ค่า W เท่ากับ $W=2.992\text{mm}$.

ที่ $Z_0/\sqrt{2}$: $A=1.169 W/d = 3.0799 > 2$ ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขตามสมการ (3-2) จึงทำการหาค่า B

$B=7.645 \rightarrow W/d = 3.0807$ เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า $W/d > 2$

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

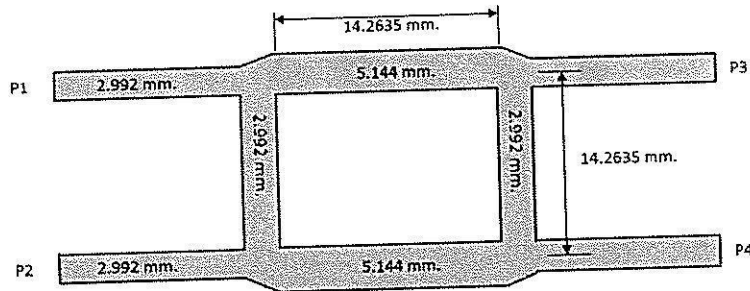
$\epsilon_e = 3.758$

$k_0 = 50.256 \text{ m}^{-1}$

$l = 16.12 \text{ mm}$

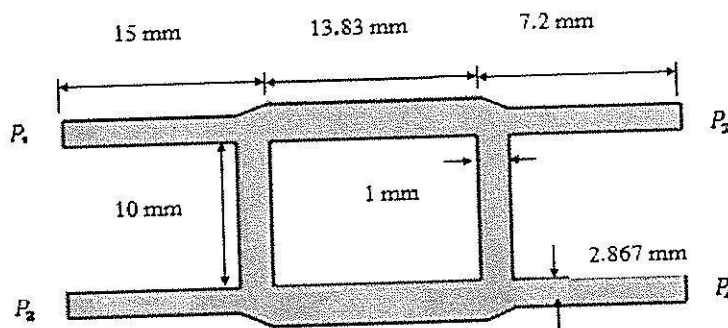
$\therefore \lambda/4 = 14.2635 \text{ mm}$

ผลที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3-11 ขนาดของไฮบริดคัปเปิลอร์ 90°

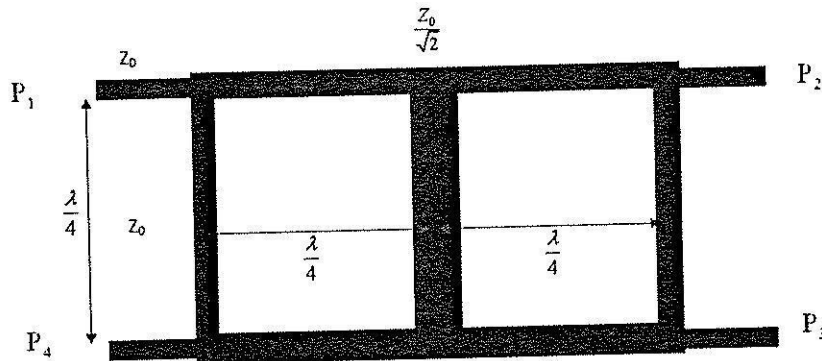
อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น เราจำเป็นต้องพัฒนาโครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยมขึ้นมาใหม่เพื่อใช้กับระบบสวิตช์สี่เหลี่ยมแบบพกพา เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับ 2x2 ได้ ขนาดของไฮบริดคัปเปิลอร์ที่ได้ออกแบบไว้แสดงในรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 ขนาดของไฮบริดคัปเปิลอร์ 68°

ตัวไขว้สัญญาณ

การสูญเสียพลังงานและความต้านหลังระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P3 และเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P2



รูปที่ 3-13 โครงสร้างของตัวไขว้สัญญาณ

จากรูปที่ 3-13 จะเห็นได้ว่าตัวไขว้สัญญาณจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกับตัวคัปเปอเรอร์ 2 ตัวมาต่อรวมกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวไขว้สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปอเรอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาดังต่อไปนี้

- ที่ Z_0 $A = 1.584$ นำค่า A แทนในสมการที่ 3.2 ได้ค่า W เท่ากับ $W = 2.992 \text{ mm}$.

- ที่ $Z_0/\sqrt{2}$ $A = 1.169$ $W/d = 3.0799 > 2$ ไม่ตรงเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2 จึงทำการหาค่า B
 $B = 7.645$ $W/d = 3.0807$ เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า $W/d > 2$

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

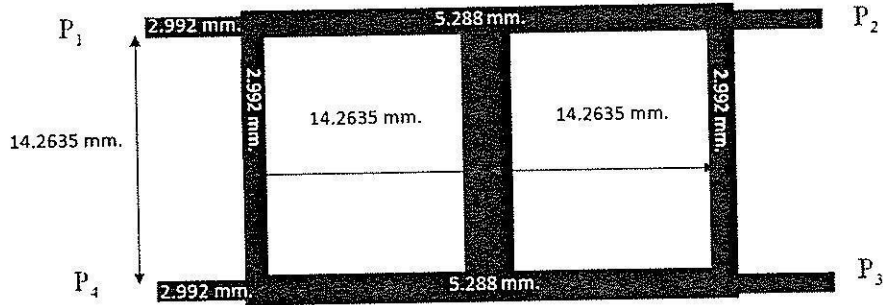
- ที่ $2Z_0/\sqrt{2}$ จาก $W = 5.144 \text{ mm}$. $2W = 5.144 \times 2 = 10.288 \text{ mm}$.

$\epsilon_e = 3.758$ $k_0 = 50.265 \text{ m}^{-1}$

$l = 16.12 \text{ mm}$.

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

ผลที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3-14 ขนาดของตัวไขว้สัญญาณ

ตัวเลื่อนเฟส 45°

การคำนวณตัวเลื่อนเฟส 45° ดังรูปที่ 3-15 ได้จากผลการคำนวณออกแบบของตัวกลับเพลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° สามารถทำให้ทราบค่าของ λ เนื่องจากใช้วัสดุในการสร้างและความถี่เดียวกัน



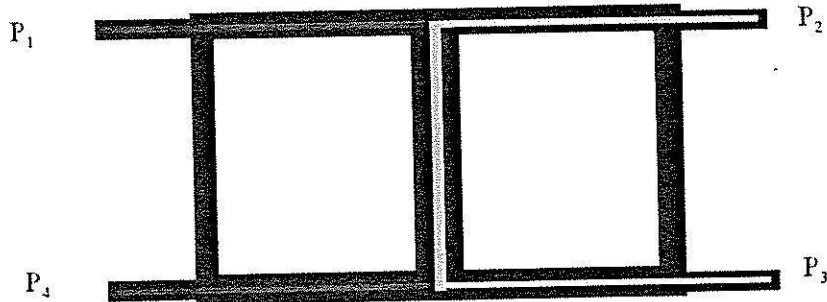
รูปที่ 3-15 โครงสร้างของตัวเลื่อนเฟส 45°

จากสมการ $\theta = \frac{360^\circ l}{\lambda}$ โดยที่เราทราบค่า $\theta = 45^\circ$ และ $\lambda = 57.054 \text{ mm}$.

ทำการหาค่า L โดยแทนค่า θ และ λ ในสมการ จะได้ $L = \frac{\theta \times \lambda}{360^\circ}$

จะได้ $L = \frac{45 \times 57.054}{360^\circ}$ ดังนั้น $L = 7.13 \text{ mm}$.

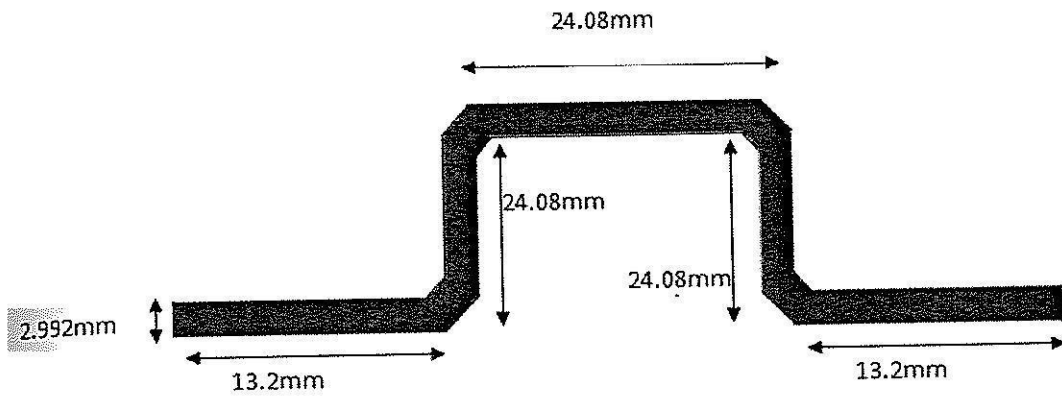
ดั่งภาพที่ 3-16 โดยการสร้างรวมในวงจรมันจะเป็นการสร้างโดยการกำหนดค่าความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 ในการสร้างเฟสด้านล่างและนำความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2 ในการสร้างเฟสด้านบนเพื่อให้มีการเพิ่มเฟสโดยเส้นทางของตัวไขว้สัญญาณ



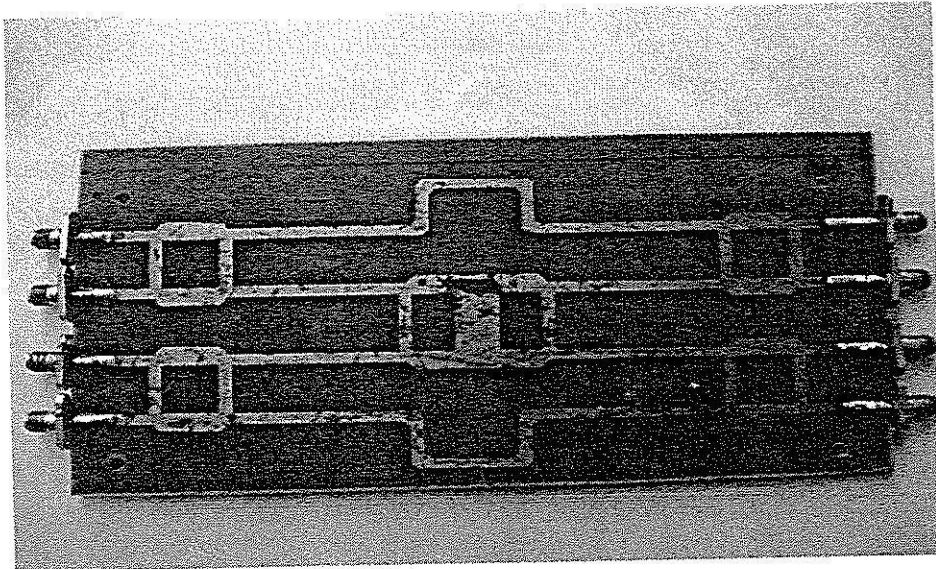
รูปที่ 3-16 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

- (ก) โดยสี่แฉงเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3
- (ข) โดยสี่ซมพูเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2

จากรูปที่ 3-16 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 มีค่าดังนี้ ซึ่งค่าเท่ากับ $20+16.12+16.12+16.12+20 = 88.36$ mm. ดังนั้นค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับพอร์ต P3 มีความยาวเท่ากับ $L=88.36+7.13 = 95.49$ mm. และความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 รวมกับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา มีค่าเท่ากับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่าย มีค่าเท่ากับ 95.49 mm. เนื่องจากมีความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงมีการคดงอขึ้น โดยการคดงอนั้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่าย ลบออกจาก ค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้ว ค่าที่เหลือให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงาม โดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ดังรูปที่ 3-17 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้ เมื่อทำการออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้วงจรก่อรูปลาคลิ้นแบบ Butler matrix ดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-17 ขนาดของตัวเลื่อนเฟส



รูปที่ 3-18 วงจรก่อรูปปลาคิ้นที่ได้สร้างขึ้น

3.2.5 สายอากาศ

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสวิตช์ต่ำคลื่นแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้ได้เลือกใช้สายอากาศชนิดโมโนโพลที่มีอัตราขยาย 5 dBi ทำงานในช่วงความถี่ 2.4 - 2.5 GHz และได้นำมาเรียงกันแบบแถวลำดับเชิงเส้นจำนวน 4 ต้น ซึ่งมีการวางเรียงกันดังรูปที่ 3-19 ซึ่งระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่นำมาวางเรียงตัวกันสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (3-9)$$

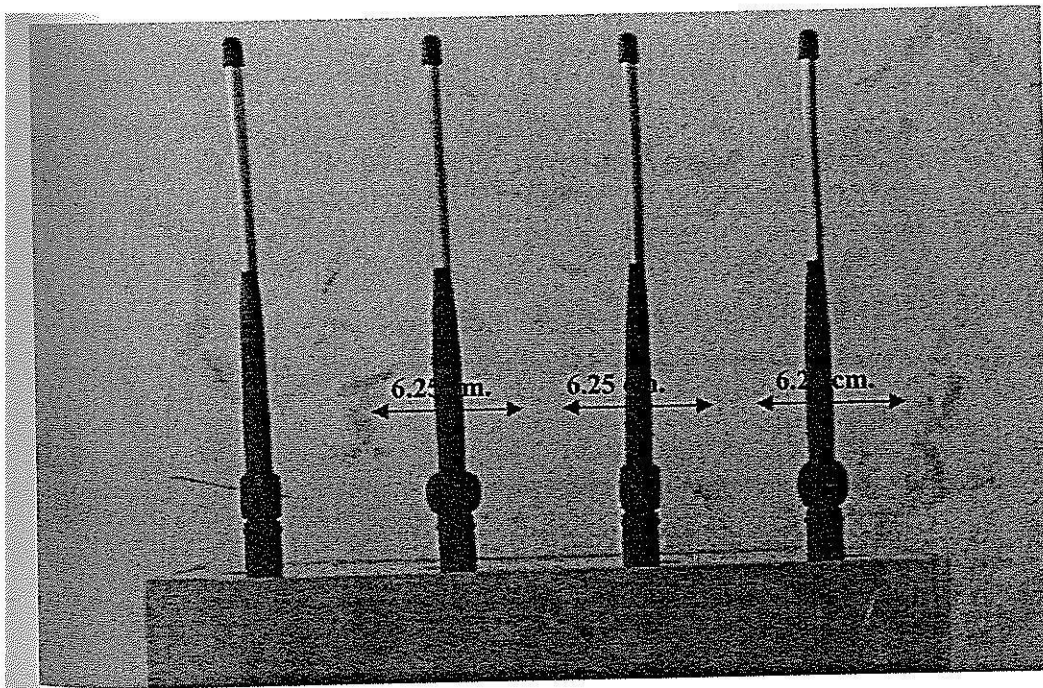
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3-10)$$

โดยที่ d หมายถึง ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น

v หมายถึง ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

f หมายถึง ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.4 GHz

เมื่อนำค่ามาแทนในสมการเพื่อหาค่า d เราจะได้ว่าค่า d มีค่าเท่ากับ 6.25 เซนติเมตร



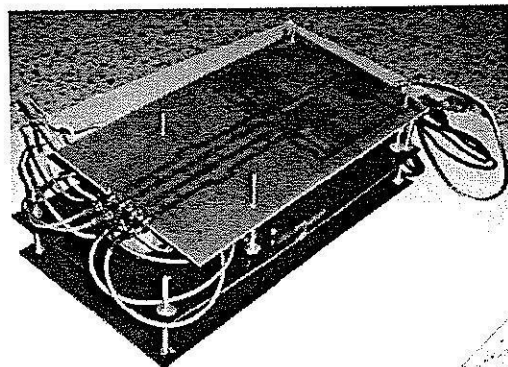
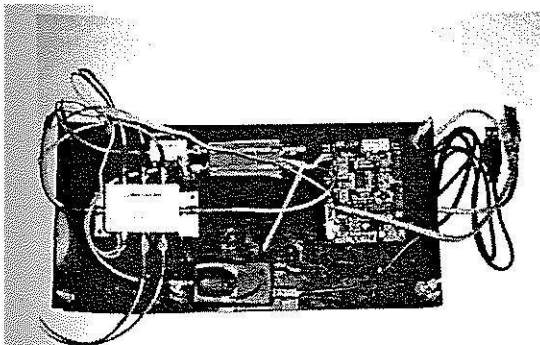
รูปที่ 3-19 สายอากาศโมโนโพลที่วางเรียงกันแบบเชิงเส้นจำนวน 4 ต้น

ชุดระบบต้นแบบของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา

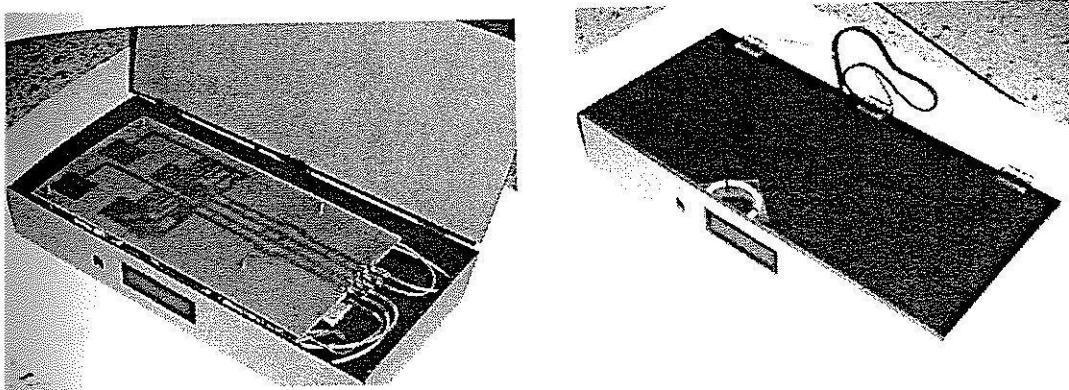
ระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพาสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีความแตกต่างจากชุดระบบต้นแบบในหัวข้อที่ 3.2 คือ ขั้นตอนในการสวิตซ์ลำคลื่นจะถูกกระทำแบบให้แล้วเสร็จภายในชุดระบบต้นแบบ ซึ่งจะสามารถพกพาไปใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องใดก็ได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องอาศัยการลงโปรแกรมที่ตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ ชุดระบบต้นแบบนี้ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับทำงานร่วมกับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นและสวิตซ์ โดยมีการควบคุมสวิตซ์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128 นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบในแต่ละส่วน โดยแบ่งออกเป็นสามส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ดัดแปลงจาก Butler matrix ซึ่งทำการออกแบบอุปกรณ์แต่ละตัวเป็นสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และในส่วนของสายอากาศได้ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปวางเรียงเป็นแถวลำดับ 2x2 โดยใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการและสามารถนำมาใช้งานได้ และในส่วนของ การควบคุมการรับสัญญาณไร้สายด้วยสวิตซ์นั้น ได้มีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128 มาควบคุมสวิตซ์เพื่อเลือกสัญญาณ ในทิศทางที่ดีที่สุด

3.3.1 ภาพรวมของชุดอุปกรณ์ต้นแบบชนิดพกพา

การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบของตัวสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา ในโครงการวิจัยชิ้นนี้จะมี ส่วนประกอบหลักๆ คือ 1) สายอากาศแถวลำดับแบบ 2x2 ที่ทำด้วยสายอากาศไมโครสตริป 2) เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น และ 3) ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการสวิตซ์ลำคลื่น และได้ทำการรวมชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานดูเรียบร้อยและสามารถพกพานำไปใช้ได้สะดวกดังที่แสดงในรูปที่ 3-20 และ 3-21



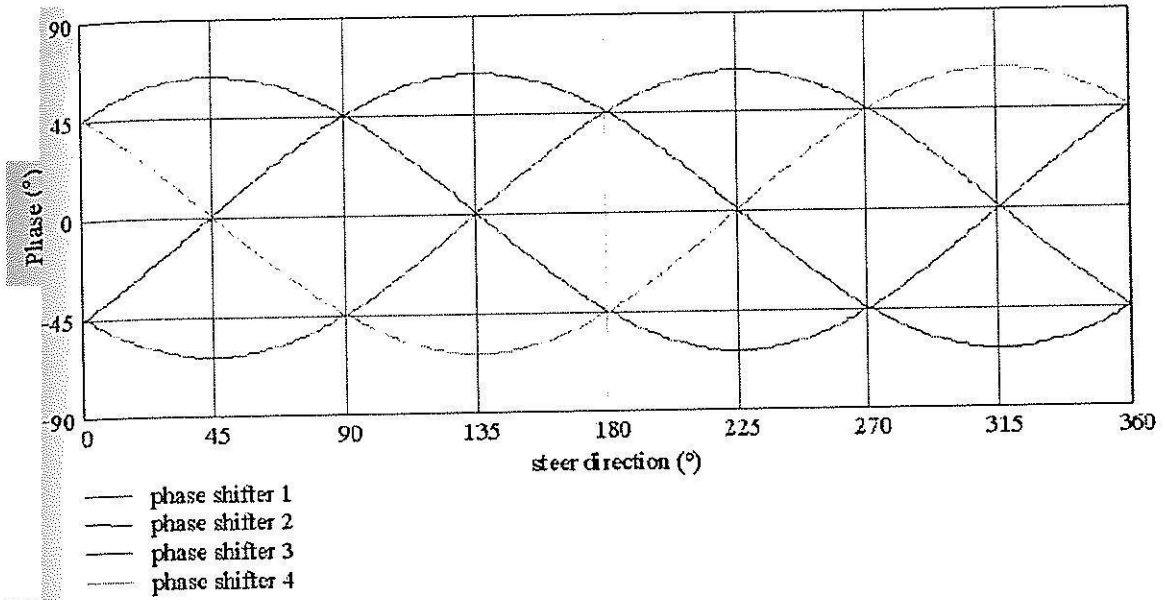
รูปที่ 3-20 ประกอบอุปกรณ์ต้นแบบของตัวสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา



รูปที่ 3-21 นำอุปกรณ์ต้นแบบของตัวสวิตช์ลัดลื่นอัตโนมัติแบบพกพาลงในกล่อง

3.3.2 สายอากาศ

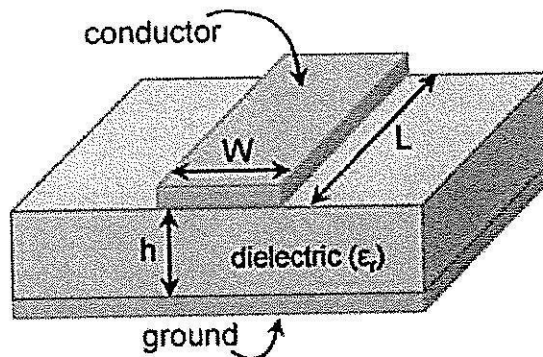
สายอากาศในชุดอุปกรณ์ต้นแบบของตัวสวิตช์ลัดลื่นอัตโนมัติแบบพกพานั้นจะเป็นสายอากาศประเภทแถวลำดับเชิงระนาบแบบ 2×2 ซึ่งจะมีองค์ประกอบคือ สายอากาศ 4 ต้น โดยเลือกใช้สายอากาศไมโครสตริป ออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศนั้นจะมีการจัดเรียงตัวในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบ 2×2 ซึ่งในการกำหนดลำดับของสายอากาศนั้นเราจะดูจากรูปที่ 3-22 ซึ่งจะเห็นว่าที่ตำแหน่งเส้นกราฟการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง ส่วนการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 4 จะมีการเลื่อนมุมเฟสนำการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 3 อยู่ ซึ่งหมายความว่า เมื่อมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเข้ามาที่ตำแหน่งมุม ใดๆ สายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 4 ก็จะได้รับสัญญาณก่อน เมื่อเราสังเกตต่อไปเช่นที่มุม จะเห็นว่า ระหว่างการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 4 นั้น การเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 1 จะมีการเลื่อนมุมเฟสนำการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 4 อยู่ แสดงว่าสายอากาศต้นที่ 1 จะได้รับสัญญาณก่อนต้นที่ 4 ซึ่งก็จะเช่นเดียวกันกับการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 3 ที่มุมเดียวกัน การเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 2 จะมีการเลื่อนมุมเฟสนำการเลื่อนมุมเฟสเส้นที่ 3 อยู่ แสดงว่า สายอากาศต้นที่ 2 จะได้รับสัญญาณก่อนต้นที่ 3 เมื่อได้ข้อมูลอย่างที่ได้อีกแล้วนั้น จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป โดยคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3-22 กราฟของเฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัว

กำหนดหาความกว้างแถบที่ใช้ในการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป พิจารณาดังที่แสดงในรูปที่

รูปที่ 3-23



รูปที่ 3-23 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

กำหนดให้ ความถี่ใช้งาน (f) = 2.45 GHz และ $\epsilon_r = 4.8$

ความสูงของไดอิเล็กตริก (h) = 1.67 mm

ออกแบบที่ $Z_0 = 50$ โอห์ม

จากการพิจารณาเงื่อนไขของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เนื่องจาก ค่า $Z_0 = 50$ โอห์ม ซึ่ง $Z_0 \geq 23.6$ โอห์ม

หาค่า

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

$$A = \frac{50}{60} 4.8 \sqrt{\frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{4.8 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.8} \right)}$$

$$A = 1.58$$

จาก

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

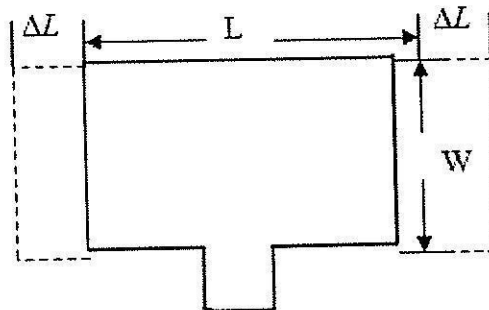
$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{1.58}}{e^{2(1.58)} - 2}$$

$$\frac{w}{h} = 1.8$$

$$w = 1.8h = 1.8(1.67) = 3 \text{ mm}$$

ดังนั้นจึงได้ความกว้างของแถบป้อนสัญญาณไมโครสตริป = 3 มิลลิเมตร

กำหนดหาความกว้างและความยาวของสายอากาศไมโครสตริป พิจารณาดังรูปที่แสดงในรูปที่ 3-24



รูปที่ 3-24 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

จาก

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \left[1 + \frac{12h}{w} \right]^{-1/2}$$

จะได้

$$\varepsilon_{eff} = \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{4.8} \left[1 + \frac{12(1.67)}{3} \right]^{-1/2}$$

$$\varepsilon_{eff} = 5.27$$

หาความกว้างของสายอากาศ

$$W_o = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad ; \quad f_r = f \sqrt{\varepsilon_{eff}}$$

$$W_o = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9 \times \sqrt{5.27}} \sqrt{\frac{2}{4.8 + 1}}$$

$$W_o = 35.9 \text{ mm}$$

หาความยาวของสายอากาศ

$$L = 25.17 \text{ mm}$$

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2\Delta L$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_o}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_o}{h} + 0.8 \right)}$$

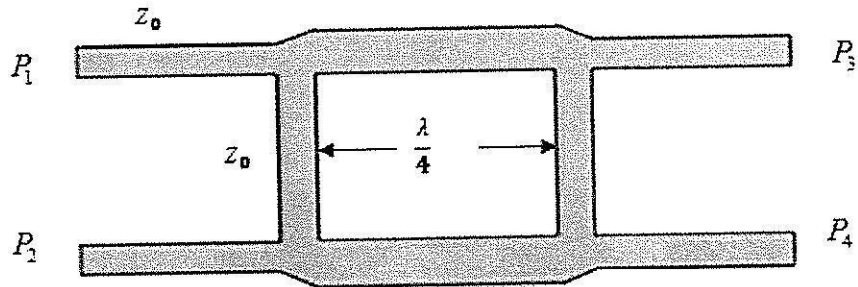
$$\Delta L = 0.412 h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_o}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_o}{h} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.412 (1.67 \text{ mm}) \frac{(5.27 + 0.3) \left(\frac{3.59 \text{ cm}}{1.67 \text{ mm}} + 0.264 \right)}{(5.27 - 0.258) \left(\frac{3.59 \text{ cm}}{1.67 \text{ mm}} + 0.8 \right)}$$

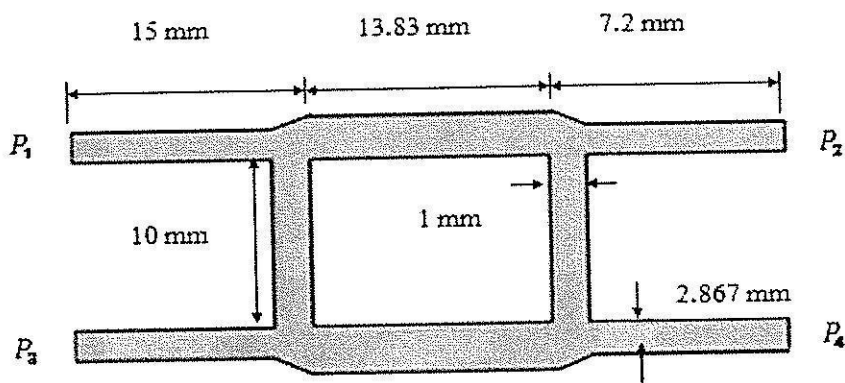
จะได้ $\Delta L = 0.746 \text{ mm}$

ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริด 68°

คัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 68 องศา (68° hybrid coupler) โดยวงจรทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อเราใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานก็จะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมกันระหว่างพอร์ต P3 และพอร์ต P4 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P3 และพอร์ต P4 จะล่าหลังกันอยู่ 68° และจะไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ต P2 (พอร์ตโคคเคียว) hybrid coupler ที่เราจะต้องทำการสร้างขึ้นนั้น จำเป็นต้องทำการดัดแปลงจากวงจร hybrid coupler ก่อน โดยที่เราจะต้องทำการคำนวณจากวงจร hybrid coupler ตามทฤษฎี ซึ่งมีรูปแบบดังที่แสดงในรูปที่ 3-26 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 3-27



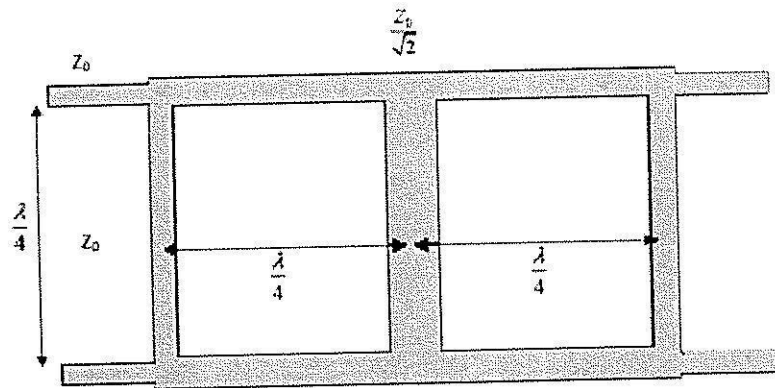
รูปที่ 3-26 โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริด 68°



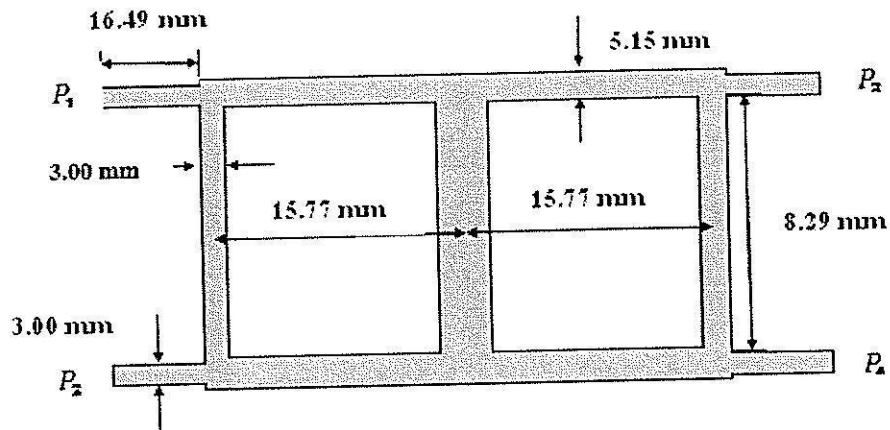
รูปที่ 3-27 ขนาดของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริด 68°

ตัวไขว้สัญญาณ

ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) ดังที่แสดงในรูปที่ 3-28 เป็นวงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกัน โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความต้านทานระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือ เมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P4 และเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P3 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P2 และเมื่อได้ออกแบบตามความถี่ที่ต้องการจะได้ขนาดดังแสดงในรูปที่ 3-29



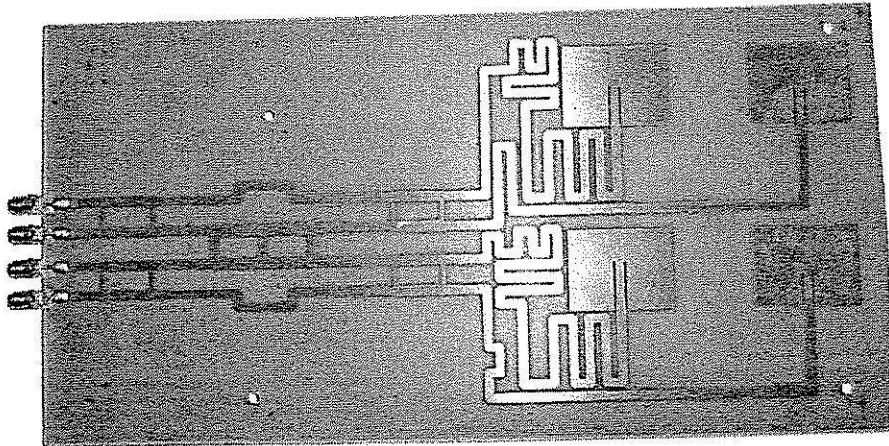
รูปที่ 3-28 โครงสร้างของตัวไขว้สัญญาณ



รูปที่ 3-29 ขนาดของตัวไขว้สัญญาณ

3.3.5 การรวมกันของชุดระบบต้นแบบ

หลังจากที่เราได้ทำการคำนวณและออกแบบแต่ละชิ้นงานแล้วนั้น เมื่อผลที่ได้ของแต่ละชิ้นงานเป็นที่น่าพึงพอใจและสามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับทฤษฎีแล้วนั้น เราจึงนำชิ้นงานที่ได้ออกแบบนั้นไปรวมเป็นเครือข่ายก่อรูปลาคลิ้นที่ได้อ้างอิงจากเครือข่ายก่อรูปลาคลิ้นแบบ Butler matrix ดังที่แสดงในรูปที่ 3-30

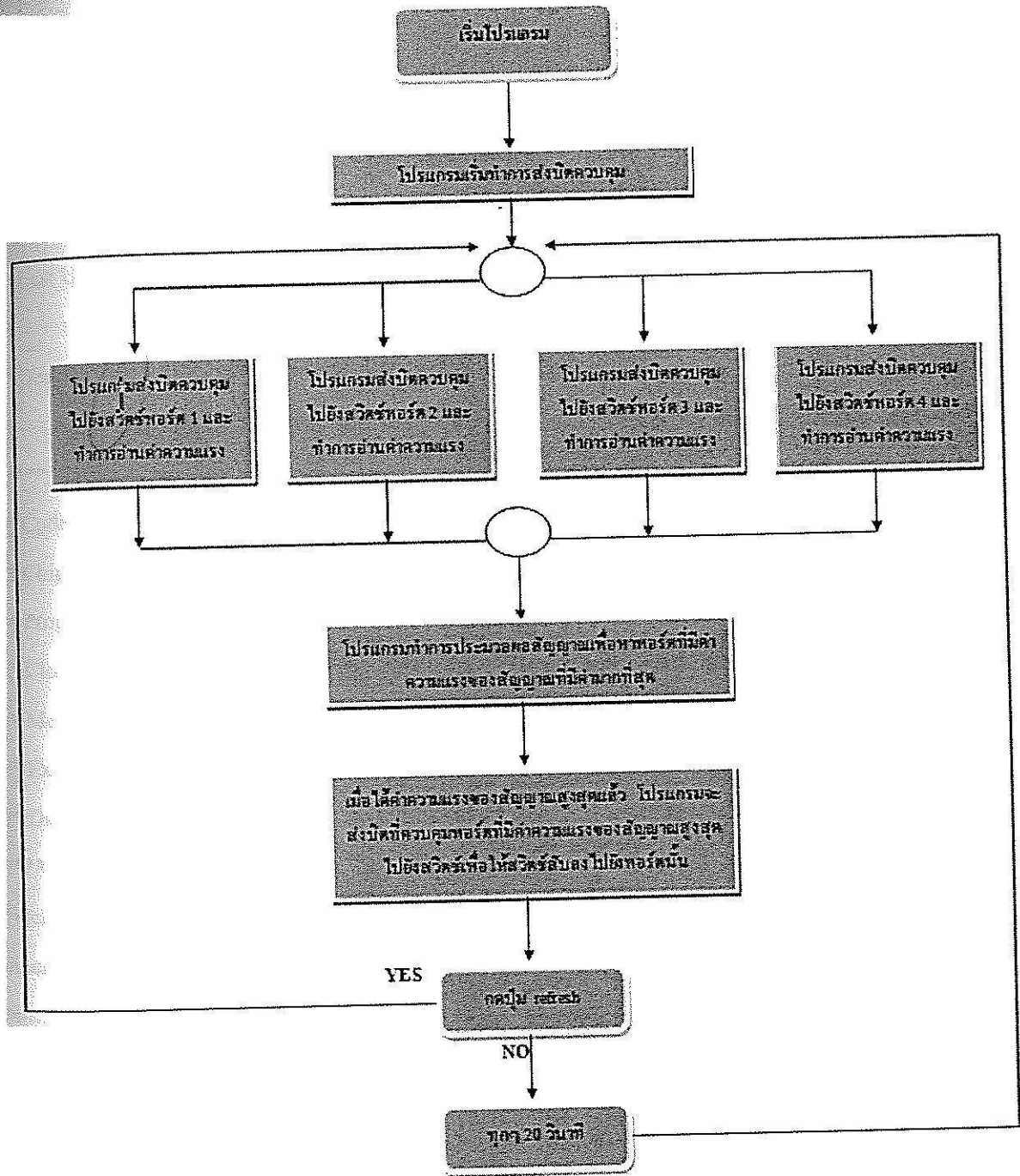


รูปที่ 3-30 การประกอบกันของสายอากาศและ โครงข่ายก่อรูปลาคลิ้น

2.3.6 โปรแกรมควบคุมการสวิตช์ลาคลิ้นแบบอัตโนมัติชนิดพกพา

โปรแกรมควบคุมการสวิตช์ลาคลิ้นแบบอัตโนมัตินี้เป็น โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ที่เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128 ในส่วนของโปรแกรม โปรแกรมจะทำการอ่านค่าความแรงของสัญญาณจากแต่ละพอร์ตนำมาเก็บค่าไว้ เมื่อจบกระบวนการนี้ถือว่าโปรแกรมทำการประมวลผลสัญญาณในแต่ละพอร์ตครบ 1 รอบ ตัวโปรแกรมจะทำงานเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบทั้ง 4 พอร์ตสุดท้ายจะนำค่าของความแรงของสัญญาณที่ได้เก็บไว้ในแต่ละรอบของการประมวลผลสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ว่าสัญญาณที่รับได้มาจากพอร์ตไหนที่มีค่าความแรงของสัญญาณมากที่สุด เมื่อโปรแกรมสามารถหาค่าความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดจากพอร์ตๆนั้นได้แล้ว โปรแกรมจะทำการส่งบิตควบคุมไปยังสวิตช์เพื่อสั่งให้สวิตช์สับไปยังพอร์ตนั้น อีกทั้งแสดงผลยังจอ LCD display เพื่อให้ทราบว่สับไปที่พอร์ตใด และโปรแกรมจะทำการ refresh ทุกๆ 20 วินาที เพื่อประมวลหาความแรงของสัญญาณที่แรงที่สุดใหม่อีกครั้ง หรืออาจกดปุ่มเพื่อ refresh หาความแรงของสัญญาณได้เช่นกัน

ผังลำดับงานของ โปรแกรม



รายละเอียดของโปรแกรม

```

/*****/;
/* Hardware : ET-BASE AVR MEGA64/128 */;
/* CPU : ATMEL-ATmega128 */;
/* X-TAL : 16.00 MHz */;
/* Compiler : CodeVisionAVR V1.24.7e */;
/* Last Update : 9-03-2006 (ETT CO.,LTD) */;
/* : WWW.ETT.CO.TH */;
/* Description : Demo ADC Channel 0 */;
/* : Setup RS232 = 9600,N,8,1 */;
/*****/;
/* CodeVisionAVR Compiler Option Setting */;
/* Chip type : ATmega128 */;
/* Program type : Application */;
/* Clock frequency : 16.000000 MHz */;
/* Memory model : Small */;
/* External SRAM size : 0 */;
/* Data Stack size : 1024 */;
/*****/;
#include <mega128.h>
#include <stdio.h>
#include <delay.h>
#define ADC_VREF_TYPE 0xC0
#define SW1 PINC.2
char lcdbuf[16+1];
void init_lcd(void); // Initial Character LCD(4-Bit Interface)
void gotolcd(unsigned char); // Set Cursor LCD
void write_ins(unsigned char); // Write Instruction LCD
void write_data(unsigned char); // Write Data LCD
void printlcd(void); // Display Message LCD

```

```

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input);           // Read ADC Result

/*****/
/* Read the AD conversion result */;
/*****/
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)           // Read Result ADC
{ ADMUX=adc_input|ADC_VREF_TYPE;
  ADCSRA|=0x40;                                         // Start the AD conversion
  while ((ADCSRA & 0x10)==0);                          // Wait for the AD conversion to complete
  ADCSRA|=0x10;
  return ADCW; }
/*****/

/* Initial LCD 4-Bit Interface */
/*****/

void init_lcd(void)
{ PORTD &= 0b01111111;                                  // Start LCD Control EN=0 (PD7)
  delay_ms(1);                                         // Wait LCD Ready
  write_ins(0x33);                                       // Initial (Set DL=1 3 Time, Reset DL=0 1 Time)
  write_ins(0x32);
  write_ins(0x28);                                       // Function Set (DL=0 4-Bit,N=1 2 Line,F=0 5X7)
  write_ins(0x0C);                                       // Display on/off Control (Entry Display,Cursor off,Cursor not
  Blink)
  write_ins(0x06);                                       // Entry Mode Set (I/D=1 Increment,S=0 Cursor Shift)
  write_ins(0x01);                                       // Clear Display (Clear Display,Set DD RAM Address=0)
  delay_ms(1);                                         // Wait Initial Complete
  return; }
/*****/

/* Set LCD Cursor */
/*****/

void gotolcd(unsigned char i)

```

```

// Set DD-RAM Address Command
{ i |= 0x80;
write_ins(i);
return; }

/*****/
/* Write Instruction to LCD */
/*****/

void write_ins(unsigned char i)
{ PORTG &= 0b11101111; // Instruction Select RS=0(PG4)
PORTG &= 0xF0; // Clear old LCD Data (Bit[3..0])
PORTG |= (i>>4) & 0x0F; // Strobe High Nibble Command
PORTD |= 0b10000000; // Enable ON EN=1(PD7)
delay_ms(1);
PORTD &= 0b01111111; // Enable OFF EN=0(PD7)
PORTG &= 0xF0; // Clear old LCD Data (Bit[3..0])
PORTG |= i & 0x0F; // Strobe Low Nibble Command
PORTD |= 0b10000000; // Enable ON EN=1(PD7)
delay_ms(1);
PORTD &= 0b01111111; // Enable OFF EN=0(PD7)
delay_ms(1); // Wait LCD Busy
return; }

/*****/
/* Print Data(ASCII) to LCD */
/*****/

void printlcd(void)
{ char *p;
p = lcdbuf;
do // Get ASCII & Write to LCD Until null
{ write_data(*p); // Write ASCII to LCD
p++; }
while(*p != '\0'); // End of ASCII (null)

```

```

return; }
void main(void)
    unsigned int valCh0,valCh1,valCh2,valCh3,num,t;                // ADC Result
    unsigned int V0,V00,V11,V21,V31,V01,V10,V20,V30,show1,show2;
    DDRA = 0xFF;                // PortA = Output
    DDRG=0xFF;                // PORTG as output
    DDRD=0xFF;                // PORTD as output
    PORTC.2 = 1;
    DDRC=0x00;
    delay_ms(30);
    while (1)
    { loop1:
        PORTA.6=1;
        PORTA.7=0;
        valCh0 = read_adc(0);
        V0 = (valCh0*4.98)/10.23 ;
        V00 = V0/100 ;
        V01 = V0%100 ;
        delay_ms(100);
        PORTA.6=1;
        PORTA.7=1;
        valCh1 = read_adc(0);
        V0 = (valCh1*4.98)/10.23 ;
        V10 = V0/100 ;
        V11 = V0%100 ;
        delay_ms(100);
        PORTA.6=0;
        PORTA.7=1;
        valCh2 = read_adc(0);
        V0 = (valCh2*4.98)/10.23 ;

```

```

V20 = V0/100 ;
V21 = V0%100 ;
delay_ms(100);
PORTA.6=0;
PORTA.7=0;
valCh3 = read_adc(0);
V0 = (valCh3*4.98)/10.23 ;
V30 = V0/100 ;
V31 = V0%100 ;
delay_ms(100);
if((valCh0<valCh1)&&(valCh0<valCh2)&&(valCh0<valCh3))
{
PORTA.6=1;
PORTA.7=0;
num = 0;
show1=V00;
show2=V01; }
else if((valCh1<valCh0)&&(valCh1<valCh2)&&(valCh1<valCh3))
{
PORTA.6=1;
PORTA.7=1;
num = 1;
show1=V10;
show2=V11; }
else if((valCh2<valCh0)&&(valCh2<valCh1)&&(valCh2<valCh3))
{
PORTA.6=0;
PORTA.7=1;
num = 2;
show1=V20;
show2=V21; }
else if((valCh3<valCh0)&&(valCh3<valCh1)&&(valCh3<valCh2))
{
PORTA.6=1;

```

```

PORTA.7=0;
num = 3;
show1=V30;
show2=V31; }

gotolcd(0); // Set Cursor Line-1
sprintf(lcdbuf," Channel %d ",num); // Display Line-1
printlcd();
gotolcd(0x40); // Set Cursor Line-2
sprintf(lcdbuf," %d.%d V ",show1,show2); // Display Line-2
printlcd();
t = 0;
while(t<=195)
{ if(!SW1)
    { delay_ms(50);
      loop2: if(!SW1)
    { delay_ms(50);
      goto loop2; }
      goto loop1; }
    delay_ms(100);
    t=t+1; }

```

3.4 กล่าวสรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้กล่าวถึงองค์ประกอบที่สำคัญของชุดระบบต้นแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบอัดโน้มติซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบที่ต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานในขณะที่ทำการวัดค่าความแรงของสัญญาณและทำการสวิตช์ลำคลื่นไปยังลำคลื่นที่แรงที่สุด และอีกแบบซึ่งสามารถพกพาชุดอุปกรณ์ไปต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เครื่องใดก็ได้ ซึ่งในแบบนี้ไม่ต้องอาศัยการสั่งงานผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์แต่อย่างใด ในบทต่อไปจะแสดงถึงผลการทดสอบของอุปกรณ์ต้นแบบทั้ง 2 ชนิด

บทที่ 4

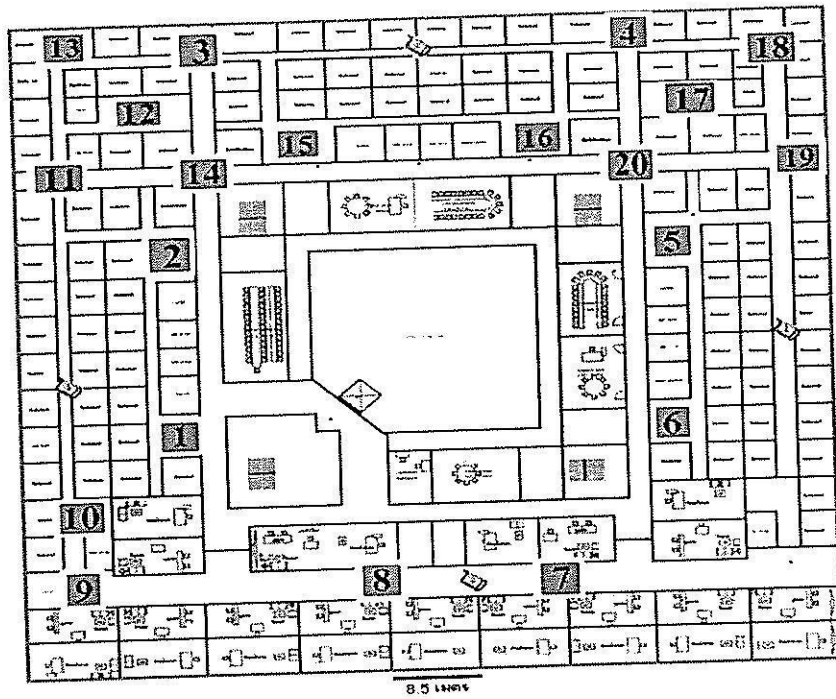
ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบในสถานการณ์จริง

4.1 กล่าวนำ

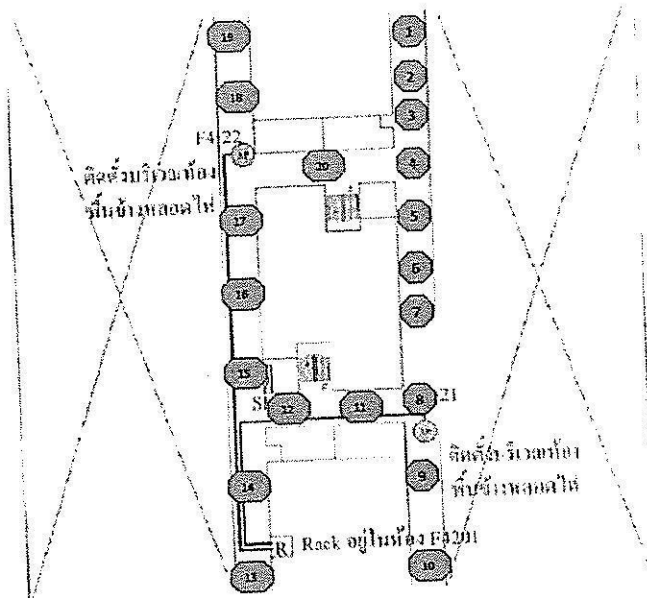
จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงชุดอุปกรณ์ต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นในโครงการวิจัยชิ้นนี้ ในบทที่ 4 นี้จะแสดงถึงผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบของสายอากาศแบบสวิตช์ลาคัลที่ทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่มีการใช้งานระบบวายไฟจริง ในช่วงต้นจะกล่าวถึงสถานที่ที่ได้ใช้ในการทดสอบซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 สถานที่ จากนั้นจะแสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ผลการทดสอบของสายอากาศสวิตช์ลาคัลแบบอัตโนมัติ และแบบอัตโนมัติชนิดพกพา อย่างไรก็ตามในโครงการวิจัยชิ้นนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเปรียบเทียบการทำงานของทั้งสองระบบ ดังนั้นการทดสอบจึงกระทำกันคนละเวลา ทำให้ไม่สามารถนำผลมาเปรียบเทียบเพื่อว่าระบบใดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากันได้

4.2 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ

สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบมีด้วยกัน 2 ที่ ได้แก่ อาคารวิชาการ ชั้น 4 และ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 ชั้น 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา โครงสร้างของทั้ง 2 อาคารแสดงไว้ในรูปที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ หมายเลขที่แสดงในรูปหมายถึงตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบ และตำแหน่งของโทรศัพท์เคลื่อนที่แสดงถึงตำแหน่งที่มีการติดตั้ง access point ของระบบวายไฟ ซึ่งการทดสอบในแต่ละตำแหน่งจะทำซ้ำกันทั้งหมด 5 ครั้ง



รูปที่ 4-1 โครงสร้างของอาคารวิชาการ ชั้น 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา



รูปที่ 4-2 โครงสร้างของอาคารศูนย์เครื่องมือ 4 ชั้น 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

4.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

4.3.1 ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติ

ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบจะเป็นการวัดค่าความแรงของสัญญาณ โดยทำการเทียบจากอุปกรณ์เดิมที่มีสายอากาศที่มีลักษณะการแผ่พลังงานรอบทิศทางเพียงด้านเดียวในทุกตำแหน่ง ผลการทดสอบเป็นค่าที่แสดงในตารางที่ 4-1 4-2 4-3 และ 4.4 ซึ่งในการทดสอบอุปกรณ์แต่ละตำแหน่งสำหรับอุปกรณ์ต้นแบบชนิดนี้ (ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น) จะทดสอบใน 2 ทิศทางคือ แนวทิศเหนือ และ แนวทิศตะวันออก

ตารางที่ 4-1 ความแรงของสัญญาณที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (ทิศตะวันออก E)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
1	1	00-1C-58-10-59-50	-85	1	00-1C-58-10-59-50	-74
	2	00-1C-58-10-59-50	-84	2	00-1C-58-10-59-50	-78
	3	00-1C-58-10-59-50	-84	3	00-1C-58-10-59-50	-74
	4	00-1C-58-10-59-50	-82	4	00-1C-58-10-59-50	-75
	5	00-1C-58-10-59-50	-81	5	00-1C-58-10-59-50	-72
2	1	00-1C-58-10-59-50	-81	1	00-1C-58-10-59-50	-74
	2	00-1C-58-10-59-50	-80	2	00-1C-58-10-59-50	-70
	3	00-1C-58-10-59-50	-83	3	00-1C-58-10-59-50	-70
	4	00-1C-58-10-59-50	-78	4	00-1C-58-10-59-50	-69
	5	00-1C-58-10-59-50	-79	5	00-1C-58-10-59-50	-69
3	1	00-1C-58-10-59-50	-79	1	00-1C-58-10-59-50	-68
	2	00-1C-58-10-59-50	-80	2	00-1C-58-10-59-50	-70
	3	00-1C-58-10-59-50	-82	3	00-1C-58-10-59-50	-72
	4	00-1C-58-10-59-50	-82	4	00-1C-58-10-59-50	-71
	5	00-1C-58-10-59-50	-82	5	00-1C-58-10-59-50	-71
4	1	00-1C-58-10-59-50	-77	1	00-1C-58-10-59-50	-70
	2	00-1C-58-10-59-50	-78	2	00-1C-58-10-59-50	-62
	3	00-1C-58-10-59-50	-83	3	00-1C-58-10-59-50	-72
	4	00-1C-58-10-59-50	-87	4	00-1C-58-10-59-50	-68
	5	00-1C-58-10-59-50	-85	5	00-1C-58-10-59-50	-68

ตารางที่ 4-1 (ต่อ) ความแรงของสัญญาณที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (ทิศตะวันออก E)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
5	1	00-1C-58-10-59-50	-85	1	00-1C-58-10-59-50	-62
	2	00-1C-58-10-59-50	-82	2	00-1C-58-10-59-50	-63
	3	00-1C-58-10-59-50	-85	3	00-1C-58-10-59-50	-61
	4	00-1C-58-10-59-50	-87	4	00-1C-58-10-59-50	-62
	5	00-1C-58-10-59-50	-88	5	00-1C-58-10-59-50	-60
6	1	00-1C-58-10-59-50	-62	1	00-1C-58-10-59-50	-60
	2	00-1C-58-10-59-50	-63	2	00-1C-58-10-59-50	-61
	3	00-1C-58-10-59-50	-64	3	00-1C-58-10-59-50	-58
	4	00-1C-58-10-59-50	-65	4	00-1C-58-10-59-50	-55
	5	00-1C-58-10-59-50	-61	5	00-1C-58-10-59-50	-58
7	1	00-1C-58-10-59-50	-65	1	00-1C-58-10-59-50	-53
	2	00-1C-58-10-59-50	-78	2	00-1C-58-10-59-50	-54
	3	00-1C-58-10-59-50	-69	3	00-1C-58-10-59-50	-51
	4	00-1C-58-10-59-50	-69	4	00-1C-58-10-59-50	-51
	5	00-1C-58-10-59-50	-69	5	00-1C-58-10-59-50	-53
8	1	00-1C-58-10-59-50	-71	1	00-1C-58-10-59-50	-54
	2	00-1C-58-10-59-50	-70	2	00-1C-58-10-59-50	-55
	3	00-1C-58-10-59-50	-68	3	00-1C-58-10-59-50	-52
	4	00-1C-58-10-59-50	-70	4	00-1C-58-10-59-50	-56
	5	00-1C-58-10-59-50	-70	5	00-1C-58-10-59-50	-56
9	1	00-1C-58-10-59-50	-69	1	00-1C-58-10-59-50	-56
	2	00-1C-58-10-59-50	-62	2	00-1C-58-10-59-50	-53
	3	00-1C-58-10-59-50	-64	3	00-1C-58-10-59-50	-46
	4	00-1C-58-10-59-50	-75	4	00-1C-58-10-59-50	-54
	5	00-1C-58-10-59-50	-64	5	00-1C-58-10-59-50	-56

ตารางที่ 4-1 (ต่อ) ความแรงของสัญญาณที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (ทิศตะวันออก E)

10	1	00-1C-58-10-59-50	-77	1	00-1C-58-10-59-50	-65
	2	00-1C-58-10-59-50	-74	2	00-1C-58-10-59-50	-66
	3	00-1C-58-10-59-50	-77	3	00-1C-58-10-59-50	-64
	4	00-1C-58-10-59-50	-74	4	00-1C-58-10-59-50	-70
	5	00-1C-58-10-59-50	-72	5	00-1C-58-10-59-50	-70
11	1	00-1C-58-10-59-50	-70	1	00-1C-58-10-59-50	-62
	2	00-1C-58-10-59-50	-60	2	00-1C-58-10-59-50	-47
	3	00-1C-58-10-59-50	-67	3	00-1C-58-10-59-50	-44
	4	00-1C-58-10-59-50	-65	4	00-1C-58-10-59-50	-46
	5	00-1C-58-10-59-50	-60	5	00-1C-58-10-59-50	-54
12	1	00-1C-58-10-59-50	-66	1	00-1C-58-10-59-50	-62
	2	00-1C-58-10-59-50	-64	2	00-1C-58-10-59-50	-56
	3	00-1C-58-10-59-50	-74	3	00-1C-58-10-59-50	-60
	4	00-1C-58-10-59-50	-67	4	00-1C-58-10-59-50	-55
	5	00-1C-58-10-59-50	-67	5	00-1C-58-10-59-50	-56
13	1	00-1C-58-10-59-50	-78	1	00-1C-58-10-59-50	-77
	2	00-1C-58-10-59-50	-81	2	00-1C-58-10-59-50	-76
	3	00-1C-58-10-59-50	-81	3	00-1C-58-10-1F-F0	-77
	4	00-1C-58-10-59-50	-78	4	00-1C-58-10-1F-F0	-76
	5	00-1C-58-10-59-50	-91	5	00-1C-58-10-1F-F0	-80
14	1	00-1C-58-10-1F-F0	-74	1	00-1C-58-10-1F-F0	-64
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-78	2	00-1C-58-10-1F-F0	-58
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-77	3	00-1C-58-10-1F-F0	-68
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-79	4	00-1C-58-10-1F-F0	-68
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-84	5	00-1C-58-10-59-50	-78
15	1	00-1C-58-10-1F-F0	-81	1	00-1C-58-10-1F-F0	-74
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-77	2	00-1C-58-10-1F-F0	-65
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-77	3	00-1C-58-10-1F-F0	-76
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-83	4	00-1C-58-10-1F-F0	-74
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-79	5	00-1C-58-10-1F-F0	-70

ตารางที่ 4-1 (ต่อ) ความแรงของสัญญาณที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (ทิศตะวันออก E)

16	1	00-1C-58-10-1F-F0	-74	1	00-1C-58-10-1F-F0	-60
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-73	2	00-1C-58-10-1F-F0	-58
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-81	3	00-1C-58-10-59-50	-75
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-72	4	00-1C-58-10-1F-F0	-61
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-72	5	00-1C-58-10-1F-F0	-58
17	1	00-1C-58-10-1F-F0	-69	1	00-1C-58-10-1F-F0	-61
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-79	2	00-1C-58-10-59-50	-66
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-65	3	00-1C-58-10-1F-F0	-64
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-67	4	00-1C-58-10-1F-F0	-65
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-65	5	00-1C-58-10-59-50	-50
18	1	00-1C-58-10-1F-F0	-65	1	00-1C-58-10-1F-F0	-44
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-61	2	00-1C-58-10-1F-F0	-48
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-62	3	00-1C-58-10-1F-F0	-42
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-60	4	00-1C-58-10-1F-F0	-51
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-61	5	00-1C-58-10-1F-F0	-47
19	1	00-1C-58-10-1F-F0	-72	1	00-1C-58-10-1F-F0	-69
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-68	2	00-1C-58-10-1F-F0	-55
	3	00-1C-58-10-59-50	-85	3	00-1C-58-10-1F-F0	-66
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-72	4	00-1C-58-10-1F-F0	-56
	5	00-1C-58-10-59-50	-87	5	00-1C-58-10-1F-F0	-68
20	1	00-1C-58-10-59-50	-90	1	00-1C-58-10-1F-F0	-66
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-65	2	00-1C-58-10-1F-F0	-63
	3	00-1C-58-10-59-50	-90	3	00-1C-58-10-1F-F0	-48
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-65	4	00-1C-58-10-1F-F0	-45
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-58	5	00-1C-58-10-1F-F0	-49

ตารางที่ 4-2 ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารเครื่องมือ 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
1	1	00-1C-58-10-59-50	-85	1	00-1C-58-10-59-50	-72
	2	00-1C-58-10-59-50	-83	2	00-1C-58-10-59-50	-71
	3	00-1C-58-10-59-50	-82	3	00-1C-58-10-59-50	-76
	4	00-1C-58-10-59-50	-82	4	00-1C-58-10-59-50	-74
	5	00-1C-58-10-59-50	-83	5	00-1C-58-10-59-50	-72
2	1	00-1C-58-10-59-50	-90	1	00-1C-58-10-59-50	-77
	2	00-1C-58-10-59-50	-87	2	00-1C-58-10-59-50	-72
	3	00-1C-58-10-59-50	-92	3	00-1C-58-10-59-50	-74
	4	00-1C-58-10-59-50	-92	4	00-1C-58-10-59-50	-70
	5	00-1C-58-10-59-50	-94	5	00-1C-58-10-59-50	-79
3	1	00-1C-58-10-59-50	-82	1	00-1C-58-10-59-50	-69
	2	00-1C-58-10-59-50	-84	2	00-1C-58-10-59-50	-83
	3	00-1C-58-10-59-50	-85	3	00-1C-58-10-59-50	-66
	4	00-1C-58-10-59-50	-85	4	00-1C-58-10-59-50	-65
	5	00-1C-58-10-59-50	-83	5	00-1C-58-10-59-50	-67
4	1	00-1C-58-10-59-50	-85	1	00-1C-58-10-59-50	-72
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-86	2	00-1C-58-10-59-50	-69
	3	00-1C-58-10-59-50	-86	3	00-1C-58-10-59-50	-75
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-85	4	00-1C-58-10-59-50	-71
	5	00-1C-58-10-59-50	-84	5	00-1C-58-10-59-50	-66
5	1	00-1C-58-10-59-50	-78	1	00-1C-58-10-1F-F0	-73
	2	00-1C-58-10-59-50	-77	2	00-1C-58-10-59-50	-75
	3	00-1C-58-10-59-50	-84	3	00-1C-58-10-59-50	-65
	4	00-1C-58-10-59-50	-84	4	00-1C-58-10-59-50	-74
	5	00-1C-58-10-59-50	-81	5	00-1C-58-10-59-50	-76

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารเครื่องมือ 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
6	1	00-1C-58-10-59-50	-92	1	00-1C-58-10-59-50	-54
	2	00-1C-58-10-59-50	-84	2	00-1C-58-10-59-50	-78
	3	00-1C-58-10-59-50	-79	3	00-1C-58-10-59-50	-59
	4	00-1C-58-10-59-50	-82	4	00-1C-58-10-59-50	-56
	5	00-1C-58-10-59-50	-83	5	00-1C-58-10-59-50	-47
7	1	00-1C-58-10-59-50	-66	1	00-1C-58-10-59-50	-56
	2	00-1C-58-10-59-50	-58	2	00-1C-58-10-59-50	-54
	3	00-1C-58-10-59-50	-60	3	00-1C-58-10-59-50	-56
	4	00-1C-58-10-59-50	-59	4	00-1C-58-10-59-50	-58
	5	00-1C-58-10-59-50	-58	5	00-1C-58-10-59-50	-57
8	1	00-1C-58-10-59-50	-70	1	00-1C-58-10-59-50	-52
	2	00-1C-58-10-59-50	-66	2	00-1C-58-10-59-50	-65
	3	00-1C-58-10-59-50	-66	3	00-1C-58-10-59-50	-62
	4	00-1C-58-10-59-50	-67	4	00-1C-58-10-59-50	-52
	5	00-1C-58-10-59-50	-67	5	00-1C-58-10-59-50	-58
9	1	00-1C-58-10-59-50	-77	1	00-1C-58-10-59-50	-54
	2	00-1C-58-10-59-50	-67	2	00-1C-58-10-59-50	-54
	3	00-1C-58-10-59-50	-68	3	00-1C-58-10-59-50	-46
	4	00-1C-58-10-59-50	-72	4	00-1C-58-10-59-50	-65
	5	00-1C-58-10-59-50	-67	5	00-1C-58-10-59-50	-44
10	1	00-1C-58-10-59-50	-70	1	00-1C-58-10-59-50	-61
	2	00-1C-58-10-59-50	-82	2	00-1C-58-10-59-50	-64
	3	00-1C-58-10-59-50	-72	3	00-1C-58-10-59-50	-63
	4	00-1C-58-10-59-50	-72	4	00-1C-58-10-59-50	-66
	5	00-1C-58-10-59-50	-70	5	00-1C-58-10-59-50	-64

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารเครื่องมือ 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
11	1	00-1C-58-10-59-50	-71	1	00-1C-58-10-59-50	-64
	2	00-1C-58-10-59-50	-70	2	00-1C-58-10-59-50	-66
	3	00-1C-58-10-59-50	-65	3	00-1C-58-10-59-50	-61
	4	00-1C-58-10-59-50	-66	4	00-1C-58-10-59-50	-63
	5	00-1C-58-10-59-50	-66	5	00-1C-58-10-59-50	-64
12	1	00-1C-58-10-59-50	-68	1	00-1C-58-10-59-50	-64
	2	00-1C-58-10-59-50	-67	2	00-1C-58-10-59-50	-58
	3	00-1C-58-10-59-50	-65	3	00-1C-58-10-59-50	-58
	4	00-1C-58-10-59-50	-67	4	00-1C-58-10-59-50	-62
	5	00-1C-58-10-59-50	-68	5	00-1C-58-10-59-50	-58
13	1	00-1C-58-10-1F-F0	-92	1	00-1C-58-10-1F-F0	-68
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-85	2	00-1C-58-10-1F-F0	-69
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-85	3	00-1C-58-10-1F-F0	-69
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-84	4	00-1C-58-10-1F-F0	-69
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-84	5	00-1C-58-10-1F-F0	-81
14	1	00-1C-58-10-1F-F0	-85	1	00-1C-58-10-1F-F0	-64
	2	00-1C-58-10-59-50	-85	2	00-1C-58-10-1F-F0	-63
	3	00-1C-58-10-59-50	-86	3	00-1C-58-10-1F-F0	-60
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-85	4	00-1C-58-10-1F-F0	-68
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-85	5	00-1C-58-10-1F-F0	-64
15	1	00-1C-58-10-59-50	-85	1	00-1C-58-10-1F-F0	-72
	2	00-1C-58-10-59-50	-87	2	00-1C-58-10-1F-F0	-68
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-78	3	00-1C-58-10-1F-F0	-63
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-85	4	00-1C-58-10-1F-F0	-68
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-78	5	00-1C-58-10-1F-F0	-70

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารเครื่องมือ 4 (ทิศเหนือ N)

ชั้นที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
16	1	00-1C-58-10-1F-F0	-71	1	00-1C-58-10-1F-F0	-56
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-70	2	00-1C-58-10-1F-F0	-56
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-71	3	00-1C-58-10-1F-F0	-64
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-72	4	00-1C-58-10-59-50	-63
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-70	5	00-1C-58-10-1F-F0	-65
17	1	00-1C-58-10-1F-F0	-65	1	00-1C-58-10-1F-F0	-62
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-68	2	00-1C-58-10-59-50	-65
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-65	3	00-1C-58-10-1F-F0	-63
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-64	4	00-1C-58-10-1F-F0	-63
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-70	5	00-1C-58-10-59-50	-66
18	1	00-1C-58-10-1F-F0	-58	1	00-1C-58-10-1F-F0	-49
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-56	2	00-1C-58-10-1F-F0	-52
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-58	3	00-1C-58-10-1F-F0	-54
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-56	4	00-1C-58-10-1F-F0	-54
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-58	5	00-1C-58-10-1F-F0	-56
19	1	00-1C-58-10-1F-F0	-75	1	00-1C-58-10-1F-F0	-70
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-75	2	00-1C-58-10-1F-F0	-70
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-77	3	00-1C-58-10-1F-F0	-67
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-74	4	00-1C-58-10-1F-F0	-71
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-74	5	00-1C-58-10-1F-F0	-67
20	1	00-1C-58-10-1F-F0	-63	1	00-1C-58-10-1F-F0	-54
	2	00-1C-58-10-1F-F0	-63	2	00-1C-58-10-1F-F0	-54
	3	00-1C-58-10-1F-F0	-66	3	00-1C-58-10-1F-F0	-52
	4	00-1C-58-10-1F-F0	-63	4	00-1C-58-10-1F-F0	-58
	5	00-1C-58-10-1F-F0	-62	5	00-1C-58-10-1F-F0	-54

ตารางที่ 4-3 ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
1	1	00-1B-D4-F5-15-70	-77	1	00-1B-D4-F5-15-70	-65
	2	00-1B-D4-F5-15-70	-78	2	00-1B-D4-F5-15-70	-58
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-77	3	00-1B-D4-F5-15-70	-69
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-80	4	00-1B-D4-F5-15-70	-69
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-79	5	00-1B-D4-F5-15-70	-66
2	1	00-1B-D4-F5-15-70	-83	1	00-1B-D4-F5-15-70	-66
	2	00-1B-D4-F5-15-70	-85	2	00-1B-D4-F5-15-70	-69
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-86	3	00-1B-D4-F5-15-70	-66
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-86	4	00-1B-D4-F5-15-70	-70
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-76	5	00-1B-D4-F5-15-70	-64
3	1	00-1B-D4-F5-16-90	-81	1	00-1B-D4-F5-16-90	-66
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-83	2	00-1B-D4-F5-16-90	-69
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-82	3	00-1B-D4-F5-16-90	-72
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-83	4	00-1B-D4-F5-16-90	-70
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-81	5	00-1B-D4-F5-16-90	-64
4	1	00-1B-D4-EA-60-90	-93	1	00-1B-D4-F5-16-90	-70
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-79	2	00-1B-D4-F5-16-90	-66
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-82	3	00-1B-D4-F5-16-90	-69
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-83	4	00-1B-D4-F5-16-90	-65
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-84	5	00-1B-D4-F5-16-90	-68
5	1	00-1B-D4-F5-18-50	-79	1	00-1B-D4-F5-18-50	-69
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-82	2	00-1B-D4-F5-18-50	-67
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-83	3	00-1B-D4-F5-18-50	-68
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-80	4	00-1B-D4-F5-18-50	-65
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-81	5	00-1B-D4-F5-18-50	-68

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
6	1	00-1B-D4-F5-18-50	-72	1	00-1B-D4-F5-18-50	-60
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-72	2	00-1B-D4-F5-18-50	-63
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-73	3	00-1B-D4-F5-18-50	-67
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-75	4	00-1B-D4-F5-18-50	-69
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-75	5	00-1B-D4-F5-18-50	-66
7	1	00-1B-D4-F5-17-10	-75	1	00-1B-D4-F5-17-10	-65
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-69	2	00-1B-D4-F5-17-10	-65
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-70	3	00-1B-D4-F5-17-10	-62
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-71	4	00-1B-D4-F5-17-10	-64
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-95	5	00-1B-D4-F5-17-10	-65
8	1	00-1B-D4-F5-16-20	-83	1	00-15-62-17-5D-90	-65
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-80	2	00-15-62-17-5D-90	-69
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-85	3	00-15-62-17-5D-90	-72
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-85	4	00-1B-D4-F5-16-20	-76
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-81	5	00-1B-D4-F5-16-20	-67
9	1	00-1B-D4-F5-17-10	-79	1	00-15-62-17-5D-90	-63
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-78	2	00-15-62-17-5D-90	-58
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-79	3	00-15-62-17-5D-90	-60
	4	00-15-62-17-5D-90	-78	4	00-1B-D4-F5-17-10	-59
	5	00-15-62-17-5D-90	-79	5	00-15-62-17-5D-90	-60
10	1	00-1B-D4-F5-18-70	-81	1	00-1B-D4-F5-15-70	-63
	2	00-1B-D4-F5-18-70	-82	2	00-1B-D4-F5-15-70	-60
	3	00-1B-D4-F5-16-20	-86	3	00-1B-D4-F5-15-70	-63
	4	00-15-62-17-5D-90	-79	4	00-15-62-17-5D-90	-61
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-85	5	00-1B-D4-F5-15-70	-65

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
11	1	00-1B-D4-F5-15-70	-93	1	00-1B-D4-F5-15-70	-71
	2	00-1B-D4-F5-15-70	-83	2	00-1B-D4-F5-15-70	-68
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-89	3	00-1B-D4-F5-15-70	-74
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-89	4	00-1B-D4-F5-15-70	-66
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-85	5	00-1B-D4-F5-15-70	-69
12	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-80	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-65
	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-80	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-66
	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-79	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-57
	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-78	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-50
	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-79	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-64
13	1	00-1B-D4-F5-16-90	-87	1	00-1B-D4-F5-16-90	-69
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-85	2	00-1B-D4-F5-15-70	-68
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-83	3	00-1B-D4-F5-15-70	-70
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-85	4	00-1B-D4-F5-15-90	-69
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-83	5	00-1B-D4-F5-15-70	-70
14	1	00-1B-D4-F5-16-90	-83	1	00-1B-D4-F5-16-90	-72
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-83	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-75
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-83	3	00-1B-D4-F5-16-90	-71
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-84	4	00-1B-D4-F5-16-90	-73
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-85	5	00-1B-D4-F5-16-90	-69
15	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-85	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-70
	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-87	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-69
	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-87	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-75
	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-87	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-74
	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-85	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-71

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
16	1	00-1B-D4-F5-15-90	-80	1	00-1B-D4-F5-16-90	-72
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-88	2	00-1B-D4-F5-16-90	-66
	3	00-1B-D4-EA-60-90	-87	3	00-1B-D4-F5-16-90	-65
	4	00-1B-D4-EA-60-90	-87	4	00-1B-D4-F5-16-90	-68
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-84	5	00-1B-D4-F5-16-90	-76
17	1	00-1B-D4-EA-60-90	-74	1	00-1B-D4-EA-60-90	-70
	2	00-1B-D4-EA-60-90	-76	2	00-1B-D4-EA-60-90	-64
	3	00-1B-D4-EA-60-90	-72	3	00-1B-D4-EA-60-90	-71
	4	00-1B-D4-EA-60-90	-72	4	00-1B-D4-EA-60-90	-65
	5	00-1B-D4-EA-60-90	-77	5	00-1B-D4-EA-60-90	-65
18	1	00-1B-D4-F5-16-90	-79	1	00-1B-D4-F5-18-50	-70
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-87	2	00-1B-D4-F5-18-50	-76
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-80	3	00-1B-D4-F5-18-50	-70
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-87	4	00-15-62-17-5F-50	-73
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-88	5	00-1B-D4-F5-18-50	-74
19	1	00-1B-D4-F5-18-50	-82	1	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-87	2	00-1B-D4-F5-18-50	-68
	3	00-1B-D4-EA-60-C0	-80	3	00-1B-D4-F5-18-50	-68
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-76	4	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-89	5	00-1B-D4-F5-18-50	-68
20	1	00-1B-D4-EA-60-90	-80	1	00-1B-D4-EA-60-90	-63
	2	00-1B-D4-EA-60-90	-79	2	00-1B-D4-EA-60-90	-66
	3	00-1B-D4-EA-60-90	-84	3	00-1B-D4-EA-60-90	-64
	4	00-1B-D4-EA-60-90	-75	4	00-1B-D4-EA-60-90	-63
	5	00-1B-D4-EA-60-90	-75	5	00-1B-D4-EA-60-90	-68

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
21	1	00-1B-D4-F5-18-50	-85	1	00-1B-D4-F5-18-50	-75
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-88	2	00-1B-D4-F5-18-50	-77
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-91	3	00-1B-D4-F5-18-50	-78
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-92	4	00-1B-D4-F5-18-50	-76
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-92	5	00-1B-D4-F5-18-50	-79
22	1	00-1B-D4-86-95-F0	-73	1	00-1B-D4-F5-17-10	-61
	2	00-1B-D4-86-95-F0	-73	2	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	3	00-1B-D4-86-95-F0	-72	3	00-1B-D4-F5-17-10	-62
	4	00-1B-D4-86-95-F0	-71	4	00-1B-D4-F5-17-10	-62
	5	00-1B-D4-86-95-F0	-67	5	00-1B-D4-F5-17-10	-55
23	1	00-1B-D4-F5-17-10	-74	1	00-1B-D4-F5-17-10	-58
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-69	2	00-1B-D4-F5-17-10	-60
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-67	3	00-1B-D4-F5-17-10	-56
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-65	4	00-1B-D4-F5-17-10	-67
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-67	5	00-1B-D4-F5-17-10	-54
24	1	00-1B-D4-86-95-F0	-81	1	00-1B-D4-F5-17-10	-68
	2	00-1B-D4-86-95-F0	-78	2	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	3	00-1B-D4-86-95-F0	-85	3	00-1B-D4-F5-18-50	-73
	4	00-1B-D4-86-95-F0	-83	4	00-1B-D4-86-95-F0	-69
	5	00-1B-D4-86-95-F0	-84	5	00-1B-D4-F5-17-10	-64
25	1	00-1B-D4-F5-17-10	-65	1	00-1B-D4-F5-17-10	-48
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-66	2	00-1B-D4-F5-17-10	-42
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-61	3	00-1B-D4-F5-17-10	-42
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-65	4	00-1B-D4-F5-17-10	-53
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-65	5	00-1B-D4-F5-17-10	-44

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศตะวันออกE)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
26	1	00-1B-D4-F5-17-10	-76	1	00-1B-D4-F5-17-10	-60
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-80	2	00-1B-D4-F5-17-10	-66
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-89	3	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-81	4	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-77	5	00-1B-D4-F5-17-10	-66
27	1	00-1B-D4-F5-16-20	-75	1	00-15-62-17-5D-90	-66
	2	00-1B-D4-F5-16-20	-74	2	00-1B-D4-F5-16-20	-62
	3	00-1B-D4-F5-16-20	-75	3	00-1B-D4-F5-16-20	-64
	4	00-1B-D4-F5-16-20	-82	4	00-15-62-17-5D-90	-69
	5	00-1B-D4-F5-16-20	-80	5	00-1B-D4-F5-16-20	-63
28	1	00-15-62-17-5D-90	-56	1	00-15-62-17-5D-90	-47
	2	00-15-62-17-5D-90	-60	2	00-15-62-17-5D-90	-38
	3	00-15-62-17-5D-90	-59	3	00-15-62-17-5D-90	-42
	4	00-15-62-17-5D-90	-59	4	00-15-62-17-5D-90	-43
	5	00-15-62-17-5D-90	-61	5	00-15-62-17-5D-90	-41
29	1	00-1B-D4-F5-17-10	-81	1	00-1B-D4-F5-17-10	-58
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-80	2	00-1B-D4-F5-17-10	-60
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-72	3	00-1B-D4-F5-17-10	-59
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-73	4	00-1B-D4-F5-17-10	-55
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-72	5	00-1B-D4-F5-17-10	-52
30	1	00-1B-D4-F5-17-10	-76	1	00-1B-D4-F5-17-10	-46
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-69	2	00-1B-D4-F5-17-10	-59
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-91	3	00-1B-D4-F5-17-10	-51
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-72	4	00-1B-D4-F5-17-10	-51
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-71	5	00-1B-D4-F5-17-10	-46

ตารางที่ 4-4 ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
1	1	00-1B-D4-F5-15-70	-83	1	00-1B-D4-F5-15-70	-62
	2	00-1B-D4-F5-15-70	-79	2	00-1B-D4-F5-15-70	-64
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-82	3	00-1B-D4-F5-15-70	-66
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-79	4	00-1B-D4-F5-15-70	-70
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-83	5	00-1B-D4-F5-15-70	-66
2	1	00-1B-D4-F5-15-70	-76	1	00-1B-D4-F5-15-70	-64
	2	00-1B-D4-F5-15-70	-80	2	00-1B-D4-F5-15-70	-64
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-82	3	00-1B-D4-F5-15-70	-62
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-79	4	00-1B-D4-F5-15-70	-61
	5	00-1B-D4-F5-15-70	-82	5	00-1B-D4-F5-15-70	-63
3	1	00-1B-D4-F5-15-70	-77	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-69
	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-87	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-70
	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-87	3	00-1B-D4-F5-16-90	-70
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-86	4	00-1B-D4-F5-16-90	-76
	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-86	5	00-1B-D4-F5-16-90	-66
4	1	00-1B-D4-F5-16-90	-79	1	00-1B-D4-F5-16-90	-68
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-81	2	00-1B-D4-F5-16-90	-68
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-74	3	00-1B-D4-F5-16-90	-75
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-81	4	00-1B-D4-F5-16-90	-71
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-80	5	00-1B-D4-F5-16-90	-82
5	1	00-1B-D4-F5-18-50	-80	1	00-1B-D4-F5-18-50	-64
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-85	2	00-1B-D4-F5-18-50	-65
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-86	3	00-1B-D4-F5-18-50	-64
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-81	4	00-1B-D4-F5-18-50	-66
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-81	5	00-1B-D4-F5-18-50	-64

รูปที่ 4-4 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Swiched-Beam Antenna (dBm)
6	1	00-1B-D4-F5-18-50	-66	1	00-1B-D4-F5-18-50	-63
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-66	2	00-1B-D4-F5-18-50	-64
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-70	3	00-1B-D4-F5-18-50	-73
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-77	4	00-1B-D4-F5-18-50	-60
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-75	5	00-1B-D4-F5-18-50	-61
7	1	00-1B-D4-F5-17-10	-72	1	00-1B-D4-F5-17-10	-68
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-72	2	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-72	3	00-1B-D4-F5-17-10	-70
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-77	4	00-1B-D4-F5-17-10	-56
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-69	5	00-1B-D4-F5-17-10	-58
8	1	00-1B-D4-F5-16-20	-83	1	00-1B-D4-F5-17-10	-70
	2	00-1B-D4-F5-16-20	-80	2	00-1B-D4-F5-17-10	-68
	3	00-1B-D4-F5-16-20	-81	3	00-1B-D4-F5-17-10	-65
	4	00-1B-D4-F5-16-20	-82	4	00-1B-D4-F5-16-20	-74
	5	00-1B-D4-F5-16-20	-79	5	00-1B-D4-F5-16-20	-69
9	1	00-15-62-17-5D-90	-74	1	00-15-62-17-5D-90	-57
	2	00-1B-D4-F5-16-20	-76	2	00-15-62-17-5D-90	-58
	3	00-15-62-17-5D-90	-74	3	00-15-62-17-5D-90	-56
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-72	4	00-15-62-17-5D-90	-56
	5	00-15-62-17-5D-90	-71	5	00-15-62-17-5D-90	-56
10	1	00-1B-D4-F5-16-20	-94	1	00-1B-D4-F5-15-70	-58
	2	00-15-62-17-5D-90	-76	2	00-1B-D4-F5-15-70	-65
	3	00-1B-D4-F5-16-20	-87	3	00-1B-D4-F5-15-70	-60
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-79	4	00-1B-D4-F5-15-70	-63
	5	00-15-62-17-5E-20	-96	5	00-1B-D4-F5-15-70	-61

ตารางที่ 4-4 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
11	1	00-1B-D4-F5-15-70	-90	1	00-1B-D4-F5-15-70	-74
	2	00-1B-D4-F5-15-70	-84	2	00-1B-D4-F5-15-70	-64
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-87	3	00-1B-D4-F5-15-70	-74
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-85	4	00-1B-D4-F5-15-70	-73
	5	00-15-62-17-5E-20	-98	5	00-1B-D4-F5-15-70	-70
12	1	00-1B-D4-68-8A-E0	-74	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-48
	2	00-1B-D4-68-8A-E0	-82	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-56
	3	00-1B-D4-68-8A-E0	-74	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-46
	4	00-1B-D4-68-8A-E0	-82	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-54
	5	00-1B-D4-68-8A-E0	-75	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-47
13	1	00-1B-D4-F5-16-90	-83	1	00-1B-D4-F5-15-70	-65
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-82	2	00-1B-D4-F5-15-70	-68
	3	00-1B-D4-F5-15-70	-83	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-81
	4	00-1B-D4-F5-15-70	-85	4	00-1B-D4-F5-15-70	-66
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-84	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-78
14	1	00-15-62-17-5E-20	-81	1	00-1B-D4-F5-16-90	-72
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-80	2	00-1B-D4-F5-16-90	-67
	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-82	3	00-1B-D4-F5-16-90	-70
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-77	4	00-1B-D4-F5-16-90	-67
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-82	5	00-1B-D4-F5-16-90	-69
15	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-84	1	00-1B-D4-86-8A-E0	-74
	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-81	2	00-1B-D4-86-8A-E0	-68
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-89	3	00-1B-D4-86-8A-E0	-74
	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-83	4	00-1B-D4-86-8A-E0	-69
	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-91	5	00-1B-D4-86-8A-E0	-70

ตารางที่ 4-4 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
16	1	00-1B-D4-F5-16-90	-82	1	00-1B-D4-F5-16-90	-69
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-85	2	00-1B-D4-F5-16-90	-72
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-88	3	00-1B-D4-F5-16-90	-69
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-84	4	00-1B-D4-F5-16-90	-72
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-83	5	00-1B-D4-EA-60-C0	-74
17	1	00-1B-D4-EA-60-90	-68	1	00-1B-D4-EA-60-90	-56
	2	00-1B-D4-EA-60-90	-74	2	00-1B-D4-EA-60-90	-56
	3	00-1B-D4-EA-60-90	-67	3	00-1B-D4-EA-60-90	-56
	4	00-1B-D4-EA-60-90	-71	4	00-1B-D4-EA-60-90	-65
	5	00-1B-D4-EA-60-90	-76	5	00-1B-D4-EA-60-90	-63
18	1	00-1B-D4-F5-16-90	-79	1	00-1B-D4-F5-16-90	-69
	2	00-1B-D4-F5-16-90	-79	2	00-1B-D4-F5-16-90	-63
	3	00-1B-D4-F5-16-90	-79	3	00-1B-D4-F5-16-90	-64
	4	00-1B-D4-F5-16-90	-85	4	00-1B-D4-F5-16-90	-64
	5	00-1B-D4-F5-16-90	-79	5	00-1B-D4-F5-16-90	-66
19	1	00-1B-D4-F5-18-50	-87	1	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-82	2	00-1B-D4-F5-18-50	-68
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-87	3	00-1B-D4-F5-18-50	-70
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-84	4	00-1B-D4-F5-18-50	-64
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-81	5	00-1B-D4-F5-18-50	-68
20	1	00-1B-D4-EA-60-90	-81	1	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	2	00-1B-D4-EA-60-90	-77	2	00-1B-D4-F5-18-50	-71
	3	00-1B-D4-EA-60-90	-82	3	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	4	00-1B-D4-EA-60-90	-79	4	00-1B-D4-EA-60-90	-72
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-87	5	00-1B-D4-EA-60-90	-69

ตารางที่ 4-4 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)

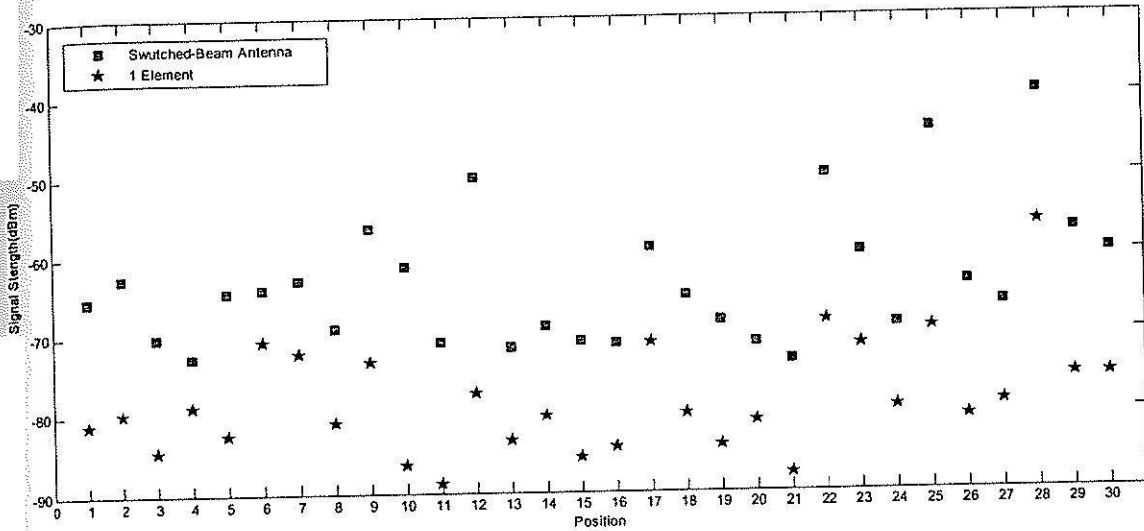
ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
21	1	00-1B-D4-F5-18-50	-86	1	00-1B-D4-F5-18-50	-76
	2	00-1B-D4-F5-18-50	-90	2	00-1B-D4-F5-18-50	-75
	3	00-1B-D4-F5-18-50	-89	3	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	4	00-1B-D4-F5-18-50	-89	4	00-1B-D4-F5-18-50	-70
	5	00-1B-D4-F5-18-50	-85	5	00-1B-D4-F5-18-50	-74
22	1	00-1B-D4-F5-17-10	-64	1	00-1B-D4-F5-17-10	-51
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-74	2	00-1B-D4-F5-17-10	-42
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-62	3	00-1B-D4-F5-17-10	-54
	4	00-1B-D4-86-95-F0	-82	4	00-1B-D4-F5-17-10	-49
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-61	5	00-1B-D4-F5-17-10	-54
23	1	00-1B-D4-F5-17-10	-68	1	00-1B-D4-F5-17-10	-68
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-70	2	00-1B-D4-F5-17-10	-59
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-72	3	00-1B-D4-F5-17-10	-60
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-71	4	00-1B-D4-F5-17-10	-60
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-77	5	00-1B-D4-F5-17-10	-52
24	1	00-1B-D4-F5-18-50	-84	1	00-1B-D4-86-95-F0	-70
	2	00-1B-D4-86-95-F0	-81	2	00-1B-D4-F5-18-50	-72
	3	00-1B-D4-86-95-F0	-79	3	00-1B-D4-86-95-F0	-69
	4	00-1B-D4-86-95-F0	-77	4	00-1B-D4-86-95-F0	-66
	5	00-1B-D4-86-95-F0	-77	5	00-1B-D4-F5-17-10	-68
25	1	00-1B-D4-F5-18-50	-89	1	00-1B-D4-F5-17-10	-44
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-64	2	00-1B-D4-F5-17-10	-41
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-66	3	00-1B-D4-F5-17-10	-46
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-64	4	00-1B-D4-F5-17-10	-44
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-65	5	00-1B-D4-F5-17-10	-47

ตารางที่ 4-4 (ต่อ) ผลการวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณอาคารวิชาการ ชั้น 4 (ทิศเหนือ N)

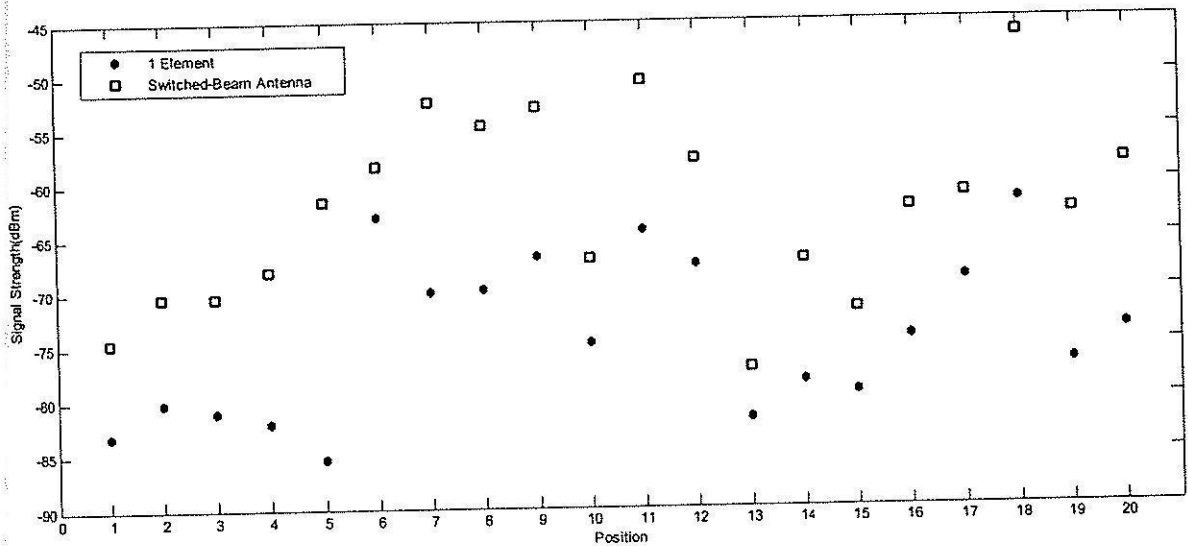
ตำแหน่งที่	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From 1 element (dBm)	ครั้งที่	MAC Address	Signal Strength From Switched-Beam Antenna (dBm)
26	1	00-1B-D4-F5-17-10	-77	1	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	2	00-1B-D4-EA-60-70	-95	2	00-1B-D4-F5-17-10	-63
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-78	3	00-1B-D4-F5-17-10	-65
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-74	4	00-1B-D4-F5-17-10	-68
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-80	5	00-1B-D4-F5-17-10	-60
27	1	00-1B-D4-F5-16-20	-76	1	00-1B-D4-F5-17-10	-65
	2	00-1B-D4-F5-16-20	-82	2	00-1B-D4-F5-16-20	-68
	3	00-1B-D4-F5-16-20	-77	3	00-1B-D4-F5-16-20	-67
	4	00-1B-D4-F5-16-20	-79	4	00-15-62-17-5D-90	-66
	5	00-1B-D4-F5-16-20	-81	5	00-1B-D4-F5-17-10	-66
28	1	00-15-62-17-5D-90	-65	1	00-15-62-17-5D-90	-44
	2	00-15-62-17-5D-90	-53	2	00-15-62-17-5D-90	-45
	3	00-15-62-17-5D-90	-54	3	00-15-62-17-5D-90	-40
	4	00-15-62-17-5D-90	-54	4	00-15-62-17-5D-90	-34
	5	00-15-62-17-5D-90	-56	5	00-15-62-17-5D-90	-36
29	1	00-1B-D4-F5-17-10	-94	1	00-1B-D4-F5-17-10	-59
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-71	2	00-1B-D4-F5-17-10	-58
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-70	3	00-1B-D4-F5-17-10	-58
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-71	4	00-1B-D4-F5-17-10	-57
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-72	5	00-1B-D4-F5-17-10	-54
30	1	00-1B-D4-F5-17-10	-94	1	00-1B-D4-F5-18-50	-83
	2	00-1B-D4-F5-17-10	-71	2	00-1B-D4-F5-17-10	-53
	3	00-1B-D4-F5-17-10	-70	3	00-1B-D4-F5-17-10	-54
	4	00-1B-D4-F5-17-10	-71	4	00-1B-D4-F5-17-10	-55
	5	00-1B-D4-F5-17-10	-72	5	00-1B-D4-F5-17-10	-54

จากตารางที่ 4-1 ถึง 4-4 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดความแรงของสัญญาณจากระบบสวิตซ์ลำคลื่น
อัตโนมัติใน 2 สถานที่ และในแต่ละตำแหน่งได้วัดซ้ำติดต่อกันเป็นจำนวน 5 ครั้ง ต่อไปจะนำผลที่ได้จาก
ตารางดังกล่าวมาพลอตกราฟเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะแบ่งประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณ



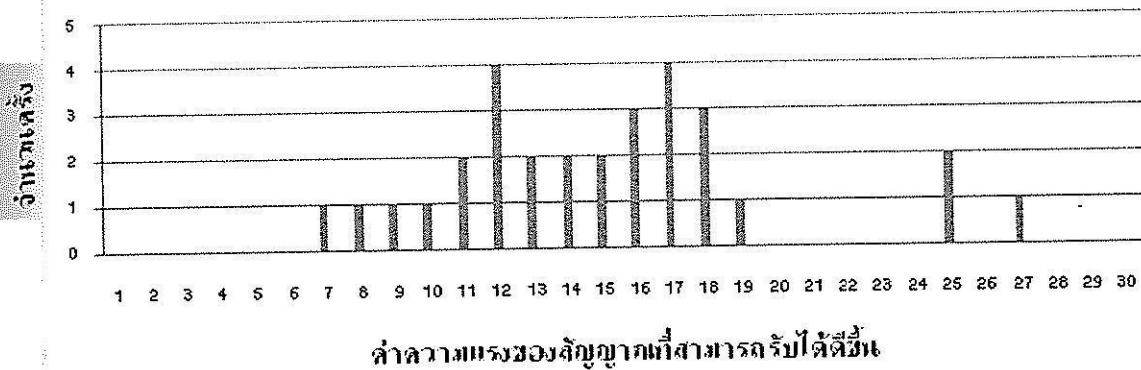
รูปที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ อาคารวิชาการชั้น 4



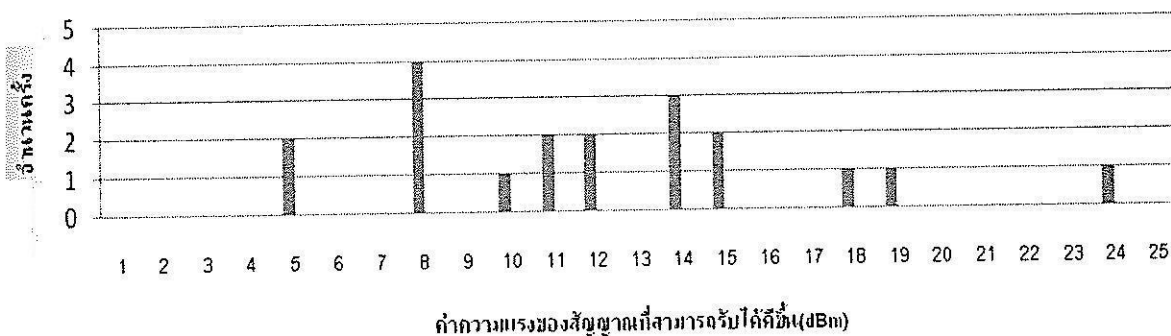
รูปที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยของความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4

จากรูปที่ 4-3 และ 4-4 แสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติทำให้ค่าความแรงของสัญญาณโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

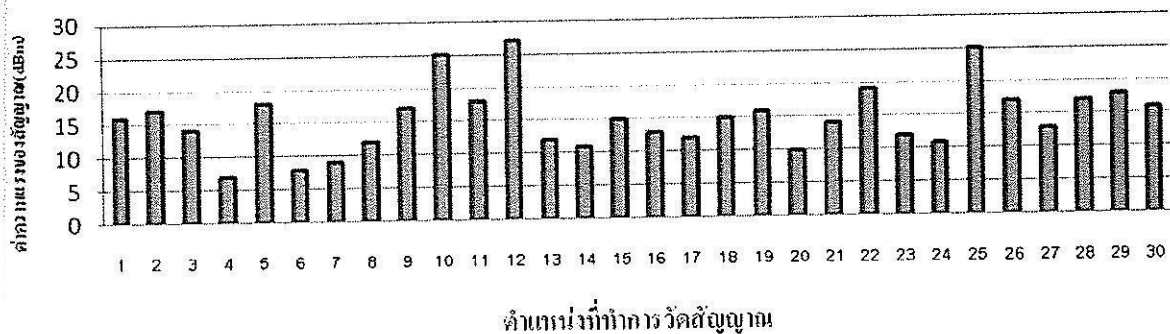
การเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ



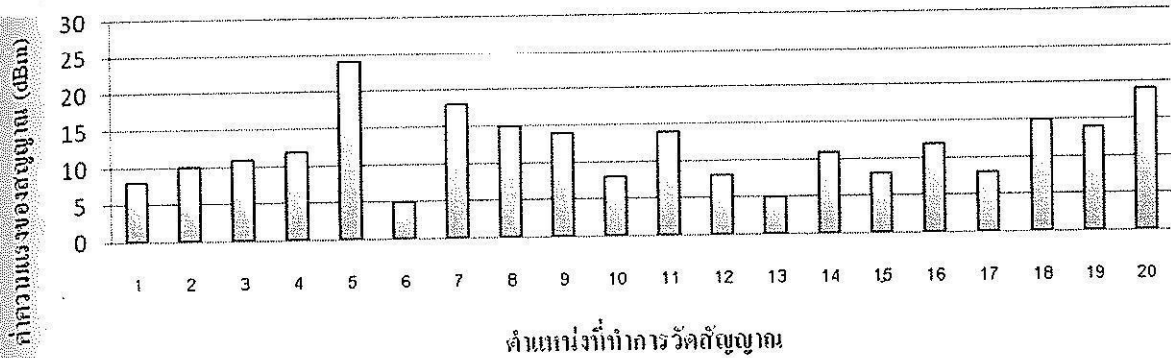
รูปที่ 4-5 ความน่าจะเป็นของการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ ณ อาคารวิชาการชั้น 4



รูปที่ 4-6 ความน่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของสัญญาณกับตำแหน่งที่ทำการวัด ณ อาคารวิชาการชั้น 4



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของสัญญาณกับตำแหน่งที่ทำการวัด ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4

รูปที่ 4-5 และ 4-6 แสดงให้เห็นว่า ระบบสวิทช์ล้าคลื่นอัตโนมัติเพิ่มความแรงของสัญญาณ ซึ่งที่อาคารวิชาการชั้น 4 เพิ่มได้มากที่สุดเท่ากับ 12 และ 17 dBm ส่วนที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 เพิ่มได้มากที่สุดเท่ากับ 8 dBm ซึ่งค่าที่ปรากฏนี้เป็นค่าที่เทียบกับการใช้งานสายอากาศรอบทิศทางเพียงคันเดียว

ในรูปที่ 4-7 และ 4-8 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาในทุกๆ ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบระบบ การใช้ระบบสวิทช์ล้าคลื่นแบบอัตโนมัติให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าการใช้สายอากาศรอบทิศทางเพียงคันเดียวสังเกตได้จากค่าความแรงของสัญญาณที่มากกว่า 0 dBm ในทุกๆ ตำแหน่งที่ทำการวัด

4.3.2 ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติแบบพกพา

เช่นเดียวกับกับระบบในหัวข้อ 4.3.1 จะเริ่มทดสอบชุดระบบต้นแบบด้วยการวัดความแรงของสัญญาณ ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะวัดซ้ำๆ กันเป็นจำนวน 5 ครั้ง ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4-5 ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการชั้น 4 (แบบพกพา)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากสาขาอากาศ 1 ตัน (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา (dBm)
1	1	-56	1	-56
	2	-60	2	-58
	3	-58	3	-55
	4	-59	4	-56
	5	-58	5	-55
2	1	-56	1	-54
	2	-58	2	-58
	3	-57	3	-56
	4	-58	4	-54
	5	-56	5	-53
3	1	-48	1	-46
	2	-48	2	-47
	3	-47	3	-43
	4	-47	4	-42
	5	-48	5	-43
4	1	-49	1	-47
	2	-48	2	-48
	3	-47	3	-46
	4	-49	4	-45
	5	-48	5	-47
5	1	-57	1	-56
	2	-58	2	-55
	3	-56	3	-57
	4	-57	4	-56
	5	-58	5	-56

ตารางที่ 4-5 (ต่อ) ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการชั้น 4 (แบบพกพา)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 ตัน (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จาก ระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบ พกพา (dBm)
6	1	-58	1	-56
	2	-58	2	-53
	3	-56	3	-57
	4	-57	4	-55
	5	-56	5	-57
7	1	-45	1	-44
	2	-47	2	-46
	3	-48	3	-43
	4	-45	4	-41
	5	-44	5	-40
8	1	-46	1	-45
	2	-47	2	-43
	3	-48	3	-43
	4	-45	4	-44
	5	-46	5	-42
9	1	-53	1	-54
	2	-54	2	-53
	3	-54	3	-53
	4	-55	4	-51
	5	-53	5	-52
10	1	-50	1	-49
	2	-52	2	-51
	3	-51	3	-47
	4	-52	4	-49
	5	-51	5	-48

ตารางที่ 4-5 (ต่อ) ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการชั้น 4 (แบบพกพา)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศ 1 คืบ (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา (dBm)
11	1	-55	1	-50
	2	-53	2	-51
	3	-54	3	-49
	4	-53	4	-51
	5	-54	5	-49
12	1	-66	1	-62
	2	-65	2	-66
	3	-66	3	-65
	4	-65	4	-65
	5	-67	5	-64
13	1	-61	1	-60
	2	-65	2	-62
	3	-63	3	-62
	4	-62	4	-61
	5	-63	5	-64
14	1	-53	1	-50
	2	-54	2	-49
	3	-53	3	-43
	4	-56	4	-52
	5	-54	5	-51
15	1	-58	1	-55
	2	-58	2	-53
	3	-57	3	-53
	4	-59	4	-52
	5	-57	5	-51

ตารางที่ 4-5 (ต่อ) ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการชั้น 4 (แบบพกพา)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศ 1 ตัน (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา (dBm)
16	1	-59	1	-56
	2	-58	2	-57
	3	-59	3	-53
	4	-57	4	-54
	5	-58	5	-56
17	1	-63	1	-63
	2	-63	2	-65
	3	-66	3	-63
	4	-65	4	-62
	5	-65	5	-65
18	1	-64	1	-60
	2	-65	2	-59
	3	-64	3	-59
	4	-63	4	-61
	5	-63	5	-62
19	1	-53	1	-52
	2	-55	2	-53
	3	-54	3	-53
	4	-53	4	-51
	5	-56	5	-52
20	1	-57	1	-52
	2	-56	2	-54
	3	-57	3	-53
	4	-54	4	-54
	5	-55	5	-53

ตารางที่ 4-6 ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารเครื่องมือ 4 (แบบพกพา)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 ต้น (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติ แบบพกพา (dBm)
1	1	-69	1	-66
	2	-68	2	-66
	3	-69	3	-64
	4	-66	4	-65
	5	-70	5	-63
2	1	-70	1	-67
	2	-71	2	-68
	3	-70	3	-69
	4	-71	4	-67
	5	-69	5	-68
3	1	-66	1	-65
	2	-60	2	-64
	3	-62	3	-66
	4	-64	4	-65
	5	-65	5	-65
4	1	-70	1	-60
	2	-70	2	-61
	3	-69	3	-60
	4	-70	4	-59
	5	-68	5	-59
5	1	-70	1	-58
	2	-69	2	-58
	3	-70	3	-59
	4	-70	4	-58
	5	-71	5	-57

ตารางที่ 4-6 (ต่อ) ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารเครื่องมือ 4 (แบบพกพา)

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 ดัน (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากระบบสวิตซ์ถ้าคลื่นอัตโนมัติ แบบพกพา (dBm)
6	1	-70	1	-61
	2	-69	2	-65
	3	-70	3	-64
	4	-70	4	-62
	5	-71	5	-63
7	1	-65	1	-57
	2	-65	2	-58
	3	-66	3	-57
	4	-65	4	-58
	5	-64	5	-56
8	1	-66	1	-52
	2	-65	2	-53
	3	-58	3	-53
	4	-61	4	-54
	5	-60	5	-53
9	1	-70	1	-60
	2	-68	2	-58
	3	-69	3	-59
	4	-68	4	-61
	5	-69	5	-61
10	1	-70	1	-67
	2	-70	2	-68
	3	-71	3	-65
	4	-70	4	-66
	5	-69	5	-65

ตารางที่ 4-6 (ต่อ) ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารเครื่องมือ 4 (แบบพกพา)

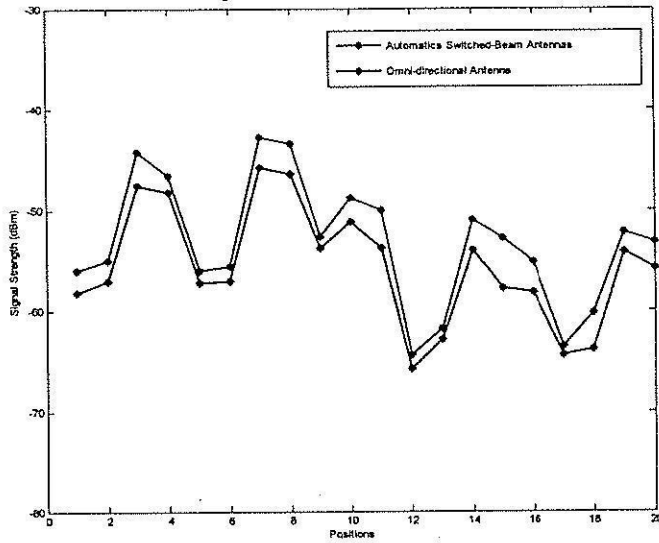
ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 ต้น (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติ แบบพกพา (dBm)
11	1	-71	1	-54
	2	-69	2	-55
	3	-69	3	-56
	4	-70	4	-56
	5	-69	5	-56
12	1	-70	1	-65
	2	-69	2	-64
	3	-71	3	-66
	4	-71	4	-65
	5	-70	5	-63
13	1	-71	1	-69
	2	-69	2	-68
	3	-69	3	-70
	4	-71	4	-68
	5	-70	5	-67
14	1	-69	1	-67
	2	-71	2	-68
	3	-69	3	-68
	4	-70	4	-70
	5	-69	5	69
15	1	-67	1	-68
	2	-69	2	-67
	3	-70	3	-69
	4	-70	4	-70
	5	-69	5	-66

ตารางที่ 4-6 (ต่อ) ค่าความแรงของสัญญาณ ณ อาคารเครื่องมือ 4 (แบบพกพา)

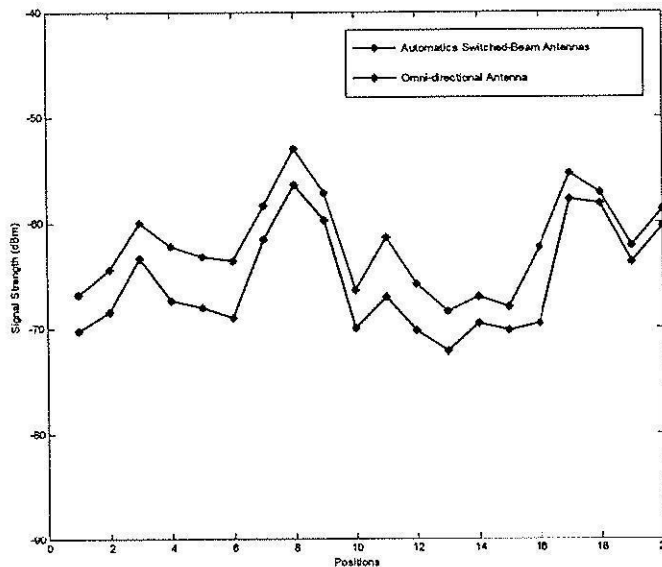
ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 คั่น (dBm)	ครั้งที่	ความแรงของสัญญาณที่วัดได้ จากระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติ แบบพกพา (dBm)
16	1	-67	1	64
	2	-71	2	-62
	3	-70	3	-60
	4	-71	4	-61
	5	-69	5	-65
17	1	-65	1	-56
	2	-65	2	-54
	3	-63	3	-55
	4	-63	4	-54
	5	-64	5	-53
18	1	-64	1	-59
	2	-63	2	-57
	3	-66	3	-60
	4	-65	4	-58
	5	-64	5	-60
19	1	-69	1	-66
	2	-71	2	-67
	3	-71	3	-65
	4	-71	4	-64
	5	-70	5	-62
20	1	-71	1	-69
	2	-69	2	-60
	3	-70	3	-62
	4	-70	4	-62
	5	-70	5	-60

จากตารางที่ 4-5 ถึง 4-6 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดความแรงของสัญญาณจากระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพหุใน 2 สถานที่ และในแต่ละตำแหน่งได้วัดซ้ำติดต่อกันเป็นจำนวน 5 ครั้ง ต่อไปจะนำผลที่ได้จากตารางดังกล่าวมาพลอตกราฟเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะแบ่งประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

ความแรงของสัญญาณโดยเฉลี่ย



รูปที่ 4-9 ความแรงของสัญญาณ ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4

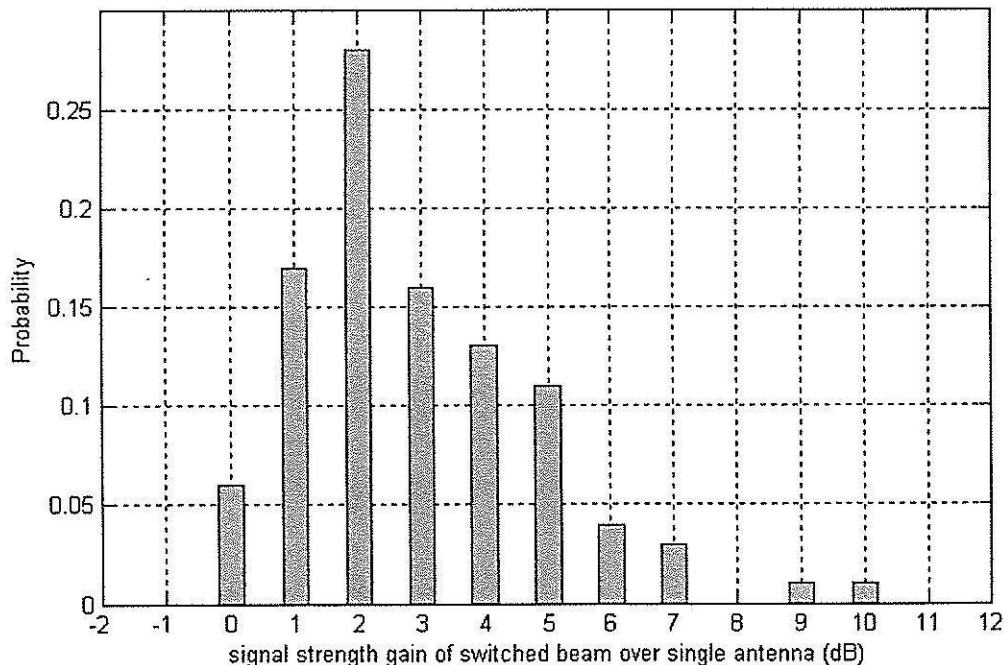


รูปที่ 4-10 ความแรงของสัญญาณ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4

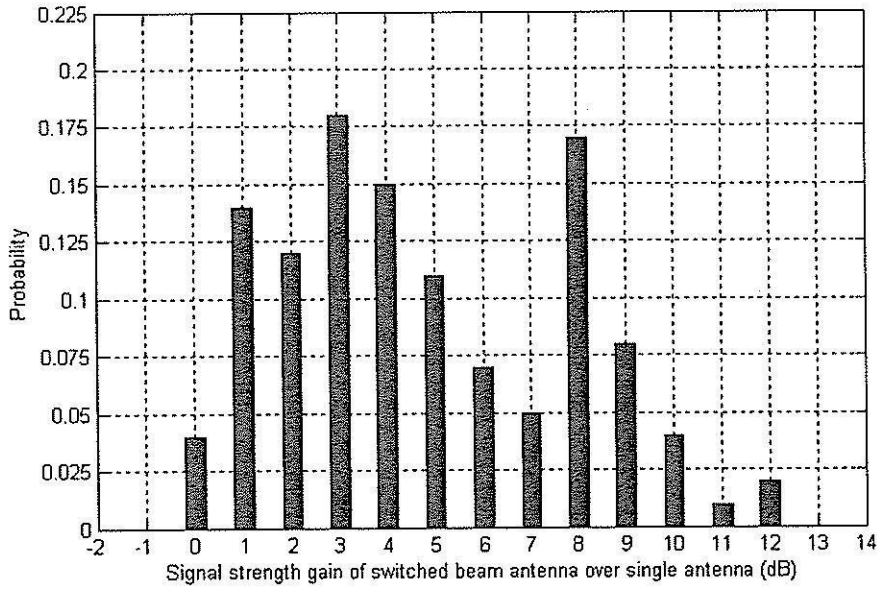
จากรูปที่ 4-9 และ 4-10 จะเห็นได้ว่า การใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพาทำให้เราสามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณในระบบวิทยุได้ อย่างไรก็ตามค่าความแรงของสัญญาณที่ได้ในรูปที่ 4-9 และ 4-10 ไม่สามารถเปรียบเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้จากรูปที่ 4-3 และ 4-4 เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ที่จะเปรียบเทียบความสมรรถนะของทั้งสองระบบ จึงไม่ได้ทำการทดสอบทั้งสองระบบในวันเวลาเดียวกัน

- การเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

การแสดงผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพาในโครงการวิจัยชิ้นนี้จะใช้การแสดงผลด้วยความน่าจะเป็นของการรับสัญญาณได้แรงขึ้นเทียบกับการใช้สายอากาศรอบทิศทางเพียงต้นเดียว ซึ่งได้ผลดังนี้



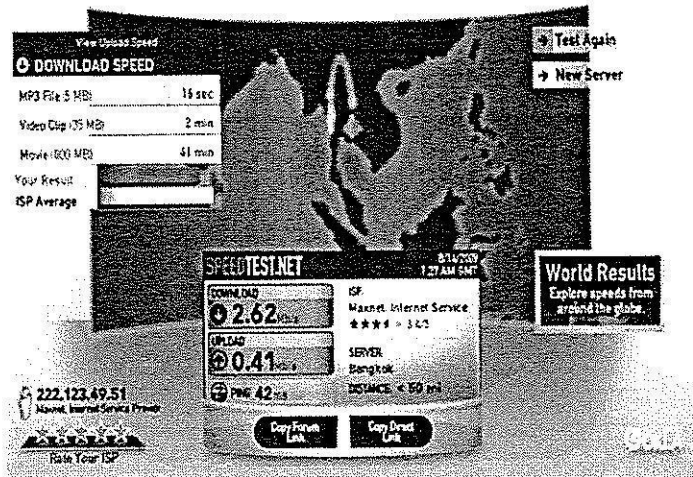
รูปที่ 4-11 ความน่าจะเป็นของการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ (พกพา) ณ อาคารวิชาการชั้น 4



รูปที่ 4-12 ความน่าจะเป็นของการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ (พกพา) ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4

จากรูปที่ 4-11 และ 4-12 จะเห็นได้ว่า ความน่าจะเป็นสูงสุดในการเพิ่มความแรงของสัญญาณที่บริเวณอาคารวิชาการชั้น 4 อยู่ที่ 2 dB และที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 มีค่าเท่ากับ 3 dB

- การทดสอบความเร็วของการเข้าใช้อินเทอร์เน็ต



รูปที่ 4-13 ภาพการทดสอบความเร็วในการเข้าใช้อินเทอร์เน็ตจากเว็บ www.speedtest.net

เพื่อยืนยันการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของระบบสายพ่าย ผู้วิจัยจึงเพิ่มการทดสอบความเร็วของการเข้าใช้อินเทอร์เน็ต เนื่องจากการเพิ่มความแรงของสัญญาณจะส่งผลทำให้การใช้งานอินเทอร์เน็ตกระทำได้เร็วขึ้นด้วย ซึ่งการทดสอบความเร็วดังกล่าวจะกระทำผ่านการเข้าเว็บ www.speedtest.net ดังที่แสดงในรูปแบบที่ 4-13 ผลในการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4-7 ความเร็วของการใช้อินเทอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการชั้น 4

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จากสายอากาศ 1 คัน (Mb/s)		ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จากระบบสวิตซ์ล้าคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา (Mb/s)	
		อัตราการส่งข้อมูล	อัตราการรับข้อมูล		อัตราการส่งข้อมูล	อัตราการรับข้อมูล
1	1	0.14	1.79	1	0.18	1.90
	2	0.12	1.79	2	0.16	1.91
	3	0.15	1.80	3	0.15	1.89
	4	0.12	1.81	4	0.17	2.00
	5	0.14	1.77	5	0.18	1.87
2	1	0.13	1.99	1	0.17	2.10
	2	0.15	2.00	2	0.20	2.09
	3	0.14	1.96	3	0.2	20.9
	4	0.13	1.97	4	0.16	2.00
	5	0.14	1.98	5	0.17	2.07
3	1	0.20	2.29	1	0.20	2.51
	2	0.20	2.29	2	0.23	2.52
	3	0.21	2.31	3	0.21	2.53
	4	0.19	2.34	4	0.20	2.50
	5	0.23	2.33	5	0.22	2.55

ตารางที่ 4-7 (ต่อ) ความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการชั้น 4

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จากสายอากาศ 1 ต้น (Mb/s)		ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จากระบบสวิตซ์ล้าคั่นอัตโนมัติแบบพกพา (Mb/s)	
4	1	0.10	1.13	1	0.14	1.27
	2	0.13	1.13	2	0.15	1.23
	3	0.12	1.15	3	0.13	1.25
	4	0.13	1.14	4	0.15	1.28
	5	0.12	1.12	5	0.14	1.24
5	1	0.07	0.99	1	0.10	1.12
	2	0.09	0.98	2	0.09	1.13
	3	0.10	0.99	3	0.09	1.13
	4	0.09	1.00	4	0.11	1.12
	5	0.08	0.97	5	0.18	1.13
6	1	0.19	2.39	1	0.20	2.51
	2	0.20	2.36	2	0.21	2.52
	3	0.19	2.37	3	0.19	2.53
	4	0.18	2.38	4	0.18	2.51
	5	0.19	2.37	5	0.22	2.51
7	1	0.23	2.42	1	0.25	2.60
	2	0.20	2.41	2	0.24	2.61
	3	0.23	2.40	3	0.25	2.59
	4	0.22	2.42	4	0.24	2.61
	5	0.21	2.43	5	0.25	2.59
8	1	0.16	2.13	1	0.20	2.29
	2	0.18	2.14	2	0.19	2.30
	3	1.15	2.13	3	0.19	2.27
	4	0.15	2.14	4	0.16	2.29
	5	0.14	2.19	5	0.17	2.28

ตารางที่ 4-7 (ต่อ) ความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการชั้น 4

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 ต้น (Mb/s)		ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จาก ระบบสวิตซ์ล้าคลื่นอัตโนมัติ แบบพกพา (Mb/s)	
9	1	0.17	2.27	1	0.20	2.33
	2	0.15	2.26	2	0.19	2.35
	3	0.18	2.27	3	0.21	2.32
	4	0.17	2.26	4	0.23	2.35
	5	0.16	2.26	5	0.22	2.36
10	1	0.09	0.99	1	0.13	1.14
	2	0.10	0.98	2	0.12	1.17
	3	0.09	1.09	3	0.14	1.16
	4	0.11	0.99	4	0.13	1.17
	5	0.10	1.10	5	0.14	1.16

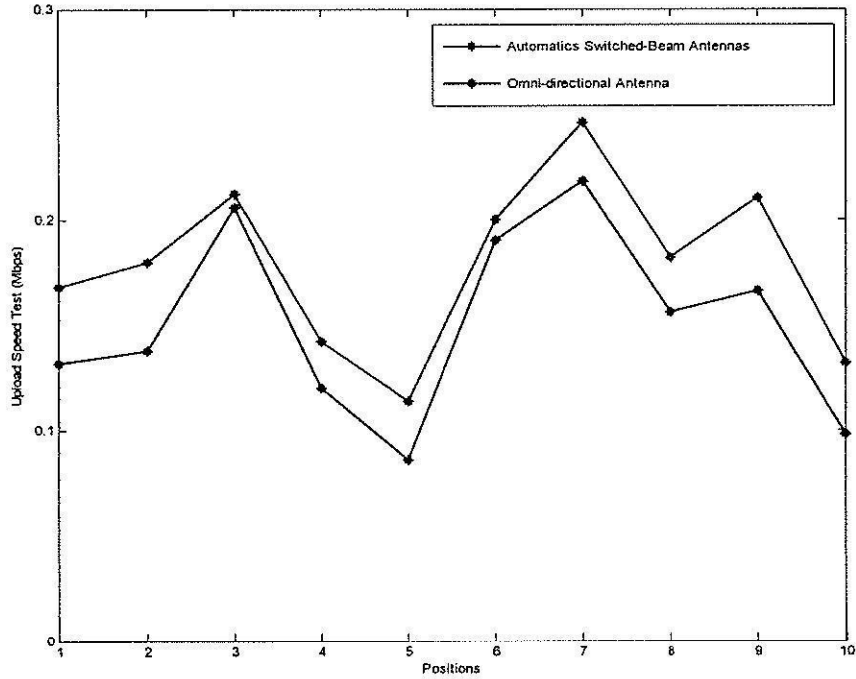
ตารางที่ 4-8 ความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จากสายอากาศ 1 คัน (Mb/s)		ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จากระบบสวิตช์ล้าคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา (Mb/s)	
		อัตราการส่งข้อมูล	อัตราการรับข้อมูล		อัตราการส่งข้อมูล	อัตราการรับข้อมูล
1	1	0.14	2.08	1	0.13	2.10
	2	0.13	2.07	2	0.14	2.11
	3	0.12	2.06	3	0.15	2.09
	4	0.13	2.08	4	0.13	2.13
	5	0.10	2.09	5	0.12	2.14
2	1	0.13	2.09	1	0.16	2.11
	2	0.12	2.10	2	0.15	2.13
	3	0.16	2.10	3	0.16	2.12
	4	0.17	2.13	4	0.17	2.16
	5	0.16	2.11	5	0.15	2.15
3	1	0.19	2.42	1	0.21	2.61
	2	0.21	2.41	2	0.25	2.59
	3	0.19	2.51	3	0.24	2.6
	4	0.20	2.42	4	0.23	2.58
	5	0.23	2.43	5	0.25	2.57
4	1	0.19	2.29	1	0.23	2.31
	2	0.20	2.28	2	0.23	2.32
	3	0.19	2.26	3	0.20	2.33
	4	0.19	2.29	4	0.21	2.31
	5	0.21	2.28	5	0.23	2.34
5	1	0.15	2.17	1	0.16	2.31
	2	0.14	2.20	2	0.20	2.29
	3	0.16	2.19	3	0.19	2.28
	4	0.13	2.18	4	0.17	2.32
	5	0.14	2.17	5	0.16	2.28

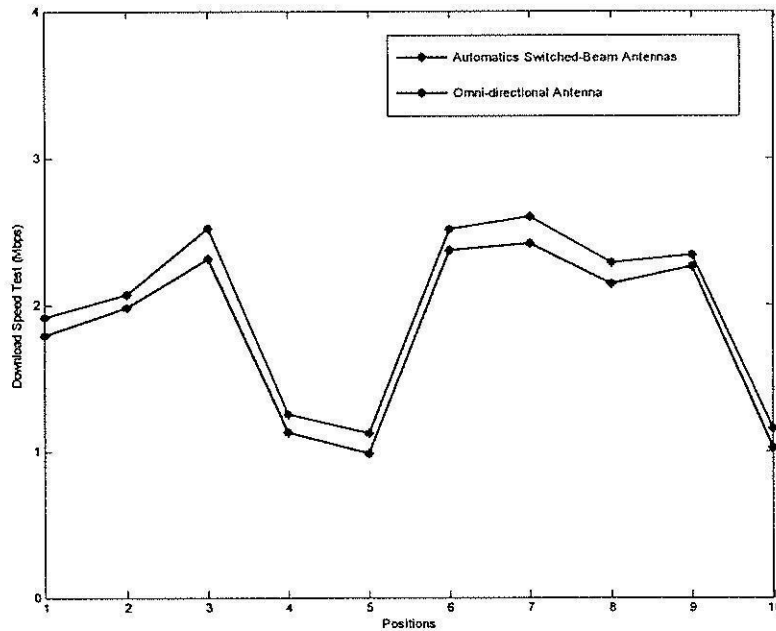
ตารางที่ 4-8 (ต่อ) ความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4

ตำแหน่งที่	ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้ จากสายอากาศ 1 ต้น (Mb/s)		ครั้งที่	ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่วัดได้จาก ระบบสวิตซ์ล้าตื้นอัตโนมัติ แบบพกพา (Mb/s)	
6	1	0.11	2.06	1	0.14	2.09
	2	0.09	2.05	2	0.12	2.08
	3	0.12	2.07	3	0.13	2.10
	4	0.13	2.04	4	0.13	.10
	5	0.11	2.03	5	0.11	2.09
7	1	0.12	2.08/	1	0.15	2.12
	2	0.10	2.07	2	0.14	2.10
	3	0.13	2.09	3	0.12	2.09
	4	0.12	2.10	4	0.15	2.11
	5	0.13	2.09	5	0.13	2.17
8	1	0.19	2.35	1	0.23	2.43
	2	0.20	2.36	2	0.21	2.43
	3	0.19	2.37	3	0.23	2.46
	4	0.18	2.35	4	0.22	2.45
	5	0.17	2.34	5	0.21	2.44
9	1	0.21	2.29	1	0.21	2.31
	2	0.20	2.30	2	0.20	2.32
	3	0.19	2.32	3	0.23	2.34
	4	0.17	2.31	4	0.21	2.33
	5	0.18	2.30	5	0.23	2.32
10	1	0.16	2.19	1	0.20	2.25
	2	0.15	2.20	2	0.17	2.26
	3	0.18	2.18	3	0.19	2.27
	4	0.17	2.17	4	0.18	2.23
	5	0.16	2.16	5	0.19	2.24

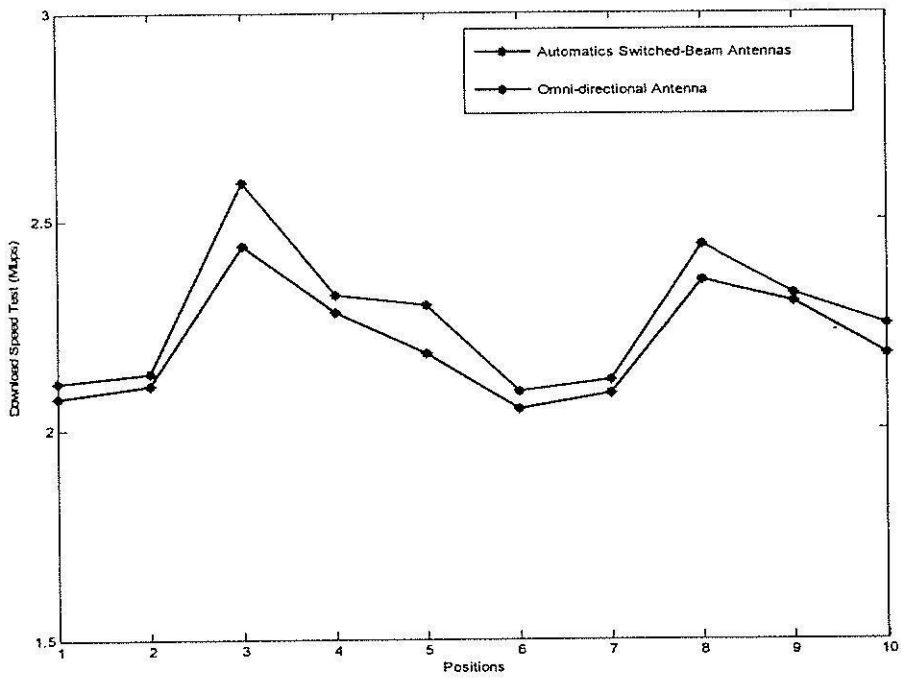
ต่อไปจะเป็นการนำผลที่บันทึกได้จากตารางที่ 4-7 และ 4-8 มาพลอตเป็นกราฟเพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบความเร็วในการใช้งานอินเทอร์เน็ต เมื่อใช้สายอากาศรอบทิศทางเพียงต้นเดียว และการใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้



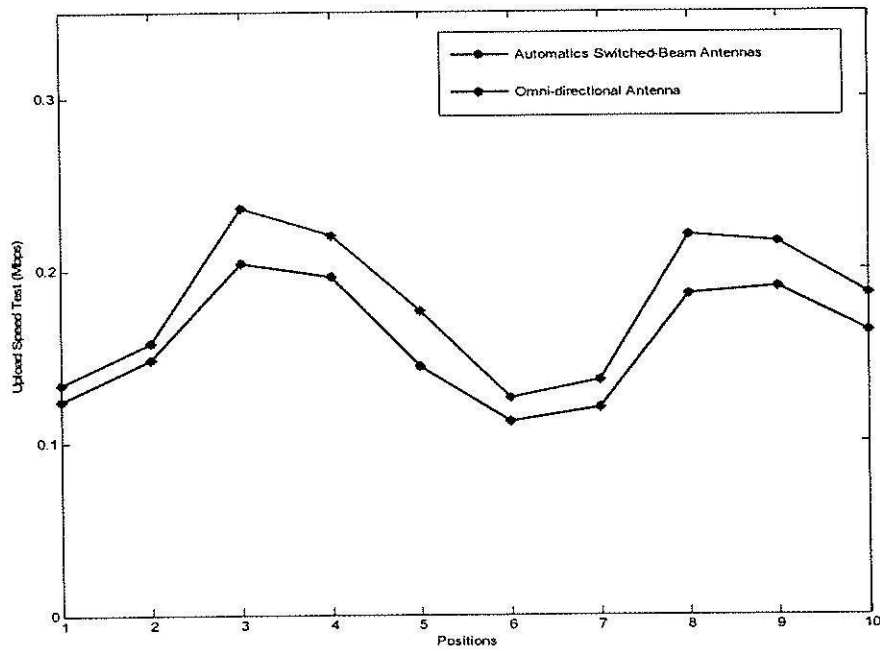
รูปที่ 4-14 ค่าความเร็วของการใช้อินเทอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4 (upload)



รูปที่ 4-15 ค่าความเร็วของการใช้อินเทอร์เน็ต ณ อาคารวิชาการ ชั้น 4 (download)



รูปที่ 4-16 ค่าความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (upload)



รูปที่ 4-17 ค่าความเร็วของการใช้อินเตอร์เน็ต ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 (download)

จากรูปที่ 4-14 ถึง 4-17 แสดงให้เห็นว่า การใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพานั้น ทำให้เราสามารถเข้าใช้อินเทอร์เน็ตด้วยความเร็วที่สูงขึ้นไม่ว่าจะการ upload และ download ก็ตาม ซึ่งได้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกันในทุกตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

4.4 กล่าวสรุป

หลังจากที่ได้สร้างอุปกรณ์ต้นแบบของระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติ และได้ทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น ณ อาคารวิชาการชั้น 4 และอาคารศูนย์เครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าการใช้ระบบสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติ และระบบสวิตช์ลำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพาทำให้ประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณในระบบบวายฟายสูงขึ้น ซึ่งจะดูได้จากค่าความแรงของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้น

บทที่ 5

สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอระบบสวิทช์ล้าคลื่นแบบอัตโนมัติสำหรับชุดอุปกรณ์วางฟาย ระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยสองส่วนหลักดังนี้ สายอากาศแถวลำดับ และระบบประมวลผลสัญญาณ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบที่มีความแตกต่างกันในกระบวนการประมวลผลสัญญาณอยู่สองแบบ ได้แก่ ระบบที่ต้องลงโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของกระบวนการเลือกล้าคลื่นที่ถูกต้อง และอีกระบบที่ไม่จำเป็นต้องลงโปรแกรมที่กล่าวมาในข้างต้น เนื่องจากสามารถทำงานได้เองภายในชุดระบบต้นแบบเลย ในระบบหลังนี้สามารถพกพาไปติดตั้งกับอุปกรณ์วางฟายทุกตัวที่มีพอร์ต USB สมรรถนะของระบบที่ได้ นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ในช่วงแรกได้ทดสอบผ่านการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ จากนั้นจึงสร้างระบบต้นแบบขึ้นและได้ทดสอบจริงภายใต้สถานการณ์ที่มีการส่งรับสัญญาณในระบบวางฟาย ค่าความแรงของสัญญาณเป็นพารามิเตอร์ในการทดสอบสมรรถนะของระบบที่ได้ นำเสนอ ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งสัญญาณของอุปกรณ์วางฟายเมื่อใช้ระบบสวิทช์ล้าคลื่นเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ผลจากการทดสอบจริงแสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบสวิทช์ล้าคลื่นแบบอัตโนมัติที่ได้นำเสนอทำให้ชุดอุปกรณ์วางฟายได้รับสัญญาณที่แรงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง ส่งผลให้การใช้งานอินเตอร์เน็ตมีความเร็วสูงขึ้นนั่นเอง

5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อ

จากชุดระบบต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่า ระบบมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดความยากลำบากสำหรับการใช้งานที่มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดว่าจะพัฒนาในส่วนของโครงข่ายก่อรูปล้าคลื่นให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งอาจจะใช้เทคโนโลยีของการใช้แผงวงจรพิมพ์หลายชั้นเข้ามาช่วยให้ขนาดของแต่ละองค์ประกอบในโครงข่ายก่อรูปล้าคลื่นมีขนาดเล็กลง จะส่งผลให้ขนาดโดยรวมของชุดระบบต้นแบบเล็กลงไปด้วย

บรรณานุกรม

- [1] A. Alexiou and M. Haardt, "Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges", *IEEE Communication Magazine*, vol. 42, no. 9, Sept. 2004, pp. 90-97.
- [2] R. S. Kawitkar and R. K. Shevgaonkar, "Design of smart antenna testbed prototype", *International Symposium on Antennas, Propagations and EM Theory*, 28 Oct. - 1 Nov. 2003, pp. 299-302.
- [3] J. A. Stine, "Exploiting smart antennas in wireless mesh networks using contention access", *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 2, Apr. 2006, pp. 38-49.
- [4] J. Rugamba, L. W. Snyman and A. Kurien, "Viability of using intelligent (smart) antenna systems in GSM cellular networks in Africa", *International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications*, 8-9 Nov. 2004, pp. 124-130.
- [5] J. C. Leberti and T. S. Rappaport, *Smart antenna for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*, Prentie Hall PTR, 1999.
- [6] C. C. Chang, T. Y. Chin, J. C. Wu and S. F. Chang, "Novel Design of a 2.5-GHz Fully Integrated CMOS Butler Matrix for Smart-Antenna Systems", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 8, Aug. 2008, pp. 1757-1763.
- [7] C. Collado, A. Grau and F. D. Flaviis, "Dual-band Butler matrix for WLAN systems", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 12-17 Jun. 2005, pp. 4.
- [8] W. Shunman, T. Ran, W. Yue and Z. Ji, "WLAN and it's security problems", *Proc. of International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies*, 2003, pp. 241 – 244.
- [9] E. L-Aguilera, J. Casademont, J. Cotrina, and A. Rojas, "Performance enhancement of WLAN IEEE 802.11 for asymmetric traffic", *Proc. of International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, 2005, pp. 1463 – 1467..
- [10] T. Jun, Z. Ying-jiang, W. An-qing, Y. Zhi-wei and J. Ming-bo, "A research of WLAN packet aggregation" *International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 2010, pp. 480 – 483.

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. S. Pradittara, P. Uthansakul, R. Wongsan and M. Uthansakul, "Low profile interference rejecter for Wireless Mesh Networks," Proc. Of Asia Pacific Microwave Conference, 2009, pp. 1802-1805.

2. ยื่นคำขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์เรื่อง สวิตซ์ต่ำคลื่นอัตโนมัติแบบพกพา เลขคำขอ 1001000558

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปี พ.ศ. 2540 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia จนสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ Narrowband/Wideband Smart Antenna, Phased Array Processing, DOA Estimation Method, Null Steering Scheme จนถึงปัจจุบันตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 9 บทความ และบทความในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 36 บทความ และในปี 2551 ได้เป็นผู้เขียน Book Chapter ในหนังสือ Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, IGI GLOBAL, USA ในบท Wideband Smart Antenna avoiding Tapped-Delay Lines and Filters

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ได้รับรางวัลที่สองของ Young Scientist Contest Award จากงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 16th International Conference Microwaves, Radar and Wireless Communications ปี พ.ศ. 2549 ณ ประเทศโปแลนด์ และได้รับรางวัล Highly Recommended prize in the Student Presentation Competition จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ 9th Australian Symposium on Antenna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย