



รายงานการวิจัย

การหาตำแหน่งของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วยการใช้คุณลักษณะของเวลา
และกำลังของสัญญาณร่วมกัน

WLAN Positioning Based on Joint TOA and RSS Characteristics

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาในทีปรีษาของผู้วิจัยที่ช่วยเก็บผลการทดลองดังรายนามต่อไปนี้ นางสาววิลาสินี ณะสำเร็จ นางสาวพัชจุฑา เป้าพุกา นางสาวจุฑารัตน์ ชัยมานิตย์ นางสาวประทุมพร อาโคม และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำหรับคำแนะนำในเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัย

มีนาคม 2553

บทคัดย่อ

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อบริษัทและองค์กรต่างๆ เพราะอำนวยความสะดวกสบายในการต่อเชื่อมเครือข่าย ทำให้สามารถส่งข้อมูลข่าวสารหรือใช้บริการอินเทอร์เน็ตจากที่ใดก็ตามที่มีจุดให้บริการไร้สายอยู่ แต่เนื่องจากการให้บริการของเครือข่ายเป็นแบบไร้สาย ทำให้ผู้ใช้บริการเองหรือแม้แต่ผู้ให้บริการเครือข่ายไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนของผู้ใช้งานได้ การหาตำแหน่งของผู้ใช้บริการในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้จึงถือว่ามีค่ามากและเป็นหัวข้อที่น่าสนใจสำหรับนักวิจัยทั่วโลก แต่ทว่าการหาตำแหน่งของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ผ่านมานั้น ยังไม่ค่อยประสบผลสำเร็จนัก ทั้งนี้เนื่องจากอาศัยการคำนวณจากแบบจำลองของกำลังสัญญาณที่รับได้เพียงอย่างเดียว ทำให้การหาตำแหน่งไม่ตรงกับสัญญาณที่เกิดขึ้นในสถานการณ์จริงและมีความผิดพลาดสูง นอกจากวิธีการใช้แบบจำลองของกำลังสัญญาณแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการหาตำแหน่งคือการใช้เวลารับส่งข้อมูลเพื่อบอกถึงตำแหน่งของผู้ใช้บริการ วิธีนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการใช้งานจริงรวมถึงต้องเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจึงจะใช้งานได้ โครงการวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งด้วยการรวมคุณลักษณะของทั้งกำลังสัญญาณที่รับได้ และเวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกัน ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของทั้งสองคุณลักษณะไว้ด้วยกัน จะทำให้อัตราความผิดพลาดและการบอกตำแหน่งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้โครงการวิจัยยังพัฒนาการหาตำแหน่งจากการใช้เวลาในการส่งรับสัญญาณที่สามารถใช้หาตำแหน่งโดยไม่เพิ่มความยุ่งยากหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการใช้คุณลักษณะทั้งสองร่วมกันนี้สามารถเพิ่มความแม่นยำในการบอกตำแหน่งได้ดีกว่าการใช้เพียงแค่คุณลักษณะเดียว

Abstract

WLAN (Wireless Local Area Network) system has a huge impact to many companies and organizations because it is able to provide more conveniences on accessing network. The WLAN user can easily connect the Internet from any spots inside coverage services. However, due to its totally wireless, neither user nor operator know the exact location of that user. Therefore the issue of WLAN positioning is of important and attractive for any researchers. In literatures, WLAN positioning technique utilizing only Received Signal Strength (RSS) characteristic did not gain a lot of success because the use of propagation modelling gives unavoidable errors on finding location. For the other technique using Time Of Arrival (TOA) characteristic, the error is less than RSS approach but the complexity of hardware or software is more required on WLAN equipments. In this research project, the concept of using both RSS and TOA characteristics has been proposed to merge both advantages into one technique. From the experimental results, it shows that using both RSS and TOA characteristics can improve the accuracy of WLAN user positioning and its outcome is better than using either only RSS or TOA characteristic.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	2
1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ผลสำเร็จของ โครงการ.....	2
1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ โครงการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การหาคำแนะนำด้วยการ ใช้กำลังของสัญญาณ.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ระบบเครือข่ายไร้สาย.....	5
2.2.1 รูปแบบ Peer-to-peer (ad hoc mode).....	5
2.2.2 รูปแบบ Client/server (Infrastructure mode).....	6
2.3 สิ่งกีดขวางมีผลต่อการรับสัญญาณคลื่นวิทยุ.....	7
2.4 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร.....	8
2.5 เทคนิคการหาคำแนะนำผู้ใช้งาน.....	9
2.5.1 การคำนวณหาแนวรัศมีของจุดเข้าถึงจากกำลังสัญญาณที่รับได้.....	9
2.5.2 การคำนวณหารูปทรงที่เล็กที่สุดที่เชื่อมต่อระหว่างแนวรัศมีของทุกจุดเข้าถึง.....	10
2.5.3 การหาจุดกึ่งกลางของรูปทรงที่เล็กที่สุด.....	11
2.6 ผลการทดสอบ.....	12
2.7 กล่าวท้ายบท.....	14
บทที่ 3 การหาคำแนะนำด้วยการ ใช้เวลาในการรับส่งข้อมูล.....	15

3.1	กล่าวนำ	15
3.2	เวลาในการรับส่งข้อมูลของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	15
3.3	การกระจายค่าหน่วยเวลา.....	19
3.4	การวัดค่าหน่วยเวลา.....	24
3.4.1	การวัดค่าหน่วยเวลาจากจุดทดสอบ.....	25
3.4.2	การหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลา.....	26
3.5	การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลากับระยะทาง	28
3.6	เทคนิคการหาค่าแห่ง.....	31
3.7	ผลการทดสอบ.....	33
3.7.1	ในบริเวณพื้นที่ๆ ทำการวัดค่าหน่วยเวลา	33
3.7.2	ในบริเวณนอกพื้นที่ทำการวัดค่าหน่วยเวลา	35
3.8	กล่าวท้ายบท.....	36
บทที่ 4	การหาค่าแห่งด้วยการใช้กำลังของสัญญาณและเวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกัน.....	37
4.1	กล่าวนำ	37
4.2	เทคนิคการหาค่าแห่งด้วยการใช้กำลังของสัญญาณและเวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกัน	37
4.3	ผลการทดสอบ.....	38
4.4	กล่าวท้ายบท.....	40
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	41
5.1	สรุป	41
5.2	ข้อเสนอแนะ	42
	บรรณานุกรม	42
	ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการหาค่าแห่งด้วยกำลังของสัญญาณ	45
	ภาคผนวก ข ผลการวัดค่าหน่วยเวลาในการรับส่งสัญญาณ	88
	ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	97
	ประวัติผู้วิจัย	98

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2- 1 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบ Peer to Peer	6
รูปที่ 2- 2 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบ Client / server หรือ Infrastructure mode	6
รูปที่ 2- 3 สัญญาณที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ.....	8
รูปที่ 2- 4 ตัวอย่างการหาค่าผลรวมของลดทอนในแต่ละทิศทาง	9
รูปที่ 2- 5 ตัวอย่างการหาค่าตำแหน่งผู้ใช้งานจากกำลังสัญญาณ	11
รูปที่ 2- 6 การหาจุดกึ่งกลางของสามเหลี่ยม.....	12
รูปที่ 2- 7 การหาจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยม.....	12
รูปที่ 2- 8 ตำแหน่งของจุดทดสอบในอาคารวิชาการชั้น 4	13
รูปที่ 2- 9 แสดงตัวอย่างการหาค่าตำแหน่งเปรียบเทียบตำแหน่งที่วัดกับตำแหน่งที่คำนวณได้	14
รูปที่ 3-1 กระบวนการทำงานของ CSMA/CA	16
รูปที่ 3-2 การส่งเฟรมข้อมูลเมื่อทำการบวกเวลามาตรฐานที่มีชื่อว่า Distributed Interframe Space (DIFS).	18
รูปที่ 3-3 การส่งเฟรมข้อมูลเมื่อทำการสุ่มเวลาที่มีชื่อว่า Short Interframe Space (SIFS)	18
รูปที่ 3-4 ตัวอย่างความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลได้สำเร็จ	23
รูปที่ 3-5 จุดทดสอบที่ทำการวัดค่าหนึ่งเวลา.....	24
รูปที่ 3-6 ตัวอย่างจุดทดสอบที่นำมาหาค่าเฉลี่ยของค่าหนึ่งเวลา.....	25
รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหนึ่งเวลา และจำนวนครั้งของการเกิดค่าหนึ่งเวลาที่ซ้ำกัน	26
รูปที่ 3-8 ขอบเขตการพิจารณาเฉพาะ Frist Transmission Attempt.....	27
รูปที่ 3-9 ค่าเฉลี่ยของค่าหนึ่งเวลากับตำแหน่งของแต่ละจุดเข้าถึง	28
รูปที่ 3-10 การกำหนดแกน x และ แกน y เพื่อหาค่าพิกัด (x,y).....	29
รูปที่ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δt และ Δd	31
รูปที่ 3-12 การกำหนดตำแหน่งจากสามมุม.....	32
รูปที่ 3-13 ตำแหน่งของผู้ใช้งานที่หาได้ ณ จุดตัวอย่างที่ทำการทดสอบ.....	34
รูปที่ 3-14 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากวิธีการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณจากจุดทดสอบทั้งห้า	35
รูปที่ 3-15 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากวิธีการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณนอกพื้นที่ทดสอบ	36

รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการหาคำแหน่งจากการใช้คุณลักษณะทางเวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกัน	38
รูปที่ 4-2 แสดงจุดทดสอบทั้งหมด 80 จุด	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายกำลังเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อบริษัทและองค์กรต่างๆ ทั้งนี้ เป็นเพราะระบบอำนวยความสะดวกสบายในการต่อเชื่อมเครือข่าย ทำให้สามารถส่งข้อมูลข่าวสารหรือใช้บริการอินเทอร์เน็ตจากที่ใดก็ตามที่มีจุดให้บริการ ไร้สายอยู่ เมื่อประกอบกับในปัจจุบันนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาสมัยใหม่นิยมรวมระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบ ไร้สายไว้ภายในทำให้การเติบโตของอุตสาหกรรมเครือข่ายนี้เป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากการให้บริการของเครือข่ายเป็นแบบ ไร้สาย กล่าวคือผู้ใช้งานจะอยู่ที่ไหนก็ได้ขอเพียงสามารถรับส่งสัญญาณได้ก็พอ ทำให้ผู้ใช้บริการเองหรือแม้กระทั่งผู้ให้บริการเครือข่ายไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนของผู้ใช้งานได้ การหาตำแหน่งของผู้ใช้บริการในเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายนี้จึงถือว่ามีความสำคัญมากต่อทั้งผู้ให้และผู้ให้บริการเครือข่าย ความสำคัญสำหรับผู้ให้บริการเครือข่ายที่สามารถติดตามตำแหน่งผู้ใช้งาน ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตการเข้าถึงข้อมูลสำคัญๆ และสามารถตามจับผู้ไม่ประสงค์ดีที่เข้ามาเจาะฐานข้อมูลหรือปล่อยไวรัสได้ ส่วนความสำคัญสำหรับผู้ให้บริการเมื่อทราบตำแหน่งที่ตนเองอยู่นั้น สามารถนำไปประยุกต์เป็นบริการใหม่ๆ ได้เช่นการบอกรายละเอียดของข้อมูลของพื้นที่ๆ ตนเองกำลังอยู่ เช่น ในห้องสมุด ห้างสรรพสินค้าหรือพิพิธภัณฑ์ ทำให้การเข้าถึงข้อมูลรวดเร็วและสะดวกขึ้น

แต่ทว่าการหาตำแหน่งของเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายที่ผ่านมานั้น ยังไม่ค่อยประสบผลสำเร็จนัก ทั้งนี้ เนื่องจากอาศัยการคำนวณจากแบบจำลองของกำลังสัญญาณที่รับได้เพียงอย่างเดียว ทำให้การหาตำแหน่งไม่ตรงกับสัญญาณที่เกิดขึ้นในสถานการณ์จริงได้และมีความผิดพลาดสูง นอกจากวิธีการใช้แบบจำลองของกำลังสัญญาณแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการหาตำแหน่งคือการใช้เวลารับส่งข้อมูลเพื่อบอกถึงตำแหน่งของผู้ใช้บริการ วิธีนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการใช้งานจริงรวมถึงต้องเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายจึงจะใช้งานได้ และผลที่ได้ก็มีความผิดพลาดพอกับวิธีการใช้แบบจำลองของกำลังสัญญาณที่รับได้ จึงทำให้การวิจัยเพื่อค้นหาวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการหาตำแหน่งยังคงดำเนินอยู่ โครงการนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการในการหาตำแหน่งด้วยการรวมคุณลักษณะของทั้งกำลังสัญญาณที่รับได้ และ

เวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกันในการวิเคราะห์ตำแหน่งของผู้ใช้บริการ ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของทั้งสองคุณลักษณะไว้ด้วยกัน จะทำให้ลดความผิดพลาดและการบอกตำแหน่งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการบอกตำแหน่งของผู้ใช้บริการในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมทั้งกำลังสัญญาณที่รับได้ และเวลาในการรับส่งข้อมูลของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
3. เพื่อสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองการแผ่กระจายคลื่นของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
2. เก็บข้อมูลการวัดความแรงของสัญญาณ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ หรือ อาคารวิชาการ มทส.
3. นำข้อมูลที่วัดมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง
4. ศึกษาการวัดค่าหน่วยเวลาในการรับส่งข้อมูลของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
5. เก็บผลการวัดค่าหน่วยเวลา ณ อาคารศูนย์เครื่องมือ หรือ อาคารวิชาการ มทส.
6. พัฒนารูปแบบการหาตำแหน่งด้วยการใช้ค่าหน่วยเวลาร่วมกับแบบจำลองการแผ่กระจายคลื่น
7. ทดสอบวิธีการหาตำแหน่งด้วยการนำไปใช้ในสถานที่ต่างๆ
8. ปรับปรุงและพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ
9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงวิธีการหาตำแหน่ง
11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

1.4 ผลสำเร็จของโครงการ

ผลสำเร็จของโครงการคือการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2 บทความและในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 บทความ ซึ่งบทความทั้งหมดนี้ผ่านกระบวนการ peer-reviewed จากผู้ทรงคุณวุฒิ ทำให้งานวิจัยนี้ถูกเผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานใกล้เคียงกันอันจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้

1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

ในปัจจุบันระบบหาตำแหน่งแบบ GPS (Global Positioning System) [1] ถือว่าเป็นระบบที่บอกตำแหน่งได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดระบบหนึ่งของโลก โดยที่สามารถส่งพิกัดและบริการเชิงตำแหน่ง (LBS: Location-Based Services) [2], [3] ให้กับผู้ใช้จำนวนมากที่สุดในโลก หลักการของการหาตำแหน่งแบบ GPS นั้นคือการใช้ข้อมูลจากดาวเทียมทั้งสามดวงเพื่อประมวลผลของพิกัดอิงตามละติจูดและลองจิจูดของโลกซึ่งพื้นที่ให้บริการต้องเป็นพื้นที่ภายนอกอาคารที่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมทั้งสามดวงเป็นอย่างน้อย แต่เมื่อนำระบบนี้เข้ามาใช้งานภายในอาคารการบอกตำแหน่งจากสัญญาณของดาวเทียมที่ไม่ครบทั้งสามดวงนั้นส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดอย่างมาก [4], [5] ทำให้การนำระบบ GPS เพื่อใช้บอกตำแหน่งภายในอาคารไม่สามารถทำได้ ด้วยเหตุนี้การศึกษาหาวิธีการใหม่ๆ สำหรับการบอกตำแหน่งภายในอาคารจึงได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น [5], [6] เช่นการใช้อินฟราเรดเซนเซอร์ [7] การใช้สัญญาณคลื่นวิทยุ [8], [9] การใช้สัญญาณจากเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย [10], [11] และการใช้กล้องวงจรปิด [12] ท่ามกลางเทคนิคต่างๆ นี้การใช้ระบบกล้องวงจรปิดและติดตามผู้ใช้งานได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางที่สุดและให้ผลที่มีความแม่นยำที่สุด [12] อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องอาศัยการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ มากมายซึ่งเป็นอุปกรณ์ใหม่และยังต้องการชุดควบคุมการทำงานทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์อีกด้วย จึงเป็นวิธีการที่สิ้นเปลืองงบประมาณมากที่สุด แต่ปัญหาที่สำคัญไม่แพ้เรื่องงบประมาณคือการสูญเสียความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้บริการ ด้วยปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้จึงทำให้การวิจัยเพื่อหาตำแหน่งผู้ใช้งานภายในอาคารหันไปสู่วิศยทางเดียวกันคือการใช้สัญญาณจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

จากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่าวิธีการบอกตำแหน่งที่ใช้ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มด้วยกัน โดยแต่ละกลุ่มจะใช้คุณลักษณะของข้อมูลเพื่อบอกตำแหน่งแตกต่างกัน คุณลักษณะทั้งสี่กลุ่มนี้ได้แก่ เวลาในการส่งรับสัญญาณ (TOA: Time of Arrival or TDOA: Time Difference of Arrival) มุมที่รับส่งสัญญาณ (AOA: Angle of Arrival) ความแรงของสัญญาณที่รับได้ (RSS: Received Signal Strength) และเลขหมายเซลล์ (cell-ID) สำหรับการใช้เวลาในการส่งรับสัญญาณนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาการเข้าจังหวะของภาคส่งและรับซึ่งหมายถึงอุปกรณ์เครือข่ายไร้สายทั้งที่จุดเข้าถึง (Access Point) และที่ผู้ใช้งานทำให้การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบของวิธีการนี้ยุ่งยากแต่ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งสูง ถ้าเป็นการใช้มุมที่รับส่งสัญญาณความผิดพลาดจะเกิดจากปรากฏการณ์สัญญาณหลายวิถีซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ในสิ่งแวดล้อมแบบภายในอาคาร สำหรับการใส่เลขหมายเซลล์นั้นถือว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่ตำแหน่งที่บอกมีพื้นที่ครอบคลุมเป็นบริเวณกว้าง ทำให้ไม่สามารถระบุพิกัดของผู้ใช้บริการได้แม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการต่างๆ พบว่าการใช้เวลารับส่งสัญญาณเป็นวิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุดทั้งนี้เพราะเป็นวิธีที่ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ ภายในอาคารน้อยที่สุด ในงานวิจัยที่ [13] ระบบที่วัดค่าหน่วย

เวลาในการรับส่งสัญญาณซึ่งประกอบด้วยเครื่องรับพิเศษที่ส่งข้อมูลไปยังเซฟเวอร์ จากนั้นเซฟเวอร์จะคำนวณเวลาและส่งกลับมายังผู้ใช้งานต่อเพื่อนำเวลาที่ได้มากำหนดตำแหน่งของผู้ใช้งาน วิธีนี้มีข้อเสียคือความยุ่งยากในการใช้ข้อมูลป้าย วิธีการที่คล้ายๆ กันนี้ได้ถูกเสนอขึ้นในงานวิจัยที่ [14] แต่ใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า ส่วนงานวิจัยที่ [15] ได้เสนอวิธีการใช้จุดเข้าถึงสองตัวเพื่อกำหนดหาเวลาในการรับส่งสัญญาณแทนการใช้จุดเข้าถึงสามตัว แต่จุดเข้าถึงทั้งสองตัวนั้นจะต้องมีตัวกรองแบบ Kalman นอกจากนี้การใช้ข้อมูลผสมระหว่าง TOA และ TDOA ยังถูกเสนอใน [16] ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมานี้ยืนยันความเหนือกว่าของการใช้เวลาในการส่งรับสัญญาณเปรียบเทียบกับการใช้กำลังสัญญาณ โดยจะมีข้อเสียที่ความซับซ้อนของอุปกรณ์เท่านั้น โครงการวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะรวมทั้งสองวิธีที่ใช้คุณลักษณะทางเวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกันเพื่อรวมข้อดีของทั้งสองวิธีไว้

แม้ว่าจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าวิธีการใช้เวลาส่งรับสัญญาณร่วมกันจะถูกนำเสนอทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติ แต่งานวิจัยด้านนี้ยังได้รับการพัฒนาไม่มากนักเมื่อเทียบกับการใช้กำลังของสัญญาณทั้งนี้ เป็นเพราะความง่ายในการวัดกำลังสัญญาณที่ไม่ต้องปรับเปลี่ยนอุปกรณ์หรือเพิ่มความซับซ้อนใดๆ [17] ดังนั้นใน โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์อีกอย่างหนึ่งคือต้องการพัฒนาวิธีการหาคำแหน่งจากคุณลักษณะทางเวลาในการรับส่งสัญญาณซึ่งไม่ต้องการเพิ่มความซับซ้อนหรือการเปลี่ยนแปลงฮาร์ดแวร์ ทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถสรุปผลสำเร็จใหม่ได้ 3 เรื่องคือ 1) แนวคิดในการใช้คุณลักษณะทางเวลาและกำลังสัญญาณร่วมกันในการบอกตำแหน่งของผู้ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2) วิธีการบอกตำแหน่งด้วยการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงใดๆที่อุปกรณ์เครือข่าย และ 3) การทดสอบยืนยันแนวคิดเรื่องการใช้ทั้งสองคุณลักษณะร่วมกันภายใต้ระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้งานจริง

บทที่ 2

การหาตำแหน่งด้วยการใช้กำลังของสัญญาณ

2.1 กล่าวนำ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ต้องการพัฒนาเทคนิคที่ใช้คุณลักษณะทั้งสองอย่างคือกำลังของสัญญาณและเวลาในการรับส่งสัญญาณ ดังนั้นในเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้เฉพาะกำลังของสัญญาณเพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นวิธีการหาตำแหน่งที่นิยมใช้งานมากที่สุด อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการใช้กำลังของสัญญาณสามารถเพิ่มความแม่นยำได้ด้วยการจดจำตำแหน่งจากการฝึกให้จำผลการวัดที่ผ่านมา หรือเรียกว่า fingerprint ซึ่งให้ผลที่แม่นยำมากและมีความผิดพลาดไม่ถึง 1 เมตรเท่านั้น แต่การใช้ fingerprint นี้ไม่สามารถนำไปใช้งานในสถานที่อื่นๆ ได้เพราะต้องทำการวัดก่อนจึงจะใช้งานได้ โครงการวิจัยนี้จึงไม่นำเทคนิค fingerprint มาพิจารณาเพราะต้องการให้สามารถนำวิธีการหาตำแหน่งไปใช้งานได้กับโครงสร้างอาคารแบบใดก็ได้โดยไม่ต้องไปวัดสัญญาณจริงมาก่อน

2.2 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

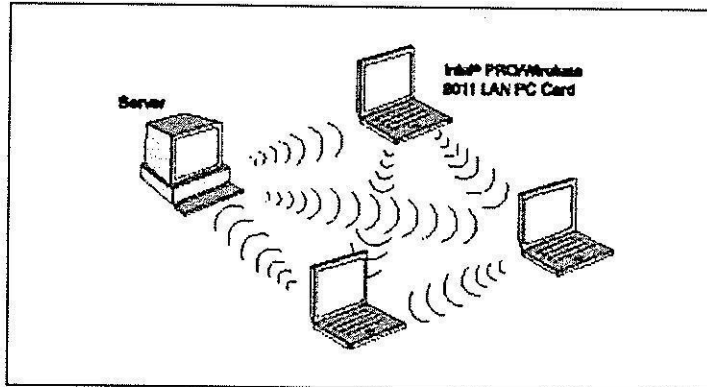
ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายคือ ระบบการสื่อสารข้อมูลที่มีความคล่องตัวมาก ซึ่งอาจจะนำมาใช้ทดแทนหรือเพิ่มต่อกับระบบเครือข่ายแลนไร้สายแบบดั้งเดิม โดยใช้การส่งคลื่นความถี่วิทยุในย่านวิทยุ RF และ คลื่นอินฟราเรด ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ผ่านอากาศ, ทะลุกำแพง, เพดานหรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ โดยปราศจากความต้องการของการเดินสายนอกจากนั้นระบบเครือข่ายไร้สายก็ยังมีคุณสมบัติครอบคลุมทุกอย่างเหมือนกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ที่สำคัญก็คือระบบนี้ไม่ต้องใช้สายทำให้การเคลื่อนย้ายการใช้งานทำได้โดยสะดวก ไม่เหมือนระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ที่ต้องใช้เวลาและการลงทุนในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์

เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีรูปแบบการเชื่อมต่อดังนี้

2.2.1 รูปแบบ Peer-to-peer (ad hoc mode)

การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบ Peer to Peer เป็นลักษณะ การเชื่อมต่อแบบโครงข่ายโดยตรงระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ จำนวน 2 เครื่องหรือมากกว่านั้น เป็นการใช้งานร่วมกันของ wireless

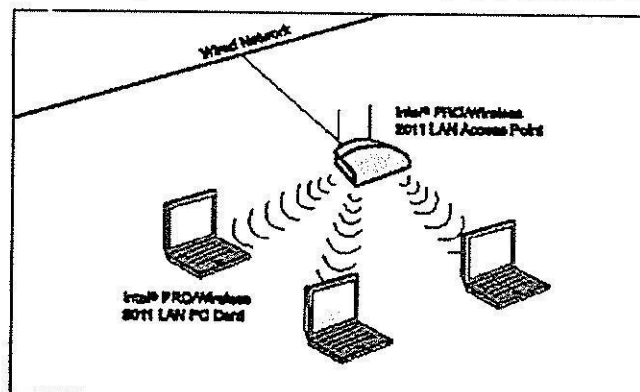
adapter cards โดยไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายแบบใช้สายเลย โดยที่เครื่องคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะมีความเท่าเทียมกันสามารถทำงานของตนเองได้และขอใช้บริการเครื่องอื่นได้ เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานเพื่อจุดประสงค์ในด้านความเร็วหรือติดตั้งได้โดยง่ายเมื่อไม่มีโครงสร้างพื้นฐานที่จะรองรับ ยกตัวอย่างเช่น ในศูนย์ประชุม, หรือการประชุมที่จัดขึ้นนอกสถานที่



รูปที่ 2- 1 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบ Peer to Peer

2.2.2 รูปแบบ Client/server (Infrastructure mode)

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบ Client / server หรือ Infrastructure mode เป็นลักษณะการรับส่งข้อมูลโดยอาศัยจุดเข้าถึง (AP: Access Point) หรือเรียกว่า “Hot spot” ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างระบบเครือข่ายแบบใช้สายกับเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (client) โดยจะกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อ รับส่งข้อมูลเป็นรัศมีโดยรอบ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรัศมีของจุดเข้าถึง จะกลายเป็น เครือข่ายกลุ่มเดียวกันทันที โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ จะสามารถติดต่อกัน หรือติดต่อกับ Server เพื่อแลกเปลี่ยนและค้นหาข้อมูลได้ โดยต้องติดต่อผ่านจุดเข้าถึงเท่านั้น ซึ่งจุดเข้าถึง 1 จุด สามารถให้บริการเครื่องลูกข่ายได้ถึง 15-50 อุปกรณ์ของเครื่องลูกข่าย เหมาะสำหรับการนำไปขยายเครือข่ายหรือใช้ร่วมกับระบบเครือข่ายแบบใช้สายเดิมในออฟฟิศ, ห้องสมุด หรือในห้องประชุม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้มากขึ้น



รูปที่ 2- 2 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบ Client / server หรือ Infrastructure mode

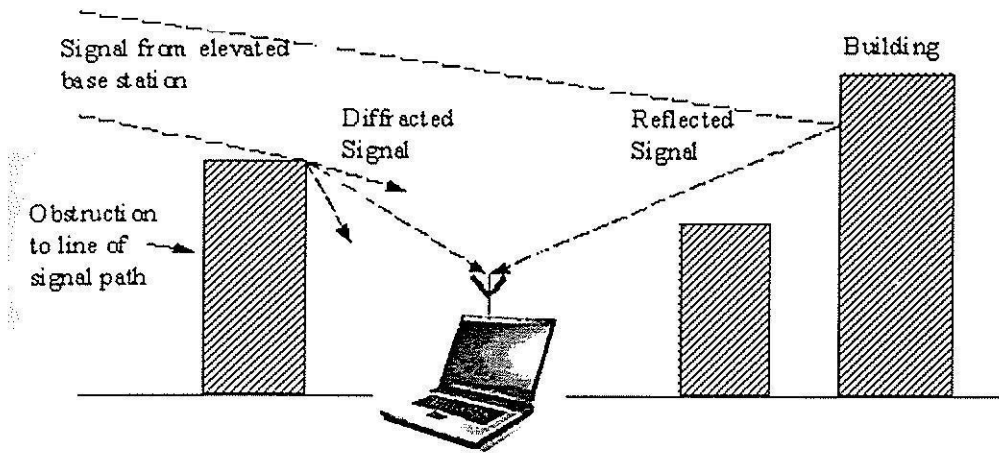
ในโครงการวิจัยนี้พิจารณารูปแบบ Infrastructure mode เพียงอย่างเดียวเพราะว่าเป็นรูปแบบที่ให้บริการในพื้นที่ของอาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์จุดเข้าถึงดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ชนิดและค่าพารามิเตอร์ของ Access Point ภายในบริเวณอาคารวิชาการชั้นที่ 1

มาตรฐาน	IEEE 802.11g 2.4-2.5 GHz, Channel 1 (2.412GHz)
กำลังส่ง	18 dBm
Gain สายอากาศส่ง	2.2 dBi
Gain สายอากาศรับ(เครื่องที่ใช้วัดสัญญาณ)	2.2 dBi
Mac Address (WLAN-G-OUT-41)	00:1B:D4:F5:15:79
Mac Address (WLAN-G-OUT-42)	00:1B:D4:F5:16:90
Mac Address (WLAN-G-OUT-43)	00:1B:D4:F5:18:50
Mac Address (WLAN-G-OUT-44)	00:1B:D4:F5:17:10
SSID	SUTWiFi

2.3 สิ่งกีดขวางมีผลต่อการรับสัญญาณคลื่นวิทยุ

ในสภาวะการใช้งานทั่วไป คงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีสิ่งกีดขวางต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาคาร ต้นไม้เสาไฟฟ้า ผนังห้อง หรือกระจก ดังแสดงในรูปที่ 2- 3 สิ่งเหล่านี้อาจจะมีคุณสมบัติในการลดทอนและการดูดซับคลื่น ซึ่งวัสดุที่มีผลต่อคลื่นวิทยุที่สำคัญก็คือ โลหะ ซึ่งสามารถสังเกตได้ง่ายๆ ว่าเมื่อที่อยู่ในลิฟต์ โทรศัพท์มือถือมักจะรับสัญญาณไม่ได้ หรือสายมักจะหลุดบ่อย ประการที่สองก็คือ ผนังคอนกรีตจะมีอัตราการลดทอนสัญญาณสูงเมื่อคลื่นวิทยุปะทะกับผนังคอนกรีตก็จะผ่านไปไม่ได้ ดังจะสังเกตได้จากการเดินเข้าไปในอาคารจอดรถชั้นใต้ดิน ซึ่งมักจะมีผนังคอนกรีตหนาๆ กันอยู่วัสดุเหล่านี้จะป้องกันไม่ให้คลื่นผ่านได้ ทำให้รับสัญญาณไม่ได้



รูปที่ 2-3 สัญญาณที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ

ลักษณะของสิ่งกีดขวางอีกประการหนึ่งก็คือ การบังคลื่นของสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ทำให้เกิดเขตเงา (Shadow) อาการนี้มักจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่หลังอาคารสูงๆ หรือภูเขา หากยังอยู่ในเขตอาคารสูงมากๆ หรืออาศัยอยู่ในอาคารพาณิชย์หรือตึกแถวอาจจะพบกับปัญหา ตัวอย่างเช่น เมื่ออยู่ในออฟฟิศจะใช้สัญญาณได้อย่างไม่มีปัญหาแต่พอออกไปยังข้างนอก จะใช้งานไม่ค่อยได้เนื่องจากเกิดการลดทอนของคลื่น เนื่องจากความหนาของผนังคอนกรีตของสำนักงาน คลื่นความถี่ที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายนั้นมีความถี่ที่ 2.4 GHz ซึ่งความถี่นี้ก็จัดว่าเป็นความถี่ที่สูง มักจะเดินทางได้ไม่ไกล แต่นั่นกลับไม่ใช่ข้อเสียแต่กลับเป็นผลดีด้วยซ้ำไป เนื่องจากการเดินทางได้ไม่ไกลทำให้สามารถควบคุมระยะทางการแพร่กระจายคลื่นได้ง่ายขึ้น ทำให้ลดปัญหาคลื่นเดินทาง ไปรบกวนกับเครือข่ายข้างเคียงได้ง่ายขึ้น

2.4 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร

โครงการวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารของ T.S. Rappaport [18] ซึ่งแสดงในสมการที่ (2-1)

$$RSS = P_t - 20 \log \frac{\lambda}{4\pi d} - \sum_i \alpha_i \quad (2-1)$$

โดยที่ RSS คือกำลังสัญญาณที่รับได้ P_t คือกำลังของสัญญาณที่ส่งออก d คือระยะห่างระหว่างจุดเข้าถึงและผู้ให้บริการ λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่ความถี่ WLAN และ α_i คือค่าการลดทอนจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ

สมการที่ (2-1) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของระยะทางกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งถ้าได้รับกำลังสัญญาณ RSS ก็จะสามารถหาระยะทาง d ได้ทันที อย่างไรก็ตามระยะทางนี้ไม่สามารถกำหนดได้ว่ามาจากทิศทางใดรอบตัวของจุดเข้าถึง จึงจำเป็นต้องพิจารณาจากข้อมูลของจุดเข้าถึงเครือข่ายอย่างน้อยสามตัวขึ้นไป ซึ่งจะกล่าวในส่วนต่อไป

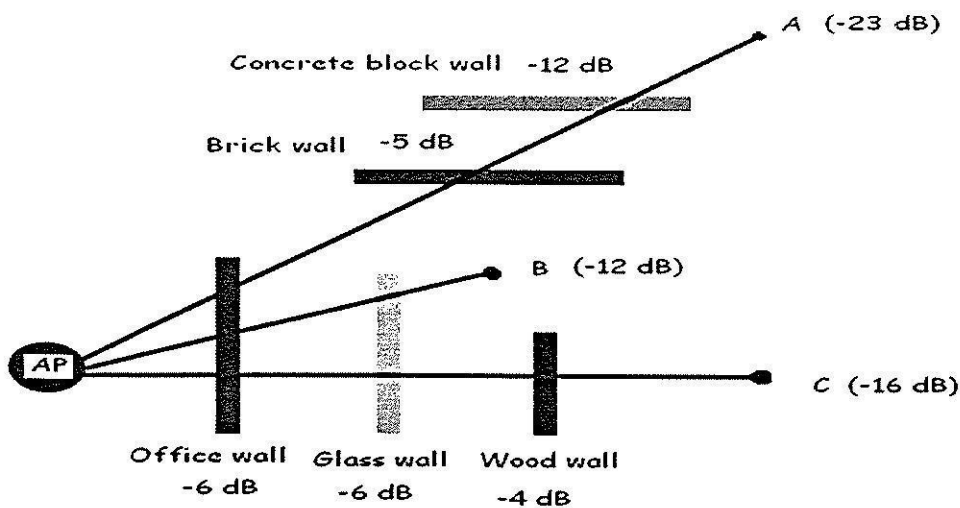
2.5 เทคนิคการหาตำแหน่งผู้ใช้งาน

เทคนิคการหาตำแหน่งนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

2.5.1 การคำนวณหาแนวรัศมีของจุดเข้าถึงจากกำลังสัญญาณที่ได้รับ

เนื่องจากการทราบระยะทาง d ไม่สามารถบอกทิศทางของผู้ใช้ได้ จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลตำแหน่งต่างๆ ไปที่ละจุด โดยเริ่มเก็บจากตำแหน่งที่ 0 องศาแล้วคำนวณหา d จากนั้นเปลี่ยนไปในแนวองศาอื่นเพื่อคำนวณหา d อีก วนซ้ำโดยการเพิ่มองศาขึ้นทีละ 5 องศาจนครบรอบ 360 องศาเพื่อหาแนวรัศมีของจุดเข้าถึงแต่ละตัว

จากรูปที่ 2-4 แสดงตัวอย่างเส้นทางในแนวองศาที่ต่างๆ กัน จากรูปพบว่าระยะ d ในแต่ละแนวองศา มีความยาวไม่เท่ากันขึ้นกับการลดทอนในแต่ละเส้นทางที่แตกต่างกัน ซึ่งตารางที่ 2-2 แสดงค่าการลดทอนเนื่องจากสิ่งกีดขวางต่างๆ



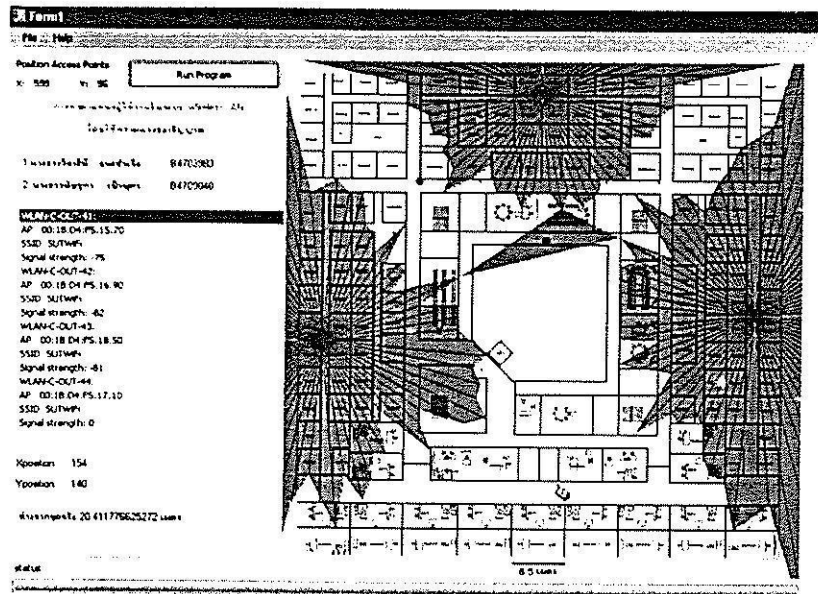
รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการหาค่าผลรวมของลดทอนในแต่ละทิศทาง

ตารางที่ 2-2 ค่าการลดทอนเนื่องจากสิ่งกีดขวางต่างๆ

ชนิดของสิ่งกีดขวาง	ค่าการลดทอนวัดในหน่วย dB
Concrete block wall	12
Metal wall / door	12
Brick wall	5
Office wall	6
Wood wall	4
Glass wall	6

2.5.2 การคำนวณหารูปทรงที่เล็กที่สุดที่เชื่อมต่อระหว่างแนวรัศมีของทุกจุดเข้าถึง

ในขั้นตอนที่ 2.5.1 นั้นทำให้สามารถเขียนเป็นแนวรัศมีรอบจุดเข้าถึงได้ ดังแสดงเป็นพื้นที่สีเขียวในรูปที่ 2- 5 จากรูปพบว่ากำลังของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงทั้งสามนั้นไม่ตัดกันที่จุดใดจุดหนึ่ง ทำให้การประมาณหาตำแหน่งผู้ใช้งานนั้นยังคงต้องอาศัยวิธีการอื่นๆอีก ซึ่งขั้นตอนต่อไปคือการหารูปทรงที่เล็กที่สุดที่มีมุมแต่ละมุมเป็นพิภาคในแนวรัศมีของแต่ละจุดเข้าถึง ในกรณีที่วัดกำลังสัญญาณได้จาก 3 จุดเข้าถึงนั้นจะได้รูปทรงสามเหลี่ยมซึ่งตรงกับที่แสดงในรูปตัวอย่างเป็นพื้นที่สีฟ้า แต่ถ้าวัดกำลังได้จากจุดเข้าถึงทั้งสี่ตัวจะได้เป็นรูปสี่เหลี่ยม สำหรับวิธีการหารูปทรงเหล่านี้ โครงการวิจัยใช้การวนซ้ำทุกกรณีที่เป็นไปได้เพื่อหาพื้นที่ที่เล็กที่สุด โดยที่จะทำการคำนวณหาพื้นที่รูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมจากจุดที่เป็นขอบเขตของกำลังสัญญาณจากจุดเข้าถึงแต่ละตัว เลือกหนึ่งจุดจากหนึ่งจุดเข้าถึงวนซ้ำให้ครบทุกกรณีเพื่อให้ได้รูปที่มีขนาดพื้นที่เล็กที่สุด



รูปที่ 2-5 ตัวอย่างการหาตำแหน่งผู้ใช้งานจากกำลังสัญญาณ

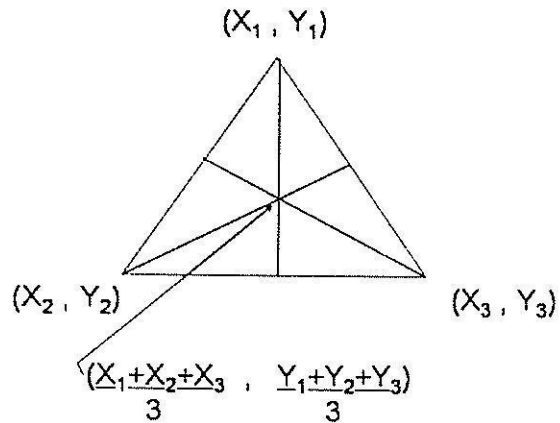
2.5.3 การหาจุดกึ่งกลางของรูปทรงที่เล็กที่สุด

จากขั้นตอนที่แล้วพบว่าในพื้นที่ทดสอบมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดพื้นที่เชื่อมต่อจากจุดเข้าถึงสัญญาณ ทั้งสี่ตำแหน่งเป็น 2 กรณี คือจากจุดเข้าถึงสามตัวและสี่ตัวตามลำดับ ดังนั้นในการหาจุดกึ่งกลางของรูปทรงที่เล็กที่สุดสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

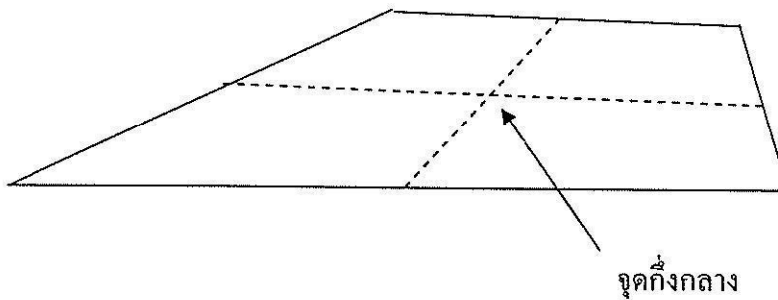
1 รูปทรงสามเหลี่ยม จะใช้จุดตัดกันของเส้นมัธยฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2-6

2 รูปทรงสี่เหลี่ยม จะใช้จุดตัดกันของเส้นที่ลากระหว่างจุดกึ่งกลางด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2-7

จุดตัดกันของเส้นมัธยฐาน (เส้นที่ลากมาแบ่งครึ่งด้านที่อยู่ตรงข้าม)



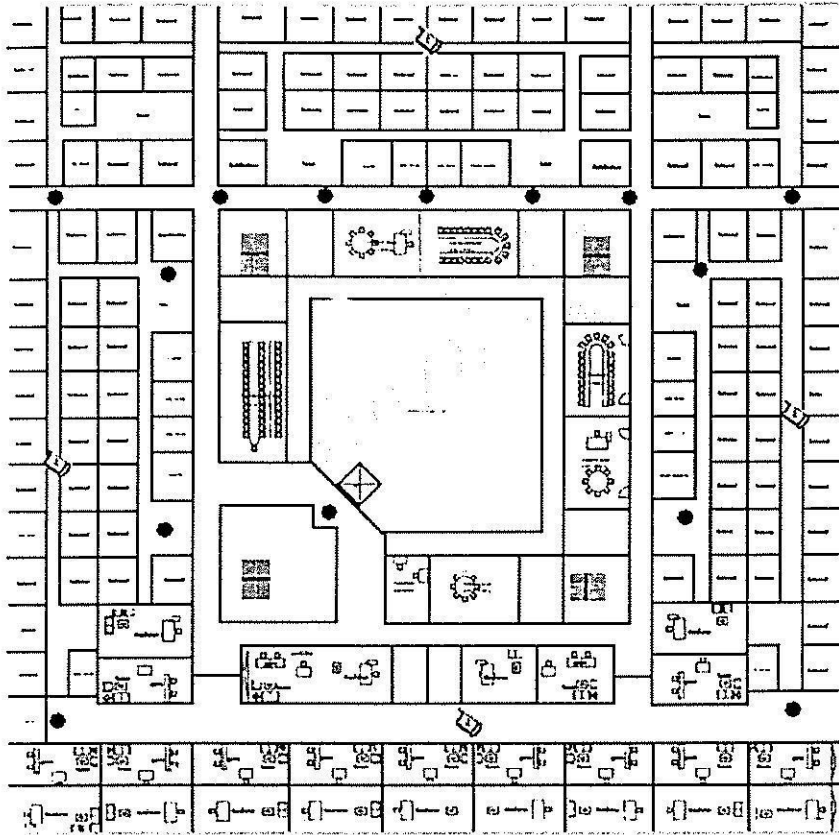
รูปที่ 2-6 การหาจุดกึ่งกลางของสามเหลี่ยม



รูปที่ 2-7 การหาจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยม

2.6 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบหาดำแหน่งจากกำลังของสัญญาณนั้นได้ทำการทดลองหาดำแหน่งที่อยู่ของผู้ใช้งานภายในอาคารวิชาการ ชั้น 4 รวมทั้งหมดจำนวน 14 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2-8

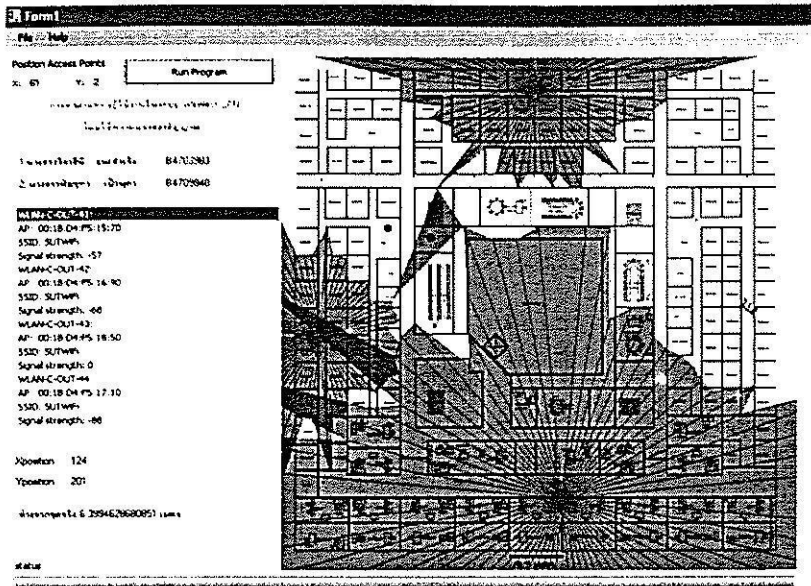


รูปที่ 2- 8 ตำแหน่งของจุดทดสอบในอาคารวิชาการชั้น 4

การเก็บผลการทดสอบนั้นทำขึ้นด้วยโปรแกรมภาษา VC++ ที่พัฒนาขึ้นเองในโครงการนี้ โดยผลการทดสอบทั้งหมด 14 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 4 ครั้ง จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก แต่สำหรับในเนื้อหาส่วนนี้จะแสดงเพียงตัวอย่างของจุดทดสอบเพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้นเพื่อให้เข้าใจการหาดำแหน่งด้วยวิธีการใช้กำลังของสัญญาณ

โดย

- = ตำแหน่งที่อยู่จริงของผู้ใช้งาน
- = ตำแหน่งที่โปรแกรมประมวลผลออกมา



รูปที่ 2-9 แสดงตัวอย่างการหาดำแหน่งเปรียบเทียบตำแหน่งที่วัดกับตำแหน่งที่คำนวณได้

จากผลการทดสอบทั้งหมดพบความความผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.97 เมตร และมากที่สุด 25.19 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.36 เมตร

2.7 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของเทคนิคการหาดำแหน่งที่อาศัยคุณลักษณะกำลังของสัญญาณเพียงอย่างเดียว ซึ่งความผิดพลาดที่ได้จากวิธีการนี้ค่อนข้างสูงมาก สำหรับบทถัดไปจะกล่าวถึงวิธีการหาดำแหน่งที่ใช้คุณลักษณะเวลาในการส่งรับข้อมูลเพียงอย่างเดียว

บทที่ 3

การหาตำแหน่งด้วยการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณ

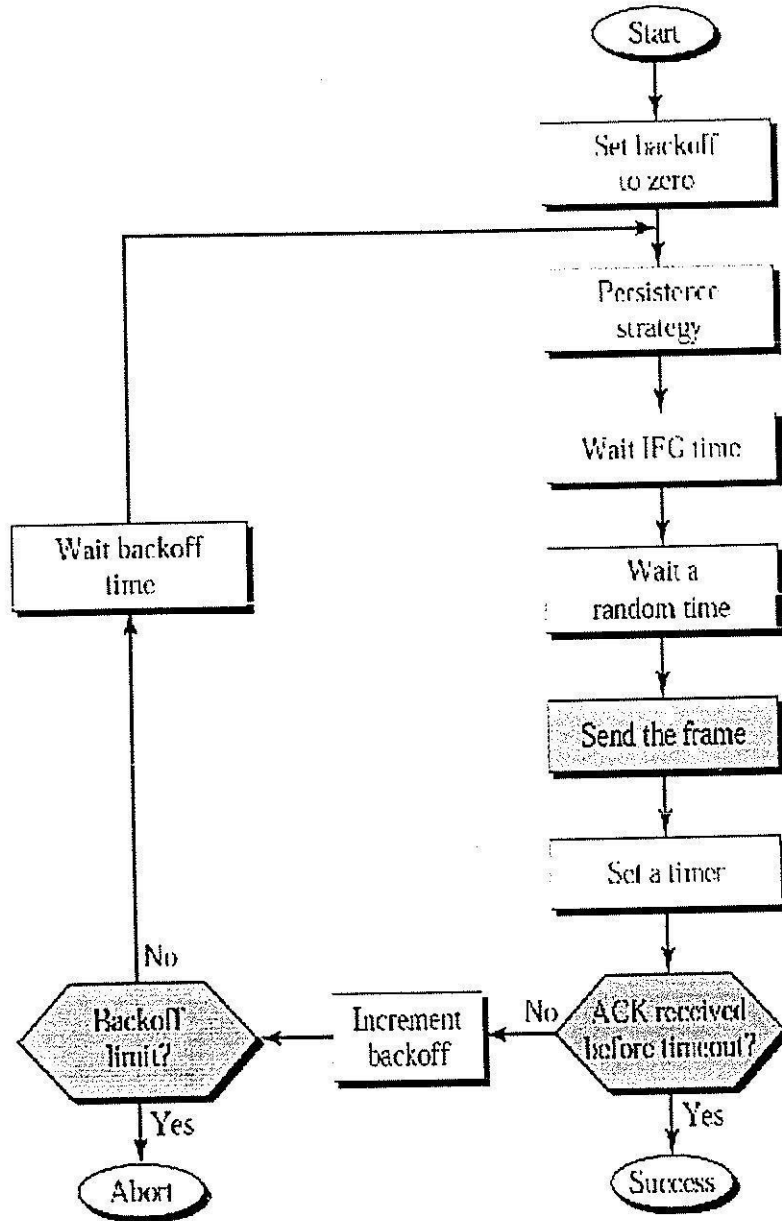
3.1 กล่าวนำ

สำหรับเทคนิคการหาตำแหน่งด้วยการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเป็นเทคนิคที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยที่ต้องการการเพิ่มเติมหรือเปลี่ยนแปลงจากอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณไปจนถึงโปรโตคอลของการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตามในโครงการวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดใหม่ ที่จะใช้ข้อมูลเรื่องเวลาในการรับส่งจากการใช้คำสั่ง ping เท่านั้นจากนั้นเก็บผลของค่าหน่วยเวลาในเชิงสถิติเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับระยะทางระหว่างจุดเข้าถึงและผู้ใช้บริการ ซึ่งวิธีการดังกล่าวถือว่าง่ายและไม่ต้องการความยุ่งยากซับซ้อนใดๆเพิ่มเติมทำให้สามารถนำไปรวมกับวิธีที่ใช้การหาตำแหน่งด้วยกำลังของสัญญาณในบทที่ 2 ได้ทันที นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังไม่เคยมีงานวิจัยใดเสนอมาก่อนจึงเป็นผลสำเร็จใหม่ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้เช่นกัน สำหรับรายละเอียดของการหาตำแหน่งด้วยการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.2 เวลาในการรับส่งข้อมูลของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

เนื่องจากการใช้นิยามของเวลาในการรับส่งข้อมูลเหมือนกับค่าหน่วยเวลา ดังนั้นในเนื้อหาบทนี้จะใช้คำว่าค่าหน่วยเวลาแทนเวลาในการรับส่งข้อมูล สำหรับค่าหน่วยเวลาในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้น ถูกกำหนดได้จากพฤติกรรมของการส่งและรับข้อมูล ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้นกำหนดให้ใช้การเข้าถึงเป็นแบบ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid (CSMA/CA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่หลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งสถานีจะเลือกวิธีการสุ่มเวลาหรือความน่าจะเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งในการส่งเฟรมข้อมูล เมื่อสายว่างแล้ว สถานีที่ต้องการจะส่งเฟรมข้อมูลจะรอเวลาอยู่ช่วงหนึ่งที่เรียกว่า IFG (InterFrame Gap) จากนั้นจะทำการสุ่มเวลาที่จะต้องส่งเฟรมข้อมูล เมื่อถึงกำหนดเวลาที่สุ่มแล้วจึงจะทำการส่งเฟรมข้อมูลออกไป และทำการกำหนดเวลาในการรอการตอบรับกลับมา ถ้ามีการตอบรับภายในเวลาที่กำหนด แสดงว่าสามารถส่งเฟรมข้อมูลไปได้เรียบร้อย แต่ถ้าไม่มีการตอบรับภายในเวลาที่กำหนดแล้ว แสดงว่าการส่งเฟรมข้อมูลครั้งนี้ล้มเหลว สถานีจะต้องทำการเพิ่มค่า backoff แล้วตรวจสอบว่าเกินจากที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าเกินก็จะเลิกส่งเฟรมข้อมูลนั้น แต่ถ้าไม่เกินรอเวลา

ค่าที่กำหนดไว้ แล้วจึงเริ่มกระบวนการการส่งใหม่อีกครั้ง เทคนิค CSMA/CA จะนิยมใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Infrastructure mode



รูปที่ 3-1 กระบวนการทำงานของ CSMA/CA

ตัวอย่างของค่า Backoff แสดงในตารางที่ 3-1 ซึ่งพบว่าค่า Backoff ที่สูงขึ้นก็จะมีโอกาสที่รอเวลานานมากขึ้น

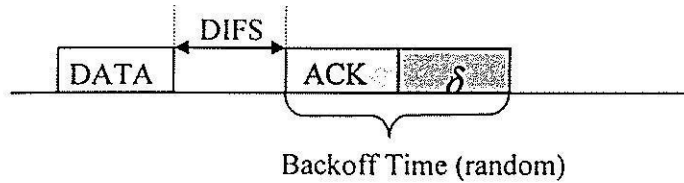
ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างการนับ Backoff time เมื่อ $CW_{min}=32, m=5, R=6$.

Transmission Attempt	Backoff stage	CW Range
First Transmission Attempt	0	0 - 31
First Retransmission	1	0 - 63
Second Retransmission	2	0 - 127
Third Retransmission	3	0 - 255
Fourth Retransmission	4	0 - 511
Fifth Retransmission	5	0 - 1023
Sixth Retransmission	6	0 - 1023

โปรโตคอล CSMA/CA มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการชนกันของเฟรมข้อมูล เนื่องจากหลักการของ CSMA นั้นมีการใช้สื่อกลางร่วมกัน ดังนั้นถ้ามีการส่งเฟรมข้อมูลจาก 2 สถานีพร้อมกัน จะเกิดการชนกัน ซึ่งหลักการที่จะหลีกเลี่ยงการชนกันของเฟรมข้อมูลสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของวิธีการส่งเฟรมข้อมูล โดยก่อนที่จะทำการส่งเฟรมข้อมูลได้ จะต้องมีการตรวจสอบสื่อก่อนว่าพร้อมที่จะส่งได้หรือไม่ ถ้าสื่อกลางไม่พร้อมที่จะให้ส่งจะมีวิธีการในการจัดการอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่

- รูปแบบแรก (รูปที่ 3-2) คือ ถ้าสื่อว่าง จะสามารถส่งเฟรมข้อมูลออกไปได้ทันที แต่ถ้าสื่อไม่ว่าง จะต้องทำการบวกเวลามาตรฐาน Distributed Interframe Space (DIFS) เข้าไป เมื่อบวกเวลามาตรฐานแล้วก็จะสามารถส่งเฟรมข้อมูลได้ทันที แต่ถ้าส่งไปแล้วเกิดการชนกันอีกจะต้องทำการสุ่มเวลาไปอีกค่าหนึ่ง เรียกว่า Backoff Time ซึ่งคำว่า สุ่ม ก็คือ การสุ่มค่าเข้ามาเลย เช่น ทำการ สุ่ม ได้ค่า 20 นั้นหมายความว่า ต้องรอไปอีก 20 slot แล้วค่อยทำการส่งใหม่ ในส่วนของ Backoff Time นั้นประกอบด้วย message ที่มีชื่อว่า Positive Acknowledgment (ACK) และ Propagation Delay (δ) message ACK นี้ทำหน้าที่แจ้งกลับมาบอกว่าได้รับเฟรมข้อมูลก่อนหน้าแล้ว ช่วงเวลา สุ่ม นี้จะช่วยลดโอกาสที่จะทำให้เกิดการชนกันในครั้งที่สอง เนื่องจากโอกาสที่ช่วงเวลาสุ่มของแต่ละสถานีจะเท่ากันนั้นมีน้อยมาก แต่วิธีการแบบนี้จะเป็นการลดประสิทธิภาพของสื่อกลางได้ เนื่องจากกว่าที่แต่ละสถานีจะส่งเฟรมข้อมูลออกมาได้อีกครั้ง จะต้องรอให้

ครบตามเวลาที่ได้ส่ง ออกมาก่อน ดังนั้นในช่วงเวลานี้ถ้าสื่อกลางว่างจะไม่มีสถานีใดส่งเฟรมข้อมูลออกมาเลย



รูปที่ 3-2 การส่งเฟรมข้อมูลเมื่อทำการบวกเวลามาตรฐานที่มีชื่อว่า Distributed Interframe Space (DIFS)

• รูปแบบที่สอง (รูปที่ 3-3) คือ ถ้าสื่อกลางไม่พร้อมที่จะส่งได้ แต่ละสถานีจะทำการสุ่มเวลาที่มีชื่อว่า Short Interframe Space (SIFS) ก่อนที่จะมี message ACK ตอบกลับมา ซึ่งช่วงเวลา SIFS นั้นก็จะเหมือนกับช่วงเวลา DIFS คือ เป็นช่วงเวลาที่เว้นไว้หนึ่งช่วงเพื่อให้ตัดสินใจ



รูปที่ 3-3 การส่งเฟรมข้อมูลเมื่อทำการสุ่มเวลาที่มีชื่อว่า Short Interframe Space (SIFS)

ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (3-1)

$$T_s = DIFS + ((H+I)/C) + \delta + SIFS + (ACK/C) + \delta \quad (3-1)$$

เมื่อ T_s หมายถึง ช่วงเวลาที่ส่งข้อมูล ได้สำเร็จ, H คือ Header, I คือ Load ซึ่งทั้ง H และ I นั้นเป็นความยาวของข้อมูล, C คือ อัตราเร็วของการส่งข้อมูลภายในช่องสื่อสาร และ δ คือเวลาในการแพร่กระจายคลื่นจากจุดเข้าถึงและผู้ใช้บริการ จากสมการที่ (3-1) พบว่าความมีความสัมพันธ์ระหว่าง δ กับเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลในเครือข่าย ซึ่งค่า δ นี้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของผู้ใช้งาน โดยตรง

3.3 การกระจายค่าหน่วงเวลา

การเกิดค่าหน่วงเวลาแต่ละค่าที่เราได้ทำการทดสอบนั้น นั้นไม่ได้หมายความว่าทุกค่าที่นั้น เกิดความสำเร็จในการส่งข้อมูล ซึ่งในแต่ละค่าจะต้องมีการกำหนดช่วงเวลาสุ่ม และเนื่องจากว่า ช่วงเวลาสุ่มของแต่ละคนไม่เท่ากัน จึงมีช่วงเวลาสุ่ม เกิดขึ้นมากมาย ช่วงเวลาสุ่ม นี้ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้งานในเครือข่ายที่มีอยู่ในระบบ, ขึ้นอยู่กับจำนวน window ว่าจะให้ สุ่ม ทั้งหมดกี่ค่า ยกตัวอย่างข้อมูลของจุดเข้าถึง ในการทดสอบของเรา window กำหนดไว้ที่ 64 นั้นหมายความว่า สุ่ม ค่าอะไรก็ได้ที่อยู่ภายใต้เลข 64 นี้ ถ้าช่องสัญญาณหนึ่งๆ มีจำนวน User มากก็จะส่งผลให้การส่งข้อมูลเกิดการชนกันมาก ซึ่งจะส่งผลให้ค่าหน่วงเวลา (delay) มีค่ามากตามไปด้วย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาการกระจายค่าหน่วงเวลา (Delay Distribution) ในรูปของความน่าจะเป็น กล่าวคือการเกิดค่าหน่วงเวลา (delay) แต่ละค่าที่นั้น คือการเกิดความสำเร็จในการส่งข้อมูลซึ่งมีข้อความ ACK ตอบกลับมาหาเรา โดยการกระจายค่าหน่วงเวลา (Delay Distribution) เป็นการกระจายที่ไม่ต่อเนื่อง และมีค่าเป็นไปตามสมการมากมาย ดังนี้

ขั้นตอนแรกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ กลุ่มของค่าหน่วงเวลาตามจำนวนการเกิดการชนกัน (ซึ่งตรงกันกับช่วงเวลาที่ยังสำเร็จ) ตัวแปร P คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดค่าหน่วงเวลา (D) ในการส่งข้อมูลได้สำเร็จ $P(D)$ นี้คือผลรวมของความน่าจะเป็นที่จะเกิดค่าหน่วงเวลา (D) ในทุกสถานะ

$$P(D) = \sum_{j=0}^R P_j(D) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq D \leq \infty \quad (3-2)$$

R คือ ขีดจำกัดของการทดลอง

j คือ จำนวนสถานะของการทดสอบ

P_j คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดสถานะ j ซึ่งเป็นสถานะที่ส่งข้อมูลได้สำเร็จ

ค่าหน่วงเวลา (D) ของการส่งข้อมูลได้สำเร็จสามารถคำนวณได้จาก

$$D = T_c \cdot N_j + N_c \sigma + j T_c + T_s \quad (3-3)$$

N_c คือ จำนวน slot ที่ว่างเปล่าก่อนที่จะส่งข้อมูลได้สำเร็จ

σ คือ ความต่อเนื่องของ slot ที่ว่างเปล่า

N_j คือ จำนวนการเกิดการชนกัน (หรือประสบความสำเร็จ) ในการส่งข้อมูล ก่อนที่จะส่ง

ข้อมูลได้สำเร็จ

jT_c คือ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการชนกันในการส่งข้อมูลจนกระทั่งถึงสถานะ j

T_s คือ ช่วงระยะเวลาของสถานะ j ที่ส่งข้อมูลได้สำเร็จ

ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการคำนวณจำนวนของการส่งข้อมูลได้สำเร็จ (N_j) ซึ่งสำหรับ P_r ก็เป็นเช่นเดียวกัน จากสมการ (3-3) N_j สามารถคำนวณได้จาก

$$N_j = (D - N_c \sigma - jT_c - T_s) / T_c \quad \text{เมื่อ } 0 \leq j \leq R \quad (3-4)$$

$$N_0 = (D - N_c \sigma - T_s) / T_c \quad \text{เมื่อ } j=0 \quad (3-5)$$

และจากสมการที่ (3-4) และสมการที่ (3-5)

$$N_j = N_0 - j \quad \text{เมื่อ } 0 \leq j \leq R, N_0 \geq 0 \quad (3-6)$$

จากสมการข้างบน ถ้าเราสามารถคำนวณหา N_0 ได้ เราก็จะสามารถคำนวณหา N_j สำหรับสถานะ j ใดๆ ได้ ในขั้นตอนต่อไปที่จะกล่าวถึงนั้น จะเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยของ N_0 สำหรับทุกๆ ช่วงเวลาของ slot ที่ใช้ในการส่งข้อมูล ก็จะมีช่วงเวลาของ slot ที่ว่างเปล่ารวมอยู่ด้วย

ตัวแปร P_r นี้คือความน่าจะเป็น (น้อยที่สุด) ในการส่งข้อมูลหนึ่งสถานะจากการส่ง $n-1$ สถานะ ซึ่งทำการพิจารณาที่ระยะเวลาของ slot (T) ที่ใช้ส่งข้อมูล และ P_c คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดช่องสัญญาณที่ว่างเปล่า ซึ่งทั้ง 2 ตัวนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$P_r = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad \text{และ} \quad P_c = 1 - P_r \quad (3-7)$$

ส่วนที่สำคัญของข้อสรุปข้างบน ซึ่งเป็นพื้นฐานของการคำนวณหา N_0 ก็คือต้องกำหนดค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่าง N_j และ N_c ให้เป็นค่าที่แน่นอนและตายตัว นั่นคือ

$$N_c = \frac{P_c}{P_r} N_j \quad (3-8)$$

ซึ่งการแทนค่า N_c ที่ได้จากสมการ (3-8) ในสมการที่ (3-5) นั้น หน่วย N_0 สามารถคำนวณให้เป็นจำนวนเต็มได้ด้วยฟังก์ชันของการกำหนดให้ค่าหน่วยเวลา (D) เป็นไปตาม

$$\text{round_int}\left(\frac{D - T_s}{T_c + (P_c / P_r)\sigma}\right) \quad (3-9)$$

สมการ (3-9) เป็นสมการที่แสดงถึงการกำหนดค่าหน่วยเวลา (D) ที่จะส่งผลต่อหน่วย N_0 ขณะนี้ความน่าจะเป็น (P) ของสมการ (3-2) สามารถแสดงเป็นฟังก์ชันของ N_j แทนที่ D ได้ดังนี้

$$P(D) = \sum_{j=0}^R P_j(N_j) \quad (3-10)$$

ซึ่งหลังจากจัดรูปสมการ (3-9) ใหม่ จะได้

$$D = N_0(T_c + (P_c / P_r)\sigma) + T_s \quad (3-11)$$

$N_j = N_0 - j$ และ $P_j(N_j)$ คือความน่าจะเป็นของจำนวนการเกิดการชน (หรือประสบความสำเร็จ) ซึ่งเริ่มต้นด้วยการคำนวณ $P_0(N_0)$ ให้ i คือการนับค่า backoff ณ สถานะเริ่มต้น ($j=0$) สถานะเดียว ค่า i คือจำนวนที่ลดลงหลังจากการส่งช่วงระยะเวลา (T_s หรือ T_c) หรือหลังจากช่วงระยะเวลาของ slot ที่ว่างเปล่า (σ) ความน่าจะเป็น (θ_i) นี้จะเกี่ยวข้องกับการนับค่าของ i backoff ซึ่งก็คือการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากสถานะเริ่มต้น โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\theta_i = \frac{1}{W_0} \frac{1-p}{1-p^{R+1}} P_r^N \cdot P_c^{i-N} \cdot c \quad \text{เมื่อ } 0 \leq N \leq i \quad (3-12)$$

$\frac{1}{W_0}$ คือ ความน่าจะเป็นของการนับค่า backoff ซึ่งได้มาจากค่า i

$$\frac{1-p}{1-p^{R+1}}$$

คือ ความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จและไม่สำเร็จ

$$p^N \cdot P_c^{i-N}$$

คือ ความน่าจะเป็นซึ่งได้มาจากการส่งข้อมูล N ใน i backoff slot

c คือ การรวมเข้าด้วยกันทั้งหมดของการส่งข้อมูล N

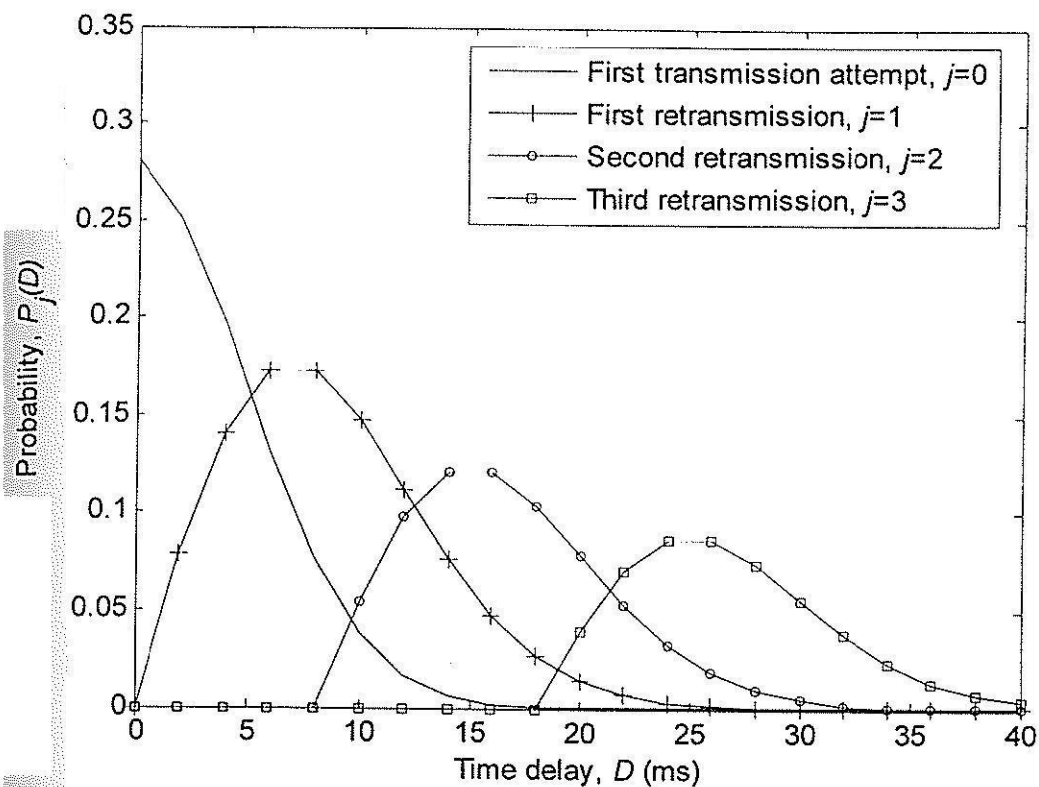
$$c = \binom{i}{N} = \frac{i!}{N!(i-N)!} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq N \leq i \quad (3-13)$$

สมการต่อจากนี้ เป็นการนับ backoff ซึ่งสามารถได้ค่าใดๆ จาก 0 ถึง $W-1$ ในสถานะเริ่มต้น ค่า $P_0(N_0)$ นี้คือความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากสถานะเริ่มต้นที่เกิดการส่งหน่วง N_0 สามารถหาได้จาก

$$P_0 N_0 = \sum_{i=N_0}^{W-1} \theta_i \quad \text{เมื่อ } 0 \leq N_0 \leq W_0 - 1 \quad (3-14)$$

รูปที่ 3-4 แสดงตัวอย่างความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลได้สำเร็จตามค่าตัวแปรที่กำหนดในตารางที่ 3-2 จากรูปพบว่าความน่าจะเป็นทั้งหมดประกอบด้วยกลุ่มของความน่าจะเป็นเล็กๆที่ขึ้นกับ backoff stage และค่ารวมที่ได้เป็นผลให้เกิดจุดยอดหลายๆ จุดรวมกันซึ่งการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ใช้บริการจะทำให้ค่า T_s เปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นไปในความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-1) กล่าวคือถ้าผู้ใช้งานเคลื่อนที่เข้าใกล้กับจุดเข้าถึงช่วงเวลา T_s ก็จะสั้นลงนั่นก็คือช่วงเวลาที่กระจายคลื่นลดลงนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้ข้อมูลทางสถิติของความน่าจะเป็นนี้เป็นตัวแทนในการหาดำแหน่งผู้ใช้งานได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ [13-16]

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการที่จะไม่เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ใดๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลของ TOA โดยตรงนั้นไม่สามารถทำได้ [13-16] โครงการวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะใช้ตัวแทนของกลุ่มข้อมูลที่อยู่ในรูปที่ 3-4 เพื่อใช้หาความสัมพันธ์ของตำแหน่งแทน แต่การที่จะคำนวณความสัมพันธ์ในรูปของสมการคณิตศาสตร์นั้นยังเป็นสิ่งที่ยากมากขึ้น โครงการวิจัยนี้จึงหาความสัมพันธ์ด้วยการประมาณจากผลการวัดจริง (Empirical Approach) โดยใช้ผลการวัดจริงมาคำนวณหาความสัมพันธ์ดังกล่าว



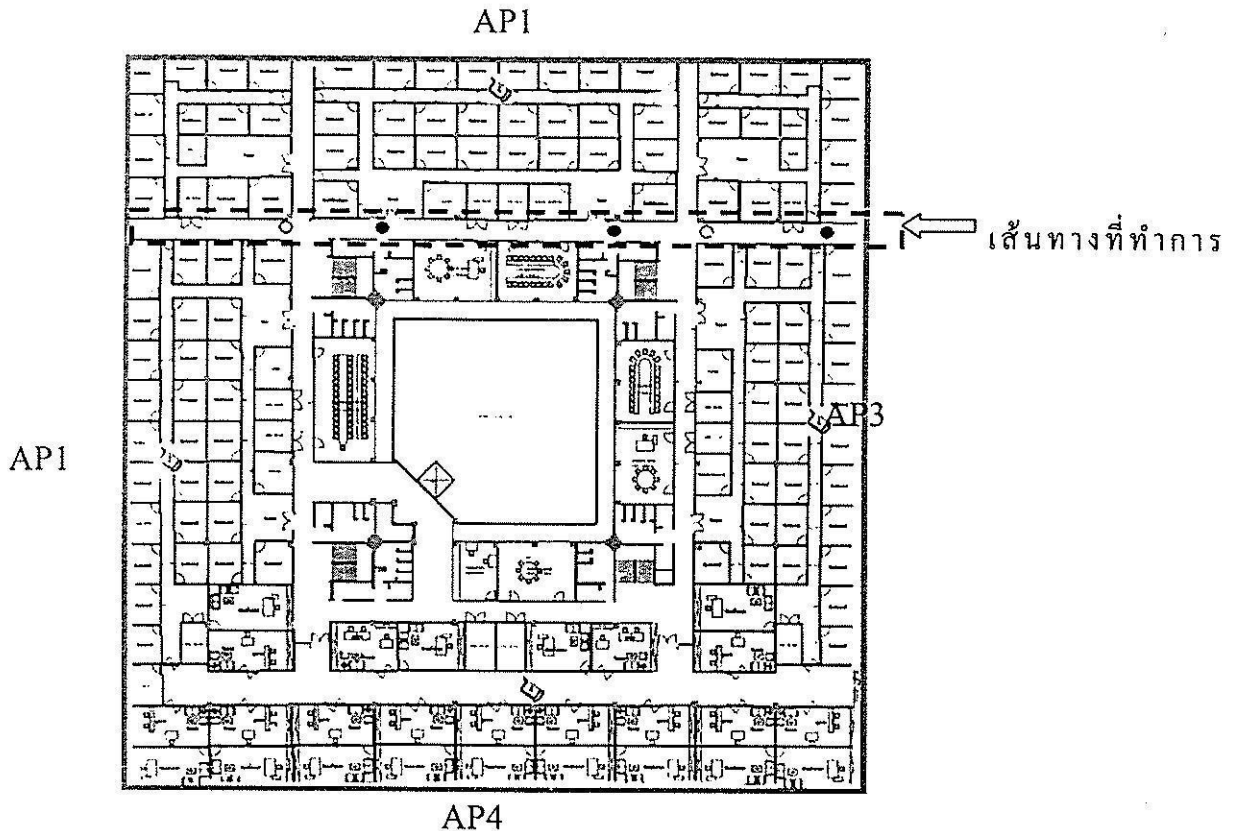
รูปที่ 3-4 ตัวอย่างความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลได้สำเร็จ

ตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการสร้าง รูปที่ 3-4

Frame interval, T_{frame}	8.6 μ s
DIFS	50 μ s
SIFS	10 μ s
Propagation Delay, δ	1 μ s
ACK interval, T_{ACK}	0.3 μ s
σ	20 μ s
CW_{min}	32
m	5
R	6
Number of users	20

3.4 การวัดค่านวงเวลา

สำหรับการวัดค่านวงเวลานั้นจากการทดสอบเบื้องต้น เราทำการทดสอบ 5 จุดที่ชั้น 4 อาคาร
วิชาการ ดังแสดงจุดทดสอบในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 จุดทดสอบที่ทำการวัดค่านวงเวลา

จากรูปที่ 3-5 จะเห็นว่ามีจุดเข้าถึง ทั้งหมด 4 ตัว คือ

API: WLAN-C-OUT-41

AP2: WLAN-C-OUT-42

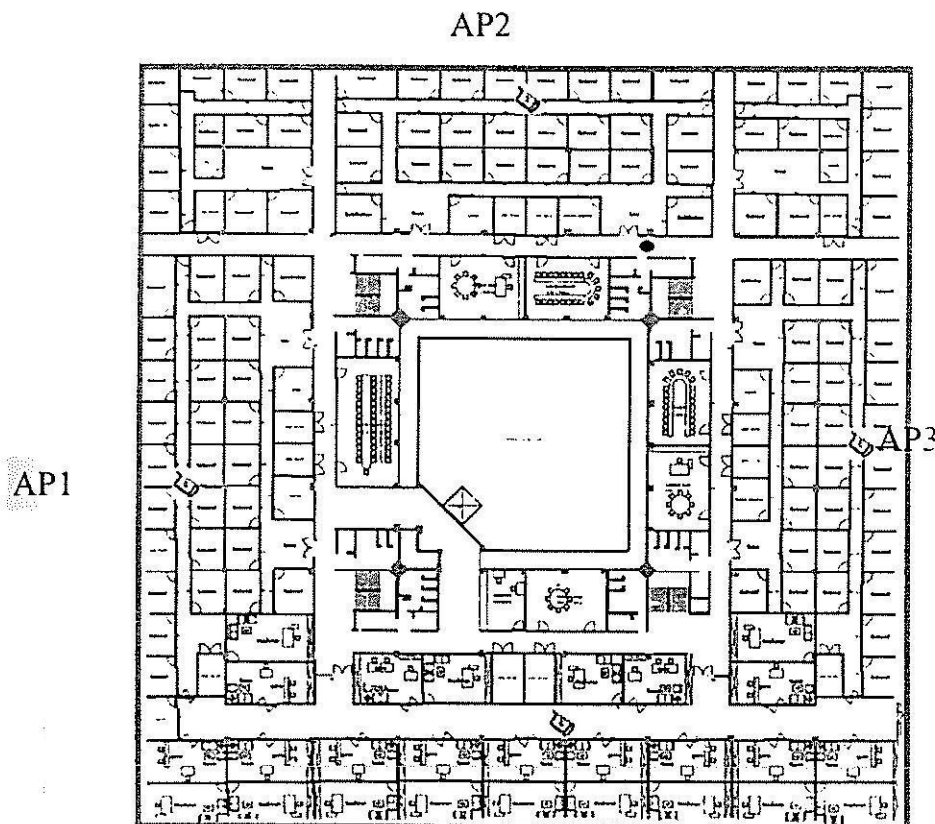
AP3: WLAN-C-OUT-43

AP4: WLAN-C-OUT-44

โดยที่รายละเอียดของจุดเข้าถึงแต่ละตัวได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 สำหรับการวัดค่านวงเวลานั้น
โครงการวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Intel(R)Proset Wireless Software Ver 10.5.0.0 เพื่อตรวจสอบว่าตรงจุดที่
เราทำการทดสอบ สามารถเชื่อมต่อกับจุดเข้าถึงตัวใดได้บ้าง และโปรแกรมนี้ยังสามารถเลือกเชื่อมต่อ จุด
เข้าถึงแต่ละตัวได้อีกด้วย ซึ่งในการทดสอบทั้ง 5 จุดนั้นจะสามารถเชื่อมต่อจุดเข้าถึงได้แค่ 3 ตัว

3.4.1 การวัดค่าหน่วงเวลาจากจุดทดสอบ

ในหัวข้อนี้ เราจะยกตัวอย่างการทดสอบของเรามาเพียง 1 จุด เพื่อแสดงให้เห็นถึงการหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลา



รูปที่ 3-6 ตัวอย่างจุดทดสอบที่นำมาหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลา

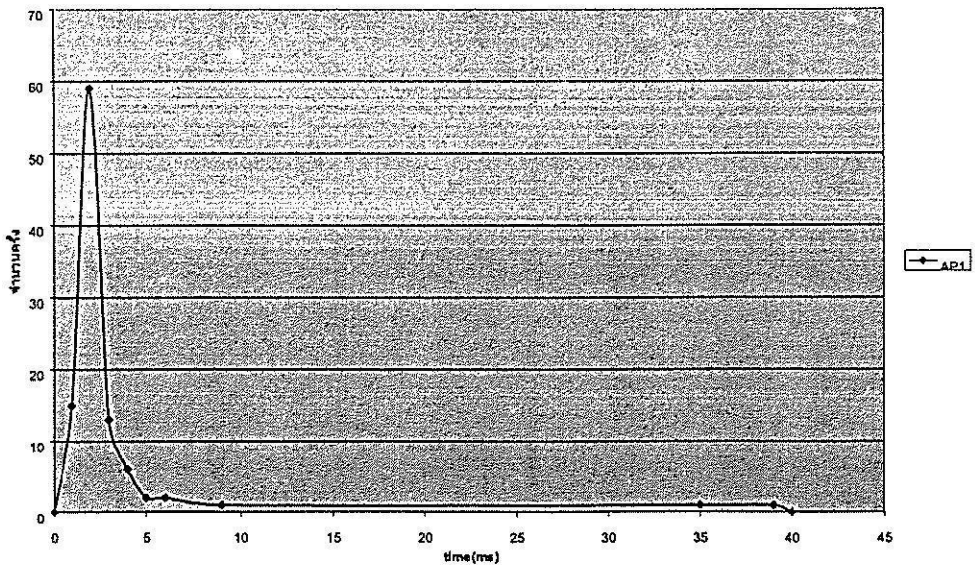
จากจุดที่เราทำการทดสอบ (รูปที่ 3-6) เราสามารถเชื่อมต่อกับ AP1, AP2 และ AP3 ได้ จากนั้นเราก็จะใช้โปรแกรม Intel(R)Proset Wireless Software Ver 10.5.0.0 เลือกเชื่อมต่อกับ AP1 ก่อน เมื่อเชื่อมต่อกับ AP1 ได้แล้วเราก็จะใช้คำสั่ง ping ไปที่ AP1 แล้วทำการเก็บค่าหน่วงเวลา (delay) ที่ AP1 ตอบกลับมาโดยเก็บทั้งหมด 100 ค่า จากนั้นเราจะทำการเลือกเชื่อมต่อกับ AP2 และ AP3 แล้วทำเช่นเดียวกับขั้นตอนการทดสอบของ AP1

3.4.2 การหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลา

การหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลา เราจะยกตัวอย่างของการเก็บค่าหน่วยเวลา (delay) 100 ค่า เมื่อเราทำการเชื่อมต่อกับ API โดยค่าที่ได้เป็น ดังนี้

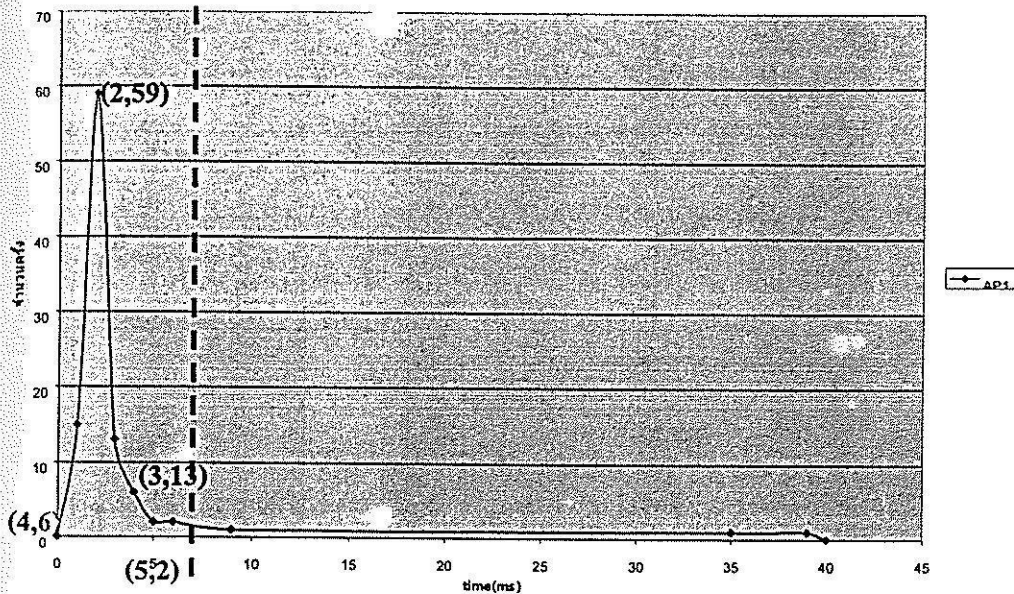
2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
2	2	2	5	2	2	1	4	2	2
2	4	1	2	2	1	5	2	2	2
2	2	2	2	1	2	2	2	2	3
39	3	2	3	2	2	2	2	3	3
2	2	2	2	2	2	2	3	1	2
3	1	2	2	6	2	3	1	2	1
1	2	2	2	4	2	2	9	6	2
35	3	3	1	2	2	4	2	4	4
2	2	1	2	3	2	1	3	2	3

จากนั้นนำค่าหน่วยเวลาที่ได้นำมาพล็อตกราฟเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเวลา(แกนx) และจำนวนครั้งของการเกิดค่าหน่วยเวลาที่ซ้ำกัน (แกนy) ดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเวลา และจำนวนครั้งของการเกิดค่าหน่วยเวลาที่ซ้ำกัน

จากรูปที่ 3-7 เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาได้จากการพิจารณาเฉพาะจุด peak ของลูกแรก ซึ่งตรงกับ First Transmission Attempt ดังแสดงขอบเขตในรูปที่ 3-8 แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลา



รูปที่ 3-8 ขอบเขตการพิจารณาเฉพาะ Frist Transmission Attempt

จากรูปที่ 3-8 เราหาค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาได้ ดังนี้

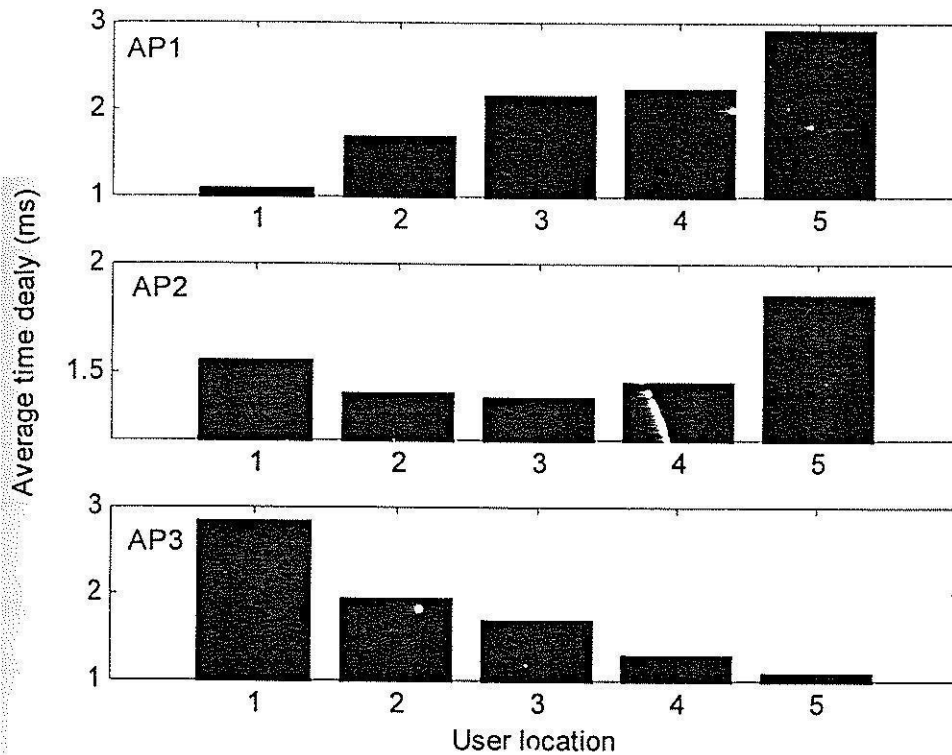
$$\text{ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลา} = \frac{(1 \times 15) + (2 \times 59) + (3 \times 13) + (4 \times 6) + (5 \times 2)}{15 + 59 + 13 + 6 + 2} = 2.168 \text{ ms}$$

ตารางที่ 3-3 ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาจากจุดทดสอบตัวอย่าง (รูปที่ 3-6)

	ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลา (ms)		
	API	AP2	AP3
จุดที่ทำการทดสอบ	2.168	1.392	1.7

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยจากจุดทดสอบทั้ง 5 จุดแล้วนำมาสรุปเป็นกราฟได้ในรูปที่ 3-9 พบว่าถ้าพิจารณาที่ API ค่าหน่วยเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อผู้ใช้งานเดินทางห่างจากจุดเข้าถึง ในขณะที่ AP2 นั้นระยะเวลาจะลดลง

แล้วเพิ่มขึ้นที่ปลายทาง ส่วน AP3 นั้นระยะเวลาจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อผู้ใช้งานเดินทางเข้าหาจุดเข้าถึง จากผลในรูปนี้ทำให้สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลานั้นแปรผันตรงกับระยะทางแน่นอน เพียงแต่ตอนนี้ยังไม่ทราบถึงรูปแบบความสัมพันธ์ ผลที่ได้ยืนยันแนวคิดที่จะใช้ค่าหน่วงเวลานี้เป็นตัวแทนในการหาตำแหน่ง ซึ่งจะอธิบายความสัมพันธ์ในส่วนถัดไป



รูปที่ 3-9 ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลากับตำแหน่งของแต่ละจุดเข้าถึง

3.5 การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลากับระยะทาง

ขั้นตอนที่ 1 เราต้องทำการปรับเทียบค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลา โดยนำค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลามาหารด้วยค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลาตัวที่น้อยที่สุด ณ จุดที่ทำการทดสอบนั้น ซึ่งจากจุดที่เราทดลองอย่างมานี้ จะได้ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลาที่ปรับเทียบแล้ว ดังนี้

ตารางที่ 3-4 ตารางสรุปค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาที่ปรับเทียบแล้ว

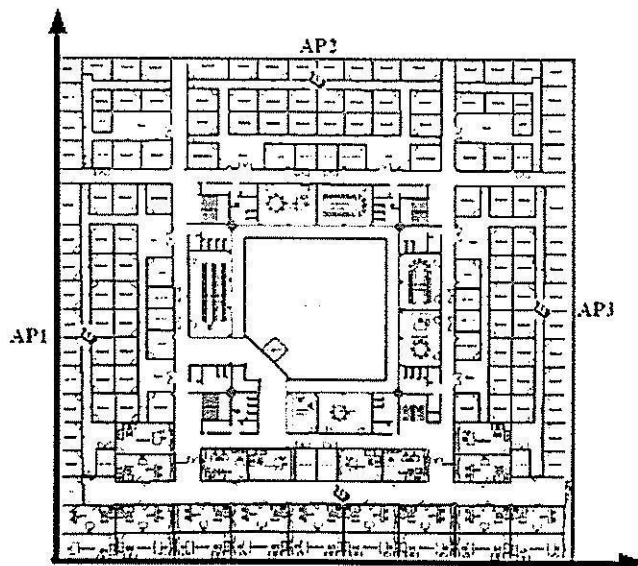
	ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาที่ปรับเทียบแล้ว		
	AP1	AP2	AP3
จุดที่ทำการทดสอบ	$\frac{2.168}{1.392} = 1.557$	$\frac{1.392}{1.392} = 1$	$\frac{1.7}{1.392} = 1.221$

ขั้นตอนที่ 2 เราจะทำการหาค่า Δt โดยเราจะนำค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาที่ปรับเทียบแล้วมาลบออกด้วยค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยเวลาที่ปรับเทียบแล้วตัวที่น้อยที่สุด ณ จุดนั้น ๆ ซึ่งก็คือ 1 (ในทุก ๆ จุด ค่านี้จะเป็น 1 เสมอ)

ตารางที่ 3-5 สรุปค่า Δt

	Δt		
	AP1	AP2	AP3
จุดที่ทำการทดสอบ	0.557	0	0.221

ขั้นตอนที่ 3 เราจะนำแผนที่ชั้น 4 ของอาคารวิชาการมากำหนดแกน x และ แกน y ดังรูปที่ 3-10 แล้วทำการวัดระยะห่าง (ในหน่วยเซนติเมตรแล้วแปลงเป็นเมตร โดยที่ 1 ซม. = 4 เมตร) จากแกน x และ แกน y



รูปที่ 3-10 การกำหนดแกน x และ แกน y เพื่อหาค่าพิกัด (x,y)

ตารางที่ 3-6 สรุปพิกัดของ AP1, AP2 และ AP3

พิกัด AP	แกน x (เมตร)	แกน y (เมตร)
AP1	2.8	32
AP2	32	60.4
AP3	60.8	32

ขั้นตอนที่ 4 เราต้องทำการหาระยะห่างจากจุดที่เราทดสอบจนถึง Access Point แต่ละตัว (ในหน่วยเซนติเมตรแล้วแปลงเป็นเมตร โดยที่ 1 ซม. = 4 เมตร) ซึ่งจากจุดที่เรากดตัวอย่างมานั้น เราจะได้ระยะห่างโดยสรุปเป็นตารางได้ ดังนี้

ตารางที่ 3-7 สรุประยะห่างจากจุดที่ทำการทดสอบถึงจุดเข้าถึง แต่ละตัว

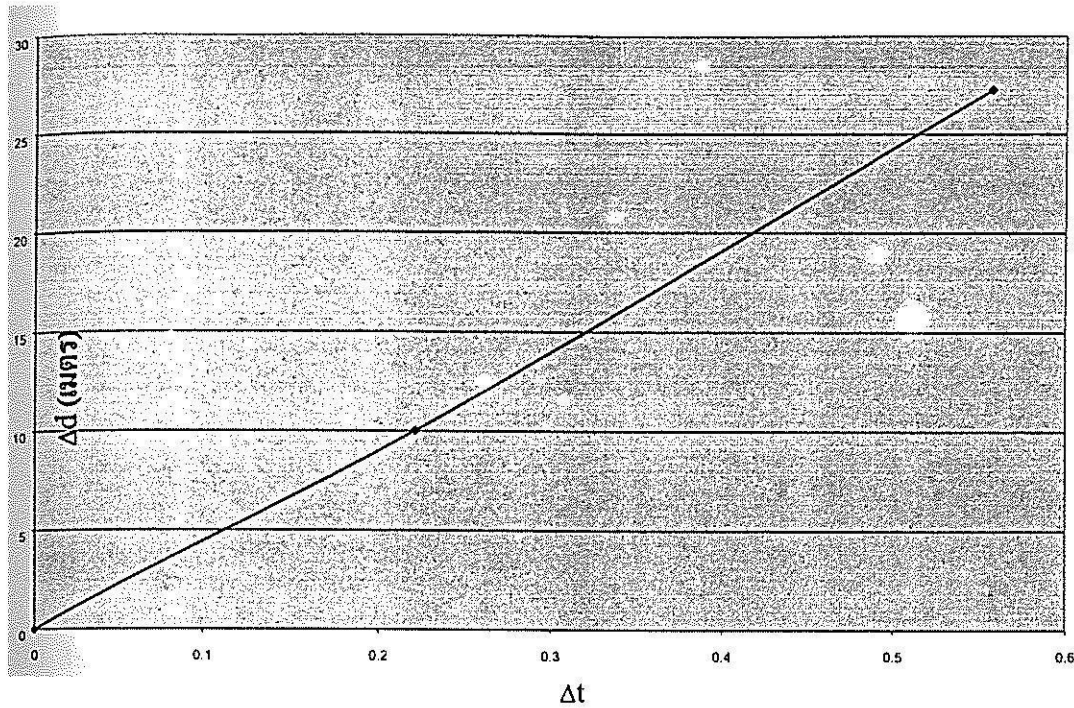
	ระยะทาง (เมตร)		
	AP1	AP2	AP3
จุดที่ทำการทดสอบ	42.4	15.2	25.2

จากนั้น ในแต่ละจุดที่ทำการทดสอบเราต้องทำการหาค่า Δd ซึ่งหาได้โดย นำระยะทางที่วัดจากตารางที่ 3-7 มาลบออกด้วยระยะที่น้อยที่สุด ณ จุดนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 3-7 ระยะที่น้อยที่สุดคือ 15.2 เมตร สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3-8 สรุปค่า Δd

	Δd (เมตร)		
	AP1	AP2	AP3
จุดที่ทำการทดสอบ	27.2	0	10

ขั้นตอนที่ 5 นำค่า Δt ที่ได้จากตารางที่ 3-5 และค่า Δd ที่ได้จากตารางที่ 3-8 มาพล็อตเป็นกราฟเชิงเส้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δt (แกน x) และ Δd (แกน y) (ดังรูปที่ 4-6)



รูปที่ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δt และ Δd

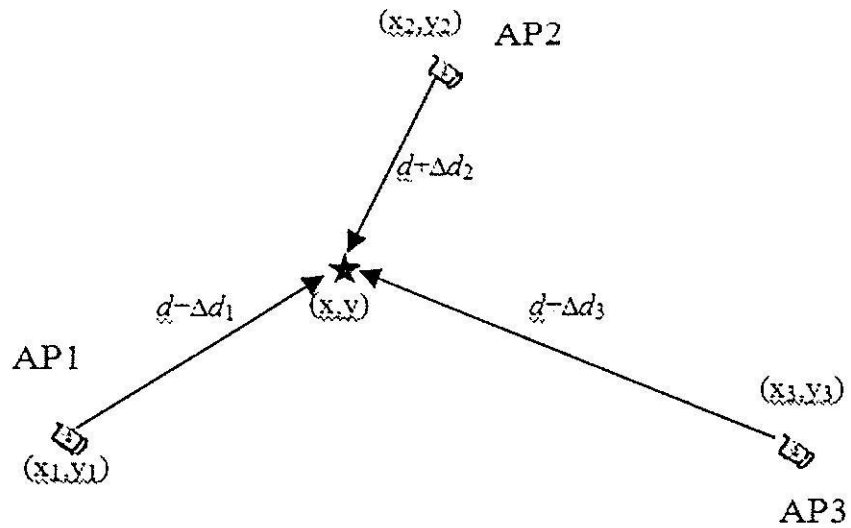
จากจุดทดสอบที่เราสกัดตัวอย่างมาเพียง 1 จุดนี้ เราสามารถใช้กราฟเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δt และ Δd มาหาใช้เพื่อหาค่าแห่งของผู้ใช้งานได้ตามสมการที่ (3-15)

$$\Delta d = \frac{\Delta t}{x} \quad (3-15)$$

ผลจากการทดสอบในโครงการวิจัยนี้ สรุปลงจากทุกจุดทดสอบได้ค่า $x = 0.0221$

3.6 เทคนิคการหาค่าแห่ง

หลังจากได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-15) งานถัดไปคือการประมาณค่าแห่งของผู้ใช้งานซึ่งโครงการวิจัยนี้ใช้เทคนิคการกำหนดค่าแห่งจากสามมุม ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 การกำหนดตำแหน่งจากสามมุม

ซึ่งวิธีการหาตำแหน่งต้องใช้การแก้สมการสามสมการด้านล่างนี้

$$d_1^2 = (d_1 + \Delta d_1)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2$$

$$d_2^2 = (d_1 + \Delta d_2)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2$$

$$d_3^2 = (d_1 + \Delta d_3)^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2$$

จากสมการทั้งสาม ค่า Δd_1 , Δd_2 และ Δd_3 สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ (3-15) ค่า Δt ที่จะใช้แทนในสมการคือ Δt จากตารางที่ 3-5 โดยเราจะกำหนดให้ค่าที่มี Δt เท่ากับ 0 เป็น Δd_1 เสมอ แล้วกำหนดให้พิกัดของ AP นี้ เป็นพิกัด (x_1, y_1) เสมอด้วย ส่วนค่าพิกัด (x_2, y_2) และ (x_3, y_3) คือ พิกัดของ AP อีก 2 ตัว จากตารางที่ 3-6

ในขั้นตอนนี้เราจะยกตัวอย่างการหาตำแหน่งเฉพาะจุดทดสอบในรูปที่ 3-6 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. จากตารางที่ 3-5 จะเห็นว่าค่า Δt ที่ได้จาก AP2 มีค่าเป็น 0 เราจึงกำหนดให้พิกัดของ AP2 เป็นพิกัด (x_1, y_1) ซึ่ง Δd_2 และ Δd_3 จะไล่หาจาก AP อีก 2 ตัวที่เหลืออยู่ตัวใดก่อนก็ได้

2. พิจารณาที่ AP2;
$$\Delta d_1 = \frac{\Delta t_{AP2}}{0.0221} = \frac{0}{0.0221} = 0$$

พิกัด (x_1, y_1) คือ (8, 15.1)

3. พิจารณาที่ AP₁; $\Delta d_2 = \frac{\Delta t_{AP1}}{0.0221} = \frac{0.557}{0.0221} = 25.204$

พิกัด (x_2, y_2) คือ $(0.7, 8)$

4. พิจารณาที่ AP₃; $\Delta d_3 = \frac{\Delta t_{AP3}}{0.0221} = \frac{0.221}{0.0221} = 10$

พิกัด (x_3, y_3) คือ $(15.2, 8)$

5. แทนค่าข้อ 2-4 ในสมการทั้งสามเพื่อหาพิกัด x และ พิกัด y ดังนี้

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (32 - x)^2 + (60.4 - y)^2 \\ (d_1 + 25.204)^2 &= (2.8 - x)^2 + (32 - y)^2 \\ (d_1 + 10)^2 &= (60.8 - x)^2 + (32 - y)^2 \end{aligned}$$

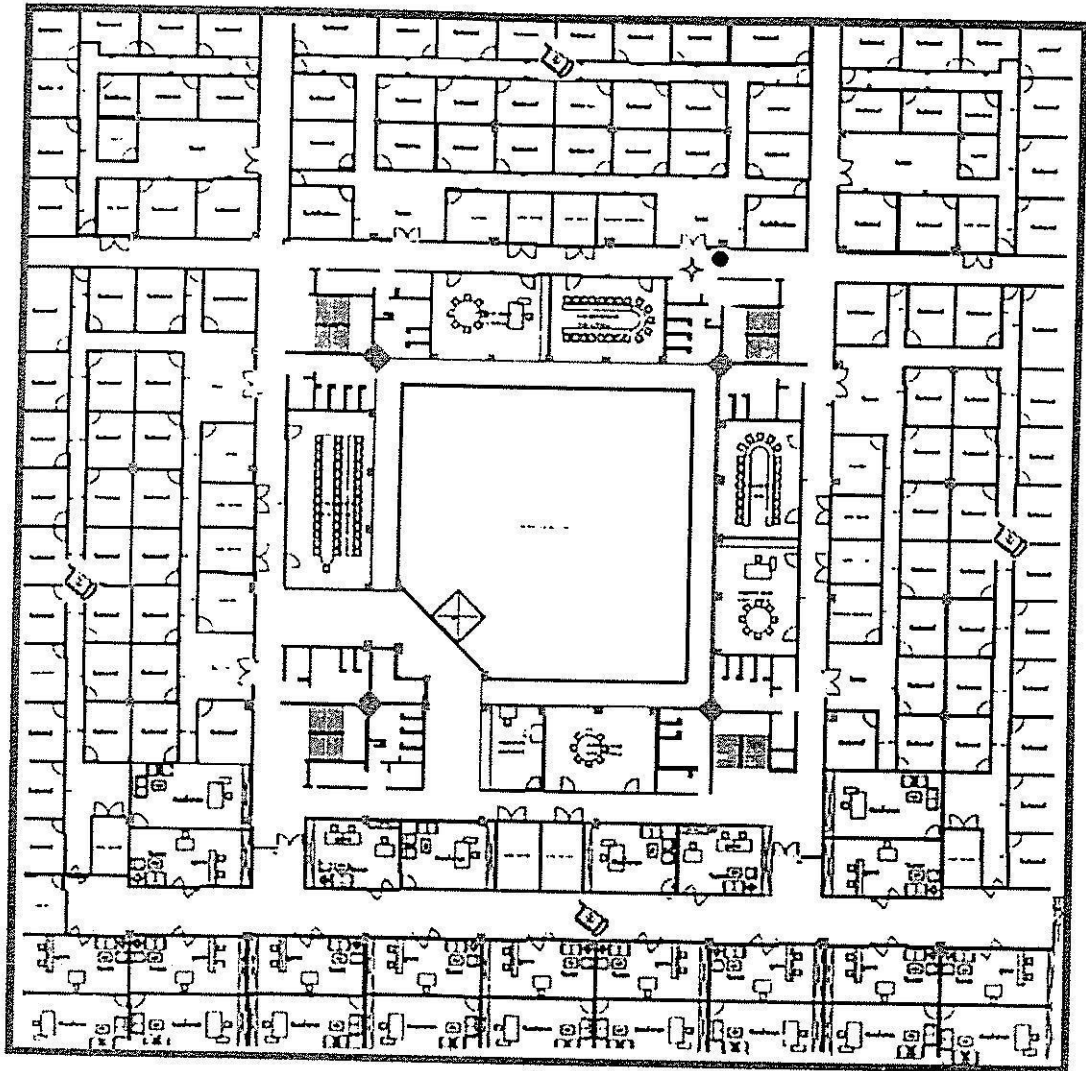
เมื่อทำการแก้สมการแล้วผลที่ได้คือ $x = 40.4791$ เมตร และ $y = 47.4165$ เมตร นำพิกัดที่ได้นี้ไปวาดในแผนที่ดังแสดงในรูปที่ 3-13 จากรูปพบว่าจุดที่ทดสอบและจุดที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน

3.7 ผลการทดสอบ

ผลการวัดค่าหน่วยเวลาทั้งหมดแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ข ซึ่งสามารถนำมาสรุปผลการหาค่าตำแหน่งได้สองกรณีคือ ในบริเวณพื้นที่ๆ ใช้จุดทดสอบหาความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-15) และในบริเวณนอกพื้นที่นั้น

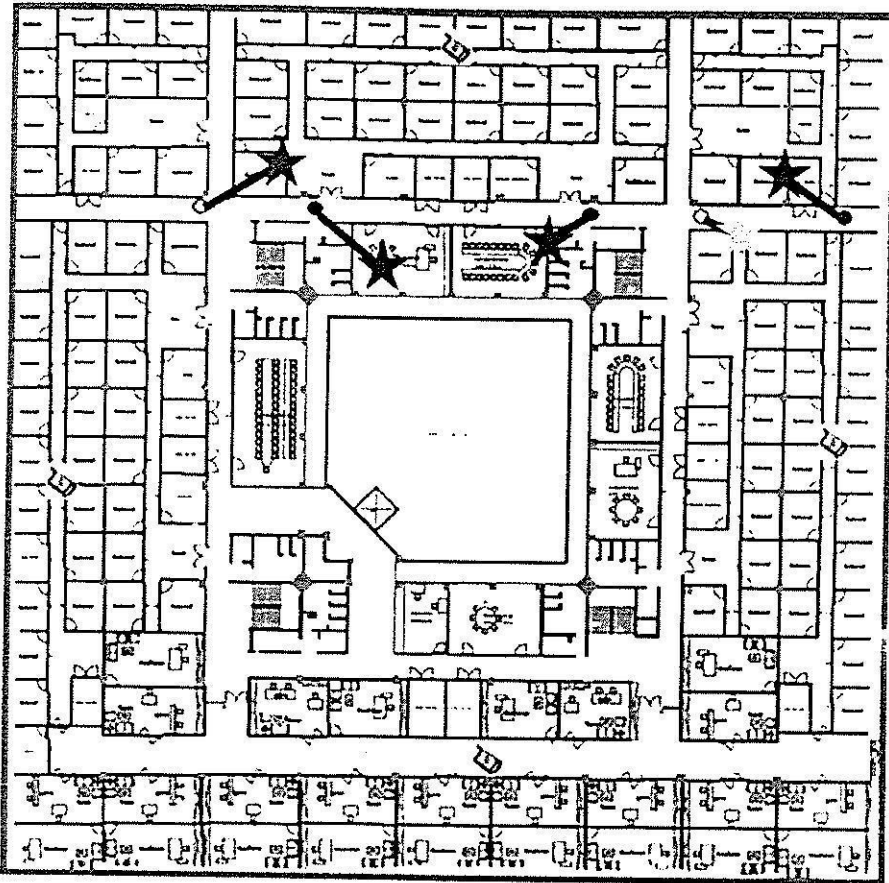
3.7.1 ในบริเวณพื้นที่ๆ ใช้จุดทดสอบหาความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-15)

ผลจากการหาค่าตำแหน่งของผู้ใช้บริการแสดงในรูปที่ 3-14 จากรูปพบว่าการประมาณตำแหน่งให้ผลที่ใกล้เคียงจุดทดสอบทุกจุดซึ่งมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 5 คือ 3.3, 5.7, 1.6, 2.8 และ 6.4 เมตรตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.96 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างประมาณหนึ่งห้องทำงานเท่านั้นเองผลที่ได้นี้เป็นขั้นความสำเร็จของการใช้วิธีหาค่าตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น



จุดที่ทำการทดสอบ ● จุดที่คำนวณได้ ✦

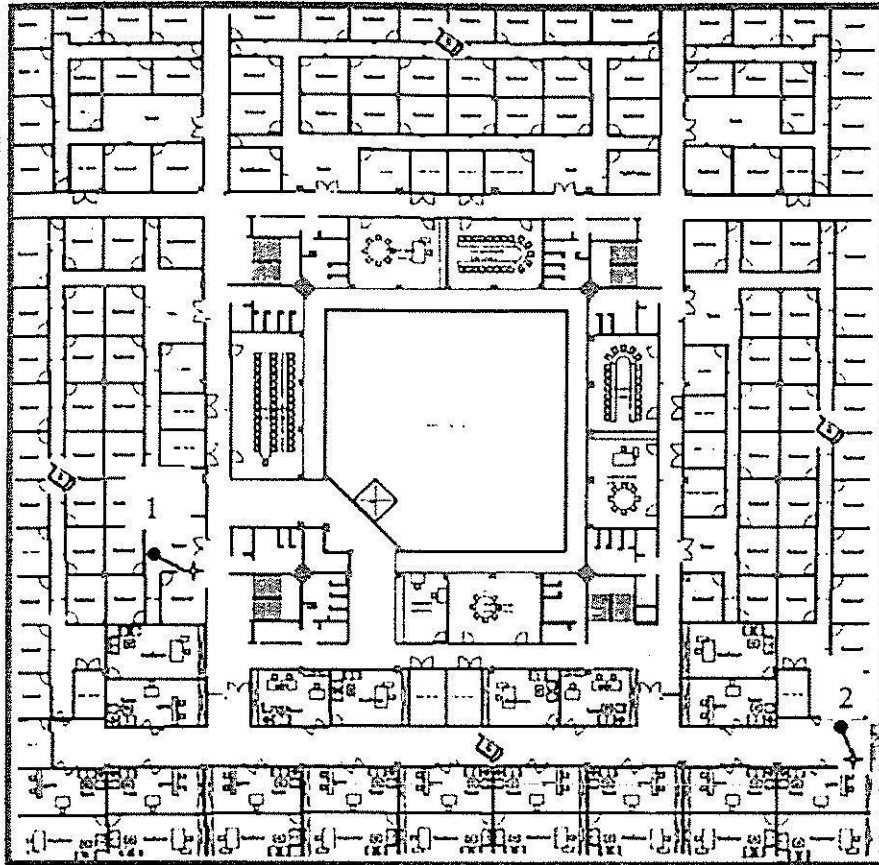
รูปที่ 3-13 ตำแหน่งของผู้ใช้งานที่หาได้ ณ จุดตัวอย่างที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3-14 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากวิธีการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณจากจุดทดสอบทั้งห้า

3.7.2 ในบริเวณนอกพื้นที่ๆ ใช้จุดทดสอบหาความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-15)

เพื่อยืนยันการนำไปใช้ได้กับทุกสถานที่ โครงการวิจัยนี้จึงทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการประมวลผลการหาค่าตำแหน่งเพิ่มอีก 2 จุด โดยสองจุดนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการหาความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-15) เลขผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3-15 ผลที่ได้พบว่ามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดประมาณ 3.4 เมตรซึ่งใกล้เคียงกับความผิดพลาดของบริเวณในพื้นที่ทดสอบ จึงพอสรุปได้ว่าวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่จริง



รูปที่ 3-15 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากวิธีการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณนอกพื้นที่ทดสอบ

3.8 กล่าวท้ายบท

เทคนิคการหาค่าแหน่งด้วยการใช้เวลาการรับส่งสัญญาณที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ ได้รับการยืนยันความสำเร็จผ่านการทดสอบ ทั้งในบริเวณที่ทำการเก็บข้อมูลไว้ก่อนและนอกพื้นที่ทำการทดสอบ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากสองกรณีใกล้เคียงกัน ซึ่งวิธีการนี้ยังไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงอะไรในอุปกรณ์เครือข่าย อีกด้วยทำให้สามารถนำไปประยุกต์เข้ากับบทที่ 2 ได้โดยตรง ซึ่งการประยุกต์นี้จะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 4

การหาตำแหน่งด้วยการใช้กำลังของสัญญาณและเวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกัน

4.1 กล่าวนำ

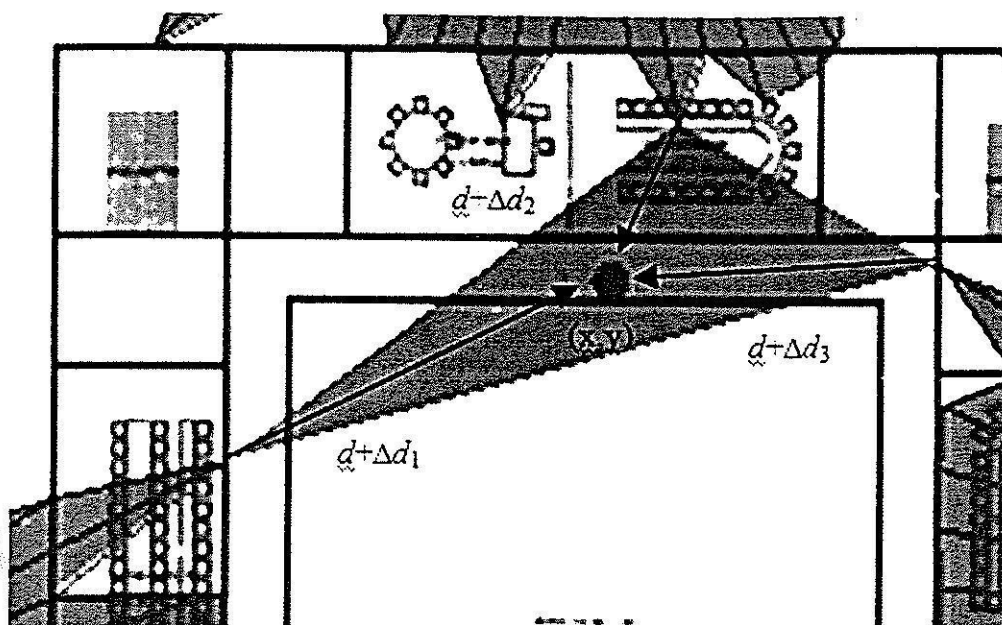
การหาตำแหน่งด้วยการใช้กำลังของสัญญาณและเวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกันในโครงการวิจัยนี้พัฒนาขึ้นมาจากการนำเทคนิคในบทที่ 2 และบทที่ 3 ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ต้องการเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ใดๆ ในเครือข่าย จึงทำให้ได้วิธีที่สะดวกและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงมีรายละเอียดเฉพาะส่วนที่เป็นการนำเทคนิคสองเทคนิคมาใช้ร่วมกัน และมีผลการทดสอบที่ครอบคลุมทุกพื้นที่มากขึ้น ซึ่งยืนยันความสำเร็จของการใช้คุณลักษณะสองอย่างร่วมกันได้เป็นอย่างดี

4.2 เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยการใช้กำลังของสัญญาณและเวลาในการรับส่งสัญญาณร่วมกัน

สำหรับแนวคิดที่จะนำสองเทคนิคที่บรรยายไปในบทที่ 2 และบทที่ 3 มาใช้ร่วมกันมีหลายวิธีการสำหรับโครงการวิจัยนี้ได้ทดลองหลายๆลักษณะ และพบว่าวิธีที่ดีที่สุดที่สามารถเพิ่มความแม่นยำในการบอกตำแหน่งได้คือการนำการคำนวณหาตำแหน่งจากสามมุมของคุณลักษณะในการใช้เวลาส่งรับสัญญาณไปหาตำแหน่งผู้ใช้งานบนพื้นที่รูปทรงที่เล็กที่สุดที่ได้จากการใช้กำลังความแรงของสัญญาณหามา ซึ่งสามารถสรุปเป็นสองขั้นตอนได้ดังนี้

1. หารูปทรงที่เล็กที่สุดจากการใช้กำลังของสัญญาณ ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 การคำนวณหา รูปทรงที่เล็กที่สุดที่เชื่อมต่อระหว่างแนวรัศมีของทุกจุดเข้าถึง
2. นำหลักการในหัวข้อ 3.6 เทคนิคการหาตำแหน่ง มาประยุกต์กับรูปทรงที่เล็กที่สุดที่หาได้จาก ขั้นตอนที่ 1 โดยเปลี่ยนตำแหน่งของจุดเข้าถึงในหัวข้อที่ 3.6 เป็นตำแหน่งมุมยอดของรูป สามเหลี่ยมในหัวข้อ 2.5.2

เมื่อใช้ทั้งสองขั้นตอนนี้แล้วก็จะสามารถกำหนดตำแหน่งผู้ให้บริการได้ ดังแสดงในรูปที่ 4-1

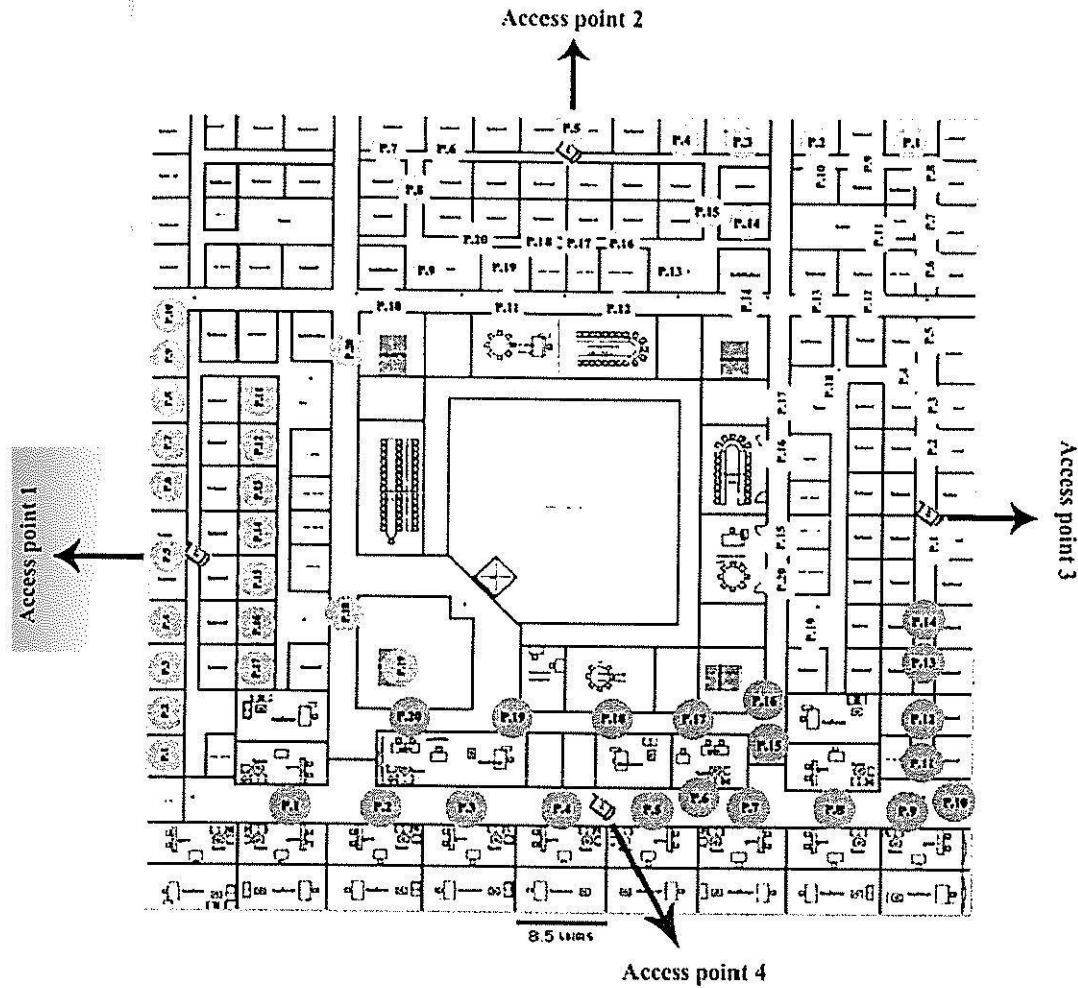


รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการหาตำแหน่งจากการใช้คุณลักษณะทางเวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกัน

4.3 ผลการทดสอบ

ในส่วนนี้ได้ทำการทดสอบเป็นจำนวนทั้งหมด 80 จุดทดสอบ จุดทดสอบละ 5 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4-2 ซึ่งผลการทดสอบ โดยจะแบ่งพื้นที่บริเวณจุดเข้าถึง AP2 เป็นจุดที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-15) ซึ่งเรียกว่าเป็นบริเวณพื้นที่ Training Area ผลการทดสอบสรุปไว้ในตารางที่ 4-1 และผลการทดสอบถูกแบ่งไว้เป็นสองกรณีคือกลุ่มที่ทดสอบภายใต้พื้นที่ Training Area และกลุ่มที่อยู่นอกพื้นที่ จุดประสงค์ของการแบ่งกลุ่มนี้เพื่อดูว่าเทคนิคการหาตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้กับสถานการณ์ที่ไม่ได้วัดความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-15) แล้วมีความแม่นยำมากน้อยเพียงไร

ผลในตารางที่ 4-1 นี้ให้เห็นว่าความแม่นยำของการใช้คุณลักษณะทั้งทางเวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกัน ให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เพียงแต่กำลังของสัญญาณหรือเวลาเพียงอย่างเดียว และการใช้วิธีการหาตำแหน่งด้วยสองคุณลักษณะร่วมกันบริเวณนอกพื้นที่ Training Area ให้ความน่าเชื่อถือที่ 62% สำหรับความผิดพลาดไม่เกิน 3 เมตรหรือประมาณหนึ่งห้องทำงาน และ 74% สำหรับความผิดพลาดไม่เกิน 10 เมตรหรือประมาณหนึ่งห้องประชุม



รูปที่ 4-2 แสดงจุดทดสอบทั้งหมด 80 จุด

ตารางที่ 4-1 การเปรียบเทียบความผิดพลาดจากการบอกตำแหน่งด้วยวิธีการต่างๆ

Type of Positioning Technique	Inside Training Area		Outside Training Area	
	Error < 3m	Error <10m	Error < 3m	Error <10m
RSS	56 %	78 %	43 %	61 %
TOA	67 %	84 %	55 %	70 %
Joint RSS and TOA	73 %	89 %	62 %	74 %

4.4 กล่าวท้ายบท

การหาตำแหน่งผู้ใช้บริการภายในอาคารด้วยวิธีที่ใช้ทั้งคุณลักษณะทางเวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกันมีขั้นตอนที่นำผลจากแต่ละวิธีของบทที่ 2 และบทที่ 3 ร่วมกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการพิจารณาร่วมกันนี้ทำให้ได้เทคนิคใหม่ที่ทำให้ความแม่นยำที่ดีกว่าเดิม โดยผลจากการทดสอบทั้งในบริเวณพื้นที่ๆ ใช้จุดทดสอบหาความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-15) และนอกพื้นที่นั้นให้บทสรุปความสำเร็จของโครงการวิจัยที่ตรงกัน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการหาคำแหน่งของผู้ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร ซึ่งที่ผ่านมามีพบว่าวิธีการบอกตำแหน่งที่ใช้ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มด้วยกัน โดยแต่ละกลุ่มจะใช้คุณลักษณะของข้อมูลเพื่อบอกตำแหน่งแตกต่างกัน คุณลักษณะทั้งสี่กลุ่มนี้ได้แก่ เวลาในการส่งรับสัญญาณ มุมที่รับส่งสัญญาณ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ และเลขหมายเซลล์ สำหรับการใช้เวลาในการส่งรับสัญญาณนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาการเข้าจังหวะของภาคส่งและรับซึ่งหมายถึงอุปกรณ์เครือข่ายไร้สายทั้งที่จุดเข้าถึง และที่ผู้ใช้งานทำให้การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบของวิธีการนี้ยุ่งยากแต่ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งสูง ส่วนการใช้กำลังสัญญาณเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนแต่ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งไม่ดีนัก โครงการวิจัยนี้จึงพัฒนาเทคนิคใหม่ที่ทำทั้งสองวิธีที่ใช้คุณลักษณะทางเวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกันเพื่อรวมข้อดีของทั้งสองวิธีไว้ แต่งานวิจัยด้านการใช้เวลาส่งรับสัญญาณเพื่อบอกตำแหน่งส่วนใหญ่ต้องปรับเปลี่ยนอุปกรณ์หรือเพิ่มความซับซ้อนให้แก่ระบบซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมารวมกับวิธีที่ใช้กำลังสัญญาณ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการหาคำแหน่งจากคุณลักษณะทางเวลาในการรับส่งสัญญาณ โดยไม่ต้องการเพิ่มความซับซ้อนหรือการเปลี่ยนแปลงฮาร์ดแวร์เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับคุณลักษณะทางกำลังสัญญาณได้

สำหรับวิธีการหาคำแหน่งจากกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นมีขั้นตอนต่างๆ ต่อไปนี้

1. นำกำลังสัญญาณที่รับได้มาเปลี่ยนเป็นระยะทาง โดยคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร
2. หาแนวรัศมีของระยะทางที่เป็นไปได้รอบจุดเข้าถึง
3. หารูปทรงที่มีพื้นที่เล็กที่สุดที่เชื่อมต่อแนวรัศมีของข้อ 2
4. หาจุดกึ่งกลางรูปทรงที่มีพื้นที่เล็กที่สุดเพื่อให้เป็นตัวแทนตำแหน่งของผู้ใช้งาน

วิธีการหาคำแหน่งจากเวลาในการรับส่งสัญญาณมีขั้นตอนต่างๆ ต่อไปนี้

1. วัดค่าหน่วงเวลาเพื่อมาหาค่าหน่วงเวลาเฉลี่ย

2. ทำการแปลงค่าหน่วยเวลาเฉลี่ยเพื่อหาเวลาที่แตกต่างกันระหว่างจุดเข้าถึงแต่ละตัว
3. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเวลาและระยะทาง
4. ใช้การคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีกำหนดจุดจากสามมุมที่ตั้งของจุดเข้าถึง ตามระยะทางที่แตกต่างกันในข้อ 3

สำหรับวิธีการหาตำแหน่งจากการใช้เวลาและกำลังของสัญญาณร่วมกันมีขั้นตอนต่างๆ ต่อไปนี้

1. นำค่ากำลังสัญญาณที่รับได้มาเปลี่ยนเป็นระยะทาง โดยคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคาร
2. หาแนวรัศมีของระยะทางที่เป็นไปได้รอบจุดเข้าถึง
3. หารูปทรงที่มีพื้นที่เล็กที่สุดที่เชื่อมต่อแนวรัศมีของข้อ 2
4. วัดค่าหน่วยเวลาเพื่อมาหาค่าหน่วยเวลาเฉลี่ย
5. ทำการแปลงค่าหน่วยเวลาเฉลี่ยเพื่อหาเวลาที่แตกต่างกันระหว่างจุดเข้าถึงแต่ละตัว
6. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเวลาและระยะทาง
7. ใช้การคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีกำหนดจุดจากสามมุมของรูปทรงในข้อ 3

โครงการวิจัยนี้สามารถสรุปผลสำเร็จใหม่ได้ 3 เรื่องคือ 1) แนวคิดในการใช้คุณลักษณะทางเวลาและกำลังสัญญาณร่วมกันในการบอกตำแหน่งของผู้ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2) วิธีการบอกตำแหน่งด้วยการใช้เวลาในการรับส่งสัญญาณที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่อุปกรณ์เครือข่าย และ 3) การทดสอบยืนยันแนวคิดเรื่องการใช้ทั้งสองคุณลักษณะร่วมกันภายใต้ระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้งานจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. โครงการวิจัยนี้พิจารณาความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-15) เป็นการประมาณเชิงเส้น ทั้งนี้การประมาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นอาจจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้
2. เนื่องจากต้องการทดสอบในสถานการณ์จริงจึงทำให้ไม่สามารถกำหนดจำนวนผู้ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ ทำให้การทดลองแต่ละครั้งมีจำนวนผู้ใช้งานจริงไม่เท่ากัน ซึ่งอาจจะเป็นเหตุผลของความผิดพลาดได้ จึงควรพัฒนาการทดสอบที่สามารถกำหนดจำนวนผู้ใช้งานได้

บรรณานุกรม

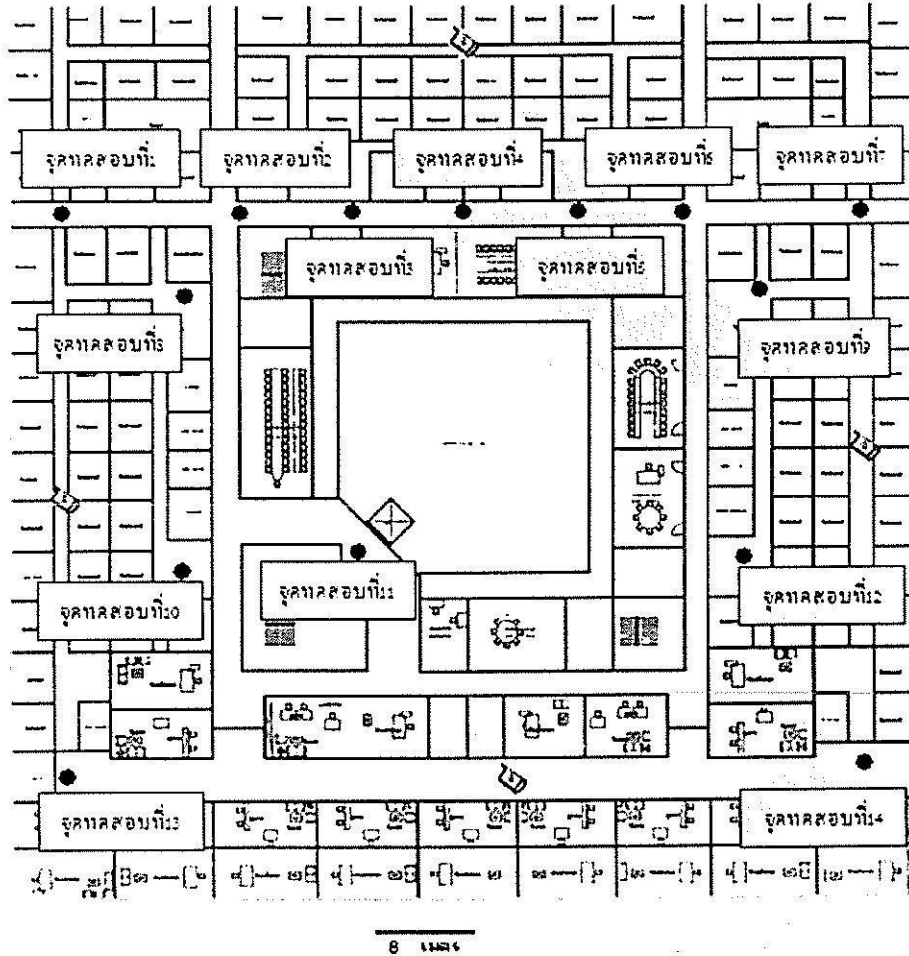
- [1] P. Enge and P. Misra, (1999). Scanning Special Issue/Technology on Global Positioning System. **Proceeding of IEEE**, 87(1), 18-35.
- [2] M. McGuire, K. Plataniotis, and A. Venetsanopoulos, (2005). Data Fusion of Power and Time Measurements for Mobile Terminal Location. **IEEE Trans. Mobile Computing**, 4(2), 142-153.
- [3] T. Roos, P. Myllymaki, and H. Tirri, (2002). A Statistical Modeling Approach to Location Estimation. **IEEE Trans. Mobile Computing**, 1(1), 59-69.
- [4] G. Sun, J. Chen, W. Guo, and K.R. Liu, (2005) Signal Processing Techniques in Network-Aided Positioning: A Survey of State-of-the-Art Positioning Designs. **IEEE Signal Processing Magazine**, 22(4), 12-23.
- [5] M. Hazas, J. Scott, and J. Krumm, (2004). Location-Aware Computing Comes of Age. **IEEE Computer**, 37(2), 95-97.
- [6] J. Hightower and G. Borriello, (2001). Location Systems for Ubiquitous Computing. **IEEE Computer**, 34(8), 57-66.
- [7] A. Harter and A. Hopper, (1994). A Distributed Location System for the Active Office. **IEEE Network**, 8(1), 62-70.
- [8] M. Hazas and A. Hopper, (2006). Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning. **IEEE Trans. Mobile Computing**, 5(5), 536-547.
- [9] N.B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, (2000). The Cricket Location-Support System. **Proc. MobiCom**, pp. 32-43.
- [10] M. Youssef and K. Agrawala, (2004). Continuous Space Estimation for WLAN Location Determination Systems. **Proc. IEEE 13th Int'l Conf. Computer Comm. and Networks**, 2004.
- [11] P. Bahl and V. Padmanabhan, (2000). RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. **Proc. INFOCOM**, vol. 2, pp. 775-784.
- [12] K. Plataniotis and C. Regazzoni, (2005). Visual-Centric Surveillance Networks and Services. **IEEE Signal Processing Magazine**, special issue on video and signal processing for surveillance networks and services, 22(2), 1072-1093.

- [13] R. Yamasaki, A. Ogino, T. Tamaki, T. Uta, N. Matsuzawa, and T. Kato, (2005). TDOA location system for IEEE 802.11b WLAN. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, vol 4, 13-17 March 2005, pp.2338 – 2343.
- [14] S.A. Golden, and S.S. Bateman, (2007). Sensor Measurements for Wi-Fi Location with Emphasis on Time-of-Arrival Ranging. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, 6(10), pp.1185 – 1198.
- [15] M. Ciurana, S. Cugno, and F. Barcelo-Arroyo, (2007). WLAN indoor positioning based on TOA with two reference points. **WPNC '07**, 22-22 March 2007, pp. 23 – 28.
- [16] F. Izquierdo, M. Ciurana, F. Barcelo, J. Paradells, and E. Zola, (2006). Performance evaluation of a TOA-based trilateration method to locate terminals in WLAN. **1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing**, 16-18 Jan. 2006, pp. 1 – 6.
- [17] M. Yousief, (2004). Horus: A WLAN-Based Indoor Location Determination system. **PhD dissertation**, Univ. of Maryland.
- [18] T.S. Rappaport, (2002). **Wireless Communications**. Prentice Hall, 2nd.
- [19] P. Raptis, V. Vitsas, K. Paparrizos, P. Chazimisios, and A.C. Boucouvalas, (2005). Packet Delay Distribution of IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. **IEEE WoWMoM**, pp. 299 – 304.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการหาตำแหน่งด้วยกำลังของสัญญาณ

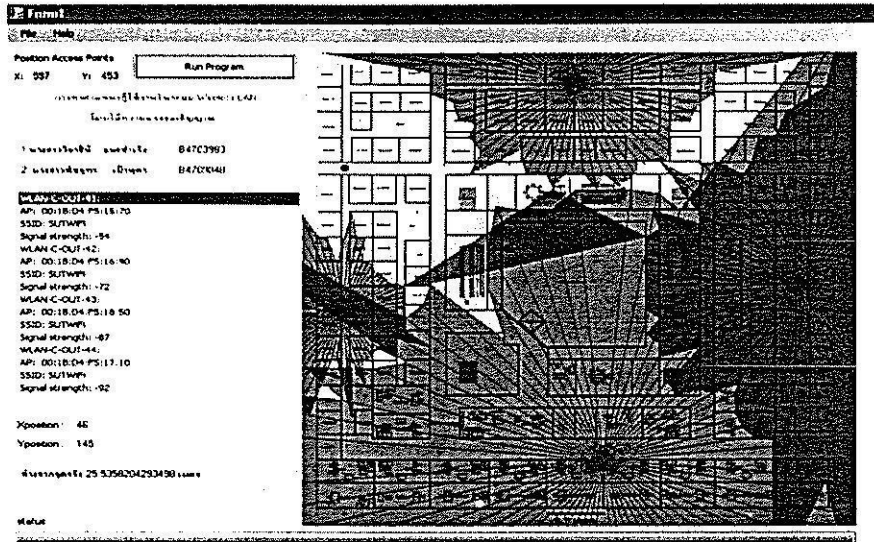


รูปที่ ก-1 แผนที่และตำแหน่งของจุดทดสอบ ณ อาคารวิชาการชั้นที่ 4

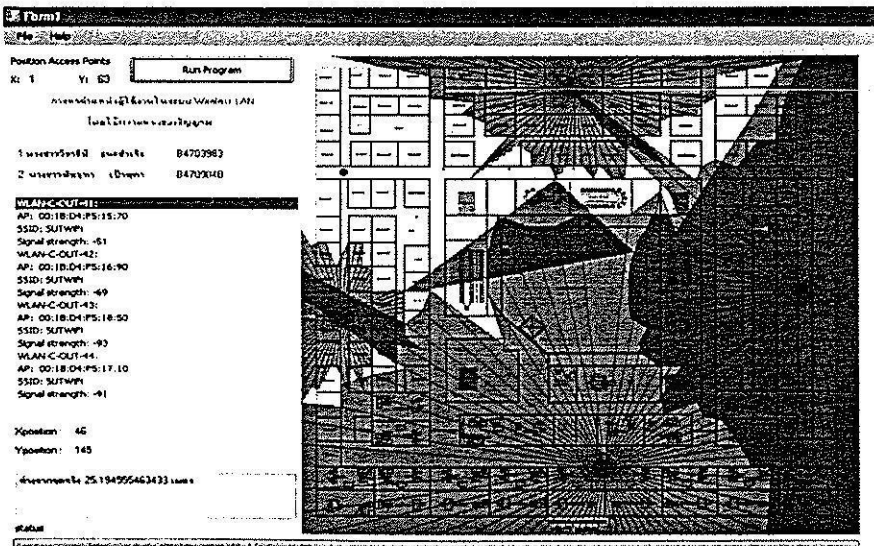
โดย

- = ตำแหน่งที่อยู่จริงของผู้ใช้งาน โปรแกรม
- = ตำแหน่งที่โปรแกรมประมวลผลออกมา

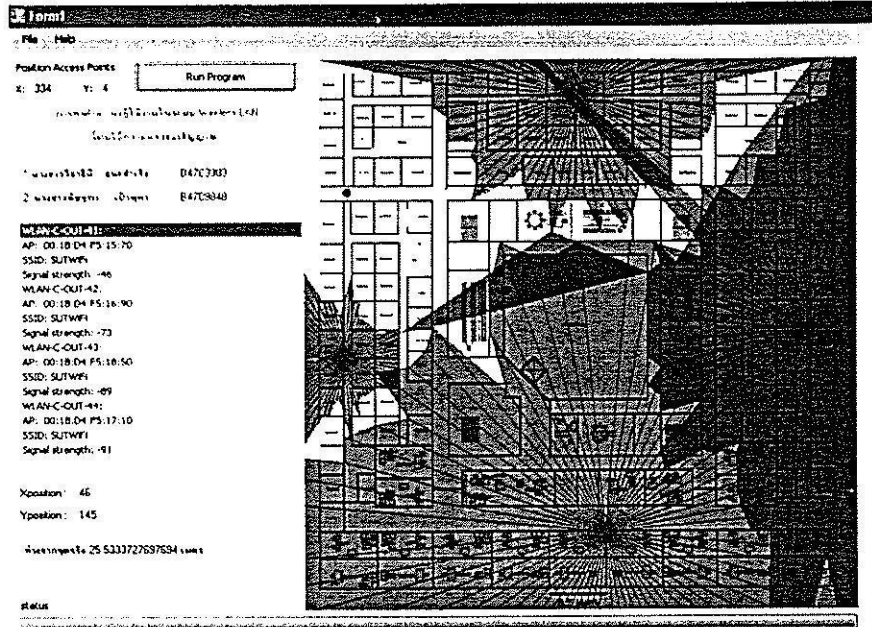
จุดทดสอบที่ 1



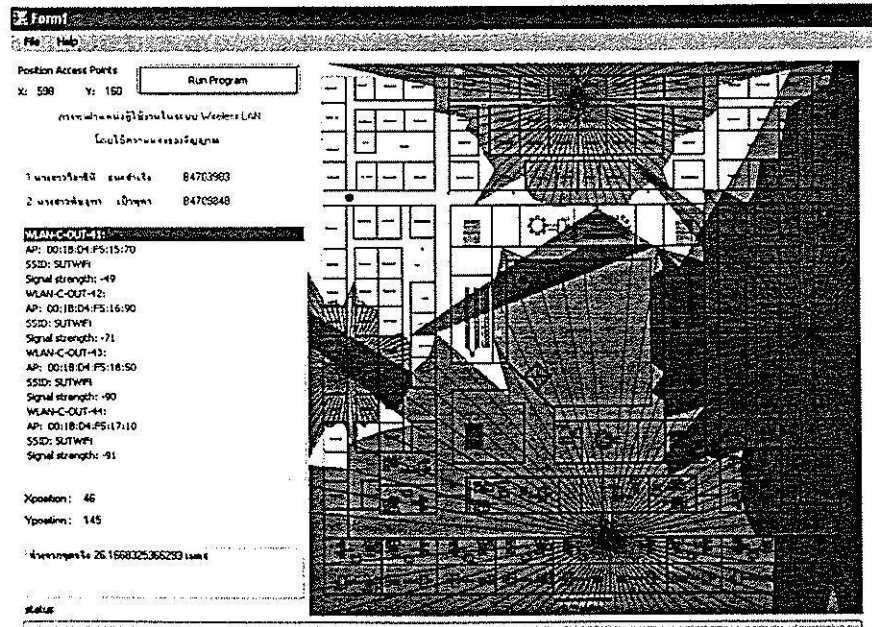
รูปที่ ก-2 จุดทดสอบที่ 1 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-3 จุดทดสอบที่ 1 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-4 จุดทดสอบที่ 1 ครั้งที่3

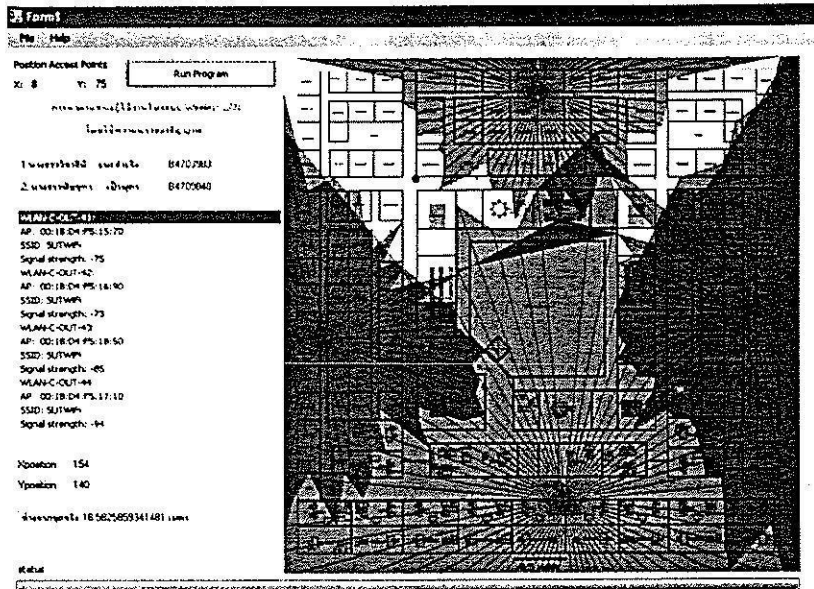


รูปที่ ก-5 จุดทดสอบที่ 1 ครั้งที่4

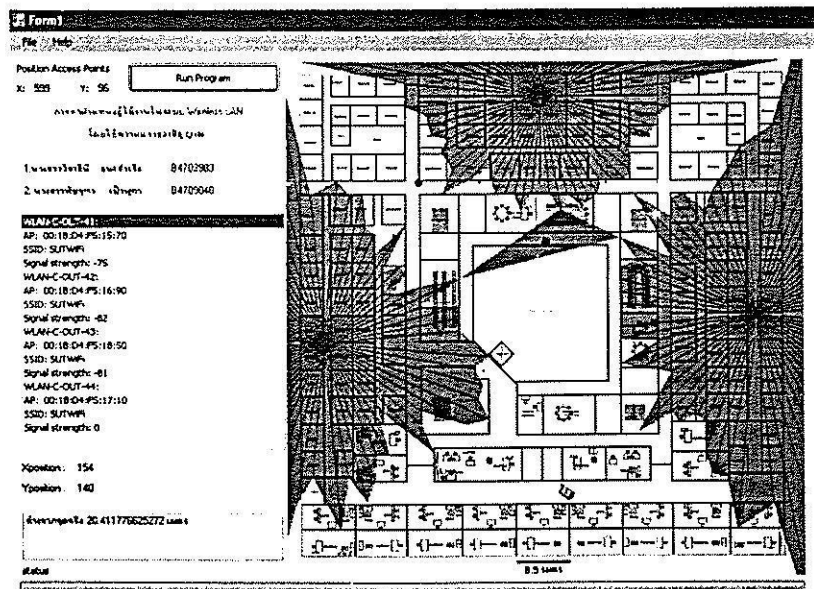
ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงผลการทดสอบ โปรแกรมในจุดทดสอบที่ 1

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
1 (รูปที่ ก-2)	00:1B:D4:F5:15:70	-54	25.54
	00:1B:D4:F5:16:90	-72	
	00:1B:D4:F5:18:50	-87	
	00:1B:D4:F5:17:10	-92	
1 (รูปที่ ก-3)	00:1B:D4:F5:15:70	-51	25.19
	00:1B:D4:F5:16:90	-69	
	00:1B:D4:F5:18:50	-93	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	
1 (รูปที่ ก-4)	00:1B:D4:F5:15:70	-46	25.53
	00:1B:D4:F5:16:90	-73	
	00:1B:D4:F5:18:50	-89	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	
1 (รูปที่ ก-5)	00:1B:D4:F5:15:70	-49	26.17
	00:1B:D4:F5:16:90	-71	
	00:1B:D4:F5:18:50	-90	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	

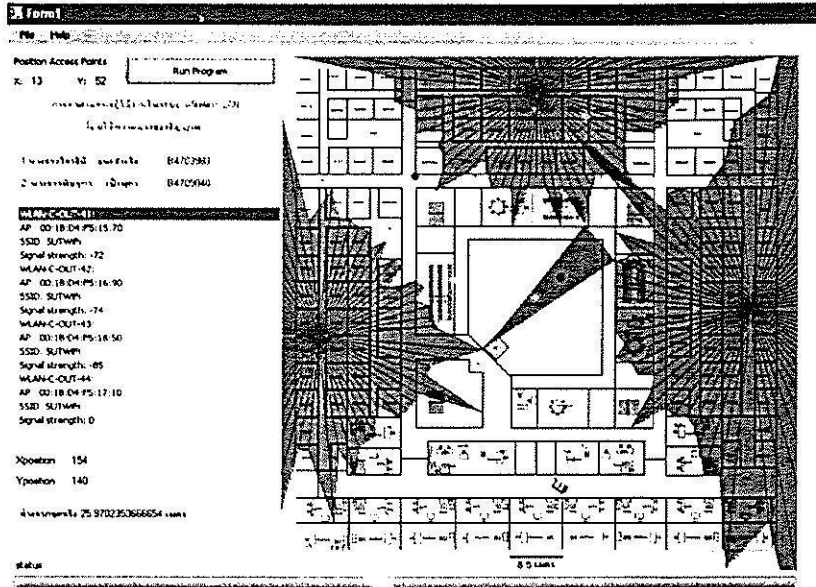
จุดทดสอบที่ 2



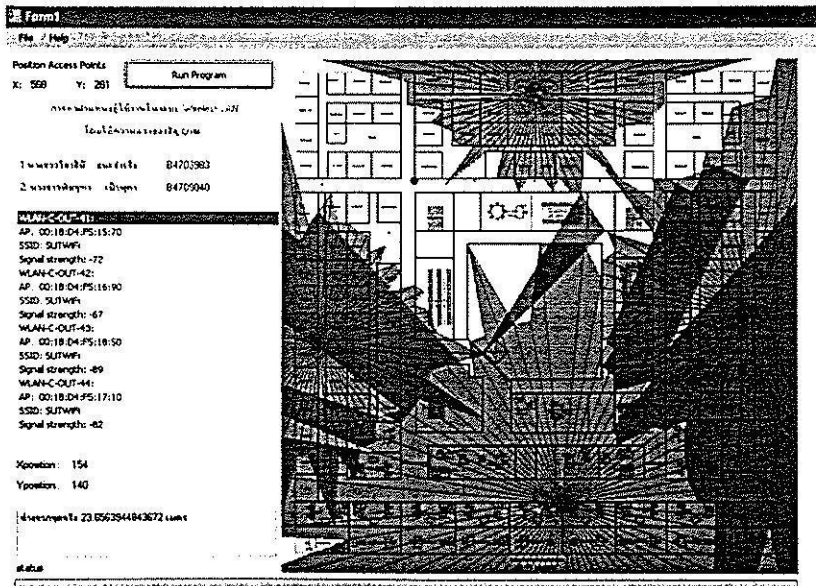
รูปที่ ก-6 จุดทดสอบที่ 2 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-7 จุดทดสอบที่ 2 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-8 จุดทดสอบที่ 2 ครั้งที่3

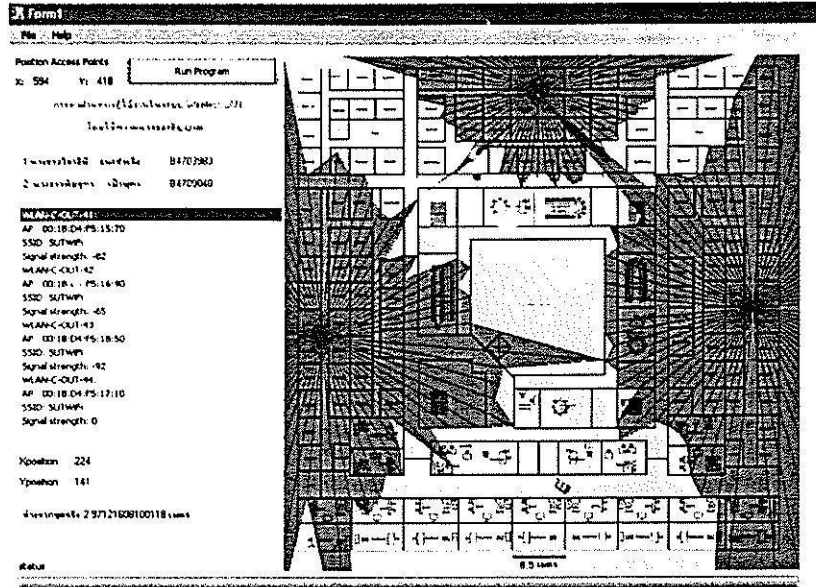


รูปที่ ก-9 จุดทดสอบที่ 2 ครั้งที่4

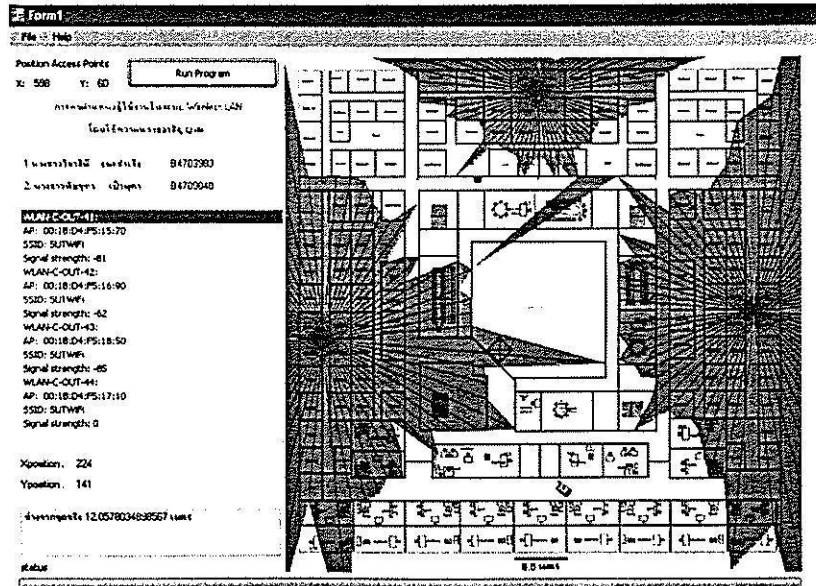
ตารางที่ ก-2 ตารางแสดงผลการทดสอบ โปรแกรมในจุดทดสอบที่ 2

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
2 (รูปที่ ก-6)	00:1B:D4:F5:15:70	-75	18.58
	00:1B:D4:F5:16:90	-73	
	00:1B:D4:F5:18:50	-85	
	00:1B:D4:F5:17:10	-94	
2 (รูปที่ ก-7)	00:1B:D4:F5:15:70	-75	20.41
	00:1B:D4:F5:16:90	-82	
	00:1B:D4:F5:18:50	-81	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	
2 (รูปที่ ก-8)	00:1B:D4:F5:15:70	-72	25.97
	00:1B:D4:F5:16:90	-74	
	00:1B:D4:F5:18:50	-85	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	
2 (รูปที่ ก-9)	00:1B:D4:F5:15:70	-72	23.67
	00:1B:D4:F5:16:90	-67	
	00:1B:D4:F5:18:50	-89	
	00:1B:D4:F5:17:10	-82	

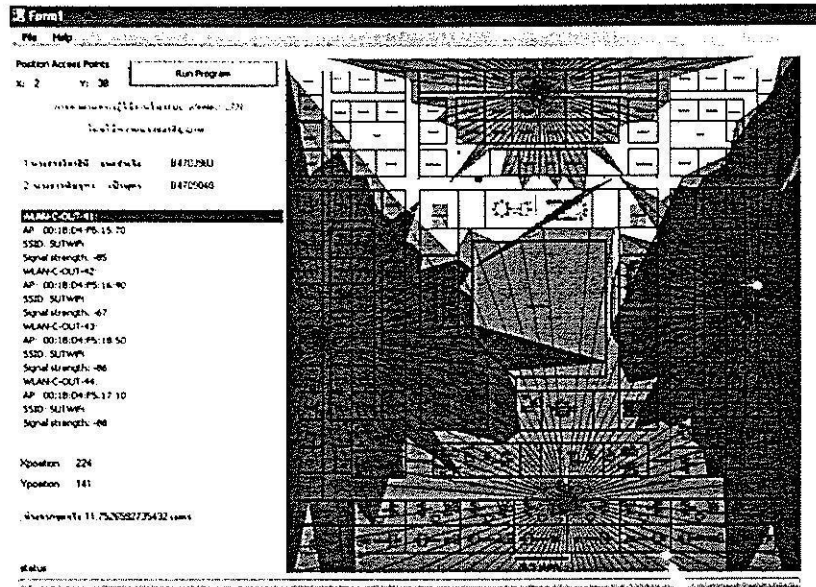
จุดทดสอบที่ 3



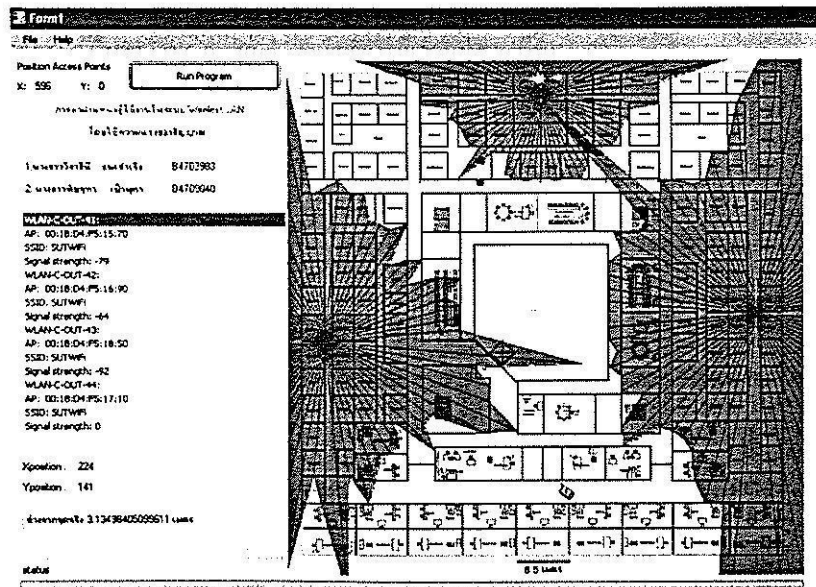
รูปที่ ก-10 จุดทดสอบที่ 3 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-11 จุดทดสอบที่ 3 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-12 จุดทดสอบที่ 3 ครั้งที่ 3

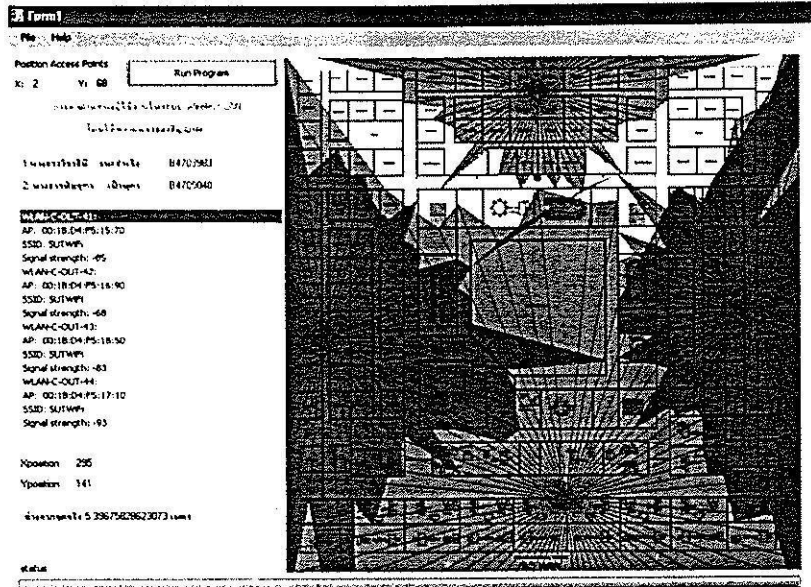


รูปที่ ก-13 จุดทดสอบที่ 3 ครั้งที่ 4

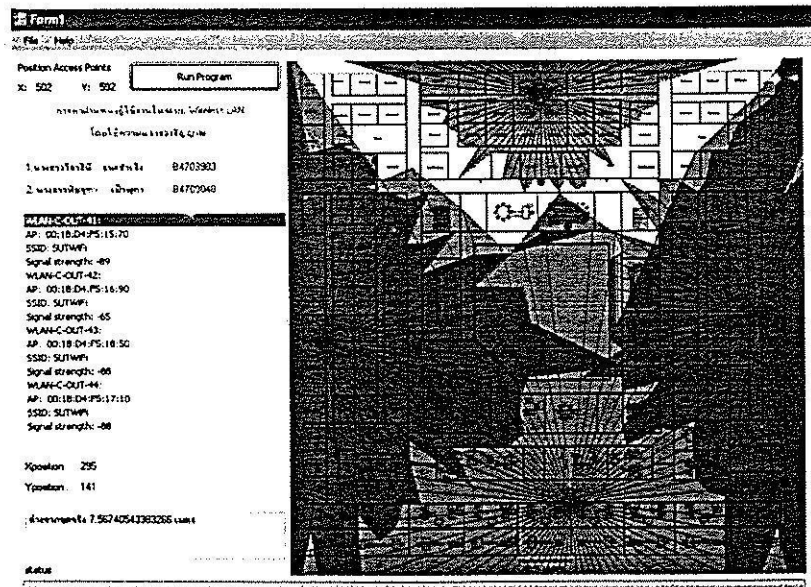
ตารางที่ ก-3 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่3

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
3 (รูปที่ ก-10)	00:1B:D4:F5:15:70	-82	2.97
	00:1B:D4:F5:16:90	-65	
	00:1B:D4:F5:18:50	-92	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	
3 (รูปที่ ก-11)	00:1B:D4:F5:15:70	-81	12.06
	00:1B:D4:F5:16:90	-62	
	00:1B:D4:F5:18:50	-85	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	
3 (รูปที่ ก-12)	00:1B:D4:F5:15:70	-85	11.75
	00:1B:D4:F5:16:90	-67	
	00:1B:D4:F5:18:50	-86	
	00:1B:D4:F5:17:10	-88	
3 (รูปที่ ก-13)	00:1B:D4:F5:15:70	-79	3.13
	00:1B:D4:F5:16:90	-64	
	00:1B:D4:F5:18:50	-92	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	

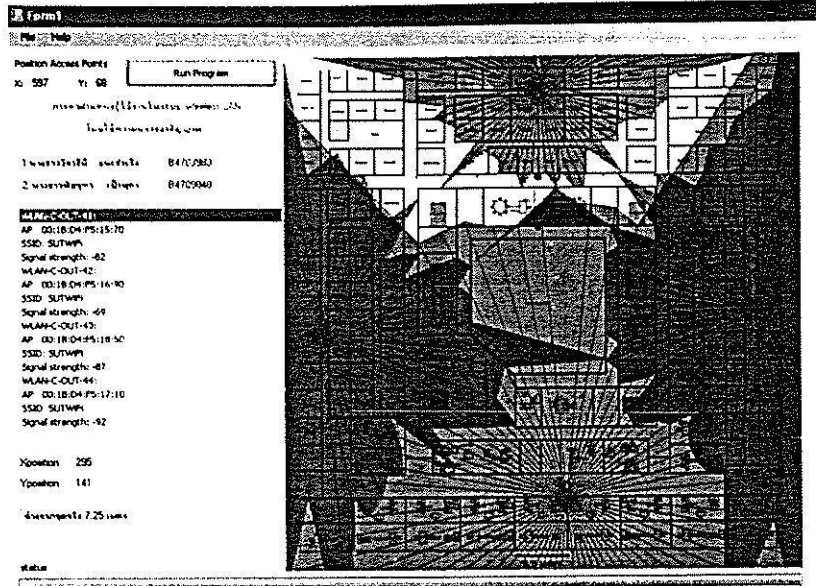
จุดทดสอบที่ 4



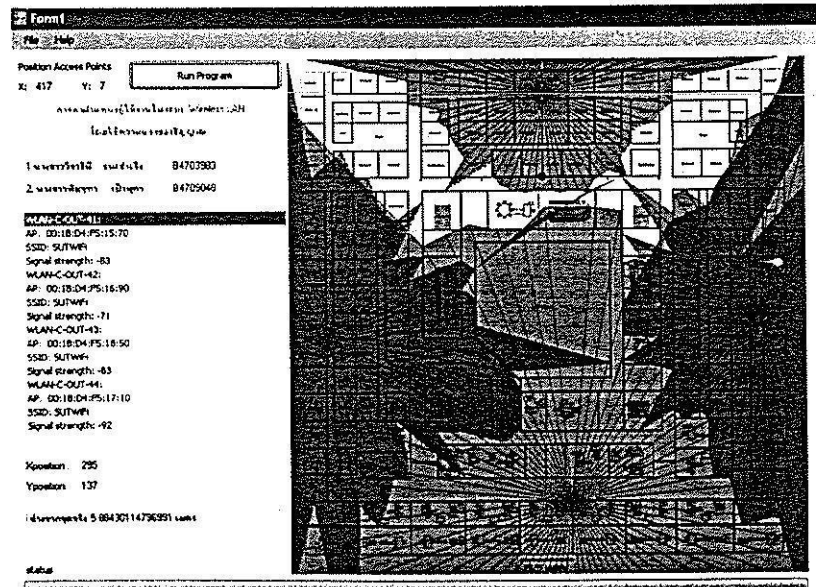
รูปที่ ก-14 จุดทดสอบที่ 4 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-15 จุดทดสอบที่ 4 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-16 จุดทดสอบที่ 4 ครั้งที่3

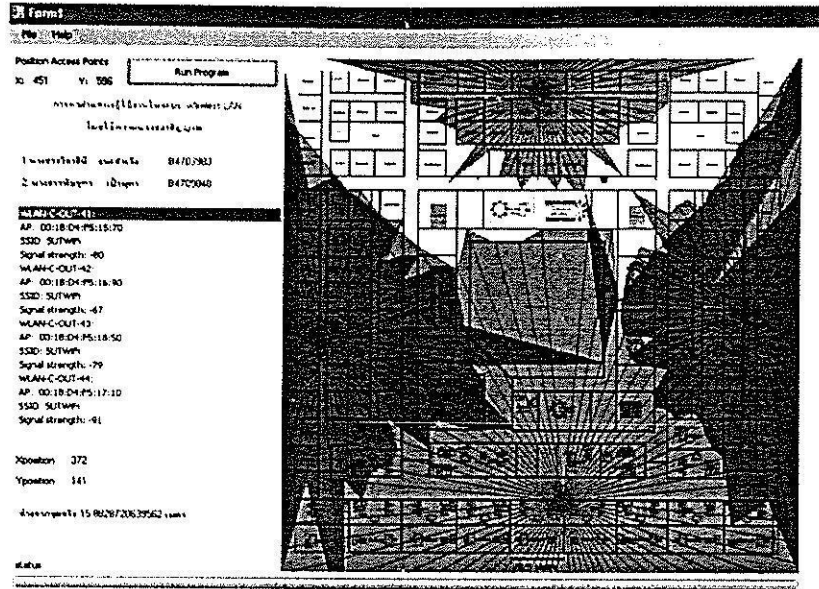


รูปที่ ก-17 จุดทดสอบที่ 4 ครั้งที่4

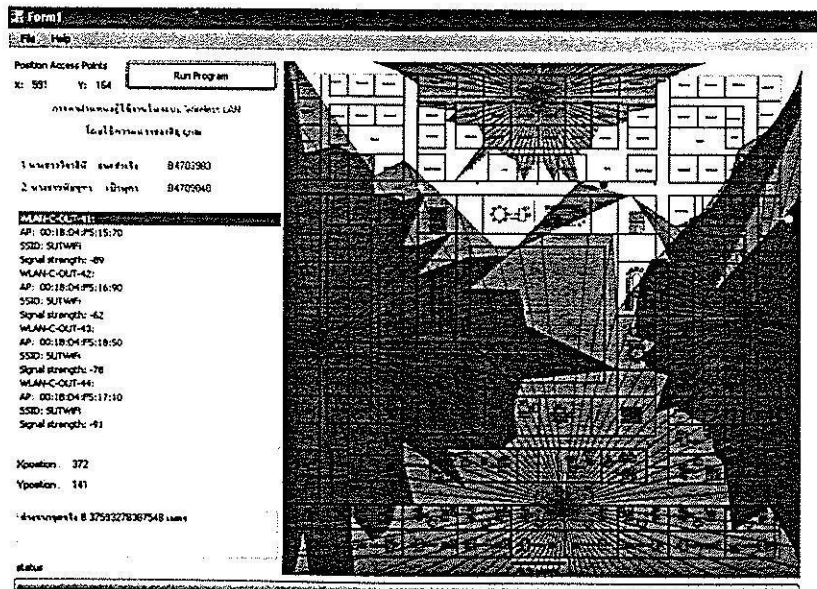
ตารางที่ ก-4 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่4

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
4 (รูปที่ ก-14)	00:1B:D4:F5:15:70	-85	5.40
	00:1B:D4:F5:16:90	-68	
	00:1B:D4:F5:18:50	-83	
	00:1B:D4:F5:17:10	-93	
4 (รูปที่ ก-15)	00:1B:D4:F5:15:70	-89	7.57
	00:1B:D4:F5:16:90	-65	
	00:1B:D4:F5:18:50	-88	
	00:1B:D4:F5:17:10	-88	
4 (รูปที่ ก-16)	00:1B:D4:F5:15:70	-82	7.25
	00:1B:D4:F5:16:90	-69	
	00:1B:D4:F5:18:50	-87	
	00:1B:D4:F5:17:10	-92	
4 (รูปที่ ก-17)	00:1B:D4:F5:15:70	-83	5.88
	00:1B:D4:F5:16:90	-71	
	00:1B:D4:F5:18:50	-83	
	00:1B:D4:F5:17:10	-92	

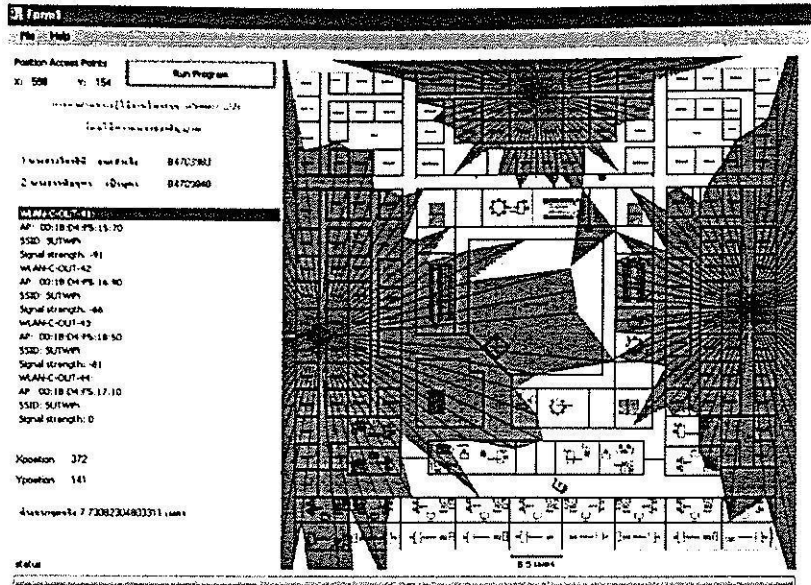
จุดทดสอบที่ 5



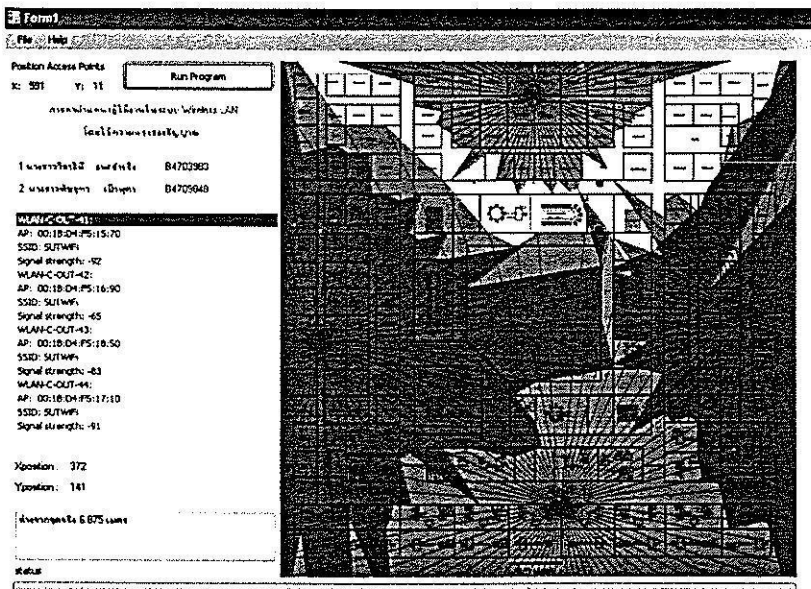
รูปที่ ก-18 จุดทดสอบที่ 5 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-19 จุดทดสอบที่ 5 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-20 จุดทดสอบที่ 5 ครั้งที่ 3

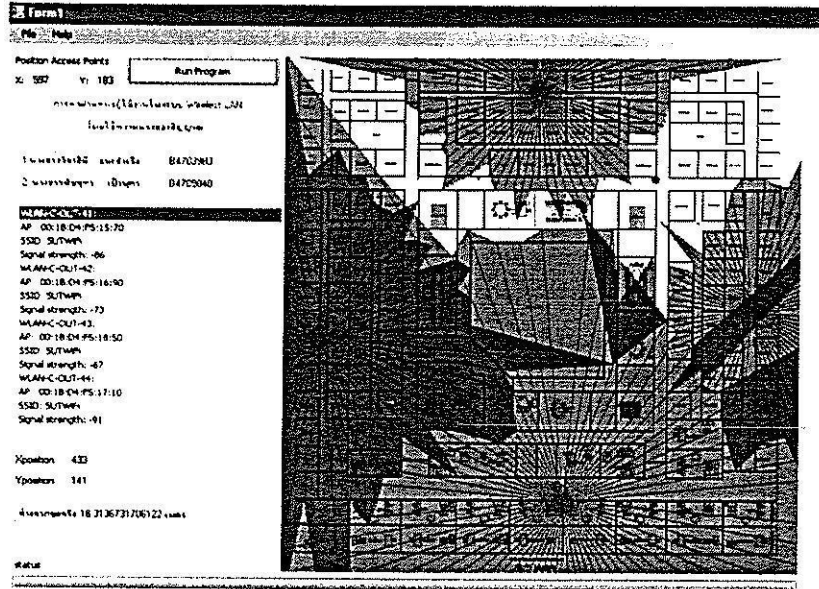


รูปที่ ก-21 จุดทดสอบที่ 5 ครั้งที่ 4

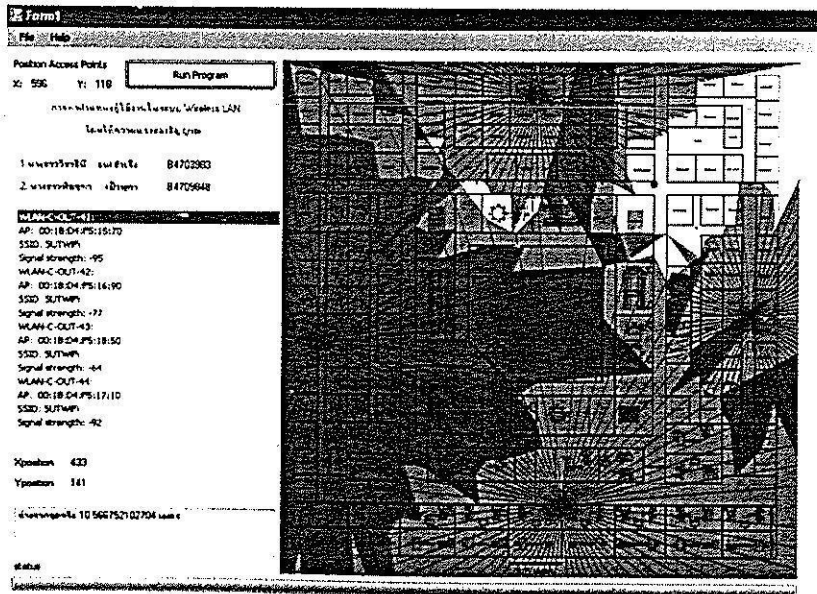
ตารางที่ ก-5 ตารางแสดงผลการทดสอบ โปรแกรมในจุดทดสอบที่ 5

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
5 (รูปที่ ก-18)	00:1B:D4:F5:15:70	-80	15.88
	00:1B:D4:F5:16:90	-67	
	00:1B:D4:F5:18:50	-79	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	
5 (รูปที่ ก-19)	00:1B:D4:F5:15:70	-89	8.38
	00:1B:D4:F5:16:90	-62	
	00:1B:D4:F5:18:50	-78	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	
5 (รูปที่ ก-20)	00:1B:D4:F5:15:70	-91	7.73
	00:1B:D4:F5:16:90	-66	
	00:1B:D4:F5:18:50	-81	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	
5 (รูปที่ ก-21)	00:1B:D4:F5:15:70	-92	6.88
	00:1B:D4:F5:16:90	-65	
	00:1B:D4:F5:18:50	-83	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	

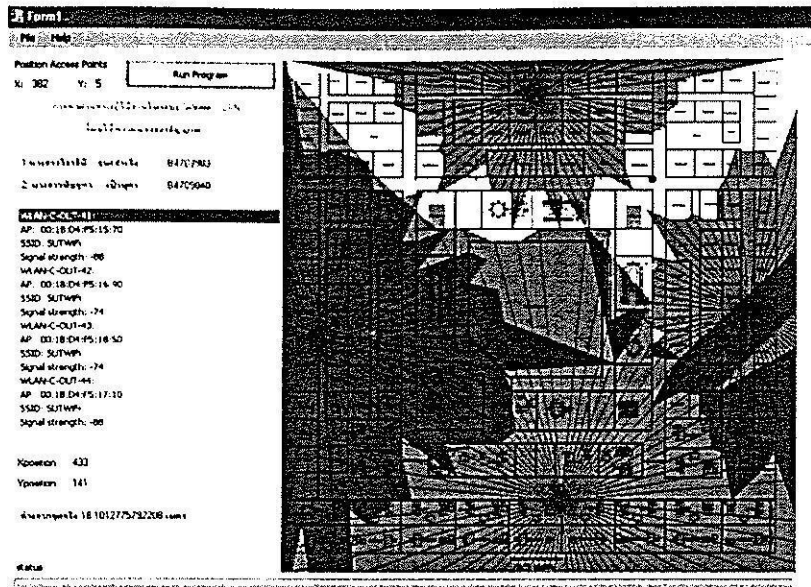
จุดทดสอบที่ 6



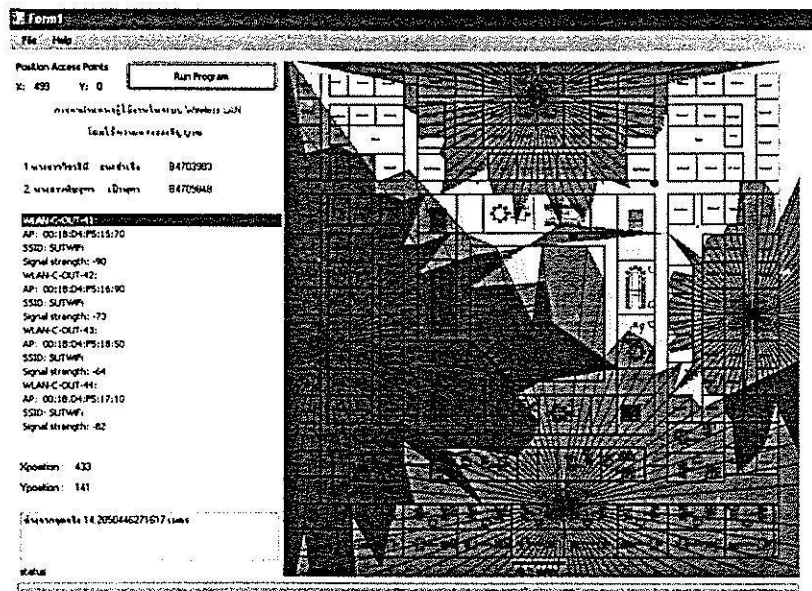
รูปที่ ก-22 จุดทดสอบที่ 6 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-23 จุดทดสอบที่ 6 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-24 จุดทดสอบที่ 6 ครั้งที่ 3

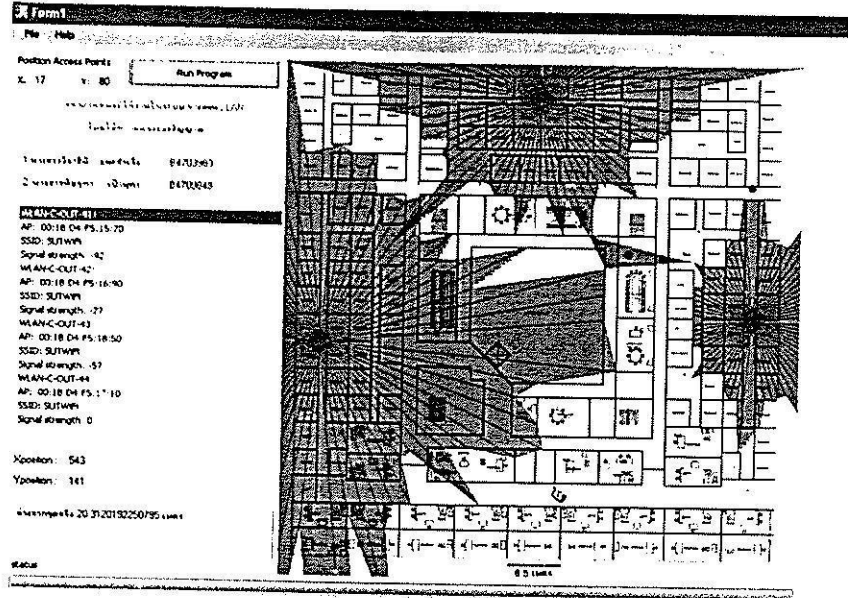


รูปที่ ก-25 จุดทดสอบที่ 6 ครั้งที่ 4

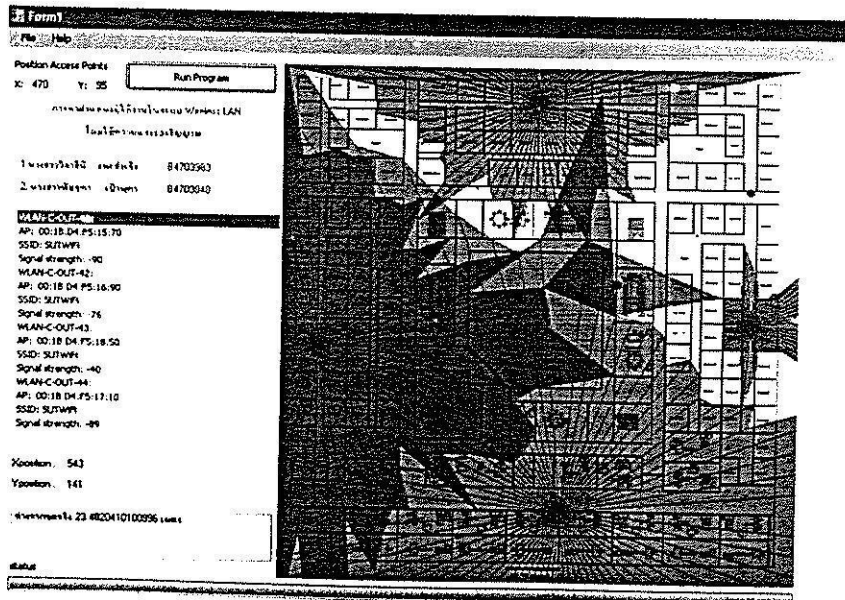
ตารางที่ ก-6 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่6

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
6 (รูปที่ ก-22)	00:1B:D4:F5:15:70	-86	18.31
	00:1B:D4:F5:16:90	-73	
	00:1B:D4:F5:18:50	-67	
	00:1B:D4:F5:17:10	-91	
6 (รูปที่ ก-23)	00:1B:D4:F5:15:70	-95	10.57
	00:1B:D4:F5:16:90	-77	
	00:1B:D4:F5:18:50	-64	
	00:1B:D4:F5:17:10	-92	
6 (รูปที่ ก-24)	00:1B:D4:F5:15:70	-88	18.1
	00:1B:D4:F5:16:90	-74	
	00:1B:D4:F5:18:50	-74	
	00:1B:D4:F5:17:10	-88	
6 (รูปที่ ก-25)	00:1B:D4:F5:15:70	-90	14.29
	00:1B:D4:F5:16:90	-73	
	00:1B:D4:F5:18:50	-64	
	00:1B:D4:F5:17:10	-82	

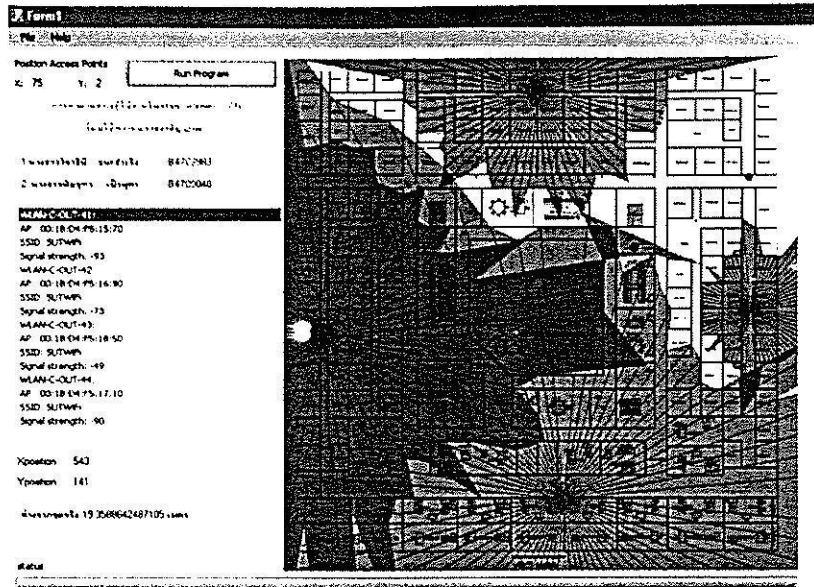
จุดทดสอบที่ 7



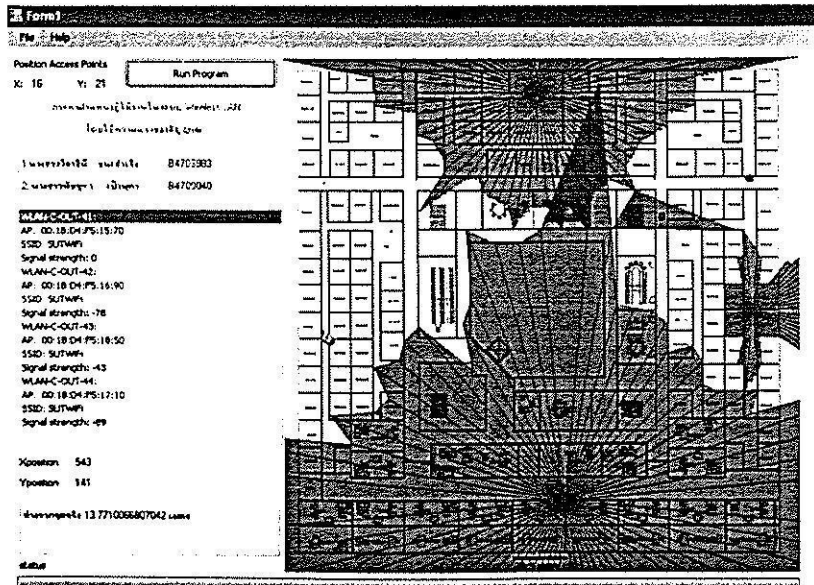
รูปที่ ก-26 จุดทดสอบที่ 7 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-27 จุดทดสอบที่ 7 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-28 จุดทดสอบที่ 7 ครั้งที่ 3

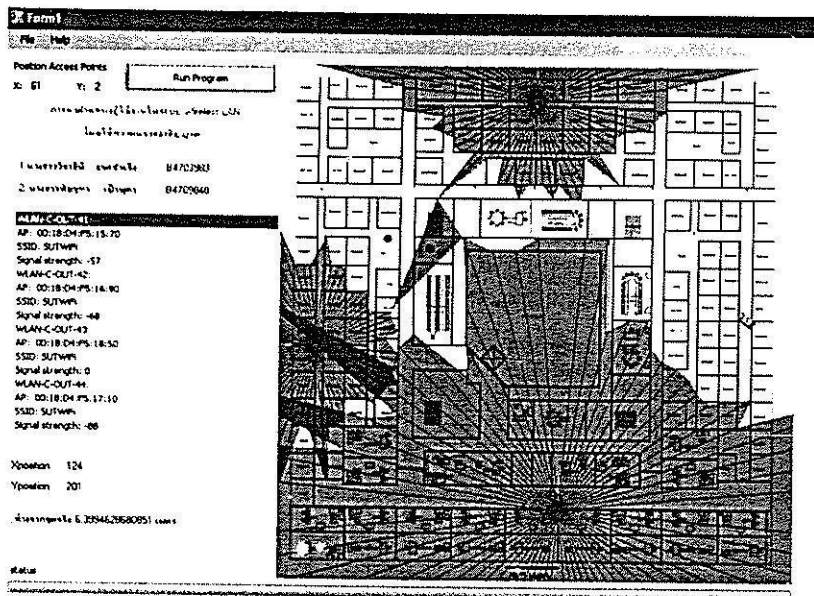


รูปที่ ก-29 จุดทดสอบที่ 7 ครั้งที่ 4

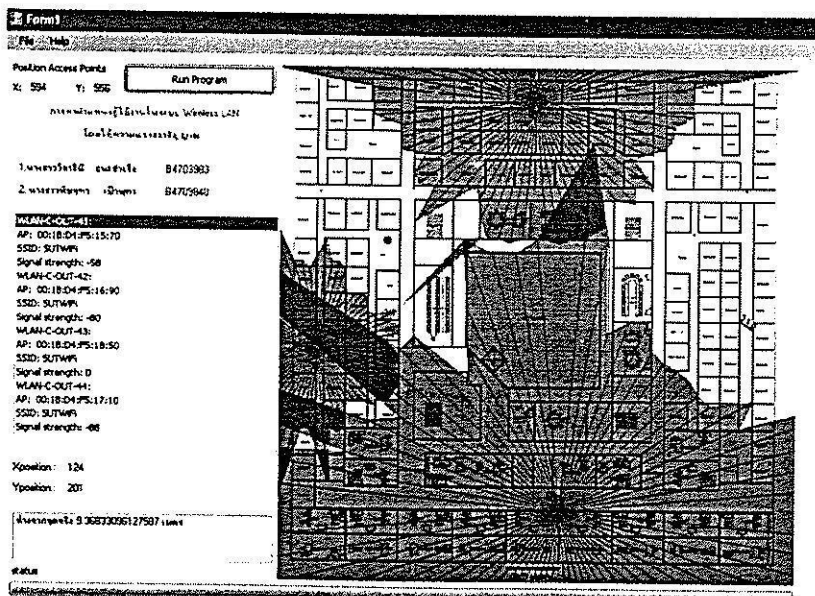
ตารางที่ ก-7 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่ 7

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
7 (รูปที่ ก-26)	00:1B:D4:F5:15:70	-92	20.31
	00:1B:D4:F5:16:90	-77	
	00:1B:D4:F5:18:50	-57	
	00:1B:D4:F5:17:10	0	
7 (รูปที่ ก-27)	00:1B:D4:F5:15:70	-90	23.48
	00:1B:D4:F5:16:90	-77	
	00:1B:D4:F5:18:50	-40	
	00:1B:D4:F5:17:10	-89	
7 (รูปที่ ก-28)	00:1B:D4:F5:15:70	-93	19.36
	00:1B:D4:F5:16:90	-73	
	00:1B:D4:F5:18:50	-49	
	00:1B:D4:F5:17:10	-90	
7 (รูปที่ ก-29)	00:1B:D4:F5:15:70	0	13.77
	00:1B:D4:F5:16:90	-78	
	00:1B:D4:F5:18:50	-43	
	00:1B:D4:F5:17:10	-89	

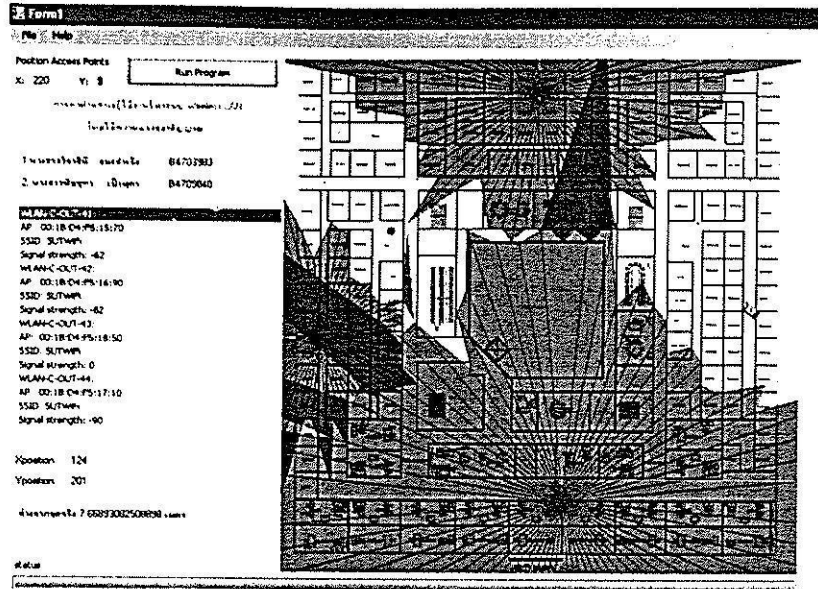
จุดทดสอบที่ 8



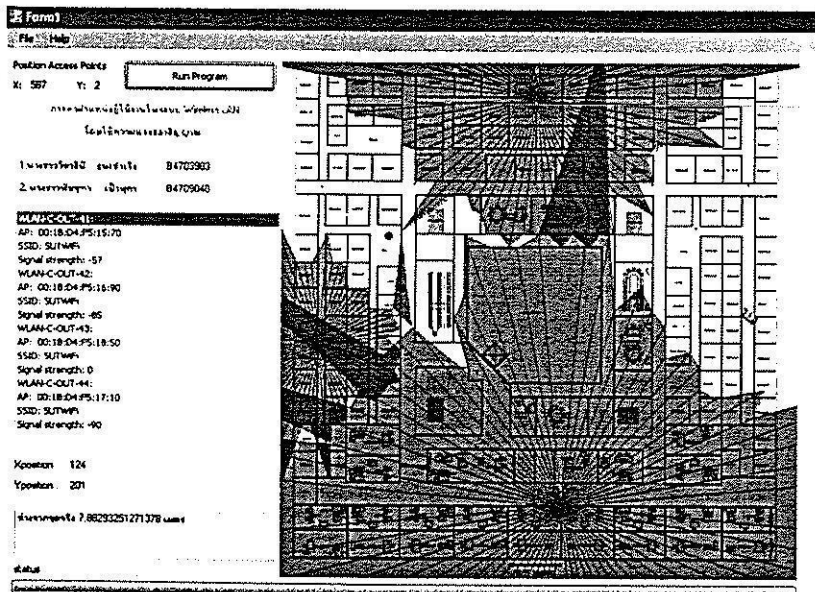
รูปที่ ก-30 จุดทดสอบที่ 8 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-31 จุดทดสอบที่ 8 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-32 จุดทดสอบที่ 8 ครั้งที่3

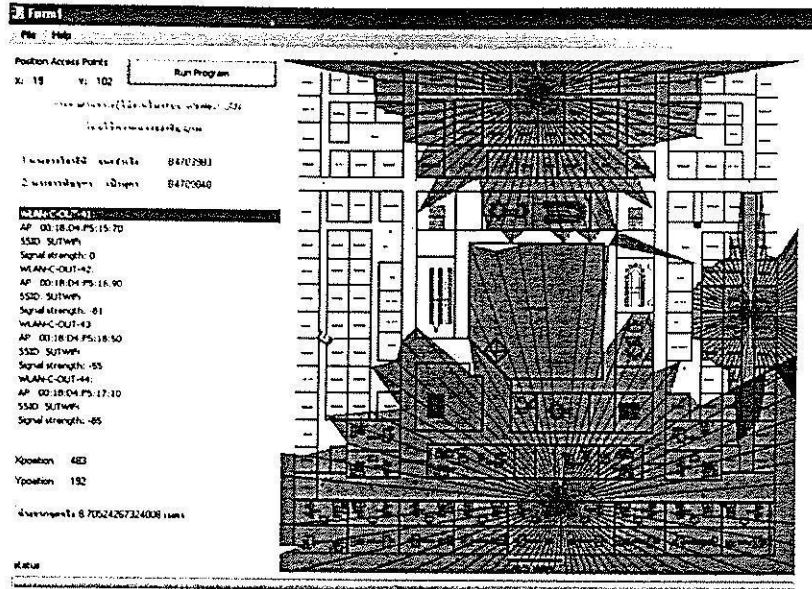


รูปที่ ก-33 จุดทดสอบที่ 8 ครั้งที่4

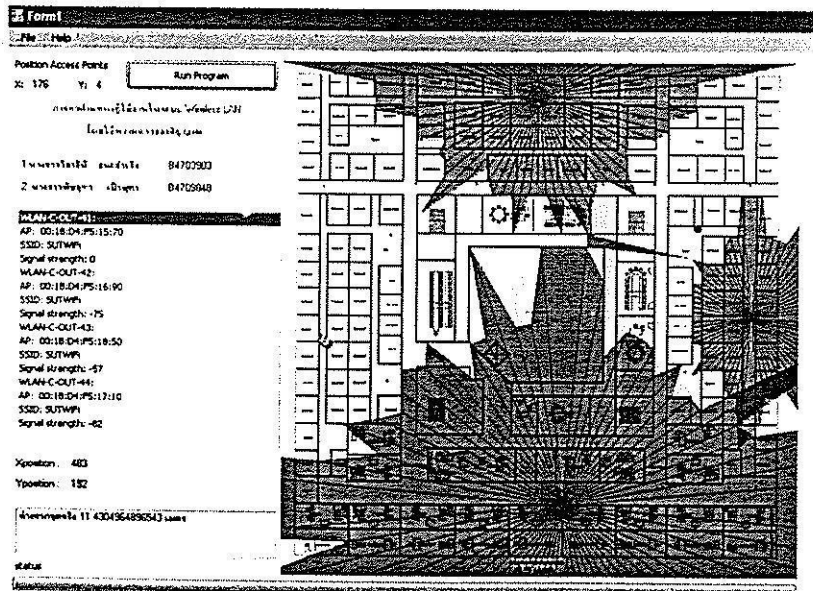
ตารางที่ ก-8 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่ 8

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
8 (รูปที่ ก-30)	00:1B:D4:F5:15:70	-57	6.40
	00:1B:D4:F5:16:90	-68	
	00:1B:D4:F5:18:50	0	
	00:1B:D4:F5:17:10	-88	
8 (รูปที่ ก-31)	00:1B:D4:F5:15:70	-58	9.37
	00:1B:D4:F5:16:90	-80	
	00:1B:D4:F5:18:50	0	
	00:1B:D4:F5:17:10	-88	
8 (รูปที่ ก-32)	00:1B:D4:F5:15:70	-62	7.67
	00:1B:D4:F5:16:90	-82	
	00:1B:D4:F5:18:50	0	
	00:1B:D4:F5:17:10	-90	
8 (รูปที่ ก-33)	00:1B:D4:F5:15:70	-57	7.88
	00:1B:D4:F5:16:90	-85	
	00:1B:D4:F5:18:50	0	
	00:1B:D4:F5:17:10	-90	

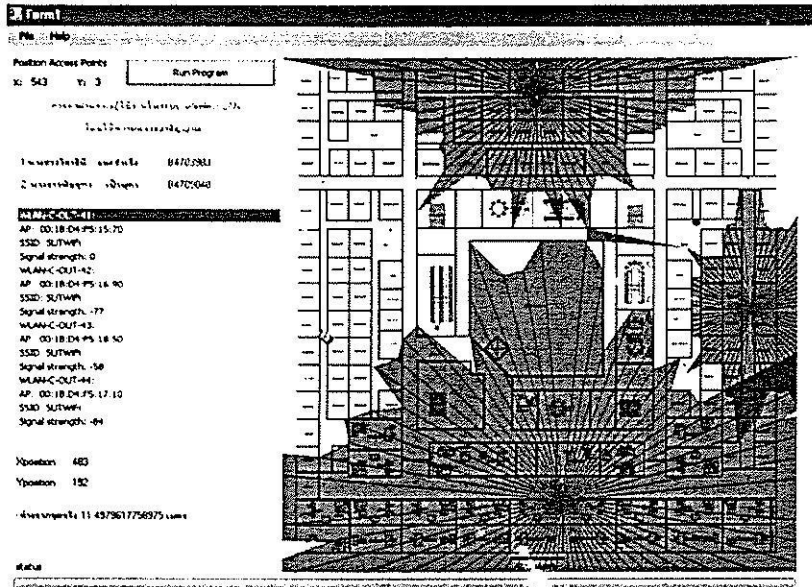
จุดทดสอบที่ 9



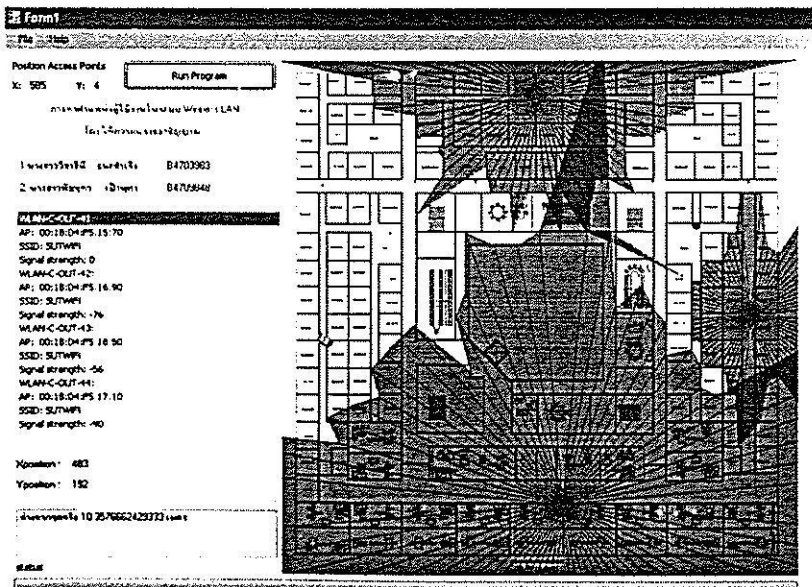
รูปที่ ก-34 จุดทดสอบที่ 9 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-35 จุดทดสอบที่ 9 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-36 จุดทดสอบที่ 9 ครั้งที่ 3

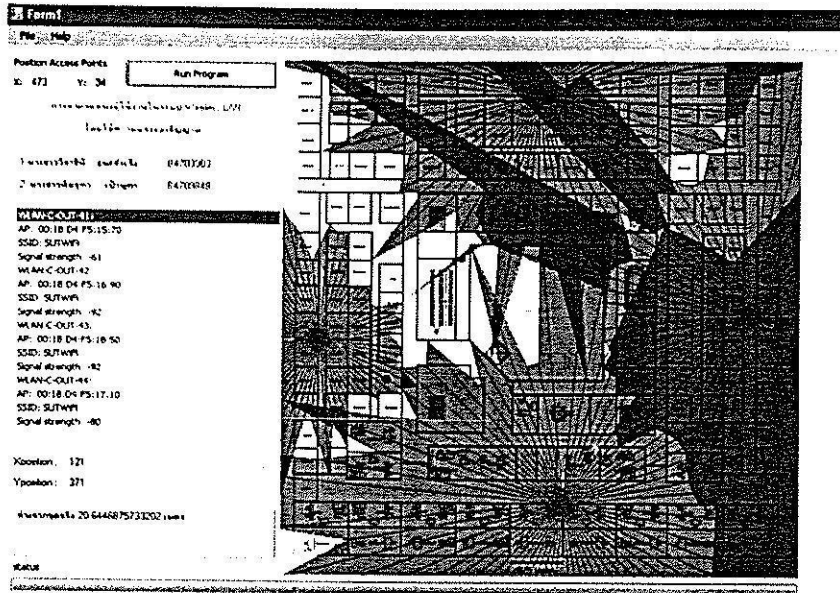


รูปที่ ก-37 จุดทดสอบที่ 9 ครั้งที่ 4

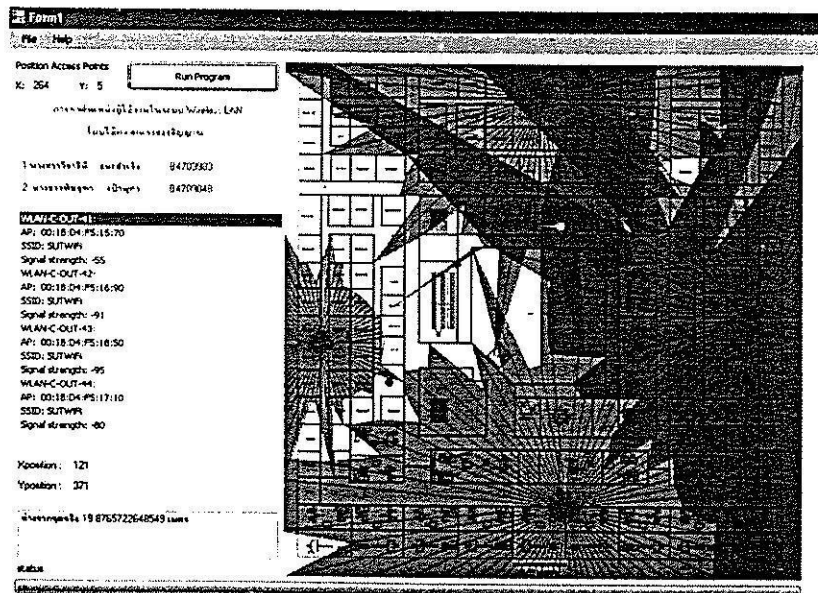
ตารางที่ ก-9 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่9

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
9 (รูปที่ ก-34)	00:1B:D4:F5:15:70	0	8.71
	00:1B:D4:F5:16:90	-81	
	00:1B:D4:F5:18:50	-55	
	00:1B:D4:F5:17:10	-85	
9 (รูปที่ ก-35)	00:1B:D4:F5:15:70	0	11.43
	00:1B:D4:F5:16:90	-75	
	00:1B:D4:F5:18:50	-57	
	00:1B:D4:F5:17:10	-82	
9 (รูปที่ ก-36)	00:1B:D4:F5:15:70	0	11.5
	00:1B:D4:F5:16:90	-77	
	00:1B:D4:F5:18:50	-58	
	00:1B:D4:F5:17:10	-84	
9 (รูปที่ ก-37)	00:1B:D4:F5:15:70	0	10.36
	00:1B:D4:F5:16:90	-76	
	00:1B:D4:F5:18:50	-56	
	00:1B:D4:F5:17:10	-90	

จุดทดสอบที่ 10



รูปที่ ก-38 จุดทดสอบที่ 10 ครั้งที่ 1

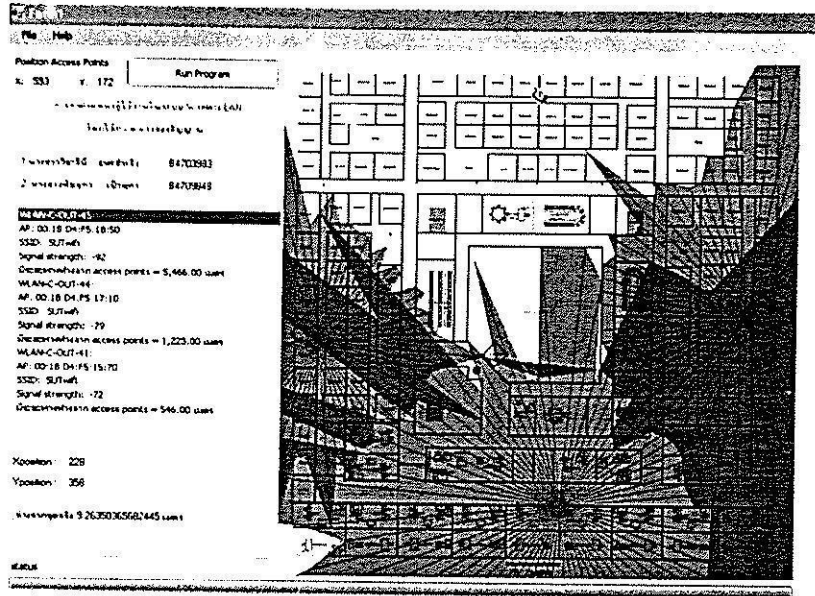


รูปที่ ก-39 จุดทดสอบที่ 10 ครั้งที่ 2

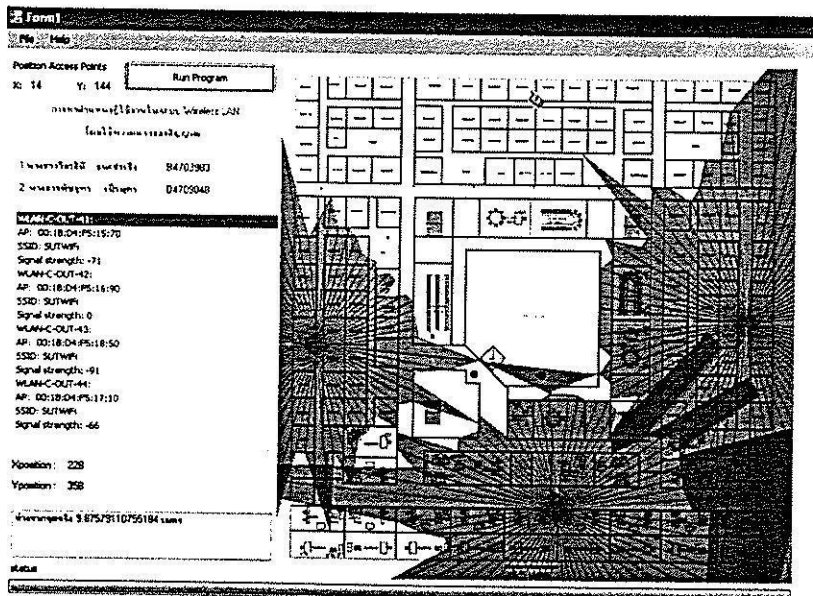
ตารางที่ ก-10 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่10

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
10 (รูปที่ ก-38)	00:1B:D4:F5:15:70	-61	20.64
	00:1B:D4:F5:16:90	-92	
	00:1B:D4:F5:18:50	-92	
	00:1B:D4:F5:17:10	-80	
10 (รูปที่ ก-39)	00:1B:D4:F5:15:70	-55	19.88
	00:1B:D4:F5:16:90	-91	
	00:1B:D4:F5:18:50	-95	
	00:1B:D4:F5:17:10	-80	
10 (รูปที่ ก-40)	00:1B:D4:F5:15:70	-60	19.29
	00:1B:D4:F5:16:90	-88	
	00:1B:D4:F5:18:50	0	
	00:1B:D4:F5:17:10	-82	
10 (รูปที่ ก-41)	00:1B:D4:F5:15:70	-58	20.58
	00:1B:D4:F5:16:90	-91	
	00:1B:D4:F5:18:50	-93	
	00:1B:D4:F5:17:10	-80	

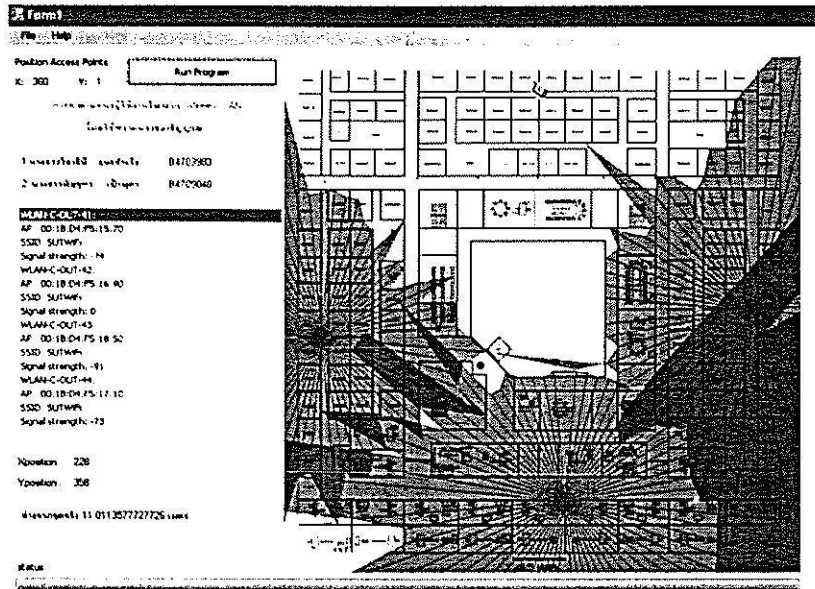
จุดทดสอบที่ 11



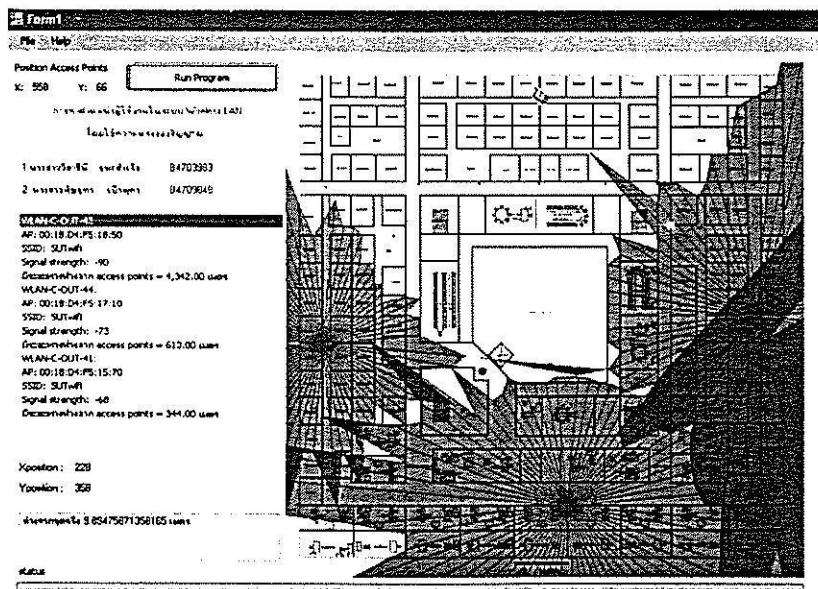
รูปที่ ก-42 จุดทดสอบที่ 11 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-43 จุดทดสอบที่ 11 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-44 จุดทดสอบที่ 11 ครั้งที่3

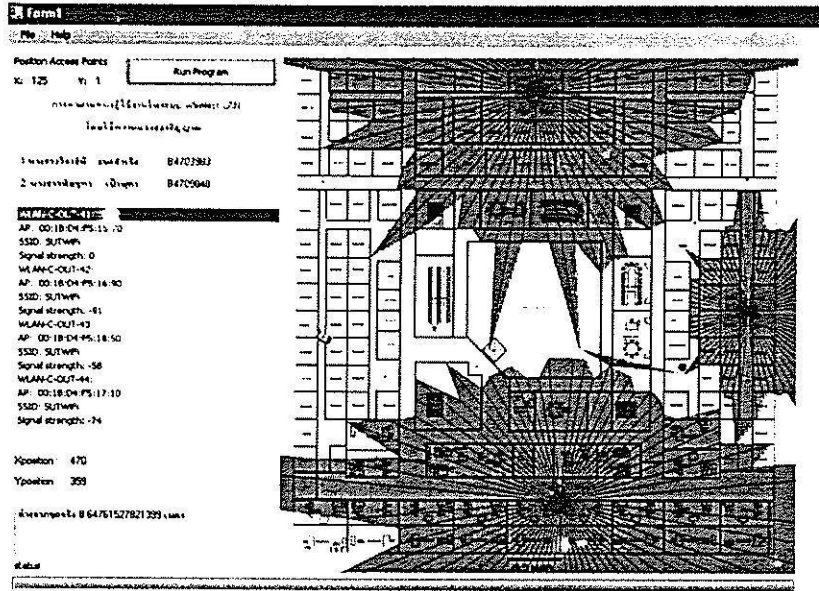


รูปที่ ก-45 จุดทดสอบที่ 11 ครั้งที่4

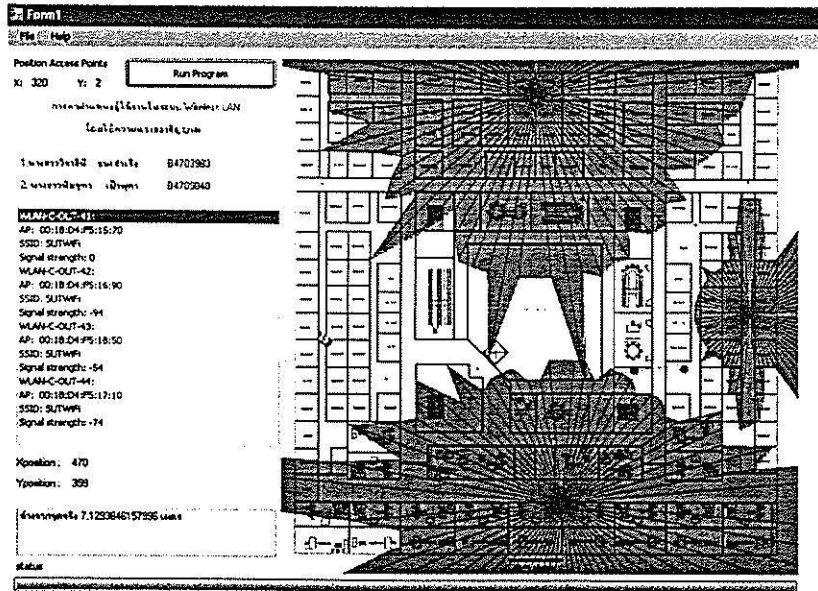
ตารางที่ ก-11 ตารางแสดงผลการทดสอบ โปรแกรมในจุดทดสอบที่ 11

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
11 (รูปที่ ก-42)	00:1B:D4:F5:15:70	-72	9.26
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-92	
	00:1B:D4:F5:17:10	-79	
11 (รูปที่ ก-43)	00:1B:D4:F5:15:70	-71	9.88
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-91	
	00:1B:D4:F5:17:10	-66	
11 (รูปที่ ก-44)	00:1B:D4:F5:15:70	-74	11.05
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-91	
	00:1B:D4:F5:17:10	-73	
11 (รูปที่ ก-45)	00:1B:D4:F5:15:70	-68	9.89
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-90	
	00:1B:D4:F5:17:10	-73	

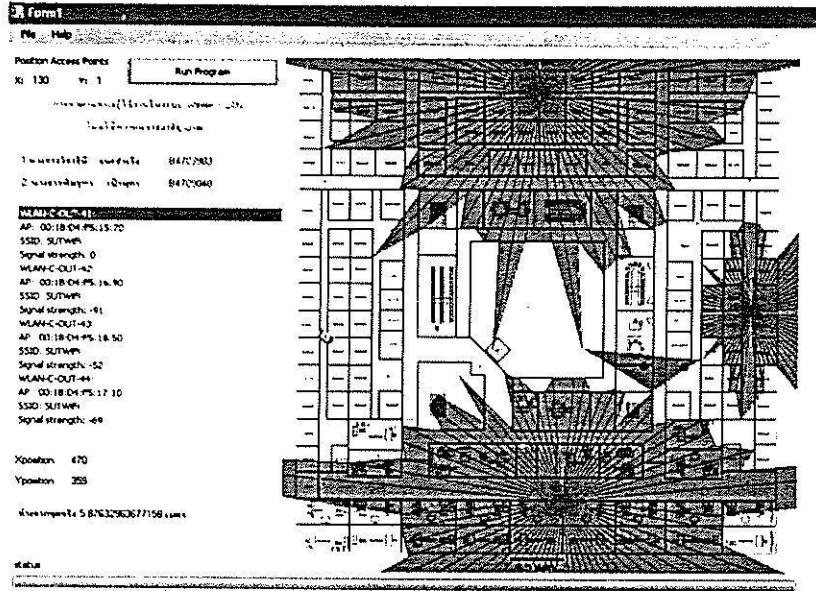
จุดทดสอบที่ 12



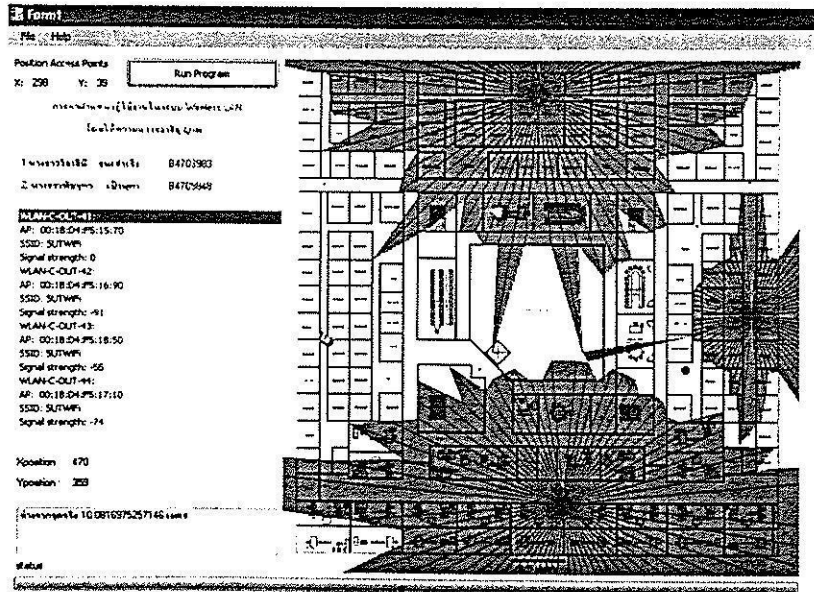
รูปที่ ก-46 จุดทดสอบที่ 17 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-47 จุดทดสอบที่ 12 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-48 จุดทดสอบที่ 12 ครั้งที่3

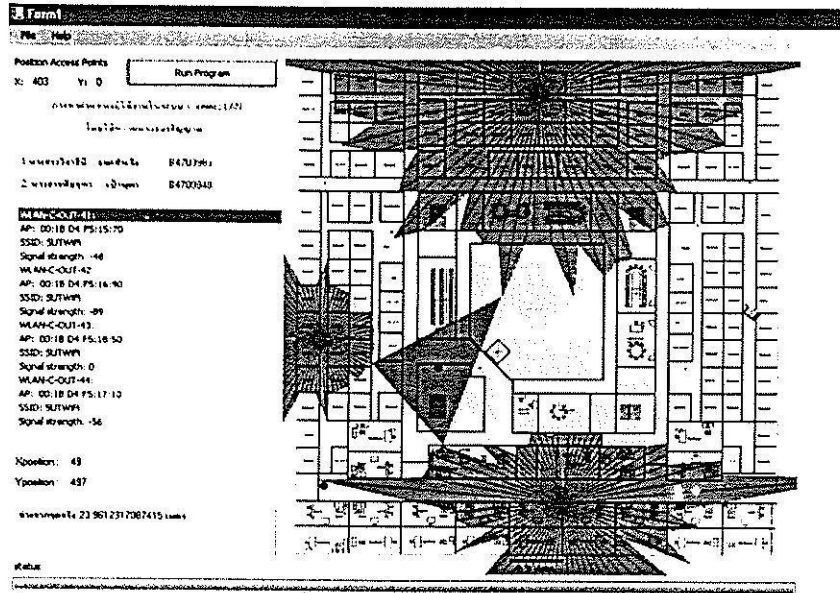


รูปที่ ก-49 จุดทดสอบที่ 12 ครั้งที่4

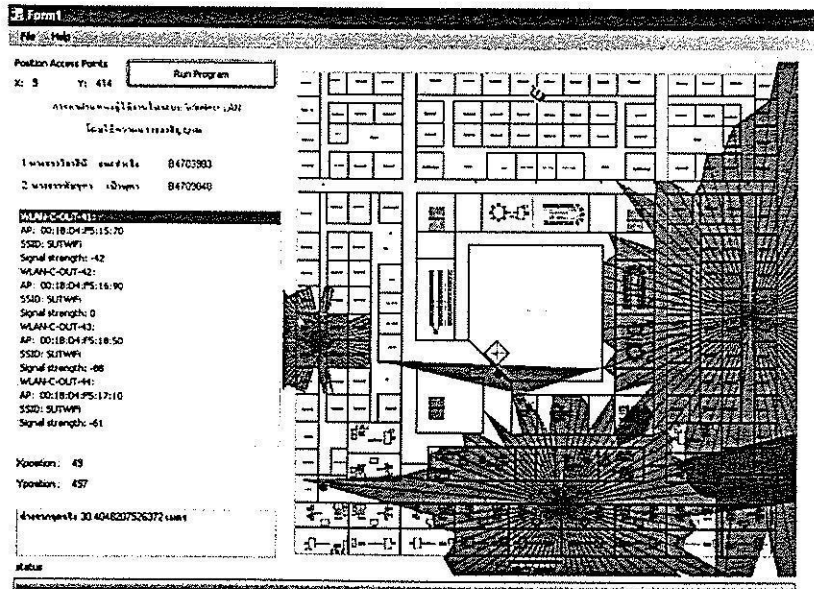
ตารางที่ ก-12 ตารางแสดงผลการทดสอบ โปรแกรมในจุดทดสอบที่ 12

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
12 (รูปที่ ก-46)	00:1B:D4:F5:15:70	0	8.65
	00:1B:D4:F5:16:90	-91	
	00:1B:D4:F5:18:50	-58	
	00:1B:D4:F5:17:10	-74	
12 (รูปที่ ก-47)	00:1B:D4:F5:15:70	0	7.13
	00:1B:D4:F5:16:90	-94	
	00:1B:D4:F5:18:50	-54	
	00:1B:D4:F5:17:10	-74	
12 (รูปที่ ก-48)	00:1B:D4:F5:15:70	0	5.88
	00:1B:D4:F5:16:90	-91	
	00:1B:D4:F5:18:50	-52	
	00:1B:D4:F5:17:10	-69	
12 (รูปที่ ก-49)	00:1B:D4:F5:15:70	0	10.08
	00:1B:D4:F5:16:90	-91	
	00:1B:D4:F5:18:50	-55	
	00:1B:D4:F5:17:10	-74	

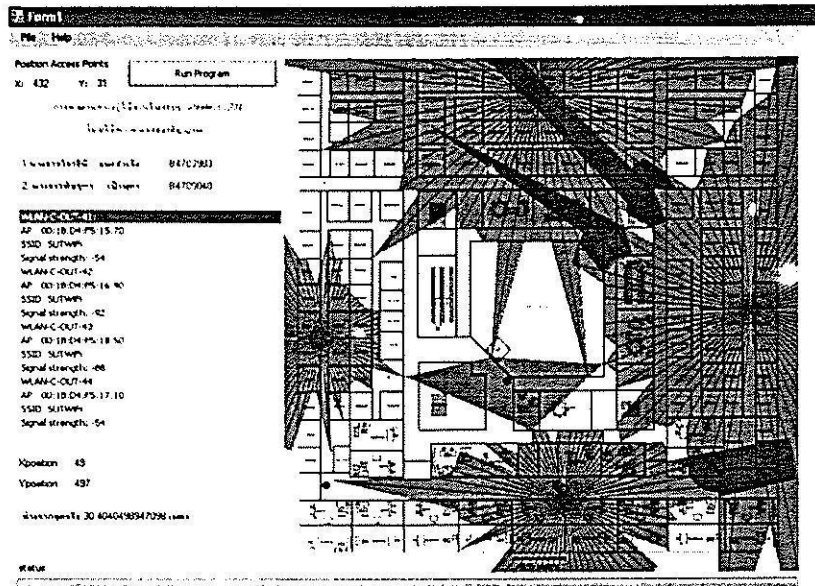
จุดทดสอบที่ 13



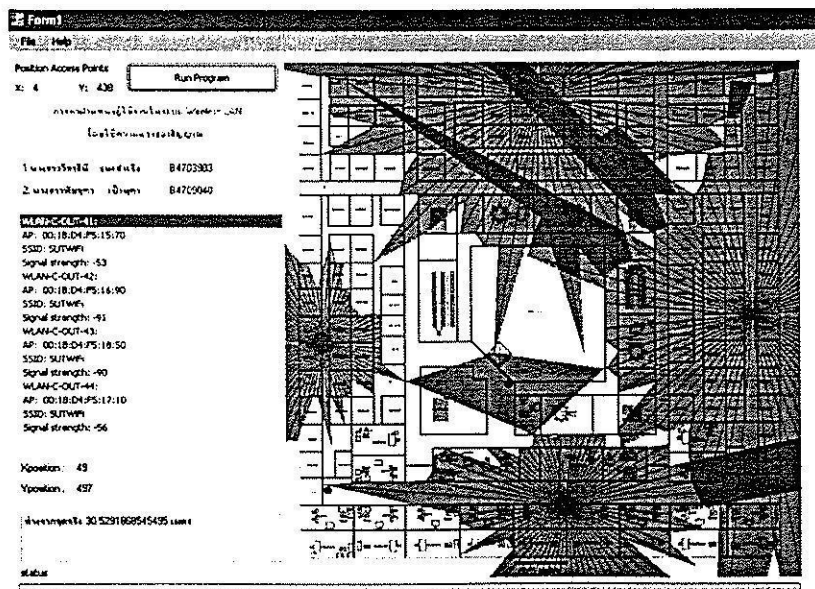
รูปที่ ก-50 จุดทดสอบที่ 13 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-51 จุดทดสอบที่ 13 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-52 จุดทดสอบที่ 13 ครั้งที่3

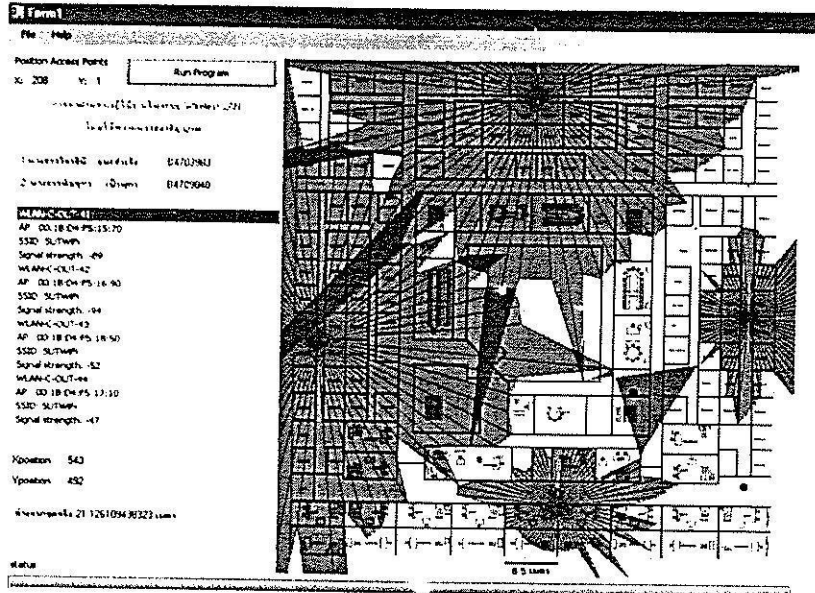


รูปที่ ก-53 จุดทดสอบที่ 13 ครั้งที่4

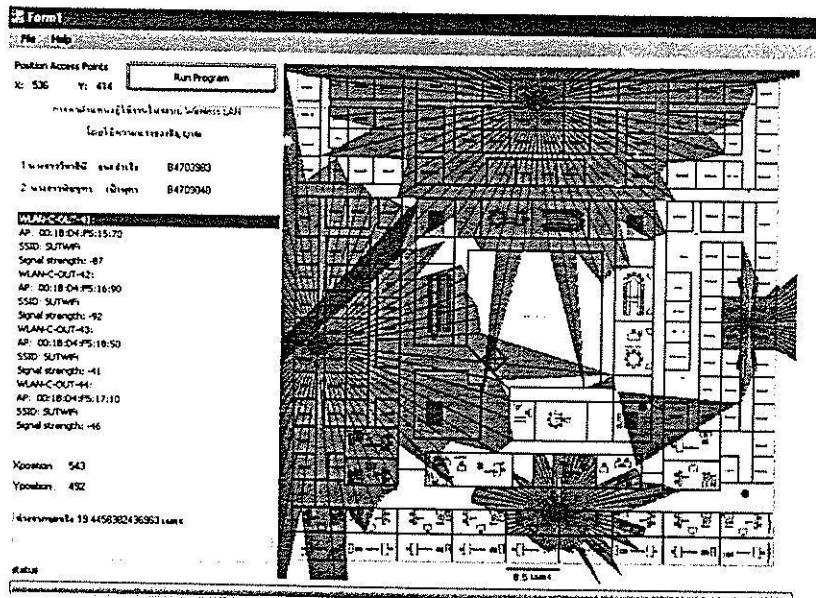
ตารางที่ ก-13 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่ 13

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
13 (รูปที่ ก-50)	00:1B:D4:F5:15:70	-48	23.96
	00:1B:D4:F5:16:90	-89	
	00:1B:D4:F5:18:50	0	
	00:1B:D4:F5:17:10	-56	
13 (รูปที่ ก-51)	00:1B:D4:F5:15:70	-42	30.40
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-88	
	00:1B:D4:F5:17:10	-61	
13 (รูปที่ ก-52)	00:1B:D4:F5:15:70	-54	30.40
	00:1B:D4:F5:16:90	-92	
	00:1B:D4:F5:18:50	-88	
	00:1B:D4:F5:17:10	-54	
13 (รูปที่ ก-53)	00:1B:D4:F5:15:70	-53	30.53
	00:1B:D4:F5:16:90	-91	
	00:1B:D4:F5:18:50	-90	
	00:1B:D4:F5:17:10	-56	

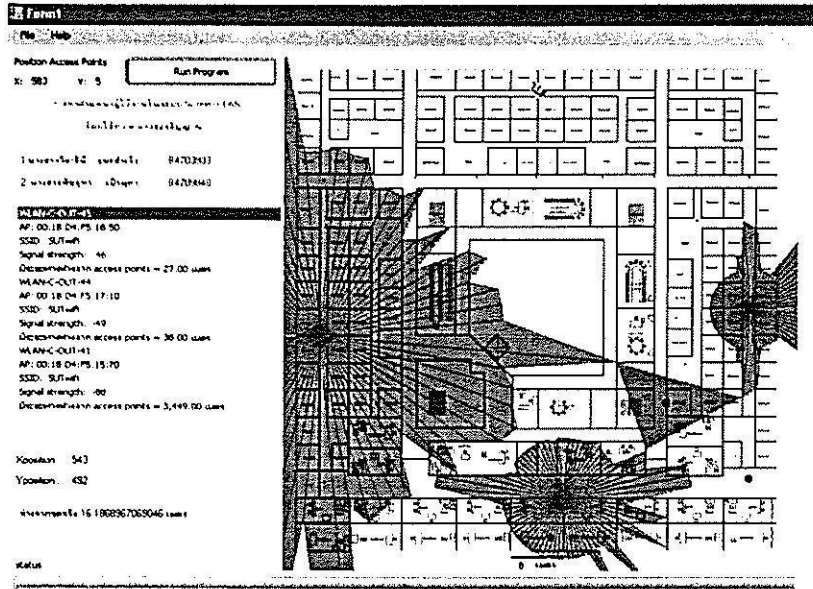
จุดทดสอบที่ 14



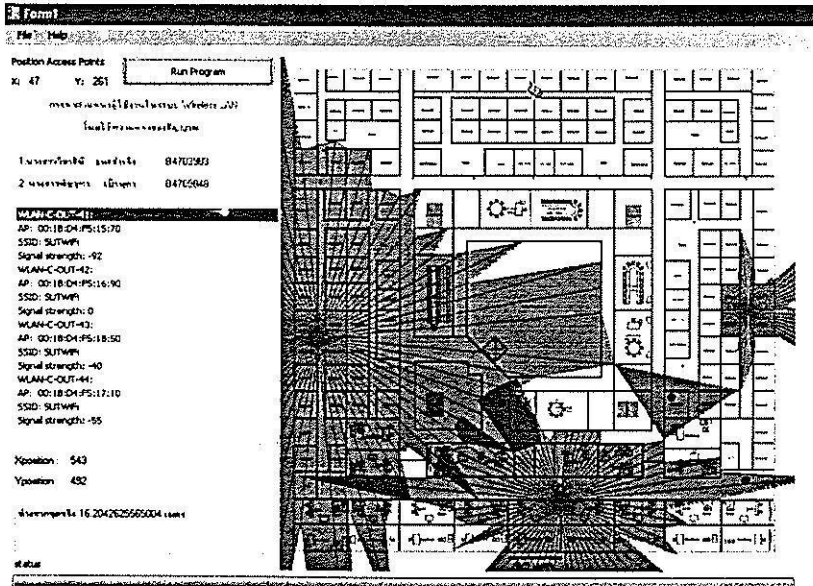
รูปที่ ก-54 จุดทดสอบที่ 14 ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-55 จุดทดสอบที่ 14 ครั้งที่ 2



รูปที่ ก-56 จุดทดสอบที่ 14 ครั้งที่ 3



รูปที่ ก-57 จุดทดสอบที่ 14 ครั้งที่ 4

ตารางที่ ก-14 ตารางแสดงผลการทดสอบโปรแกรมในจุดทดสอบที่14

จุดทดสอบที่	Mac Address	ค่า SignalStrength (dB)	ระยะทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (เมตร)
14 (รูปที่ ก-54)	00:1B:D4:F5:15:70	-89	21.13
	00:1B:D4:F5:16:90	-94	
	00:1B:D4:F5:18:50	-52	
	00:1B:D4:F5:17:10	-47	
14 (รูปที่ ก-55)	00:1B:D4:F5:15:70	-87	19.45
	00:1B:D4:F5:16:90	-92	
	00:1B:D4:F5:18:50	-41	
	00:1B:D4:F5:17:10	-46	
14 (รูปที่ ก-56)	00:1B:D4:F5:15:70	-88	16.19
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-46	
	00:1B:D4:F5:17:10	-49	
14 (รูปที่ ก-57)	00:1B:D4:F5:15:70	-92	16.20
	00:1B:D4:F5:16:90	0	
	00:1B:D4:F5:18:50	-40	
	00:1B:D4:F5:17:10	-55	

Maximum = 25.19 เมตร

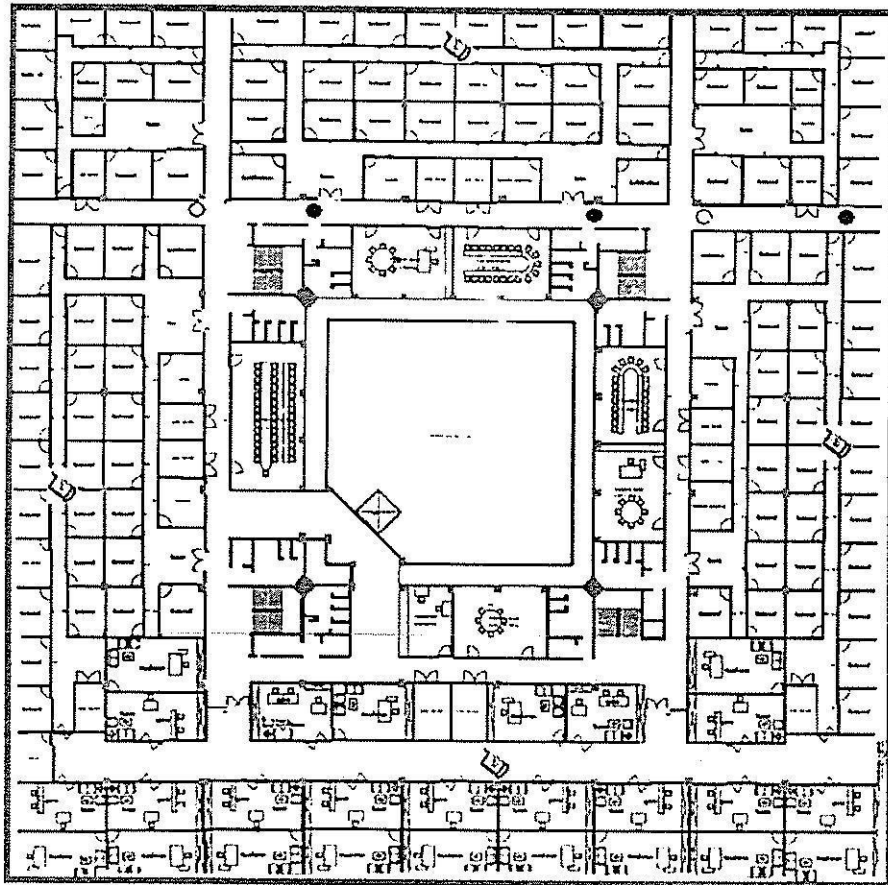
Minimum = 2.97 เมตร

Mean = 12.36 เมตร

ภาคผนวก ข

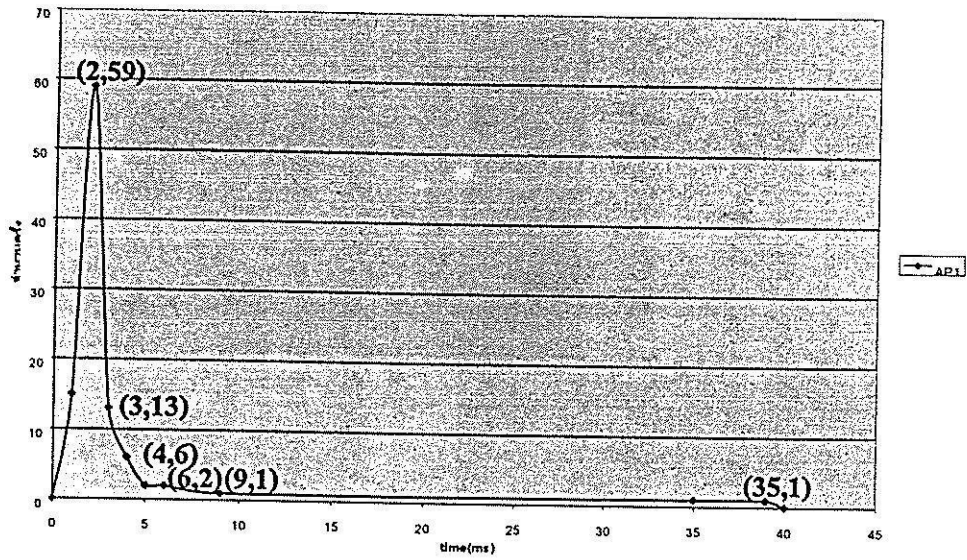
ผลการวัดค่าหน่วยเวลาในการรับส่งสัญญาณ

สำหรับการวัดค่าหน่วยเวลาในโครงการวิจัยนี้ใช้จุดทดสอบ 5 จุดแสดงในรูปด้านล่างนี้

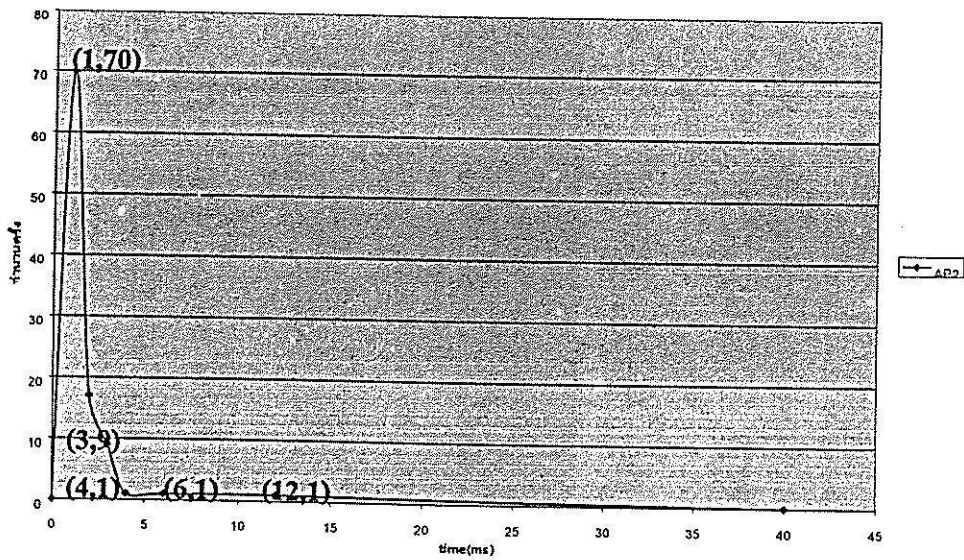


- จุดที่ 1
- จุดที่ 2
- จุดที่ 3
- ⊗ จุดที่ 4
- จุดที่ 5

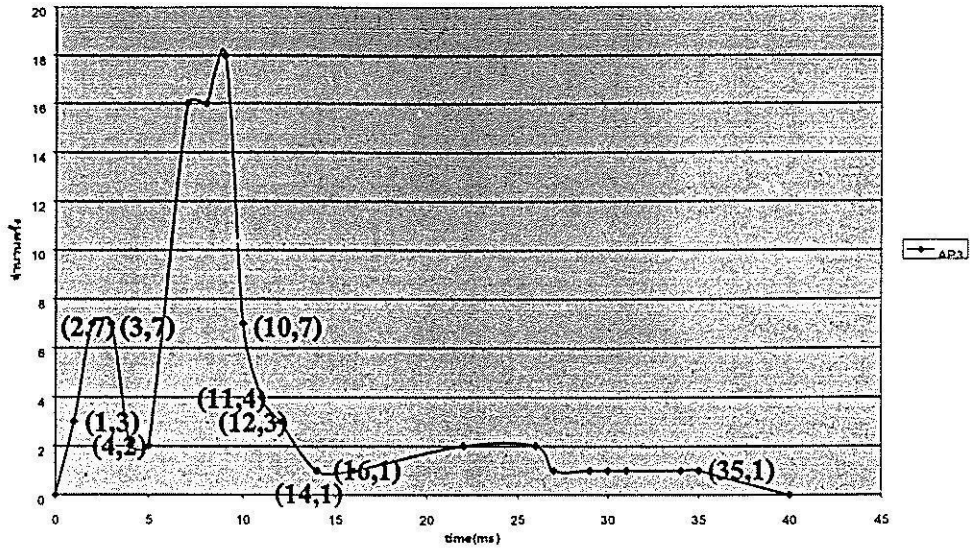
ผลการทดสอบ ณ จุดทดสอบที่ 1



AP1

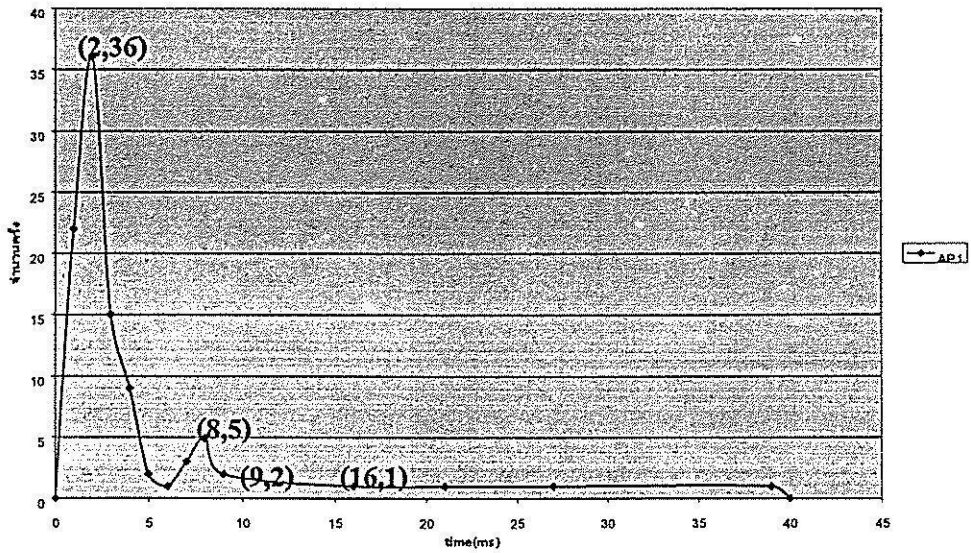


AP2

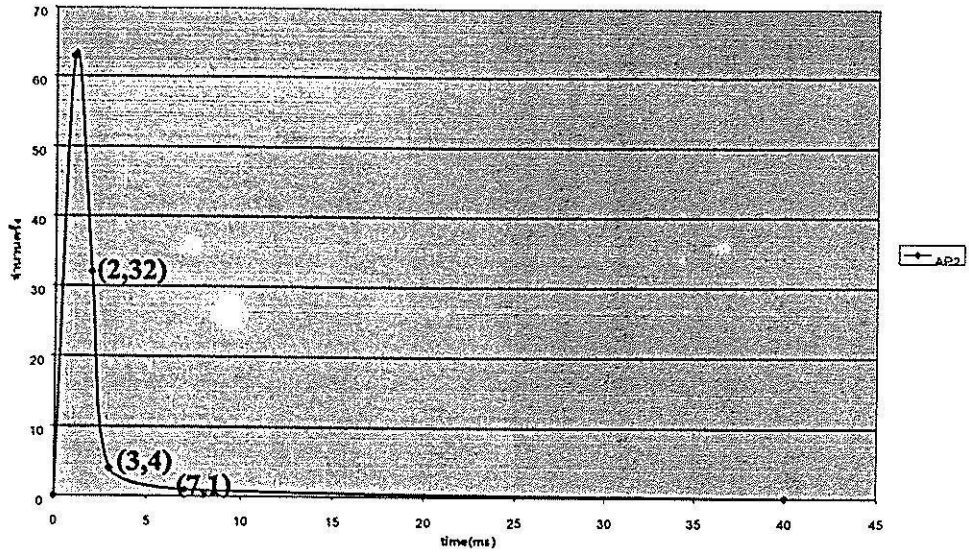


AP3

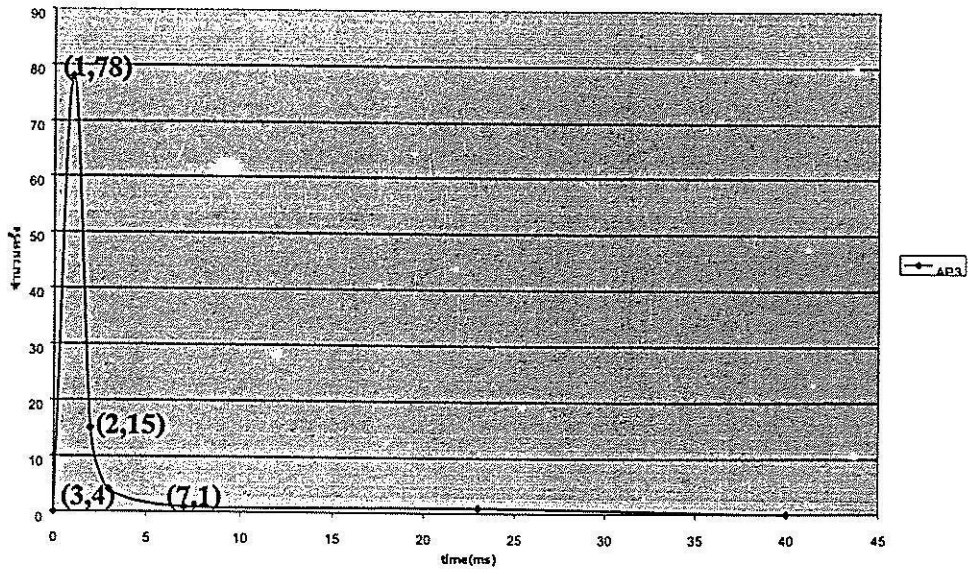
ผลการทดสอบ ณ จุดทดสอบที่ 2



AP1

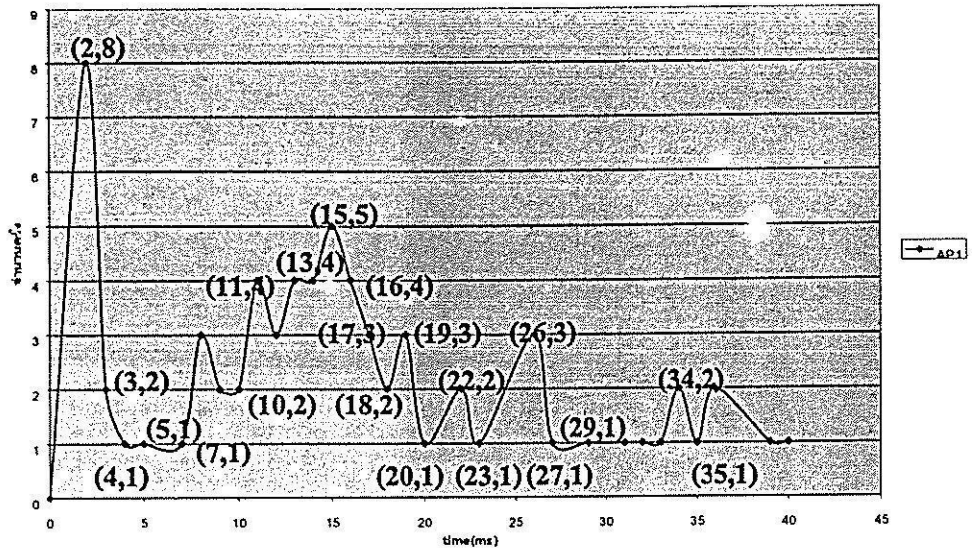


AP2

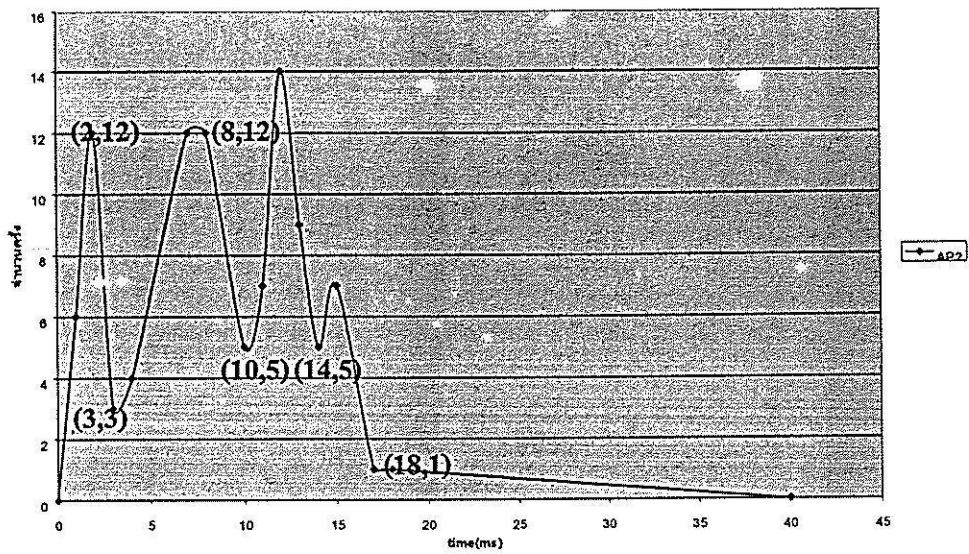


AP3

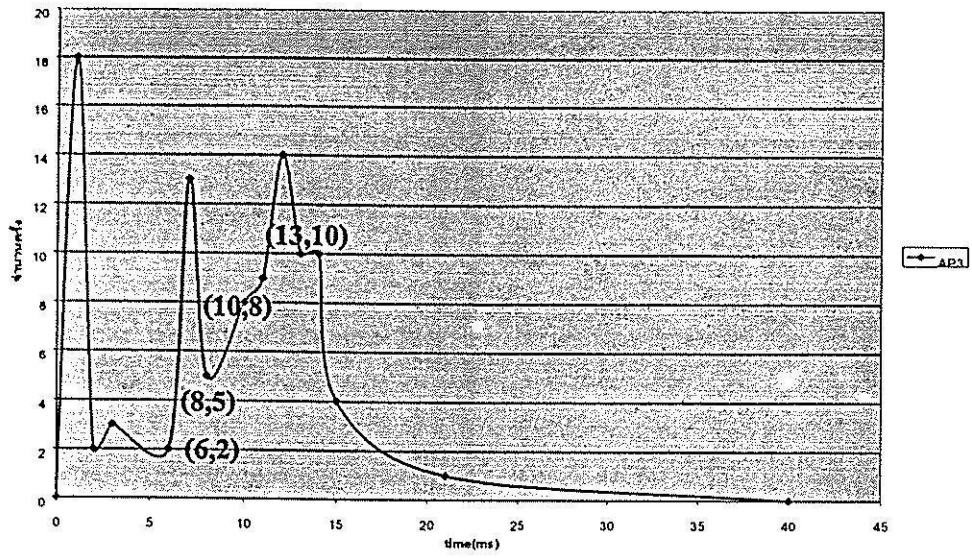
ผลการทดสอบ ณ จุดทดสอบที่ 3



AP1

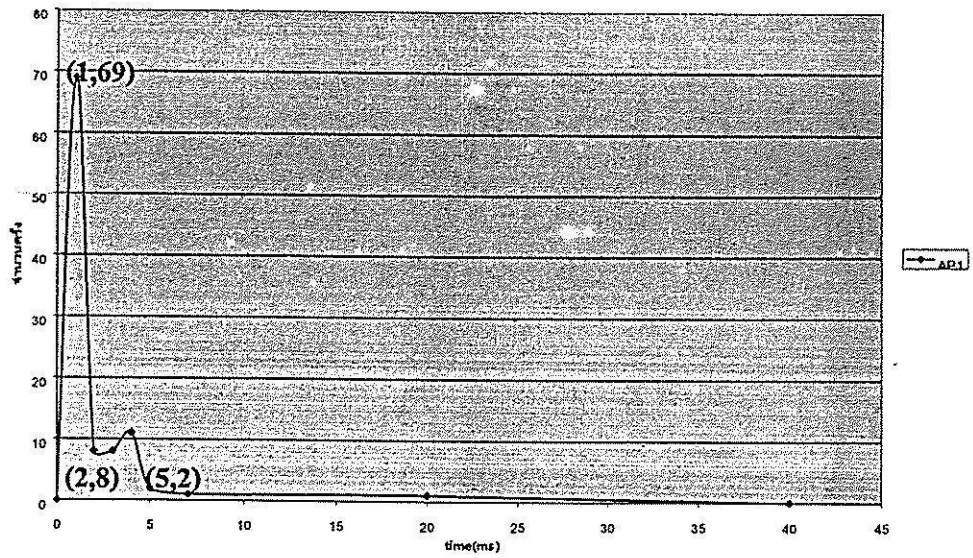


AP2

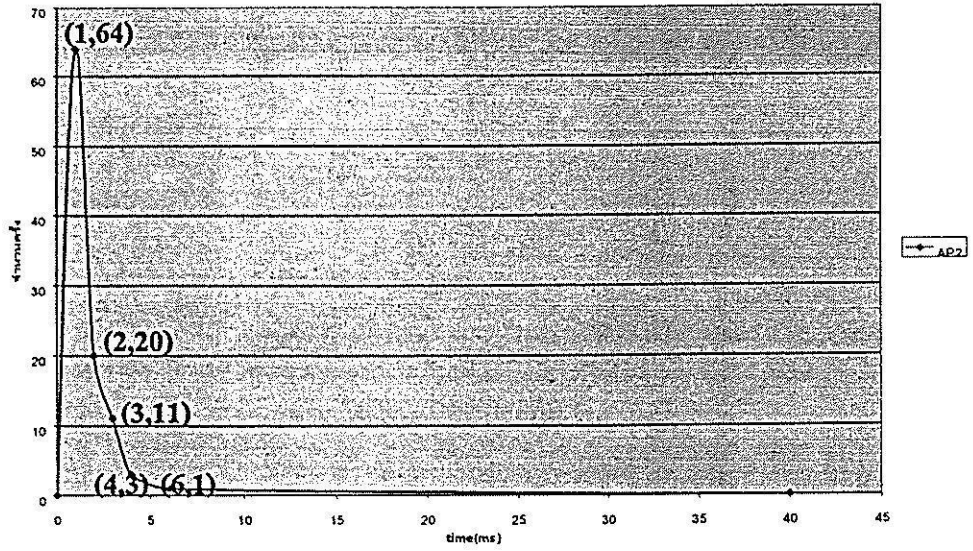


AP3

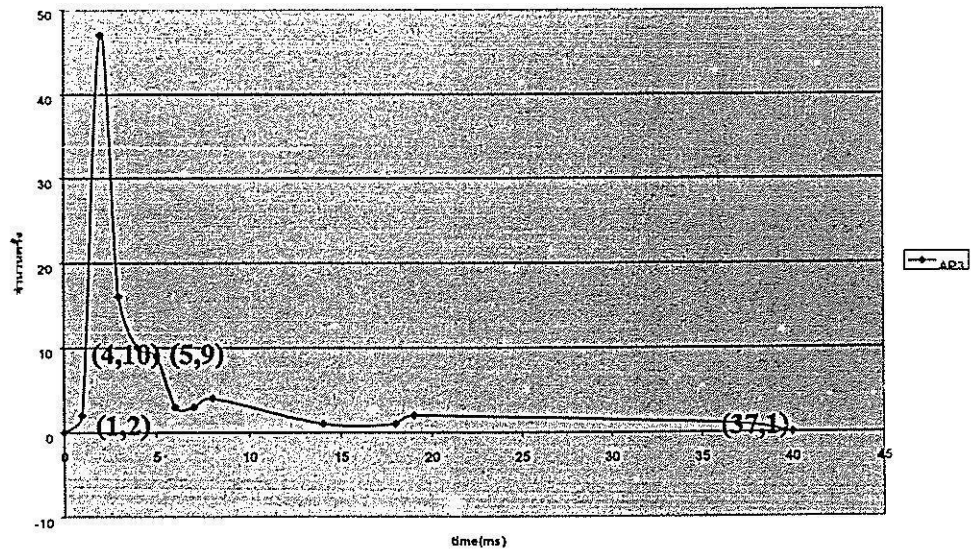
ผลการทดสอบ ณ จุดทดสอบที่ 4



AP1

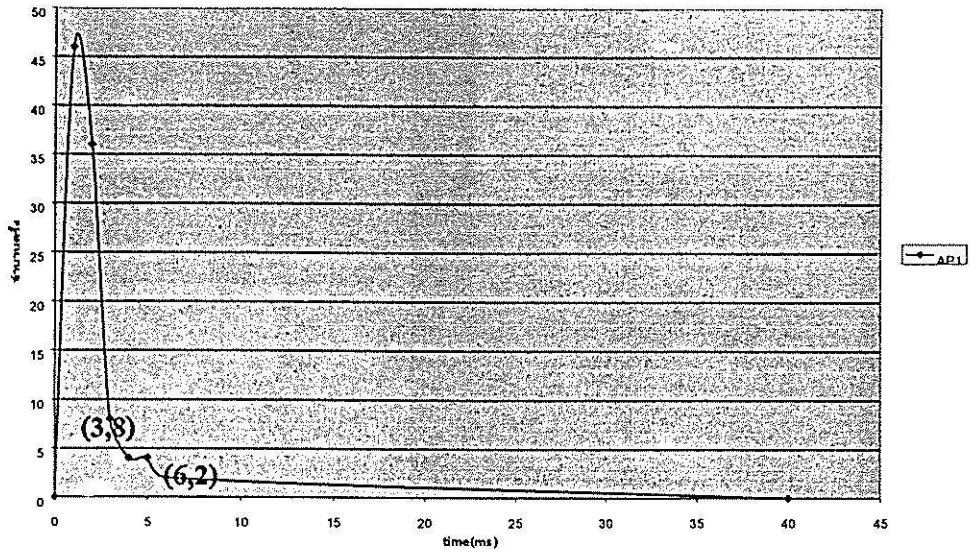


AP2

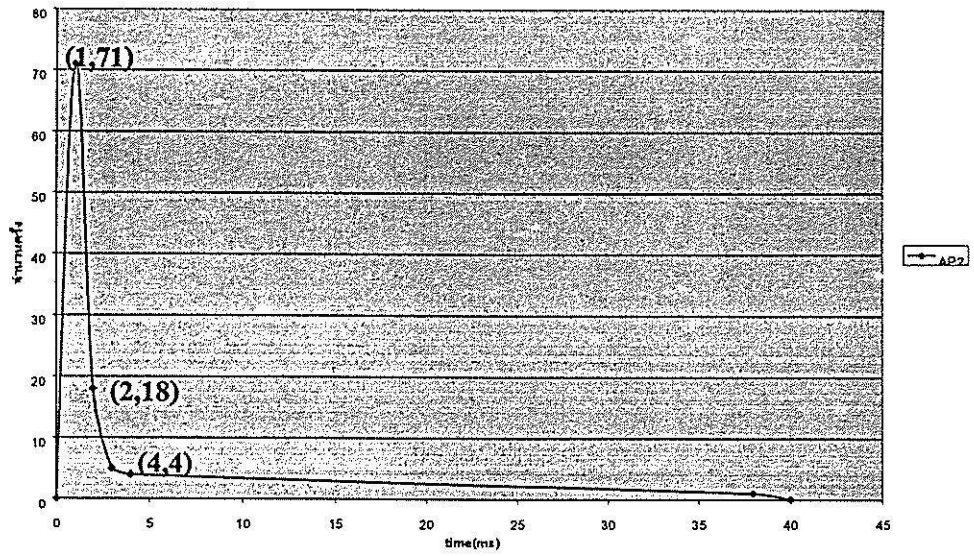


AP3

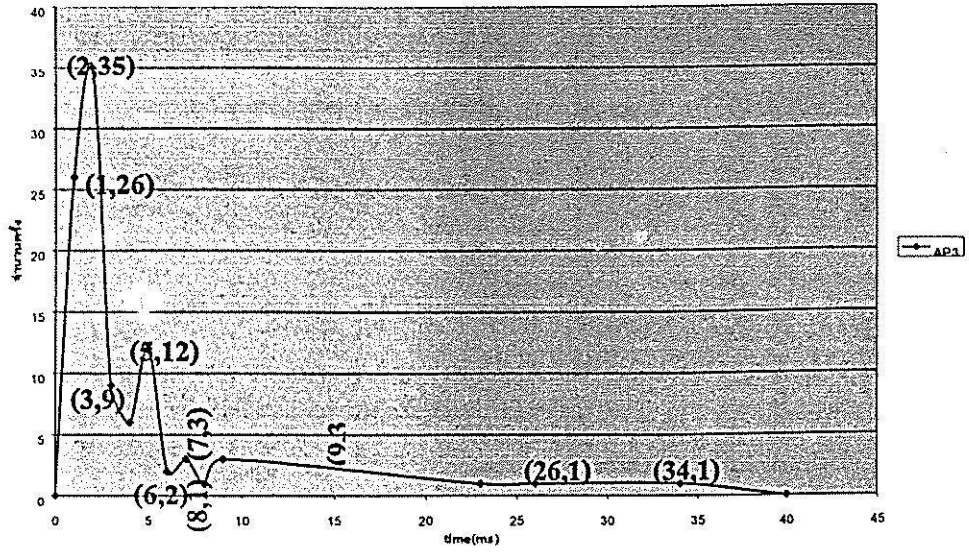
ผลการทดสอบ ณ จุดทดสอบที่ 5



AP1



AP2



AP3

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. Uthansakul, P. and Uthansakul, M. (2009) WLAN Positioning Based on Joint TOA and RSS Characteristic. International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering Volume 1, Number 3, 156-163, July 2009.

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ

2. Uthansakul, P. and Uthansakul, M. (2008) A Novel WLAN Positioning Technique by Time Delay of Successful Transmission. IEEE Next Generation Mobile Application and Services Technology UK, pp. 105-110.
3. Uthansakul, P. and Uthansakul, M. (2008) WLAN Positioning Technique Based on Measured Time Delay Distribution. Asia Pacific Conference on Communications. Japan, pp. 1-4.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุซารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั่ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมาเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยมากกว่า 60 รายการ หนังสือวิชาการต่างประเทศ 1 เล่ม และมีลิขสิทธิ์ 1 รายการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุซารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antenna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย