

การพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงสำหรับ
ระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

นายกิตติภพ กนต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**DEVELOPMENT OF REFERENCE NODE PLACEMENT
TECHNIQUES FOR WIRELESS INDOOR POSITIONING
SYSTEMS IN MULTI-FLOOR BUILDING**

Kittipob Kondee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงสำหรับ
ระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สมศักดิ์ วาณิชนันต์ชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชุตินา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.วิภาวี หัตถกรรม)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติภพ คนดี : การพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น (DEVELOPMENT OF REFERENCE NODE PLACEMENT TECHNIQUES FOR WIRELESS INDOOR POSITIONING SYSTEMS IN MULTI-FLOOR BUILDING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินาพรหมมาก, 191 หน้า

ระบบระบุตำแหน่งวัตถุในอาคาร (indoor positioning system: IPS) ที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายระยะใกล้ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องและความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารคือ การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิง โดยเฉพาะอาคารหลายชั้น ซึ่งมีโครงสร้างภายในที่ซับซ้อน ดังนั้นตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องมีการพิจารณาสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร

งานวิจัยนี้นำเสนอการเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งเทคนิคที่นำเสนออยู่บนพื้นฐานวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated annealing: SA) มีชื่อเรียกว่า MSMR-SA ซึ่งพิจารณาค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ กำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการระบบระบุตำแหน่งในอาคาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ซึ่งสามารถใช้สำหรับอาคารชั้นเดียวและอาคารหลายชั้นได้ ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดลองจริงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกำหนดตำแหน่ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสม และยังได้พัฒนาการจำลองข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้ และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

KITTIPOB KONDEE : DEVELOPMENT OF REFERENCE NODE
PLACEMENT TECHNIQUES FOR WIRELESS INDOOR POSITIONING
SYSTEMS IN MULTI-FLOOR BUILDING. THESIS ADVISOR : ASST.
PROF. CHUTIMA PROMMAK, Ph.D., 191 PP.

INDOOR POSITIONING SYSTEM/ OPTIMIZATION SYSTEM DESIGN MULTI-
FLOOR BUILDING/ WIRELESS SENSOR NETWORKS/ PERFORMANCE

The applications of wireless communication technology standard IEEE 802.15.4 for indoor positioning systems has gained more attention recently because it is small, lightweight and low power consumption. One of the key factors that affects the accuracy and precision of the scene analysis based indoor positioning systems is the placement of reference nodes, especially in the multi-floor building which has complex internal structures. Therefore, the placement of reference node is important issues that must be considered for the wireless indoor positioning systems.

This thesis proposes the development of reference node placement techniques for wireless indoor positioning systems in multi-floor building. The proposed technique is based on simulated annealing algorithm and is called MSMR-SA. The proposed algorithm considers received signal strength to determine the optimal location to install the reference nodes for the required service areas of indoor positioning systems to increase accuracy for the systems. The proposed technique can be used for the single-floor areas and the multi-floor buildings. Moreover, this thesis conducted real environment and evaluated the efficiencies of the placement of reference nodes. And this thesis developed the closed form equations to generate the

received signal strength and analyzed various parameters that affect the performance of the indoor positioning systems.

School of Telecommunication Engineering

Student's Signature_____

Academic Year 2014

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตากรุณาให้โอกาสทางการศึกษา อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ สนับสนุนในการทำการศึกษางานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจอกนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และศูนย์บรรณสารและการสื่อสารที่ให้ความช่วยเหลือในด้านสถานที่ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุนทางการศึกษาและกำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษา

กิตติภพ คนดี

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 4 |
| 1.3 สมมติฐานของการวิจัย..... | 4 |
| 1.4 ข้อยกเว้นเบื้องต้น..... | 4 |
| 1.5 ขอบเขตของการวิจัย..... | 5 |
| 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 5 |
| 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน..... | 5 |
| 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย..... | 5 |
| 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย..... | 6 |
| 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... | 6 |
| 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล..... | 6 |
| 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล..... | 7 |
| 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 7 |
| 1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้..... | 7 |
| 1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์..... | 8 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2 | ปฏิสัมพันธ์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 9 |
| 2.1 | กล่าวนำ | 9 |
| 2.2 | ปฏิสัมพันธ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 10 |
| 2.3 | การโปรแกรมเชิงเส้น | 17 |
| 2.3.1 | ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น | 17 |
| 2.3.2 | รูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้น | 18 |
| 2.3.3 | ตัวอย่างการกำหนดปัญหา | 20 |
| 2.4 | การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก | 24 |
| 2.4.1 | การค้นหาคำตอบด้วยกรีคืออัลกอริทึม | 25 |
| 2.4.2 | การค้นหาคำตอบด้วยการรอบอ่อนจำลอง | 27 |
| 2.4.3 | การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม | 28 |
| 2.4.4 | การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค | 29 |
| 2.5 | โปรแกรม IBM ILOG CPLEX | 30 |
| 3 | การพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับอาคารหลายชั้น | 35 |
| 3.1 | แนวคิดสำหรับการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น | 35 |
| 3.2 | แนวทางการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น | 36 |
| 3.3 | โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น | 39 |
| 3.3.1 | ข้อมูลเริ่มต้น | 42 |
| 3.3.2 | ขั้นตอนการประมาณจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงเริ่มต้น (Phase 1) | 44 |
| 3.3.2.1 | คำนวณจำนวนโนดอ้างอิงเริ่มต้น | 44 |
| 3.3.2.2 | กำหนดตำแหน่งเริ่มติดตั้งโนดอ้างอิง | 45 |
| 3.3.3 | ขั้นตอนการหาจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมด้วยวิธีการรอบอ่อนจำลอง (Phase 2) | 45 |
| 3.3.3.1 | การตรวจสอบเงื่อนไข | 48 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|---------|---|----|
| 3.3.3.2 | ตรวจสอบเกณฑ์การเพิ่มจำนวนโนดอ้างอิง..... | 50 |
| 3.3.3.3 | เพิ่มโนดอ้างอิงและกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นตั้งโนดอ้างอิงที่เพิ่ม..... | 50 |
| 3.3.3.4 | คำนวณฟังก์ชันการประเมินผลจากจำนวน และตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่กำหนด..... | 50 |
| 3.3.3.5 | ค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนดอ้างอิง..... | 51 |
| 3.3.3.6 | ฟังก์ชันการประเมินผล..... | 52 |
| 3.3.3.7 | การเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีกว่าเดิม..... | 53 |
| 3.3.3.8 | ความน่าจะเป็น..... | 53 |
| 3.3.3.9 | เกณฑ์การหยุด..... | 53 |
| 3.4 | การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอุ่นจำลอง..... | 54 |
| 3.4.1 | การกำหนดค่าพารามิเตอร์..... | 54 |
| 3.4.2 | พื้นที่การทดลอง..... | 55 |
| 3.4.3 | ผลการทดลอง..... | 59 |
| 3.4.3.1 | ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ | 64 |
| 3.4.3.2 | ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ ρ | 64 |
| 3.4.3.3 | ประสิทธิภาพของเกณฑ์การหยุดทำงานของ กระบวนการอบอุ่นจำลอง..... | 66 |
| 3.4.4 | การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอุ่นจำลองใน การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับ ระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น..... | 67 |
| 4 | การทดลองและวิเคราะห์ผล..... | 70 |
| 4.1 | การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่ง ด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เราได้นำเสนอ กับเทคนิคแบบ Uniform Placement..... | 71 |
| 4.1.1 | สถานที่และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 71 |
| 4.1.2 | อุปกรณ์สำหรับการทดลอง..... | 75 |
| 4.1.3 | การเก็บบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ..... | 76 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| 4.1.4 การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล..... | 77 |
| 4.2 การเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งวัตถุจากการใช้ฐานข้อมูล ที่ได้จากการวัดจริงกับการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรม..... | 81 |
| 4.2.1 ข้อมูลความเข้มของสัญญาณ..... | 82 |
| 4.2.2 การจำลองข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่ได้รับได้..... | 86 |
| 4.2.3 การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล..... | 92 |
| 4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งวัตถุ เมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบ..... | 94 |
| 4.3.1 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 95 |
| 4.3.1.1 ขนาดของจุดทดสอบที่เหมาะสม..... | 98 |
| 4.3.1.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่ง เมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบที่ต่างกัน..... | 99 |
| 4.3.2 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 100 |
| 4.3.2.1 ขนาดของจุดทดสอบที่เหมาะสม..... | 103 |
| 4.3.2.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่ง เมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบที่ต่างกัน..... | 104 |
| 4.4 การวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง ของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณ ในพื้นที่ลักษณะต่างๆ..... | 105 |
| 4.4.1 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 106 |
| 4.4.1.1 การเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง..... | 110 |
| 4.4.1.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่ง..... | 113 |
| 4.4.2 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 117 |
| 4.4.2.1 การเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง..... | 121 |
| 4.4.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่ง..... | 126 |
| 4.5 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของการกำหนด ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร..... | 132 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|------------|
| 4.5.1 การทดลองเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบ ด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX กับวิธีการอบอ่อนจำลอง..... | 133 |
| 4.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA..... | 138 |
| 5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 143 |
| 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... | 143 |
| 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ..... | 145 |
| 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต..... | 145 |
| รายการอ้างอิง..... | 147 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก. ข้อมูลของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย..... | 150 |
| ภาคผนวก ข. คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์..... | 165 |
| ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา..... | 172 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 191 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 2.1 | กำไรที่ได้จากการขายสินค้าจากโรงงานผลิต..... 21 |
| 2.2 | กำไรที่ได้จากการขายสินค้าของบริษัทไทยพัฒนา..... 22 |
| 3.1 | การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1..... 60 |
| 3.2 | การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2..... 62 |
| 3.3 | แสดงค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1..... 66 |
| 3.4 | แสดงค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2..... 67 |
| 4.1 | รายละเอียดของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ใช้ในงานวิจัย..... 76 |
| 4.2 | ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งที่ได้จากการวัดจริง โดยการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงในอาคาร 2 ชั้น..... 81 |
| 4.3 | ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง ณ จุดทดสอบ A..... 83 |
| 4.4 | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มสัญญาณในช่วงระยะทางต่าง ๆ..... 88 |
| 4.5 | เปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ..... 93 |
| 4.6 | ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทดลอง ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... 97 |
| 4.7 | ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทดลอง ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... 102 |
| 4.8 | ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร..... 110 |
| 4.9 | ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร..... 111 |
| 4.10 | ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 ตารางเมตร..... 111 |
| 4.11 | แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... 116 |
| 4.12 | ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร..... 122 |
| 4.13 | ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร..... 123 |
| 4.14 | ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 ตารางเมตร..... 124 |
| 4.15 | แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... 131 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.16 การเปรียบเทียบผลการหาคำตอบจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ด้วยโปรแกรม CPLEX กับวิธี MSMR-SA..... | 136 |
| 4.17 การเปรียบเทียบผลการหาคำตอบจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคำตอบ ที่ได้จากวิธีการ SA สามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด..... | 141 |
| ก.1 รายละเอียดของ PCB inverted-F-antenna..... | 154 |
| ก.2 รายละเอียดของ MC13224 Sensor Node..... | 154 |
| ก.3 รายละเอียดของ Sub Miniature version “A” connector-antenna..... | 155 |
| ก.4 รายละเอียดของ MC13224 Network Node..... | 156 |
| ก.5 รายละเอียดของ MC13224 Low Power Node..... | 157 |
| ก.6 รายละเอียดของ MC13224 USB Dongle..... | 158 |
| ก.7 รายละเอียดค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศ ของโนคฮ้างอิงแต่ละกรณีที่ระยะทางต่าง ๆ..... | 163 |
| ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์..... | 166 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.1 | โครงสร้างแสดงการแลกเปลี่ยนด้วยกริดอัลกอริทึม..... 27 |
| 2.2 | หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio..... 31 |
| 2.3 | model file editing area..... 32 |
| 2.4 | data file editing area..... 33 |
| 2.5 | setting file editing area..... 33 |
| 3.1 | กระบวนการสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง..... 38 |
| 3.2 | กระบวนการสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง..... 40 |
| 3.3 | แผนภาพการทำงานของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับ ระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น (MSMR-SA)..... 41 |
| 3.4 | ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางจากการวัดจริง..... 42 |
| 3.5 | ขนาดพื้นที่ครอบคลุมของโนดอ้างอิงโดยประมาณ..... 43 |
| 3.6 | แสดงโครงสร้างของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงข้างเคียงในพื้นที่อาคารหลายชั้น..... 51 |
| 3.7 | แสดงการเลือกตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนดอ้างอิง..... 52 |
| 3.8 | แสดงพื้นที่การทดลองที่ 1 อาคารบรรณสาร..... 56 |
| 3.9 | แสดงพื้นที่การทดลองที่ 1 อาคารวิชาการ..... 58 |
| 3.10 | แสดงตัวอย่างการลดลงของอุณหภูมิของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง..... 65 |
| 3.11 | แสดงตัวอย่างการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง..... 65 |
| 3.12 | ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่การทดลองที่ 1..... 68 |
| 3.13 | ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่การทดลองที่ 2..... 69 |
| 4.1 | แสดงพื้นที่การทดลอง ณ อาคารบรรณสาร 2 ชั้น (พิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ 110 พิกัด)..... 72 |
| 4.2 | แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งโนดอ้างอิง ณ อาคารบรรณสาร 2 ชั้น..... 73 |
| 4.3 | ตำแหน่งวัตถุของอาคารบรรณสาร 2 ชั้น (88 จุดทดสอบ)..... 74 |
| 4.4 | อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลอง..... 75 |
| 4.5 | ผลการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง ณ อาคารบรรณสาร..... 77 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|--|-----|
| 4.6 | ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของระยะทางคลาดเคลื่อน ในการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับทั้ง 2 เทคนิค (grid spacing $4 \times 4 \text{ m}^2$)..... | 80 |
| 4.7 | ตัวอย่างการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้น..... | 83 |
| 4.8 | ตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการ..... | 85 |
| 4.9 | ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางจากการวัดจริง..... | 86 |
| 4.10 | ค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโหนดอ้างอิงแต่ละกรณีที่ระยะทางต่าง ๆ รวมกับการคำนวณค่า shadow fading ด้วยการแจกแจงแบบปกติ..... | 89 |
| 4.11 | ค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโหนดอ้างอิงแต่ละกรณีที่ระยะทางต่าง ๆ รวมกับการคำนวณค่า shadow fading ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม..... | 91 |
| 4.12 | ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะการระบุตำแหน่งผิดพลาด..... | 93 |
| 4.13 | ค่าคลาดเคลื่อน..... | 94 |
| 4.14 | แสดงตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 96 |
| 4.15 | แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ เมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 100 |
| 4.16 | แสดงตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 101 |
| 4.17 | แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ เมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 105 |
| 4.18 | กรณีที่ 1 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 107 |
| 4.19 | กรณีที่ 2 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 108 |
| 4.20 | กรณีที่ 3 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 109 |
| 4.21 | แสดงตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 112 |
| 4.22 | แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing $2 \times 2 \text{ m}^2$ | 114 |
| 4.23 | แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing $4 \times 4 \text{ m}^2$ | 115 |
| 4.24 | แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing $6 \times 6 \text{ m}^2$ | 115 |
| 4.25 | ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะการระบุตำแหน่งผิดพลาด สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1..... | 116 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|-----|
| 4.26 | กรณีที่ 1 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 118 |
| 4.27 | กรณีที่ 2 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 119 |
| 4.28 | กรณีที่ 3 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 120 |
| 4.29 | แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 125 |
| 4.30 | แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing 2x2 m ² | 128 |
| 4.31 | แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing 4x4 m ² | 129 |
| 4.32 | แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing 6x6 m ² | 130 |
| 4.33 | ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะการระบุตำแหน่งผิดพลาด สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2..... | 131 |
| 4.34 | กรณีที่ 1..... | 133 |
| 4.35 | กรณีที่ 2..... | 133 |
| 4.36 | กรณีที่ 3..... | 134 |
| 4.37 | กรณีที่ 4..... | 134 |
| 4.38 | กรณีที่ 5..... | 134 |
| 4.39 | กรณีที่ 6..... | 135 |
| 4.40 | กรณีที่ 7..... | 135 |
| 4.41 | กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สำหรับพื้นที่ให้บริการกรณี 1 - 3..... | 137 |
| 4.42 | กราฟเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการหาค่ามากที่สุด (Maximize) สำหรับพื้นที่ให้บริการกรณีที่ 4 - 7..... | 142 |
| ก.1 | ชุดพัฒนา 1322x ZigBee Evaluation Kit..... | 151 |
| ก.2 | ย่านความถี่ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4..... | 152 |
| ก.3 | อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 153 |
| ก.4 | PCB inverted-F-antenna..... | 153 |
| ก.5 | อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Sensor Node..... | 154 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| ก.6 | Sub Miniature version “A” connector.....155 |
| ก.7 | อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Network Node.....156 |
| ก.8 | อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Low Power Node.....157 |
| ก.9 | อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 USB Dongle.....158 |
| ก.10 | โปรแกรม Freescale BeeKit.....159 |
| ก.11 | โปรแกรม IAR Embedded Workbench.....160 |
| ก.12 | สาย J-Link V8.....160 |
| ก.13 | โปรแกรม Docklight.....161 |
| ก.14 | โปรแกรม MATLAB.....162 |
| ก.15 | โปรแกรม Sweet Home 3D.....162 |

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร (indoor positioning system) (Gu et al., 2009) ที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายระยะใกล้ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากการส่งข้อมูลปริมาณน้อยจึงใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลต่ำ และที่สำคัญมีความแม่นยำในการวัดค่าและเก็บข้อมูล เป็นต้น โดยเทคโนโลยีของเครือข่ายดังกล่าวมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย (Liu et al., 2007) อาทิเช่น การตรวจหาตำแหน่งของผู้ป่วยหรืออุปกรณ์ในโรงพยาบาล การตรวจจับสินค้าในโรงงานการผลิต การระบุตำแหน่งของผู้เยี่ยมชมในพิพิธภัณฑ์ขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ดังนั้นการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ส่งผลให้การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารเป็นเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเทคนิคที่ใช้สำหรับการค้นหาตำแหน่งของวัตถุมีหลายวิธี โดยสามารถจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มเทคนิค Triangulation เป็นกลุ่มเทคนิคการระบุตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติ เช่น งานวิจัยของ Kodippili and Dias (2010) ได้นำเสนอเทคนิคแบบผสมซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ และเทคนิคที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติ เป็นต้น โดยเทคนิคในกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่มีความซับซ้อนที่ต้องการความแม่นยำของสัญญาณนาฬิกาหรือการวัดมุมที่ตกกระทบของสัญญาณเพื่อหาจุดตัดของวงกลมทั้งสามวง กลุ่มที่ 2 กลุ่มเทคนิค Proximity เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งโดยอาศัยคุณสมบัติของสัญลักษณ์ (symbolic) ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลตำแหน่งของวัตถุ เช่น งานวิจัยของ Lee and Kavehrad (2012) ได้นำเสนอการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

ซึ่งโครงสร้างของระบบประกอบไปด้วยเครือข่ายสองชนิดคือ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ และเครือข่ายไร้สายแบบ ad hoc เป็นต้น โดยเทคนิคในกลุ่มนี้มีความแม่นยำสามารถระบุตำแหน่งได้เพียงห้องที่วัตถุอยู่เท่านั้น และกลุ่มที่ 3 กลุ่มเทคนิค Scene Analysis เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้การวิเคราะห์เหตุการณ์ในส่วนออฟไลน์เฟส (offline phase) ร่วมกับเหตุการณ์ในส่วนออนไลน์เฟส (online phase) เช่น งานวิจัยของ Bal et al., (2010) ได้นำเสนอระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในห้อง 3 มิติ โดยจะมีการเก็บบันทึกค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ ได้ เพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ในแบบ 3 มิติ จากนั้นจะระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้วิธีการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด k จำนวน ($k=4$) ถัดมาจะแสดงผลของตำแหน่งวัตถุที่คำนวณได้ในแบบสามมิติ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ได้รับความสนใจในการพัฒนามาก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้ความถูกต้องและความแม่นยำสูง มีความซับซ้อนในการประมวลผลน้อย โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร (Baunach et al., 2007) ประเภทนี้ประกอบด้วย ส่วนแรกโนดอ้างอิง (Reference node: RN) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งไว้ในอาคารทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยที่อุปกรณ์มีการกำหนดชื่อหรือ Media Access Control address (MAC address) ที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการวัดค่าความแรงสัญญาณ ส่วนที่สองโนดวัตถุ (Target node) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งไว้กับวัตถุหรือสิ่งที่ต้องการทราบตำแหน่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีคุณสมบัติในการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength: RSS) เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยเทคนิคต่างๆ ในส่วนนี้สามารถทำแบบเวลาจริง (online phase) ส่วนสุดท้ายการสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ (fingerprint) เป็นการกำหนดพิกัดที่ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ให้ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของอาคารที่ให้บริการของระบบระบุตำแหน่ง ในส่วนนี้จะต้องมีการเก็บข้อมูลไว้ก่อน (offline phase) ที่จะทำการระบุตำแหน่งวัตถุและสิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารก็คือ การเลือกวางโนดอ้างอิงซึ่งจะส่งผลต่อความถูกต้องและแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร งานวิจัยของ Baala et al., (2009) ได้ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งการวางของจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สาย (Access Point: AP) ต่อประสิทธิภาพของระบบการหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ซึ่งได้พิจารณาจากจำนวนและรูปแบบในการวางจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สายในรูปแบบการวางแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรในพื้นที่ โดยเปรียบเทียบในพื้นที่ของอาคารที่มีความซับซ้อนมากกับพื้นที่ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของวัตถุ

ภายในอาคาร งานวิจัยของ Kaemarungsi, K. (2005) ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ใช้เทคนิคของการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรี้นท์ (location fingerprint) โดยได้พิจารณาถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งสัญญาณที่สูญเสีย (path loss exponent) จำนวนการติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สาย รวมถึงระยะห่างของกริด (grid spacing) และวิธีการที่ใช้ในการประมาณตำแหน่ง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร งานวิจัยของ Tatham and Kunz (2011) ได้ศึกษาวิเคราะห์การวางโนดอ้างอิง และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งของเครือข่ายงานวิจัยของ Sharma et al., (2010) ได้นำเสนอเทคนิคการวางของจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สาย (Access Point: AP) โดยพิจารณาจำนวนและตำแหน่งการวางจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สายซึ่งมีผลต่อความถูกต้องในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร งานวิจัยของ Dai et al., (2012) ได้เสนอเทคนิคการใช้จำนวนโนดอ้างอิงที่น้อยที่สุดสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยพิจารณาเงื่อนไขการจัดสรรพลังงานที่เหมาะสม งานวิจัยของ Supattra, A. (2013) ได้นำเสนอเทคนิคการวางโนดอ้างอิงที่เหมาะสมภายในบริเวณระนาบเดียวโดยใช้หลักการของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming: BILP) แต่ไม่ได้พิจารณาถึงการหาตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงที่เหมาะสมภายในอาคารแบบหลายชั้น ในงานวิจัยของ Kriangkrai, M. (2013) ได้นำเสนอเทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยพิจารณาค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับร่วมกับค่าอุณหภูมิและความชื้นในบริเวณพื้นที่ที่เก็บข้อมูลเพื่อสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ (fingerprint) แม้ว่าเทคนิคนี้จะให้ค่าความถูกต้องถูกต้องที่ค่อนข้างมากแต่เทคนิคนี้ไม่ได้พิจารณาถึงการเลือกติดตั้งตำแหน่งของโนดอ้างอิงที่เหมาะสมภายในอาคารแบบหลายชั้น

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร จากงานวิจัยที่ผ่านมา นั้นมีบางงานที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกวางตำแหน่งโนดอ้างอิงให้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารลักษณะต่างๆ แต่ยังไม่ได้พิจารณาถึงการเลือกวางตำแหน่งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น แต่งานวิจัยเหล่านั้นมีเป้าหมายหลักเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งวัตถุที่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งยังขาดการศึกษาเรื่องการเลือกวางตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น ดังนั้นงานวิจัยที่น่าเสนอนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งวัตถุให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารผ่านเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee)
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่มีการเลือกใช้จำนวนโนดอ้างอิงและตำแหน่งของการวางโนดอ้างอิงที่เหมาะสม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 โหนดอ้างอิงสามารถส่งสัญญาณข้ามชั้นได้
- 1.3.2 สมการจำลองค่าความแรงสัญญาณสามารถใช้ในการช่วยกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงได้
- 1.3.3 จำนวน โหนดอ้างอิงและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารส่งผลต่อการทำงานของระบบ
- 1.3.4 การกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee)
- 1.4.2 ในการระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นใช้เทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนท์
- 1.4.3 การทดสอบจะทำโดยจำลองการทำงานของระบบภายในอาคารอย่างน้อย 2 ชั้น อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ต้องไม่ทำงานอยู่ในย่านความถี่เดียวกับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานและทฤษฎีของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นผ่านเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4
- 1.5.2 ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.5.3 พัฒนาเทคนิคที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีการเลือกจำนวน โหนดอ้างอิงและตำแหน่งของการวาง โหนดอ้างอิงที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ภายในอาคารแบบหลายชั้น
- 1.5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างการออกแบบระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร
- 3) ศึกษาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ใช้เครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นสมการสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด
- 4) ศึกษาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 3
- 5) พัฒนาเทคนิคการระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นโดยใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4
- 6) พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสำหรับเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น
- 7) วิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาเทคนิควิธีการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารชนิดต่าง ๆ

- 3) พัฒนาเทคนิคการระบุตำแหน่งอาคารแบบหลายชั้นโดยใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4
- 4) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นโดยใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้น
- 5) เปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ได้จากการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารบรรณสาร อาคารวิชาการ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) อุปกรณ์สื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล)
- 2) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
- 3) โปรแกรมกำหนดค่าอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (Freescale BeeKit)
- 4) โปรแกรม MATLAB
- 5) โปรแกรมแสดงผล Docklight
- 6) โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio
- 7) โปรแกรมแสดงพื้นที่ของระบบระบุตำแหน่งแบบ 3 มิติ sweet home 3D
- 8) โปรแกรม Microsoft Office
- 9) โปรแกรม Edraw Max

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) เก็บรวบรวมค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้หรือตัวบอกลักษณะการเชื่อมโยงเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล
- 3) เก็บรวบรวมผลการทดลองจากการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยวิธีการเลือกวางตำแหน่งโหนดอ้างอิงที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุในอาคาร

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของการระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งการวางโนดอ้างอิง จากวิธีการหาตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับเทคนิควิธีการอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้น

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.7.1 เป็นแนวทางในการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้กับเครือข่ายไร้สาย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครือข่ายประเภทนี้ได้ในงานที่เกี่ยวข้อง
- 1.7.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารให้ดียิ่งขึ้น

1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) โดยใช้การกำหนดปัญหาการด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นและใช้เทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยวิธีฟังก์ชันการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดกับลักษณะรูปแบบอาคารหลายชั้นนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบุตำแหน่งได้ กระบวนการทำงานสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนการทำงาน คือ ส่วนแรกหาจำนวนและตำแหน่งเริ่มติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการที่พิจารณา ส่วนที่สองหาจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ ในการดำเนินการวิจัยได้สังเกตเห็นถึงข้อดีของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายระยะใกล้ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำเนื่องจากการส่งข้อมูลปริมาณน้อยจึงใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลต่ำ และที่สำคัญมีความแม่นยำในการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ เป็นต้น โดยได้พัฒนากระบวนการจำลองค่าพารามิเตอร์ของระบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลพารามิเตอร์ของการจำลองค่าความแรงสัญญาณที่รับได้สำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงไร้สายภายในอาคารหลายชั้น และยังได้แสดงการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถูกต้องของระบบระบุตำแหน่ง

1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และนวัตกรรมของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคนิคและโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ปรัชญา วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การโปรแกรมเชิงเส้น การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก โปรแกรม IBM ILOG CPLEX

บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดสำหรับการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น แนวทางการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอ่อนจำลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Uniform Placement การเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งวัตถุจากการใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงกับการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรม การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งวัตถุเมื่อพิจารณาจำนวนโนดวัตถุ การวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สาย ภายในอาคารหลายชั้นให้มีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งที่ติดตั้ง จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรม ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างการทำงานของระบบระบุตำแหน่งเพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวนำ หัวข้อ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.3 การโปรแกรมเชิงเส้น หัวข้อ 2.4 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก หัวข้อ 2.5 โปรแกรม IBM ILOG CPLEX

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร (Wireless Indoor Positioning systems) ได้รับความนิยมและมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System : GPS) ไม่สามารถนำมาใช้งานสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้ เพราะตัวอาคารเป็นตัวบดบังสัญญาณดาวเทียมที่ทำการส่งมายังวัตถุ ซึ่งเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการระบุตำแหน่งภายในอาคาร อาทิเช่น อินฟราเรด (Infrared) อัลตราซาวด์ (Ultra-sound) ความถี่วิทยุ (Radio Frequency) คลื่นแม่เหล็ก (Magnetic) พื้นฐานการมองเห็น (Vision-based) เป็นต้น (Liu et al., 2007) ซึ่งเทคนิคที่ใช้สำหรับการค้นหาตำแหน่งของวัตถุมีหลายวิธี โดยสามารถจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มเทคนิค Triangulation เป็นกลุ่มเทคนิคการระบุตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติ กลุ่มที่ 2 กลุ่มเทคนิค Proximity เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งโดยอาศัยคุณสมบัติของสัญลักษณ์ (symbolic) ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลตำแหน่งของวัตถุ และกลุ่มที่ 3 กลุ่มเทคนิค Scene Analysis หรือเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนซ์เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้การวิเคราะห์เหตุการณ์ในส่วนออฟไลน์เฟส (offline phase) ร่วมกับ

เหตุการณ์ในส่วนออนไลน์เฟส (online phase) เทคนิคนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นเทคนิคที่เข้าใจง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนสูง

สำหรับโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรี้นท์ (Baunach et al., 2007) ประกอบด้วยสามส่วนหลัก ส่วนแรกโนดอ้างอิง (Reference node: RN) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งไว้ในอาคารทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยที่อุปกรณ์มีการกำหนดชื่อหรือ Media Access Control address (MAC address) ที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการวัดค่าความแรงสัญญาณ ส่วนที่สองโนดวัตถุ (Target node) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งไว้กับวัตถุที่หรือสิ่งที่ต้องการทราบตำแหน่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีคุณสมบัติในการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength: RSS) เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยเทคนิคต่าง ๆ ในส่วนนี้สามารถทำแบบเวลาจริง (online phase) ส่วนสุดท้ายการสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ (fingerprint) เป็นการกำหนดพิกัดที่ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ให้ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของอาคารที่ให้บริการของระบบระบุตำแหน่ง ในส่วนนี้จะต้องมีการเก็บข้อมูลไว้ก่อน (offline phase) ที่จะทำการระบุตำแหน่งวัตถุ อย่างไรก็ตามในหลาย ๆ งานวิจัยได้ศึกษาถึงเทคโนโลยีและเทคนิคการระบุตำแหน่งที่เพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร รวมไปถึงการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ควรพิจารณาเพื่อให้มีการออกแบบติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับอาคารหลายชั้นได้อย่างเหมาะสม

2.2 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารและสามารถพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารให้มีสมรรถนะการระบุตำแหน่งที่ดีได้นั้น จำเป็นต้องศึกษาทิศทางปรัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร เพื่อเป็นความรู้และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งจากการศึกษาปรัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2.1 งานวิจัยของ Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and, Liu, J. (2007) เป็นงานวิจัยที่

สำรวจเทคนิคที่ใช้สำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้สำรวจและรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับเทคนิคการระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร โดยได้จำแนกประเภทของเทคนิคการระบุตำแหน่งพร้อมกับ

อธิบายหลักการการทำงานของแต่ละเทคนิค การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประเภทต่าง ๆ สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารและยังวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคแต่ละประเภท ซึ่งทำให้เห็นภาพรวมของเทคนิคที่ใช้สำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่ง เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการการทำงานของเทคนิคการระบุตำแหน่งแต่ละกลุ่ม โดยเทคนิคแต่ละกลุ่มมีข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค รวมถึงได้ทราบวิธีการประเมินประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ

2.2.2 งานวิจัยของ Gu, Y., Lo, A. and, Niemegeers, I. (2009) เป็นงานวิจัยที่สำรวจเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายที่ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้สำรวจและรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยได้อธิบายคุณลักษณะของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายประเภทต่าง ๆ อาทิเช่น อินฟราเรด (Infrared) อัลตราซาวด์ (Ultrasound) ความถี่วิทยุ (Radio Frequency) คลื่นแม่เหล็ก (Magnetic) พื้นฐานการมองเห็น (Vision-based) เป็นต้น ซึ่งยังกล่าวถึงข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของการระบุตำแหน่ง (localization) การติดตาม (tracking) การนำทาง (navigation) และการเฝ้าตรวจ (monitoring) เป็นต้น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ได้ทราบถึงข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแต่ละประเภท อีกทั้งยังสามารถนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้ เช่น การเลือกใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีคุณสมบัติการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

2.2.3 งานวิจัยของ Kodippili, N.S. and Dias, D. (2010) เป็นงานวิจัยที่พัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งแบบผสมซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเทคนิคฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้ง (Fingerprinting) และ เทคนิค Trilateration

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการพัฒนากระบวนการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารซึ่งมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาประสิทธิภาพของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุในระนาบเดียว โดยได้นำเสนอ

เทคนิคแบบผสมซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์และเทคนิคที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติ โดยในช่วงออฟไลน์เฟสจะมีการเก็บรวบรวมค่าความเข้มสัญญาณภายในอาคาร เพื่อสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ จากนั้นในช่วงออนไลน์เฟสจะคำนวณหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbor) และใช้พื้นฐานการทำงานของกลุ่มเทคนิค triangulation โดยจะพิจารณาค่าตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด 3 ตำแหน่ง ถัดมาจะใช้คุณสมบัติการแพร่กระจายของสัญญาณเพื่อคำนวณหาระยะห่างของตำแหน่งวัตถุกับตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดทั้ง 3 ตำแหน่ง และสุดท้ายจะระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้จุดตัดของวงกลมทั้งสามวง

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ที่นำมาใช้สำหรับระบบระบุตำแหน่งในอาคาร โดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่มีความซับซ้อน (ข้อดีของกลุ่มเทคนิค scene analysis) และเห็นถึงข้อดีของเทคนิค trilateration ที่ให้ประสิทธิภาพความถูกต้องที่ดีอีกด้วย (ข้อดีของกลุ่มเทคนิค triangulation) แต่ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ ระบบระบุตำแหน่งวัตถุในระนาบเดียว ซึ่งอาคารส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนและเป็นอาคารลักษณะหลายชั้น

2.2.4 งานวิจัยของ Kim, H.S., Kim, D.R., Yang, S.H., Son, Y.H. and, Han, S.K. (2013)

เป็นงานวิจัยที่นำเสนอระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ใช้การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Visible Light Communication: VLC)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการพัฒนาการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร โดยมีการนำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งใช้การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ แทนการใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง โดยใช้พื้นฐานการทำงานของกลุ่มเทคนิค triangulation ซึ่งจะใช้การมอดูเลต (modulation) สัญญาณแสงของหลอดไฟ Light Emitting Diode (LED) ด้วยช่องสัญญาณ (channel) ที่แตกต่างกัน แทนการใช้ MAC address ของโนดอ้างอิง เมื่อต้องการระบุตำแหน่ง ที่โนดวัตถุจะวัดกำลังความถี่วิทยุที่รับได้ (received RF power) และเปลี่ยนให้เป็นระยะทาง จากนั้นจะคำนวณหาตำแหน่งวัตถุโดยใช้การทำงานพื้นฐานของกลุ่มเทคนิค triangulation

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการนำค่าพารามิเตอร์ของระบบคือ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้มาใช้ระบุตำแหน่งวัตถุ แทนการใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงหรือจากจุดเข้าถึง (Access Point : AP) แต่ข้อจำกัดของการใช้การสื่อสารด้วยแสงของงานวิจัยนี้คือ เส้นทางารรับส่งข้อมูลระหว่างโนดวัตถุและหลอดไฟ

LED ต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง (Line of Sight : LOS) และเทคนิค triangulation จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่มีความซับซ้อนสูง

2.2.5 งานวิจัยของ Bal, M., Xue, H., Shen, W. and Ghenniwa, H.H. (2010) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในห้อง 3 มิติ ด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด k จำนวน

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในห้อง 3 มิติที่ทำงานอยู่บนพื้นฐานของกลุ่มเทคนิค scene analysis ซึ่งมีการเก็บบันทึกพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์ในแบบ 3 มิติ จากนั้นจะระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้วิธีการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด k จำนวน ($k=4$) ถัดมาจะแสดงผลของตำแหน่งวัตถุที่คำนวณได้ในแบบสามมิติด้วย Virtual Reality Modeling Language (VRML) ซึ่งโนดอ้างอิงและโนดวัตถุทำงานอยู่บนมาตรฐานของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย IEEE 802.15.4

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษาวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของกลุ่มเทคนิค scene analysis ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่ง ได้แก่ การระบุตำแหน่งในบริเวณระนาบเดียว การระบุตำแหน่งภายในห้อง 3 มิติ และการระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นได้ อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของเทคนิคที่มีการสร้างฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ ซึ่งในขั้นตอนการระบุตำแหน่งจะมีการพิจารณาฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ทั้งหมดที่เก็บบันทึกได้ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุของเทคนิคประเภทนี้จึงใช้เวลานาน

2.2.6 งานวิจัยของ Gansemer, S., Grossmann, U. and, Hakobyan, S. (2010) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่อยู่บนพื้นฐานของเทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean distance)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่มีสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (dynamically changing environment) ซึ่งเกิดจากความแปรปรวนของสัญญาณที่อยู่ภายในอาคาร ส่งผลให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุลดลง ซึ่งสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของงานวิจัยนี้หมายถึง การวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จาก โหนดอ้างอิง หรือสถานีฐาน (base station) ณ ที่ตำแหน่งการวัดเดียวกันแต่คนละช่วงเวลา อาจไม่สามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณจาก โหนดอ้างอิงตัวเดิมได้ จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางแก้ไข โดยทำการคัดเลือกพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่มีชุดของโนดอ้างอิงที่สามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณได้เหมือนกับตำแหน่งของวัตถุมาพิจารณา จากนั้นจะใช้เทคนิค

ระยะห่างยูทิลิตี้เดิมคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุจากพิกัดฟังก์ชันที่กรองได้ และระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความถูกต้องในระบุตำแหน่งของวัตถุ อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาถึงเทคนิคที่ใช้สำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง ภายในอาคารแบบหลายชั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องของระบบระบุตำแหน่ง

2.2.7 งานวิจัยของ Baunach, M., Kolla, R. and Muhlberger, C. (2007) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้เสนอการประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารกับเทคโนโลยีของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ที่มีข้อจำกัดในด้านของหน่วยความจำน้อย ข้อจำกัดในด้านของการใช้พลังงาน โดยได้อธิบายถึงโครงสร้างของกระบวนการในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร รวมไปถึงการอธิบายเทคนิควิธีที่ใช้ในการหาตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคของระยะทางแบบต่าง ๆ ซึ่งได้อธิบายวิธีการทำงาน ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นถึงการนำเทคโนโลยีของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย IEEE 802.15.4 ที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร และได้แสดงภาพรวมของโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งและได้ทราบถึงข้อจำกัดที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งได้แนวคิดสำหรับการพิจารณาเลือกใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.2.8 งานวิจัยของ Baala, O., B., Zheng, Y. and Caminada, A. (2009) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของการเลือกติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบจากการเลือกติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณ (Access Point: AP) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) โดยพิจารณาจากจำนวนและรูปแบบการติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สาย โดยมีรูปแบบการวางแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรในพื้นที่

ให้บริการ และเปรียบเทียบในพื้นที่ให้บริการที่มีความซับซ้อนมากกับพื้นที่ให้บริการที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า ซึ่งการเลือกติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ นั่นคือตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงหรือจากงานวิจัยนี้ได้ใช้ เป็นจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สาย ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังขาดการพิจารณาดำเนินการติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมและความซับซ้อนของพื้นที่ให้บริการจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพความถูกต้องของระบบได้

2.2.9 งานวิจัยของ Kaemarungsi, K. (2005) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบการ ออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารสำหรับการใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีน (location fingerprint technique)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ใช้เทคนิคของการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีน (location fingerprint) โดยได้พิจารณาถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งสัญญาณที่สูญเสีย (path loss exponent) จำนวนการติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณไร้สาย รวมถึงระยะห่างของกริด (grid spacing) และวิธีการที่ใช้ในการประมาณตำแหน่ง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แนะนำจำนวนจุดเข้าถึงสัญญาณควรมีอย่างน้อย 4 โหนด จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่ช่วยในการออกแบบระบบระบุตำแหน่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะได้มีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการติดตั้งโนดอ้างอิงที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่ง แต่ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงปัญหาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร

2.2.10 งานวิจัยของ Tatham, B. and Kunz, T. (2011) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับตำแหน่ง ติดตั้งโนดอ้างอิง (anchor node) สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้นำเสนอผลกระทบของตำแหน่งวางโนดอ้างอิงซึ่งเป็นแนวทางสำหรับผู้ออกแบบระบบเครือข่ายและผู้ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ที่ต้องการประเมินประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผล

กระทบในการหาตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ดีที่สุดเช่น ค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของ ตำแหน่ง โหนดอ้างอิงน้อยที่สุด ครอบคลุมพื้นที่ของเครือข่าย และระยะห่างระหว่าง โหนดอ้างอิงที่ถูก ติดตั้ง 3 โหนด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นว่าในการศึกษาเพื่อการแก้ปัญหา การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด ควรกำหนดเงื่อนไขหรือข้อจำกัดที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของเครือข่าย และนำมาสร้างเป็นสมการทาง คณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาคำตอบของตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงเหมาะสมที่สุดได้

2.2.11 งานวิจัยของ Sharma, C., Wong, Y., F., Soh, W., S., and Wong, W., C. (2010) เป็น งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกตำแหน่งติดตั้งของจุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุด้วยวิธีการฟิงเกอร์ปรีน

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้เสนอวิธีการในการหาตำแหน่งติดตั้งจุดเข้าถึง สัญญาณ สำหรับการใส่เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่มีวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อลดจำนวนการสร้าง ข้อมูลอ้างอิงในพื้นที่ที่ทำการทดสอบ โดยใช้หลักการของความแตกต่างของคุณลักษณะของค่า ความแรงสัญญาณมาใช้ในการพิจารณาเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณในเครือข่าย โดยวิธี อีวิริสติกที่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คือ วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) มาใช้ สำหรับการหาตำแหน่งติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด และได้เลือกใช้วิธี KNN (K-Nearest Neighbor) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประเมินประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่ง ในขั้นตอน การเลือกตำแหน่งวัตถุ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ จะเห็นว่าในการหาตำแหน่งติดตั้ง โหนด อ้างอิงหรือจุดเข้าถึงสัญญาณ จากงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงการหาตำแหน่งติดตั้ง โหนด อ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ นำแนวคิดของการหาคำตอบของการเลือกตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง (SA) รวมไปถึงได้เพิ่มการพิจารณาถึงลักษณะรูปแบบอาคารหลายชั้น

2.3 การโปรแกรมเชิงเส้น

การวางแผนและการตัดสินใจเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งของการบริหารจัดการปัญหา โดยปัญหาที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านการทหาร ด้านอุตสาหกรรมการผลิต ด้านธุรกิจ ด้านการลงทุน ด้านขนส่งสินค้าหรือแม้กระทั่งด้านบริการ เป็นหน้าที่ของผู้รับผิดชอบที่จะต้องศึกษาลักษณะของปัญหาต่าง ๆ เพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์หาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับปัญหานั้น ในบางครั้งการวางแผนหรือการตัดสินใจแก้ปัญหาอาศัยความชำนาญ หลักการและเหตุผลประกอบกับประสบการณ์ของแต่ละบุคคลที่ได้รับมอบหมายในงานนั้น โดยอาจขาดข้อมูลหรือการวิเคราะห์อย่างละเอียด ซึ่งเป็นเหตุให้การวางแผนหรือการแก้ปัญหานั้นอาจไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหาหรือทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจากการตัดสินใจนั้นมีปัจจัยขึ้นอยู่กับตัวบุคคล เมื่อข้อมูลของปัญหามีปริมาณมากและความซับซ้อนสูงยังเป็นเรื่องยากที่จะแก้ปัญหานั้นแล้วได้คำตอบหรือการเลือกตัดสินใจที่ดีที่สุด จึงได้มีการนำโปรแกรมคณิตศาสตร์ (mathematical programming) มาช่วยในการจัดการกับปัญหา ซึ่งคำตอบของปัญหาที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำและมีความรวดเร็วในการแก้ปัญหา วิธีการหนึ่งที่อยู่กันอย่างแพร่หลายในเทคนิคการโปรแกรมคณิตศาสตร์และเป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยดำเนินงานวิจัย (operations research) ก็คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP)

การโปรแกรมเชิงเส้นถูกนำมาช่วยในการแก้ปัญหาที่เราไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยความสามารถของปัญหาและใช้เวลามากในการดำเนินการ โปรแกรมเชิงเส้นเป็นเทคนิคในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยใช้การจัดสรรปัจจัยและทรัพยากรที่มีลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เป็นแบบเชิงเส้น (linear form) หรือมีการเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราส่วนที่คงที่ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การแก้ปัญหาที่ดีที่สุด (optimum solution) สำหรับปัญหานั้น

2.3.1 ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น

การโปรแกรมเชิงเส้นเป็นวิธีการเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้การจัดสรรหรือแจกจ่ายทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดภายใต้ข้อบังคับต่าง ๆ ของปัญหาเพื่อบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้โดยมีผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ ให้ได้คำตอบที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด เช่น ต้นทุนในกระบวนการผลิตต่ำสุด กำไรมากที่สุด เส้นทางที่สั้นที่สุด เป็นต้น โดยปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมักมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาเสมอ ตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตขนมปังแห่งหนึ่งสามารถผลิตขนมปังได้หลายชนิด ขนมปังแต่ละชนิดใช้วัตถุดิบไม่เหมือนกันและมีปริมาณแตกต่างกัน เวลาที่ใช้ในการผลิต ขั้นตอนการผลิตก็แตกต่างกันออกไป แรงงานที่ใช้จึงไม่เท่ากัน ทั้งวัตถุดิบและแรงงานมีปริมาณจำกัด จำนวนวัตถุดิบมีการแปรผันไปตามฤดูกาลและสภาพอากาศ เวลาที่ใช้ในการผลิตขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจักร หากต้องการ

เพิ่มการผลิตก็ต้องสำรองวัตถุดิบไว้มากยิ่งขึ้น ต้องมีที่เก็บเพียงพอ ต้องเพิ่มปริมาณแรงงานหรือขยายเวลาทำงาน เพิ่มจำนวนเครื่องจักร นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการขายซึ่งอาจแปรผันตามฤดูกาลหรือค่านิยม ขนบปึงบางชนิดอาจขายได้ในปริมาณน้อย บางชนิดอาจมีความต้องการมาก ทำให้ได้จากการจำหน่ายขนบปึงแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับต้นทุนการผลิต ค่าขนส่งสินค้า ซึ่งขนบปึงแต่ละชนิดมีกำไรไม่เท่ากัน ปัญหาของตัวอย่างนี้มีอยู่ว่า ผู้ผลิตจะเลือกผลิตขนบปึงชนิดใด ปริมาณเท่าไร จึงจะได้กำไรมากที่สุด การผลิตเพื่อให้ได้กำไรสูงสุดคือเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ของโรงงานผลิตขนบปึงแห่งนี้ การใช้โปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ไขปัญหาจึงต้องศึกษารายละเอียดและพิจารณาวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยจะต้องทราบข้อจำกัดของปัญหานั้นมีอะไรบ้าง มีขอบเขตเงื่อนไขอย่างไร เป้าหมายที่ต้องการคืออะไรและเป้าหมายที่ต้องการนั้นต้องการค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด แล้วนำมาวิเคราะห์หาตัวแปรที่จะใช้ในการตัดสินใจ (decision variable) มีตัวแปรอะไรบ้าง สามารถเขียนเป็นรูปสมการหรือสมการเชิงเส้นของข้อจำกัดและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ได้อย่างไร

ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการใช้หรือการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรที่กำหนดในขอบเขตของการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชัน ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหาสามารถเขียนเป็นรูปแบบแทนระบบสมการทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้นได้ในหัวข้อต่อไป

2.3.2 รูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้น

ในการดำเนินการแทนระบบของปัญหาโดยการใช้โปรแกรมเชิงเส้น จำเป็นต้องทำความเข้าใจและศึกษาปัญหาอย่างละเอียด นอกจากนี้ยังต้องสามารถระบุสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ในปัญหาที่เกิดขึ้นได้

1) สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุนการผลิต กำไรของสินค้า ฯลฯ เพื่อให้กำหนดความต้องการของปัญหาว่า ต้องการค่าสูงสุดหรือต่ำสุด (maximize or minimize) สามารถเขียนแทนได้ดังสมการที่ (2.1) หรือ (2.4)

2) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข ในปัญหาที่พิจารณา อาจกำหนดตัวแปรได้หลายลักษณะ ดังนั้นตัวแปรที่ต้องตัดสินใจคือสิ่งที่เราต้องการหาผลลัพธ์หรือคำตอบของปัญหา เราต้องทำการระบุหน่วยของตัวแปร

เหล่านั้นด้วยหน่วยเดียวกัน เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งคำตอบของปัญหาที่ได้ จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น สามารถเขียนแทนได้ดังสมการที่ (2.3) หรือ (2.6)

3) สมการแสดงข้อจำกัดหรือสมการเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งแสดงความขอบเขตของ ปัจจัยหรือทรัพยากร โดยวัตถุประสงค์ของปัญหาจะบรรลุค่าที่สูงที่สุดหรือต่ำที่สุดตามที่ต้องการได้ ดีมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของปัญหา เช่น ข้อจำกัดด้านทรัพยากร ด้านแรงงาน ด้านการขนส่งหรือเงื่อนไขต่าง ๆ ของปัญหา โดยที่เงื่อนไขบังคับอาจจะอยู่ในรูปสมการหรืออสมการก็ได้ สามารถเขียนแทนได้ดังสมการที่ (2.2) หรือ (2.5)

4) ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่าง ๆ ของระบบต้องมีลักษณะรูปแบบเป็นเชิงเส้นตรง (linear form) คือ ตัวแปรทุกตัวในสมการวัตถุประสงค์ สมการหรืออสมการของเงื่อนไข จะต้องมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงกล่าวคือ ตัวแปรทุกตัวต้องมีเลขยกกำลังเป็นหนึ่งเท่านั้น

5) การจำกัด (restriction) จะเห็นได้ว่าการ โปรแกรมเชิงเส้นจะมีลักษณะสมการเงื่อนไข แสดงข้อจำกัดของปัญหา คือ เงื่อนไขอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ด้วยเครื่องหมายเท่ากับ (=) และเงื่อนไขที่อยู่ในรูปอสมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ด้วยเครื่องหมายมากกว่าเท่ากับ (\geq) หรือน้อยกว่าเท่ากับ (\leq) ในสมการเงื่อนไข

รูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{Maximize หรือ Minimize} \quad z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.1)$$

$$\text{โดยมีข้อจำกัดดังนี้} \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \{ \geq, \leq, = \} b_1 \quad (2.2)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \{ \geq, \leq, = \} b_2$$

....

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \{ \geq, \leq, = \} b_m$$

$$\text{และตัวแปรตัดสินใจ} \quad x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.3)$$

หรือเขียนแบบย่อได้ดังนี้

$$\text{Maximize หรือ Minimize} \quad z = \sum_{j=1}^n c_jx_j \quad (2.4)$$

$$\text{โดยมีข้อจำกัดดังนี้} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \{ \geq, \leq, = \} b_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

$$\text{ตัวแปรตัดสินใจ} \quad x_j \geq 0, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.6)$$

เมื่อตัวแปร c_j, a_{ij} และ b_j เป็นค่าคงที่

วัตถุประสงค์ของรูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้น คือ ต้องการหาค่าตัวแปรการตัดสินใจ x_j ที่ส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงดังสมการที่ (2.1) หรือ (2.4) มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด โดยที่ตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้ได้อยู่ภายใต้ข้อจำกัดจำนวน m เงื่อนไขและมีทรัพยากร c_j, a_{ij} และ b_j อย่างจำกัด

2.3.3 ตัวอย่างการกำหนดปัญหา

ในการสร้างรูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของเรานั้นไม่สามารถกำหนดกฎเกณฑ์คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นมีลักษณะรูปแบบของปัญหาไม่เหมือนกัน แต่สามารถสร้างรูปแบบแทนระบบสมการคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้นได้ ดังนั้นเราจึงยกตัวอย่างการกำหนดปัญหาของโปรแกรมเชิงเส้นดังต่อไปนี้

2.3.3.1 ปัญหาการขนส่ง

บริษัทไทยพัฒนาอุตสาหกรรมมีโรงงานผลิตสินค้า 3 แห่ง โรงงานแต่ละแห่งมีกำลังผลิตสูงสุดเท่ากับ 4,000 6,000 และ 5,000 หน่วย ตามลำดับ สินค้าที่ผลิตจากโรงงานทั้งสามแห่งนี้ จะถูกจัดส่งต่อไปให้กับลูกค้าของบริษัทซึ่งมีอยู่ 4 รายด้วยกัน โรงงานได้ตกลงที่จะขายสินค้า 5,000 ชิ้น ให้กับลูกค้ารายที่หนึ่ง 4,000 ชิ้น ให้กับลูกค้ารายที่สอง อย่างน้อย 2,000 ชิ้น ให้กับลูกค้ารายที่สาม ลูกค้ารายที่สามและลูกค้ารายที่สี่ต้องการซื้อสินค้าที่เหลือให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ หากกำไรที่บริษัทได้จากการขายสินค้าจากโรงงานผลิตแต่ละแห่งให้กับลูกค้าแต่ละรายเป็นไปตามตารางที่ 2.1 บริษัทควรจะขายสินค้าจากโรงงานใดให้กับลูกค้ารายใด ในจำนวนเท่าใด

ตารางที่ 2.1 กำไรที่ได้จากการขายสินค้าจากโรงงานผลิต

| | ลูกค้ารายที่ 1 | ลูกค้ารายที่ 2 | ลูกค้ารายที่ 3 | ลูกค้ารายที่ 4 |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| โรงงานที่ 1 | 165 | 263 | 362 | 464 |
| โรงงานที่ 2 | 168 | 267 | 365 | 462 |
| โรงงานที่ 3 | 163 | 260 | 359 | 460 |

การสร้างปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น จากปัญหาข้างต้นนี้ ทำได้ดังนี้ คือ การกำหนดนิยามของตัวแปรตัดสินใจ ปัญหาการขนส่งที่กำหนดให้นี้ เราต้องการที่จะทราบว่า ควรจะส่งสินค้าจากโรงงานใดไปให้กับลูกค้าคนไหน ในปริมาณเท่าไร จึงจะทำให้บริษัทได้รับกำไรสูงสุด ดังนั้นเราจะกำหนดให้

ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} ปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจากโรงงานที่ i ไปจำหน่ายให้กับลูกค้าคนที่ j โดยที่ $i = 1, 2, 3$ และ $j = 1, 2, 3, 4$

ตัวแปรค่าคงที่ c_{ij} กำไรการขายสินค้าจากโรงงานที่ i ไปจำหน่ายให้กับลูกค้าคนที่ j โดยที่ $i = 1, 2, 3$ และ $j = 1, 2, 3, 4$

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ปัญหาการขนส่งนี้ บริษัทควรจะส่งสินค้าจากโรงงานใดไปให้กับลูกค้าคนไหน ในปริมาณเท่าไร จึงจะทำให้บริษัทได้รับกำไรสูงสุด สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad \text{Maximize } z = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 c_{ij} x_{ij}$$

กำหนดข้อจำกัดของปัญหา

สมการเงื่อนไขที่ 1 กำลังการผลิตของโรงงานที่ 1 สูงสุดเท่ากับ 4,000 หน่วย

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \leq 4000$$

สมการเงื่อนไขที่ 2 กำลังการผลิตของโรงงานที่ 2 สูงสุดเท่ากับ 6,000 หน่วย

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 6000$$

สมการเงื่อนไขที่ 3 กำลังการผลิตของโรงงานที่ 3 สูงสุดเท่ากับ 5,000 หน่วย

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} \leq 5000$$

สมการเงื่อนไขที่ 4 โรงงานได้ตกลงขายสินค้า 5,000 ชิ้นให้กับลูกค้ารายที่ 1

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} = 5000$$

สมการเงื่อนไขที่ 5 โรงงานได้ตกลงขายสินค้า 4,000 ชิ้นให้กับลูกค้ารายที่ 2

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} = 4000$$

สมการเงื่อนไขที่ 4 โรงงานได้ตกลงขายสินค้า 2,000 ชิ้นให้กับลูกค้ารายที่ 3

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} \geq 2000$$

กำหนดข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ ปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจะต้องมีค่าไม่ติดลบ $x_{ij} \geq 0$

2.3.3.2 ปัญหาวางแผนการผลิต

บริษัทไทยพัฒนาอุตสาหกรรมทำการผลิตสินค้าออกจำหน่าย 3 ประเภทด้วยกัน คือ ชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง ชนิด 6 ที่นั่ง และชนิด 10 ที่นั่ง ในการผลิตชุดทานอาหารแต่ละชุดจะใช้เวลาในการซัดกลึงตบแต่งไม้ เวลาในการประกอบชุดทานอาหารเข้าด้วยกันและปริมาณวัตถุดิบ (ไม้) ต่างกันตามชนิดของชุดทานอาหารที่ผลิต ถ้าไรที่บริษัทจะได้รับจากการจำหน่ายชุดทานอาหารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ทางบริษัทต้องการทราบว่าควรจะผลิตชุดทานอาหารชนิดใดบ้าง เป็นจำนวนเท่าไร จึงจะทำให้ได้กำไรสูงสุด อนึ่งทางแผนกการตลาดของบริษัทได้ให้ข้อมูลมาว่า จากการสำรวจตลาดคาดว่าปริมาณชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง และ 6 ที่นั่ง คงจะจำหน่ายได้ไม่เกิน 40 ชุด และ 100 ชุด ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 กำไรที่ได้จากการขายสินค้าของบริษัทไทยพัฒนา

| | ชุดทานอาหาร | | | |
|--------------------------------------|-------------|-----------|------------|-------------|
| | 4 ที่นั่ง | 6 ที่นั่ง | 10 ที่นั่ง | ปริมาณที่มี |
| เวลาในการซัดกลึงตบแต่งไม้ (ชม./ชุด) | 4 | 5 | 10 | 2,000 ชม. |
| เวลาในการประกอบเข้าด้วยกัน (ชม./ชุด) | 1 | 1 | 3 | 400 ชม. |
| ปริมาณไม้ที่ใช้ (ลบ.ฟ./ชุด) | 1 | 1.5 | 3 | 500 ลบ.ฟ. |
| กำไรต่อหน่วย (บาท/ชุด) | 2,000 | 2,800 | 6,000 | |

การสร้างปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น จากปัญหาข้างต้นนี้ ทำได้ดังนี้ คือ การกำหนดนิยามของตัวแปรตัดสินใจ ในปัญหานี้ สิ่งที่เราต้องการทราบคือ จำนวนของชุดทานอาหารแต่ละชนิดที่บริษัทควรจะทำการผลิตให้

ตัวแปรตัดสินใจ x_1 = จำนวนชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง ที่จะทำการผลิต

x_2 = จำนวนชุดทานอาหารชนิด 6 ที่นั่ง ที่จะทำการผลิต

x_3 = จำนวนชุดทานอาหารชนิด 10 ที่นั่ง ที่จะทำการผลิต

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในปัญหานี้ เราต้องการจะหาค่าไรสูงสุดจากการจำหน่ายชุดทานอาหารแต่ละชนิดที่ผลิต

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad \text{Maximize } z = 2000x_1 + 2800x_2 + 6000x_3$$

กำหนดข้อจำกัดของปัญหา ในปัญหานี้มีข้อจำกัดอยู่สองประเภท คือ ข้อจำกัดเนื่องจากปริมาณทรัพยากรที่จำกัดและข้อจำกัดเนื่องมาจากการตลาด

สมการเงื่อนไขที่ 1 ข้อจำกัดจากเวลาที่ใช้ในการจัดตั้ง โต๊ะ

$$4x_1 + 5x_2 + 10x_3 \leq 2000$$

สมการเงื่อนไขที่ 2 ข้อจำกัดจากเวลาในการประกอบชุดทานอาหาร

$$1x_1 + 1x_2 + 3x_3 \leq 400$$

สมการเงื่อนไขที่ 3 ข้อจำกัดจากปริมาณไม้ที่ใช้ในการผลิต

$$1x_1 + 1.5x_2 + 3x_3 \leq 500$$

สมการเงื่อนไขที่ 4 ข้อจำกัดจากการตลาดของชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง

$$x_1 \leq 40$$

สมการเงื่อนไขที่ 5 ข้อจำกัดจากการตลาดของชุดทานอาหารชนิด 6 ที่นั่ง

$$x_2 \leq 100$$

ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ ชุดทานอาหารที่จะทำการผลิตขาย จะต้องมีค่าไม่ติดลบ
 $x_1, x_2, x_3 \geq 0$

2.3.3.3 ปัญหาการลงทุน

ชายคนหนึ่งมีเงินอยู่ 100,000 บาท กำลังพิจารณาว่าควรจะนำเงินจำนวนนี้ไปลงทุนในโครงการลงทุนสองโครงการอย่างไร ในช่วงเวลา 3 ปีนับจากนี้ไป เพื่อที่จะได้รับผลตอบแทนสูงสุด เงินทุกบาทที่ลงทุนในโครงการหนึ่งจะให้ผลตอบแทน 70 % โดยมีระยะเวลา

การลงทุนครั้งละ 1 ปี ส่วนโครงการที่สอง ให้ผลตอบแทน 150 % แต่มีระยะเวลาการลงทุน 2 ปี ดังนั้นชายผู้นี้ควรจะลงทุนอย่างไร

ปัญหาการลงทุนนี้ เราต้องการหาว่า ชายผู้นี้ควรจะลงทุนอย่างไรจึงจะได้รับผลตอบแทนจากการลงทุนสูงที่สุด กำหนดให้

ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} จำนวนเงินที่ตัดสินใจลงทุนในโครงการที่ i ที่เวลา j ปี โดย
ที่ $i = 1, 2$ และ $j = 1, 2, 3$

ปัญหาการลงทุน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Maximize } = z = 1.7x_{13} + 2.50x_{22}$$

กำหนดข้อจำกัดของปัญหา

สมการเงื่อนไขที่ 1 ข้อจำกัดการลงทุนในปีที่ 1

$$x_{11} + x_{21} \leq 100000$$

สมการเงื่อนไขที่ 2 ข้อจำกัดการลงทุนในปีที่ 2

$$-1.7x_{11} + x_{12} + x_{22} \leq 0$$

สมการเงื่อนไขที่ 3 ข้อจำกัดการลงทุนในปีที่ 3

$$-1.7x_{12} - 2.5x_{21} + x_{13} \leq 0$$

ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ จำนวนเงินที่ลงทุนจะต้องไม่ติดลบ $x_{ij} \geq 0$

2.4 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

วิธีฮิวริสติกเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาที่ใช้หลักเกณฑ์ของกระบวนการต่าง ๆ นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบ และลดปริมาณการคำนวณให้น้อยลง มีการใช้กฎการตัดสินใจมาพิจารณาตัดสินใจปัญหาอย่างเป็นขั้นเป็นตอน ซึ่งวิธีการจะถูกทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งบรรลุเป้าหมายของปัญหานั้น ๆ ซึ่งคำตอบของการแก้ปัญหาด้วยวิธีฮิวริสติกนี้จะเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimum) การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristic Search) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ความซับซ้อนสูง ใช้เวลานานในการแก้ปัญหา ต่างจากการค้นหาคำตอบ

ธรรมดา ซึ่งเหมาะกับข้อมูลมีขนาดไม่ใหญ่มาก โดยจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่ละตัวจนครบ การค้นหาคำตอบธรรมดานี้จะให้คำตอบที่ถูกต้องและเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเสมอ (optimal solution) แต่ในบางครั้งข้อมูลมีขนาดใหญ่มากการตรวจสอบข้อมูลที่ละตัวจนครบเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้องที่สุดคงเป็นไปได้ยาก ลักษณะของปัญหาเหล่านี้ เช่น การทางเดินที่สั้นที่สุดของ 77 จังหวัด ที่แต่ละจังหวัดมีทางเดินที่เชื่อมต่อกัน ถ้าจะหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเราจะต้องเปรียบเทียบเส้นทางของแต่ละจังหวัด ซึ่งเป็นจำนวนมหาศาลและอาจไม่สามารถเปรียบเทียบให้เสร็จได้ในเวลาที่มีอย่างจำกัด ดังนั้นการแก้ไขปัญหาแบบนี้จึงต้องอาศัยวิธีฮิวริสติก วิธีการนี้จะเลือกคำตอบที่เหมาะสมให้กับปัญหาเท่านั้น ซึ่งอาจใช่หรือไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด เรียกคำตอบลักษณะนี้ว่า คำตอบใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal solution) ดังนั้นวิธีฮิวริสติกจึงได้รับความนิยมนำมาใช้แก้ปัญหาเหล่านั้น ระบบที่มีการประยุกต์ใช้วิธีฮิวริสติก ได้แก่ ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System : ES) และ ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent :AI) เป็นต้น

ในปัจจุบันการแก้ปัญหาด้วยฮิวริสติกได้รับความสนใจมาก จึงได้มีการพัฒนาการค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกมากมาย โดยได้เลียนแบบวิถีชีวิตของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ กระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมหรือแม้กระทั่งกระบวนการเรียนรู้ของมนุษย์ เป็นต้น การค้นหาด้วยวิธีฮิวริสติกมีเครื่องมือที่สำคัญช่วยการค้นหาแบบนี้คือ ฮิวริสติกฟังก์ชัน (Heuristic function) ซึ่งมีหน้าที่หาความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา เพื่อกำหนดทิศทางของการค้นหาคำตอบ ดังนั้นจุดประสงค์ที่แท้จริงของฮิวริสติกฟังก์ชันก็คือ การกำกับทิศทางของกระบวนการค้นหา เพื่อให้อยู่ในทิศทางที่ได้ประโยชน์สูงสุด โดยจะมีการประเมินค่าฟังก์ชันเหมาะสม (fitness function) เพื่อตรวจสอบการบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ในหัวข้อนี้ได้ยกตัวอย่างการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกในหัวข้อย่อต่อไปนี้

2.4.1 การค้นหาคำตอบด้วยกริดดี้อัลกอริทึม

กริดดี้อัลกอริทึม (Greedy Algorithm) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดก่อน (Best first search) ที่ง่ายที่สุด โดยหลักการของการค้นหาแบบนี้คือ การเลือกคำตอบที่ดีที่สุดตลอดเวลาหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นวิธีตะกละตะกลาม (greedy) ซึ่งในการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดนี้จะพิจารณาค่าที่วัดได้จากสถานะปัจจุบันที่ดีที่สุดเพื่อไปยังสถานะถัดไปและจะดำเนินการเลือกสถานะปัจจุบันที่ดีที่สุดจนกระทั่งบรรลุเป้าหมาย ยกตัวอย่าง ถ้า A คือค่าที่วัดได้จากสถานะปัจจุบัน ดังนั้นในการเลือกการเคลื่อนที่ไปยังสถานะถัดไปจะเลือกจากตำแหน่งที่มีค่า A ดีที่สุด โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยกริดดี้อัลกอริทึมได้ดังนี้

- 1) เลือกสถานะเริ่มต้นกำหนดให้เป็นสถานะปัจจุบัน
- 2) หาค่า A ที่ได้จากสถานะปัจจุบัน

2.1) ถ้า $A = 0$ แสดงว่าสถานะปัจจุบันคือสถานะเป้าหมาย ให้แสดงคำตอบและจบกระบวนการ

2.2) ถ้า $A \neq 0$ ให้สร้างสถานะถัดไปให้กับสถานะปัจจุบัน จากนั้นหาค่า A ให้กับสถานะถัดไป เลือกสถานะถัดไปที่มีค่า A ดีที่สุด และกำหนดให้สถานะถัดไปเป็นสถานะปัจจุบัน

3) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2

ตัวอย่าง การใช้กริด์อัลกอริทึมแลกเหรียญให้ได้จำนวนเหรียญน้อยที่สุดจากจำนวนเงินที่กำหนด เช่น สมมติว่าประเทศแห่งหนึ่งมีเงินเหรียญใช้อยู่ 4 ขนาด 1 บาท 5 บาท และ 10 บาท ถ้าต้องการแลกเงินจำนวน 16 บาท จะได้เหรียญน้อยที่สุดจำนวนกี่เหรียญ

สถานะที่ 1 เหรียญ 10 บาท ค่าของ $A = 6$ (16-10)

เหรียญ 5 บาท ค่าของ $A = 11$ (16-5)

เหรียญ 1 บาท ค่าของ $A = 15$ (16-1)

เลือกเหรียญ 10 บาท ค่าของเงินที่เหลือ $16 - 10 = 6$ บาท ต่อไปหาเหรียญจากเงินที่เหลือ
สถานะที่ 2 เหรียญ 10 บาท ไม่สามารถใช้ได้เพราะ ค่าของเหรียญมากกว่าค่าของเงินที่เหลือ

เหรียญ 5 บาท ค่าของ $A = 1$ (6-5)

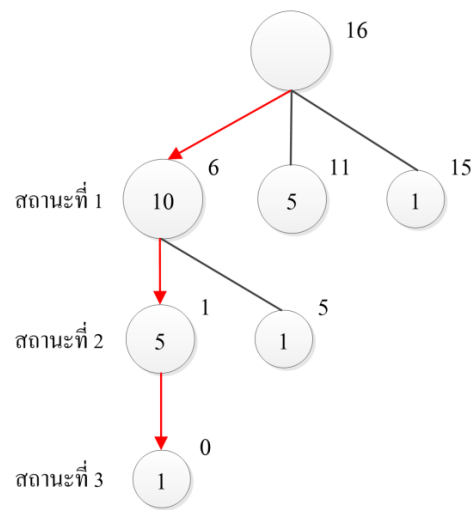
เหรียญ 1 บาท ค่าของ $A = 5$ (6-1)

เลือกเหรียญ 5 บาท ค่าของเงินที่เหลือ $6 - 5 = 1$ บาท ต่อไปหาเหรียญจากเงินที่เหลือ
สถานะที่ 3 เหรียญ 10 บาท ไม่สามารถใช้ได้เพราะ ค่าของเหรียญมากกว่าค่าของเงินที่เหลือ

เหรียญ 5 บาท ไม่สามารถใช้ได้เพราะ ค่าของเหรียญมากกว่าค่าของเงินที่เหลือ

เหรียญ 1 บาท ค่าของ $A = 0$ (1-1)

ดังนั้น ถ้าต้องการแลกเงินจำนวน 16 บาท เราจะได้เหรียญ 10 บาท จำนวน 1 เหรียญ เหรียญ 5 บาท จำนวน 1 เหรียญ และเหรียญ 1 บาท จำนวน 1 เหรียญ แสดงกระบวนการดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแสดงการแลกเหรียญด้วยกริด้อัลกอริทึม

2.4.2 การค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลอง

การค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) เป็นอัลกอริทึมที่จำลองกระบวนการหลอมโลหะ โดยอาศัยหลักการลดอุณหภูมิของการหลอมโลหะที่มีความร้อนที่จุดหลอมเหลวสูงมากให้ลดลงมาอยู่ที่อุณหภูมิปกติ โดยที่การลดอุณหภูมินี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ฉับของโลหะคือ มีความแข็งและเหนียว เมื่อโลหะหลอมตัว (Annealing) อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว การทำให้โลหะนั้นเย็นตัวอย่างช้า ๆ จนถึงที่อุณหภูมิต่ำที่โลหะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งก็คือกระบวนการลดพลังงานที่สะสมในโลหะ จากการที่โลหะมีพลังงานความร้อนสะสมอยู่สูงมากให้สถานะสุดท้ายมีพลังงานคงที่ ถ้าอุณหภูมิลดลงเร็วเกินไปก็จะทำให้โลหะเกิดความเสียหายหรือมีคุณสมบัติที่ไม่ดี คือ เปราะแตกหักง่าย แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงช้าเกินไปก็จะเป็นการเสียเวลาในการดำเนินงาน ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิจึงสำคัญ เพื่อที่จะทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ของการหลอมโลหะ จึงต้องมีฟังก์ชันการลดลงของอุณหภูมิตที่เหมาะสม เนื่องจากวิธีการนี้ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานแก้ปัญหาต่าง ๆ และเป็นวิธีการที่เข้าใจง่าย ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการนี้ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิง ไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งรายละเอียดวิธีนี้จะอธิบายในบทที่ 3.4 โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลองได้ดังนี้

- 1) สุ่มประชากรเริ่มต้นกำหนดให้เป็นสถานะปัจจุบัน
- 2) ประเมินค่าความเหมาะสมของสถานะปัจจุบัน
- 3) สร้างสถานะใหม่จากสถานะปัจจุบัน

- 4) ประเมินค่าความเหมาะสมของสถานะใหม่
- 5) เปรียบเทียบสถานะใหม่กับสถานะปัจจุบัน
 - 5.1) ถ้าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน กำหนดสถานะใหม่ให้เป็นสถานะปัจจุบัน
 - 5.2) ถ้าสถานะใหม่แย่กว่าสถานะปัจจุบัน ตัดสินใจด้วยความน่าจะเป็นว่าจะยอมรับสถานะใหม่หรือไม่
- 6) ปรับค่าอุณหภูมิ
- 7) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งถึงเกณฑ์การหยุดทำงาน โดยสถานะสุดท้ายจะเป็นคำตอบของปัญหา

2.4.3 การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม

การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เป็นอัลกอริทึมที่จำลองกระบวนการวิวัฒนาการของธรรมชาติ โดยมีหลักการคัดเลือกสายพันธุ์ของธรรมชาติเพื่อนำไปสู่สายพันธุ์ใหม่ที่ดีขึ้น โดยผู้ที่จำลองกลไกการวิวัฒนาการทางธรรมชาติที่ว่าด้วย “ความอยู่รอดของผู้ที่แข็งแรงที่สุด” (Survival of the Fittest) คือ Charles Darwin เนื่องจากในทางธรรมชาติ การดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตที่มีทรัพยากรในธรรมชาติอย่างจำกัด สิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงที่สุดเท่านั้นที่จะอยู่รอดและปกครองผู้ที่อ่อนแอกว่าได้ การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมนี้จะหาผู้ที่แข็งแรงที่สุดในระหว่างการวิวัฒนาการของประชากรรุ่นต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาในแต่ละรุ่น (generation) จะประกอบไปด้วยประชากรของสตริง (string) สตริงจะแสดงคุณสมบัติของสมาชิกแต่ละตัวในประชากรนั้น ซึ่งเป็นการเลียนแบบวิธีการของโครโมโซม (chromosome) โดยสมาชิกหรือสตริงแต่ละตัวในประชากรนี้จะแสดงถึงคำตอบที่เป็นไปได้ในปริภูมิปัญหา (problem space) และสตริงเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการของการวิวัฒนาการเพื่อความอยู่รอด สตริงที่มีค่าเหมาะสม (fitness) สูงจะถูกเลือกสรรให้อยู่หรือสืบพันธุ์ต่อไปในรุ่นถัดไป โดยกระบวนการเลือกสรร (selection) จะเลือกประชากรที่ดีคือ มีค่าความเหมาะสมสูงเป็นสายพันธุ์พ่อแม่ (parent) แล้วจะเลือกถ่ายทอดคุณสมบัติที่ดีของพ่อแม่มาสู่ลูก เป็นเหตุให้ลูกมีแนวโน้มที่ดีกว่าสายพันธุ์พ่อแม่และแม่ วิธีการนี้เรียกว่า การตัดข้าม (crossover) ซึ่งจำนวนประชากรบางส่วนจะถูกตัดออกไป เพื่อเว้นที่ว่างไว้สำหรับลูกที่เกิดใหม่ ในที่สุดก็จะทำให้เกิดรุ่นใหม่ และวิวัฒนาการจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนเมื่อความแตกต่างของคุณสมบัติที่ดีในรุ่นใหม่กับรุ่นเดิมไม่แตกต่างกันมากนั้นก็หมายความว่า การวิวัฒนาการถึงจุดสิ้นสุด การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมก็จะจบการทำงานลง โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมได้ดังนี้

- 1) สุ่มประชากรเริ่มต้น
- 2) ประเมินค่าความเหมาะสมของประชากร
- 3) สร้างประชากรใหม่ด้วยกระบวนการทางพันธุกรรมดังนี้
 - 3.1) การเลือกสรร (Selection) เป็นการสำเนาประชากรที่ดีที่สุดเพื่อการทำกระบวนการทางพันธุกรรม
 - 3.2) ตัดข้าม (Crossover) เป็นการตัดข้ามประชากรที่ได้รับการเลือกสรร
 - 3.3) การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นการปรับปรุงประชากรด้วยการสุ่ม
- 4) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งความแตกต่างของรุ่นใหม่กับรุ่นเดิมไม่แตกต่างกัน ประชากรที่ดีที่สุด หลังจากการทำงานของหลายรุ่นจะเป็นคำตอบของปัญหา

2.4.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค

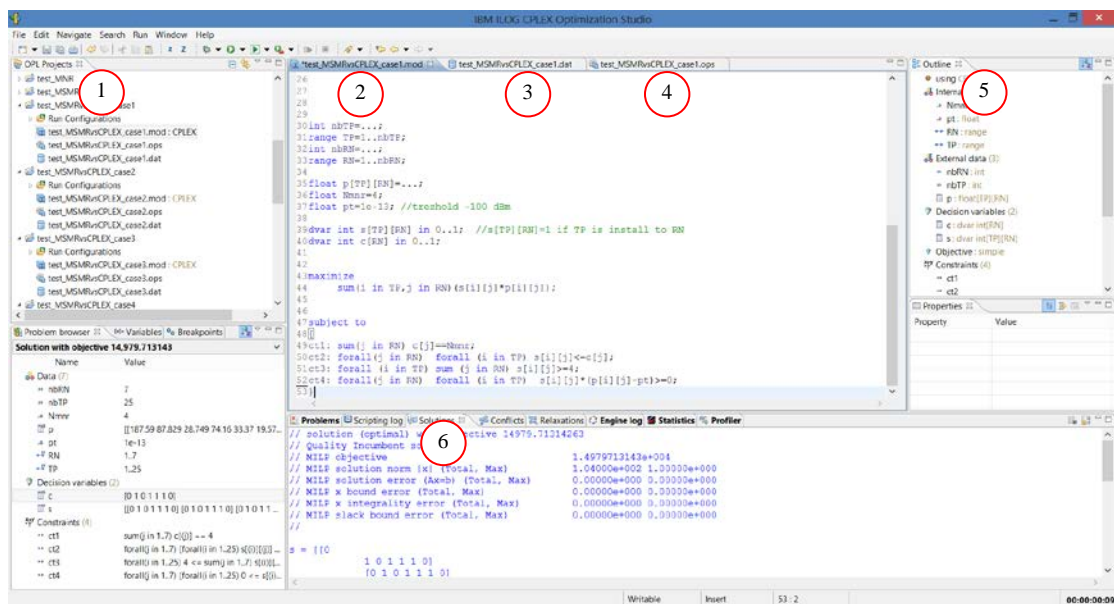
การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) เป็นอัลกอริทึมที่ได้สังเกตลักษณะการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตจากธรรมชาติโดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของกลุ่มสิ่งมีชีวิต เช่น ผีเสื้อและฝูงปลา เป็นต้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เป็นการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิตองค์ประกอบย่อย ๆ ที่มีเคลื่อนที่ไปด้วยกันอย่างเข้าจังหวะกัน (synchronous) โดยปลาหรือนกสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยกันเป็นฝูง สามารถแยกตัวออกจากฝูงแล้วรวมตัวกลับเข้ามาในฝูงอีกครั้งอย่างประสานกลมเกลียว ซึ่งเป็นพฤติกรรมทางสังคมของสิ่งมีชีวิต การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคเป็นอัลกอริทึมเชิงประชากร โดยมีคุณลักษณะหลาย ๆ อย่างที่เหมือนกับการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม (GA) โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคมีการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้น มีการประเมินค่าความเหมาะสม (fitness) ของแต่ละประชากรด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในรอบการคำนวณหรือทุกรุ่น (generation) ซึ่งการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคมีความแตกต่างไปจาก GA ตรงที่ไม่มีกระบวนการทางพันธุกรรมเช่น การทำครอสโอเวอร์หรือมิวเทชัน ฯลฯ โดยคำตอบของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคถูกแทนด้วยอนุภาค (particle) ที่ซึ่งเคลื่อนที่ไปในปริภูมิค้นหา (search space) โดยมีทิศทางไปตามอนุภาคที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขณะนั้น ๆ สิ่งที่น่าสนใจของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคคือ ความเรียบง่ายของอัลกอริทึม จึงได้รับความนิยมสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ งานที่สามารถใช้ GA

ได้ รายละเอียดของการหาค่าเหมาะที่สุดของกลุ่มอนุภาคถูกนำเสนอ James, K. and Eberhart, R. (1995) โดยสามารถสรุปกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดของกลุ่มอนุภาคได้ดังนี้

- 1) สุ่มค่าตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคเริ่มต้น
- 2) ประเมินค่าความเหมาะสมของอนุภาค
- 3) ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคดีกว่าค่าความเหมาะสมที่สุดของกลุ่มให้ปรับค่าความเหมาะสมของกลุ่ม
 - 3.1) ถ้าค่าความเหมาะสมของกลุ่มบรรลุวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบให้สิ้นสุดการทำงาน
- 4) ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคดีกว่าค่าความเหมาะสมที่สุดของอนุภาคให้ปรับค่าความเหมาะสมของอนุภาค
- 5) ปรับค่าตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค
- 6) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2

2.5 โปรแกรม IBM ILOG CPLEX

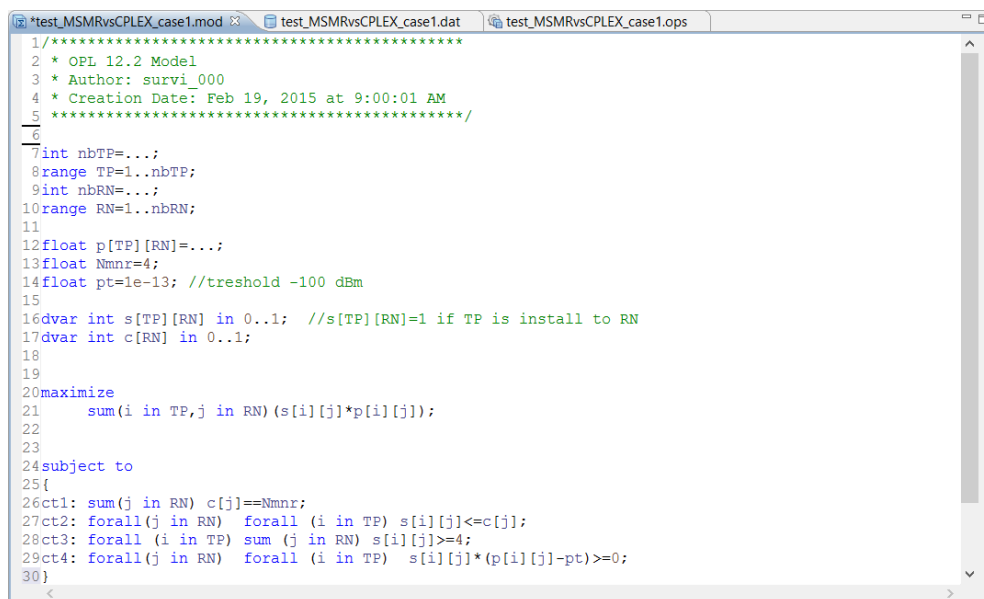
ในการแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาผลคำตอบที่ดีที่สุดของการปัญหาลักษณะต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องใช้การประมวลผลทางคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกรวดเร็ว และได้คำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้แก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้น โดยสามารถแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมได้อย่างไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพ โดยโปรแกรมนี้จะใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการตามวัตถุประสงค์ของปัญหา ซึ่งหน้าต่างของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.2 โดยอธิบายรายละเอียดตามหมายเลข 1-6



รูปที่ 2.2 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

- หมายเลข 1 (OPL Project) แสดงในส่วนของหน้าต่างไฟล์โครงการ (project) ที่ผู้สร้างไว้ในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio สำหรับการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยแต่ละโครงการจะประกอบไปด้วย 3 ไฟล์ คือ โมเดลไฟล์ (*.mod) คำสั่งไฟล์ (*.dat) และเซตตั้งไฟล์ (*.ops)
- หมายเลข 2 (model file editing area) แสดงในส่วนของหน้าต่างสำหรับป้อนคำสั่งด้วยภาษาของโปรแกรมที่ผู้ใช้งานต้องการคำนวณหาค่าที่ดีที่สุดของปัญหานั้น ๆ โดยคำสั่งเหล่านี้ผู้ใช้งานต้องทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งมีโครงสร้างหลักประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข แสดงดังรูป 2.3
- หมายเลข 3 (data file editing area) แสดงในส่วนของหน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลที่เป็นตัวแปรค่าคงที่ ตัวแปรในรูปของเมตริกซ์ (matrix) โดยข้อมูลเหล่านี้จะเป็นข้อมูลการนำเข้า (input) ที่ถูกเรียกใช้ในการคำนวณจากคำสั่งในส่วนของโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ 2.4
- หมายเลข 4 (setting file editing area) แสดงในส่วนของหน้าต่างสำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหา เช่น การจำกัดเวลา (time) ตั้งค่าหน่วยความจำ (memory) จำนวนการวนซ้ำ (iteration) และการตั้งค่าอัลกอริทึม (algorithm) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตอบ แสดงดังรูปที่ 2.5

- หมายเลข 5 (outline view) แสดงในส่วนของหน้าต่างส่วนสรุปโดยย่อ (outline) ของโมเดลไฟล์ คาด้าไฟล์และเซตตั้งไฟล์ เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของโครงการ
- หมายเลข 6 (solution log area) แสดงในส่วนของหน้าต่างคำตอบที่โปรแกรมคำนวณได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ของปัญหา รวมไปถึงแสดงปัญหาที่พบในระหว่างการคำนวณหาคำตอบ



```

1/******
2 * OPL 12.2 Model
3 * Author: survi_000
4 * Creation Date: Feb 19, 2015 at 9:00:01 AM
5 *****/
6
7int nbTP=...;
8range TP=1..nbTP;
9int nbRN=...;
10range RN=1..nbRN;
11
12float p[TP][RN]=...;
13float Nmnr=4;
14float pt=1e-13; //threshold -100 dBm
15
16dvar int s[TP][RN] in 0..1; //s[TP][RN]=1 if TP is install to RN
17dvar int c[RN] in 0..1;
18
19
20maximize
21    sum(i in TP,j in RN) (s[i][j]*p[i][j]);
22
23
24subject to
25{
26ct1: sum(j in RN) c[j]==Nmnr;
27ct2: forall(j in RN) forall (i in TP) s[i][j]<=c[j];
28ct3: forall (i in TP) sum (j in RN) s[i][j]>=4;
29ct4: forall(j in RN) forall (i in TP) s[i][j]*(p[i][j]-pt)>=0;
30}

```

รูปที่ 2.3 model file editing area

```

1/*****
2 * OPL 12.2 Data
3 * Author: survi_000
4 * Creation Date: Feb 19, 2015 at 9:00:01 AM
5 *****/
6nbTP=25;
7nbRN=7;
8
9p=[[187.5882364 87.82864906 28.74875427 74.16002951 33.37022633 19.56951913 22.02994232]
10 [341.9758128 242.9287761 91.67592249 101.9553331 84.57323459 47.20998305 30.05778983]
11 [197.7809353 307.1829847 164.1984927 85.6171214 81.36648203 63.76207562 33.18116561]
12 [86.47610382 223.4488835 288.6777767 38.47225348 77.4539303 77.84776177 43.61574734]
13 [42.8837318 83.55330275 167.57996 21.59572985 38.9351219 61.34996855 18.86718602]
14 [270.7516333 90.25849352 37.73882013 175.115938 92.83194385 35.50637925 60.94506581]
15 [479.6410013 323.9358494 96.14733414 359.1776691 181.4751396 92.35855706 74.74563723]
16 [279.320596 745.2632742 330.0606311 157.9366349 243.5364202 204.2566792 95.60581149]
17 [104.8499596 258.3461686 687.2415668 85.36382693 154.4334579 289.0255696 56.25970733]
18 [39.79991236 94.45590812 340.3884431 29.2237947 81.48508668 198.0861336 50.19576355]
19 [200.1134619 90.02544219 26.92604816 285.9349777 82.2064995 41.82502289 80.7691096]
20 [320.3679102 199.7330145 70.46054396 731.3435552 287.1748216 129.495939 228.671881]
21 [193.1490191 299.075061 206.5869752 265.1742484 782.4454301 358.0371397 268.2671242]
22 [97.94503715 164.7004023 282.8399414 88.66837378 255.6324459 759.043518 170.8176648]
23 [35.23154455 80.85113984 212.6482652 41.50954586 115.1304736 267.6549909 68.62318714]
24 [75.63242792 46.13364126 21.69616653 196.4567703 98.73735526 30.68314209 107.9639795]
25 [114.1312028 67.67791145 36.36328889 268.23977 187.9205446 90.38994077 247.1390147]
26 [66.42495917 86.29903859 93.85339278 185.2736361 319.8903978 206.8322429 658.4652206]
27 [64.91260445 67.08584477 104.1630591 84.94348652 147.3227284 280.9484892 250.4654536]
28 [20.3860974 39.85358822 96.54812401 27.62820491 82.129318 214.4574961 94.78666015]
29 [33.40092197 22.91821656 16.65890957 80.46614921 40.39437245 16.97797718 90.39554304]
30 [30.49863854 31.10102557 32.18431068 104.9008345 79.82202657 45.68680105 219.3864062]

```

รูปที่ 2.4 data file editing area

The screenshot displays the 'Mathematical programming / General' settings window in OPL 12.2. On the left, a tree view shows the navigation structure with 'General' selected under 'Mathematical programming'. The main area contains the following settings:

- Advanced start switch: Standard advanced start
- Computation time reporting: Wall clock time
- Algorithm for continuous problems: Automatic
- Algorithm for continuous quadratic optimization: Automatic
- Global default thread count: 0
- Global time limit: 1.0E75
- Directory for working files: . (with a 'Browse...' button)
- Memory available for working storage: 128.0
- Parallel mode switch: Automatic

รูปที่ 2.5 setting file editing area

จากการที่ได้อธิบายรายละเอียดของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio มาพอสมควร โดยผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียด เพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการใช้งานอย่างละเอียดได้ในคู่มือสำหรับการใช้งาน อ้างอิงจาก <http://www.ibm.com> จากการอธิบายข้างต้นจะเห็นได้ว่าโปรแกรมนี้เป็นเครื่องมือที่ช่วยแก้ปัญหาในการค้นหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี โดยผู้ใช้งานจะต้องศึกษาการแปลงสมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมเสียก่อน ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักสามส่วน คือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของปัญหา เพื่อให้สามารถใช้งานโปรแกรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

ในกรณีที่ปัญหาที่ต้องการแก้ไขมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น โปรแกรมนี้ไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เนื่องจากการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหานั้นใช้เวลาอันยาวนานเกินไป เพราะอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์จะคำนวณหาคำตอบที่เป็นไปได้ทุกคำตอบ ด้วยเหตุนี้ อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์จึงไม่เหมาะที่จะใช้แก้ปัญหาสำหรับปัญหานั้นๆ ควรพิจารณาใช้การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกช่วยในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4

บทที่ 3

การพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับอาคารหลายชั้น

ในบทนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น โดยความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่า ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.1 แนวคิดสำหรับการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น หัวข้อ 3.2 แนวทางการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น หัวข้อ 3.3 โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น 3.4 กระบวนการทำงานของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง (Simulated Annealing) 3.5 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

3.1 แนวคิดสำหรับการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น

ปัจจุบันระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารมีการพัฒนาอย่างแพร่หลายเนื่องจากระบบระบุตำแหน่งภายนอกอาคาร (Global Positioning Systems: GPS) ไม่สามารถนำมาใช้ระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้เนื่องจากตัวอาคารเป็นตัวบดบังความแรงสัญญาณที่ดาวเทียมส่งมายังวัตถุหรืออุปกรณ์ที่ต้องการทราบตำแหน่ง เห็นได้ว่าเทคโนโลยีของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารตามมาตรฐานการสื่อสารไร้สาย IEEE 802.15.4 ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ตรวจหาตำแหน่งผู้ป่วยหรืออุปกรณ์ภายในโรงพยาบาล ตรวจหาวัตถุระเบิดในพื้นที่เสี่ยงภัย ตรวจจับสินค้าในโรงงานการผลิตหรือการขนส่งทางอุตสาหกรรม ระบบตำแหน่งผู้เยี่ยมชมในพิพิธภัณฑ์ขนาดใหญ่ ระบบตำแหน่งบุคคลภายในสนามบินหรือสถานีขนส่งขนาดใหญ่ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนต่ำ (low complexity) มีความถูกต้อง (accuracy) และความแม่นยำ (precision) ในการระบุตำแหน่งสูงคือวิธีฟิงเกอร์ปริ้นท์ โดยวิธีการนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกออฟไลน์เฟส (Offline phase) ในส่วนนี้โนดวัตถุ (Target node) จะเก็บ

รวบรวมข้อมูลค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength: RSS) จากโนดอ้างอิง (Reference node) ที่ติดตั้งในพื้นที่ให้บริการเพื่อนำค่าความแรงสัญญาณที่รับได้สร้างฐานข้อมูลใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลในออนไลน์เฟส ส่วนที่สองออนไลน์เฟส (Online phase) ส่วนนี้จะเป็นการระบุตำแหน่งของวัตถุ โดยโนดวัตถุจะวัดค่าความแรงสัญญาณ ณ จุดที่ต้องการทราบตำแหน่งแล้วนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลด้วยวิธีระยะห่างยูคลิดีเนียน (Euclidean Distances) เป็นวิธีการหาข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน (Matching) ที่สุด จะเห็นว่าในส่วนออฟไลน์เฟสของเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนที่นี้จำเป็นจะต้องมีตำแหน่งโนดอ้างอิงติดตั้งอยู่ก่อนแล้วและในความเป็นจริงรูปแบบของอาคารพื้นที่ให้บริการก็มีความแตกต่างกันในแต่ละสถานที่ ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารคือ การเลือกกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมให้กับพื้นที่ให้บริการ

จากการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของอาคารได้เห็นว่า อาคารในปัจจุบันมีทั้งที่เป็นอาคารประเภทชั้นเดียวและอาคารประเภทหลายชั้น ซึ่งอาคารส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นอาคารประเภทหลายชั้น โดยอาคารประเภทนี้มีโครงสร้างทางกายภาพซับซ้อนมากกว่าอาคารประเภทชั้นเดียวเนื่องจากลักษณะพื้นที่ของอาคารในแต่ละชั้นมีความซับซ้อนไม่เหมือนกัน โดยอาคารประเภทชั้นเดียวนั้นกำหนดพิกัดเป็น 2 มิติ (x, y) โดยที่ x คือ ความกว้างและ y คือ ความยาวของพื้นที่อาคาร แต่สำหรับอาคารประเภทหลายชั้นจะมีการกำหนดพิกัดเป็น 3 มิติ (x, y, z) โดยที่ x คือ ความกว้าง y คือ ความยาว และ z คือ ความสูงของพื้นที่อาคาร

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งสามารถใช้กำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่อยู่ในอาคารประเภทชั้นเดียวและในอาคารประเภทหลายชั้นได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้กับอาคารที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันได้

3.2 แนวทางการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้แนวทางอ้างอิงจากงานวิจัย Aomumpai, S. (2013) ซึ่งได้นำเสนอการวางตำแหน่งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารประเภทชั้นเดียวด้วยวิธีการกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ วิธีดังกล่าวเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายรวมถึงเป็นส่วนหนึ่งของเทคนิคการวิจัยดำเนินการ (operation research) โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้้นำแนวทางการกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของสมการทาง

คณิตศาสตร์ มาใช้กับการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งการโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ที่ใช้แก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimal) นั้นไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาภายในอาคารหลายชั้นที่มีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนสูง มีจำนวนตัวแปรจำนวนมากหรือแม้กระทั่งถูกจำกัดด้วยเวลาในการค้นหาคำตอบ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาวิธีการแก้ปัญหาที่มีการหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal) ด้วยวิธีฮิวริสติกเป็นวิธีการแก้ปัญหาคำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งยังคงประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญของการกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์คือ สมการวัตถุประสงค์ ตัวแปรตัดสินใจและสมการเงื่อนไข

โดยเทคนิคที่นำเสนอแบ่งการทำงานเป็น 2 เฟส แสดงดังรูปที่ 3.1 การทำงานในเฟสที่ 1 คือหาจำนวนและตำแหน่งเริ่มติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการที่พิจารณา โดยการทำงานในขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณหาจำนวนเริ่มติดตั้ง โหนดอ้างอิงจากขนาดพื้นที่พิจารณาและกำหนดตำแหน่งเริ่มติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform placement) ถัดไปในเฟสที่ 2 เป็นการหาจำนวน โหนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของพื้นที่ให้บริการที่พิจารณา โดยการติดตั้ง โหนดอ้างอิงจะต้องทำให้ระบบมีค่าสูงที่สุดของผลรวมค่าความแรงสัญญาณมากที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจาก โหนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งในอาคาร (Maximum Summation of Max RSSI: MSMR) ซึ่งความต้องการนี้เขียนได้ดังฟังก์ชัน (3.1)

$$f(C) = \text{Maximize} \sum_{vi \in T} \max_{\forall j \in R} (S_{ij} P_{ij}) \quad (3.1)$$

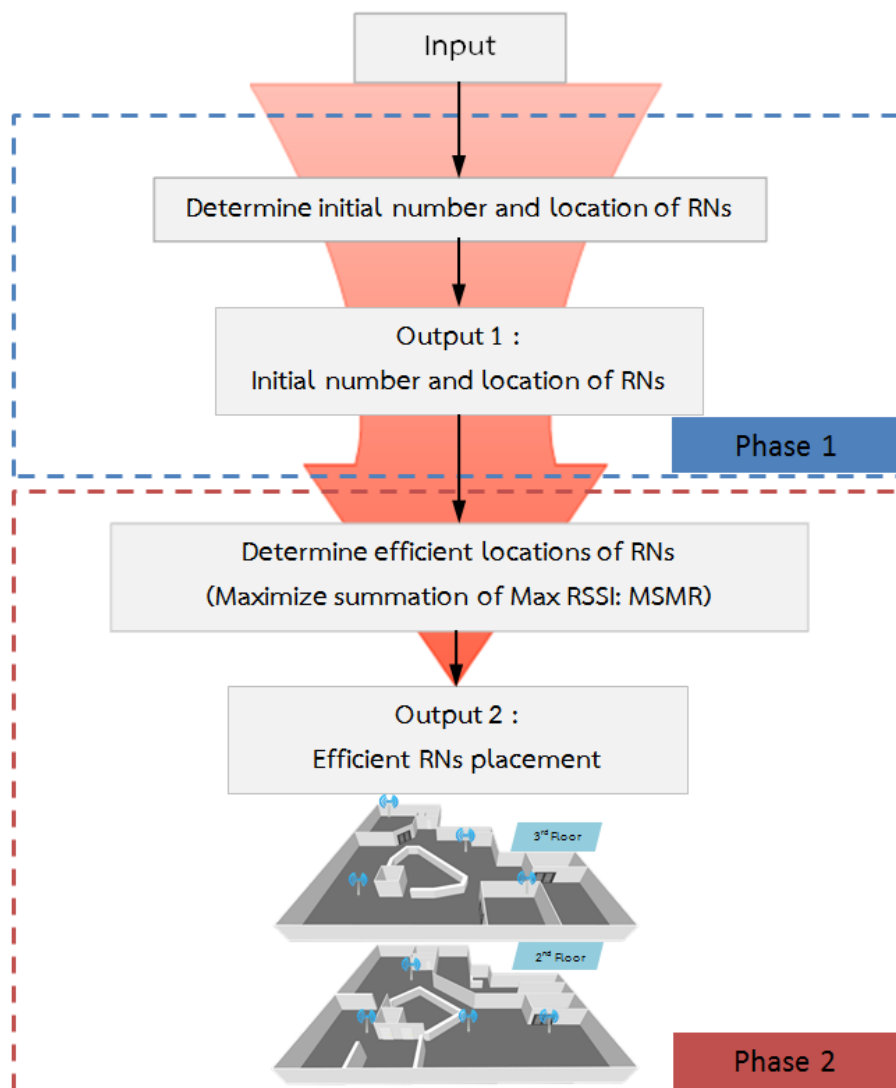
การดำเนินการทั้ง 2 เฟส มีเงื่อนไขเดียวกันซึ่งประกอบด้วย 1. เงื่อนไขที่หนึ่งเงื่อนไขสำหรับการรับประกันคุณภาพความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งทดสอบสัญญาณที่ได้รับจาก โหนดอ้างอิงจะต้องมีระดับของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จาก โหนดอ้างอิงมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (threshold) โดยจะต้องมีค่ามากกว่า -100 dBm อ้างอิงจากงานวิจัย Maneerat, K. (2013)

2. เงื่อนไขสำหรับการกำหนดจำนวนของสัญญาณที่ตำแหน่งทดสอบได้รับสัญญาณจาก โหนดอ้างอิง ซึ่งจำเป็นต้องทราบถึงจำนวน โหนดอ้างอิงอย่างน้อยที่สุดสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัย Kaemarungsi, K. (2005) ได้เสนอให้ทุกตำแหน่งทดสอบสัญญาณซึ่งอยู่ทั่วบริเวณของอาคารได้รับสัญญาณจาก โหนดอ้างอิงอย่างน้อย N_r โหนด ($N_r = 4$) จะช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

3. เงื่อนไขสำหรับการกำหนดการได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิง โดยที่ตำแหน่งทดสอบสัญญาณจะได้รับสัญญาณจาก โนคอ้างอิงที่ได้ถูกเลือกติดตั้งไว้ในระบบ

4. เงื่อนไขการกำหนดจำนวน โนคอ้างอิงทั้งหมดที่ใช้ติดตั้งในอาคารสำหรับระบบระบุตำแหน่ง

สุดท้ายคำตอบที่ได้จะเป็นตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสม มีจำนวน โนคอ้างอิงที่เพียงพอ กับลักษณะรูปแบบพื้นที่ที่ให้บริการและอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึง รายละเอียดโครงสร้างการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สาย ภายในอาคารหลายชั้น



รูปที่ 3.1 กระบวนการสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิง

3.3 โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

จากหัวข้อที่ 3.2 การดำเนินการในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นเป็นการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่มีความเหมาะสมกับลักษณะรูปแบบอาคารขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน ใช้จำนวนโนดอ้างอิงที่เหมาะสมและมีความเข้มสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการระบบระบุตำแหน่งไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (Zigbee) ด้วยปัจจัยดังกล่าววิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาเทคนิคสำหรับกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นบนพื้นฐานของอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing Algorithm: SA) เพื่อให้ได้โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งที่ให้ค่าสูงที่สุดของผลรวมค่าความแรงสัญญาณมากที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งในอาคาร (Maximum Summation of Max RSSI: MSMR) เราตั้งชื่อเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ว่า MSMR-SA

เทคนิค MSMR-SA ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งมีกระบวนการในการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.2 ส่วนรูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการทำงานของเทคนิคค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งกระบวนการในการค้นหาคำตอบประกอบด้วยการทำงาน 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกเป็นการป้อนข้อมูลเริ่มต้นที่จำเป็นสำหรับการดำเนินการของระบบ (อธิบายในหัวข้อ 3.3.1) ขั้นตอนที่สองเป็นการประมาณจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับระบบ (อธิบายในหัวข้อ 3.3.2) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการหาจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง (อธิบายในหัวข้อ 3.3.3)

```

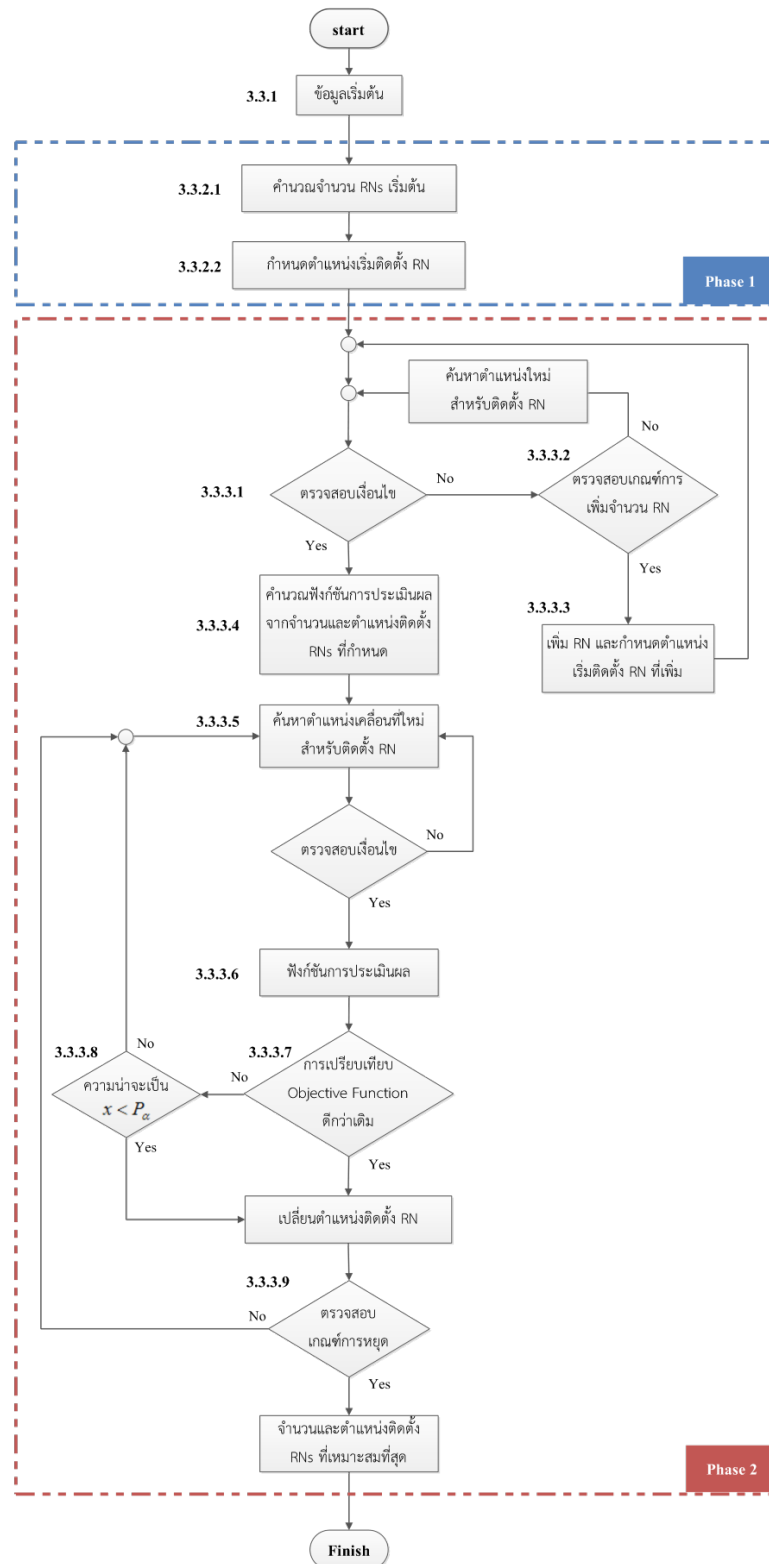
Input static parameters:  $\varphi$ ,  $Max\_noimprove$ ,  $CT_{max}$ ,  $CT_{min}$ ,  $RSS$ ,  $A_{floor}$ ,  $A_r$ , STP, candidates, dummy
Initialize  $CT = CT_{max}$ ,  $Max_{iter} = n$ ,  $iter = 0$ ,  $count\_noimprove = 0$ 

    Calculate initial number of RNs // 3.3.2.1
    Determine initial location of RNs // 3.3.2.2
    Check constraints // 3.3.3.1
    Check criteria increase number of RN // 3.3.3.2
    Evaluate  $cost = \Theta(S)$  // 3.3.3.4
    While  $CT > CT_{min}$  do // 3.3.3.9
        While  $iter < Max_{iter}$  do // 3.3.3.9
            Generate new assignment  $S_{new}$  from  $S$  // 3.3.3.5
            Check constraints // 3.3.3.1
            Evaluate  $cost_{new} = \Theta(S_{new})$  // 3.3.3.6
            Calculate  $\Delta cost = cost - cost_{new}$  // 3.3.3.7
            If  $\Delta cost < 0$  then
                 $count\_noimprove = 0$ 
                 $S = S_{new}$ 
                 $cost = cost_{new}$ 
            Else
                 $count\_noimprove ++$ 
                If ( $count\_noimprove > Max\_noimprove$ ) then End SA process
                Else If random [0,1]  $< e^{-\frac{\Delta cost}{CT}}$  // 3.3.3.8
                     $S = S_{new}$ 
                     $cost = cost_{new}$ 
                End If
            End If
        End While
         $iter ++$ 
    End While

     $iter = 0$ 
     $CT = \varphi CT$ 
     $Max_{iter} = \frac{Max_{iter}}{\varphi}$ 
End While

```

รูปที่ 3.2 Pseudo code ของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น (MSMR-SA)



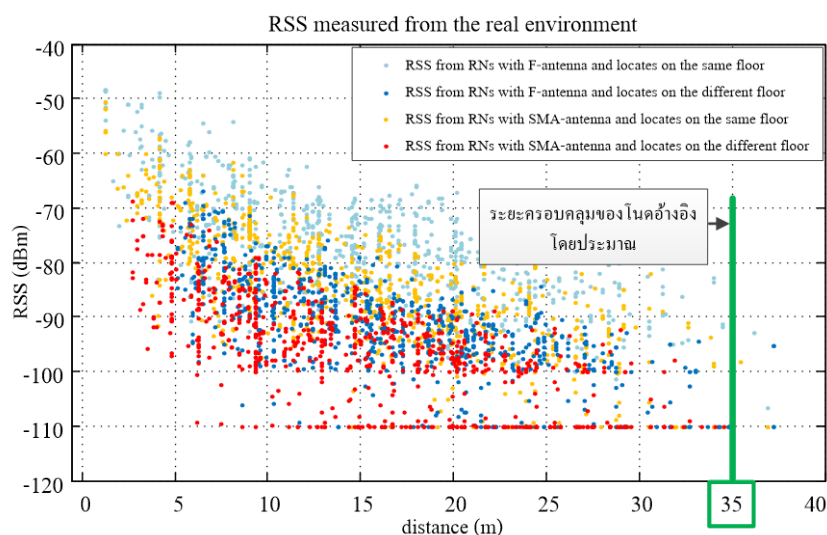
รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น (MSMR-SA)

3.3.1 ข้อมูลเริ่มต้น (Initial data) เป็นข้อมูลที่ป้อนให้กับระบบเพื่อที่ระบบจะนำไปใช้ในขั้นตอนการหาจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอจนกระทั่งกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ ของปัญหา ซึ่งข้อมูลเริ่มต้นนั้นประกอบด้วย

3.3.1.1 ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Received signal strength: RSS) เป็นค่าความเข้มสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณทุกจุดในพื้นที่ให้บริการของระบบระบุตำแหน่งที่ได้รับจากโนดอ้างอิง โดยค่าความเข้มสัญญาณนี้จะได้มาจากทุกตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงได้

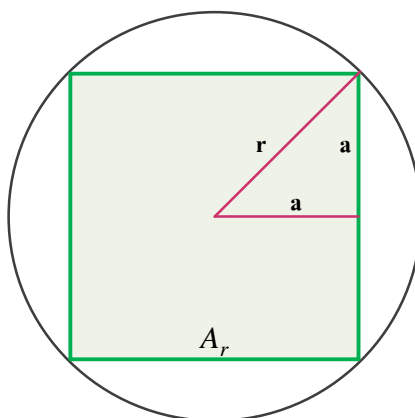
3.3.1.2 ขนาดของพื้นที่ที่ให้บริการ (A_{floor}) สำหรับขนาดของพื้นที่ที่ให้บริการในอาคารจะเป็นประมาณขนาดของพื้นที่ทั้งหมดอย่างง่าย โดยหาจากการรวมขนาดพื้นที่ในแต่ละชั้นด้วยระนาบ 2 มิติ (กว้าง x ยาว)

3.3.1.3 ขนาดพื้นที่ครอบคลุมของโนดอ้างอิงโดยประมาณ (A_r) ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ของ FreeScale MC13224 รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล กำลังส่งสูงสุดเท่ากับ +1.7dBm โดยมีระยะครอบคลุมประมาณ 35 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นข้อความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางจากการวัดจริง



รูปที่ 3.4 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางจากการวัดจริง

จากระยะครอบคลุมของโนคอ้างอิงโดยประมาณไม่สามารถจะกำหนดขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมของโนคอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคารได้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมและความซับซ้อนของพื้นที่ภายในอาคารทำให้ขนาดครอบคลุมของโนคอ้างอิงไม่เป็นรูปวงกลม ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมของโนคอ้างอิงโดยประมาณเป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณหาขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมได้ตามทฤษฎีบทพีทาโกรัสดังนี้



รูปที่ 3.5 ขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมของโนคอ้างอิงโดยประมาณ

พิสูจน์ $r^2 = a^2 + a^2$

$$r^2 = 2a^2$$

$$a^2 = \frac{r^2}{2}$$

$$a = \frac{r}{\sqrt{2}}$$

พื้นที่รูปสี่เหลี่ยม $A_r = 2a \times 2a$

แทนค่า $A_r = 2\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right) \times 2\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)$

$$A_r = 2r^2 \quad (3.1)$$

ดังนั้นขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมของโนคอ้างอิงโดยประมาณสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1)

3.3.1.4 จำนวนและพิกัดจุดทดสอบสัญญาณ (Signal test point: STP) จุดทดสอบสัญญาณนี้จะกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ให้บริการ เป็นพิกัดที่ใช้วัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนคอ้างอิงเพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูลใช้สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

3.3.1.5 จำนวนและพิกัดตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนคอ้างอิงได้ (Candidates) ตำแหน่งที่เป็นไปได้ที่สามารถติดตั้งโนคอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

3.3.1.6 พิกัดตำแหน่งที่ไม่สามารถติดตั้งโนคอ้างอิงภายในพื้นที่ได้ (dummy) เป็นตำแหน่งที่ไม่สามารถติดตั้งโนคอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการได้ เช่น ตำแหน่งที่เป็นบันไดหรือตำแหน่งที่มีสิ่งของวางอยู่ไม่เหมาะที่จะติดตั้งโนคอ้างอิง เป็นต้น

3.3.2 ขั้นตอนการประมาณจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้น (Phase 1)

การทำงานในส่วนนี้รับข้อมูลต้นที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 แล้วนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการคำนวณเพื่อหาจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นและกำหนดตำแหน่งเริ่มติดตั้งโนคอ้างอิงเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นในขั้นตอนต่อไป

3.3.2.1 คำนวณจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้น

การประมาณจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้น เป็นการประมาณจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นอย่างง่าย แสดงดังสมการที่ (3.2) โดยคำนวณจากพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้นหารด้วยขนาดพื้นที่ครอบคลุมของโนคอ้างอิงแล้วคูณกับจำนวนโนคอ้างอิงที่นำเสนอโดยงานวิจัยของ Kaemarungsi K. (2005) ซึ่งแนะนำว่าแต่ละจุดทดสอบสัญญาณควรได้รับสัญญาณอย่างน้อย 4 โนค การพิจารณาพื้นที่ครอบคลุมของโนคอ้างอิงอย่างง่ายเราจะพิจารณาเป็นพื้นที่แบบวงกลมสองมิติ โดยมีรัศมีของวงกลมคือ 35 เมตร สุดท้ายก็จะได้จำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นที่ใช้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นในการค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นต่อไป

$$N_{initial} = \left(\frac{A_{floor1}}{A_r} + \frac{A_{floor2}}{A_r} + \frac{A_{floor3}}{A_r} + \dots \right) \times N_R \quad (3.2)$$

โดยที่ $N_{initial}$ คือ จำนวน โหนดอ้างอิงเริ่มต้น

A_{floor} คือ พื้นที่ให้บริการสำหรับระบบระบุตำแหน่งในแต่ละชั้น

A_r คือ พื้นที่ครอบคลุมของโหนดอ้างอิงโดยประมาณ

N_R คือ จำนวน โหนดอ้างอิงที่จุดทดสอบสัญญาณสามารถรับสัญญาณได้ (จากงานวิจัย Kaemarungsi K. (2005) แนะนำให้มีอย่างน้อย 4 โหนด)

3.3.2.2 กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นติดตั้งโหนดอ้างอิง

การกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นติดตั้งโหนดอ้างอิงจำเป็นต้องได้รับจำนวนของโหนดอ้างอิงเริ่มต้นในหัวข้อก่อนหน้าแล้วนำจำนวนที่ได้มากำหนดตำแหน่งด้วยวิธียูนิฟอร์ม (Uniform placement) ซึ่งมีลักษณะตำแหน่งโหนดอ้างอิงที่สมมาตรกันโดยกำหนดให้เป็นโหนดอ้างอิงเริ่มต้นเพื่อใช้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการค้นหาตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการที่พิจารณาในขั้นตอนต่อไป

3.3.3 ขั้นตอนการหาจำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง (Phase 2)

กระบวนการทำงานในส่วนนี้เป็นการหาจำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เหมาะสมครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของพื้นที่ให้บริการ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) ในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหานี้ ในปัจจุบันมีการใช้วิธีฮิวริสติกมากมาย อาทิเช่น วิธีการค้นหาคำตอบด้วยกริดี้แอลกอริทึม (Greedy Algorithm) การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม (Genetic Algorithm) การหาค่าเหมาะที่สุดของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) และ อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing Algorithm : SA) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สนใจที่จะศึกษาวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นนี้โดยใช้อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง เนื่องจากกระบวนการวิธีการอบอ่อนจำลองเข้าใจง่ายและเหมาะกับรูปแบบปัญหาของงานวิจัยนี้ที่ประกอบด้วย ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข ซึ่งเป็นกลวิธีหนึ่งที่มีความนิยมมากในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัด (combinatorial optimization problem) โดยอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลองนี้เป็นกลวิธีการค้นผลเฉลยแบบเฉพาะที่ (local search) ซึ่งมีกระบวนการทำงานแบบวนซ้ำ (iterative)

เพื่อค้นผลเฉลยในปริภูมิผลเฉลยไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่พอใจ โดยเริ่มจากผลเฉลยเริ่มต้น การทำงานของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองนั้นจะล้อเลียนอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการอบอุ่น (annealing) ซึ่งเป็นขั้นตอนการลดอุณหภูมิระหว่างการหลอมโลหะเพื่อให้ได้โลหะที่อยู่ในสถานะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้โลหะที่เหนียว ไม่เปราะ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของการอบอุ่น เป็นการปรับค่าพารามิเตอร์การค้นหาคำตอบของระบบ ซึ่งในงานนี้ได้นำมาปรับใช้สำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น โดยตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงปัจจุบันเปรียบเหมือนสถานะปัจจุบันของโครงสร้างโลหะ และในการค้นหาตำแหน่งใหม่ก็เปรียบเหมือนสถานะใหม่ของโครงสร้างโลหะที่มีการลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ เปรียบการทำงานแบบวนซ้ำเสมือนกับการค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ ระหว่างการอบอุ่น เพื่อไปหาสถานะที่ต้องการคือเป็นโลหะที่แข็งและเหนียว เปรียบเสมือนวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือผลรวมของค่าความแรงสัญญาณสูงสุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากโนดอ้างอิง ในกระบวนการทำงานการสร้างคำตอบของตำแหน่งโนดอ้างอิงใหม่โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งโนดอ้างอิงปัจจุบัน ก็จะมีตัดสินใจว่าจะยอมรับตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงใหม่ที่หาได้หรือไม่ ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับตำแหน่งโนดอ้างอิงใหม่นี้โดยอาศัยความรู้จากกระบวนการทางฟิสิกส์ระหว่างการอบอุ่น ซึ่งจะยอมรับโครงสร้างใหม่เสมอถ้าดีกว่า แต่ถ้าแย่ลง ก็อาจจะยอมรับภายใต้ความน่าจะเป็นซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิมขณะนั้นในรูปแบบ $e^{-\frac{\Delta cost}{CT}}$ กล่าวไว้ในสมการที่ (3.11) สำหรับกรณีปัญหาในงานวิจัยนี้ ก็หมายความว่า จะยอมรับตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงใหม่ที่หาได้เสมอ ถ้าตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงใหม่นั้นให้ค่าผลรวมของค่าความแรงสัญญาณสูงสุดจากจุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งมีค่ามากกว่า แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าเราจะยอมรับภายใต้ความน่าจะเป็นในลักษณะเดียวกัน จากเกณฑ์การตัดสินใจสามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายว่า ในระยะแรกของการวนซ้ำ (เมื่ออุณหภูมิสูง) ก็จะมีโอกาสมากที่เราจะยอมรับตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงที่ให้ค่าผลรวมของค่าความแรงสัญญาณสูงสุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งมีค่าน้อยกว่าได้ง่าย ในทางกลับกันระยะของการวนซ้ำที่มากขึ้น (เมื่ออุณหภูมิต่ำ) เราจะยอมรับตำแหน่งการวางโนดอ้างอิงที่ให้ค่าผลรวมของค่าความแรงสัญญาณสูงสุดจากจุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งมีค่าน้อยกว่ายากขึ้นเรื่อยๆ สุดท้ายการวนซ้ำจะสิ้นสุดเมื่อถึงอุณหภูมิเย็น ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของวิธีการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองมีดังนี้

- **ตัวแปรที่ใช้เก็บค่าคำตอบ**

ในงานวิจัยนี้ใช้เมตริกแถว C ซึ่งเป็นเมตริกขนาด \mathcal{N} ในการเก็บค่าคำตอบของการเลือกตำแหน่งสำหรับติดตั้งโนดอ้างอิง โดยแต่ละอีลีเมนต์ของเมตริกเก็บค่า 0 หรือ 1 ถ้ามีค่าเป็น 1

หมายถึง เลือกติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j และถ้ามีค่าเป็น 0 จะหมายถึง ไม่เลือกติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j ตัวอย่างเช่น $C = [00011001]$ โดย C เป็นเมตริกแถวขนาด 8 บิตไบนารี ซึ่งแสดงการเลือกติดตั้ง โหนดอ้างอิง 3 ตำแหน่ง คือ ติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ C_4 C_5 และ C_8

- ตารางจัดการรอบอ่อน (Annealing schedule)

ตารางจัดการรอบอ่อนมีพารามิเตอร์ที่สำคัญและเป็นตัวชี้วัดตารางการรอบอ่อนนั้นคือ อุณหภูมิ (Temperature: CT) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมความเป็นไปได้ที่จะยอมรับคำตอบใหม่ที่แย่กว่าคำตอบปัจจุบันเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตในการจัดการรอบอ่อนของอัลกอริทึมการรอบอ่อนจำลองสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น แสดงในสมการที่ (3.3) เนื่องจากเป็นสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพที่ได้นำเสนอโดย Costa et al. (1993) อุณหภูมิจะมีค่าลดลงตามพารามิเตอร์ φ ซึ่งจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิถูกกำหนดโดยสมการที่ (3.4) โดยที่ค่าเริ่มต้นของจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบสูงสุด (Max_{iter}) คือ จำนวนของ โหนดอ้างอิงที่ติดตั้งในระบบระบุตำแหน่ง

$$CT = \varphi CT \quad (3.3)$$

$$Max_{iter} = \frac{Max_{iter}}{\varphi} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิ (CT) จะมีค่าลดลงแต่จำนวนการค้นหาคำตอบสูงสุด (Max_{iter}) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิ (CT) ลดลงระบบก็จะมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้นและจะยอมรับคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันเท่านั้น โดยการเคลื่อนที่ค้นหาคำตอบก็จะเข้าสู่หาคำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้น

- ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการรอบอ่อนจำลอง

ขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการรอบอ่อนจำลอง โดยระบบจะรับพารามิเตอร์เริ่มต้นที่จำเป็น และถูกกำหนดให้กับกระบวนการทำงานเพื่อหาตำแหน่งการติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น จากนั้นในแต่ละครั้งการค้นหาคำตอบติดตั้ง โหนดอ้างอิงจะมีตำแหน่งใหม่ (S_{new}) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นตำแหน่งข้างเคียงของตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงปัจจุบัน (S) ขั้นตอนต่อมาคือการประเมินค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงใหม่ (S_{new}) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงปัจจุบัน (S) ถ้าค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้ง

โนคอ้างอิงใหม่ (S_{new}) มีค่ามากกว่าค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงปัจจุบัน (S) ตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงใหม่นั้นจะถูกยอมรับและกลายเป็นตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงปัจจุบัน หรือถ้าหากค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงใหม่ (S_{new}) ถูกยอมรับด้วยความน่าจะเป็น (P_a) กล่าวไว้ในสมการที่ (3.11) ตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงใหม่นั้นก็จะกลายเป็นตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงปัจจุบันเช่นกัน

การควบคุมอุณหภูมิ เริ่มแรกอุณหภูมิเริ่มต้นจะมีค่าสูงและจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อการค้นหาคำตอบดำเนินไปเรื่อย ๆ โดยมีการปรับอุณหภูมิทุกครั้งที่จำนวนครั้งการค้นหาคำตอบถึงจุดสูงสุด อุณหภูมินั้นๆ และการค้นหาคำตอบก็จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงเกณฑ์การหยุดที่ได้กำหนดไว้คือ ไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบที่ได้ให้ดีขึ้น ($Max_noimprove$) หรืออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำสุด (CT_{min}) ที่กำหนดไว้ แสดงขั้นตอนการทำงานของกระบวนการรอบอ่อนจำลองดังรูปที่ 3.2 ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของเฟสที่ 2 มีดังนี้

3.3.3.1 การตรวจสอบเงื่อนไข

เป็นการตรวจสอบจำนวนโนคอ้างอิงที่ได้จากการประมาณจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นในหัวข้อ 3.3.2 ว่ามีจำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับพื้นที่ที่ให้บริการในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นและอยู่ภายใต้เงื่อนไขของปัญหาทุกข้อหรือไม่ ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขทุกข้อแสดงว่าจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นเพียงพอสำหรับพื้นที่ที่ให้บริการในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น แต่ถ้าไม่ก็จะตรวจสอบเกณฑ์การเพิ่มจำนวนโนคอ้างอิงในหัวข้อ 3.3.3.2 ต่อไป ซึ่งเงื่อนไขของสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงมีดังนี้

3.3.3.1.1 เงื่อนไขสำหรับการรับประกันคุณภาพของการรับสัญญาณจากตำแหน่งทดสอบสัญญาณกับโนคอ้างอิง โดยที่ตำแหน่งที่ทำการทดสอบสัญญาณ i จะได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิง j ได้ เมื่อระดับของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนคอ้างอิงมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (threshold) แสดงดังสมการที่ (3.5)

$$S_{ij}(P_{ij} - P_T) \geq 0 \quad \forall i \in T, \forall j \in R \quad (3.5)$$

3.3.3.1.2 เงื่อนไขสำหรับการกำหนดจำนวนของสัญญาณที่ตำแหน่งทดสอบสัญญาณ i ซึ่งอยู่ทั่วบริเวณของอาคารจะต้องได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิง j อย่างน้อย N_R โนค โดย N_R มีค่าเท่ากับ 4 โนค แสดงดังสมการที่ (3.6)

$$\sum_{\forall j \in R} S_{ij} \geq N_R \quad \forall i \in T \quad (3.6)$$

3.3.3.1.3 เงื่อนไขสำหรับการกำหนดการได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิง โดยที่ตำแหน่งทดสอบสัญญาณ i จะต้องได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิง j ที่ได้ถูกเลือกติดตั้งไว้ในระบบ แสดงดังสมการที่ (3.7)

$$S_{ij} \leq c_j \quad \forall i \in T, \forall j \in R \quad (3.7)$$

3.3.3.1.4 เงื่อนไขการกำหนดจำนวนโหนดอ้างอิงที่ใช้ในการติดตั้งในพื้นที่ให้บริการสำหรับระบบระบุตำแหน่งจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอ แสดงดังสมการที่ (3.8)

$$\sum_{\forall j \in R} c_j = N_S \quad (3.8)$$

ซึ่งสำหรับสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขได้แบ่งตัวแปรต่าง ๆ ออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มเซตของตัวแปร กลุ่มของตัวแปรตัดสินใจ และกลุ่มของตัวแปรค่าคงที่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

- R คือ เซตของตำแหน่งโหนดอ้างอิงที่สามารถติดตั้งในเครือข่ายได้
- T คือ เซตของตำแหน่งที่เป็นจุดทดสอบสัญญาณ

ตัวแปรตัดสินใจ :

- c_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j หรือ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $j \in R$
- S_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อจุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i เลือกรับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อจุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i ไม่เลือกรับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $i \in T, j \in R$

ตัวแปรค่าคงที่ :

P_{ij} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i รัับได้จากโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $i \in T, j \in R$ (dBm)

P_T คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สามารถได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงได้ (dBm)

N_s คือ จำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ให้บริการที่พิจารณา

3.3.3.2 ตรวจสอบเกณฑ์การเพิ่มจำนวนโหนดอ้างอิง

สำหรับการตรวจสอบเกณฑ์การเพิ่มจำนวนโหนดอ้างอิงจะพิจารณาเพิ่มจำนวนโหนดอ้างอิงก็ต่อเมื่อตำแหน่งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นไม่เพียงพอจึงไม่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการกำหนดติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เหมาะสมทั้งหมดได้ โดยเกณฑ์การเพิ่มจำนวนโหนดอ้างอิงจะใช้เวลาเป็นตัวตัดสินใจ โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดเวลาไว้ที่ 3 นาทีในการตรวจเกณฑ์การเพิ่มจำนวนโหนดอ้างอิง ถ้าครบกำหนดเวลาจำนวนโหนดอ้างอิงปัจจุบันไม่สามารถหาตำแหน่งที่ผ่านเงื่อนไขของปัญหาทั้งหมดได้ก็จะทำการเพิ่มโหนดอ้างอิงและกำหนดตำแหน่งติดตั้งเริ่มติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เพิ่ม (3.3.3.3) แต่ถ้ายังไม่ครบเวลาที่กำหนดจะทำการค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโหนดอ้างอิง (3.3.3.5) ต่อไป

3.3.3.3 เพิ่มโหนดอ้างอิงและกำหนดตำแหน่งเริ่มติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เพิ่ม

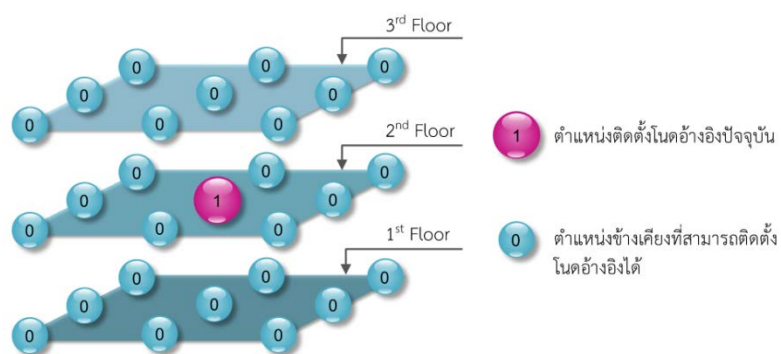
การทำงานในส่วนนี้จะทำการเพิ่มจำนวนโหนดอ้างอิง 1 โหนดและกำหนดตำแหน่งเริ่มติดตั้งให้กับโหนดอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นด้วยการสุ่มและกำหนดจำนวนโหนดอ้างอิงทั้งหมดเป็นโหนดอ้างอิงปัจจุบัน จากนั้นเมื่อได้จำนวนโหนดอ้างอิงปัจจุบันที่เพิ่มขึ้นโอกาสในการตรวจสอบเงื่อนไขผ่านก็มากขึ้นด้วย

3.3.3.4 คำนวณฟังก์ชันการประเมินผลจากจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่กำหนด

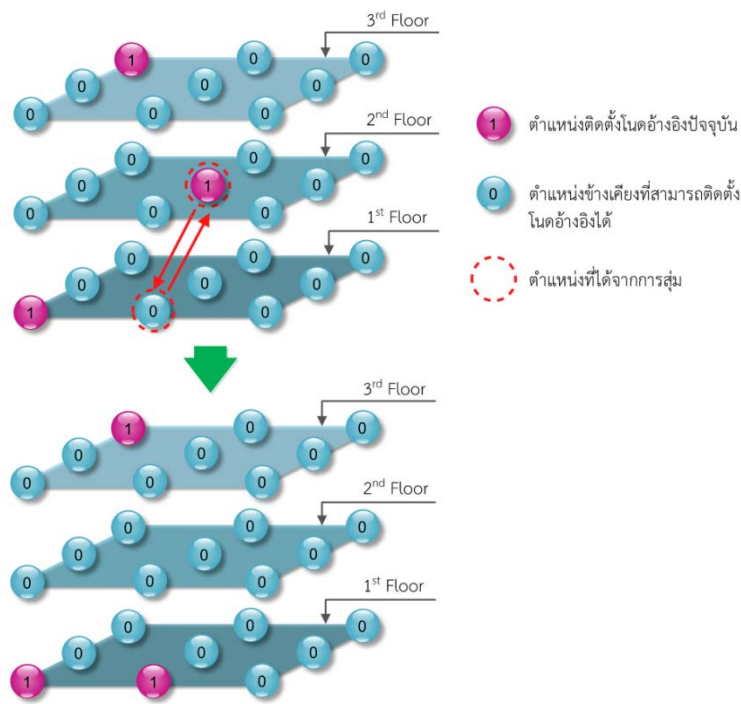
การทำงานในส่วนนี้จะนำจำนวนและตำแหน่งเริ่มติดตั้งโหนดอ้างอิงที่ได้ไปคำนวณค่าฟังก์ชันการประเมินผล (อธิบายในหัวข้อ 3.3.3.6) เพื่อหาค่าตามวัตถุประสงค์ จำนวนและตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงนี้จะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงปัจจุบันเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโหนดอ้างอิงต่อไป

3.3.3.5 ค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนคอ้างอิง (Move operator)

เป็นวิธีการเลือกตำแหน่งใหม่โดยเปลี่ยนจากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งข้างเคียง โดยกำหนดโครงสร้างของตำแหน่งข้างเคียง (Neighborhood structure) เป็นรูปแบบของตำแหน่งที่อยู่รอบ ๆ ตำแหน่งเดิมเป็นแบบ 3 มิติ ยกตัวอย่างเช่น การค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงในพื้นที่อาคารหลายชั้น แสดงในรูปที่ 3.6 และการค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนคอ้างอิง เริ่มจากการสุ่มตำแหน่งของโนคอ้างอิงเดิมหนึ่งตำแหน่ง จากตำแหน่งโนคอ้างอิงที่สุ่มได้ก็จะทำการสุ่มหนึ่งตำแหน่งข้างเคียงแบบ 3 มิติของโนคอ้างอิงนั้น โดยตำแหน่งข้างเคียงที่สุ่มได้นั้นจะต้องไม่ซ้ำกับเซตของตำแหน่งโนคอ้างอิงเดิม จากนั้นทำการสลับตำแหน่งกัน ซึ่งตำแหน่งของโนคอ้างอิงใหม่แสดงดังรูปที่ 3.7 จะถูกส่งต่อไปตรวจสอบเงื่อนไขข้อกำหนดของปัญหา (3.3.3.1) ถ้าไม่ผ่านเงื่อนไขของปัญหาก็จะทำการค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนคอ้างอิงซ้ำอีก



รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงข้างเคียงในพื้นที่อาคารหลายชั้น



รูปที่ 3.7 แสดงการเลือกตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้ง โหนดอ้างอิง

3.3.3.6 ฟังก์ชันการประเมินผล (Evaluation function)

เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับประเมินค่าคำตอบของปัญหาโดยจะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อจะบรรลุวัตถุประสงค์ (Objective) ของปัญหาได้ ซึ่งวัตถุประสงค์เป็นสิ่งที่ปัญหาต้องการจากฟังก์ชันการประเมินผล เพื่อบอกวัตถุประสงค์ของปัญหาว่าต้องการค่าที่มากที่สุด (Maximize) หรือ ค่าน้อยที่สุด (Minimize) โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีสมการวัตถุประสงค์เพื่อที่จะต้องการค่าสูงที่สุดของผลรวมค่าความแรงสัญญาณมากที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากโหนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งแล้วในระบบ เขียนแทนด้วยสมการที่ (3.9) และมีฟังก์ชันการประเมินผลแสดงในสมการที่ (3.10)

$$Maximize \sum_{\forall i \in T} \max_{\forall j \in R} (S_{ij} P_{ij}) \tag{3.9}$$

$$\sum_{\forall i \in T} \max_{\forall j \in R} (S_{ij} P_{ij}) \tag{3.10}$$

3.3.3.7 การเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีกว่าเดิม

การทำงานส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงปัจจุบันกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าเดิม ในวิทยานิพนธ์นี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาค่าที่มากที่สุด (Maximize) ดังนั้นถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงปัจจุบันก็จะถูกพิจารณาด้วยความน่าจะเป็นต่อไป แต่ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่มีค่ามากกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงปัจจุบันก็จะเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่เป็นตำแหน่งโนดอ้างอิงปัจจุบันเพื่อค้นหาตำแหน่งที่ดีขึ้นต่อไป

3.3.3.8 ความน่าจะเป็น (Probability)

เมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่มีค่าต่ำกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงปัจจุบันก็จะต้องใช้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเลือกว่าจะยอมรับตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่หรือไม่ โดยค่าความน่าจะเป็นคำนวณได้จากสมการที่ (3.11) ซึ่งการตัดสินใจจะยอมรับตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่ก็ต่อเมื่อสมการที่ (3.12) เป็นจริง ถ้าเป็นจริงก็จะยอมรับตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่และเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่เป็นตำแหน่งโนดอ้างอิงปัจจุบันเพื่อค้นหาตำแหน่งที่ดีขึ้นต่อไป

$$P_a = e^{-\frac{\Delta cost}{CT}} \quad (3.11)$$

$$x < P_a \quad (3.12)$$

โดยที่ $\Delta cost$ คือ ค่าผลต่างของฟังก์ชันการประเมินผล

CT คือ ค่าอุณหภูมิปัจจุบันของการอบอ่อน

x คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม 0 ถึง 1

3.3.3.9 เกณฑ์การหยุด (stopping criteria)

เป็นเงื่อนไขสำหรับควบคุมให้ระบบหยุดการค้นหาคำตอบ ถ้าเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดระบบจะหยุดการค้นหาคำตอบและคำตอบปัจจุบันของอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลองก็จะ เป็นคำตอบของปัญหา ยกตัวอย่างเกณฑ์การหยุดเช่น ไม่มีการปรับปรุงคำตอบที่ได้ให้ดีขึ้น 100 ครั้งการค้นหาติดต่อกัน ค่าอุณหภูมิลดต่ำเป็นศูนย์ การเคลื่อนที่ในการหาคำตอบครบ 1000 ครั้ง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เกณฑ์การหยุดการค้นหาคำตอบด้วยค่าอุณหภูมิลดต่ำเข้าใกล้ศูนย์

ร่วมกับจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบที่ได้ให้ดีขึ้น n ครั้งการค้นหาติดต่อกัน อย่างไรก็ตามอย่างหนึ่งซึ่งหมายความว่า จะหยุดกระบวนการค้นหาเมื่อมีค่าอุณหภูมิลดต่ำเข้าใกล้ศูนย์หรือไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบที่ได้ให้ดีขึ้น n ครั้งการค้นหาติดต่อกัน ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอ่อนจำลอง

วิธีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นด้วยกระบวนการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) มีค่าพารามิเตอร์ค่าคงที่เริ่มต้นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบอ่อนจำลองประกอบไปด้วย อุณหภูมิสูงสุด (CT_{max}) พารามิเตอร์ ρ ที่เป็นตัวกำหนดการลดลงของอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิ อีกทั้ง เกณฑ์การหยุดที่เป็นตัวกำหนดการหยุดค้นหาคำตอบของกระบวนการอบอ่อนจำลองนั่นคือ อุณหภูมิต่ำสุด (CT_{min}) และจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบให้ดีขึ้น ($Max_noimprove$) ซึ่งในหัวข้อนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อใช้ในการทดลองหัวข้อต่าง ๆ ต่อไป

3.4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น (CT_{max}) พารามิเตอร์ ρ อุณหภูมิต่ำสุด (CT_{min}) และจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบให้ดีขึ้น ($Max_noimprove$)

3.4.1.1 อุณหภูมิสูงสุด (CT_{max}) เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่เป็นตัวกำหนดความน่าจะเป็นของการยอมรับค่าคำตอบที่ได้จากการเริ่มแก้ไขปัญหาด้วยกระบวนการอบอ่อนจำลอง แสดงสมการความน่าจะเป็น (P_a) ของการยอมรับการแก้ปัญหาดังสมการที่ (3.9)

ให้ $\Delta cost$ เป็นผลต่างระหว่างค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงปัจจุบัน (S) กับค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงใหม่ (S_{new}) เริ่มแรกอุณหภูมิปัจจุบันจะมีค่าอุณหภูมิสูงสุด ($CT = CT_{max}$) โดยที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด (CT_{max}) ได้จากช่วงระยะเวลาการค้นหาคำตอบที่ระดับอุณหภูมินั้นและมีความน่าจะเป็นของการยอมรับการแก้ปัญหาที่แย่ที่สุดประมาณเท่ากับค่าเริ่มต้นความน่าจะเป็นที่จะยอมรับการแก้ปัญหา ($P_{a_initial}$) ดังนั้น ค่าอุณหภูมิสูงสุด (CT_{max}) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.13)

$$CT_{\max} = -\frac{\Delta cost}{\ln(P_{a_initial})} \quad (3.13)$$

Kirkpatrick S. (1984) ได้เสนอไว้ว่า ค่าเริ่มต้นความน่าจะเป็นที่จะยอมรับการแก้ปัญหา ($P_{a_initial}$) ยิ่งมีค่าสูง ก็จะมีโอกาสสูงที่จะยอมรับการแก้ปัญหาที่มีค่าแย่กว่าในการค้นหาคำตอบช่วงต้น โดยที่เขาแนะนำให้ใช้ค่า $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 ในงานวิจัยนี้เราได้ทดลองกำหนดค่า $P_{a_initial}$ ให้มีค่าเท่ากับ 0.3 0.5 และ 0.8 ซึ่งแต่ละค่าจะส่งผลกระทบต่อการค้นหาคำตอบของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

โดยค่า $\Delta cost$ ที่ใช้ในสมการที่ (3.13) จะได้จากการคำนวณ $\Delta cost$ ในระดับต่าง ๆ โดยในขั้นแรกจะทำการประเมินค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้น ขั้นที่สองจะนำค่าคำตอบของตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้นมาเปรียบเทียบกับค่าคำตอบของตำแหน่งโนคอ้างอิงใหม่ทุก ๆ ครั้งการค้นหาคำตอบที่ได้บันทึกไว้ ยกตัวอย่างค่า $\Delta cost > 0$ แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่า $\Delta cost$ เหล่านั้น ท้ายที่สุดเราก็จะได้ค่าอุณหภูมิสูงสุด (CT_{\max}) จากการคำนวณค่า $\Delta cost$ และ $P_{a_initial}$ ในสมการที่ (3.13)

3.4.1.2 สำหรับค่าพารามิเตอร์ ϕ เป็นตัวกำหนดการลดลงของอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิ โดยเราได้ทำการทดลอง 4 กรณีคือค่าพารามิเตอร์ ϕ เท่ากับ 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 ซึ่งแต่ละค่าจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการอบอุ่นจำลองของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

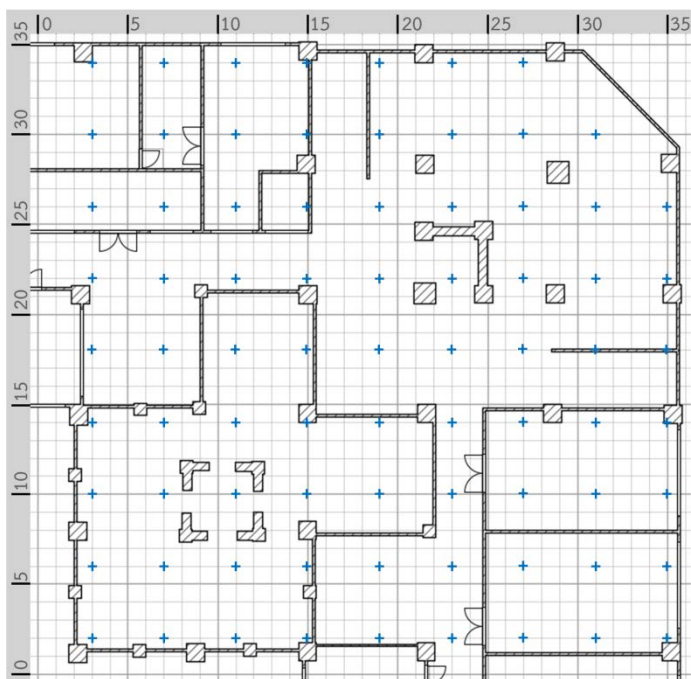
3.4.1.3 เกณฑ์การหยุดสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นกำหนดใช้อุณหภูมิต่ำสุด (CT_{\min}) และจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบให้ดีขึ้น ($Max_noimprove$) ซึ่งในการทดลองนี้เราได้กำหนดค่าอุณหภูมิต่ำสุด CT_{\min} เท่ากับ 0.01 และกำหนดใช้ค่า $Max_noimprove$ ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละค่าพารามิเตอร์ ϕ และ $P_{a_initial}$

3.4.2 พื้นที่การทดลอง

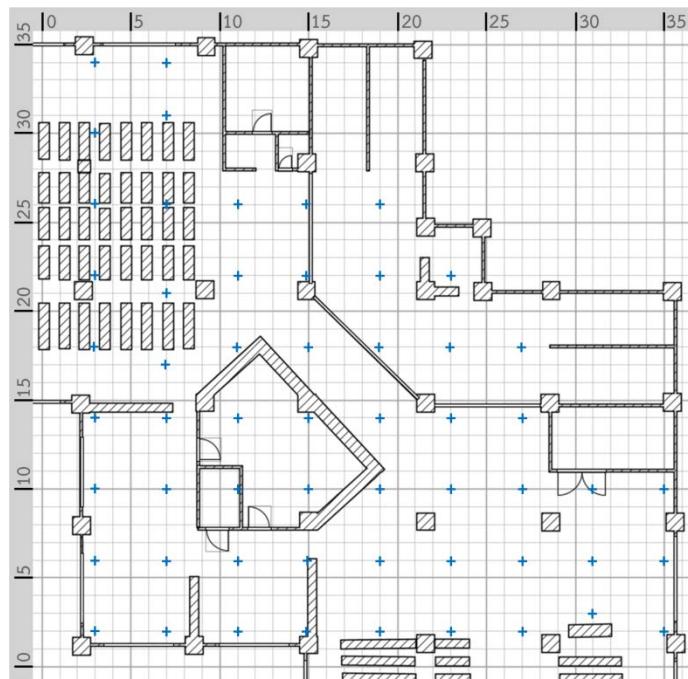
ในการศึกษาประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้กล่าวมาข้างต้นของกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ได้พิจารณาพื้นที่การทดลอง 2 พื้นที่ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พื้นที่ทดลองที่ 1 อาคารบรรณสาร 3 ชั้น (ชั้นที่ 1 2 และ 3) มีขนาดของพื้นที่แต่ละชั้นโดยประมาณเท่ากับ 35x35 ตารางเมตร มีระยะห่างของกริด

เท่ากับ 4 เมตร (grid spacing 4x4 m2) มีจำนวนพิกัดฟังก์ชันปริ้นท์ 188 พิกัดและมีจุดทดสอบจำนวน 188 จุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.8a-c พื้นที่ทดลองที่ 2 อาคารวิชาการ 1 จำนวน 2 ชั้น (ชั้นที่ 2 และ 3) มีขนาดของพื้นที่แต่ละชั้นโดยประมาณเท่ากับ 75x75 ตารางเมตร มีระยะห่างของกริดเท่ากับ 4 เมตร (grid spacing 4x4 m2) มีจำนวนพิกัดฟังก์ชันปริ้นท์ 668 พิกัดและมีจุดทดสอบจำนวน 232 จุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.9a-b

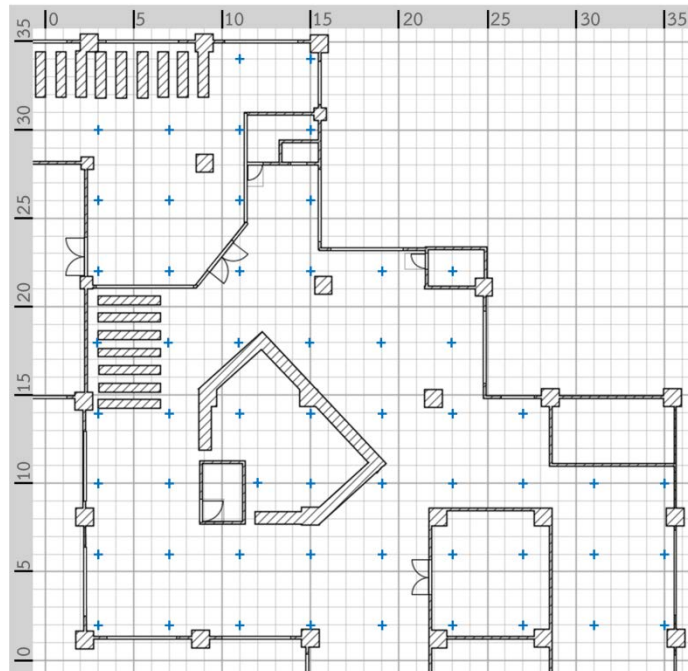
การวิเคราะห์ในส่วนนี้เราจะมุ่งเน้นถึงประสิทธิภาพของการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นด้วยอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพที่เราศึกษานี้ประกอบไปด้วย เวลาในการทำงาน (run time) ของกระบวนการอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง และค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ตามสมการที่ (3.9) เป็นตัวชี้วัดผลกระทบของค่าพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม



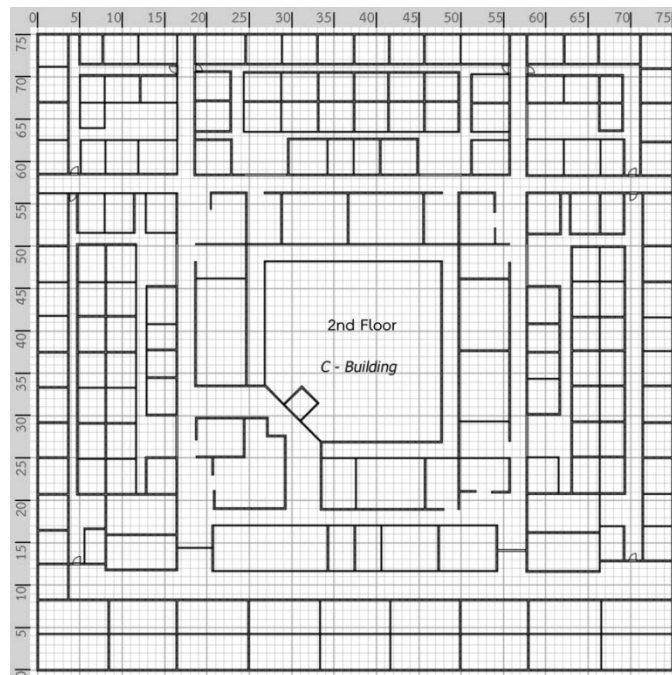
รูปที่ 3.8a แสดงพื้นที่การทดลองที่ 1 อาคารบรรณสารชั้น 1



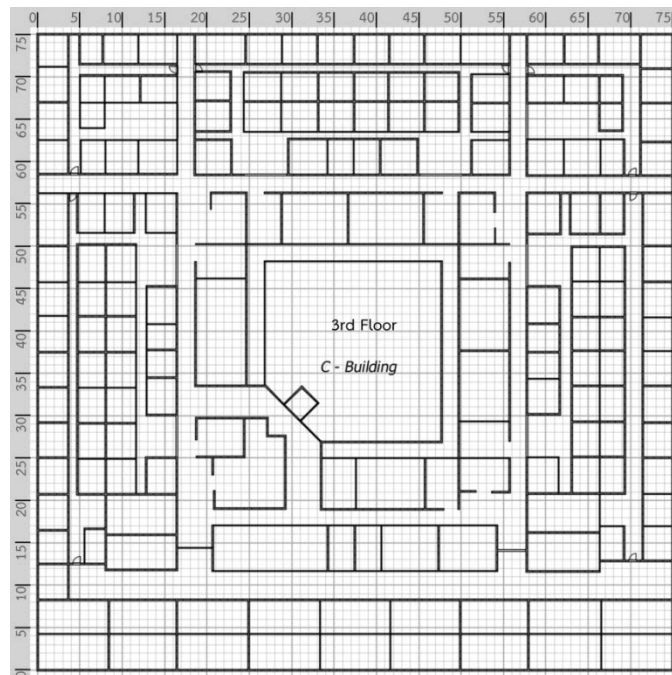
รูปที่ 3.8b แสดงพื้นที่การทดลองที่ 1 อาคารบรรณสารชั้น 2



รูปที่ 3.8c แสดงพื้นที่การทดลองที่ 1 อาคารบรรณสารชั้น 3



รูปที่ 3.9a แสดงพื้นที่การทดลองที่ 2 อาคารวิชาการชั้น 2



รูปที่ 3.9b แสดงพื้นที่การทดลองที่ 2 อาคารวิชาการชั้น 3

3.4.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นด้วยกระบวนการอบอุ่นจำลอง แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งค่าที่แสดงในตารางเราได้ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้งพร้อมกับคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหน่วยเป็นนาโนวัตต์ (nWatt) และเวลาในการทำงานเฉลี่ย (Average run time) มีหน่วยเป็นวินาที (second) จากผลการทดลองสังเกตเห็นว่าค่าในตารางที่มีการไฮไลต์ (highlight) แสดงให้เห็นว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละพื้นที่การทดลอง และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal solution) และได้จำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารพื้นที่การทดลองที่ 1 คือ 8 โหนดและ 12 โหนดสำหรับพื้นที่การทดลองที่ 2 ตลอดจนยังใช้เวลาอันสั้นในการค้นหาคำตอบเหล่านั้น

ตารางที่ 3.1 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1

$\varphi = 0.3$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Cost (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|--------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 30.02 | 8 |
| | | stdv | 0.73 | 2 |
| | 100 | avg | 30.45 | 7 |
| | | stdv | 0.35 | 1 |
| | 150 | avg | 30.38 | 9 |
| | | stdv | 0.27 | 2 |
| | 200 | avg | 30.26 | 11 |
| | | stdv | 0.54 | 2 |
| | 250 | avg | 30.48 | 11 |
| | | stdv | 0.45 | 3 |
| 0.5 | 50 | avg | 30.23 | 6 |
| | | stdv | 0.66 | 1 |
| | 100 | avg | 30.46 | 8 |
| | | stdv | 0.34 | 2 |
| | 150 | avg | 30.55 | 8 |
| | | stdv | 0.35 | 1 |
| | 200 | avg | 30.49 | 11 |
| | | stdv | 0.34 | 2 |
| | 250 | avg | 30.43 | 13 |
| | | stdv | 0.33 | 3 |
| 0.8 | 100 | avg | 30.46 | 8 |
| | | stdv | 0.44 | 2 |
| | 200 | avg | 30.47 | 11 |
| | | stdv | 0.48 | 2 |
| | 300 | avg | 30.64 | 17 |
| | | stdv | 0.41 | 4 |
| | 400 | avg | 30.48 | 18 |
| | | stdv | 0.43 | 4 |
| | 500 | avg | 30.60 | 23 |
| | | stdv | 0.32 | 11 |
| | 1000 | avg | 30.36 | 31 |
| | | stdv | 0.45 | 9 |
| | 1500 | avg | 30.42 | 39 |
| | | stdv | 0.27 | 15 |
| | 2000 | avg | 30.50 | 38 |
| | | stdv | 0.42 | 6 |

$\varphi = 0.5$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Cost (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|--------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 30.37 | 7 |
| | | stdv | 0.42 | 2 |
| | 100 | avg | 30.23 | 10 |
| | | stdv | 0.49 | 2 |
| | 150 | avg | 30.34 | 8 |
| | | stdv | 0.42 | 1 |
| | 200 | avg | 30.55 | 16 |
| | | stdv | 0.36 | 3 |
| | 250 | avg | 30.76 | 12 |
| | | stdv | 0.27 | 3 |
| 0.5 | 50 | avg | 29.96 | 8 |
| | | stdv | 0.61 | 1 |
| | 100 | avg | 30.33 | 8 |
| | | stdv | 0.50 | 2 |
| | 150 | avg | 30.31 | 10 |
| | | stdv | 0.55 | 2 |
| | 200 | avg | 30.62 | 13 |
| | | stdv | 0.25 | 3 |
| | 250 | avg | 30.39 | 11 |
| | | stdv | 0.56 | 2 |
| 0.8 | 100 | avg | 30.41 | 9 |
| | | stdv | 0.25 | 2 |
| | 200 | avg | 30.68 | 13 |
| | | stdv | 0.29 | 4 |
| | 300 | avg | 30.57 | 18 |
| | | stdv | 0.32 | 4 |
| | 400 | avg | 30.73 | 19 |
| | | stdv | 0.25 | 5 |
| | 500 | avg | 30.80 | 19 |
| | | stdv | 0.15 | 3 |
| | 1000 | avg | 30.65 | 24 |
| | | stdv | 0.38 | 6 |
| | 1500 | avg | 30.52 | 39 |
| | | stdv | 0.43 | 13 |
| | 2000 | avg | 30.67 | 49 |
| | | stdv | 0.23 | 27 |

ตารางที่ 3.1 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1(ต่อ)

$\varphi = 0.7$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Objective fn. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 30.01 | 6 |
| | | stdv | 0.59 | 2 |
| | 100 | avg | 30.48 | 11 |
| | | stdv | 0.39 | 2 |
| | 150 | avg | 30.60 | 10 |
| | | stdv | 0.33 | 3 |
| | 200 | avg | 30.46 | 12 |
| | | stdv | 0.37 | 3 |
| | 250 | avg | 30.67 | 14 |
| | | stdv | 0.22 | 3 |
| 0.5 | 50 | avg | 30.25 | 8 |
| | | stdv | 0.46 | 3 |
| | 100 | avg | 30.40 | 9 |
| | | stdv | 0.42 | 2 |
| | 150 | avg | 30.59 | 12 |
| | | stdv | 0.30 | 3 |
| | 200 | avg | 30.61 | 10 |
| | | stdv | 0.24 | 2 |
| | 250 | avg | 30.28 | 11 |
| | | stdv | 0.30 | 2 |
| 0.8 | 100 | avg | 30.57 | 9 |
| | | stdv | 0.31 | 2 |
| | 200 | avg | 30.50 | 14 |
| | | stdv | 0.36 | 3 |
| | 300 | avg | 30.60 | 17 |
| | | stdv | 0.34 | 3 |
| | 400 | avg | 30.70 | 17 |
| | | stdv | 0.24 | 3 |
| | 500 | avg | 30.79 | 19 |
| | | stdv | 0.19 | 4 |
| | 1000 | avg | 30.80 | 29 |
| | | stdv | 0.13 | 5 |
| | 1500 | avg | 30.79 | 34 |
| | | stdv | 0.21 | 6 |
| | 2000 | avg | 30.70 | 44 |
| | | stdv | 0.39 | 7 |

$\varphi = 0.9$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Objective fn. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 30.39 | 8 |
| | | stdv | 0.43 | 2 |
| | 100 | avg | 30.55 | 10 |
| | | stdv | 0.36 | 3 |
| | 150 | avg | 30.50 | 11 |
| | | stdv | 0.28 | 3 |
| | 200 | avg | 30.41 | 11 |
| | | stdv | 0.48 | 4 |
| | 250 | avg | 30.19 | 13 |
| | | stdv | 0.56 | 3 |
| 0.5 | 50 | avg | 30.43 | 9 |
| | | stdv | 0.52 | 1 |
| | 100 | avg | 30.43 | 11 |
| | | stdv | 0.40 | 2 |
| | 150 | avg | 30.47 | 10 |
| | | stdv | 0.34 | 2 |
| | 200 | avg | 30.41 | 13 |
| | | stdv | 0.45 | 3 |
| | 250 | avg | 30.30 | 14 |
| | | stdv | 0.51 | 2 |
| 0.8 | 100 | avg | 30.73 | 12 |
| | | stdv | 0.34 | 3 |
| | 200 | avg | 30.64 | 16 |
| | | stdv | 0.38 | 2 |
| | 300 | avg | 30.72 | 18 |
| | | stdv | 0.26 | 5 |
| | 400 | avg | 30.71 | 21 |
| | | stdv | 0.24 | 7 |
| | 500 | avg | 30.75 | 19 |
| | | stdv | 0.23 | 3 |
| | 1000 | avg | 30.75 | 28 |
| | | stdv | 0.15 | 7 |
| | 1500 | avg | 30.80 | 37 |
| | | stdv | 0.18 | 4 |
| | 2000 | avg | 30.88 | 35 |
| | | stdv | 0.08 | 4 |

ตารางที่ 3.2 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2

$\varphi = 0.3$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Objective fn. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 73.12 | 11 |
| | | stdv | 1.25 | 2 |
| | 100 | avg | 74.76 | 17 |
| | | stdv | 1.49 | 4 |
| | 150 | avg | 74.92 | 22 |
| | | stdv | 1.83 | 8 |
| | 200 | avg | 75.22 | 25 |
| | | stdv | 1.11 | 6 |
| | 250 | avg | 75.41 | 26 |
| | | stdv | 0.68 | 5 |
| 0.5 | 50 | avg | 73.65 | 12 |
| | | stdv | 1.68 | 2 |
| | 100 | avg | 74.99 | 19 |
| | | stdv | 1.25 | 4 |
| | 150 | avg | 75.85 | 26 |
| | | stdv | 0.56 | 6 |
| | 200 | avg | 75.26 | 28 |
| | | stdv | 1.51 | 5 |
| | 250 | avg | 75.61 | 27 |
| | | stdv | 0.67 | 5 |
| 0.8 | 100 | avg | 75.27 | 23 |
| | | stdv | 0.83 | 5 |
| | 200 | avg | 75.99 | 34 |
| | | stdv | 0.54 | 7 |
| | 300 | avg | 76.23 | 39 |
| | | stdv | 0.53 | 11 |
| | 400 | avg | 76.31 | 54 |
| | | stdv | 0.77 | 5 |
| | 500 | avg | 76.22 | 56 |
| | | stdv | 0.81 | 10 |
| | 1000 | avg | 76.59 | 67 |
| | | stdv | 0.52 | 10 |
| | 1500 | avg | 76.27 | 162 |
| | | stdv | 0.77 | 149 |
| | 2000 | avg | 76.11 | 198 |
| | | stdv | 0.63 | 161 |

$\varphi = 0.5$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Objective fn. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 73.11 | 12 |
| | | stdv | 1.79 | 1 |
| | 100 | avg | 74.88 | 19 |
| | | stdv | 1.29 | 5 |
| | 150 | avg | 75.05 | 24 |
| | | stdv | 1.08 | 5 |
| | 200 | avg | 75.52 | 27 |
| | | stdv | 0.50 | 6 |
| | 250 | avg | 75.72 | 31 |
| | | stdv | 0.81 | 7 |
| 0.5 | 50 | avg | 74.89 | 15 |
| | | stdv | 0.84 | 2 |
| | 100 | avg | 74.81 | 18 |
| | | stdv | 1.23 | 2 |
| | 150 | avg | 75.84 | 23 |
| | | stdv | 0.68 | 5 |
| | 200 | avg | 75.89 | 33 |
| | | stdv | 0.42 | 8 |
| | 250 | avg | 75.75 | 28 |
| | | stdv | 0.98 | 7 |
| 0.8 | 100 | avg | 75.46 | 21 |
| | | stdv | 0.76 | 2 |
| | 200 | avg | 76.20 | 34 |
| | | stdv | 0.69 | 7 |
| | 300 | avg | 76.28 | 45 |
| | | stdv | 0.69 | 8 |
| | 400 | avg | 76.39 | 54 |
| | | stdv | 0.39 | 15 |
| | 500 | avg | 76.43 | 65 |
| | | stdv | 1.07 | 19 |
| | 1000 | avg | 76.67 | 96 |
| | | stdv | 0.34 | 19 |
| | 1500 | avg | 76.46 | 112 |
| | | stdv | 0.30 | 20 |
| | 2000 | avg | 76.30 | 199 |
| | | stdv | 0.71 | 239 |

ตารางที่ 3.2 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2 (ต่อ)

$\varphi = 0.7$

| Pa_init | Max noimprove | statistic | Objective fn. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 74.25 | 18 |
| | | stdv | 1.17 | 3 |
| | 100 | avg | 75.21 | 21 |
| | | stdv | 0.98 | 4 |
| | 150 | avg | 75.00 | 28 |
| | | stdv | 0.90 | 6 |
| | 200 | avg | 75.48 | 41 |
| | | stdv | 0.92 | 9 |
| | 250 | avg | 76.10 | 49 |
| | | stdv | 0.59 | 10 |
| 0.5 | 50 | avg | 74.73 | 18 |
| | | stdv | 1.04 | 4 |
| | 100 | avg | 75.36 | 23 |
| | | stdv | 1.01 | 3 |
| | 150 | avg | 76.10 | 30 |
| | | stdv | 0.57 | 6 |
| | 200 | avg | 75.81 | 34 |
| | | stdv | 0.59 | 8 |
| | 250 | avg | 75.94 | 34 |
| | | stdv | 0.69 | 6 |
| 0.8 | 100 | avg | 75.71 | 30 |
| | | stdv | 0.88 | 7 |
| | 200 | avg | 75.92 | 42 |
| | | stdv | 0.97 | 7 |
| | 300 | avg | 76.40 | 51 |
| | | stdv | 0.64 | 22 |
| | 400 | avg | 76.26 | 64 |
| | | stdv | 0.89 | 15 |
| | 500 | avg | 76.21 | 70 |
| | | stdv | 0.54 | 32 |
| | 1000 | avg | 76.62 | 97 |
| | | stdv | 0.35 | 30 |
| | 1500 | avg | 76.40 | 120 |
| | | stdv | 0.38 | 41 |
| | 2000 | avg | 76.58 | 162 |
| | | stdv | 0.42 | 105 |

$\varphi = 0.9$

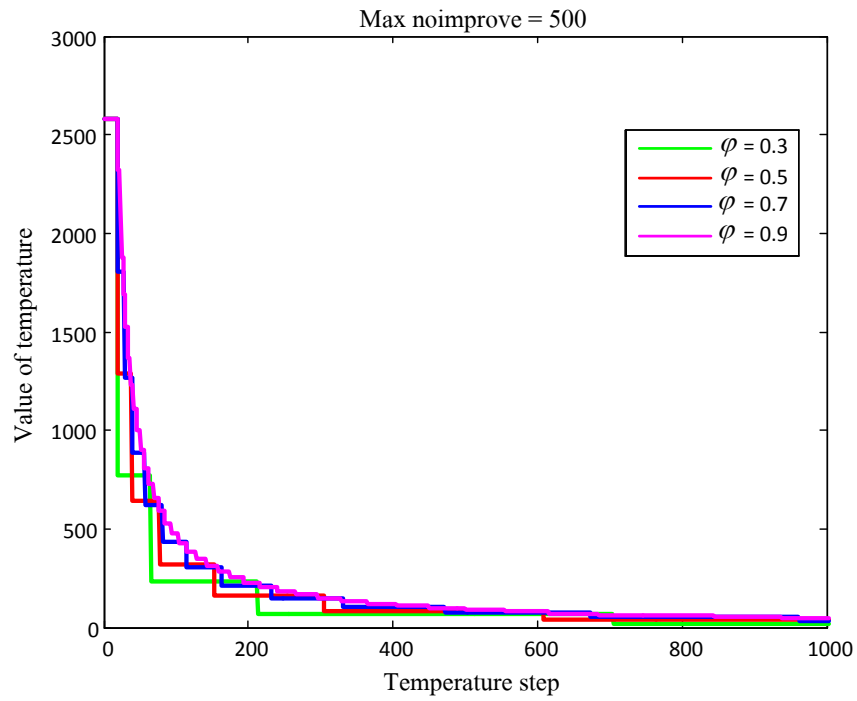
| Pa_init | Max noimprove | statistic | Objective fn. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|---------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| 0.3 | 50 | avg | 75.08 | 21 |
| | | stdv | 0.79 | 4 |
| | 100 | avg | 75.84 | 24 |
| | | stdv | 0.53 | 6 |
| | 150 | avg | 75.88 | 27 |
| | | stdv | 0.50 | 5 |
| | 200 | avg | 75.70 | 33 |
| | | stdv | 0.81 | 7 |
| | 250 | avg | 75.84 | 35 |
| | | stdv | 0.59 | 7 |
| 0.5 | 50 | avg | 74.76 | 20 |
| | | stdv | 0.84 | 4 |
| | 100 | avg | 75.83 | 26 |
| | | stdv | 0.73 | 6 |
| | 150 | avg | 75.44 | 27 |
| | | stdv | 0.67 | 4 |
| | 200 | avg | 75.69 | 33 |
| | | stdv | 0.59 | 8 |
| | 250 | avg | 76.01 | 37 |
| | | stdv | 0.79 | 9 |
| 0.8 | 100 | avg | 76.13 | 30 |
| | | stdv | 0.59 | 4 |
| | 200 | avg | 76.43 | 53 |
| | | stdv | 0.37 | 9 |
| | 300 | avg | 76.48 | 57 |
| | | stdv | 0.49 | 8 |
| | 400 | avg | 76.34 | 65 |
| | | stdv | 0.39 | 26 |
| | 500 | avg | 76.58 | 70 |
| | | stdv | 0.39 | 10 |
| | 1000 | avg | 76.57 | 89 |
| | | stdv | 0.35 | 13 |
| | 1500 | avg | 76.60 | 110 |
| | | stdv | 0.36 | 33 |
| | 2000 | avg | 76.69 | 133 |
| | | stdv | 0.27 | 33 |

3.4.3.1 ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$

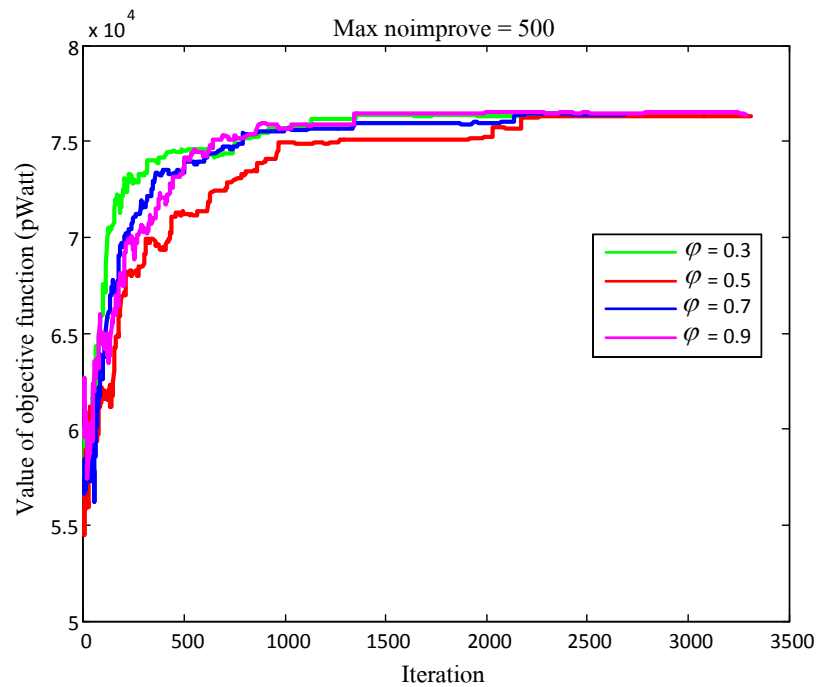
สำหรับอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิสูงสุด (CT_{max}) ตามสมการที่ (12) ถ้าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ มีค่ามาก ค่าอุณหภูมิสูงสุด (CT_{max}) ก็จะมีค่ามากด้วย นั่นหมายความว่าโอกาสที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดก็จะมากขึ้นด้วย สำหรับแต่ละค่าของพารามิเตอร์ φ ที่ใช้ในการศึกษาทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ มีค่าเพิ่มขึ้นการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองมีจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่เพิ่มมากขึ้นก่อนจะเข้าสู่ค่าคำตอบที่ดีที่สุด ในทำนองเดียวกันเมื่อ $Max_noimprove$ มีค่าเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้มีแนวโน้มการค้นหาคำตอบใกล้ค่าคำตอบที่ดีที่สุดเพิ่มมากขึ้นพร้อมทั้งเวลาการทำงานที่มากขึ้นด้วย สำหรับทั้ง 2 พื้นที่การทดลองความแตกต่างของค่าเวลาในการทำงานเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ไม่ได้แตกต่างกันมากนักแต่เมื่อสังเกตจะพบว่าในแต่ละค่าพารามิเตอร์ φ สำหรับทั้ง 2 พื้นที่การทดลองค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ที่มีค่าสูงก็ยังสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงค่าคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ที่มีค่าน้อย ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 จะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.4.3.2 ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ φ

สำหรับอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองค่าพารามิเตอร์ φ ส่งผลต่อการปรับลดลงของอุณหภูมิและจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบ ยกตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อค่าพารามิเตอร์ φ มีค่าน้อยการลดลงของอุณหภูมิจะไวมากขึ้นและจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิก็จะมากขึ้นด้วย นั่นส่งผลให้มีโอกาสน้อยที่จะการยอมรับการแก้ไขปัญหาที่มีคำตอบแย่กว่าคำตอบปัจจุบัน และในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าพารามิเตอร์ φ มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้นเนื่องจากมีโอกาสมากที่จะการยอมรับการแก้ไขปัญหาที่มีคำตอบแย่กว่าคำตอบปัจจุบันแต่เวลาการค้นหาคำตอบก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน เห็นได้ชัดเมื่อพื้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นดังพื้นที่การทดลองที่ 2 แต่เวลาไม่กินาทีไม่เป็นปัญหาสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 จะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการลดลงของอุณหภูมิของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง



รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างการค้นหาค่าตอบของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง

3.4.3.3 ประสิทธิภาพของเกณฑ์การหยุดทำงานของกระบวนการอบอุ่นจำลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทฤษฎีของกระบวนการค้นหาคำตอบด้วย อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองหยุดการค้นหาคำตอบด้วย $Max_noimprove$ เป็นเงื่อนไขการหยุดการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง ซึ่งจบกระบวนการก่อนที่อุณหภูมิจะลดต่ำลงถึงค่าอุณหภูมิต่ำสุด $CT_{min} = 0.01$ หมายความว่าอุณหภูมิต่ำสุด เท่ากับ 0.01 เป็นค่าที่เพียงพอแล้วสำหรับ อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองที่จะถึงจุดสมดุล ค่าพารามิเตอร์ $Max_noimprove$ ควรจะกำหนดให้เพียงพอกับจำนวนครั้งการเคลื่อนที่ค้นหาคำตอบและไม่มากเกินไปเนื่องจากถ้าพารามิเตอร์ $Max_noimprove$ มีค่ามากก็จะยิ่งใช้เวลาในการทำงานมากขึ้นด้วย แต่ด้วยในการทดลองนี้ เวลาในการค้นหาคำตอบไม่ได้แตกต่างกันมากนักแต่ให้ค่าการค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่ดีที่สุด หรือใกล้เคียงตำแหน่งที่ดีที่สุดได้และมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคำตอบมีค่าดีที่สุดด้วย แสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับพื้นที่การทดลองที่ 1 และตารางที่ 3.3 สำหรับพื้นที่การทดลองที่ 2 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า $Max_noimprove$ เท่ากับ 2000 ครั้งในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 และค่าพารามิเตอร์ ϕ เท่ากับ 0.9 ในพื้นที่การทดลองที่ 1

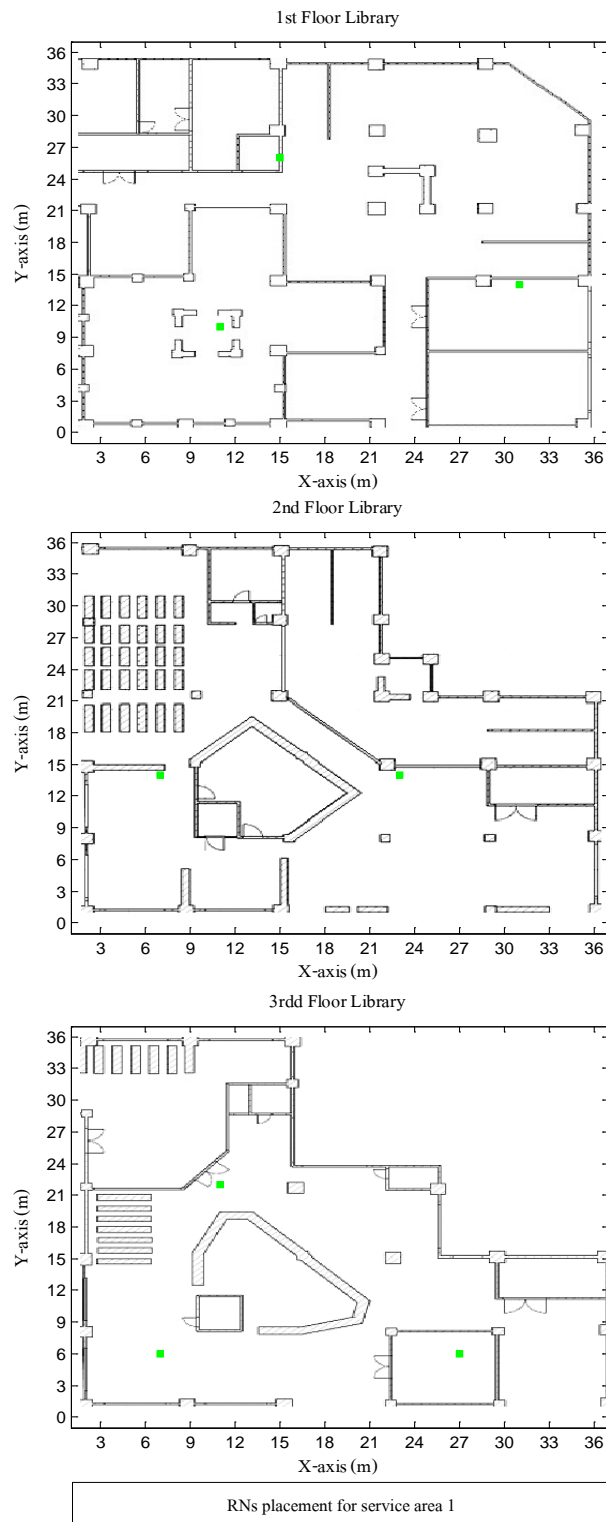
| #Max noimprove | Best (nWatt) | Worst (nWatt) | Avg. (nWatt) | Std. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 100 | 30.96 | 30.07 | 30.73 | 0.34 | 12 |
| 200 | 30.96 | 29.82 | 30.64 | 0.38 | 16 |
| 300 | 30.96 | 30.10 | 30.72 | 0.26 | 18 |
| 400 | 30.96 | 30.38 | 30.71 | 0.24 | 21 |
| 500 | 30.96 | 30.34 | 30.75 | 0.23 | 19 |
| 1000 | 30.96 | 30.52 | 30.75 | 0.15 | 28 |
| 1500 | 30.96 | 30.61 | 30.83 | 0.14 | 36 |
| 2000 | 30.96 | 30.75 | 30.88 | 0.08 | 35 |

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 และค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ในพื้นที่การทดลองที่ 2

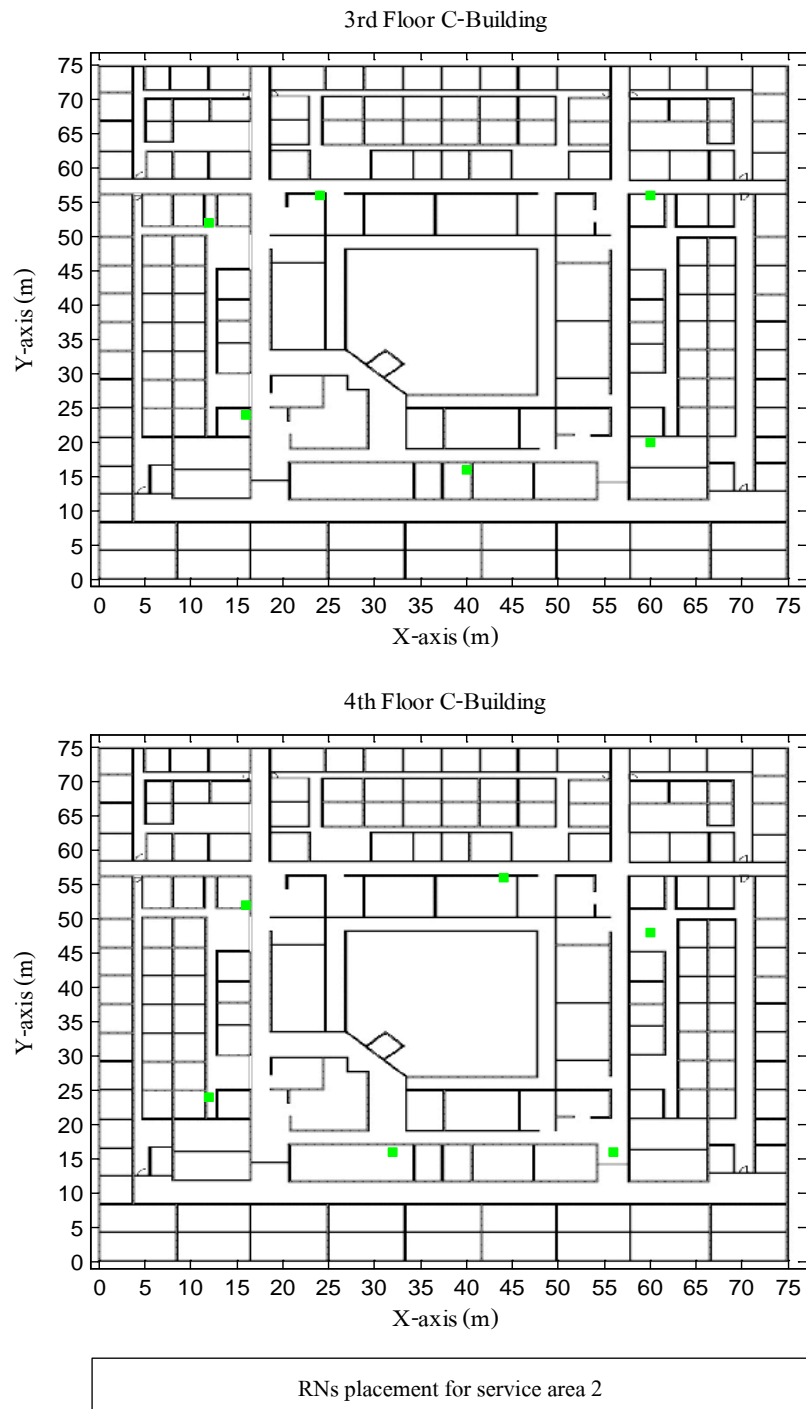
| #Max noimprove | Best (nWatt) | Worst (nWatt) | Avg. (nWatt) | Std. (nWatt) | Avg. run time (sec) |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 100 | 76.73 | 75.56 | 76.13 | 0.59 | 30 |
| 200 | 76.77 | 75.75 | 76.43 | 0.37 | 53 |
| 300 | 76.98 | 75.53 | 76.48 | 0.49 | 57 |
| 400 | 76.96 | 75.76 | 76.34 | 0.39 | 65 |
| 500 | 76.94 | 76.16 | 76.58 | 0.39 | 70 |
| 1000 | 76.91 | 75.92 | 76.57 | 0.35 | 89 |
| 1500 | 76.98 | 75.76 | 76.60 | 0.36 | 110 |
| 2000 | 77.01 | 76.01 | 76.69 | 0.27 | 133 |

3.4.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอุ่นจำลองในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น

จากการทดลองสรุปได้ว่า การกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอุ่นจำลองในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นนั้น จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าดังต่อไปนี้ในการทดลองต่อไป พารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 ค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ค่าอนุหภูมิต่ำสุด $CT_{min} = 0.01$ และค่า $Max_noimprove$ เท่ากับ 2000 ครั้ง โดยมีตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงดังรูปที่ 3.12 สำหรับอาคารบรรณสาร และ รูปที่ 3.13 สำหรับอาคารวิชาการ



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่การทดลองที่ 1



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่การทดลองที่ 2

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

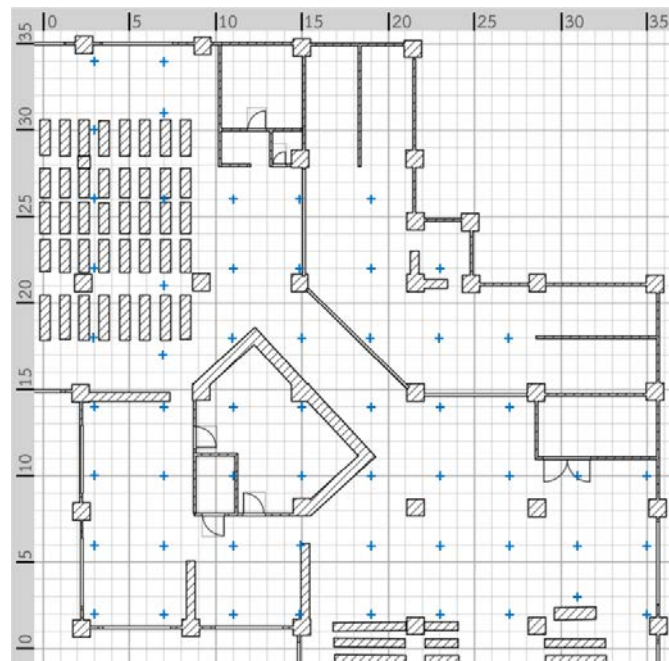
จากเนื้อหาในบทก่อนหน้าได้นำเสนอแนวคิดของการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยได้นำเสนอแนวคิดการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning system: IPS) เนื่องจากตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงนั้นจะต้องถูกติดตั้งไว้ในบริเวณพื้นที่ให้บริการเป็นลำดับแรกก่อนจะให้บริการระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารได้ โดยตำแหน่งที่เลือกติดตั้งโนดอ้างอิงนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารรวมถึงความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุ และเนื่องจากระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารควรมีประสิทธิภาพสามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้ให้บริการระบบระบุตำแหน่งในทุกลักษณะพื้นที่ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่อาคารชั้นเดียว อาคารหลายชั้น อาคารที่มีขนาดใหญ่ความซับซ้อนมาก ดังนั้นการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมครอบคลุมทั่วพื้นที่และลักษณะรูปแบบอาคารให้บริการนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างเหมาะสมอีกด้วย สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 4.1 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Uniform Placement 4.2 การเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งวัตถุจากการใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงกับการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรม 4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งวัตถุเมื่อพิจารณาจำนวนโนดวัตถุ 4.4 การวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ 4.5 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

4.1 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Uniform Placement

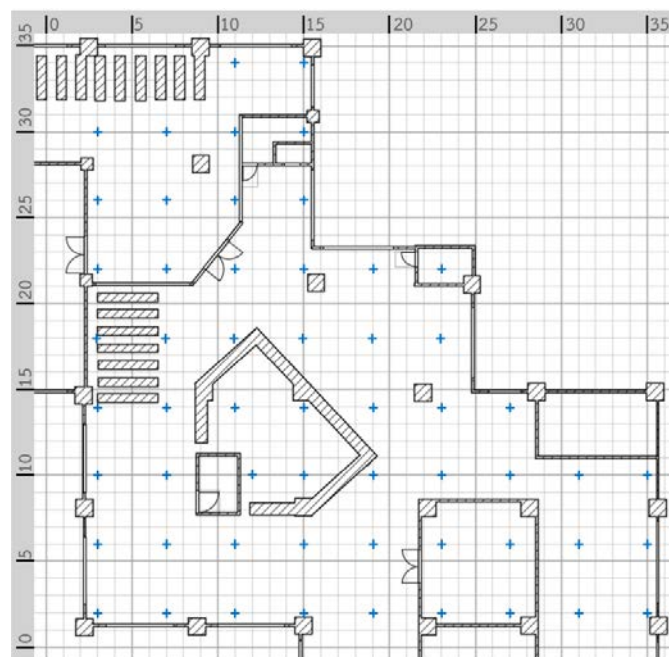
ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำของการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Uniform Placement โดยจะเปรียบเทียบการระบุตำแหน่งวัตถุด้วยวิธีการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปρίนซ์ที่ได้จากการวัดจริงในพื้นที่ทำการทดลอง โดยเลือกจุดทดสอบเป็นตำแหน่งเดียวกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปρίนซ์และจุดทดสอบที่ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบจริง โดยใช้เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนเป็นวิธีการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำของทั้งสองเทคนิค

4.1.1 สถานที่และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

การเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำของการระบุตำแหน่งได้ทำการทดลองในอาคารบรรณสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 2 ชั้น (2nd floor และ 3rd floor) ขนาดพื้นที่การทดลองแต่ละชั้นประมาณ 35 เมตร x 35 เมตร มีจำนวนพิกัดฟิงเกอร์ปρίนซ์ 110 พิกัดและเลือกจุดทดสอบจำนวน 88 จุดทดสอบ กำหนดให้แต่ละชั้นติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โนด (RN1 – RN4) โดยมีความสูงจากพื้น 2 เมตร กำหนดให้โนดวัตถุหรือโนดที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลติดตั้งอยู่บนรถเข็นและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โนดบู๊ทมีความสูงจากพื้น 0.8 เมตร สามารถเก็บบันทึกค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ทุก 3 วินาที ซึ่งในการทดลองผู้วิจัยได้กำหนดระยะห่างของตำแหน่งฟิงเกอร์ปρίนซ์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 4 เมตร (grid spacing 4x4 m²) รูปที่ 4.1a-b แสดงพื้นที่การทดลอง ณ อาคารบรรณสาร เครื่องหมายวงกลมสีน้ำเงินแทนพิกัดฟิงเกอร์ปρίนซ์ที่มีทั้งหมด 110 พิกัด รูปที่ 4.2a-b แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งโนดอ้างอิง วงกลมสีแดงแทนตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่หาได้จากเทคนิคที่เราได้นำเสนอ วงกลมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบยูนิฟอร์ม และรูปที่ 4.3a-b แสดงตำแหน่งทดสอบทั้ง 88 จุด ที่เลือกจากพิกัดฟิงเกอร์ปρίนซ์

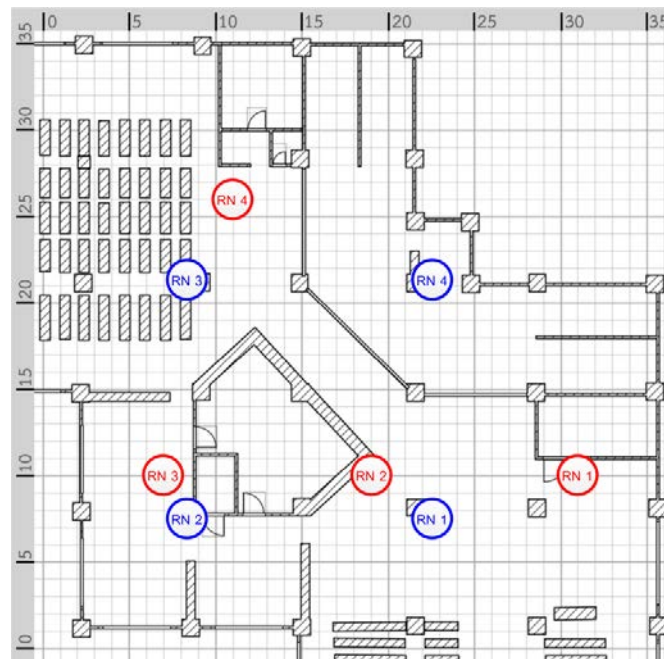


a. พิกัดฟิงเกอร์ปริ้นท์บนชั้นที่ 2 (fingerprint 56 points)

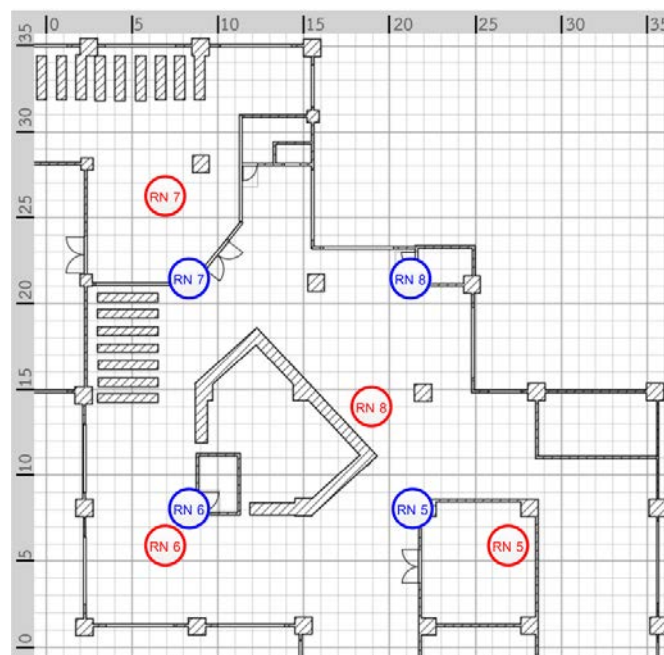


b. พิกัดฟิงเกอร์ปริ้นท์บนชั้นที่ 3 (fingerprint 54 points)

รูปที่ 4.1a-b แสดงพื้นที่การทดลอง ณ อาคารบรรณสาร 2 ชั้น (พิกัดฟิงเกอร์ปริ้นท์ 110 พิกัด)

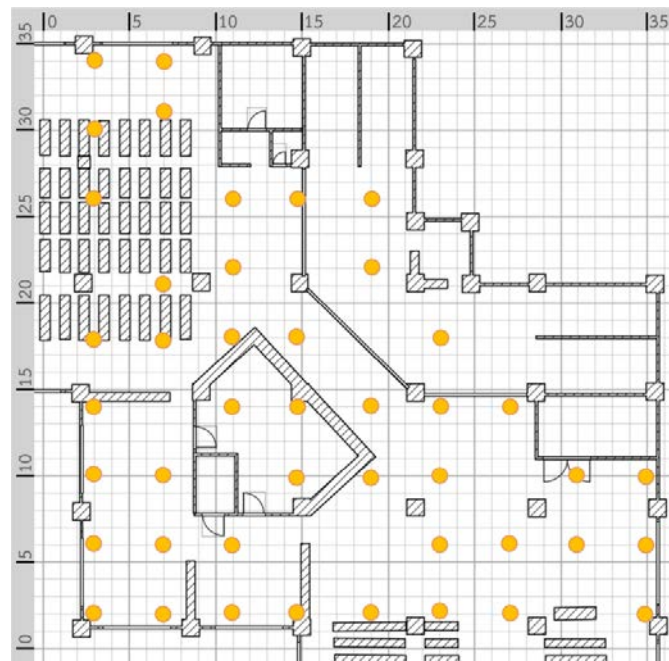


๑. ตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงบนชั้นที่ 2

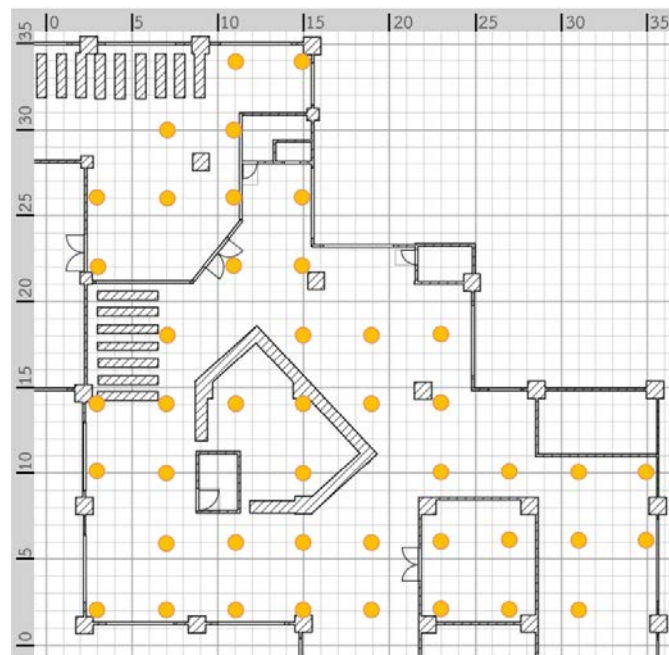


๒. ตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงบนชั้นที่ 3

รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง โนคอ้างอิง ณ อาคารบรรณสาร 2 ชั้น



a. ตำแหน่งวัตถุบนชั้นที่ 2 (Target 44 point)



b. ตำแหน่งวัตถุบนชั้นที่ 3 (Target 44 point)

รูปที่ 4.3 ตำแหน่งวัตถุของอาคารบรรณสาร 2 ชั้น (88 จุดทดสอบ)

4.1.2 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

สำหรับการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 3 ชนิดคือ MC13224 Sensor Node MC13224 Network Node และ MC13224-LPN ของ Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล แต่ละชนิดมีกำลังส่งสูงสุดเท่ากับ +1.7dBm โดยมีชนิดของสายอากาศ 2 ชนิดคือ F-antenna (Inverted F-antenna) และ SMA-antenna (Sub Miniature version “A” connector antenna) โดยโนดวัตถุจะเลือกใช้ MC13224 Sensor Node ขณะที่โนดอ้างอิงจะประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด และกำหนดให้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายทุกโนดให้ทำงานในย่านความถี่ 2.480 GHz (Channel 26) สำหรับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 และรายละเอียดอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแสดงดังตารางที่ 4.1

- เสาสำหรับติดตั้งโนดอ้างอิงสูง 2 เมตร จำนวน 8 ต้น
- เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (Computer Notebook)
- สาย serial port
- ถ่านชาร์จขนาด AA จำนวน 18 ก้อน
- แผ่นชาร์จถ่าน ขนาด AA 4 เครื่อง



a. โนดอ้างอิง

b. โนดวัตถุ

รูปที่ 4.4 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ใช้ในงานวิจัย

| อุปกรณ์ | พารามิเตอร์ | |
|-------------|--|---------------------------------|
| Sensor node | ผู้ผลิต | Freescale |
| | ชิปเซต | MC13224V |
| | ช่วงความถี่ | 2.405 GHz – 2.480 GHz |
| | กำลังส่ง | Max transmit power (+1.7 dBm) |
| | ช่องสัญญาณ | CH 26 (2.480 GHz) |
| | สายอากาศ | Inverted F-antenna, SMA-antenna |
| | ค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่จะรับได้ | -100 dBm |

4.1.3 การเก็บบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ

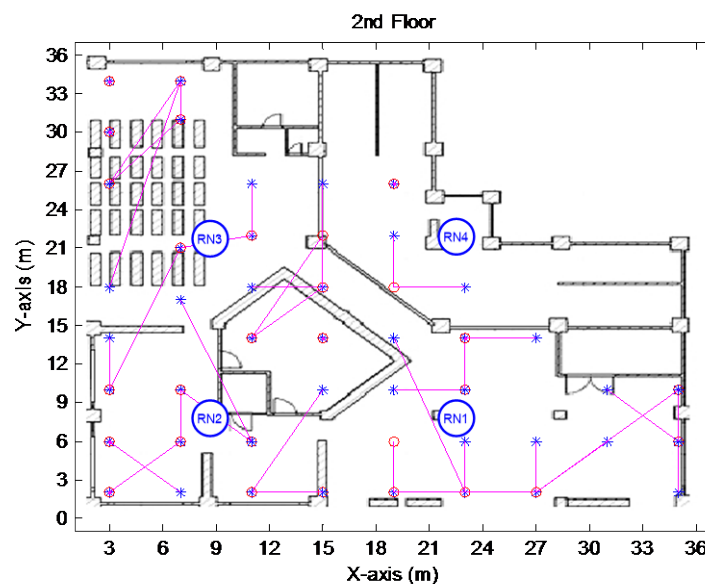
การเก็บบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบเพื่อใช้สร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ ในขั้นตอนออฟไลน์เฟสจะเป็นขั้นตอนแรกเริ่ม โดยโนดวัตถุ (Target node) หรือโนดที่ใช้วัดข้อมูลจะเก็บบันทึกค่าข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง (Reference node) ที่ได้ติดตั้งไว้ในพื้นที่ทำการทดลอง จำนวน 100 ครั้ง (ใช้เวลาประมาณ 6 นาทีต่อหนึ่งฟิงเกอร์ปรีนท์) และในแต่ละครั้งของการวัดค่าความเข้มสัญญาณ ถ้าหากโนดวัตถุไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้ จะกำหนดให้ค่าความเข้มสัญญาณในการวัดครั้งนั้นมีค่าเท่ากับ -110 dBm หรืออีกความหมายคือ สัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงมีค่าอ่อนมาก ในทางเดียวกันถ้าครบเวลาที่กำหนดแล้วมีค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงใดมีค่าไม่ครบ 100 ครั้ง จะกำหนดให้ค่าความเข้มสัญญาณในการวัดครั้งที่เหลือมีค่าเท่ากับ -110 dBm จากนั้นขั้นตอนถัดมาคือการใส่กระบวนการกรองข้อมูล (data filter) เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลนั้น ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กรองข้อมูลด้วยวิธีเปอร์เซ็นต์ไทล์ (percentile) เพื่อกำจัดค่าผิดปกติ (outliers) ของข้อมูลและจะนำข้อมูลที่ผ่านกระบวนการกรองข้อมูลแล้วไปหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลนั้น เพื่อใช้สร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ที่ได้จากการวัดจริงในพื้นที่การทดลอง

สำหรับขั้นตอนออนไลน์เฟสจะเป็นขั้นตอนการระบุตำแหน่งของวัตถุ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการวัดค่าความเข้มสัญญาณ โดยโนดวัตถุจะทำการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง ณ จุดที่ต้องการทราบตำแหน่ง จำนวน 20 ครั้ง (ใช้เวลาประมาณ 1 นาทีครึ่งต่อหนึ่งจุด) ขั้นตอนต่อมาเป็นการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ โดยการทดลอง

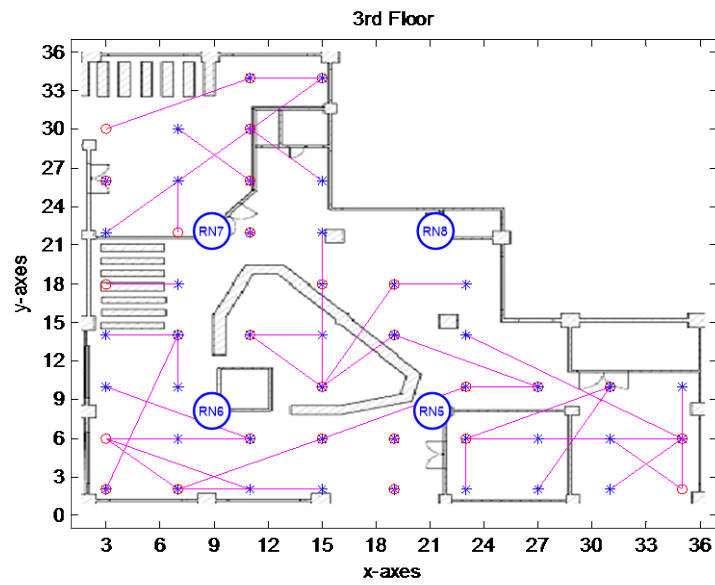
นี้เลือกใช้เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean distance) ซึ่งเป็นวิธีการระบุตำแหน่งโดยเลือกตำแหน่งที่มีค่าความแรงสัญญาณในฐานะข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ใกล้เคียงกับค่าความแรงสัญญาณที่โนควัตถุรับได้จากโนคอ้างอิงมากที่สุด

4.1.4 การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล

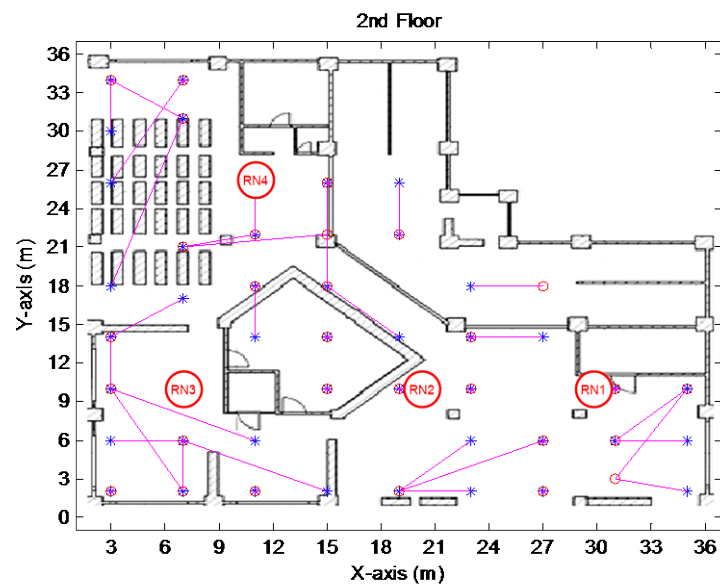
ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งโนคอ้างอิงที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคการกำหนดตำแหน่งโนคอ้างอิงแบบ Uniform Placement โดยทั้ง 2 เทคนิคจะมีพิกัดฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์จำนวน 110 พิกัด มีกำหนดระยะห่างของพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 4 เมตร และมีการสุ่มเลือกตำแหน่งโนควัตถุที่ได้จากการวัดจริงจำนวน 88 จุด เพื่อใช้วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพของทั้ง 2 เทคนิค โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุด้วยวิธีระยะห่างยูคลีเดียน ซึ่งผลการทดลองในการระบุตำแหน่งวัตถุสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงแบบ Uniform Placement แสดงดังรูปที่ 4.5a-b และผลการทดลองในการระบุตำแหน่งวัตถุสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงแบบ MSMR-SA แสดงดังรูปที่ 4.5c-d



รูปที่ 4.5a ผลการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงแบบ Uniform Placement ณ อาคารบรรณสารชั้นที่ 2



รูปที่ 4.5b ผลการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิง
แบบ Uniform Placement ณ อาคารบรรณสารชั้นที่ 3



รูปที่ 4.5c ผลการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิง
แบบ MSMR-SA ณ อาคารบรรณสารชั้นที่ 2

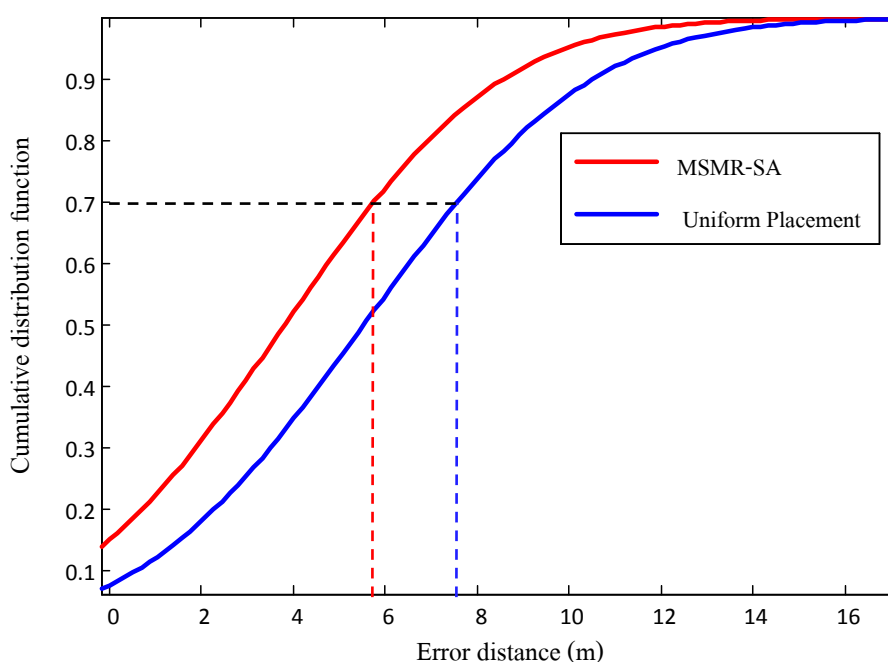


รูปที่ 4.5d ผลการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ณ อาคารบรรณสารชั้นที่ 3

จากรูปที่ 4.5a-d จะเห็นได้ว่าโนดอ้างอิงที่ใช้ติดตั้งของทั้งสองเทคนิคมีจำนวนเท่ากัน แต่ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงของทั้งสองเทคนิคไม่เหมือนกัน โดยตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA มีลักษณะที่เหมาะสมกับพื้นที่มากกว่าตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement และจะสังเกตเห็นว่าตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ให้ค่าระยะทางคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของตำแหน่งวัตถุจริงกับตำแหน่งที่ได้จากวิธียูคลิเดียนน้อยกว่าการติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement ในพื้นที่การทดลองทั้ง 2 ชั้น ซึ่งหมายความว่า การติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ให้ความถูกต้องและแม่นยำในการระบุตำแหน่งมากกว่าการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement

จากนั้นเมื่อนำมาพิจารณาฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของระยะทางคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับทั้ง 2 เทคนิค แสดงดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนภายในระยะ 6 เมตร การเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งสูงถึง 72% แต่การติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement ให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเพียง 52% และถ้าพิจารณาที่ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ 70% การติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ให้ค่าความคลาดเคลื่อนภายในระยะ 5.75 เมตร แต่ในส่วนของการติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement ให้ค่าความคลาดเคลื่อนภายในระยะ 7.56 เมตร และเมื่อพิจารณาในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ระบบระบุ

ตำแหน่งที่เลือกติดตั้งโน้ตอ้างอิงแบบ MSMR-SA มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่ง 3.81 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งมากที่สุดอยู่ที่ 13.60 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.69 เมตร ซึ่งดีกว่าการติดตั้งโน้ตอ้างอิงแบบ Uniform Placement โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่ง 5.53 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งมากที่สุดอยู่ที่ 16.97 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.87 เมตร ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกวางตำแหน่งติดตั้งโน้ตอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้อง และความแม่นยำในระบบระบุตำแหน่งเฉลี่ยได้สูงถึง 31%



รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของระยะทางคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุจริงสำหรับทั้ง 2 เทคนิค (grid spacing $4 \times 4 \text{ m}^2$)

ตารางที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งที่ได้จากการวัดจริง โดยการเลือกติดตั้ง โหนด
อ้างอิงในอาคาร 2 ชั้น

| Performance metric | Error distances (meters) | |
|---|--------------------------|---------|
| | Uniform Placement | MSMR-SA |
| Average | 5.53 | 3.81 |
| Max. | 16.97 | 13.60 |
| Min. | 0.00 | 0.00 |
| S.D. | 3.87 | 3.69 |
| 70 th percentile of Estimation error | 7.56 | 5.75 |

4.2 การเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งวัตถุจากการใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการวัดจริง กับการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรม

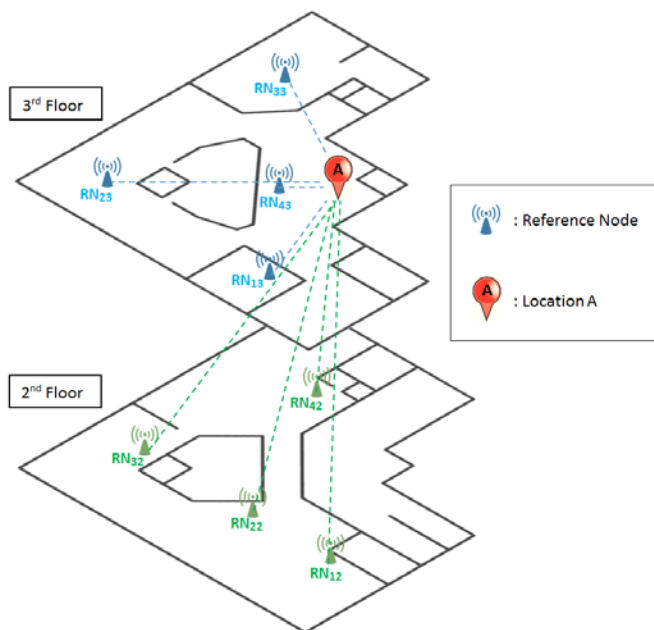
จากการทดลองก่อนหน้านี้ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาตำแหน่งวัตถุ ด้วยการวางตำแหน่ง โหนดอ้างอิงที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น คือ การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA เปรียบเทียบกับการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement ซึ่งเป็นแนวคิดจากงานวิจัยอ้างอิง โดยได้ทำการวัดสัญญาณจริงเพื่อสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบระบุตำแหน่งได้ดีกว่าการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงจากงานวิจัยอ้างอิงในการทดลองวัดสัญญาณจริง ดังนั้นสำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จึงได้นำผลการทดลองการระบุตำแหน่งวัตถุจากการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนที่ได้จากการวัดสัญญาณจริงมาสร้างการจำลองสัญญาณขึ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดสัญญาณจริง โดยใช้เทคนิค ระยะห่างยูคลิเดียนเป็นวิธีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำ

ในการทดลองเราได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ได้กำหนดในพื้นที่สำหรับการให้บริการระบบระบุตำแหน่งเป็นอาคารบรรณสารชั้นที่ 2 และ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 35x35 ตารางเมตร มีตำแหน่ง โหนดอ้างอิงทั้งหมด 8 โหนดที่ได้การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (MSMR-SA) และการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement กำหนดตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนทั้งหมด 110 ตำแหน่ง และ

ตำแหน่ง โหนดวัตถุสำหรับการทดลองหาตำแหน่งทั้งหมด 88 ตำแหน่ง ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมานี้ จะเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 การจำลองค่าความแรงสัญญาณเพื่อใช้ในการสร้างฐานข้อมูล ฟิงเกอร์ปรีนในขั้นตอนออฟไลน์เฟส และการจำลองค่าความแรงสัญญาณของตำแหน่ง โหนดวัตถุใน ขั้นตอนออนไลน์เฟสจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองค่าความแรงสัญญาณขึ้นโดยใช้ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดสัญญาณจริง

4.2.1 ข้อมูลความเข้มของสัญญาณ

การจำลองความเข้มสัญญาณที่รับได้ ผู้วิจัยได้ใช้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางระหว่างโหนดอ้างอิงกับ โหนดวัตถุจากการวัดจริง โดยการวัดข้อมูล ความเข้มของสัญญาณในแต่ละครั้งจะได้ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่โหนดวัตถุรับได้จากโหนดอ้างอิง (reference node : RN) ที่ติดตั้งไว้ในพื้นที่การทดลองพร้อมกับชื่อของโหนดอ้างอิงนั้น ตัวอย่างการวัด สัญญาณข้อมูล ถ้าโหนดวัตถุตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง A แสดงได้รูปที่ 4.7 และข้อมูลที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.3 ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลที่วัดได้จากโหนดอ้างอิงที่อยู่ภายในพื้นที่การทดลอง เช่น $RN_{12} = -91.10$ dBm หมายถึง โหนดวัตถุตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง A สามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิง ตัวที่ 1 ของอาคารชั้นที่ 2 (แทนด้วย RN_{12}) มีค่าเท่ากับ -91.10 dBm และ $RN_{43} = -66.87$ dBm หมายถึง โหนดวัตถุตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง A สามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงตัวที่ 4 ของอาคารชั้นที่ 3 (แทนด้วย RN_{43}) มีค่าเท่ากับ -66.87 dBm เป็นต้น จากนั้นนำค่าที่เก็บรวบรวม ได้มาคำนวณหาระยะห่างระหว่างโหนดวัตถุ (ภาครับตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง A) กับโหนดอ้างอิงแต่ละตัว (ภาคส่ง) โดยใช้ทฤษฎีบทพีทาโกรัส (Pythagorean theorem) คำนวณหาระยะห่างในระบบ 3 มิติ (x, y, z)



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้น

ตารางที่ 4.3 ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง ณ จุดทดสอบ A

| Point A (x, y, z) | Floor | Received Signal Strength (dBm) | | | |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
| | | RN1 | RN2 | RN3 | RN4 |
| (20, 10, 3) | 2 nd | -91.10 | -90.48 | -91.21 | -95.30 |
| | 3 rd | -63.23 | -69.66 | -75.83 | -66.88 |

ในส่วนของวิธีการคำนวณระยะห่างระหว่างโนดอ้างอิงกับโนดวัตถุ สามารถทำได้ดังนี้ ยกตัวอย่างการคำนวณระยะห่างระหว่างโนดอ้างอิงตัวที่ 1 ของชั้นที่ 2 (RN₁₂) กับโนดวัตถุที่ตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง A โดยกำหนดพิกัดของโนดอ้างอิง RN₁₂ คือ (31, 10, 2) และกำหนดพิกัดของตำแหน่ง A คือ (23, 10, 3) อธิบาย (x, y, z) โดยที่ x, y คือ ระยะจริงในแนวแกนราบมีหน่วยเป็นเมตร ส่วน z คือ หมายเลขชั้นของตำแหน่งนั้น เราจึงต้องเปลี่ยนค่า z ให้เป็นระยะจริงที่มีหน่วยเป็นเมตร สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดความสูงของโนดวัตถุหรือโนดที่ใช้วัดข้อมูลเท่ากับ 0.8 เมตร กำหนดความสูงของโนดอ้างอิงจากพื้นเท่ากับ 2 เมตร และระยะห่างของชั้นอาคารในแต่ละชั้นคือ 4 เมตร ดังนั้น พิกัดจริงของโนดอ้างอิง RN₁₂ และ พิกัดจริงของจุดทดสอบ A คือ (31, 10, 6) และ (23, 10, 8.8) ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณหาระยะห่างของสองพิกัดนี้ด้วยทฤษฎีบทพีทาโกรัสดังสมการที่ 4.1 จะได้

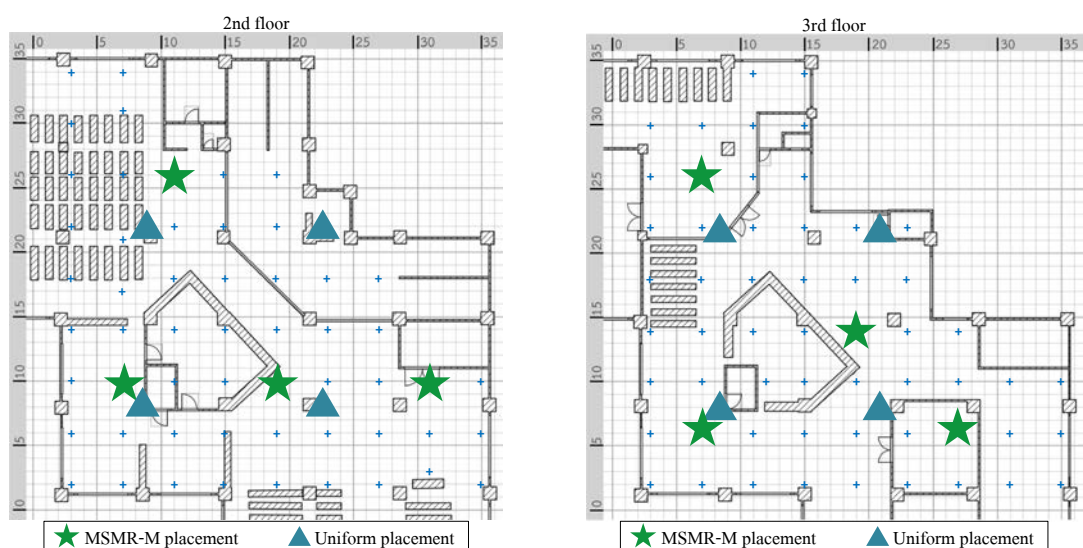
$$\begin{aligned}
 \text{Distance} &= \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} & (4.1) \\
 \text{Distance} &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\
 \text{แทนค่า} \quad \text{Distance} &= \sqrt{(23 - 31)^2 + (10 - 10)^2 + (8.8 - 6)^2} \\
 \text{Distance} &= 8.48 \text{ m}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นระยะห่างระหว่างโนดอ้างอิง RN₁₂ กับโนดวัตถุที่ตำแหน่ง A บนชั้นที่ 3 ของอาคาร มีค่าเท่ากับ 8.48 เมตร

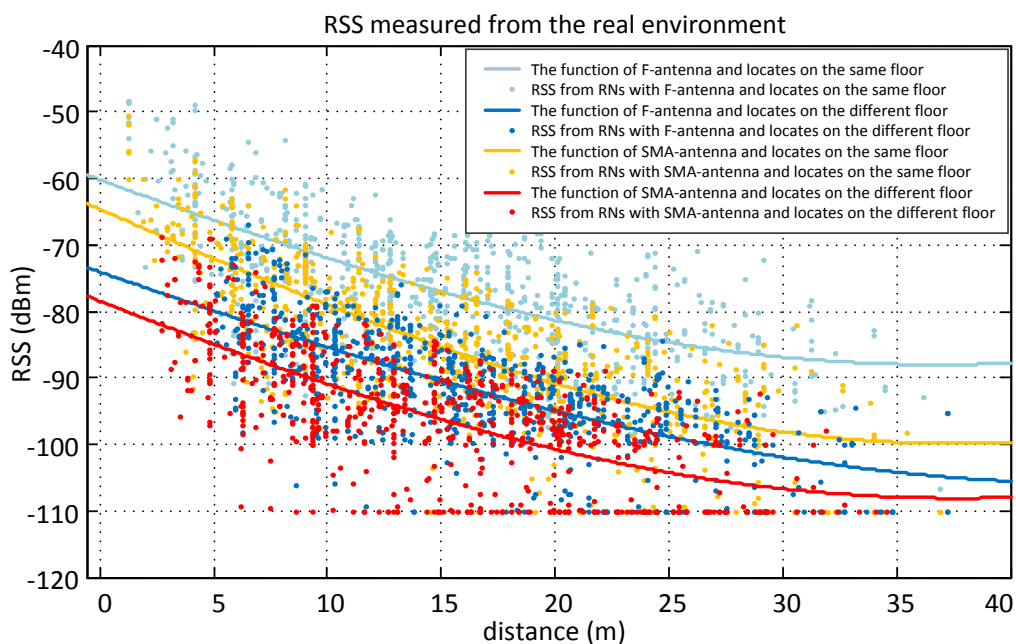
เมื่อได้ข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณและระยะทางแล้ว (RSS = -91.10 dBm, Distance = 8.48 เมตร) ขั้นตอนต่อมาคือการนำข้อมูลที่นำไปพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสัญญาณกับระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลความสัมพันธ์ โดยมีประเภทสายอากาศของโนดอ้างอิงในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดคือ F-antenna และ SMA-antenna ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งกรณีของข้อมูลออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 โนดอ้างอิงและโนดวัตถุอยู่ในชั้นเดียวกัน (same floor) และ กรณีที่ 2 โนดอ้างอิงและโนดวัตถุอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น (across one floor) ยกตัวอย่าง กรณีที่ โนดอ้างอิงและโนดวัตถุอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น เช่น โนดวัตถุหรือโนดที่ใช้วัดสัญญาณอยู่ในชั้นที่ 2 และตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิงอยู่ในชั้นที่ 3 เป็นต้น โดยมีตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 4.8 สัญลักษณ์ดาวสี่เหลี่ยมแสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA และสัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีฟ้าแสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform placement สุดท้ายเมื่อเก็บรวบรวมข้อมูลจะได้ค่าเฉลี่ยข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางสำหรับสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna และสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna

รูปที่ 4.9 แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางสำหรับสายอากาศของโนดอ้างอิง 2 ชนิด สัญลักษณ์จุดสีฟ้าแสดงค่าความเข้มสัญญาณที่วัดจริงจากสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน สัญลักษณ์จุดสีน้ำเงินแสดงค่าความเข้มสัญญาณที่วัดจริงจากสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น สัญลักษณ์จุดสีส้มแสดงค่าความเข้มสัญญาณที่วัดจริงจากสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน สัญลักษณ์จุดสีแดงแสดงค่าความเข้มสัญญาณที่วัดจริงจากสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น ต่อมาได้ทำการหาฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละกรณีด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงด้วยเส้นทึบดังรูปที่ 4.9 เส้นทึบสีฟ้าแสดงฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna

ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน ดังสมการที่ 4.2 เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนคอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น ดังสมการที่ 4.3 เส้นทึบสีส้มแสดงฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนคอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน ดังสมการที่ 4.4 เส้นทึบสีแดงแสดงฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนคอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งรายละเอียดค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนคอ้างอิงแต่ละกรณีในระยะทางต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ก.7 (ภาคผนวก ก.2.3)



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการ



รูปที่ 4.9 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางจากการวัดจริง

$$f_1(d) = -88.02 \exp(-((d-36.78)/59.72)^2) \quad (4.2)$$

$$f_2(d) = -106 \exp(-((d-44.82)/74.74)^2) \quad (4.3)$$

$$f_3(d) = -99.84 \exp(-((d-37.57)/56.94)^2) \quad (4.4)$$

$$f_4(d) = -108.1 \exp(-((d-37.7)/66.46)^2) \quad (4.5)$$

4.2.2 การจำลองข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่รับได้

การจำลองข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่รับได้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ โดยมีวัตถุประสงค์ให้ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้จากการจำลองมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการวัดข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้จริงมากที่สุด โดยผู้วิจัยได้ใช้คุณสมบัติของฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีรวมกับการแจกแจงแบบต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีรวมกับค่า Shadow fading ที่คำนวณจากการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) และ กรณีที่ 2 ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความ

เข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีรวมกับค่า Shadow fading ที่คำนวณจากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform distribution)

4.2.2.1 ฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีรวมกับค่า Shadow fading ที่คำนวณจากการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)

จากรูปที่ 4.9 ผู้วิจัยสังเกตได้ว่า การวัดค่าความเข้มสัญญาณในแต่ละครั้งถึงแม้ว่าระยะทางระหว่างโนดอ้างอิง (ภาคส่ง) และโนดวัด (ภาครับ) จะมีค่าเท่ากัน แต่ข้อมูลที่วัดได้กลับมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากสภาวะแวดล้อมในระหว่างทำการทดลอง สิ่งกีดขวางระหว่างทางมีความแปรปรวนทำให้ความเข้มสัญญาณที่รับได้มีค่าไม่คงที่ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้นำการแจกแจงแบบปกติมาใช้เพื่อจำลองค่าความแปรปรวนของสัญญาณ (Shadow fading) ทำให้ได้สมการการจำลองค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ดังสมการที่ 4.6 ซึ่งประกอบด้วย ฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณี ($f_i(d)$) รวมกับค่า Shadow fading ที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติ

ในขั้นตอนของการแจกแจงแบบปกติ ผู้วิจัยได้แบ่งเป็นช่วงระยะต่าง ๆ ออกเป็น 13 ช่วง ๆ ละ 3 เมตร เพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ซึ่งได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ภาคส่งและภาครับอยู่ในชั้นเดียวกัน กรณีที่ภาคส่งและภาครับอยู่ต่างชั้นหนึ่งชั้น สำหรับสายอากาศทั้ง 2 ชนิด F-antenna และ SMA-antenna แสดงดังตารางที่ 4.4

$$f_{i,normal}(d) = f_i(d) + N(\mu, \sigma) \quad (4.6)$$

| | | | |
|--------|-------------------|-----|---|
| โดยที่ | $f_{i,normal}(d)$ | คือ | ค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีที่ระยะทาง d รวมกับการแจกแจงแบบปกติ |
| | μ | คือ | ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติ |
| | σ | คือ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้แสดงในตารางที่ 4.4 |
| | $i = 1$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน ($f_1(d)$ จากสมการที่ 4.2) |
| | $i = 2$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างชั้นหนึ่งชั้น ($f_2(d)$ จากสมการที่ 4.3) |
| | $i = 3$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้ง |

อยู่บนชั้นเดียวกัน ($f_3(d)$ จากสมการที่ 4.4)

$i = 4$ คือ กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้ง
อยู่ต่างกันหนึ่งชั้น ($f_4(d)$ จากสมการที่ 4.5)

ตารางที่ 4.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มสัญญาณในช่วงระยะทางต่าง ๆ

| ช่วงระยะต่าง ๆ | กรณีที่ตั้งของภาคส่งและภาครับ | | | |
|----------------|-------------------------------|-------------|------------------|-------------|
| | บนชั้นเดียวกัน | | ต่างกันหนึ่งชั้น | |
| | F-antenna | SMA-antenna | F-antenna | SMA-antenna |
| 0-3 ม. | 8.18 | 7.37 | N/A* | 6.10 |
| 3-6 ม. | 8.43 | 7.02 | 8.09 | 7.19 |
| 6-9 ม. | 7.20 | 7.83 | 6.87 | 6.75 |
| 9-12 ม. | 7.07 | 6.91 | 6.51 | 7.18 |
| 12-15 ม. | 6.23 | 7.16 | 6.21 | 7.27 |
| 15-18 ม. | 6.38 | 6.20 | 5.65 | 7.50 |
| 18-21 ม. | 6.85 | 6.27 | 5.23 | 6.42 |
| 21-24 ม. | 5.97 | 8.51 | 7.21 | 6.26 |
| 24-27 ม. | 6.63 | 7.19 | 5.65 | 6.18 |
| 27-30 ม. | 6.94 | 7.26 | 5.52 | 5.42 |
| 30-33 ม. | 5.44 | 10.55 | 5.79 | 4.18 |
| 33-36 ม. | 4.82 | 7.03 | 6.15 | 0** |
| >36 ม. | 9.65 | 0** | 8.07 | 0** |

หมายเหตุ : N/A* หมายถึง ไม่มีข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้ในช่วงระยะทางดังกล่าว

0** หมายถึง ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้ที่อยู่ในช่วงระยะทางดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0
ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงมีค่าเท่ากับ 0

ในการจำลองข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้เพื่อนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลฟังก์ชันการปรับแก้ด้วยวิธีฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีในระยะทางต่าง ๆ ร่วมกับการแจกแจงแบบปกติสำหรับการทดลองการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสามารถทำได้ดังนี้

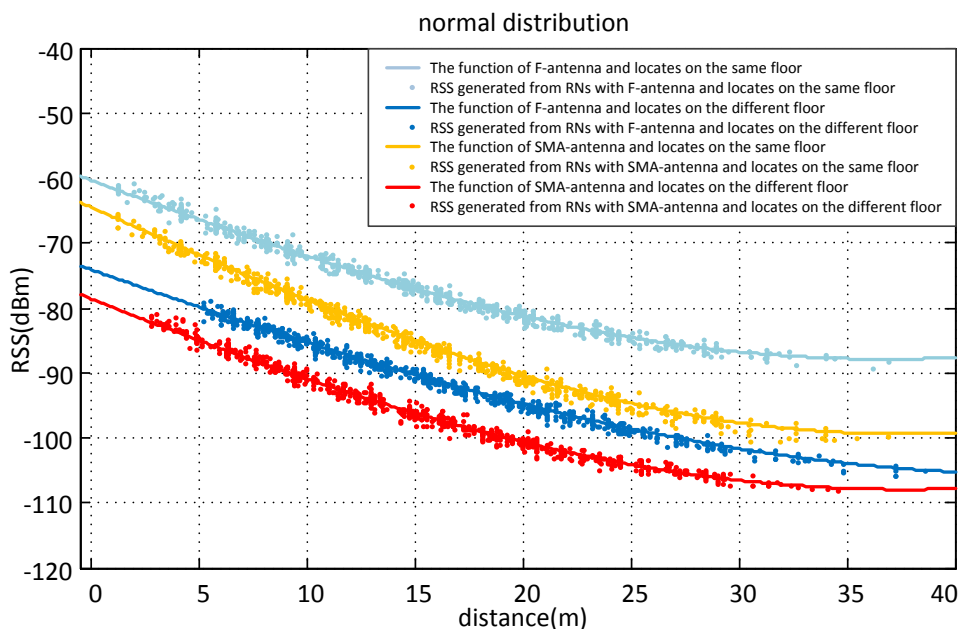
1) คำนวณหาระยะห่างระหว่างภาคส่ง (โนดอ้างอิง) และภาครับ (โนดวัตถุ) จากฟังก์ชันของโนดทั้งสอง ตามทฤษฎีบทพีทาโกรัสดังสมการที่ 4.1

2) นำระยะทางที่ได้ไปแปลงเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้จากความสัมพันธ์ตามกรณีของที่ตั้ง โนดภาคส่งและภาครับและตามกรณีของชนิดสายอากาศภาคส่ง (ความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.9) จากนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ของระยะทางนั้น ๆ

3) ทำการสุ่มตัวเลขซึ่งเป็นการสุ่มค่าความแปรปรวนของสัญญาณเนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยใช้การสุ่มแบบแจกแจงปกติ (normal distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามช่วงที่ได้จากตารางที่ 4.4

4) นำค่าตัวเลขดังกล่าวไปรวมกับค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้จากความสัมพันธ์ในข้อที่ 2 จากนั้นจะได้ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ซึ่งเป็นค่าความเข้มสัญญาณที่รวมกับค่าความแปรปรวนของสัญญาณเนื่องจากสภาพแวดล้อม ซึ่งเสมือนกับการวัดข้อมูลความเข้มสัญญาณที่พิกัดใด ๆ จำนวนหนึ่งครั้ง

5) ข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปสร้างเป็นฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์และใช้เป็นข้อมูลของตำแหน่งวัตถุ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีที่ระยะทางต่าง ๆ รวมกับการคำนวณค่า shadow fading ด้วยการแจกแจงแบบปกติ

4.2.2.2 ฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีรวมกับค่า shadow fading ที่คำนวณจากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (uniform distribution)

จากรูปที่ 4.9 ผู้วิจัยสังเกตเห็นได้ว่า การวัดค่าความเข้มสัญญาณในแต่ละครั้ง ถึงแม้ว่าระยะทางระหว่างโนดอ้างอิง (ภาคส่ง) และโนดวัด (ภาครับ) จะมีค่าเท่ากัน แต่ข้อมูลที่วัดได้กลับมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากสภาวะแวดล้อมในระหว่างทำการทดลอง สิ่งกีดขวางระหว่างทางมีความแปรปรวนทำให้ความเข้มสัญญาณที่รับได้มีค่าไม่คงที่ และยังสังเกตเห็นอีกว่า ระยะที่ค่าความเข้มสัญญาณมีการกระจายตัวหนาแน่นในแต่ละกรณีนั้นอยู่ในช่วงระยะประมาณ -10 ถึง +10 ของฟังก์ชัน $f_i(d)$ (ฟังก์ชันเหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณี) ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทดลองนำการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มมาใช้ในการคำนวณค่า shadow fading สำหรับการสร้างฐานข้อมูลจำลองซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.7

$$f_{i,uniform}(d) = f_i(d) + U(\alpha, \beta) \quad (4.7)$$

| | | | |
|--------|--------------------|-----|--|
| โดยที่ | $f_{i,uniform}(d)$ | คือ | ค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีที่ระยะทาง d รวมกับการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม |
| | α | คือ | ค่าขอบล่าง (lower bound) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ -10 |
| | β | คือ | ค่าขอบบน (upper bound) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ +10 |
| | $i = 1$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน ($f_1(d)$ คือสมการที่ 4.2) |
| | $i = 2$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด F-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น ($f_2(d)$ คือสมการที่ 4.3) |
| | $i = 3$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้งอยู่บนชั้นเดียวกัน ($f_3(d)$ คือสมการที่ 4.4) |
| | $i = 4$ | คือ | กรณีที่สายอากาศของโนดอ้างอิงชนิด SMA-antenna ที่ตั้งอยู่ต่างกันหนึ่งชั้น ($f_4(d)$ คือสมการที่ 4.5) |

ในการจำลองข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้เพื่อนำไปใช้เป็นฐานข้อมูล ฟังก์ชันที่ด้วยวิธีฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละ

กรณีทีระยะทางต่าง ๆ รวมกับการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มสำหรับการทดลองการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสามารถทำได้ดังนี้

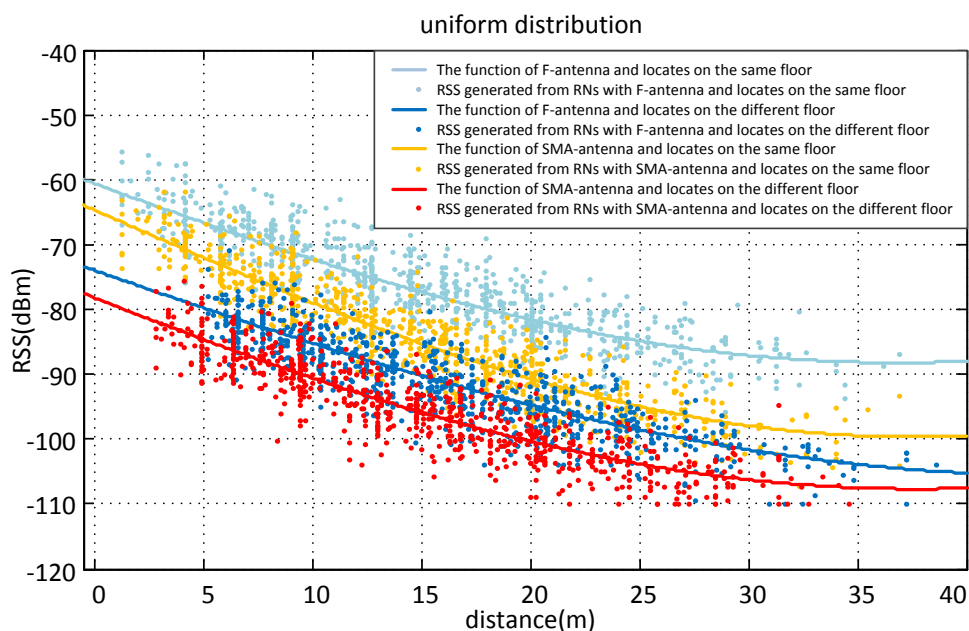
1) คำนวณหาระยะห่างระหว่างภาคส่ง (โนดอ้างอิง) และภาครับ (โนดวัตถุ) จากพิกัดของโนดทั้งสอง ตามทฤษฎีบทพีทาโกรัสดังสมการที่ 4.1

2) นำระยะทางที่ได้ไปแปลงเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้จากความสัมพันธ์ตามกรณีของที่ตั้ง โนดภาคส่งและภาครับและตามกรณีของชนิดสายอากาศภาคส่ง (ความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.9) จากนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ของระยะทางนั้น ๆ

3) ทำการสุ่มตัวเลขโดยใช้การสุ่มแบบยูนิฟอร์ม (uniform distribution) ที่มีค่าขอบล่างอยู่ที่ -10 และขอบบนอยู่ที่ +10

4) นำค่าตัวเลขดังกล่าวไปรวมกับค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้จากความสัมพันธ์ในข้อที่ 2 จากนั้นจะได้ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ซึ่งเป็นค่าความเข้มสัญญาณที่รวมกับค่าความแปรปรวนของสัญญาณเนื่องจากสภาพแวดล้อม ซึ่งเสมือนกับการวัดข้อมูลความเข้มสัญญาณที่พิกัดใด ๆ จำนวนหนึ่งครั้ง

5) ข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปสร้างเป็นฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์และใช้เป็นข้อมูลของตำแหน่งวัตถุ ยกตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของโนดอ้างอิงแต่ละกรณีทีระยะทางต่าง ๆ รวมกับการคำนวณค่า shadow fading ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม

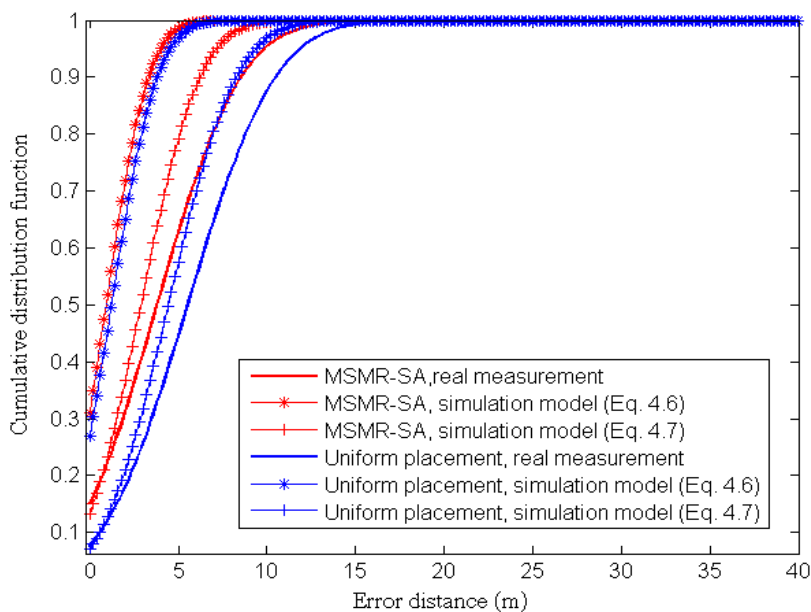
4.2.3 การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของระบบระบุตำแหน่งที่ได้จากการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริงกับการจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้ด้วยวิธีที่ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมรวมกับการแจกแจงแบบปกติและการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม และยังเปรียบเทียบกับการเลือกวางตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA และแบบ Uniform placement ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งการทดลองนี้ได้ทดลองในพื้นที่ให้บริการที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อ 4.2 มีตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนทั้งหมด 110 ตำแหน่ง และตำแหน่งโนดวัตถุประสงค์สำหรับการทดลองหาตำแหน่งทั้งหมด 88 ตำแหน่ง

พิจารณารูปที่ 4.12 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) ที่ระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA และแบบ Uniform placement โดยใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงเปรียบเทียบกับ การจำลองค่าความเข้มสัญญาณด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ สิ่งแรกที่สังเกตเห็นได้คือ การเลือกวางตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ให้ค่าการระบุตำแหน่งผิดพลาดน้อยกว่าการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform placement ทั้งการวัดค่าความเข้มสัญญาณจริงและการจำลอง และเมื่อเปรียบเทียบการจำลองค่าความเข้มสัญญาณจะพบว่า การจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้ด้วยวิธีฟังก์ชันที่เหมาะสมรวมกับการแจกแจงแบบปกติ นั้นให้ค่าการระบุตำแหน่งผิดพลาดน้อยมากเมื่อเทียบกับการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริง ซึ่งผิดกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการสร้างการจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้ใกล้เคียงกับการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริง สุดท้ายผู้วิจัยเห็นว่าการจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้ด้วยวิธีที่ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมรวมกับการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มให้ค่าการระบุตำแหน่งผิดพลาดใกล้เคียงกับการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริงมากกว่า ทั้งการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA และ Uniform placement

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริงของการเลือกตำแหน่งติดตั้งแบบ Uniform placement ให้ค่าความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 5.53 เมตร ส่วนประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริงของการเลือกตำแหน่งติดตั้งแบบ MSMR-SA ให้ค่าความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 3.81 เมตร ซึ่งดีกว่าการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform placement ถึง 31% และ MSMR-SA ยังมีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งดีกว่าถึง 24% ที่การแจกแจงสะสมที่ 70 เปอร์เซนต์ สอดคล้องกับรูปที่ 4.12 และข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 ข้างต้นจะเห็นว่า การจำลองแบบที่ใช้การแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในการคำนวณค่า shadow fading ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับ ได้จริงทั้งการ

เลือกตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA และแบบ Uniform placement ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการจำลองค่าค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ที่ดีกว่าการจำลองแบบที่ใช้การแจกแจงแบบปกติในการคำนวณค่า shadow fading



รูปที่ 4.12 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะการระบุตำแหน่งผิดพลาด

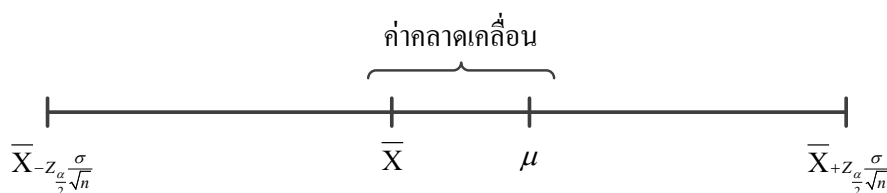
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ

| Performance metric | Error distances (meters) | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| | Uniform Placement | | | MSMR-SA | | |
| | Measurement data | $f_{i,normal}(d)$ | $f_{i,uniform}(d)$ | Measurement data | $f_{i,normal}(d)$ | $f_{i,uniform}(d)$ |
| Average | 5.53 | 1.228 | 4.17 | 3.81 | 0.92 | 2.70 |
| Max. | 16.97 | 5.657 | 8.94 | 13.60 | 6.40 | 8.00 |
| Min. | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| S.D. | 3.87 | 2.01 | 2.68 | 3.69 | 1.870 | 2.36 |
| 70th percentile of Estimation error | 7.56 | 2.29 | 6.01 | 5.75 | 1.91 | 4.25 |

ในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น สรุปได้ว่าการจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ด้วยวิธีที่ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมรวมกับการคำนวณค่า shadow fading ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเข้มสัญญาณจากการวัด ดังนั้น การทดลองในหัวข้อต่อไปผู้วิจัยจะใช้การจำลองค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ด้วยวิธีที่ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมรวมกับการคำนวณค่า shadow fading ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มดังแสดงในสมการที่ 4.7

4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งวัตถุเมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบ

ในการดำเนินการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของการหาตำแหน่งวัตถุในพื้นที่ให้บริการสำหรับระบบระบุตำแหน่งนั้น จำเป็นต้องมีจำนวนจุดทดสอบอย่างเพียงพอ เพื่อให้ผลจากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการกำหนดจำนวนจุดทดสอบด้วยวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่าง โดยพิจารณากรณีข้อมูลมีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ สามารถใช้ทฤษฎีที่กล่าวว่า ถ้า \bar{X} เป็นตัวประมาณค่าของ μ เราสามารถเชื่อมั่นได้ $(1-\alpha)100\%$ ว่า ความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่า $Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งการกำหนดจำนวนจุดทดสอบหรือขนาดตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.8 (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) *ความน่าจะเป็นและสถิติ*)



รูปที่ 4.13 ค่าคลาดเคลื่อน

$$n = \left(\frac{Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma}{e} \right)^2 \tag{4.8}$$

| | | |
|--------|----------|---|
| โดยที่ | n | คือ ขนาดตัวอย่าง |
| | Z | คือ ระดับความเชื่อมั่น |
| | σ | คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
| | e | คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ย |
| | μ | คือ การประมาณค่าเฉลี่ย |

จากทฤษฎีข้างต้นต่อไปเป็นการดำเนินการทดลองคำนวณหาจำนวนของจุดทดสอบจากผลข้อมูลการการระบุตำแหน่งในพื้นที่ให้บริการ เพื่อหาจำนวนจุดทดสอบที่เพียงพอ มีความน่าเชื่อถือของประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุในพื้นที่ให้บริการ โดยได้ยกตัวอย่างแสดงการทดลองคำนวณหาจำนวนของจุดทดสอบสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 และ 2 ในหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ตามลำดับ

4.3.1 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

ในการทดลองเราได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ พื้นที่สำหรับให้บริการระบบระบุตำแหน่งเป็นอาคารบรรณสารชั้นที่ 2 และ 3 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 35x35 ตารางเมตร มีจำนวนพิกัดฟังก์เจอร์ปรั้นท์ 110 พิกัด โดยในชั้นแรกเลือกจุดทดสอบจำนวน 60 จุดทดสอบ และระบุตำแหน่งด้วยวิธีระยะห่างยูคลิเดียน เพื่อประเมินความถูกต้องการระบุตำแหน่งจากจำนวนจุดทดสอบที่เลือกกว่ามีจำนวนเพียงพอสำหรับระบบระบุตำแหน่งหรือไม่ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการ โดยกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ดังรูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

ตารางที่ 4.6 ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทดลองในพื้นที่ให้บริการ
แบบที่ 1

| No. | ตำแหน่ง วัตถุจริง | | | ตำแหน่ง ที่หาได้ | | | ระยะ ผิดพลาดการ ระบุตำแหน่ง (เมตร) | No. | ตำแหน่ง วัตถุจริง | | | ตำแหน่งที่ หาได้ | | | ระยะ ผิดพลาดการ ระบุตำแหน่ง (เมตร) |
|-----|----------------------|----|---|---------------------|----|---|---|-----|----------------------|----|---|---------------------|----|---|---|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | | | X | Y | Z | X | Y | Z | |
| 1 | 3 | 12 | 2 | 3 | 18 | 2 | 6.00 | 31 | 3 | 12 | 3 | 3 | 10 | 3 | 2.00 |
| 2 | 5 | 14 | 2 | 3 | 14 | 2 | 2.00 | 32 | 3 | 18 | 3 | 3 | 18 | 3 | 0.00 |
| 3 | 5 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2.00 | 33 | 3 | 14 | 3 | 3 | 14 | 3 | 0.00 |
| 4 | 5 | 32 | 2 | 3 | 34 | 2 | 2.83 | 34 | 5 | 6 | 3 | 3 | 6 | 3 | 2.00 |
| 5 | 5 | 16 | 2 | 7 | 14 | 2 | 2.83 | 35 | 5 | 24 | 3 | 3 | 26 | 3 | 2.83 |
| 6 | 5 | 28 | 2 | 3 | 30 | 2 | 2.83 | 36 | 5 | 10 | 3 | 3 | 10 | 3 | 2.00 |
| 7 | 9 | 22 | 2 | 11 | 18 | 2 | 4.47 | 37 | 7 | 6 | 3 | 7 | 2 | 3 | 4.00 |
| 8 | 11 | 14 | 2 | 11 | 14 | 2 | 0.00 | 38 | 7 | 12 | 3 | 3 | 10 | 3 | 4.47 |
| 9 | 13 | 10 | 2 | 15 | 14 | 2 | 4.47 | 39 | 9 | 14 | 3 | 3 | 14 | 3 | 6.00 |
| 10 | 15 | 8 | 2 | 15 | 6 | 2 | 2.00 | 40 | 9 | 26 | 3 | 11 | 26 | 3 | 2.00 |
| 11 | 17 | 12 | 2 | 19 | 14 | 2 | 2.83 | 41 | 9 | 4 | 3 | 11 | 2 | 3 | 2.83 |
| 12 | 17 | 22 | 2 | 19 | 26 | 2 | 4.47 | 42 | 9 | 20 | 3 | 7 | 18 | 3 | 2.83 |
| 13 | 19 | 22 | 2 | 19 | 22 | 2 | 0.00 | 43 | 11 | 16 | 3 | 11 | 18 | 3 | 2.00 |
| 14 | 19 | 8 | 2 | 19 | 6 | 2 | 2.00 | 44 | 11 | 34 | 3 | 15 | 34 | 3 | 4.00 |
| 15 | 19 | 10 | 2 | 19 | 10 | 2 | 0.00 | 45 | 13 | 2 | 3 | 15 | 2 | 3 | 2.00 |
| 16 | 21 | 10 | 2 | 23 | 6 | 2 | 4.47 | 46 | 13 | 16 | 3 | 11 | 18 | 3 | 2.83 |
| 17 | 21 | 4 | 2 | 23 | 2 | 2 | 2.83 | 47 | 13 | 8 | 3 | 15 | 6 | 3 | 2.83 |
| 18 | 23 | 14 | 2 | 23 | 18 | 2 | 4.00 | 48 | 13 | 34 | 3 | 11 | 34 | 3 | 2.00 |
| 19 | 23 | 6 | 2 | 23 | 2 | 2 | 4.00 | 49 | 15 | 32 | 3 | 15 | 34 | 3 | 2.00 |
| 20 | 23 | 18 | 2 | 19 | 18 | 2 | 4.00 | 50 | 15 | 30 | 3 | 15 | 34 | 3 | 4.00 |
| 21 | 25 | 18 | 2 | 27 | 18 | 2 | 2.00 | 51 | 17 | 18 | 3 | 15 | 18 | 3 | 2.00 |
| 22 | 25 | 20 | 2 | 23 | 22 | 2 | 2.83 | 52 | 17 | 4 | 3 | 15 | 2 | 3 | 2.83 |

ตารางที่ 4.6 ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 (ต่อ)

| No. | ตำแหน่งวัตถุจริง | | | ตำแหน่งที่ทำได้ | | | ระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่ง (เมตร) | No. | ตำแหน่งวัตถุจริง | | | ตำแหน่งที่ทำได้ | | | ระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่ง (เมตร) |
|-----|------------------|----|---|-----------------|----|---|----------------------------------|-----|------------------|----|---|-----------------|----|-------------|----------------------------------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | | | X | Y | Z | X | Y | Z | |
| 23 | 27 | 4 | 2 | 27 | 2 | 2 | 2.00 | 53 | 19 | 22 | 3 | 19 | 22 | 3 | 0.00 |
| 24 | 27 | 16 | 2 | 27 | 18 | 2 | 2.00 | 54 | 19 | 8 | 3 | 19 | 6 | 3 | 2.00 |
| 25 | 29 | 8 | 2 | 31 | 6 | 2 | 2.83 | 55 | 19 | 12 | 3 | 19 | 10 | 3 | 2.00 |
| 26 | 29 | 20 | 2 | 27 | 18 | 2 | 2.83 | 56 | 21 | 2 | 3 | 19 | 2 | 3 | 2.00 |
| 27 | 29 | 16 | 2 | 27 | 18 | 2 | 2.83 | 57 | 21 | 12 | 3 | 23 | 14 | 3 | 2.83 |
| 28 | 29 | 10 | 2 | 23 | 10 | 2 | 6.00 | 58 | 23 | 14 | 3 | 19 | 18 | 3 | 5.66 |
| 29 | 33 | 4 | 2 | 35 | 2 | 2 | 2.83 | 59 | 25 | 4 | 3 | 23 | 2 | 3 | 2.83 |
| 30 | 35 | 8 | 2 | 35 | 10 | 2 | 2.00 | 60 | 29 | 8 | 3 | 31 | 6 | 3 | 2.83 |
| | | | | | | | | | | | | | | Avg. | 2.73 |
| | | | | | | | | | | | | | | Max. | 6.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | Min. | 0.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | SD. | 1.43 |

4.3.1.1 ขนาดของจุดทดสอบที่เหมาะสม

เมื่อมีข้อมูลทางสถิติในการคำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เพียงพอ ผู้วิจัยได้ทดลองใช้จุดทดสอบ 60 จุด นำมาคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในท้ายตารางที่ 4.6 ดังนั้นในการทดลองต่อไปเพื่อจะแน่ใจว่าผลการระบุตำแหน่งจากการทดลองให้ค่าที่เชื่อถือได้ทางสถิติ ผู้วิจัยจะกำหนดจำนวนจุดทดสอบจากการคำนวณด้วยสมการ (4.8) โดยข้อมูลที่ได้จากรายการที่ 4.6 จะนำมาคำนวณหาขนาดตัวอย่าง (จำนวนจุดทดสอบ) ที่เหมาะสม โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% หรือมีค่า Z เท่ากับ 1.96 กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ย 0.3 เมตร และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากรายการที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ 1.43 เมตร แทนค่าในสมการที่ (4.8) จะได้

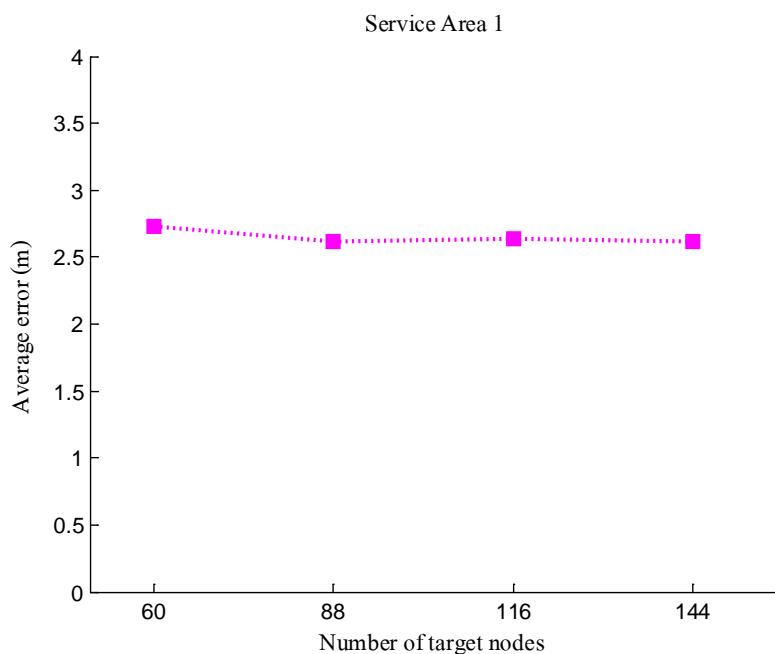
$$n = \left(\frac{(1.96)(1.43)}{(0.3)} \right)^2$$

$$n = 87.29 \approx 88 \text{ ตัวอย่าง}$$

เนื่องจากเราต้องการค่า n ที่ทำให้มีความเชื่อมั่น 95% ว่าค่าเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งผิดพลาดจะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.3 เมตร จากค่าเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดที่ 60 ตำแหน่ง ดังนั้น จะต้องใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 88 ตัวอย่าง หรือมีจำนวนจุดทดสอบ 88 ตำแหน่ง

4.3.1.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งเมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบที่ต่างกัน

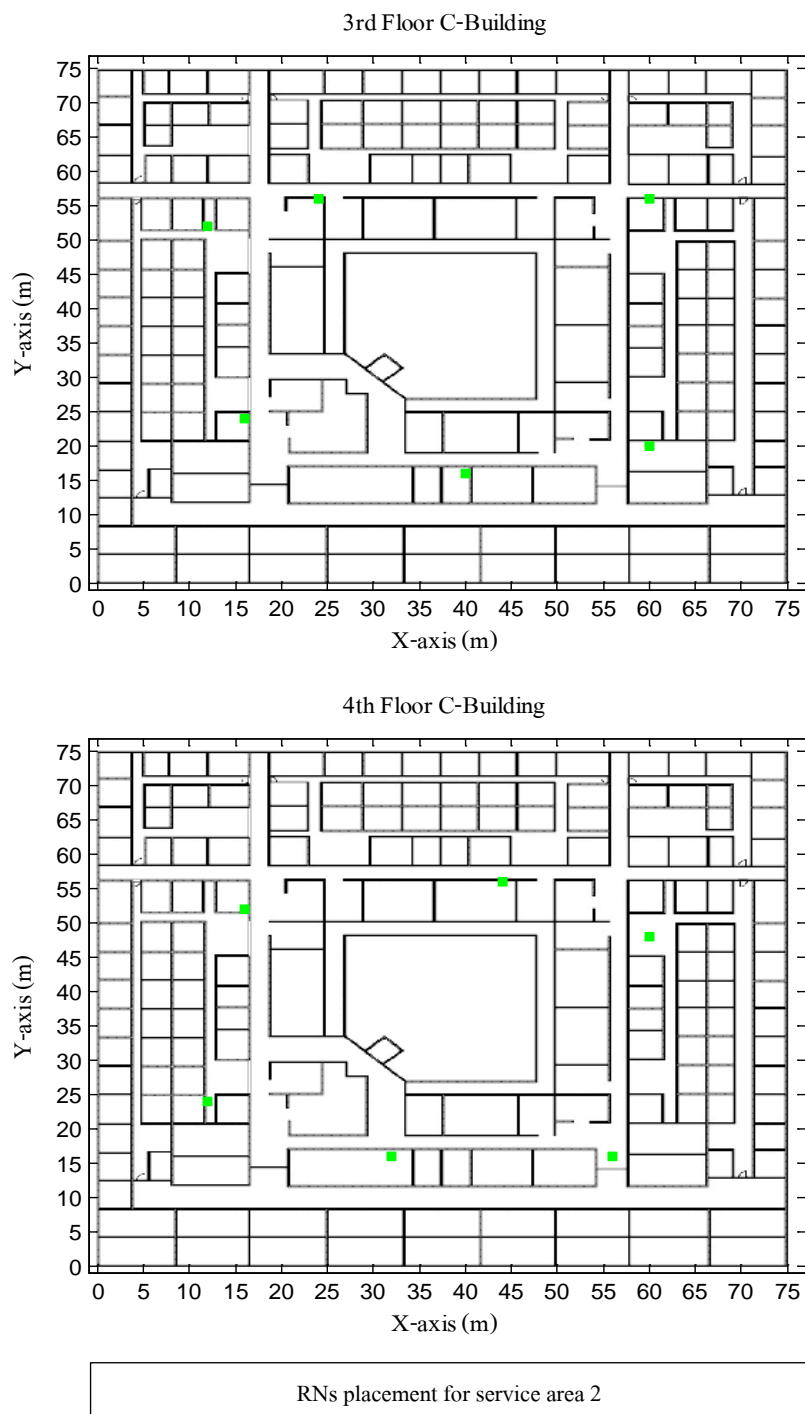
จากหัวข้อ 4.3.1.1 เราได้คำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมตามหลักการของการกำหนดขนาดตัวอย่างทางสถิติ (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) *ความน่าจะเป็นและสถิติ*) ซึ่งได้ค่าจำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่การทดลองแบบที่ 1 คือ 88 ตำแหน่ง เพื่อเปรียบเทียบการใช้จำนวนจุดทดสอบที่ต่างกันในการประเมินความถูกต้องของระบบระบุตำแหน่ง ในหัวข้อนี้จะได้ทดลองใช้จุดทดสอบจำนวน 60 88 116 และ 144 ตำแหน่ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งผลแสดงในรูป 4.15 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของผลการระบุตำแหน่งมีค่าลดลงเมื่อจุดทดสอบเพิ่มขึ้น และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเริ่มมีค่าคงที่เมื่อใช้จำนวนจุดทดสอบตั้งแต่ 88 ตำแหน่งขึ้นไป ดังนั้นผู้วิจัยจะใช้จำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลองแบบที่ 1 คือ 88 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุเมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

4.3.2 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ในการทดลองเราได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ พื้นที่สำหรับให้บริการระบบระบุตำแหน่งเป็นอาคารวิชาการชั้นที่ 3 และ 4 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 75x75 ตารางเมตร มีจำนวนพิกัดฟังก์เจอร์ปรีนท์ 668 พิกัด โดยในขั้นแรกเลือกจุดทดสอบจำนวน 60 จุดทดสอบ และระบุตำแหน่งด้วยวิธีระยะห่างยูคลิเดียน เพื่อประเมินความถูกต้องการระบุตำแหน่งจากจำนวนจุดทดสอบที่เลือกว่ามีจำนวนเพียงพอสำหรับระบบระบุตำแหน่งหรือไม่ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการ โดยกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA ดังรูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.16 แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ตารางที่ 4.7 ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทดลองในพื้นที่ให้บริการ
แบบที่ 2

| No. | ตำแหน่ง วัตถุจริง | | | ตำแหน่ง ที่หาได้ | | | ระยะ ผิดพลาด การระบุ ตำแหน่ง (เมตร) | No. | ตำแหน่ง วัตถุจริง | | | ตำแหน่งที่ หาได้ | | | ระยะ ผิดพลาด การระบุ ตำแหน่ง (เมตร) |
|-----|----------------------|----|---|---------------------|----|---|---|-----|----------------------|----|---|---------------------|----|---|---|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | | | X | Y | Z | X | Y | Z | |
| 1 | 36 | 0 | 1 | 32 | 0 | 1 | 2.83 | 31 | 16 | 0 | 2 | 16 | 0 | 2 | 2.00 |
| 2 | 22 | 4 | 1 | 24 | 0 | 1 | 4.47 | 32 | 4 | 2 | 2 | 0 | 4 | 2 | 6.32 |
| 3 | 44 | 6 | 1 | 40 | 4 | 1 | 4.47 | 33 | 48 | 6 | 2 | 48 | 4 | 2 | 4.47 |
| 4 | 48 | 6 | 1 | 48 | 4 | 1 | 4.00 | 34 | 62 | 8 | 2 | 64 | 4 | 2 | 4.47 |
| 5 | 50 | 6 | 1 | 52 | 4 | 1 | 4.47 | 35 | 4 | 10 | 2 | 4 | 8 | 2 | 4.00 |
| 6 | 70 | 10 | 1 | 72 | 16 | 1 | 4.00 | 36 | 60 | 10 | 2 | 60 | 8 | 2 | 2.00 |
| 7 | 64 | 12 | 1 | 64 | 12 | 1 | 4.47 | 37 | 4 | 16 | 2 | 0 | 16 | 2 | 6.00 |
| 8 | 60 | 16 | 1 | 60 | 12 | 1 | 2.00 | 38 | 40 | 18 | 2 | 40 | 20 | 2 | 4.00 |
| 9 | 74 | 16 | 1 | 72 | 4 | 1 | 0.00 | 39 | 22 | 24 | 2 | 16 | 16 | 2 | 2.83 |
| 10 | 16 | 20 | 1 | 12 | 20 | 1 | 4.47 | 40 | 58 | 24 | 2 | 64 | 20 | 2 | 4.47 |
| 11 | 66 | 20 | 1 | 68 | 20 | 1 | 4.00 | 41 | 64 | 26 | 2 | 68 | 24 | 2 | 2.83 |
| 12 | 16 | 26 | 1 | 20 | 24 | 1 | 8.25 | 42 | 22 | 28 | 2 | 28 | 28 | 2 | 2.83 |
| 13 | 28 | 28 | 1 | 28 | 28 | 1 | 4.00 | 43 | 20 | 30 | 2 | 20 | 32 | 2 | 5.66 |
| 14 | 54 | 32 | 1 | 56 | 32 | 1 | 7.21 | 44 | 64 | 38 | 2 | 68 | 36 | 2 | 2.00 |
| 15 | 56 | 40 | 1 | 52 | 40 | 1 | 2.00 | 45 | 60 | 42 | 2 | 64 | 44 | 2 | 2.83 |
| 16 | 12 | 44 | 1 | 8 | 44 | 1 | 2.00 | 46 | 20 | 44 | 2 | 20 | 44 | 2 | 2.00 |
| 17 | 74 | 46 | 1 | 72 | 60 | 1 | 4.47 | 47 | 54 | 48 | 2 | 52 | 44 | 2 | 0.00 |
| 18 | 10 | 48 | 1 | 8 | 48 | 1 | 2.83 | 48 | 8 | 50 | 2 | 8 | 48 | 2 | 2.83 |
| 19 | 34 | 50 | 1 | 36 | 68 | 1 | 0.00 | 49 | 12 | 56 | 2 | 8 | 52 | 2 | 2.83 |
| 20 | 6 | 54 | 1 | 4 | 52 | 1 | 2.00 | 50 | 26 | 58 | 2 | 28 | 60 | 2 | 2.00 |
| 21 | 18 | 54 | 1 | 16 | 60 | 1 | 6.00 | 51 | 42 | 60 | 2 | 44 | 64 | 2 | 4.47 |
| 22 | 34 | 54 | 1 | 32 | 60 | 1 | 4.00 | 52 | 58 | 60 | 2 | 60 | 64 | 2 | 0.00 |

ตารางที่ 4.7 ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทดลองในพื้นที่ให้บริการ แบบที่ 2 (ต่อ)

| No. | ตำแหน่ง วัตถุจริง | | | ตำแหน่ง ที่หาได้ | | | ระยะ ผิดพลาด การระบุ ตำแหน่ง (เมตร) | No. | ตำแหน่ง วัตถุจริง | | | ตำแหน่งที่ หาได้ | | | ระยะ ผิดพลาด การระบุ ตำแหน่ง (เมตร) |
|-----|----------------------|----|---|---------------------|----|---|---|-----|----------------------|----|---|---------------------|----|-------------|---|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | | | X | Y | Z | X | Y | Z | |
| 23 | 66 | 54 | 1 | 68 | 52 | 1 | 2.00 | 53 | 4 | 62 | 2 | 4 | 64 | 2 | 6.32 |
| 24 | 68 | 58 | 1 | 64 | 68 | 1 | 0.00 | 54 | 52 | 64 | 2 | 48 | 64 | 2 | 2.83 |
| 25 | 22 | 64 | 1 | 20 | 64 | 1 | 4.47 | 55 | 38 | 66 | 2 | 36 | 64 | 2 | 2.00 |
| 26 | 30 | 66 | 1 | 28 | 68 | 1 | 3.61 | 56 | 40 | 66 | 2 | 40 | 64 | 2 | 4.00 |
| 27 | 36 | 68 | 1 | 36 | 72 | 1 | 2.24 | 57 | 52 | 68 | 2 | 56 | 72 | 2 | 2.83 |
| 28 | 58 | 70 | 1 | 60 | 68 | 1 | 6.32 | 58 | 12 | 70 | 2 | 4 | 68 | 2 | 2.00 |
| 29 | 24 | 72 | 1 | 28 | 72 | 1 | 0.00 | 59 | 42 | 72 | 2 | 44 | 72 | 2 | 2.00 |
| 30 | 56 | 72 | 1 | 56 | 72 | 1 | 2.00 | 60 | 40 | 74 | 2 | 40 | 72 | 2 | 4.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | Avg. | 3.71 |
| | | | | | | | | | | | | | | Max. | 18.87 |
| | | | | | | | | | | | | | | Min. | 0.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | SD. | 3.10 |

4.3.2.1 ขนาดของจุดทดสอบที่เหมาะสม

เมื่อมีข้อมูลทางสถิติในการคำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เพียงพอ ผู้วิจัยได้ทดลองใช้จุดทดสอบ 60 จุด นำมาคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในท้ายตารางที่ 4.7 ดังนั้นในการทดลองต่อไปเพื่อจะแน่ใจว่าผลการระบุตำแหน่งจากการทดลองให้ค่าที่เชื่อถือได้ทางสถิติ ผู้วิจัยจะกำหนดจำนวนจุดทดสอบจากการคำนวณด้วยสมการ (4.8) โดยข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.7 จะนำมาคำนวณหาขนาดตัวอย่าง (จำนวนจุดทดสอบ) ที่เหมาะสม โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% หรือมีค่า Z เท่ากับ 1.96 กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 0.3 เมตร และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากตารางที่ 4.7 มีค่าเท่ากับ 3.10 เมตร เมื่อแทนค่าในสมการที่ 1 จะได้

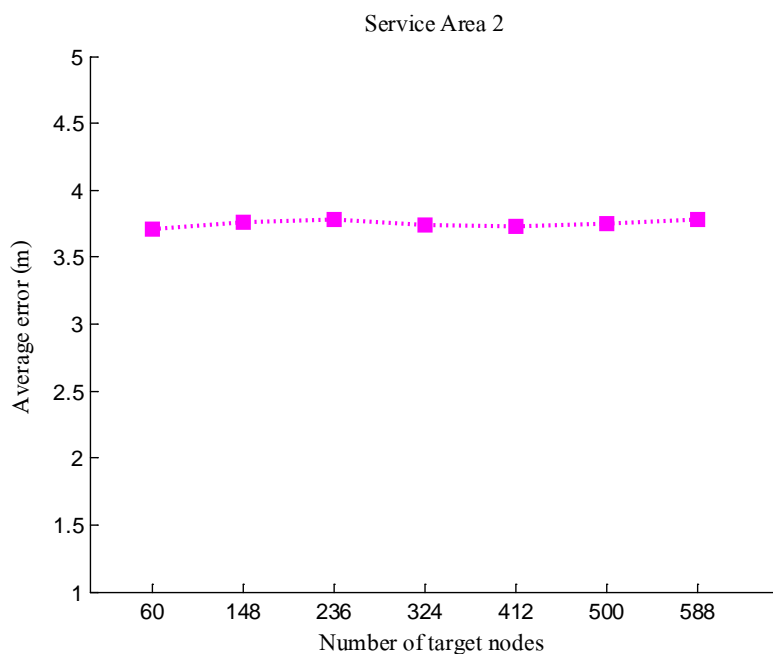
$$n = \left(\frac{(1.96)(3.10)}{(0.3)} \right)^2$$

$$n = 410.20 \approx 411 \text{ ตัวอย่าง}$$

เนื่องจากเราต้องการค่า n ที่ทำให้มีความเชื่อมั่น 95% ว่าค่าเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งผิดพลาดจะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.3 เมตร จากค่าเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดที่ 60 ตำแหน่ง ดังนั้น จะต้องใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 411 ตัวอย่าง หรือมีจำนวนจุดทดสอบ 411 ตำแหน่ง แต่เมื่อพื้นที่การทดลองเป็นอาคารวิชาการ 2 ชั้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 412 ตัวอย่าง หรือมีจำนวนจุดทดสอบ 412 ตำแหน่ง

4.3.2.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งเมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบที่ต่างกัน

จากหัวข้อ 4.3.2.1 เราได้คำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมตามหลักการของการกำหนดขนาดตัวอย่างทางสถิติ (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) *ความน่าจะเป็นและสถิติ*) ซึ่งได้ค่าจำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่การทดลองแบบที่ 2 คือ 412 ตำแหน่ง เพื่อเปรียบเทียบการใช้จำนวนจุดทดสอบที่ต่างกันในการประเมินความถูกต้องของระบบระบุตำแหน่ง ในหัวข้อนี้จะได้ทดลองใช้จุดทดสอบจำนวน 60 148 236 324 412 500 และ 588 ตำแหน่ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งผลแสดงในรูป 4.17 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของผลการระบุตำแหน่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อจุดทดสอบเพิ่มขึ้น และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเริ่มมีค่าคงที่เมื่อใช้จำนวนจุดทดสอบตั้งแต่ 236 ตำแหน่งขึ้นไป ดังนั้นผู้วิจัยจะใช้จำนวนจุดทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลองแบบที่ 2 ที่ได้จากการคำนวณคือ 412 ตำแหน่ง



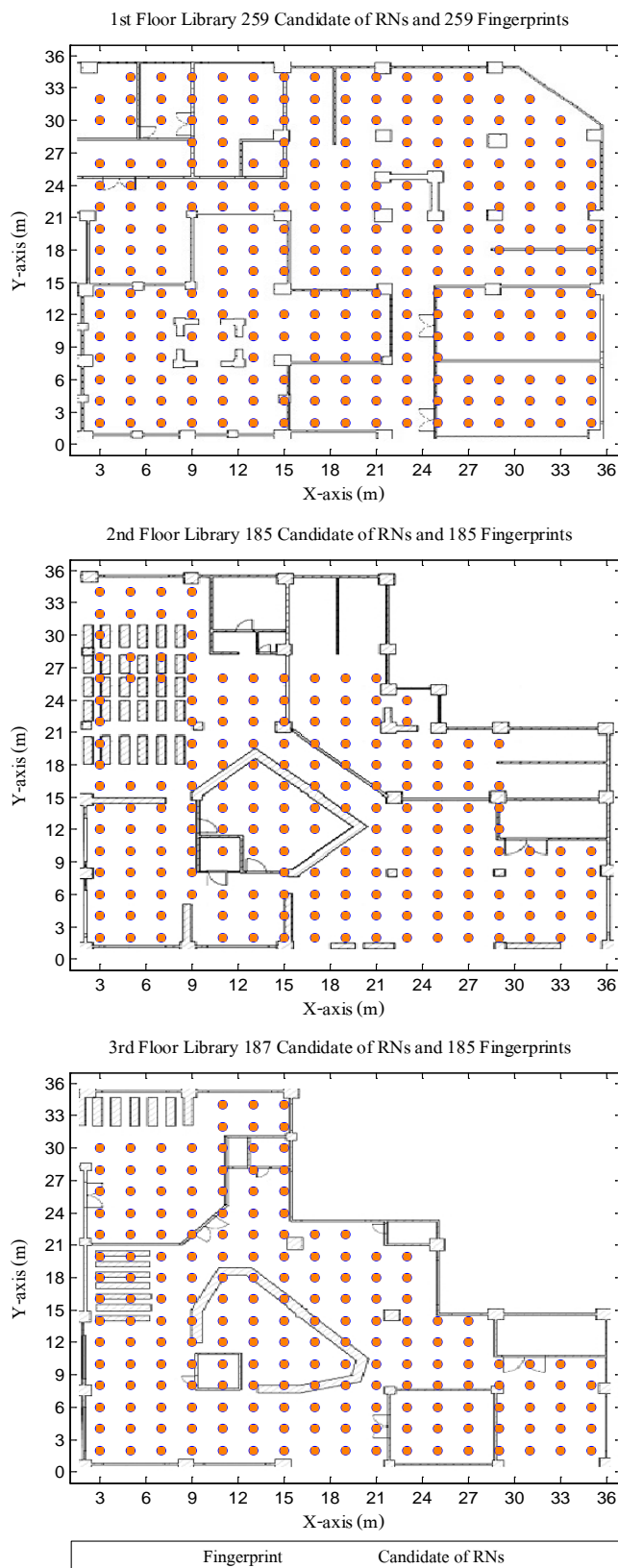
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุเมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

4.4 การวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ

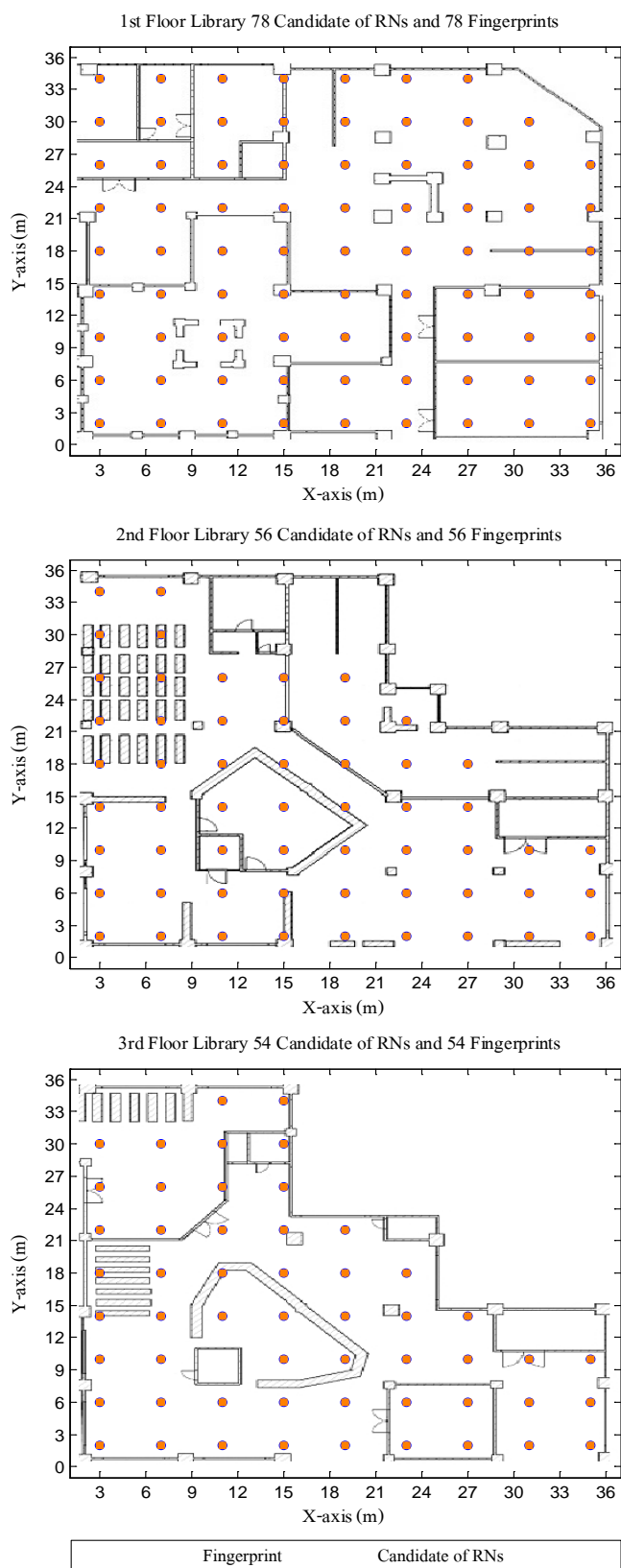
ความถูกต้องของการหาตำแหน่งเป็นสิ่งชี้วัดประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ การเลือกตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงให้กับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่ง ซึ่งในหัวข้อนี้ได้แสดงการวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดความละเอียดของตำแหน่งเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิง (Candidate) และผลกระทบจากระยะห่างของจุดทดสอบสัญญาณ (Fingerprinting) ในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ โดยใช้การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของอัลกอริทึมการอบอ่อน (Simulated Annealing) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และใช้เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean distance) ในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุ

4.4.1 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

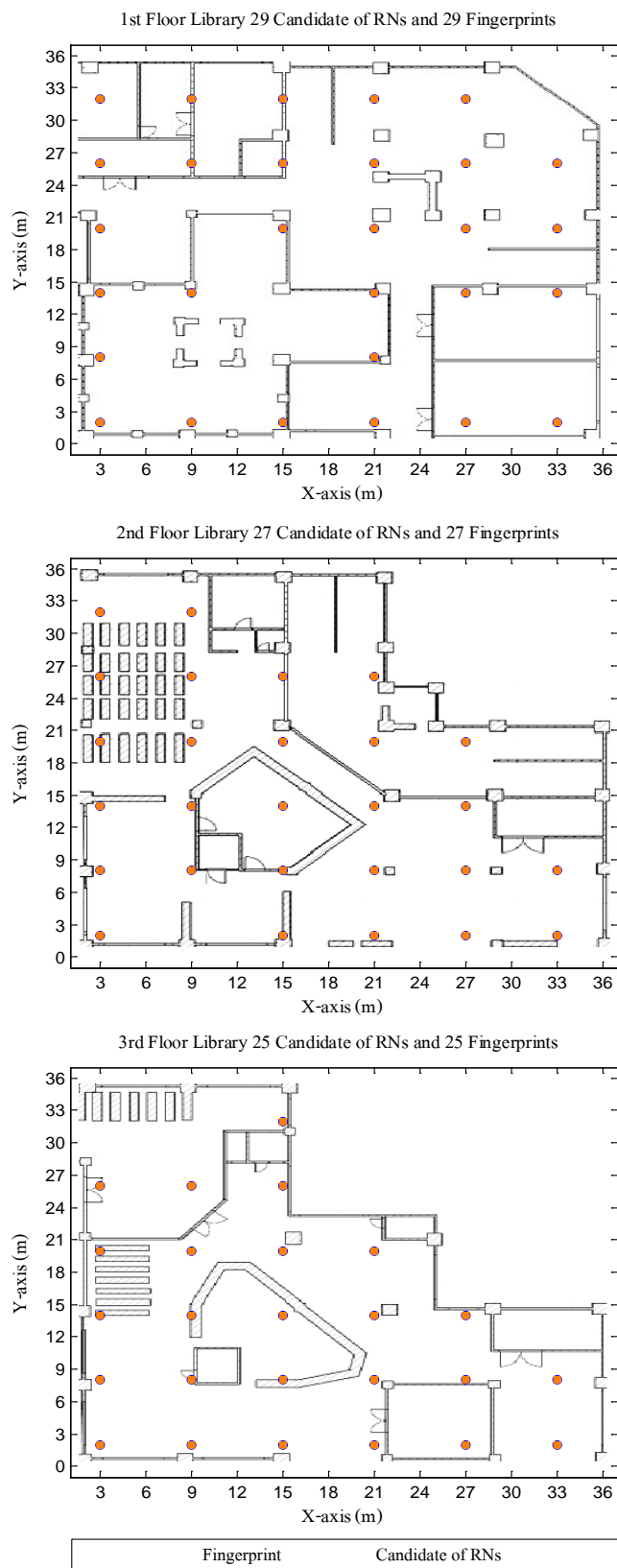
ในการทดลองเราได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ พื้นที่สำหรับให้บริการระบบระบุตำแหน่งเป็นอาคารบรรณสารชั้นที่ 1 2 และ 3 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 35x35 ตารางเมตร กำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิง (Candidate) และจุดทดสอบสัญญาณ (Fingerprinting) เป็นตำแหน่งเดียวกัน แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ ความละเอียด 2x2 ตารางเมตร 4x4 ตารางเมตร และ 6x6 ตารางเมตร โดยกรณีที่ 1 ความละเอียดระยะห่าง 2x2 ตารางเมตร (grid spacing $2 \times 2 \text{m}^2$) มีตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณ 631 พิกัด แสดงดังรูปที่ 4.18 กรณีที่ 2 ความละเอียดระยะห่าง 4x4 ตารางเมตร (grid spacing $4 \times 4 \text{m}^2$) มีตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณ 188 พิกัด แสดงดังรูปที่ 4.19 และกรณีที่ 3 ความละเอียดระยะห่าง 6x6 ตารางเมตร (grid spacing $6 \times 6 \text{m}^2$) มีตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณ 81 พิกัด แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยทั้ง 3 กรณี ใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB และประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุค หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i5-2450M ความถี่ 2.5 GHz หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ 8 GB



รูปที่ 4.18 กรณีสที่ 1 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1



รูปที่ 4.19 กรณีสที่ 2 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1



รูปที่ 4.20 กรณีสี่ที่ 3 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

4.4.1.1 การเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง

จากการทดลองหาตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงด้วยการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ได้ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ตารางที่ 4.8 – 4.10 แสดงผลการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงทั้ง 3 กรณี ตามลำดับ โดยเราจะพิจารณาเลือกตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด ซึ่งหมายความว่า ผลรวมของค่าความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับได้จากโนดอ้างอิงมีค่ามากที่สุด ดังนั้นตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง 2x2 ตารางเมตร มีจำนวน 8 โนด คือ C_{72} C_{129} C_{214} C_{324} C_{393} C_{501} C_{508} C_{608} ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง 4x4 ตารางเมตร มีจำนวน 8 โนด คือ C_{21} C_{34} C_{67} C_{91} C_{121} C_{144} C_{155} C_{180} ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง 6x6 ตารางเมตร มีจำนวน 8 โนด คือ C_9 C_{23} C_{36} C_{44} C_{52} C_{63} C_{66} C_{77} รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 3 กรณี สำหรับพื้นที่การทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร

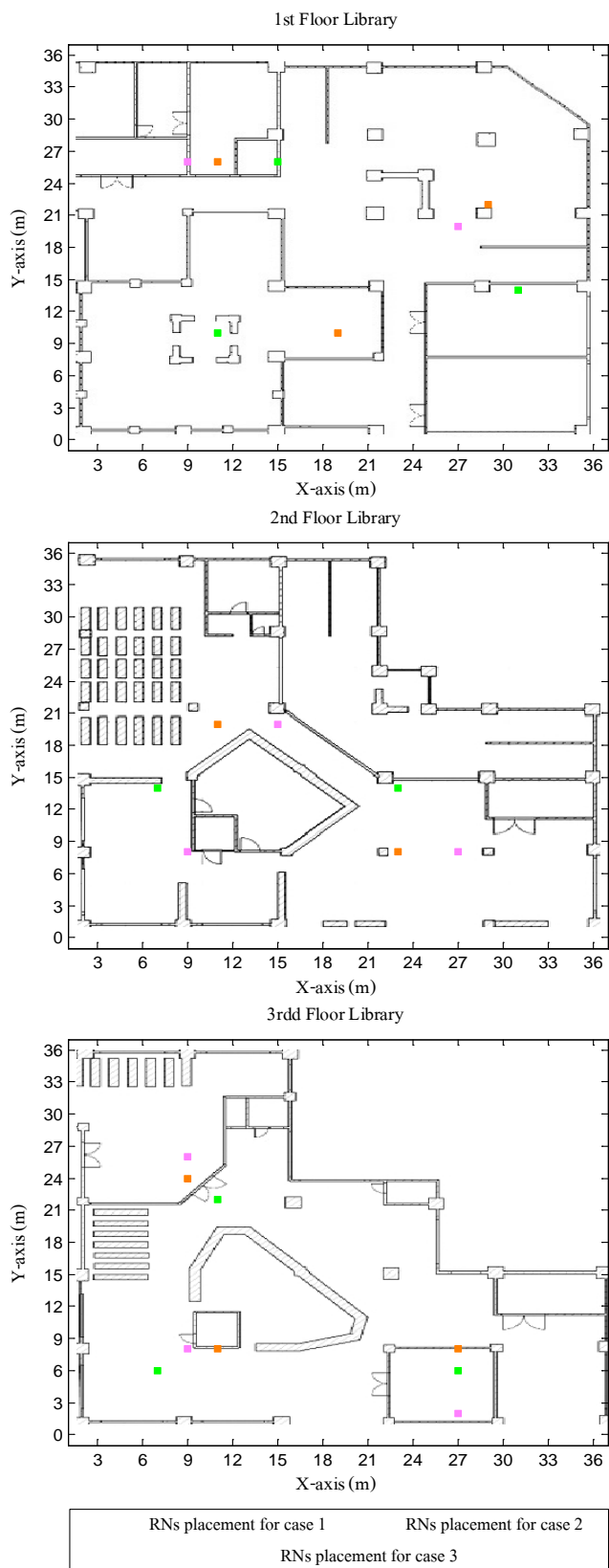
| No. | Objective Fn. (pico Watt) | Run time (sec) | RNs | RNs Placement |
|-----|------------------------------|-------------------|-----|---|
| 1 | 107,734 | 1,166 | 8 | C_{72} C_{129} C_{214} C_{324} C_{393} C_{501} C_{508} C_{608} |
| 2 | 107,472 | 172 | 8 | C_{52} C_{104} C_{181} C_{324} C_{393} C_{501} C_{508} C_{608} |
| 3 | 107,432 | 1,055 | 8 | C_{72} C_{129} C_{214} C_{324} C_{393} C_{508} C_{514} C_{608} |
| 4 | 107,341 | 127 | 8 | C_{52} C_{104} C_{181} C_{348} C_{393} C_{479} C_{501} C_{591} |
| 5 | 107,273 | 156 | 8 | C_{104} C_{113} C_{226} C_{306} C_{393} C_{508} C_{514} C_{608} |
| 6 | 107,165 | 127 | 8 | C_{102} C_{111} C_{226} C_{348} C_{393} C_{508} C_{514} C_{608} |
| 7 | 106,902 | 1,122 | 8 | C_{72} C_{129} C_{214} C_{302} C_{372} C_{479} C_{501} C_{591} |
| 8 | 106,864 | 190 | 8 | C_{63} C_{72} C_{197} C_{324} C_{393} C_{501} C_{508} C_{608} |
| 9 | 106,775 | 136 | 8 | C_{72} C_{82} C_{212} C_{304} C_{406} C_{501} C_{508} C_{608} |
| 10 | 106,626 | 272 | 8 | C_{52} C_{153} C_{178} C_{324} C_{393} C_{501} C_{508} C_{608} |

ตารางที่ 4.9 ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร

| No. | Objective Fn. (pico Watt) | Run time (sec) | RNs | RNs Placement |
|-----|------------------------------|-------------------|-----|--|
| 1 | 30,965 | 41 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₄₄ C ₁₅₅ C ₁₈₀ |
| 2 | 30,965 | 35 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₄₄ C ₁₅₅ C ₁₈₀ |
| 3 | 30,965 | 31 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₄₄ C ₁₅₅ C ₁₈₀ |
| 4 | 30,886 | 37 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₅₅ C ₁₆₀ C ₁₈₀ |
| 5 | 30,886 | 38 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₅₅ C ₁₆₀ C ₁₈₀ |
| 6 | 30,886 | 32 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₅₅ C ₁₆₀ C ₁₈₀ |
| 7 | 30,886 | 40 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₅₅ C ₁₆₀ C ₁₈₀ |
| 8 | 30,886 | 39 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₉₁ C ₁₂₁ C ₁₅₅ C ₁₆₀ C ₁₈₀ |
| 9 | 30,748 | 29 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₁₀₈ C ₁₁₉ C ₁₄₄ C ₁₅₅ C ₁₈₀ |
| 10 | 30,748 | 31 | 8 | C ₂₁ C ₃₄ C ₆₇ C ₁₀₈ C ₁₁₉ C ₁₄₄ C ₁₅₅ C ₁₈₀ |

ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 ตารางเมตร

| No. | Objective Fn. (pico Watt) | Run time (sec) | RNs | RNs Placement |
|-----|------------------------------|-------------------|-----|--|
| 1 | 13,615 | 19 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 2 | 13,615 | 25 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 3 | 13,615 | 29 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 4 | 13,615 | 28 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 5 | 13,615 | 18 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 6 | 13,615 | 25 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 7 | 13,615 | 18 | 8 | C ₉ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 8 | 13,592 | 27 | 8 | C ₉ C ₁₅ C ₂₃ C ₄₄ C ₄₇ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 9 | 13,592 | 45 | 8 | C ₉ C ₁₅ C ₂₃ C ₄₄ C ₄₇ C ₆₃ C ₆₆ C ₇₇ |
| 10 | 13,553 | 21 | 8 | C ₉ C ₁₅ C ₂₃ C ₃₆ C ₄₄ C ₅₂ C ₆₄ C ₇₇ |



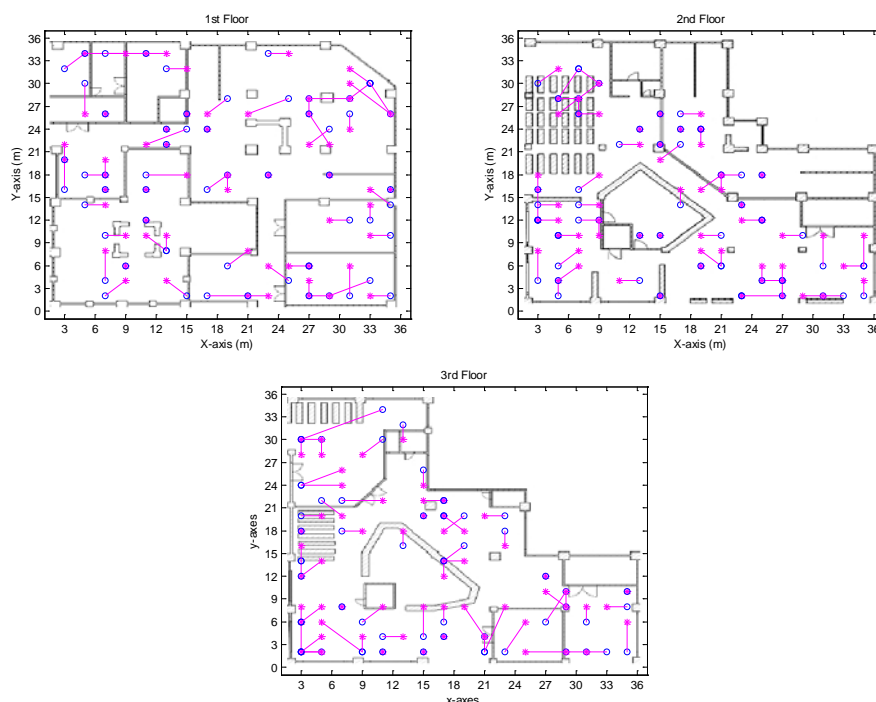
รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่ดีที่สุดด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ทั้ง 3 กรณีมีจำนวนตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ทั้งหมด 8 ตำแหน่งเท่ากัน ซึ่งกระจายตัวครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ แต่มีจำนวนโนคอ้างอิงในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน โดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงกรณีที่ 1 ความละเอียดระยะห่าง 2x2 ตารางเมตร ใช้เวลาในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมมากที่สุด และการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงกรณีที่ 1 ความละเอียดระยะห่าง 6x6 ตารางเมตร ใช้เวลาในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าเมื่อความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นหมายความว่าความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงมีค่ามาก ก็ยังมีตำแหน่งเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงมากส่งผลให้ต้องใช้เวลามากในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพื้นที่ให้บริการ ซึ่งตำแหน่งที่ได้ในแต่ละกรณีนั้นไม่เหมือนกันจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุอย่างไร หัวข้อต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงกรณีต่าง ๆ

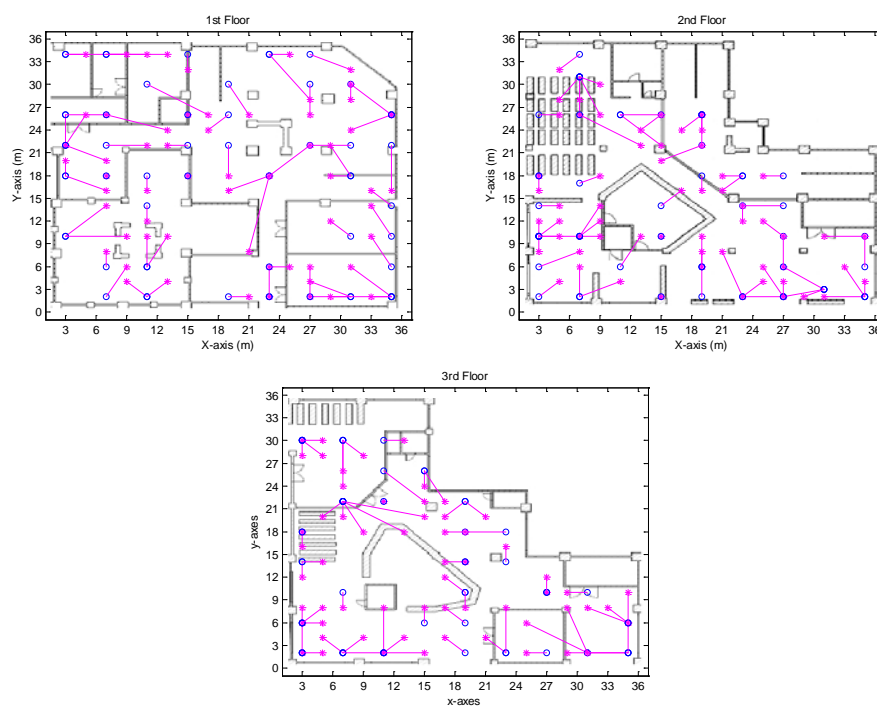
4.4.1.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่ง

เมื่อนำตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่ได้ของทั้ง 3 กรณี มาใช้สำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean distance) เป็นวิธีการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุ โดยมีโนควัตถุ 180 พิกัด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ จากรูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดจากตำแหน่งที่วัตถุตั้งอยู่จริงกับตำแหน่งที่คำนวณได้ด้วยเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 4x4 และ 6x6 ตารางเมตร ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร มีระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดที่น้อยกว่าระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 และ 6x6 ตารางเมตร รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) ที่ระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง จากรูปสังเกตได้ว่า ระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร มีค่าระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดสะสมที่ดีกว่าความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร และระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร มีค่าระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดสะสมที่ดีกว่าความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 ตารางเมตร

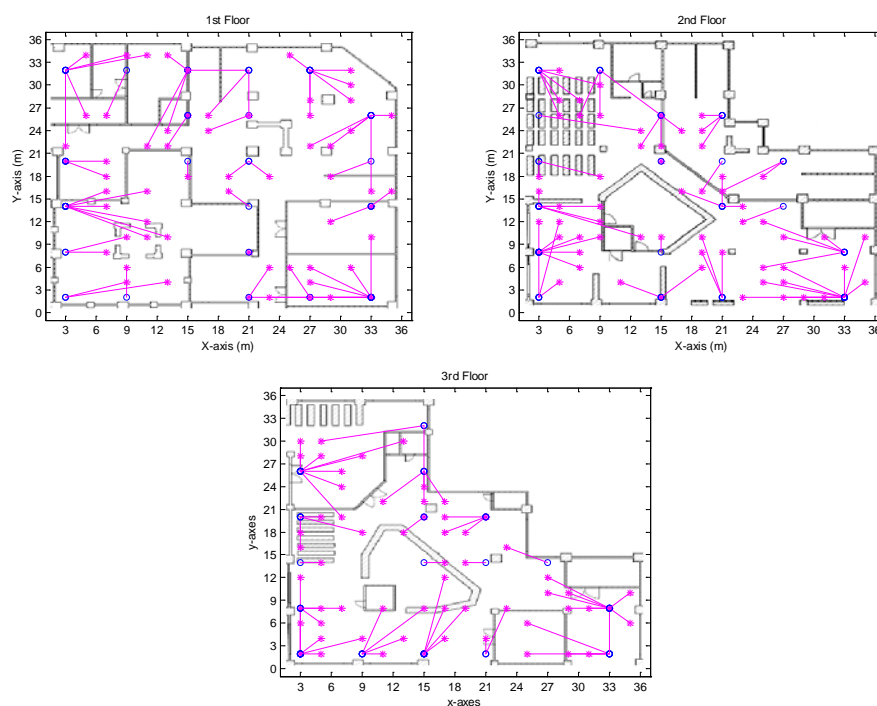
เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ ยิ่งเห็นได้ชัดว่าระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 มีประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งดีที่สุด โดยมีค่าระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งเฉลี่ย 2.20 เมตร ระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งมากที่สุด 8.94 เมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.55 เมตร ลองลงมาคือ ระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 มีค่าระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งเฉลี่ย 3.33 เมตร และระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งมากที่สุด 10.20 เมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.81 เมตร สุกท้ายแย่ที่สุดคือ ระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 มีค่าระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งเฉลี่ย 4.91 เมตร และระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งมากที่สุด 12 เมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.70 เมตร ซึ่งเห็นได้ชัดว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดอยู่ในระยะ 3.5 4.86 และ 7.18 เมตร สำหรับความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 4x4 และ 6x6 ตารางเมตร ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาที่ให้ในการดำเนินการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงร่วมด้วย จะเห็นได้ว่า ความละเอียดจุดทดสอบสัญญาณมาก (grid spacing 2x2 m²) ให้ประสิทธิภาพความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุสูง โดยแลกกับเวลาที่ใช้ในการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น



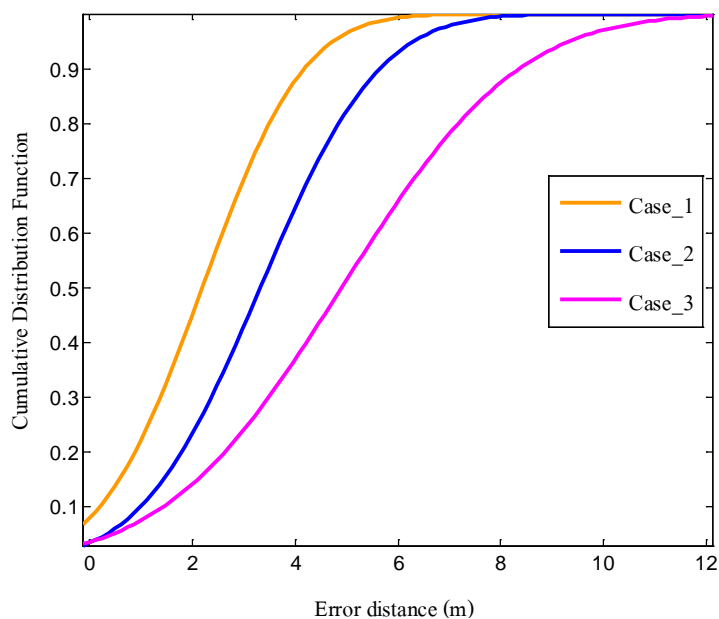
รูปที่ 4.22 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing 2x2 m²



รูปที่ 4.23 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing 4x4 m²



รูปที่ 4.24 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing 6x6 m²



รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะการระบุตำแหน่งผิดพลาด
สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

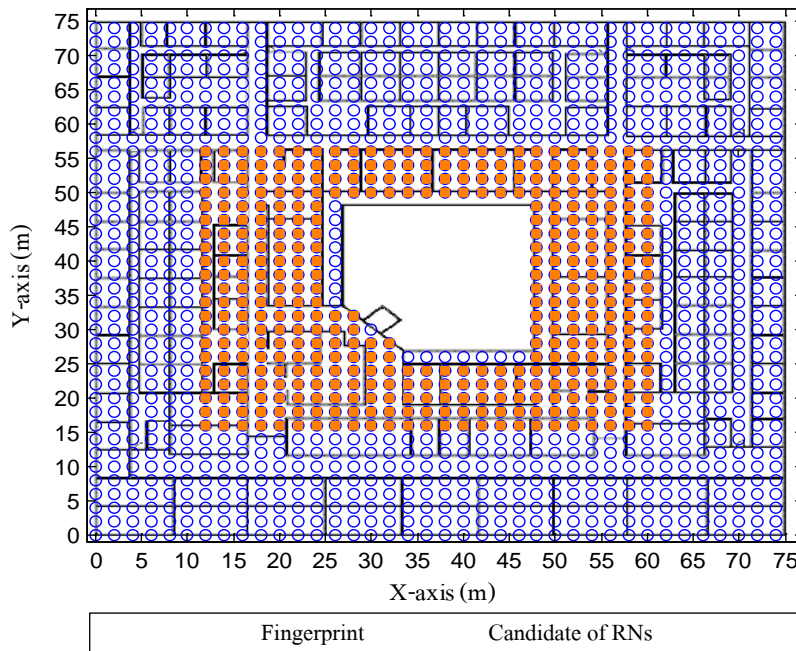
ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

| Performance metrics | Case 1 gs =2x2 m ² | Case 2 gs =4x4 m ² | Case 3 gs =6x6 m ² |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Error distance (meters) | | | |
| Number of grid spacing | 631 | 188 | 81 |
| Number of candidate | 631 | 188 | 81 |
| Number of RNs installed | 8 | 8 | 8 |
| Average Error distance (m.) | 2.20 | 3.33 | 4.91 |
| Maximum Error distance (m.) | 8.94 | 10.20 | 12.00 |
| Minimum Error distance (m.) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Standard deviation | 1.55 | 1.81 | 2.70 |
| 80 th percentile of error distance (m.) | 3.51 | 4.86 | 7.18 |

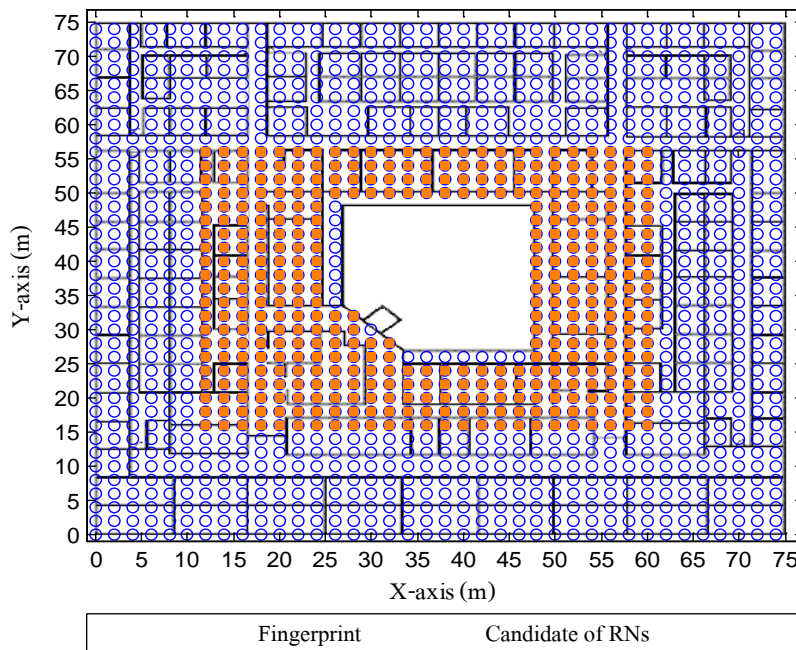
4.4.2 การทดลองสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ในการทดลองเราได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ พื้นที่สำหรับให้บริการระบบระบุตำแหน่งเป็นอาคารวิชาการชั้นที่ 3 และ 4 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 75x75 ตารางเมตร กำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิง (Candidate) และจุดทดสอบสัญญาณ (Fingerprinting) แบ่งออกเป็น 3 กรณี ความละเอียด 2x2 ตารางเมตร 4x4 ตารางเมตร และ 6x6 ตารางเมตร โดยกรณีที่ 1 ความละเอียดระยะห่าง 2x2 ตารางเมตร มีตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิง 810 พิกัด และจุดทดสอบสัญญาณ 2,680 พิกัด แสดงดังรูปที่ 4.26 กรณีที่ 2 ความละเอียดระยะห่าง 4x4 ตารางเมตร มีตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิง 232 พิกัด และจุดทดสอบสัญญาณ 668 พิกัด แสดงดังรูปที่ 4.27 และกรณีที่ 3 ความละเอียดระยะห่าง 6x6 ตารางเมตร มีตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิง 122 พิกัด และจุดทดสอบสัญญาณ 316 พิกัด แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยทั้ง 3 กรณี ใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB และประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุค หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i5-2450M ความถี่ 2.5 GHz หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ 8 GB

3rd Floor Library 405 Candidate of RNs and 1340 Fingerprints

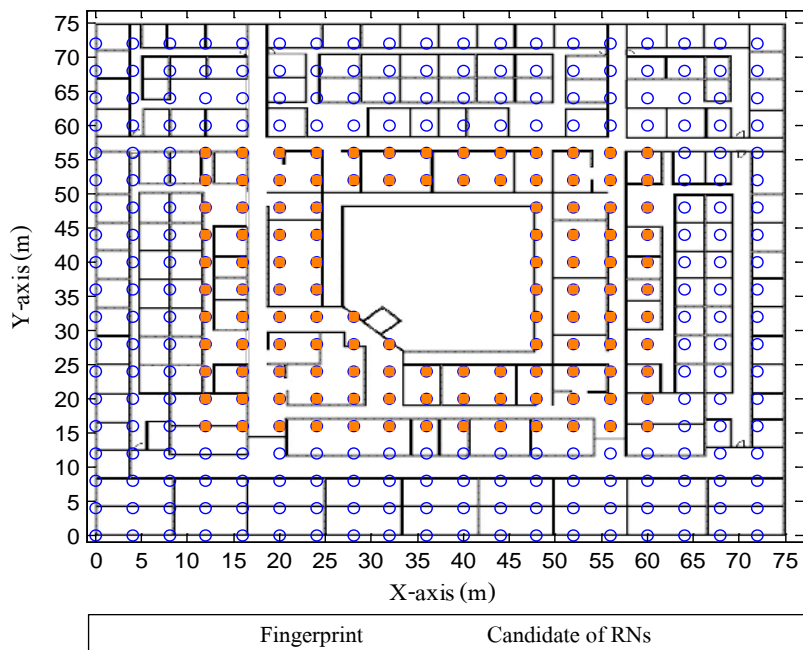


4th Floor Library 405 Candidate of RNs and 1340 Fingerprints

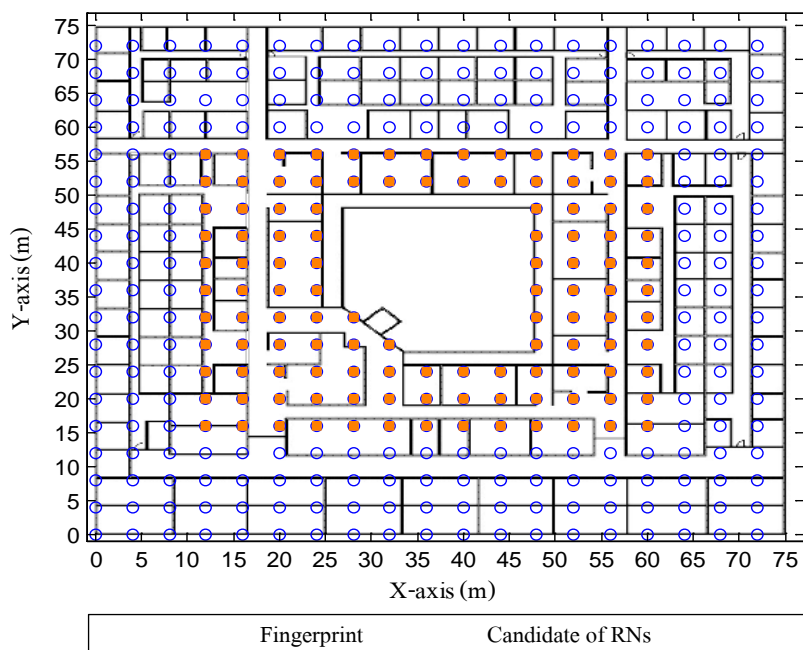


รูปที่ 4.26 กรณีที่ 1 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

3rd Floor Library 116 Candidate of RNs and 334 Fingerprints

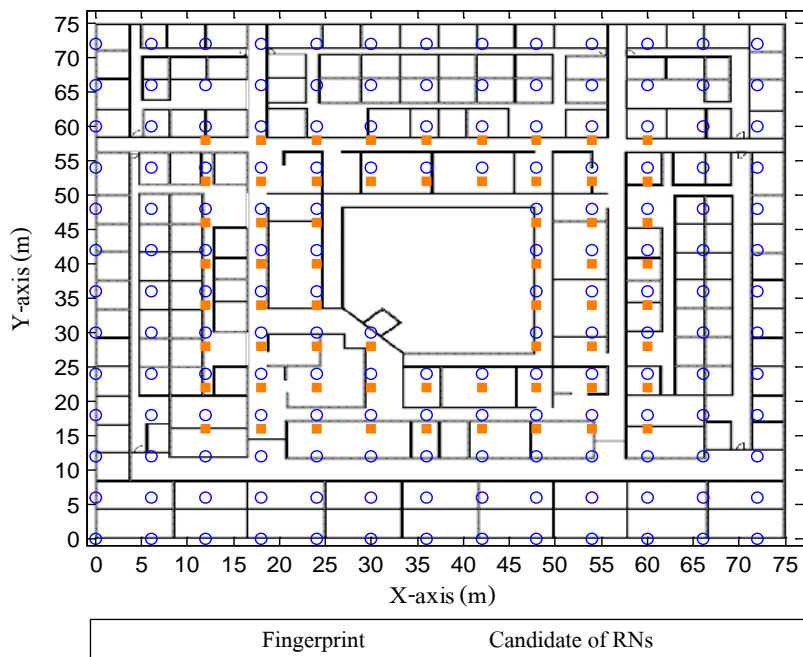


4th Floor Library 116 Candidate of RNs and 334 Fingerprints

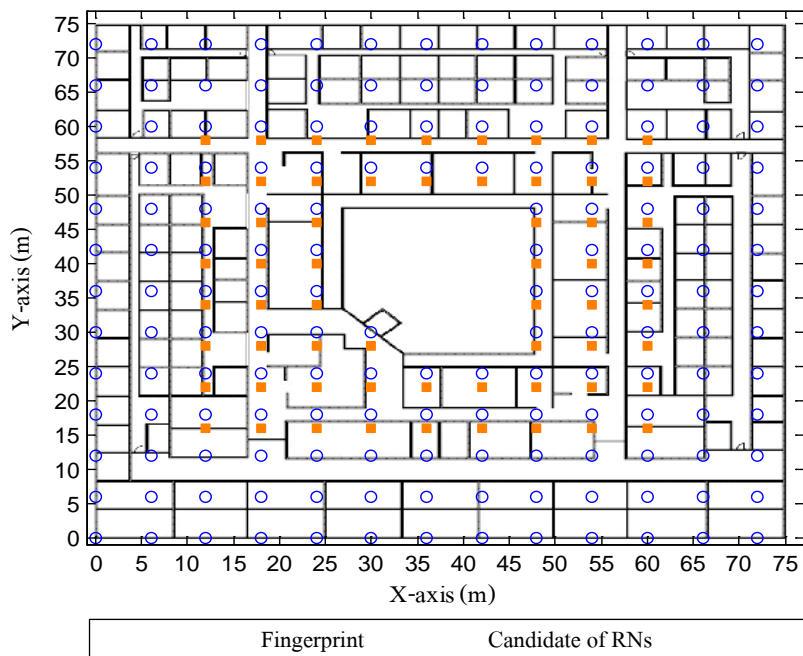


รูปที่ 4.27 กรณีที่ 2 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

3rd Floor Library 61 Candidate of RNs and 158 Fingerprints



4th Floor Library 61 Candidate of RNs and 158 Fingerprints



รูปที่ 4.28 กรณีที่ 3 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

4.4.2.1 การเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง

จากการทดลองหาตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงด้วยการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ได้ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ตารางที่ 4.12 – 4.14 แสดงผลการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงทั้ง 3 กรณี ตามลำดับ โดยเราจะพิจารณาเลือกตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด ซึ่งหมายความว่า ผลรวมของค่าความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับได้จากโนดอ้างอิงมีค่ามากที่สุด ดังนั้นตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง 2×2 ตารางเมตร มีจำนวน 12 โหนด คือ C_{11} C_{25} C_{194} C_{219} C_{318} C_{401} C_{418} C_{430} C_{551} C_{612} C_{790} C_{806} ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง 4×4 ตารางเมตร มีจำนวน 12 โหนด คือ C_8 C_{26} C_{28} C_{91} C_{107} C_{116} C_{122} C_{128} C_{143} C_{206} C_{208} C_{228} ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการกำหนดความละเอียดระยะห่าง 6×6 ตารางเมตร มีจำนวน 12 โหนด คือ C_3 C_{24} C_{32} C_{51} C_{56} C_{65} C_{70} C_{71} C_{92} C_{99} C_{116} C_{121} แสดงดังรูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 3 กรณี สำหรับพื้นที่การทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.12 ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร

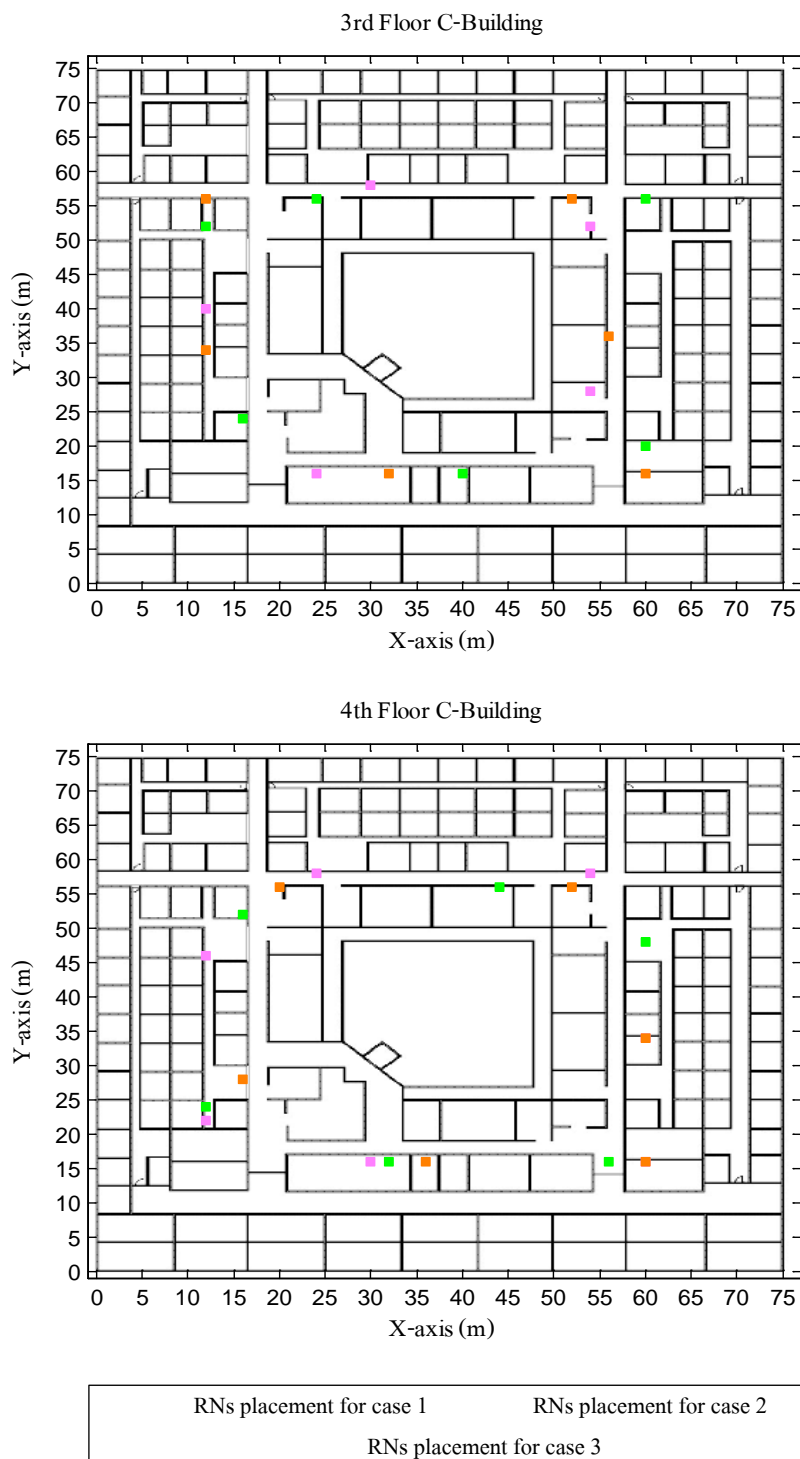
| No. | Objective Fn. (pico Watt) | Run time (sec) | RNs | RNs Placement |
|-----|------------------------------|-------------------|-----|--|
| 1 | 217,211 | 321 | 12 | C ₁₁ C ₂₅ C ₁₉₄ C ₂₁₉ C ₃₁₈ C ₄₀₁ C ₄₁₈ C ₄₃₀ C ₅₅₁ C ₆₁₂ C ₇₉₀ C ₈₀₆ |
| 2 | 216,161 | 1,362 | 12 | C ₇ C ₁₉ C ₂₂₁ C ₂₂₂ C ₃₉₀ C ₄₀₅ C ₄₁₈ C ₄₃₁ C ₅₀₅ C ₆₉₆ C ₇₈₆ C ₈₀₁ |
| 3 | 216,113 | 688 | 12 | C ₁ C ₁₃ C ₁₆₁ C ₁₉₆ C ₃₅₄ C ₃₈₁ C ₄₁₅ C ₄₂₇ C ₅₃₁ C ₆₉₆ C ₇₁₁ C ₇₉₇ |
| 4 | 215,482 | 466 | 12 | C ₁ C ₁₆ C ₁₆₁ C ₂₂₂ C ₃₉₀ C ₄₀₅ C ₄₀₉ C ₅₀₅ C ₆₅₅ C ₆₈₁ C ₇₉₂ C ₈₀₅ |
| 5 | 215,429 | 412 | 12 | C ₇ C ₄₈ C ₁₉₄ C ₃₈₁ C ₃₉₀ C ₄₀₁ C ₄₂₂ C ₅₅₁ C ₆₁₂ C ₇₈₆ C ₇₉₇ C ₈₁₀ |
| 6 | 215,343 | 342 | 12 | C ₁₇ C ₃₀ C ₁₆₁ C ₂₂₂ C ₃₅₄ C ₃₉₀ C ₄₀₆ C ₄₂₆ C ₆₁₃ C ₆₅₃ C ₇₈₆ C ₇₉₇ |
| 7 | 215,144 | 360 | 12 | C ₁ C ₁₃ C ₁₉₆ C ₂₁₉ C ₃₈₄ C ₃₉₅ C ₄₀₅ C ₄₁₈ C ₅₅₁ C ₆₁₂ C ₇₉₀ C ₈₀₆ |
| 8 | 214,960 | 636 | 12 | C ₉ C ₇₁ C ₁₉₄ C ₂₂₁ C ₃₈₄ C ₄₀₁ C ₄₁₈ C ₅₃₃ C ₆₁₂ C ₆₈₃ C ₇₉₇ C ₈₀₈ |
| 9 | 214,940 | 466 | 12 | C ₇ C ₂₁ C ₁₉₆ C ₂₂₁ C ₃₈₆ C ₃₉₉ C ₄₁₅ C ₄₃₁ C ₅₀₅ C ₆₉₆ C ₇₈₆ C ₈₀₃ |
| 10 | 214,935 | 302 | 12 | C ₇ C ₇₁ C ₁₆₂ C ₂₉₁ C ₃₀₇ C ₄₀₉ C ₄₁₈ C ₄₃₀ C ₆₁₂ C ₆₁₃ C ₇₈₈ C ₈₀₈ |

ตารางที่ 4.13 ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร

| No. | Objective Fn. (nWatt) | Run time (sec) | RNs | RNs Placement |
|-----|--------------------------|-------------------|-----|--|
| 1 | 55,957 | 72 | 12 | $C_8 C_{26} C_{28} C_{91} C_{107} C_{116} C_{122} C_{128} C_{143}$ $C_{206} C_{208} C_{228}$ |
| 2 | 55,957 | 69 | 12 | $C_8 C_{26} C_{28} C_{91} C_{107} C_{116} C_{122} C_{128} C_{143}$ $C_{206} C_{208} C_{228}$ |
| 3 | 55,638 | 106 | 12 | $C_8 C_{26} C_{28} C_{90} C_{91} C_{110} C_{122} C_{128} C_{143}$ $C_{200} C_{206} C_{226}$ |
| 4 | 55,638 | 105 | 12 | $C_8 C_{26} C_{28} C_{90} C_{91} C_{110} C_{122} C_{128} C_{143}$ $C_{200} C_{206} C_{226}$ |
| 5 | 55,616 | 84 | 12 | $C_6 C_{26} C_{28} C_{75} C_{107} C_{116} C_{122} C_{143} C_{165}$ $C_{200} C_{226} C_{232}$ |
| 6 | 55,616 | 87 | 12 | $C_6 C_{26} C_{28} C_{75} C_{107} C_{116} C_{122} C_{143} C_{165}$ $C_{200} C_{226} C_{232}$ |
| 7 | 55,603 | 85 | 12 | $C_{13} C_{28} C_{66} C_{91} C_{110} C_{116} C_{122} C_{128} C_{143}$ $C_{200} C_{206} C_{226}$ |
| 8 | 55,603 | 84 | 12 | $C_{13} C_{28} C_{66} C_{91} C_{110} C_{116} C_{122} C_{128} C_{143}$ $C_{200} C_{206} C_{226}$ |
| 9 | 55,575 | 88 | 12 | $C_8 C_{26} C_{28} C_{91} C_{110} C_{116} C_{125} C_{131} C_{182}$ $C_{200} C_{226} C_{232}$ |
| 10 | 55,575 | 84 | 12 | $C_8 C_{26} C_{28} C_{91} C_{110} C_{116} C_{125} C_{131} C_{182}$ $C_{200} C_{226} C_{232}$ |

ตารางที่ 4.14 ตำแหน่งโนดอ้างอิงจากการกำหนดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 ตารางเมตร

| No. | Objective Fn. (nWatt) | Run time (sec) | RNs | RNs Placement |
|-----|--------------------------|-------------------|-----|---|
| 1 | 25,292 | 33 | 12 | C ₃ C ₂₄ C ₃₂ C ₅₁ C ₅₆ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₂ C ₉₉ C ₁₁₆ C ₁₂₁ |
| 2 | 25,258 | 139 | 12 | C ₃ C ₉ C ₃₁ C ₃₂ C ₅₁ C ₅₆ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₉ C ₁₁₆ C ₁₂₁ |
| 3 | 25,258 | 92 | 12 | C ₃ C ₉ C ₃₁ C ₃₂ C ₅₁ C ₅₆ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₉ C ₁₁₆ C ₁₂₁ |
| 4 | 25,204 | 96 | 12 | C ₁ C ₆ C ₉ C ₂₁ C ₃₁ C ₅₄ C ₆₀ C ₆₅ C ₇₀ C ₈₀ C ₁₁₅ C ₁₂₁ |
| 5 | 25,150 | 62 | 12 | C ₁ C ₆ C ₂₄ C ₃₂ C ₅₁ C ₅₆ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₉ C ₁₁₆ C ₁₂₁ |
| 6 | 25,136 | 70 | 12 | C ₃ C ₇ C ₃₁ C ₃₂ C ₅₄ C ₆₀ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₉ C ₁₁₆ C ₁₂₁ |
| 7 | 25,136 | 88 | 12 | C ₃ C ₇ C ₃₁ C ₃₂ C ₅₄ C ₆₀ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₉ C ₁₁₆ C ₁₂₁ |
| 8 | 25,129 | 78 | 12 | C ₁ C ₄ C ₉ C ₃₁ C ₃₂ C ₅₁ C ₅₆ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₉ C ₁₂₁ |
| 9 | 25,117 | 43 | 12 | C ₁ C ₆ C ₂₁ C ₂₄ C ₅₁ C ₅₄ C ₆₅ C ₆₈ C ₈₀ C ₉₂ C ₁₁₅ C ₁₂₁ |
| 10 | 25,111 | 46 | 12 | C ₃ C ₂₄ C ₃₂ C ₅₁ C ₅₄ C ₆₅ C ₇₀ C ₇₁ C ₉₂ C ₉₉ C ₁₁₈ C ₁₂₁ |



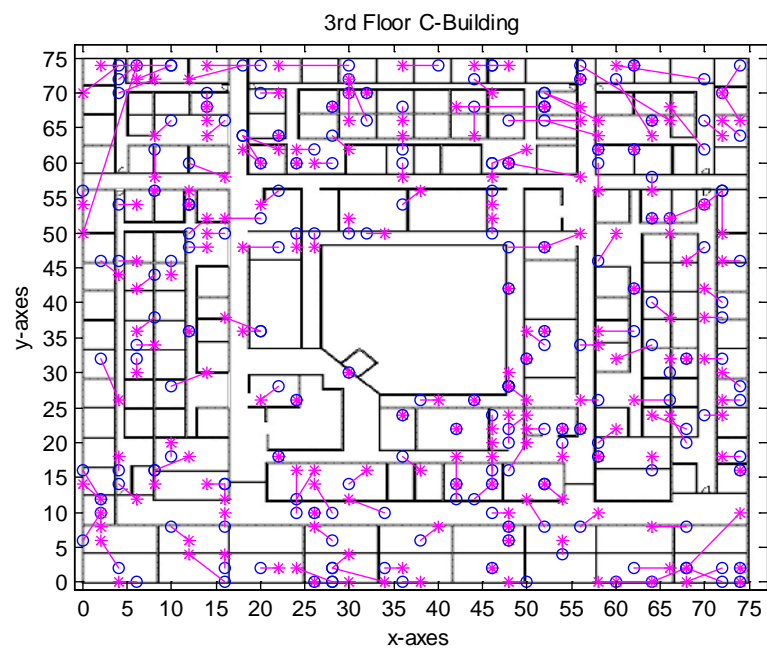
รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่ดีที่สุดด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น (MSMR-SA) ทั้ง 3 กรณีมีจำนวนตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ทั้งหมด 12 ตำแหน่งเท่ากัน ซึ่งกระจายตัวครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ แต่มีจำนวนโนคอ้างอิงในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน โดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงกรณีที่ 1 ความละเอียดระยะห่าง 2x2 ตารางเมตร ใช้เวลาในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมมากที่สุด และการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงกรณีที่ 1 ความละเอียดระยะห่าง 6x6 ตารางเมตร ใช้เวลาในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าเมื่อความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นหมายความว่าความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงมีค่ามาก ก็ยังมีตำแหน่งเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงมากส่งผลให้ต้องใช้เวลามากในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของพื้นที่ให้บริการ ซึ่งพิกัดที่ได้ในแต่ละกรณีนั้น ไม่เหมือนกันจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุอย่างไร หัวข้อต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการเลือกติดตั้งโนคอ้างอิงกรณีต่าง ๆ

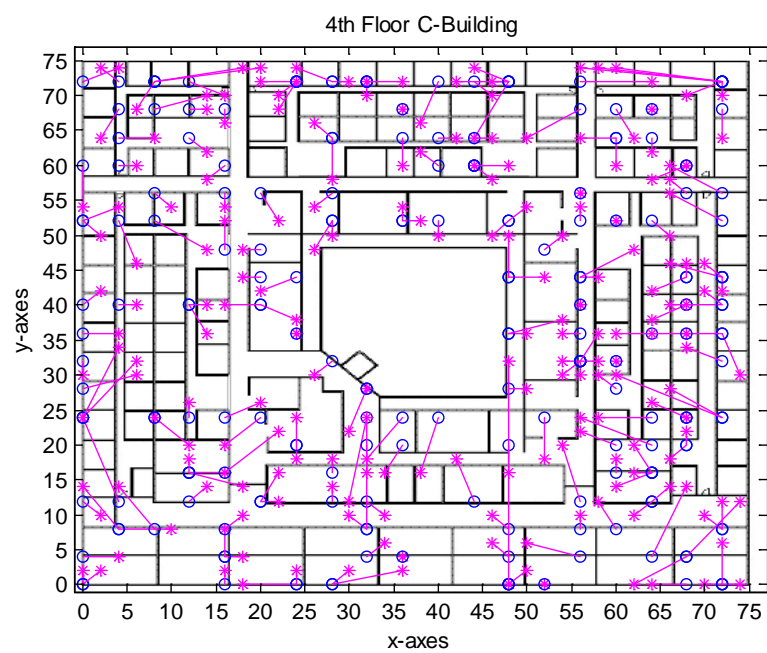
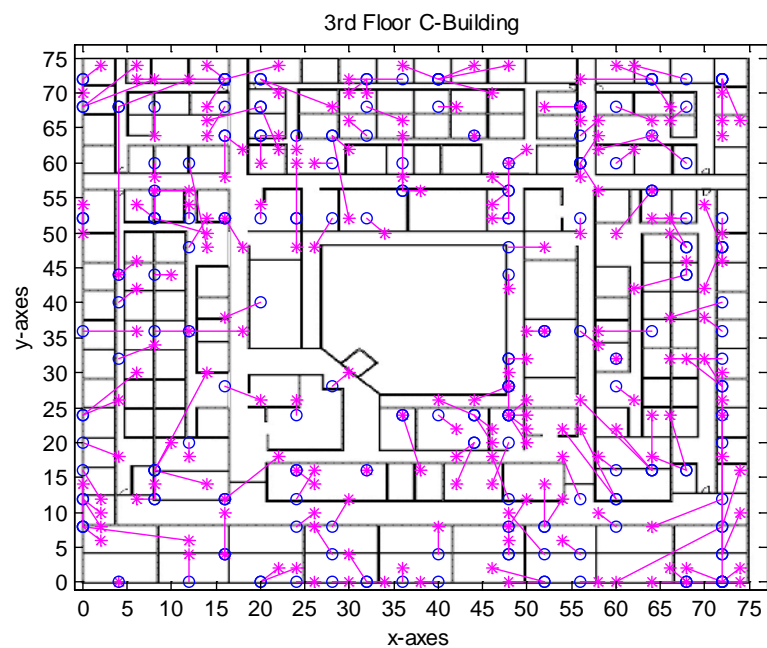
4.4.2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่ง

เมื่อนำตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่ได้ของทั้ง 3 กรณี มาใช้สำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean distance) เป็นวิธีการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุ โดยมีโนควัตถุ 412 พิกัด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ จากรูปที่ 4.30 – 4.32 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดจากตำแหน่งที่วัตถุตั้งอยู่จริงกับตำแหน่งที่คำนวณได้ด้วยเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 4x4 และ 6x6 ตารางเมตร ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งวัตถุที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร มีระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดที่สั้นกว่าระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 และ 6x6 ตารางเมตร รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) ที่ระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง จากรูปสังเกตได้ว่า ระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 ตารางเมตร มีค่าระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดสะสมที่ดีกว่าความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร และระยะทางระบุตำแหน่งผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 ตารางเมตร มีค่าระยะการระบุตำแหน่งวัตถุผิดพลาดสะสมที่ดีกว่าความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 ตารางเมตร

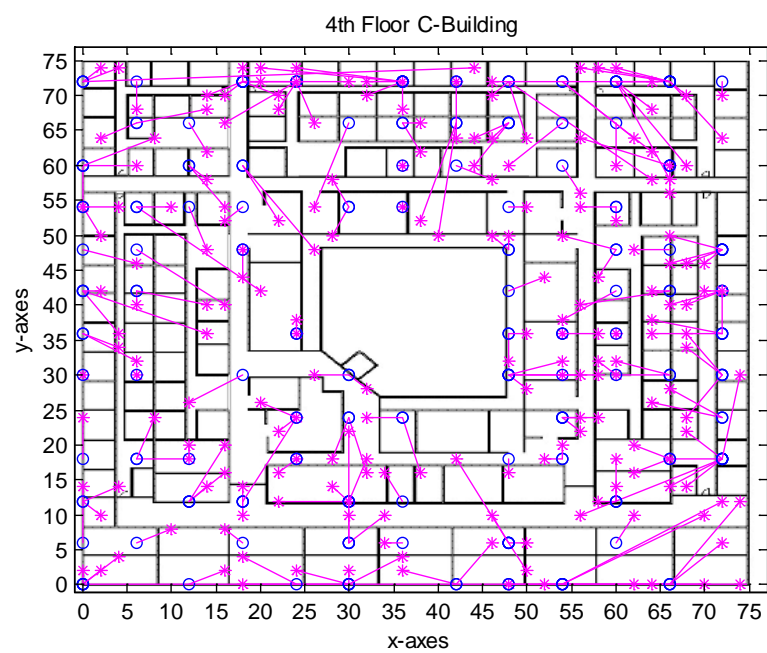
เมื่อพิจารณาดารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุ ยิ่งเห็นได้ชัดว่าระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 2x2 มีประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งดีที่สุด โดยมีค่า ระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งเฉลี่ย 3.08 เมตร ระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งมากที่สุด 24.74 เมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.98 เมตร ลองลงมาคือ ระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 4x4 มีค่า ระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งเฉลี่ย 4.45 เมตร และระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งมากที่สุด 32 เมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.68 เมตร สุดท้ายแย่ที่สุดคือ ระยะห่างจุดทดสอบสัญญาณ 6x6 มี ค่าระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งเฉลี่ย 6.29 เมตร และระยะผิดพลาดการระบุตำแหน่งมากที่สุด 74 เมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6.82 เมตร ซึ่งเห็นได้ชัดว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลระยะการระบุ ตำแหน่งวัตถุผิดพลาดอยู่ในระยะ 5.59 7.56 และ 12.03 เมตร สำหรับความละเอียดระยะห่างจุด ทดสอบสัญญาณ 2x2 4x4 และ 6x6 ตารางเมตร ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการเลือกตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงร่วมด้วย จะเห็นได้ว่า ความละเอียดระยะห่างจุดทดสอบ สัญญาณมาก (grid spacing 2x2 m²) ให้ประสิทธิภาพความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุสูง โดยแลกกับเวลาที่ใช้ในการเลือกตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น



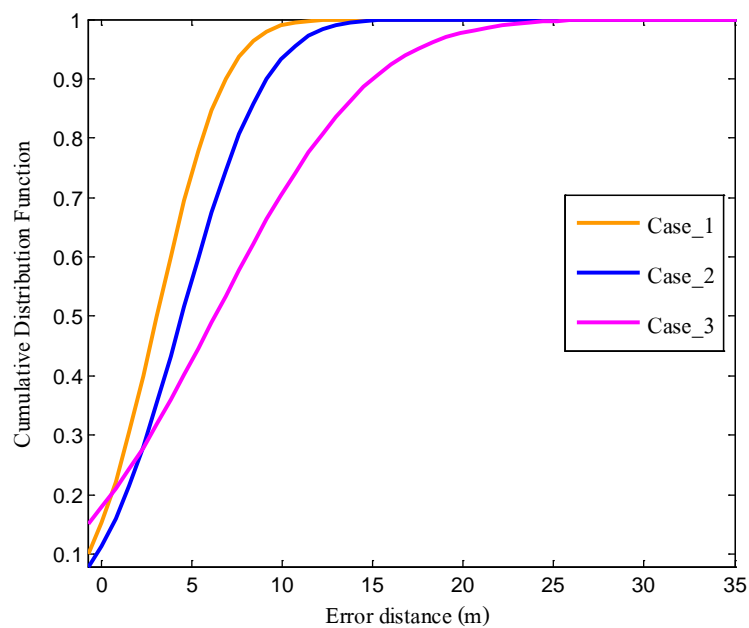
รูปที่ 4.30 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing $2 \times 2 \text{ m}^2$



รูปที่ 4.31 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing $4 \times 4 \text{ m}^2$



รูปที่ 4.32 แสดงผลการระบุตำแหน่งวัตถุ grid spacing $6 \times 6 \text{ m}^2$



รูปที่ 4.33 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะการระบุตำแหน่งผิดพลาด
สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

| Performance metrics Error distance (meters) | Case 1 gs =2x2 m ² | Case 2 gs =4x4 m ² | Case 3 gs =6x6 m ² |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Number of grid spacing | 2,680 | 668 | 316 |
| Number of candidate | 810 | 232 | 122 |
| Number of RNs installed | 12 | 12 | 12 |
| Average Error distance (m.) | 3.08 | 4.45 | 6.29 |
| Maximum Error distance (m.) | 24.74 | 32.00 | 74.00 |
| Minimum Error distance (m.) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Standard deviation | 2.98 | 3.68 | 6.82 |
| 80 th percentile of error distance (m.) | 5.59 | 7.56 | 12.03 |

ในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น สรุปได้ว่าความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงยิ่งมีค่ามากจะยิ่งเพิ่มโอกาสและประสิทธิภาพสำหรับการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงให้มีตำแหน่งที่เหมาะสมกับลักษณะรูปแบบอาคารมากขึ้น ตลอดจนความละเอียดระยะห่างของจุดทดสอบสัญญาณยิ่งมีความละเอียดมากจะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารมากขึ้น ทั้งนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบก็จะส่งผลต่อเวลาในการดำเนินการที่มากขึ้นด้วย ซึ่งถ้าพื้นที่ให้บริการมีขนาดใหญ่มากไม่ต้องการความถูกต้องที่สูงมากนักก็ไม่จำเป็นจะต้องความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณที่มีค่ามาก ๆ เพราะอาจต้องใช้เวลามากในการดำเนินการจริง แต่ถ้าพื้นที่ให้บริการมีขนาดเล็กต้องการความถูกต้องสูงก็จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณมีค่าความละเอียดสูง

4.5 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

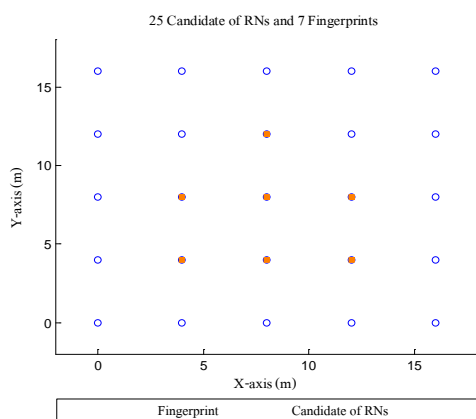
สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงโดยเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ดำเนินการด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX กับวิธีฮิวริสติก (heuristic algorithm) โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ MSMR-SA ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนาบนพื้นฐานของวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing :SA) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบ เพื่อให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบของทั้งสองวิธีดังกล่าว โดยแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 2 การทดลอง คือ หัวข้อ 4.5.1 การทดลองเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX กับวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing :SA) และหัวข้อ 4.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing :SA)

4.5.1 การทดลองเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX กับวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA)

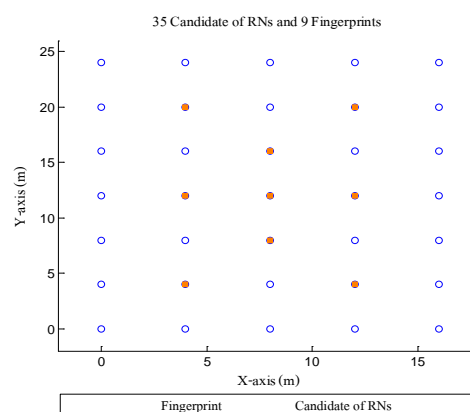
ในการทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบของการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ได้จาก โปรแกรม ILOG CPLEX กับวิธีในการค้นหาคำตอบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อนี้ ซึ่งผลของคำตอบที่ได้จะเป็นตำแหน่งสำหรับติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบบตำแหน่งในพื้นที่ให้บริการที่เราสนใจ

ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็นทั้งหมด 7 กรณี โดยได้พิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

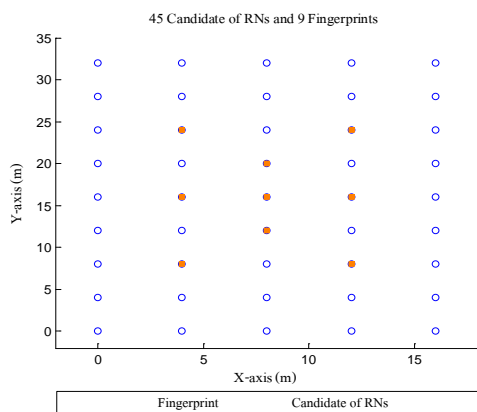
- 1) ขนาดของพื้นที่
- 2) จำนวน โหนดอ้างอิงที่ต้องการติดตั้งในเครือข่าย
- 3) จำนวนตำแหน่งเลือกวาง โหนดอ้างอิงที่สามารถติดตั้งได้ในบริเวณพื้นที่ให้บริการ
- 4) จำนวนตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้เป็นจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point: STP) ที่ได้ถูกกำหนดไว้ทั่วบริเวณของพื้นที่ให้บริการระบบระบบตำแหน่ง และ
- 5) จำนวนสัญญาณที่เพียงพอที่ได้รับจาก โหนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งไว้แล้ว ซึ่งจากพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ได้แสดงเป็นกรณีเปรียบเทียบสำหรับการทดลองทั้งหมด 7 กรณี ที่แสดงดังรูปที่ 4.34 - 4.40



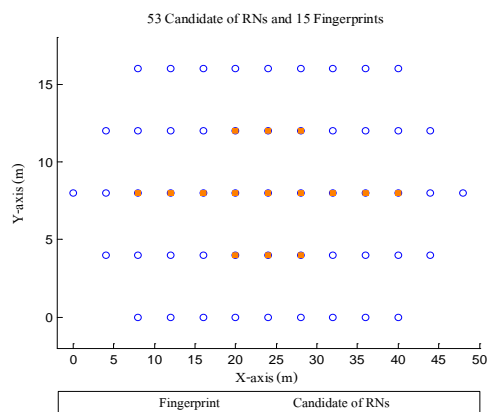
รูปที่ 4.34 กรณีที่ 1



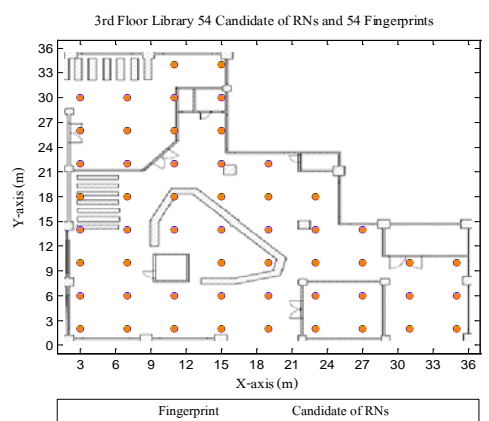
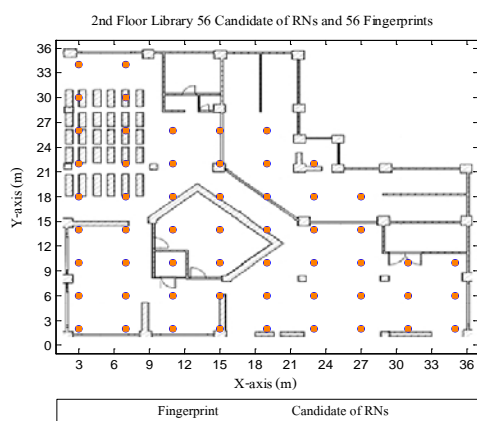
รูปที่ 4.35 กรณีที่ 2



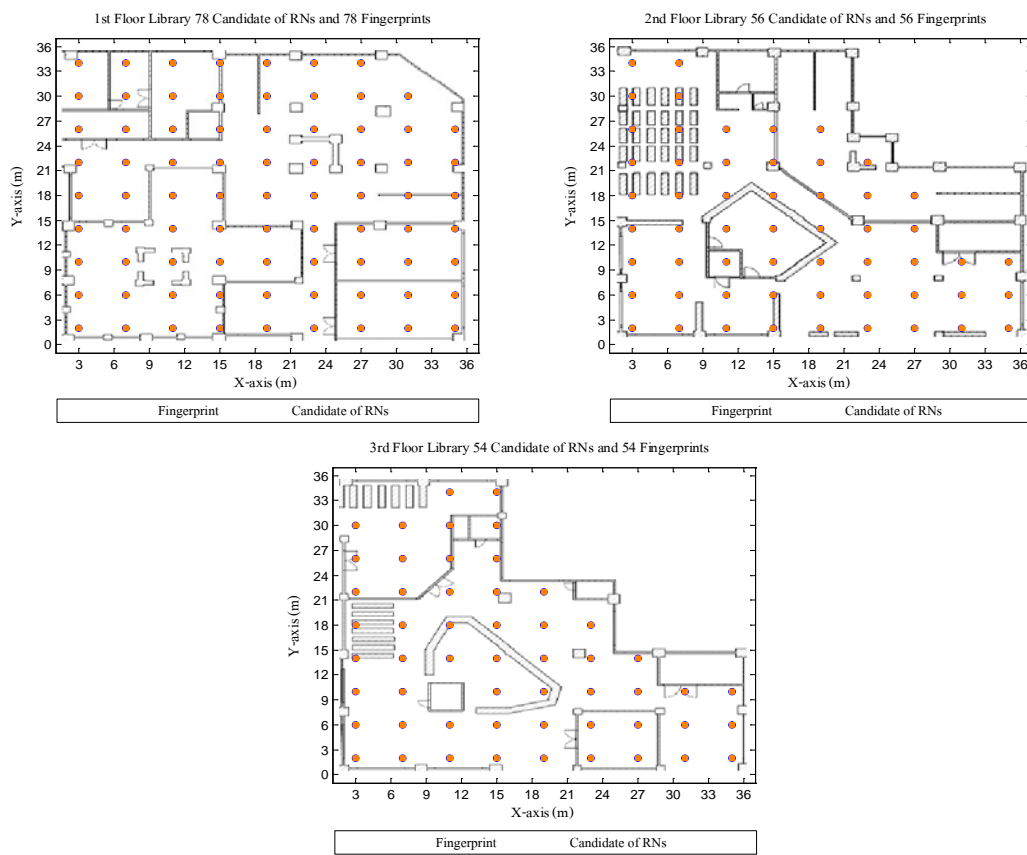
รูปที่ 4.36 กรณีที่ 3



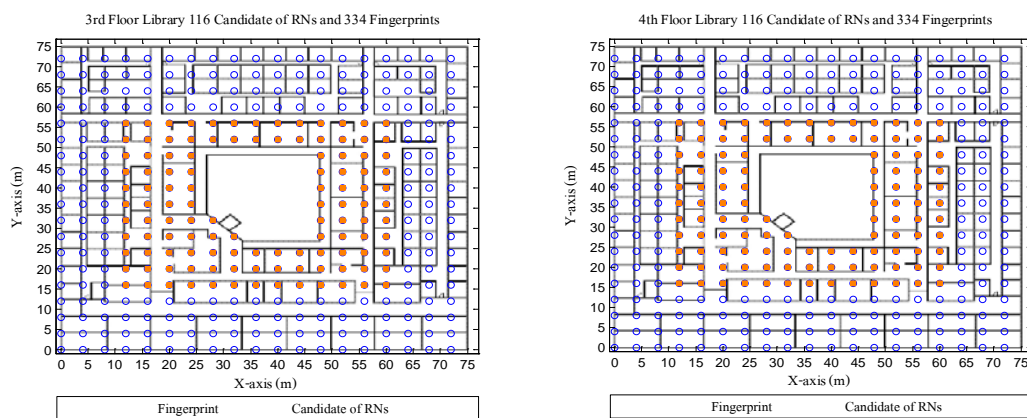
รูปที่ 4.37 กรณีที่ 4



รูปที่ 4.38 กรณีที่ 5



รูปที่ 4.39 กรณีที่ 6



รูปที่ 4.40 กรณีที่ 7

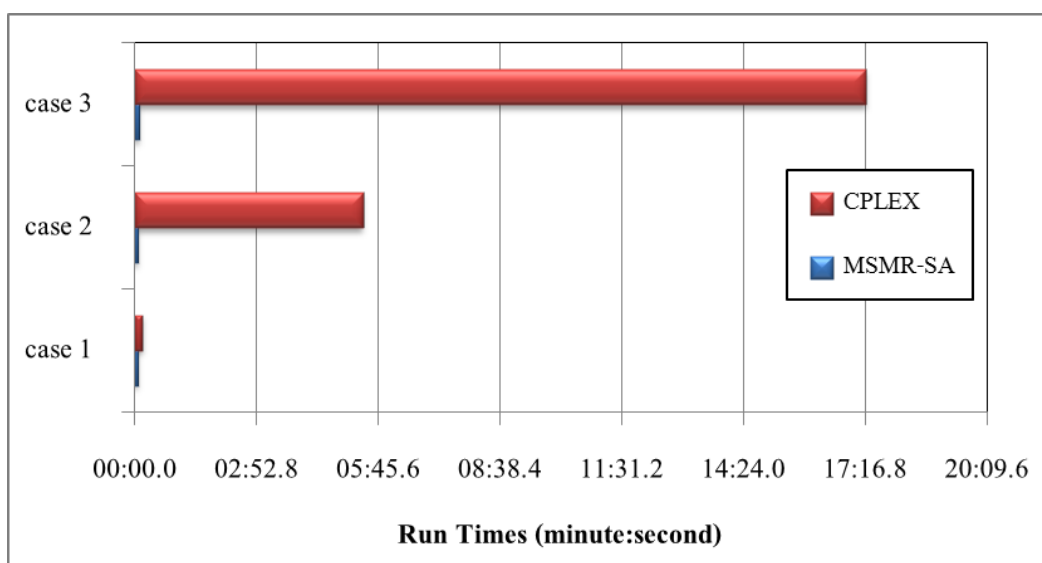
จากนั้นได้ทำการทดลองค้นหาคำตอบสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการแต่ละกรณี โดยในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากค่าฟังก์ชันกวัตตูปริมาณ และระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบระหว่างวิธีการจากโปรแกรม ILOG CPLEX กับ MSMR-SA ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นสำหรับแต่ละกรณี โดยที่ในกรณีที่ 1 - 3 จะเป็นการทดลองค้นหาคำตอบสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการแบบชั้นเดียว และกรณีที่ 4 - 7 จะเป็นการทดลองค้นหาคำตอบสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงในพื้นที่ให้บริการแบบหลายชั้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลการหาคำตอบจากค่าฟังก์ชันกวัตตูปริมาณด้วยโปรแกรม CPLEX กับวิธี MSMR-SA

| กรณีสำหรับการทดลอง | | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 | กรณีที่ 7 |
|---|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ขนาด grid spacing (เมตรxเมตร) | | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 |
| ขนาดพื้นที่ (เมตรxเมตร) | | 16x16 1 ชั้น | 16x25 1 ชั้น | 16x32 1 ชั้น | 16x40 1 ชั้น | 35x35 2 ชั้น | 35x35 3 ชั้น | 75x75 2 ชั้น |
| จำนวน RN | | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 12 |
| Candidate of RN | | 7 | 9 | 9 | 15 | 110 | 188 | 232 |
| จำนวน fingerprint | | 25 | 35 | 45 | 53 | 110 | 188 | 668 |
| จำนวนสัญญาณที่ได้รับจาก RN อย่างน้อย | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| เวลาที่ใช้ (นาที:วินาที) | CPLEX | 00:11 | 05:24 | 17:18 | >100 ชม. | >100 ชม. | >100 ชม. | >100 ชม. |
| | MSMR-SA | 0:05.08 | 0:05.25 | 0:06.02 | 0:06.63 | 0:23.68 | 0:31.28 | 0:69.03 |
| Objective Function Value (pico Watt) | CPLEX | 7,570.31 | 9,775.54 | 10,830.90 | - | - | - | - |
| | MSMR-SA | 7,570.31 | 9,775.54 | 10,830.90 | 11,886 | 25,497 | 30,965 | 55,957 |

จากตารางที่ 4.16 สำหรับกรณีที่ 1 - 3 ได้มีการทดลองกับพื้นที่อาคารชั้นเดียวหรือพื้นที่ให้บริการขนาดเล็กจะเห็นได้ว่า การค้นหาคำตอบที่ได้จากโปรแกรม CPLEX และวิธี MSMR-SA สามารถค้นหาคำตอบได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าเท่ากัน ซึ่งหมายความว่า สำหรับพื้นที่ให้บริการขนาดเล็ก (กรณีที่ 1 - 3) การค้นหาคำตอบด้วยวิธี MSMR-SA สามารถให้คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดได้ตรงกับการค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม CPLEX และเมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของเวลาที่ใช้ค้นหาคำตอบ จะเห็นว่า โปรแกรม CPLEX ใช้เวลาในการค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงมากขึ้นจากกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 คือ 11 วินาที 5 นาที 24 วินาที และ 17 นาที 18 วินาที ตามลำดับ แต่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 คือ 5.08 5.25 และ 6.02 วินาที ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าในกรณีปัญหาขนาดเล็กการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA ได้ผลคำตอบเดียวกับการค้นหาคำตอบที่ได้จากโปรแกรม CPLEX แต่วิธี MSMR-SA มีประสิทธิภาพสูงกว่าในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบการใช้เวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับพื้นที่ให้บริการกรณีที่ 1 - 3 ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่ให้บริการกรณี 1 - 3

จากตารางที่ 4.16 กรณีที่ 4 - 7 เป็นการทดลองปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีพื้นที่ให้บริการแบบหลายชั้นหรือพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งพิจารณาพื้นที่ของอาคารบรรณสารและอาคาร

วิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้มีการปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ให้มีความซับซ้อนมากขึ้น จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดพื้นที่มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นปัญหามาขนาดใหญ การค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม CPLEX ใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่นานมากเกินกว่า 100 ชั่วโมง ไม่สามารถค้นหาคำตอบสำหรับตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงได้ที่ แต่สำหรับการค้นหาคำตอบด้วยวิธี MSMR-SA นั้นสามารถให้คำตอบสำหรับตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงได้ ในหัวข้อต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA

4.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA

สำหรับในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA เนื่องจากคำตอบที่ได้จากวิธีทางฮิวริสติกไม่สามารถรับประกันว่าจะให้คำตอบที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าที่ดีที่สุด (optimal) ส่วนวิธีการค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX ถึงแม้ว่าจะสามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ตามวัตถุประสงค์และเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ แต่ถ้าเป็นปัญหามาขนาดใหญ่วิธีการค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX อาจใช้เวลาในการหาคำตอบนานจนไม่สามารถรอได้

ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA และวิธีการค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX ผู้วิจัยจึงต้องทำการปรับสมการคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้การค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX สามารถหาคำตอบได้ (relaxed objective function) โดยค่าที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบนี้ถือว่าเป็นค่าขอบบน (Upper Bound) ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบเดิม เพื่อสะดวกในการอธิบายต่อไป ผู้วิจัยจะเรียกแนวทางการหาคำตอบโดยใช้สมการแบบ relaxed objective function นี้ว่า Upper Bound CPLEX สมการที่ 4.9 - 4.13 แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขสำหรับแนวทาง Upper Bound CPLEX (UB-CPLEX)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ UB-CPLEX

$$\text{Maximize} \quad \sum_{\forall i \in T} \sum_{j \in R} S_{ij} P_{ij} \quad (4.9)$$

สมการเงื่อนไข UB-CPLEX

1. เงื่อนไขการกำหนดจำนวนโนคอ้างอิงที่ใช้ในการติดตั้งในอาคารสำหรับระบบระบุตำแหน่งจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอ (N_S)

$$\sum_{j \in R} c_j = N_S \quad (4.10)$$

2. เงื่อนไขสำหรับการกำหนดการได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิง โดยที่ตำแหน่งทดสอบสัญญาณ i จะต้องได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิง j ที่ได้ถูกเลือกติดตั้งไว้ในระบบ

$$S_{ij} \leq c_j \quad \forall i \in T, \forall j \in R \quad (4.11)$$

3. เงื่อนไขสำหรับการกำหนดจำนวนของสัญญาณจากตำแหน่งทดสอบสัญญาณ i ที่อยู่ทั่วบริเวณของอาคารจะต้องได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิง j ได้อย่างน้อย

$$\sum_{j \in R} S_{ij} \geq N_R \quad \forall i \in T \quad (4.12)$$

4. เงื่อนไขสำหรับการรับประกันคุณภาพของสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของอาคาร ของการรับสัญญาณจากตำแหน่งทดสอบสัญญาณกับโหนดอ้างอิง โดยที่ตำแหน่งที่ทำการทดสอบสัญญาณ i จะได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิง j ได้ เมื่อระดับของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (threshold)

$$S_{ij} (P_{ij} - P_T) \geq 0 \quad \forall i \in T, \forall j \in R \quad (4.13)$$

ซึ่งสำหรับสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขของวิธี UB-CPLEX นี้ (สมการที่ 4.9 – 4.13) ได้แบ่งตัวแปรต่าง ๆ ออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มเซตของตัวแปร กลุ่มของตัวแปรตัดสินใจ และกลุ่มของตัวแปรค่าคงที่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เซตของตัวแปร :

R คือ เซตของตำแหน่งโหนดอ้างอิงที่สามารถติดตั้งในเครือข่ายได้

T คือ เซตของตำแหน่งที่เป็นจุดทดสอบสัญญาณ

- ตัวแปรตัดสินใจ :

c_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j หรือ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้งโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $j \in R$

S_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ จุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i เลือกรับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อจุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i ไม่เลือกรับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $i \in T, j \in R$

• ตัวแปรค่าคงที่ :

P_{ij} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i รับได้จากโหนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $i \in T, j \in R$ (dBm)

P_T คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สามารถได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงได้ (dBm)

N_S คือ จำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ให้บริการที่พิจารณา

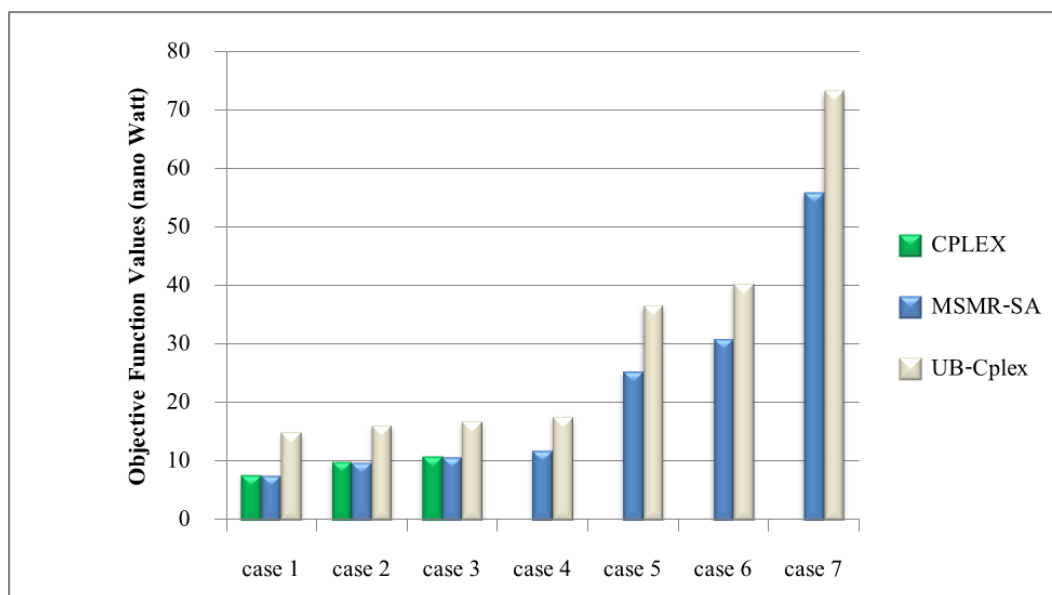
สำหรับการทดลองเพื่อทดสอบการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA เปรียบเทียบกับการค้นหาคำตอบที่ได้จากโปรแกรม ILOG CPLEX ที่ได้มีการปรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลักษณะ UB-CPLEX ตามสมการที่ 4.9 ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองกับพื้นที่อาคารบรรณสารชั้น 1-3 และอาคารวิชาการชั้นที่ 3-4 ซึ่งได้ทำการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ค่อย ๆ เพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดของพื้นที่ จำนวนโหนดอ้างอิงที่ต้องการติดตั้งในเครือข่าย จำนวนตำแหน่งเลือกวางโหนดอ้างอิงที่สามารถติดตั้งได้ในบริเวณพื้นที่ให้บริการ และจำนวนตำแหน่งฟังเกอรัปรีน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้เป็นจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point: STP) ที่ได้ถูกกำหนดไว้ทั่วบริเวณของพื้นที่ให้บริการระบบระบุตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.37 - 4.40 จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลในการค้นหาคำตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละกรณี ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.17 โดยที่จำนวนของโหนดอ้างอิงที่ใช้เลือกติดตั้งที่แสดงในตาราง เป็นค่าจำนวนที่ได้มาจากจำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอ (ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3)

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลการหาคำตอบจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคำตอบที่ได้จากวิธีการ SA สามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด

| กรณีสำหรับการทดลอง | | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 | กรณีที่ 7 |
|---|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ขนาด grid spacing (เมตรxเมตร) | | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 | 4x4 |
| ขนาดพื้นที่ (เมตรxเมตร) | | 16x16 1 ชั้น | 16x25 1 ชั้น | 16x32 1 ชั้น | 16x40 1 ชั้น | 35x35 2 ชั้น | 35x35 3 ชั้น | 75x75 2 ชั้น |
| จำนวน RN | | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 12 |
| Candidate of RN | | 7 | 9 | 9 | 15 | 110 | 188 | 232 |
| จำนวน fingerprint | | 25 | 35 | 45 | 53 | 110 | 188 | 668 |
| จำนวนสัญญาณที่ได้รับจาก RN อย่างน้อย | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| เวลาที่ใช้ (นาที่:วินาที) | CPLEX | 00:11 | 05:24 | 17:18 | >100 ชม. | >100 ชม. | >100 ชม. | >100 ชม. |
| | MSMR-SA | 0:05.08 | 0:05.25 | 0:06.02 | 0:06.63 | 0:23.68 | 0:31.28 | 0:69.03 |
| | UB - CPLEX | 00:0.06 | 00:0.07 | 00:0.08 | 00:0.09 | 00:0.28 | 00:0.47 | 00:2.11 |
| Objective Function Value (nano Watt) | CPLEX | 7.57 | 9.78 | 10.83 | - | - | - | - |
| | MSMR-SA | 7.57 | 9.78 | 10.83 | 11.89 | 25.50 | 30.97 | 55.96 |
| | UB - CPLEX | 14.98 | 16.14 | 16.93 | 17.72 | 36.72 | 40.49 | 73.31 |

จากตารางที่ 4.17 กรณีที่การค้นหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG CPLEX หาคำตอบได้คือ กรณีที่ 1 ถึง 3 นั้นวิธี UB-CPLEX ให้ค่าคำตอบมากกว่าวิธี CPLEX อยู่ที่ 50% 40% และ 36% ตามลำดับ โดยในกรณีดังกล่าวการค้นหาคำตอบด้วยวิธี MSMR-SA สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาที่น้อยกว่ามาก จากนั้นได้นำผลของคำตอบที่ได้จากวิธี MSMR-SA มาเปรียบเทียบกับวิธีการ UB-CPLEX ซึ่งเป็นการปรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ให้ผลคำตอบในลักษณะ upper bound ในรูปที่ 4.42 แสดงให้เห็นว่าค่าคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการ MSMR-SA และ UB-CPLEX นั้นให้คำตอบที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปัญหา มีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้

จากวิธี MSMR-SA จะให้ค่าคำตอบที่ไม่เกินค่า UB-CLPEX ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธีการ MSMR-SA สามารถให้ค่าตอบที่มีค่าไม่เกินค่าคำตอบที่ได้จากวิธีการ UB-CPLEX ที่มีการรีแลกซ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีการคำนวณที่ง่ายขึ้น การประมวลผลน้อยลงเพื่อให้โปรแกรม ILOG CPLEX สามารถคำนวณหาคำตอบได้ในเวลาที่ไม่ยาวนานมาก



รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการหาค่ามากที่สุด (Maximize) สำหรับพื้นที่ให้บริการกรณี 1 – 7

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Technology) ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันและเข้ามามีบทบาทมากสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร (Indoor Positioning System : IPS) เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายระยะใกล้ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำเนื่องจากการส่งข้อมูลปริมาณน้อยจึงใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลต่ำ และที่สำคัญมีความแม่นยำในการวัดค่าและเก็บข้อมูล เป็นต้น และเนื่องจากระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System : GPS) ไม่สามารถนำมาใช้งานสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้ เพราะพื้นที่ภายในอาคารมีโครงสร้างทางกายภาพที่มีความซับซ้อน สัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมจึงถูกตัวอาคารบดบังสัญญาณที่ส่งมายังผู้ใช้งาน ผู้ใช้งานจึงไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนได้เมื่ออยู่ภายในอาคาร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่าง ๆ อาทิเช่น การตรวจหาตำแหน่งของผู้ป่วยหรืออุปกรณ์ในโรงพยาบาล การตรวจจับสินค้าในโรงงานการผลิต การระบุตำแหน่งของผู้เยี่ยมชมในพิพิธภัณฑ์ขนาดใหญ่ การระบุตำแหน่งของผู้โดยสารภายในสนามบินหรือสถานีขนส่ง เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงข้อดีของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ของ Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ที่นอกจากจะมีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ และสามารถสร้างการเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายได้แล้ว มันยังมีความสามารถในการวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength : RSS) ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานในการทำงานสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุ นั้น ประกอบด้วย 1) โหนดวัตถุ (Target node) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งไว้กับบุคคลวัตถุหรือสิ่งที่ต้องการทราบตำแหน่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีคุณสมบัติในการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เป็นต้น อุปกรณ์นี้จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้รับจากโหนดอ้างอิงที่ติดตั้งไว้ในระบบ 2) โหนดอ้างอิง (reference node: RN) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งไว้ในบริเวณพื้นที่ให้บริการระบบระบุตำแหน่ง ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการรับส่งค่าพารามิเตอร์ของระบบระบุตำแหน่ง 3) การระบุตำแหน่งทำหน้าที่

ประมวลผลสำหรับระบุตำแหน่งของบุคคลหรือวัตถุ โดยใช้เทคนิคประเภทต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นความสำคัญของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการระบบระบุตำแหน่ง ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาถึงปัจจัยของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งของวัตถุ และมีการศึกษาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบชั้นเดียว แต่ยังไม่มีการพิจารณาถึงการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่สามารถใช้ได้กับอาคารแบบชั้นเดียวและหลายชั้นด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น (MSMR-SA) ที่ประกอบไปด้วยการ 2 เฟสการทำงานคือ เฟสที่ 1 ขั้นตอนการประมาณจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงเริ่มต้น เฟสที่ 2 ขั้นตอนการหาจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอ่อนจำลอง การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่ได้แนะนำเสนอกับเทคนิคแบบ Uniform Placement การเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งวัตถุจากการใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงกับการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรม การวิเคราะห์ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งวัตถุเมื่อพิจารณาจำนวนจุดทดสอบ การวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดความละเอียดระยะห่างของตำแหน่งเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงและจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ การวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น สามารถสรุปถึงข้อดีของระบบได้ดังนี้

- เทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นสามารถกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงได้ทั้งอาคารแบบชั้นเดียวและอาคารแบบหลายชั้น
- โครงสร้างทางกายภาพของอาคารให้บริการระบบระบุตำแหน่งในแต่ละชั้นไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเหมือนกัน
- การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่นำเสนอ (MSMR-SA) ในการทดลองจริงมีลักษณะครอบคลุมทั่วบริเวณพื้นที่ให้บริการของระบบระบุตำแหน่ง และยังสามารถให้ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งได้ดีกว่าตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement สูงถึง 20% ที่ค่าความคลาดเคลื่อนภายในระยะ 6 เมตร โดยตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ MSMR-SA มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่ง 3.81 เมตร ส่วน

ตำแหน่งที่เลือกติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบ Uniform Placement ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่ง 5.53 เมตร ดังนั้นเทคนิคที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องในระบบระบุตำแหน่งเฉลี่ยได้สูงถึง 31%

- จำนวนโหนดอ้างอิงและตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมกับลักษณะพื้นที่ให้บริการ ระบบระบุตำแหน่งวัตถุจะช่วยให้ประสิทธิภาพให้กับระบบได้ดีมากขึ้น
- เมื่อพื้นที่การทดลองมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น เทคนิคที่นำเสนอ MSMR-SA สามารถหาคำตอบได้ด้วยเวลาที่รวดเร็ว

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในงานที่จะต้องศึกษา โดยต้องทราบถึงข้อจำกัด และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ต้องสามารถทำงานได้ทั้งอาคารแบบชั้นเดียวและอาคารแบบหลายชั้น อีกทั้งยังต้องทำการลงจริงเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งในการทดลองจริงมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เข้ามามีผลกระทบต่อการทำงาน เช่น บุคคล ความแปรปรวนของสัญญาณ สภาพพื้นที่จริง อุปกรณ์และเวลา เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในสถานะที่ระบบทำงานอยู่จริง เป็นตัวประเมินถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบุตำแหน่งในเวลาใช้งานจริง ที่ต้องมีการปรับให้เหมาะสมในการจำลองระบบ อีกทั้งในส่วนของเทคนิคที่ใช้ในขั้นตอนการระบุตำแหน่งด้วยวิธีระยะห่างยูคลิดีเนียน (Euclidean Distance) เป็นเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุ ผู้ที่สนใจในการพัฒนาอาจเลือกใช้เทคนิคที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเช่น เทคนิคในกลุ่มของ Triangulation หรือการทำงานร่วมกันมากกว่าหนึ่งเทคนิค ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งวัตถุให้มากขึ้น หรือจะพิจารณาการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในกรณีอื่น เช่น ความซับซ้อนของเวลาดำเนินการ (run time complexity) ความคงทนของระบบ (robustness) และ ต้นทุนของระบบ (cost) เป็นต้น

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งได้ แนวทางการพัฒนาในอนาคต สามารถพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ

ประสิทธิภาพของระบบ ที่ได้ นอกจากพิจารณาจากคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ภายในอาคาร เช่น ค่าอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่ง เป็นต้น ซึ่งอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบได้นั้นคือการระบุตำแหน่งด้วยวิธีระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean Distance) โดยสามารถเลือกใช้เทคนิคในการระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเช่น เทคนิคในกลุ่มของ Triangulation หรือการทำงานร่วมกันมากกว่าหนึ่งเทคนิค เป็นต้น การลดขั้นตอนในการสร้างฐานข้อมูลและพิจารณาการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในกรณีอื่น เช่น ความซับซ้อนของเวลาดำเนินการ (run time complexity) ความคงทนของระบบ (robustness) และ ต้นทุนของระบบ (cost) เป็นต้น และยังสามารถพัฒนาให้ผู้ใช้งานได้เข้าถึงเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งนี้มากขึ้น โดยการบอกตำแหน่งของผู้ใช้งานในอุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก

รายการอ้างอิง

คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) **ความน่าจะเป็นและสถิติ** กรุงเทพฯ โรงพิมพ์แห่งหุ้นส่วนจำกัดพิทักษ์การพิมพ์

บุญเจริญ ศิริเนาวกุล (2551) **ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)** กรุงเทพฯ : ท็อปประกอบ จีริกิติ (2535). **การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)**. โครงการส่งเสริมเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

Ali, S.F.M., and Hassan, R. (2011). **Local Positioning System Performance Evaluation with Cosine Correlation Similarity Measure**, Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), pp. 151-156.

Aomumpai, S., and Prommak, C. (2011). **On the Impact of Reference Node Placement in Wireless Indoor Positioning Systems**, World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 449-453.

Aomumpai, S., (2013) **Optimal Reference Node Placement For Wireless Indoor Positioning Systems**, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand.

Baala, O., B., Zheng, Y., and Caminada, A. (2009). **The Impact of AP Placement in WLAN-Based Indoor Positioning System**, International Conference on Networks: 12-17.

Bal, M., Xue, H., Shen, W., and Ghenniwa, H.H. (2010). **A 3-D Indoor Location Tracking and Visualization System Based on Wireless Sensor Networks**, IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC), pp. 1584-1590.

Baunach, .M., Kolla, R., and Muhlberger, C. (2007). **Beyond Theory: Development of a Real World Localization Application as Low Power WSN**, IEEE Conference on Local Computer Networks, pp. 872-884.

Costa D., (1993). **On the use of some known methods for T-colorings of graphs**, Annals of Operations Research, vol. 41, pp. 343-358.

- Gansemer, S., Großmann, U., and Hakobyan, S. (2010). **RSSI-Based Euclidean Distance Algorithm for Indoor Positioning Adapted for The Use in Dynamically Changing WLAN Environments and Multi-Level Buildings**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-6.
- Gu, Y., Lo, A., and Niemegeers, I. (2009). **A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks**, IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 11, Issue. 1, pp. 13-32.
- International Business Machines Corporation**. [Online]. Available: <http://www.ibm.com/>
- Kaemarungsi, K. and Krishnamurthy, P. (2004). **Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting**, Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp. 1012 – 1022.
- Kaemarungsi, K. (2005). **Efficient Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting**, International Conference on Wireless Networks Communications and Mobile Computing, pp. 181-186.
- Kim, H.S., Kim, D.R., Yang, S.H., Son, Y.H., and Han, S.K. (2013). **An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique**, Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, Issue. 1, pp. 134-144.
- Kirkpatrick S., (1984) **Optimization by simulated annealing: Quantitative studies**, Journal of Statistical Physics, vol. 34, pp. 975-986.
- Kodippili, N.S., and Dias, D. (2010). **Integration of Fingerprinting and Trilateration Techniques for Improved Indoor Localization**, Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1-6.
- Liu, H., Darab, H., Banerjee, P. and, Liu, J. (2007). **Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems**, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, Vol. 37, No. 6, pp. 1067-1080.
- Maneerat, K., (2013). **Development of Wireless Indoor Positioning Systems For Multi-Floor Building Using Hybrid Techniques**, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand.
- Prommak, C., (2004). **Demand-Based Network Planning For WLANS**, Doctor of Philosophy in Information Sciences, University of Pittsburgh, Pennsylvania, United States.

- Tatham, B., and Kunz, T., (2011). **Anchor node placement for localization in wireless sensor networks**, International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp. 180 – 187.
- Sharma, Y., F., Wong, W., Soh, S., and Wong, W., C. (2010). **Access point placement for fingerprint-based localization**, IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), pp. 238 - 243.
- Liu, H., Darab, H., Banerjee, P. and, Liu, J. (2007). **Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems**, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, Vol. 37, No. 6, pp. 1067-1080.
- Tatham, B., and Kunz, T. (2011). **Anchor node placement for localization in wireless sensor networks**, International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp. 180 – 187.
- Sharma, Y., F., Wong, W., Soh, S., and Wong, W., C. (2010). **Access point placement for fingerprint-based localization**, IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), pp. 238 - 243.
- Stoyanova, T., Kerasiotis, F., Prayati, A., and Papadopoulos, G. (2009). **Evaluation of Impact Factors on RSS Accuracy for Localization and Tracking Applications in Sensor Networks**, Telecommunication System, pp. 235–248.
- Sugano, M., Kawazoe, T., Ohta, Y., and Murata, M. (2006). **Indoor Localization System Using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network Based on ZigBee Standard**, Int. Conf. on Wireless Network and Emerging Technologies.
- Yong U.L., and Kavehrad, M. (2012). **Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-hoc Wireless Network**, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 58, Issue. 4, pp. 1176-1184.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย

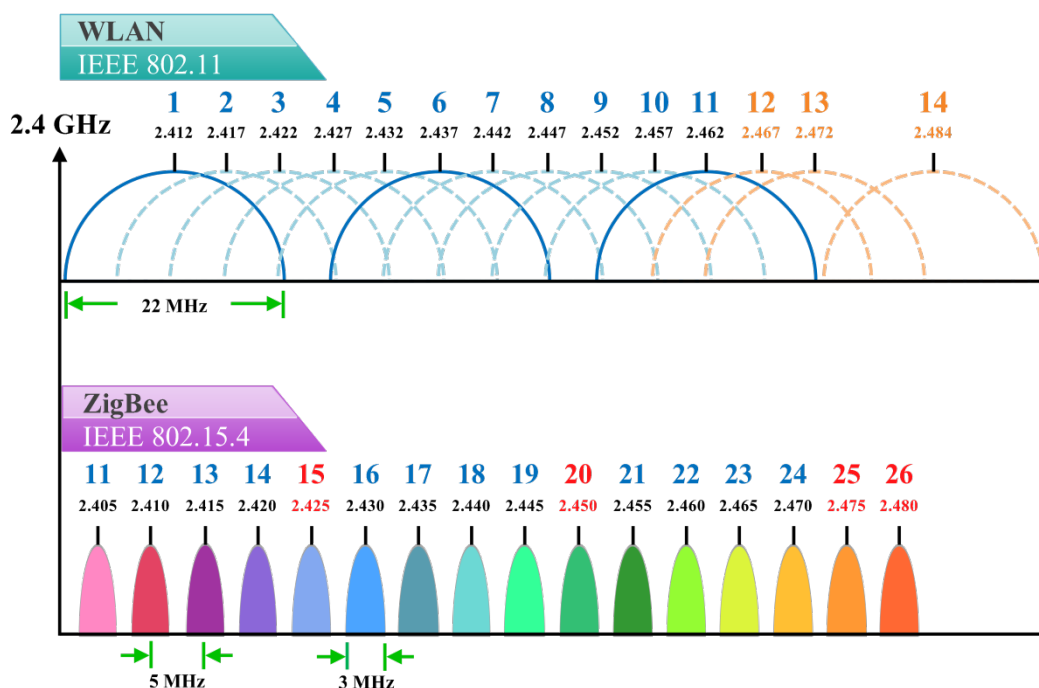
ก.1 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคโนโลยีรับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ซึ่งผลิตจากบริษัท Freescale (<http://www.freescale.com/>) โดยได้เลือกใช้ชุดพัฒนา 1322x ZigBee Evaluation Kit ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งหมด 4 ชนิดได้แก่ MC13224 Sensor Node, MC13224 Network Node, MC13224-LPN, และ MC13224 USB Dongle (ซึ่งประกอบไปด้วย 4S + 4N + 1L) แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดจะทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz (มีค่าความถี่กลางตั้งแต่ 2.405 GHz ถึง 2.480 GHz) มีช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณที่ 11 ถึง ช่องสัญญาณที่ 26) โดยแต่ละช่องสัญญาณจะมีขนาดแบนด์วิดท์ (bandwidth) เท่ากับ 3 MHz สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 26 มีค่าความถี่กลางเท่ากับ 2.480 GHz ซึ่งเป็นช่องสัญญาณที่ไม่มีการซ้อนทับกับย่านความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.11 (Wireless Local Area Network : WLAN) รูปที่ ก.2 แสดงย่านความถี่ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

หมายเหตุ ช่องสัญญาณของ ZigBee ที่ไม่มีการซ้อนทับกับช่องสัญญาณของ WLAN มีทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณได้แก่ ช่องสัญญาณที่ 15, 20, 25 และ 26 แสดงด้วยตัวอักษรสีแดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 ชุดพัฒนา 1322x ZigBee Evaluation Kit



รูปที่ ก.2 ย่านความถี่ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย 2 ชนิดคือ โหนดอ้างอิง (reference node : RN) และ โหนดวัตถุ (target node) แสดงได้ดังรูปที่ ก.3 ซึ่งที่โหนดวัตถุจะเลือกใช้อุปกรณ์ MC13224 Sensor Node และ โหนดอ้างอิงจะใช้อุปกรณ์ MC13224 Sensor Node, MC13224 Network Node และ MC13224-LPN (รวมทั้งสิ้น 8 โหนด) ขณะที่ MC13224 USB Dongle จะใช้สำหรับการดักจับ packet ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย เพื่อง่ายต่อการสังเกตการณ์ ซึ่งสามารถเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจจับ และสามารถแสดงข้อมูลที่ตรวจจับได้ เช่น ค่า address ต้นทาง ค่า address ปลายทาง และข้อมูลที่ส่ง เป็นต้น โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดมีดังนี้



a. โหนดอ้างอิง

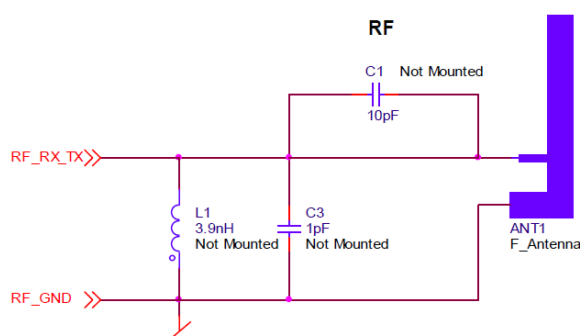


b. โหนดวัดถู

รูปที่ ก.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ก.1.1 MC13224 Sensor Node (MC13224-SN)

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Sensor Node รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล และมีสายอากาศภายในตัว ซึ่งมีชื่อว่า PCB inverted-F-antenna (F-antenna) แสดงได้ดังรูปที่ ก.4 และรายละเอียดของสายอากาศ F-antenna แสดงดังตารางที่ ก.1 สำหรับ MC13224 Sensor Node มีคุณสมบัติเด่นคือ มีตัวตรวจจับความดัน (Pressure sensor) ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensor) มาตรการความเร่งแบบ 3 แกน (3 axis accelerometer) และ Joystick ซึ่งสามารถปรับกำลังส่ง (transmit power) ตั้งแต่ +3 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไว (sensitivity) เท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วยประมาณ \$220 (6,427 บาท) รูปที่ ก.5 แสดงอุปกรณ์ MC13224 Sensor Node และตารางที่ ก.2 แสดงรายละเอียดของ MC13224 Sensor Node



รูปที่ ก.4 PCB inverted-F-antenna

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของ PCB inverted-F-antenna

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|---|------------------------|
| Typical nominal output power | 0 dBm, with +4 dBm max |
| Typical sensitivity | -95 dBm. |
| Frequency range | 2.405 GHz - 2.480 GHz |
| Typical range (outdoors, line of sight) | 300 meters |



รูปที่ ก.5 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Sensor Node

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดของ MC13224 Sensor Node

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|-----------------|---|
| Manufacturer | Freescale |
| Chipset | MC13224V |
| Frequency range | 2.405 GHz - 2.480 GHz |
| Transmit power | +3 dBm to -30 dBm |
| Sensitivity | -95 dBm |
| Antenna | PCB inverted-F |
| Power | USB or DC Jack (12V Max) or 2x AA batteries |
| Connection | UART1: USB Interface FT232R |
| Size (x, y, z) | 95 x 60 x 40 mm |
| Sensor features | Pressure, Temperature, 3 axis accelerometer |
| Other features | Joystick, 4 Push buttons, 4 GPIO LEDs |

ก.1.2 MC13224 Network Node (MC13224-NN)

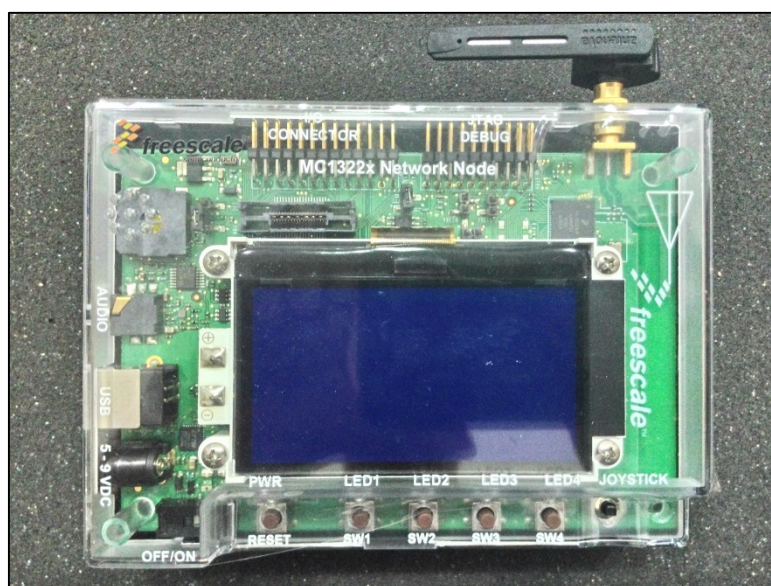
อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Network Node รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล และมีสายอากาศสองชนิดคือ Sub Miniature version “A” connector (SMA-antenna) และ F-antenna สำหรับสายอากาศ SMA-antenna แสดงได้ดังรูปที่ ก.6 และรายละเอียดของสายอากาศ F-antenna แสดงดังตารางที่ ก.3 สำหรับ MC13224 Network Node มีคุณสมบัติเด่นคือ จอแสดงผลขนาด 128x64 LCD with LED backlight มีตัวตรวจจับความดัน ตัวตรวจจับอุณหภูมิ มาตรฐานแรงแบบ 3 แกน และ Joystick ซึ่งสามารถปรับกำลังตั้งแต่ +2 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไวเท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วยประมาณ \$160 (4,674 บาท) รูปที่ ก.7 แสดงอุปกรณ์ MC13224 Network Node และตารางที่ ก.4 แสดงรายละเอียดของ MC13224 Network Node



รูปที่ ก.6 Sub Miniature version “A” connector

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดของ Sub Miniature version “A” connector-antenna

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|---|------------------------|
| Typical nominal output power | 0 dBm, with +2 dBm max |
| Typical sensitivity | -95 dBm. |
| Frequency range | 2.405 GHz - 2.480 GHz |
| Typical range (outdoors, line of sight) | 300 meters |



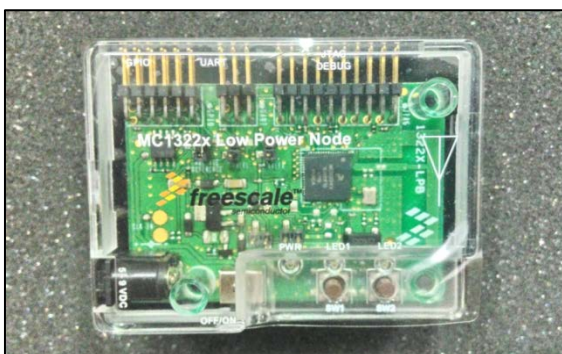
รูปที่ ก.7 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Network Node

ตารางที่ ก.4 รายละเอียดของ MC13224 Network Node

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|-----------------|---|
| Manufacturer | Freescale |
| Chipset | MC13224V |
| Frequency range | 2.405 GHz - 2.480 GHz |
| Transmit power | +2 dBm to -30 dBm |
| Sensitivity | -95 dBm |
| Antenna | External SMA antenna or PCB inverted-F |
| Power | USB or DC Jack (12V Max) or 2x AA batteries |
| Connection | UART1: USB Interface FT232R |
| Size (x, y, z) | 135 x 100 x 40 mm |
| Sensor features | Pressure, Temperature, 3 axis accelerometer |
| Other features | Joystick, 4 Push buttons, 4 GPIO LEDs |

ก.1.3 MC13224 Low Power Node (MC13224-LPN)

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Low Power Node รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล และมีสายอากาศภายในตัว ซึ่งมีชื่อว่า F-antenna สามารถปรับกำลังส่งตั้งแต่ +4 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไวเท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วย ประมาณ \$120 (3,506 บาท) รูปที่ ก.8 แสดงอุปกรณ์ MC13224 Low Power Node และตารางที่ ก.5 แสดงรายละเอียดของ MC13224 Low Power Node



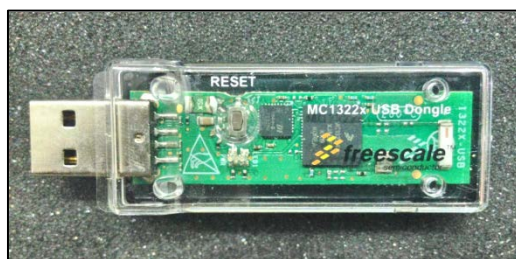
รูปที่ ก.8 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Low Power Node

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดของ MC13224 Low Power Node

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|-----------------|--|
| Manufacturer | Freescale |
| Chipset | MC13224V |
| Frequency range | 2.405 GHz - 2.480 GHz |
| Transmit power | +4 dBm to -30 dBm |
| Sensitivity | -95 dBm |
| Antenna | PCB inverted-F |
| Power | DC Jack (12V Max), or 2x AAA batteries |
| Connection | On pin header |
| Size (x, y, z) | 70 x 50 x 30 mm |
| Sensor features | No |
| Other features | 2 Push buttons, 2 GPIO LEDs |

ก.1.4 MC13224 USB Dongle

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 USB Dongle มีสายอากาศภายในตัว ซึ่งมีชื่อว่า SMD ceramic สามารถปรับกำลังส่งตั้งแต่ +4 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไวเท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วยประมาณ \$80 (2,337 บาท) รูปที่ ก.9 แสดงอุปกรณ์ MC13224 USB Dongle และตารางที่ ก.6 แสดงรายละเอียดของ MC13224 USB Dongle



รูปที่ ก.9 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 USB Dongle

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดของ MC13224 USB Dongle

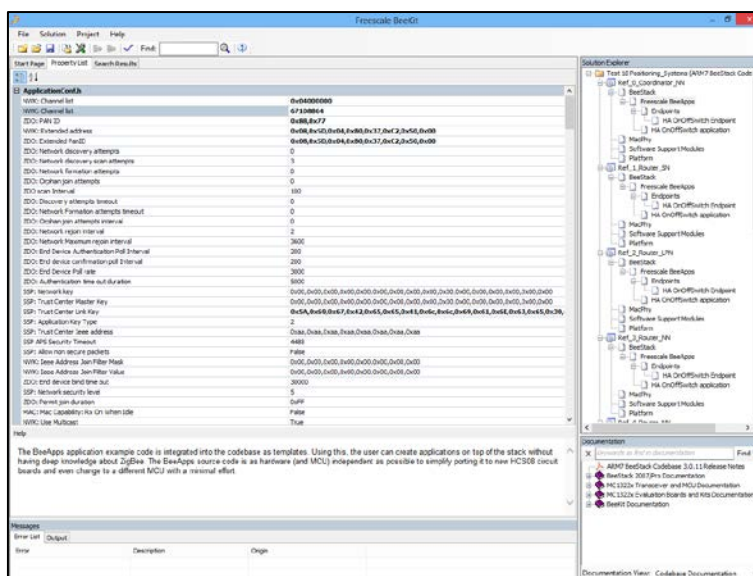
| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|-----------------|-----------------------------|
| Manufacturer | Freescall |
| Chipset | MC13224V |
| Frequency range | 2.405 GHz - 2.480 GHz |
| Transmit power | +4 dBm to -30 dBm |
| Sensitivity | -95 dBm |
| Antenna | SMD ceramic |
| Power | USB |
| Connection | UART1: USB Interface FT232R |
| Size (x, y, z) | 60 x 24 x 12 mm |
| Sensor features | No |
| Other features | 2 Push buttons, 1 GPIO LEDs |
| Price per unit | \$80 (2,337 Baht) |

ก.2 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โปรแกรมที่ใช้กำหนดค่าและควบคุมอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย และโปรแกรมที่ใช้ประมวลผล รวมทั้งใช้คำนวณหาตำแหน่งวัตถุและใช้คำนวณหาฟังก์ชันที่เหมาะสม

ก.2.1 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย

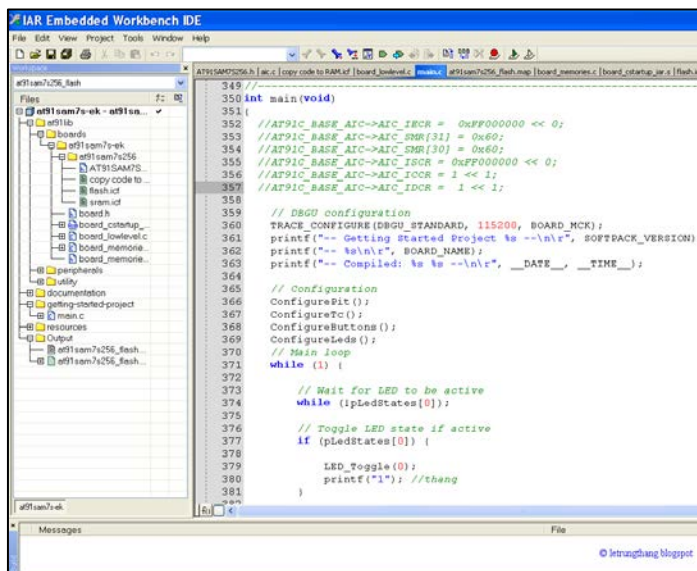
โปรแกรม Freescale BeeKit จะใช้สำหรับสร้างรูปแบบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์แต่ละชนิด และกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สาย อาทิเช่น ช่องสัญญาณ ค่า address ค่า PANID กำลังส่ง และค่าเวลาที่ใช้ในการอัปเดตเส้นทาง เป็นต้น รูปที่ ก.10 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม Freescale BeeKit



รูปที่ ก.10 โปรแกรม Freescale BeeKit

โปรแกรม IAR Embedded Workbench จะใช้สำหรับกำหนด code คำสั่ง หรือแก้ไข code คำสั่งที่ได้จากโปรแกรม Freescale BeeKit เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย และควบคุมกลไกการทำงานของการทำงานของการรับส่งข้อมูล โดยจะอาศัยความรู้พื้นฐานของภาษา C ในการกำหนดกลไก สำหรับการโหลดคำสั่งลงที่บอร์ดหรือตัวอุปกรณ์จะใช้สาย J-Link V8 JLink Segger ARM Emulator Debugger เพื่อโหลด code คำสั่งลงอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายผ่านขา JTAG Connector ของตัวอุปกรณ์ รูปที่ ก.11 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม IAR Embedded Workbench และรูปที่ ก.12 แสดง สาย J-Link V8

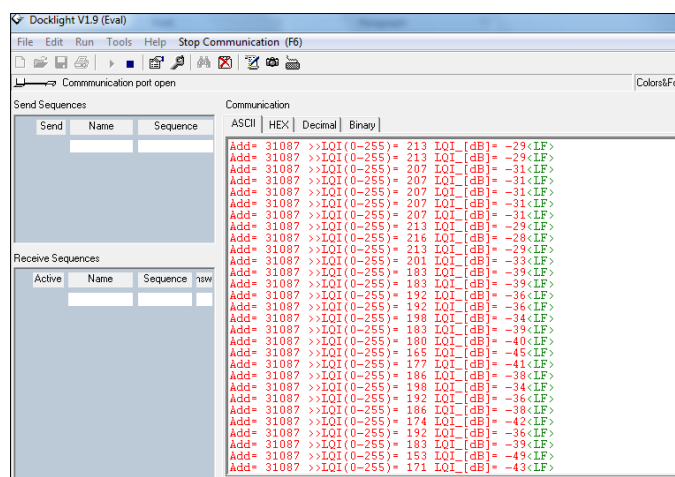
โปรแกรม Docklight จะใช้สำหรับแสดงค่าต่าง ๆ ที่อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายรับได้ เช่น ค่า LQI และ ค่า address ต้นทาง เป็นต้น ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบ text และเก็บบันทึกค่าเหล่านี้ลงใน text file (.txt) โดยมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับโปรแกรม HyperTerminal รูปที่ ก.13 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม Docklight



รูปที่ ก.11 โปรแกรม IAR Embedded Workbench



รูปที่ ก.12 สาย J-Link V8



รูปที่ ก.13 โปรแกรม Docklight

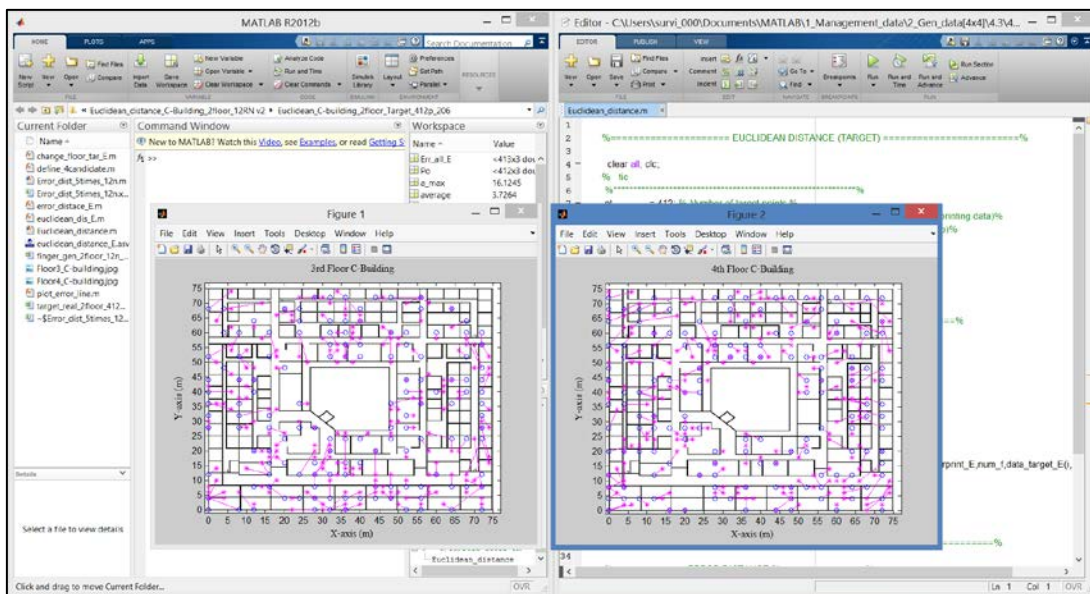
ก.2.2 โปรแกรมที่ใช้คำนวณหาตำแหน่งวัตถุ

โปรแกรม MATLAB 2012b จะใช้สำหรับการอ่านข้อมูลที่เก็บบันทึกได้จาก text file เพื่อนำไปจัดเก็บลงในไฟล์ Excel (ทำให้ text อยู่ในรูปของ matrix) เพื่อง่ายต่อการนำมาใช้งาน เมื่อต้องการระบุตำแหน่ง โปรแกรมจะมีหน้าที่อ่านค่าจากไฟล์ Excel (ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ และ ข้อมูลที่วัดถูวัดได้) และนำค่าที่อ่านได้ไปประมวลผลเพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุตามกระบวนการทำงานของเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น รูปที่ ก.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ของงานวิจัยนี้

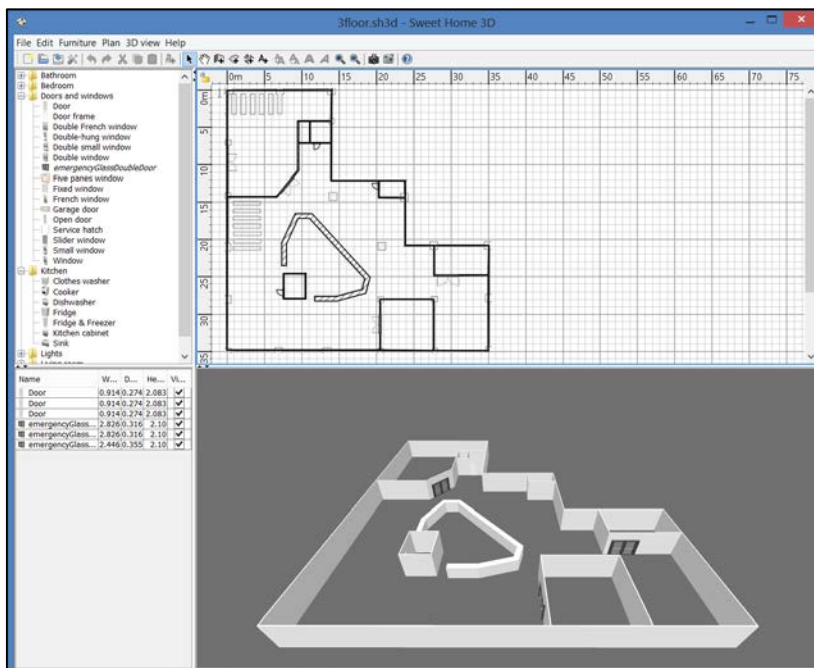
หมายเหตุ เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุ ดังนั้นกลไกการทำงานของขั้นตอนการระบุตำแหน่งของงานวิจัยนี้จึงยังไม่ถูกพิจารณา ด้วยเหตุนี้กระบวนการทำงานของระบบระบุตำแหน่งจึงยังไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง (เช่น โนควัดถูวัด ค่าพารามิเตอร์และส่งต่อไปยังโปรแกรมประมวลผลแบบอัตโนมัติ)

โปรแกรมจำลองแผนที่ของอาคาร Sweet Home 3D ใช้สำหรับสร้างแผนที่ กำหนดโครงสร้างภายในของอาคาร เพื่อนำไปใช้ในการแสดงผลระบุตำแหน่งของวัตถุ ตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ ก.15

หมายเหตุ เนื่องจากพื้นที่ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจำนวนจำกัด ดังนั้นข้อมูล code คำสั่งของโปรแกรมควบคุม และ code กระบวนการทำงานของโปรแกรมประมวลผล เช่น code การทำงานของเทคนิคการระบุตำแหน่ง เป็นต้น รวมทั้งแผนที่ของอาคารที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะถูกเก็บไว้ใน CD ท้ายเล่มของวิทยานิพนธ์ (รายละเอียดของ CD สามารถดูได้จาก Readme.docx)



รูปที่ ก.14 โปรแกรม MATLAB



รูปที่ ก.15 โปรแกรม Sweet Home 3D

ก.2.3 โปรแกรมที่ใช้คำนวณหาฟังก์ชันที่เหมาะสม

โปรแกรม MATLAB 2012b จะใช้สำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของ โหนดอ้างอิงแต่ละกรณีในระยะทางต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดค่าความเข้มสัญญาณจริงในพื้นที่ให้บริการ แสดงดังตารางที่ ก.7

ตารางที่ ก.7 รายละเอียดค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของ โหนดอ้างอิงแต่ละกรณีในระยะทางต่าง ๆ

| The function of F-antenna and locates on the same floor | |
|---|--|
| General model Gauss1: $f(x) = a1 * \exp(-((x-b1)/c1)^2)$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a1 = -88.02 (-91.34, -84.71) b1 = 36.78 (29.71, 43.86) c1 = 59.72 (49.29, 70.14) | Goodness of fit: SSE: 3.721e+04 R-square: 0.4826 Adjusted R-square: 0.4813 RMSE: 6.902 |
| The function of F-antenna and locates on the different floor | |
| General model Gauss1: $f(x) = a1 * \exp(-((x-b1)/c1)^2)$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a1 = -106 (-111.5, -100.5) b1 = 44.82 (33.33, 56.31) c1 = 74.74 (58.5, 90.97) | Goodness of fit: SSE: 3.087e+04 R-square: 0.4993 Adjusted R-square: 0.4981 RMSE: 6.223 |
| The function of SMA-antenna and locates on the same floor | |
| General model Gauss1: $f(x) = a1 * \exp(-((x-b1)/c1)^2)$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a1 = -99.84 (-103.4, -96.3) b1 = 37.57 (31.63, 43.51) c1 = 56.94 (48.73, 65.16) | Goodness of fit: SSE: 4.076e+04 R-square: 0.5761 Adjusted R-square: 0.575 RMSE: 7.151 |

ตารางที่ ก.7 แสดงรายละเอียดค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมของค่าความเข้มสัญญาณจากสายอากาศของ
โนดอ้างอิงแต่ละกรณีในระยะทางต่าง ๆ (ต่อ)

| The function of SMA-antenna and locates on the different floor | |
|--|---------------------------|
| General model Gauss1: | Goodness of fit: |
| $f(x) = a1 * \exp(-((x-b1)/c1)^2)$ | SSE: 3.613e+04 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | R-square: 0.4942 |
| a1 = -108.1 (-112, -104.2) | Adjusted R-square: 0.4929 |
| b1 = 37.7 (29.51, 45.9) | RMSE: 6.801 |
| c1 = 66.46 (53.5, 79.42) | |

ภาคผนวก ข

คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยใช้รูปแบบของภาษาไทย ซึ่งคำศัพท์เทคนิควิศวกรรมภาษาอังกฤษที่ใช้ในวิทยานิพนธ์จะถูกเรียบเรียงให้เป็นคำศัพท์เทคนิควิศวกรรมภาษาไทย โดยผู้วิจัยได้อ้างอิงจากแหล่งอ้างอิงดังนี้

- หนังสือศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ซึ่งจัดทำโดย คณะอนุกรรมการปรับปรุงศัพท์เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้า ในคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า พ.ศ. 2527-2534
- หนังสืออภิธานศัพท์โทรคมนาคมไทย (Thai Telecommunication Glossary) จัดทำและจัดพิมพ์โดย สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ (อชีทีไอ) ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารเชิงแสงและควอนตัม (Optical & Quantum Communications Laboratory : OQC/ICCRU) และชมรมไฟฟ้าสื่อสาร สมาคมสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ไอทีริเปลอี) สาขาประเทศไทย พ.ศ. 2554
- ศัพท์บัญญัติราชบัณฑิตยสถาน (<http://rirs3.royin.go.th/coinages/webcoinage.php>)

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

| คำศัพท์ภาษาไทย | คำศัพท์ภาษาอังกฤษ |
|--|---|
| กฎของเบย์ | Bayes' rule |
| กรณีที่ย่ำที่สุด | worst-case |
| กระบวนการกรองข้อมูล | data filter |
| กระบวนการกรองชั้น | floor-filter |
| กระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิดีเนียน | calculation euclidean distance |
| กระบวนการหาดำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก k จำนวน | calculation Weighted K-Nearest Neighbor |
| การกระจัดกระจาย | scattering |
| การค้นแบบเฉพาะที่ | local search |
| การค้นหาปริภูมิสถานะ | search space |
| การแจกแจงปกติ | Normal distribution |
| การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม | Uniform distribution |

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

| คำศัพท์ภาษาไทย | คำศัพท์ภาษาอังกฤษ |
|--|--|
| กริดี้อัลกอริทึม | Greedy Algorithm |
| การซิงโครไนซ์ | synchronized |
| การซิงโครไนซ์ของสัญญาณนาฬิกา | clock synchronization |
| การดีมอดูเลชัน | Demodulation |
| การดำเนินการเคลื่อนที่ | Move operator |
| การติดตาม | tracking |
| การถดถอยแบบเชิงเส้น | linear regression |
| การนำทาง | navigation |
| การบดบัง | shadowing |
| การประมาณค่าในช่วง | interpolation |
| การประมาณตำแหน่งด้วยวิธีการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด k จำนวน | K-Nearest Neighbor method (KNN method) |
| การโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ | mathematical programming |
| การโปรแกรมเชิงเส้น | Linear Programming |
| การเฝ้าตรวจ | monitoring |
| การแพร่กระจายของคลื่นสัญญาณวิทยุ | radio propagation |
| การมอดูเลต | Modulation |
| การแมตช์ | matching |
| การระบุตำแหน่ง | localization |
| การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ | Visible Light Communication (VLC) |
| การสูญเสียของสัญญาณ | signal path loss |
| การแสดงเอกลักษณ์ | Identification (ID) |
| การหาค่าเหมาะที่สุดของกลุ่มอนุภาค | particle swarm optimization |
| การเหลื่อมกัน | overlap |
| การอบอ่อนจำลอง | Simulated Annealing |
| เกณฑ์การหยุด | stopping criteria |
| กำลังความถี่วิทยุที่รับได้ | received RF power |

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

| คำศัพท์ภาษาไทย | คำศัพท์ภาษาอังกฤษ |
|------------------------------------|--------------------------------|
| กำลังทางแสง | optical power |
| กำลังส่ง | transmit power |
| ข้อจำกัดหรือเงื่อนไข | constraint |
| ขอบเขต | bound |
| ขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปร | define parameter |
| ควอนไทล์ | quantiles |
| ความถูกต้อง | accuracy |
| ความทนทาน | robustness |
| ความน่าจะเป็น | probability |
| ความแม่นยำ | precision |
| ความไว | sensitivity |
| ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ | Received Signal Strength (RSS) |
| ค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง | error distance |
| ค่าความแปรปรวน | variance |
| ค่าถ่วงน้ำหนัก | weighted |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | Standard Deviation (SD) |
| ค่าผิดปกติ | outliers |
| ค่าพิสัย | range |
| ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม | temperature |
| โครงสร้างของตำแหน่งข้างเคียง | Neighborhood structure |
| คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด | near optimal |
| คำตอบที่ดีที่สุด | optimal solution |
| จำลองแบบ | simulation |
| จุดเข้าถึง | Access Point (AP) |
| ช่วงความเชื่อมั่น | confidence interval |
| ช่องสัญญาณ | channel |
| ฐานข้อมูลฟingerprint | fingerprint database |

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

| คำศัพท์ภาษาไทย | คำศัพท์ภาษาอังกฤษ |
|--|--|
| ตัวชี้บอกรูปภาพการเชื่อมโยง | Link Quality Indicator (LQI) |
| ตัวแปรการตัดสินใจ | decision variable |
| ตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงแบบยูนิฟอร์ม | Uniform placement |
| ตำแหน่งฟิงเกอร์ปริ้นท์ | location fingerprint |
| ทฤษฎีบทพีทาโกรัส | pythagorean theorem |
| เทคนิคการวัดค่าความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึง | Time Difference of Arrival (TDOA) |
| เทคนิคการวัดค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึง | Angle of Arrival (AOA) |
| เทคนิคการวัดระยะ | range measurement technique |
| เทคนิคระยะห่างยูคลิดีเนียน | Euclidean distance technique |
| โหนดอ้างอิง | reference node (RN) |
| แบนด์วิดท์ | bandwidth |
| แบบเวลาจริง | real time |
| แบบเชิงเส้น | linear form |
| ประสิทธิภาพ | performance |
| ปริภูมิค้นหา | search space |
| ปริภูมิปัญหา | problem space |
| เปอร์เซ็นต์ไทล์ | percentile |
| โปรแกรมจำลอง | simulator |
| พื้นที่การเหลื่อม | overlap area |
| ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อน | Cumulative Distribution Function (CDF) |
| ฟังก์ชันการประเมินผล | Evaluation function |
| ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น | Probability Density Function (PDF) |
| ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ | Objective function |
| ภาครับ | Receiver (Rx) |
| ภาคส่ง | Transmitter (Tx) |

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

| คำศัพท์ภาษาไทย | คำศัพท์ภาษาอังกฤษ |
|--|--|
| ย่านความถี่สาธารณะสำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ | Industrial Sciences Medicine band (ISM band) |
| รหัสเทียม | pseudo code |
| ระบบดาวเทียมบอกพิกัด | Global Positioning System (GPS) |
| ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ | mobile cellular networks |
| ระบบระบุตำแหน่งภายในบริเวณระนาบเดียว | single plane system |
| ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้น | multi-floor environments, multi-floor building |
| ระบบระบุตำแหน่งวัตถุ | positioning system |
| ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร | Indoor Positioning System (IPS) |
| ระบบระบุพิกัดภายในห้อง 3 มิติ | 3 dimension system |
| ระบบเรดาร์ | Radar system |
| ระยะห่างของตำแหน่งฟังก์ชันกริด | grid spacing |
| ลักษณะการเดินทางของสัญญาณเป็นเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวาง | Non-Line-of-Sight (NLOS) |
| วิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดก่อน | Best first search |
| เวลาในการทำงาน | run time |
| สถานีฐาน | base station |
| สภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา | dynamically changing environment |
| สัญลักษณ์ | Symbolic |
| ออนไลน์เฟส | online phase |
| ออฟไลน์เฟส | offline phase |
| อัลกอริทึมพันธุกรรม | Genetic Algorithm |
| อุปกรณ์เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 | Wireless Local Area Network (WLAN) |
| อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a | Ultra-wideband (UWB) |

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

| คำศัพท์ภาษาไทย | คำศัพท์ภาษาอังกฤษ |
|---|-------------------|
| อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 | ZigBee |
| อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.1 | Bluetooth |

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Kondee, K. and Prommak, C. (2015) **Performance Analysis and Comparison for Wireless Indoor Positioning Systems in Multi-Floor Building**, in International Electrical Engineering Congress (iEECON), Thailand, pp. 110-115.

Kondee, K. and Prommak, C. (2014) **Optimal Design of Reference Node Placement for Wireless Indoor Positioning Systems in Multi-Floor Building**, in International Conference on Telecommunications and Network Engineering (ICTNE), Switzerland, pp. 1123 – 1127.

Aomumpai, S., Kondee, K., Prommak, C. and Kaemarungsi, K. (2014) **Optimal Placement of Reference Nodes for Wireless Indoor Positioning Systems**, in International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), May 2014, pp. 1-6.

Performance Analysis and Comparison for Wireless Indoor Positioning Systems in Multi-Floor Building

Kittipob Kondee and Chutima Prommak[†]

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

m5540174@g.sut.ac.th, cprommak@sut.ac.th

Keywords: Indoor positioning System, Optimization System design, Multi-Floor Building, Signal measurement, Simulation data.

Abstract. In this paper, performance analysis and comparison for Wireless Indoor Positioning Systems (WIPS) in multi-floor building are presented. Different structures of WIPS are considered. In particular, WIPS structure designed by our proposed technique was compared with other structures designed by an opportunistic approach. The comparisons were conducted by using signal strength data from the real measurement and from simulation models. An efficiency of the simulation models was compared as well. The results show that the WIPS structure designed by our proposed technique yield better indoor positioning performances in term of the accuracy and precision.

Introduction

The applications of wireless communication technology standard IEEE 802.15.4 for indoor positioning systems has gained more attention recently because it is small, lightweight and low power consumption [1]. The technology has widespread applications, such as location detection of the patient or equipment in hospital, product inspection in a manufacturing plant, identifying location of visitor in large museum, etc. [2]. The optimal design for the placement of wireless transceivers in the system is needed to ensure high service performance of the indoor positioning systems.

The techniques used for indoor positioning systems can be classified into three groups. The first group is based on Triangulation properties. Particularly, the geometric features of trigonometry are applied [3]–[4]. The second group is based on proximity of known objects or symbolic location [5]. Finally, the third group is called scene analysis. It infers the location based on off-line observation of features of a scene [6]–[8]. This technique has gained more attention due to it is provided high accuracy, high precision and less complexity.

Procedures of the scene analysis techniques are divided into two phases [9]. The first phase is called an off-line phase. In this phase, the fingerprint database is created. This database collects parameters of interest in the service areas and is used to determine the coordinates of objects.

The second phase is call an online phase. In this phase, a set of reference nodes (RNs), which are installed in the building, send out referencing signal for the indoor positioning systems. Each RN has different name or Media Access Control address (MAC address) which is used as a reference for the measured signal strength. The target node, which is a device that is attached to an object or something that needs to know the location, measures the parameters of the system such as the received signal strength (RSS), the temperature, etc. Then, the measured parameters are used to determine the location of objects.

One of the key factors that affects the accuracy and precision of the scene analysis based indoor positioning systems is the placement of reference nodes [10].

Several works in literatures have shown interest in the placement design for reference nodes in the indoor positioning systems. The research work in [10] studied the effect of the access point (APs) placement on the performance of localization in WLAN based indoor positioning system. The work in [10] interested in the number and pattern of APs placement in both symmetric and asymmetric in service area. Such areas are complicated and could influence the accuracy of the indoor positioning systems. In [11], the authors studied the factors affecting the design of indoor

positioning systems based on location fingerprinting such as path loss exponent, number of access point, grid spacing and methods used in estimating the location which affects the performance metric of indoor positioning systems. In [12], the authors presented a technique for reference nodes placement in a single story building base on Binary Integer Linear Programming (BILP) for a single plane. Our recent work in [13] presented a novel technique for efficiently designing the structure of wireless indoor positioning systems in multi-floor buildings. We named our proposed technique in [13] “MSMR-M” (Maximize-Sum of Maximum RSS for Multi-floor building). The MSMR-M applies Simulated Annealing (SA) to solve the optimal placement of reference nodes for wireless indoor positioning systems in multi-floor buildings.

In this paper, we further investigate the performances of WIPS structures designed by MSMR-M. The comparisons were conducted by using signal strength data from the real measurement and from simulation models. An efficiency of the simulation models was compared as well.

The rest of this paper is organized as follows. In the next section, the methodology for the performance study is described. After that the performance comparison and analysis of an accuracy of the positioning systems are presented. The final section concludes the paper.

Methodology

To investigate the performances of WIPS structures for the fingerprinting approach, the indoor positioning accuracy and precision of the systems designed by MSMR-M [13] are compared with those of other systems designed by the opportunistic approach [10]. In particular, we consider the normally used approach which based on the uniform reference node placement, putting reference nodes of WIPS uniformly across the service area [10]. An indoor environment of the two-floor building at Suranaree University of Technology is considered as a tested bed for the experimental study. Size of each floor of the service area is approximately 35m×35m. Fig. 1 compares WIPS structures designed by MSMR-M against the uniform approach. The star and triangular symbols denote locations to install the reference nodes determined by MSMR-M and the uniform approach, respectively. Grid spacing of 4m x 4m was applied. As a result, there are 110 fingerprint locations across the service area, depicted by the symbol ‘+’ in Fig. 1.

Thorough experiments and comparisons were conducted by using signal strength data from the real measurement and from simulation models. The layout of reference nodes of WIPS based on MSMR-M and uniform approaches were implemented by using IEEE 802.15.4 wireless transceivers using Freescale MC13224V third generation chipset with built-in ARM7TDMI processor. There are two types of the wireless transceiver antennas, including the F-antenna and the-SMA antenna. They operate at 2.480 GHz (i.e. channel 26 of IEEE 802.15.4 standard). The transmit power is set to 1.7 dBm [14]. The height of the reference nodes is at 2 meters. The height of the target node is 0.8 meters.

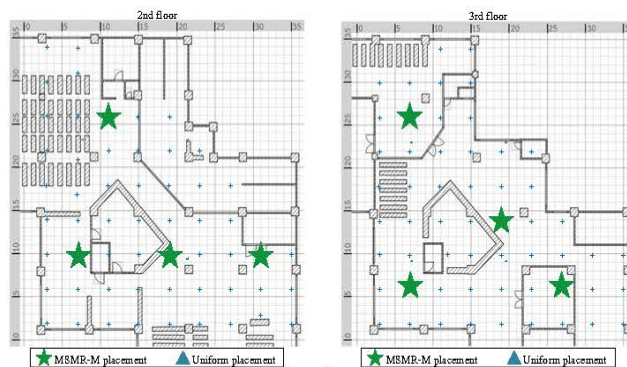


Fig. 1 2nd and 3rd of service area

First, to create the fingerprint database, the signal strength at each fingerprint location received from the reference nodes in the system was measured and recorded by using computer notebook with an Intel Core i5-2450M Processor 2.5GHz and 8GB of RAM. At each fingerprint location, the Received Signal Strength (RSS) was measured 100 times in which the outlier values were excluded and an average value of RSS at each fingerprint location was computed to create the fingerprint database. Fig. 2 plots RSS measured from the real environment. The measured data is divided into four categories based on the location and the antenna type of the reference nodes: (Eq. 1) light blue, (Eq. 2) dark blue, (Eq. 3) orange and (Eq. 4) red, dots denote RSS from (Eq. 1) the reference node with F-antenna and locates on the same floor with the fingerprint location, (Eq. 2) the reference node with F-antenna and locates on the different floor from the fingerprint location, (Eq. 3) the reference node with SMA-antenna and locates on the same floor with the fingerprint location, and (Eq. 4) the reference node with SMA-antenna and locates on the different floor from the fingerprint location, respectively. The solid lines represent the best fit curve of empirical data in each category. The function of each curve is written in (Eq. 1) – (Eq. 4). The notation d denotes the distance (in meter) between the reference node and the fingerprint location and $f_i(d)$ is RSS (in dBm) at distance d , $i = 1, 2, 3, 4$.

$$f_1(d) = -88.02\exp(-((d-36.78)/59.72)^2). \quad (1)$$

$$f_2(d) = -106\exp(-((d-44.82)/74.74)^2). \quad (2)$$

$$f_3(d) = -99.84\exp(-((d-37.57)/56.94)^2). \quad (3)$$

$$f_4(d) = -108.1\exp(-((d-37.7)/66.46)^2). \quad (4)$$

Next, we aim to determine models for efficiently simulating RSS to be used in our further experiments. Due to the fluctuation nature of RSS, suitable models need to be able to capture such effects caused by the shadow fading. Two sets of simulation models were evaluated here. To capture the shadow fading effects, first we applied the normal distribution function with $f_i(d)$ and the simulation model in this case are written in (Eq. 5); μ and σ denote mean and standard deviation of the empirical data, respectively. Second, we applied the uniform distribution function with $f_i(d)$ and the simulation model in this case are written in (Eq. 6); α and β denote the upper bound and the lower bound of the RSS fluctuation.

$$f_{i,normal}(d) = f_i(d) + N(\mu, \sigma). \quad (5)$$

$$f_{i,uniform}(d) = f_i(d) + U(\alpha, \beta). \quad (6)$$

We implement the simulation models (Eq. 5) and (Eq. 6) by using the MATLAB R2012b solver. Computations are performed on a computer notebook with an Intel Core i5-2450M Processor 2.5GHz and 8GB of RAM. Fig. 3 and 4 illustrates RSS generated by (Eq. 5) and (Eq. 6), respectively.

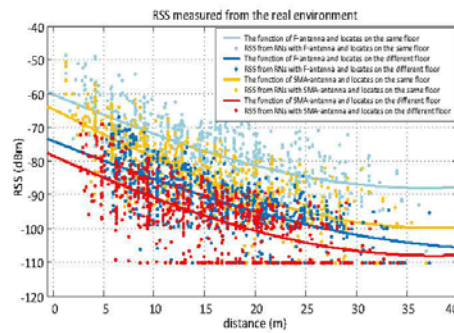
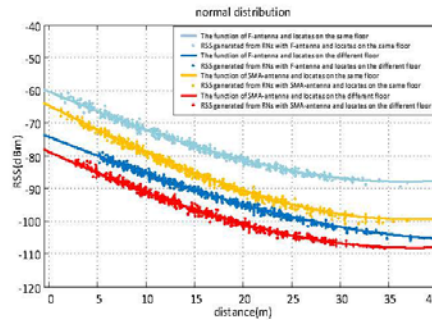
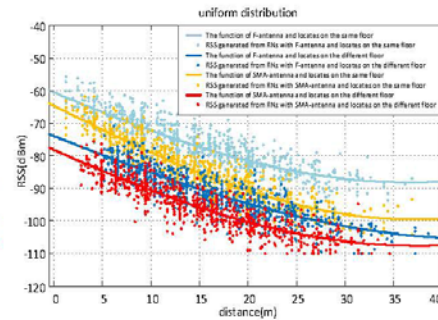


Fig. 2 Received signal strength measured from real experiments

Fig. 3 Simulating RSS with $f_{i,normal}(d)$ Fig. 4 Simulating RSS with $f_{i,uniform}(d)$

Performance Comparison and Analysis

In this section, we present an accuracy analysis of WIPS designed by MSMR-M [13] and the uniform approach [10]. Here the use of system structures in fig. 1 was evaluated and compared. Total number of 88 locations of target nodes was randomly selected for accuracy testing of the positioning systems. The target node used in our experiments is a mobile node consisting of the wireless transceiver connected to a computer notebook.

We conducted three sets of tests to determine locations of the target node. Fingerprinting based indoor positioning technique was applied. The first set of tests is based on RSS data from the real measurements. The other two sets of tests are based on simulation data obtained by the simulation models (Eq. 5) and (Eq. 6) presented in the previous section.

Fig. 5 compares the cumulative distribution function (CDF) of error distances resulting from WIPS designed by MSMR-M [13] and the uniform approach [10], using the real measurement data and the simulation models. It can be observed that the positioning system designed by our MSMR-M model yields less error distances than that of the uniform based approach for all three sets of tests. Table 1 shows detailed performance comparison between the proposed MSMR-M and the uniform placement approach. Considering the results of using real measurement data, WIPS designed by MSMR-M could yield positioning accuracy at the minimum average error distances of 3.81 m. whereas the system designed by the uniform placement technique yields the positioning accuracy at the minimum average error distances of 5.53 m. Particularly, 70% of tests using the positioning systems designed by MSMR-M results in error distance of 5.75 m. whereas that of the uniform placement technique results in error distance of 7.56 m. Therefore, the wireless indoor positioning system designed by MSMR-M outperforms that of the other technique 31% in average and up to 24% at 70th percentile.

Comparing the use of real measurement data and the other two simulation models, fig. 5 and table 1 shows that the simulation model (Eq. 6), $f_{i,uniform}(d)$, results in the positioning performance closer to those using the real measurement data than the simulation model (Eq. 5), $f_{i,normal}(d)$, which results in much less error distances than the real experiments.

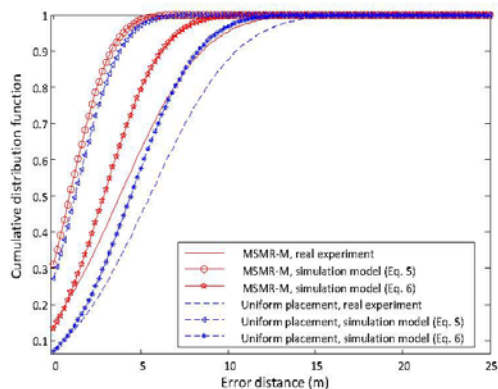


Fig. 5 Cumulative Distribution Function (CDF) of error distances

Table 1 Performance comparison

| Performance metric | Error distances [meters] | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| | Uniform Placement | | | MSMR-M | | |
| | Measurement data | $f_{i,normal}(d)$ | $f_{i,uniform}(d)$ | Measurement data | $f_{i,normal}(d)$ | $f_{i,uniform}(d)$ |
| Average | 5.53 | 1.228 | 4.17 | 3.81 | 0.92 | 2.70 |
| Max. | 16.97 | 5.657 | 8.94 | 13.60 | 6.40 | 8 |
| Min. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S.D. | 3.87 | 2.01 | 2.68 | 3.69 | 1.870 | 2.36 |
| 70th percentile of Estimation error | 7.56 | 2.29 | 6.01 | 5.75 | 1.91 | 4.25 |

Conclusion

In this paper, effects of using different structure of Wireless Indoor Positioning Systems (WIPS) on the positioning accuracy are investigated. The comparisons were conducted by using signal strength data from the real measurement and from simulation models. The results show that WIPS structure designed by our proposed technique yields better indoor positioning performances in term of the accuracy and precision regardless of the data type. In particular, WIPS designed by our proposed technique outperforms that of the other technique 31% in average and up to 24% at 70th percentile. As for the simulation models, we found that the model that applies the uniform distribution in the signal generating function yields results closer to those using the real measurement data than the model that applies the normal distribution.

References

- [1] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.11, no 1, 2009, pp. 13–32.
- [2] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, vol. 37, no. 6, November 2007, pp. 1067–1080.

- [3] Kodippili, N.S. and Dias, D. "Integration of fingerprinting and trilateration techniques for improved indoor localization," IEEE Conference on Wireless And Optical Communications Networks (WOCN), September 2010, pp. 1–6.
- [4] Kim, H.S., Kim, D.R., Yang, S.H., Son, Y.H., and Han, S.K. "An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique," Journal of Lightwave Technology, vol.31.1, January 2013, pp. 134–144.
- [5] Yong U.L., and Kavehrad, M. "Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-hoc Wireless Network," IEEE Transactions on Consumer Electronics, IEEE Transactions on, vol.58, November 2012, pp. 1176–1184.
- [6] Ali, S.F.M., and Hassan, R. "Local Positioning System Performance Evaluation with Cosine Correlation," IEEE Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), September 2011, pp. 151–156.
- [7] Bal, M., Xue, H., Shen, W., and Ghenniwa, H. "A 3-D Indoor Location Tracking and Visualization System Based on Wireless Sensor Networks," IEEE Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC), October 2010, pp. 1584–1590.
- [8] Gansemmer, S., Großmann, U., and Hakobyan, S. "RSSI-Based Euclidean Distance Algorithm for Indoor Positioning Adapted for The Use in Dynamically Changing WLAN Environments and Multi-Level Buildings," IEEE Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), September 2010, pp. 1–6.
- [9] M. Baunach, R. Kolla and C. Muhlberger, "Beyond Theory: Development of a Real World Localization Application as Low Power WSN," IEEE Conference on Local Computer Networks, October 2007, pp. 872–884.
- [10] O. Baala, Y. Zheng and A. Caminada, "The Impact of AP Placement in WLAN-Based Indoor Positioning System," International Conference on Networks, March 2009. pp. 12–17.
- [11] K. Kaemarungsi, "Efficient Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting," International Conference on Wireless Networks Communications and Mobile Computing, 2005, pp. 181–186
- [12] A. Supattra, (2013). Optimal Reference Node Placement For Wireless Indoor Positioning Systems, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand
- [13] K. Kittpob and P. Chutima "Optimal Design of Reference Node Placement for Wireless Indoor Positioning Systems in Multi-Floor Building," ICTNE, 12th World Academy of Science, Engineering and Technology, July 2014, vol. 8, pp. 1094 - 1098
- [14] M. Kriangkrai, (2013). Development of Wireless Indoor Positioning Systems For Multi-Floor Building Using Hybrid Techniques, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand

Optimal Design of Reference Node Placement for Wireless Indoor Positioning Systems in Multi-Floor Building

Kittipob Kondee, Chutima Prommak

Abstract—In this paper, we propose an optimization technique that can be used to optimize the placements of reference nodes and improve the location determination performance for the multi-floor building. The proposed technique is based on Simulated Annealing algorithm (SA) and is called MSMR-M. The performance study in this work is based on simulation. We compare other node-placement techniques found in the literature with the optimal node-placement solutions obtained from our optimization. The results show that using the optimal node-placement obtained by our proposed technique can improve the positioning error distances up to 20% better than those of the other techniques. The proposed technique can provide an average error distance within 1.42 meters.

Keywords—Indoor positioning System, Optimization System design, Multi-Floor Building, Wireless Sensor Networks.

I. INTRODUCTION

THE applications of wireless communication technology standard IEEE 802.15.4 for indoor positioning systems has gained more attention recently because it is small, lightweight and low power consumption [1]. The technology has widespread applications, such as location detection of the patient or equipment in hospital, product inspection in a manufacturing plant, identifying location of visitor in large museum, etc. [2]. The optimal design for the placement of wireless transceivers in the system is needed to ensure high service performance of the indoor positioning systems.

The techniques used for indoor positioning systems can be classified into three groups. The first group is based on Triangulation properties. Particularly, the geometric features of trigonometry are applied [3], [4]. The second group is based on proximity of known objects or symbolic location [5]. Finally, the third group is called scene analysis. It infers the location based on off-line observation of features of a scene [6]–[8]. This technique has gained more attention due to it is provided high accuracy, high precision and less complexity.

Procedures of the scene analysis techniques are divided into two phases [9]. The first phase is called an off-line phase. In this phase, the fingerprint database is created. This database collects parameters of interest in the service areas and is used to determine the coordinates of objects.

The second phase is call an online phase. In this phase, a set of reference nodes (RNs), which are installed in the building,

send out referencing signal for the indoor positioning systems. Each RN has different name or Media Access Control address (MAC address) which is used as a reference for the measured signal strength. The target node, which is a device that is attached to an object or something that needs to know the location, measures the parameters of the system such as the received signal strength (RSS), the temperature, etc. Then, the measured parameters are used to determine the location of objects.

One of the key factors that affects the accuracy and precision of the scene analysis based indoor positioning systems is the placement of reference nodes [10].

Several works in literatures have shown interest in the placement design for reference nodes in the indoor positioning systems. The research work in [10] studied the effect of the access point (APs) placement on the performance of localization in WLAN based indoor positioning system. This work interested in the number and pattern of APs placement in both symmetric and asymmetric in service area. Such areas are complicated and could influence the accuracy of the indoor positioning systems. In [11], the authors studied the factors affecting the design of indoor positioning systems based on location fingerprinting such as path loss exponent, number of access point, grid spacing and methods used in estimating the location which affects the performance metric of indoor positioning systems. In [12], the authors presented a technique for reference nodes placement in a single story building base on Binary Integer Linear Programming (BILP) for a single plane. In Research [13], the authors presented a localization technique for multi-story buildings by considering the RSS along with the temperature and humidity to create the fingerprinting database in service area. Although this technique could yield high accuracy but this technique has not considered the problems of placement design of reference nodes for indoor positioning systems in multi-story buildings.

Based on our literature review above, existing studies are interested on the accurate and precise indoor positioning systems. There has been little interest on the placement design of reference nodes for indoor positioning systems. Existing work has not considered the optimum placement of reference nodes for multi-story buildings. Therefore, this paper focuses on the study and development of optimal reference nodes placement techniques for multi-story buildings. We aim to increase accurate and precision of indoor positioning services in multi-story buildings by installing reference nodes in the most suitable locations.

Kittipob Kondee and Chutima Prommak (corresponding author) are with the School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, 30000 Thailand (e-mail: m5540174@ g.sut.ac.th, cprommak@sut.ac.th).

The rest of this paper is organized as follows. In section II, we formulate the RNs optimization model in detail. Section III presents experimental study and analysis demonstrating the optimal RN placement. Section IV presents an analysis of accuracy of the positioning systems. Finally, Section V concludes our work and provides directions for future research.

II. METHODOLOGY

We proposed a heuristic optimization algorithm based on Simulated Annealing (SA) to solve optimal placement of reference node (RNs) for indoor multi-floor positioning system. The proposed technique is called MSMR for multi-floor building (MSMR-M) which is extended from our preliminary work presented in [14]. The MSMR-M is based on SA which is a heuristic optimization technique that mathematically mirrors the vulcanization process. SA is a simple and popular method that has been applied to various optimization problems [12]. Here we apply SA to solve the optimal placement of reference nodes for indoor positioning systems in multi-floor buildings. Note that in this work the optimal placement is done each floor as a time. It is not a joint optimization in which optimal placement of all RNs is derived simultaneously. The proposed optimization formulation consists of the objective function (1) and the constraints (2) - (5). Table I defines notation used in the proposed formulation.

Objective function:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in T} \max_{j \in R} (S_{ij} P_{ij}) \tag{1}$$

Constraints:

$$S_{ij} (P_{ij} - P_T) \geq 0 \quad \forall i \in T, \forall j \in R \tag{2}$$

$$\sum_{j \in R} S_{ij} \geq N_R \quad \forall i \in T \tag{3}$$

$$S_{ij} \leq c_j \quad \forall i \in T, \forall j \in R \tag{4}$$

$$\sum_{j \in R} c_j = N_S \tag{5}$$

TABLE I
NOTATIONS

| | |
|------------------------|--|
| Sets: | |
| R | A set of candidate sites to install reference node (RNs). |
| T | A set of signal test points (STPs). |
| Decision variables: | |
| c_j | A binary {0, 1} variable that equals 1 if the RN is installed at site $j, j \in R, 0$ otherwise. |
| S_{ij} | A binary {0, 1} variable that equals 1 if the STP i is assigned to RN $j, i \in T$ and $j \in R, 0$ otherwise. |
| Constraint parameters: | |
| P_{ij} | The signal strength that a STP i receives from RN $j, i \in T$ and $j \in R$ (dBm). |
| P_T | The received signal strength threshold (dBm). |
| N_R | The minimum number of RNs recommended [5]. |
| N_S | Sufficient number of RNs. |

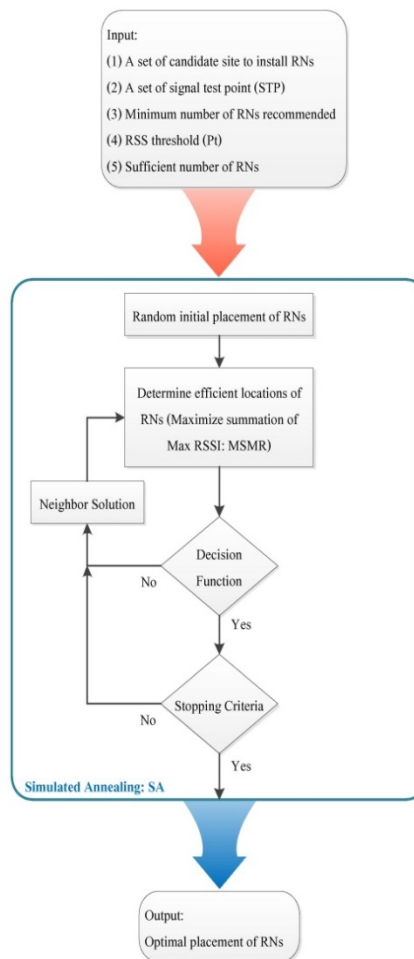


Fig. 1 The process of MSMR-M technique

The objective function (1) aims to maximizing summation of the maximum RSS at STPs or MSMR objective function. Constraint (2) is the condition for guaranteeing the quality of the radio coverage of RNs in the target service area of the building. Constraint (3) enforces that each STP must be able to communicate with at least a minimum number of RNs, specified with a parameter N_R . Constraint (4) specifies that STP i can receive signal from RN j if a RN j is installed. And constraint (5) defined the number of nodes used in the installation must have an equal sufficient number of RNs.

Fig. 1 illustrates the process of MSMR-M technique to determine the optimal placement of RNs for each floor of the multi-floor buildings. The first step involves entering the input to the Simulated Annealing algorithm (SA) [12]. Then SA starts by generating a random set of initial placement of RNs

and evaluates the cost values with objective function. Then set this as a current state.

Those locations are selected by the decision function. If not selected, the neighbor solutions will be searched by applying the constraints of the problem. The cost values of the objective function will be evaluated and be compared with that of the current state. Then the new state will be obtained. This pattern repeats until reaching the stopping criteria. Finally, we will obtain the optimal placement for RN installation.

III. IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTS

In this section, we present an implementation and experiments demonstrating performance of the proposed technique. First, in this section we will apply our proposed technique to determine optimal placement of RNs in the service area ranging over two floors of the building as described below. Then in Section IV we will analyze the positioning performance of the positioning systems obtained by our models and will compare with the systems obtained by using the uniform placement technique in [10].

In the experiment of optimal RNs placement, we considered two-story library building at Suranaree University of Technology which was used as a test bed. Size of each floor of the service area is approximately $35 \times 35 m^2$ as shown in Fig. 2 and Fig. 3. A set of candidate locations to install RNs are distributed at the same location as those of Signal Test Points (STPs) as depicted by the symbol '+' in Fig. 2 and Fig. 3. We consider different sizes of the grid spacing to study how the grid size affects the optimal solutions and the performance of the obtained indoor positioning systems. In particular, we consider the grid spacing of $2 \times 2 m^2$ and $4 \times 4 m^2$.

We implemented the system of IEEE 802.15.4 wireless transceivers using Freescale MC13224V third generation chipset with built-in ARM7TDMI processor. The antennas of wireless transceivers are the inverted F-shape antennas and operate at 2.480 GHz (i.e. channel 26 of IEEE 802.15.4 standard). The received signal strength threshold to ensure the radio communication between RNs and the target node is set to -110dBm [13] and the transmit power is set to 4 dBm [13]. In addition, a guideline of the positioning framework in [11] recommends that each STP should be able to receive signal from at least four RNs. Therefore, we set the value of N_R equals to 4. To provide sufficient coverage over the service area, we defined the value of N_S equals to 40n each floor.

Fig. 4 depicts a set of RNs which were installed within the service area. The height of RNs is at 2meters. The target node used in our experiments is a mobile node consisting of the wireless transceiver connected to a computer notebook, which is used to calculate positions of the object. The height of the wireless transceiver of the target node is 0.8meters. We implement the proposed optimization technique by using the MATLAB R2012b solver. Computations are performed on an Intel Core i5-2450M Processor 2.5GHz and 4GB of RAM.

Figs. 2 and 3 depict the optimal locations of RNs for the first and second floor of the service area, respectively (denoted by green star symbols). The figures also show the locations of RNs based on the uniform placement technique in [10]

(denoted by blue triangle symbols). In the next section, we will analyze and compare the accuracy performance of the positioning system designed by our proposed method with those design used in [10].

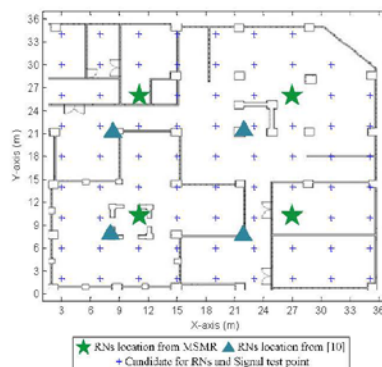


Fig. 2 1st floor of the service area

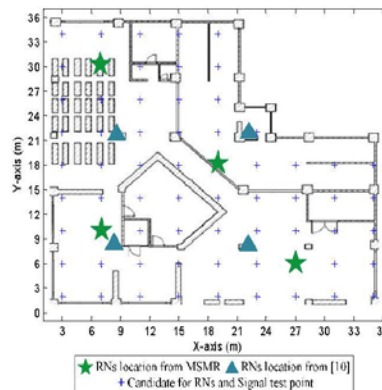


Fig. 3 2nd floor of the service area



Fig. 4 Experimental equipment in this work

International Science Index Vol:8, No:7, 2014 waset.org/Publication/9998851

IV. PERFORMANCE COMPARISON AND ANALYSIS

In this section, we present an analysis of the accuracy of the positioning systems modeled for multi-floor building using the locations of RNs as obtained in the last section.

We conducted five sets of tests to determine locations of the target node. In each set of tests, thirty locations were randomly selected as the actual locations of the target node. Then the location of the target node was determined based on the positioning systems obtained by our proposed technique compared with the other system obtained by using the uniform placement technique in [10].

Figs. 5 and 6 compare the actual locations and the estimated locations of the target node on the first and second floor of the service area, respectively (in the case of grid spacing of four meters). Figs. 7 and 8 compare the cumulative distribution function (CDF) of error distances resulting from the positioning systems for 2-story building at grid spacing of two and four meters, respectively.

We can observe that the positioning systems designed by our MSMR-M model yield the higher accuracy than other model in both situations. MSMR-M model could yield positioning accuracy at the minimum average error distances of 1.42 and 1.93 meters for the case of grid spacing two and four meters, respectively, whereas the system designed by the uniform placement technique yields the positioning accuracy at the minimum average error distances of 1.71 and 2.32 meters for the case of grid spacing two and four meters, respectively. Particularly, 90% of test using the positioning systems designed by MSMR-M model result in error distance of 2.68 and 3.30 meters at grid spacing of two and four meters, respectively whereas the other model result in error distance of 3.36 and 4.05 meters at grid spacing of two and four meters, respectively. Therefore, the optimal placement of RNs obtained by the proposed model outperforms the other technique up to 20% and 18.5% for the case of grid spacing of two and four meters, respectively.

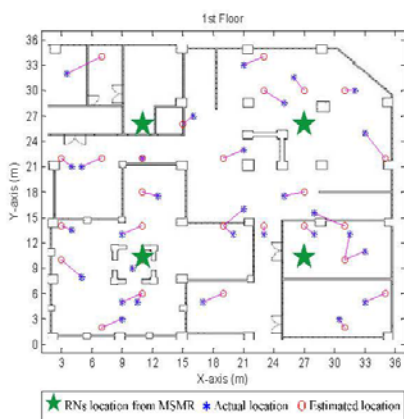


Fig. 5 Position estimation error of test 1 on 1st floor

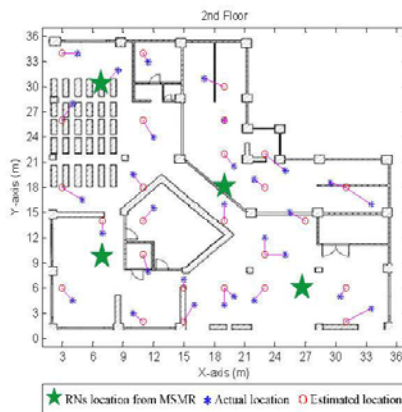


Fig. 6 Position estimation error of test 1 on 2nd floor

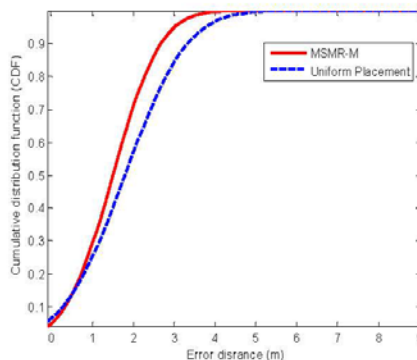


Fig. 7 CDF of error distance of the service area at grid spacing 2x2m²

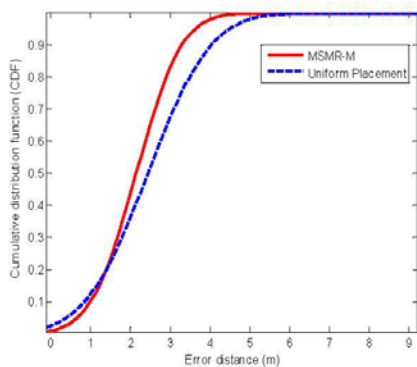


Fig. 8 CDF of error distance of the service area at grid spacing 4x4m²

V. CONCLUSION

In this paper, the optimal placement problems of reference nodes (RN) in wireless indoor positioning systems for multi-

International Science Index Vol:8, No:7, 2014 waset.org/Publication/9998851

floor building are investigated. We propose a novel mathematical formulation using a Simulated Annealing algorithm (SA). Experimental results and comparisons illustrated that the proposed models yield positioning systems that can operate at higher accuracy compared with other model. The proposed model yield the positioning accuracy at the minimum average error distances of 1.42 meters and outperform the other technique up to 20%. Our future works will consider parameters of the indoor environment. We aim to develop indoor positioning systems for multi-floor building by finding optimal locations of RNs on every floor simultaneously.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

REFERENCES

- [1] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.11, no 1, 2009, pp. 13–32.
- [2] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, November 2007, pp. 1067–1080.
- [3] Kodippili, N.S. and Dias, D. "Integration of fingerprinting and trilateration techniques for improved indoor localization," *IEEE Conference on Wireless And Optical Communications Networks (WOCN)*, September 2010, pp. 1–6.
- [4] Kim, H.S., Kim, D.R., Yang, S.H., Son, Y.H., and Han, S.K. "An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique," *Journal of Lightwave Technology*, vol.31.1, January 2013, pp. 134–144.
- [5] Yong U.L., and Kavehrad, M. "Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-hoc Wireless Network," *IEEE Transactions on Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol.58, November 2012, pp. 1176–1184.
- [6] Ali, S.F.M., and Hassan, R. "Local Positioning System Performance Evaluation with Cosine Correlation," *IEEE Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, September 2011, pp. 151–156.
- [7] Bai, M., Xue, H., Shen, W., and Ghenniwa, H. "A 3-D Indoor Location Tracking and Visualization System Based on Wireless Sensor Networks," *IEEE Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, October 2010, pp. 1584–1590.
- [8] Gansemer, S., Großmann, U., and Hakobyan, S. "RSSI-Based Euclidean Distance Algorithm for Indoor Positioning Adapted for The Use in Dynamically Changing WLAN Environments and Multi-Level Buildings," *IEEE Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, September 2010, pp. 1–6.
- [9] M. Baumach, R. Kolla and C. Mühlberger, "Beyond Theory: Development of a Real World Localization Application as Low Power WSN," *IEEE Conference on Local Computer Networks*, October 2007, pp. 872–884.
- [10] O. Baala, Y. Zheng and A. Caminada, "The Impact of AP Placement in WLAN-Based Indoor Positioning System," *International Conference on Networks*, March 2009, pp. 12–17.
- [11] K. Kaemarungsi, "Efficient Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting," *International Conference on Wireless Networks Communications and Mobile Computing*, 2005, pp. 181–186
- [12] A. Supattra, (2013). Optimal Reference Node Placement For Wireless Indoor Positioning Systems, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand
- [13] M.Kriangkrai, (2013). Development of WirelessIndoor Positioning Systems For Multi-Floor Building Using Hybrid Techniques, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand
- [14] S Aomumpai, K. Kondee, C. Prommak and K. Kaemarungsi "Optimal Placement of Reference Nodes for Wireless Indoor Positioning Systems," in 2014Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, to be published.

Optimal Placement of Reference Nodes for Wireless Indoor Positioning Systems

Supattra Aomumpai, Kittipob Kondee and Chutima Prommak[†]

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

Kamol Kaemarungsi

National Electronics and Computer Technology Center, Thailand

Abstract— Accuracy of location determination is one of the keys to success of any indoor positioning system. This performance metric is influenced by how reference nodes (RNs) are installed. However, most of existing research studies ignored the problem of optimal reference node placement and efficient system design for indoor positioning systems. In this paper, we propose an optimization technique that can be used to optimize the placements of reference nodes and improve the location determination performance. A mathematical formulation of reference node placement is developed as a *Binary Integer Linear Programming (BILP)* problem, which is an efficient approach generally applied in facility layout problems. The proposed formulation aims to minimize the number of reference nodes and search for their optimal locations in indoor positioning system. The performance study in this work is based on simulation model comparison of node placements found in the literature with the optimal node placement solutions obtained from our optimization. The results show that using optimal placement of reference nodes the indoor positioning systems can gain up to five meters of accuracy at 90% precision.

Keywords— Indoor positioning systems; Reference node placements; System design.

I. INTRODUCTION

Indoor positioning systems increasingly gain attention to become important add-ons to today's pervasive wireless technologies. The indoor positioning systems using radio frequency signals of indoor wireless networks have been suggested as alternatives where signals of *Global Positioning System (GPS)* cannot reach receivers inside buildings [1]. Compared to outdoor environment, indoor environment often does not have line-of-sight communication between reference node and receiver. The radio signal propagation is greatly influenced by multi-path effect and attenuation of various obstacles, which can degrade the accuracy of indoor positioning system. These issues created challenges in the design of the indoor positioning systems [2].

Among different radio frequency techniques used to determine indoor position such as *Angle-of-Arrival (AOA)* and *Time-of-Arrival (TOA)* measurement, the location fingerprinting technique is the simplest technique which assumes unique relationship between received signal strength (RSS) patterns called *location fingerprints* and locations [3]. It is an attractive approach because almost all wireless transceivers have built-in received signal strength

measurement capability and no other specialized hardware is required at the *mobile station (MS)*. This kind of technique has been applied to both *Wireless Local Area Network (WLAN)* and *Wireless Sensor Network (WSN)* in the literature.

Generally, the wireless indoor positioning system based on location fingerprinting technique can be deployed in two phases [4]. First, in the offline phase the location fingerprints are collected by performing a site-survey of the *received signal strength (RSS)* from multiple reference nodes. The measurement of RSS is usually performed on points or positions inside rectangular grid which covers the localization area. The RSS patterns or location fingerprints from all positions are recorded in a database called radio map. Second, in the online phase a sample of RSS pattern at a current mobile station's location is fed into a location estimation algorithm that utilizes radio map created in previous phase. An estimated location is reported by the indoor positioning system where the location accuracy is usually reported as the error distance deviated from the actual position [4].

The simplest location estimation algorithm is based on the computation of Euclidean distance between the current measured RSS patterns and all location fingerprints in the radio map. The position that associated with the fingerprint that has the shortest distance to the current sample or RSS pattern is reported as the estimated position [5]. In this research study, we will assume this type of positioning system and algorithm as baselines for our performance comparison. We will show that optimal placement of reference node can improve the accuracy performance of the system.

Thus far, there are a number of studies investigating on techniques that can locate objects inside building using either IEEE 802.15.4 wireless sensor networks or IEEE 802.11 wireless local area networks. For instance, Stoyanova et al studied factors that influence the RSS of wireless sensor network using Tmote Sky nodes [6]. They concluded that there are a number of parameters that affect the accuracy of mobile localization which are the transmitter-receiver distance, the variation among the same type of transceivers, the orientation of antenna, and the location of reference nodes. The study of Sugano et al [7] utilized RSS of ZigBee based wireless sensor network to create an indoor localization system. Yao et al [8] also studied the use of location fingerprinting technique for localization in ZigBee based wireless sensor network. The measurement of RSS

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

[†]corresponding author

distribution in form of *Probability Density Function (PDF)* at the location of cluster-head of wireless sensor network was studied and used in standard hypothesis testing for the proposed localization system of [9].

The research work in [10] studied the impacts of *access points (APs)* placement on localization in WLAN based indoor positioning system. A related work in [11] proposed an algorithm that required strategic placement of nodes in each room and suggested a new range-free solution based on simple RSSI measurement. From the system design perspective, Kaemarungsi [4] suggested a framework for efficiently design an indoor positioning system based on location fingerprint. A number of system parameters that influence positioning performance were identified such as grid spacing, number of reference nodes, path loss exponent, and standard deviation of RSS. Recently, the impact of reference node placement in wireless indoor positioning system was presented in [3].

Based on our literature review above, existing studies are interested in the impacts of reference node placement such as [3], while other studies [6], [10], and [4] are only focused on the problem of efficiently design the networks of positioning system. However, they did not consider the optimal reference node placement in order to enhance the localization performance of the indoor positioning systems. An example of wireless sensor network design problem that used *Binary Integer Linear Programming (BILP)* in determining the placement of relay nodes was reported in [12]. In this work, we will apply the BILP to the design of indoor positioning system where the reference nodes of wireless network (both WLAN and WSN) are optimally placed in order to provide better localization performance. Our main goal is to find a design with minimum number of required reference nodes while maintaining maximum level of RSS possible over the positioning area.

The organization of this paper is as follows. Section II described the problem definition and problem formulation. Section III presents experimental study and analysis demonstrating the optimal RN placement. Section IV presents an analysis of the accuracy of the positioning systems. Finally, Section V provides conclusion and guidelines for future research work.

II. PROBLEM DEFINITION AND FORMULATION

In this section, we will describe our mathematical models for optimal placement of *reference nodes (RNs)* in wireless indoor positioning systems. In particular, we consider the positioning systems based on the location fingerprinting. In such system, RNs are wireless transceivers that are installed within the target service area of the positioning systems and *signal test points (STPs)* are locations where the received signal strength from RNs is recorded to create a fingerprinting database. Some RNs should be able to respond to a signal inquiry from a target node of which a location needed to be determined. Therefore, RNs should have sufficient coverage over the service area. That is the number of reference nodes should be sufficient to cover the design area and research results presented in [3] recommended that each STP should be

able to receive signal from at least four RNs in order to achieve good positioning performance.

Incorporating a recommended framework presented in [3], we have developed mathematical models for optimal placement of RNs for wireless indoor positioning systems using a BILP. It is an efficient approach widely applied in the facility layout problems due to its low complexity and requiring short time to solve the problem [13]. Specifically, we have developed two models for optimal placement of RNs in wireless indoor positioning systems which are the minimize-number of RN model and the maximize-sum of maximum RSS model. Table I defines notations used in the proposed models.

A. Minimize-Number of RN Model

We denote this model as *MNR*. The proposed model aims to minimize the number of RNs and determine the optimal locations to install them in the target service area of the wireless indoor positioning systems. This can be written as the objective function (1). The problem involves selecting locations from a set of predetermine candidate location such that the obtained wireless indoor positioning system meets the requirements recommended in [3] such as the level of signal quality and the number of RNs required to provide high accuracy in positioning systems. These requirements are incorporated into the model via a set of constraint (2) – (5).

MNR objective function:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in R} c_j \quad (1)$$

Constraints:

$$\sum_{j \in R} c_j \geq N_R \quad (2)$$

$$S_{ij}(P_{ij} - P_T) \geq 0 \quad \forall i \in T, \forall j \in R \quad (3)$$

$$S_{ij} \leq c_j \quad \forall i \in T, \forall j \in R \quad (4)$$

$$\sum_{j \in R} S_{ij} \geq N_R \quad \forall i \in T \quad (5)$$

TABLE I. NOTATIONS

| Sets: | |
|----------------------|---|
| R | A set of candidate sites to install reference node (RNs) |
| T | A set of signal test points (STPs) |
| Decision variables: | |
| c_j | A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the RN is installed at site j , $j \in R$; 0 otherwise |
| S_{ij} | A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP i is assigned to RN j , $i \in T$ and $j \in R$; 0 otherwise |
| Constant parameters: | |
| P_{ij} | The signal strength that a STP i receives from RN j , $i \in T$ and $j \in R$ |
| P_T | The received signal strength threshold |
| N_R | The minimum number of RNs recommended |
| N_{MNR} | An optimal number of RNs obtained from MNR model |

The objective function (1) aims to minimize the number of RNs needed for the specified service area of the indoor positioning system. Constraint (2) requires that the number of RNs installed in the indoor positioning system must be at least equal to N_R . To ensure the radio coverage of RNs in the target service area, two conditions are imposed in constraint (3) and (4). Constraint (3) states that STP i is in coverage of RN j if the signal strength received at STP i from RN j (P_{ij}) is greater than the threshold P_T . Constraint (4) specifies that STP i can receive signal from RN j if a RN j is installed. Constraint (5) enforces that each STP must be able to communicate with at least a minimum number of RNs, specified with a parameter N_R .

B. Maximize-Sum of Maximum RSS Model

We denote this model as MSMR. The proposed model aims to determine the optimal locations to install RNs so that we can achieve high quality of radio signal propagation from RNs across the target service area of the wireless indoor positioning systems. This can be mathematically modeled as maximizing summation of the maximum RSS at STPs as written in an objective function (7). Incorporating requirements of the wireless indoor positioning systems as suggested in [3], constraints (3) – (5) described earlier are also applied in this model whereas constraint (2) is replaced by (8) which enforces the number of RNs equal to N_{MNR} , an optimal number of RNs obtained from the MNR model.

MSMR objective function:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in T} \max_{j \in R} (S_{ij}, P_{ij}) \quad (7)$$

Constraints:

$$\sum_{j \in R} c_j = N_{MNR} \quad (8)$$

III. EXPERIMENT ON OPTIMAL RN PLACEMENT

In this section we present experimental study and analysis demonstrating the optimal RN placement using the proposed MNR and MSMR models. We aim to compare the positioning systems designed by our models with other systems reported in [14] and [15]. First, in this section we will apply our models to determine optimal placement of RNs in two service environments described below. Then in Section IV we will analyze the positioning performance of the positioning systems obtained by our models and will compare with the positioning performance of the systems presented in [14] and [15].

In the experiment of optimal RN placement, we consider two environments of the wireless indoor positioning systems which were used in the study of [14] and [15]. The first environment from [14] considers the service area of size $63\text{m} \times 10\text{m}$ as shown in Fig. 1. In this case, a set of STPs with grid spacing of three meters and a set of 43 candidate locations to install RNs are located along the building as depicted in Fig. 1. The second environment from [15] considers the service area of size $23\text{m} \times 37\text{m}$ as shown in Fig. 2. In this case, a set of STPs is also distributed at grid spacing of three meters and a

set of 45 candidate location to install RNs are selected uniformly over the service area as depicted in Fig. 2.

The wireless transceivers with IEEE 802.15.4 standards are applied in our experiments. The received signal strength threshold to ensure the radio communication between RNs and the target node (P_T) is set to -100 dBm [16] and the transmit power is set to 18 dBm (60mW) [14]. In addition, a guideline of the positioning framework in [3] recommends that each STP should be able to receive signal from at least four RNs. Therefore, we set the value of N_R equals to 4.

We apply the path-loss model written in (6) to simulate the signal strength that STP i receives from RN j (P_{ij}). This path-loss model considers obstruction and building materials in the signal attenuation [17].

$$P_{ij}(\text{dBm}) = P_t + L_0 - 10\alpha \log(d_{ij}) - \sum m_{type} w_{type} + X \quad (6)$$

where P_t is the transmitted power (in dBm), L_0 is the free space loss at distance one meter, α is the path-loss exponent. For this path-loss model which considers the building materials, $\alpha = 2$. d_{ij} is the distance between STP i and RN j in meters, and m_{type} refers to the number of partition of that type and w_{type} refers to loss in dB attributed to such partition. X is a random variable with a distribution that depends on the fading component. In this study, we apply the log-normal distribution to the random variable X . We conducted preliminary signal measurements using wireless transceivers with IEEE 802.15.4 standards and obtained mean value of the received signal strength $\mu = 0$ and the standard deviation $\sigma = 5.678$ dBm.

We apply MNR model to find minimum number of RNs (N_{MNR}) required for both service environments described

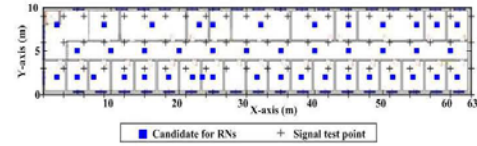


Fig. 1. The first service area of our experiments

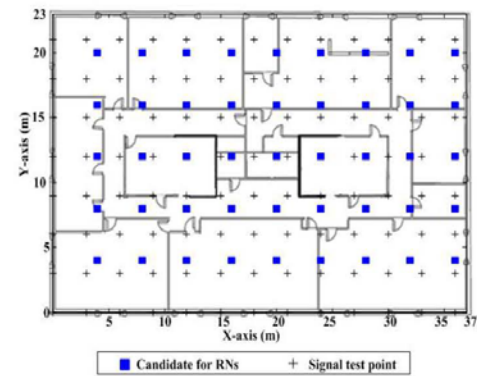


Fig. 2. The second service area of our experiments

earlier. Next we apply MSMR model to determine optimal locations to install RNs. In solving MSMR model, the input parameters include the value of N_{MNR} obtained from MNR model, a set of candidate locations to install RNs (R), a set of STPs (T), a set of simulated signal strength (P_{s_i}) and a received signal strength threshold (P_T). We implement the problems with the ILOG-OPL development studio and solve them with CPLEX Optimization Studio Academic Research 12.2 optimization solver. Computations are performed on an Intel Centrino Duo Processor 2.0 GHz and 2 GB of RAM.

Fig. 3 and Fig. 4 depict the optimal number and locations of RNs for the first and second service environment compared with those deployed in [14] and [15], respectively. In Fig. 3 we can see that our models require the use of four RNs whereas the deployment in [14] uses three RNs. In Fig. 4 the positioning system designed by our models deploys four RNs which are the same as that used in [15]. However, the locations of RNs obtained by our models are different from those locations in [15]. In the next section, we will analyze and compare the positioning performance of the positioning system designed by our models with those deployed in [14] and [15].

IV. ANALYSIS OF POSITIONING PERFORMANCE

In this section, we will present an analysis of the accuracy of the positioning systems modeled in the last section. In order to test the positioning systems based on the location fingerprinting, first in the offline phase we need to create a fingerprinting database. The radio map of the received signal strength at STPs is simulated by using the path-loss model as written in (6). Then in the online phase, during which the location of the target node is determined, the sample signal strength that the target node receives from RNs is also

simulated by using the same path-loss model as written in (6) but this time incorporating a sample standard deviation of the log-normal distribution. Then the Euclidean distance technique [5] is applied to determine a location of the target node by matching the target's sampled signal strength with those signal strength in the fingerprinting database.

We conducted three sets of tests to determine locations of the target node. In each set of tests, twenty locations were randomly selected as the actual locations of the target node. Then the location of the target node was determined based on the positioning systems obtained by our models compared with other systems deployed in [14] and [15]. Fig. 5 and Fig. 6 compare the actual locations and the estimated locations of the target node in the first and second service area, respectively. The figures show positioning results obtained by using the positioning systems designed by the proposed MSMR model.

Table II and Table III summarize the positioning performance in term of the error distance from the three sets of tests and compare results from the positioning systems designed by the proposed MSMR model with those from the positioning system deployed in [14] and [15], respectively. We can observe that the positioning systems designed by MSMR model yield the highest accuracy. The optimal placement of RNs obtained from the proposed models can reduce the positioning error up to 18% and 16% compared with the positioning system deployed in [14] and [15], respectively.

Different environments of positioning systems yield different accuracy of the location determination. Fig. 7 and Fig. 8 depict the *Cumulative Density Function (CDF)* of the error distances resulting from the positioning systems designed by the proposed MSMR model and those from the positioning systems deployed in [14] and [15], respectively.

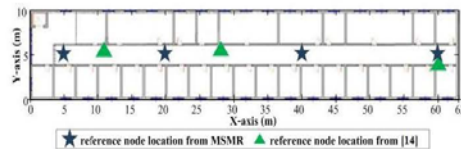


Fig. 3. Comparison of RN placement in the first service area

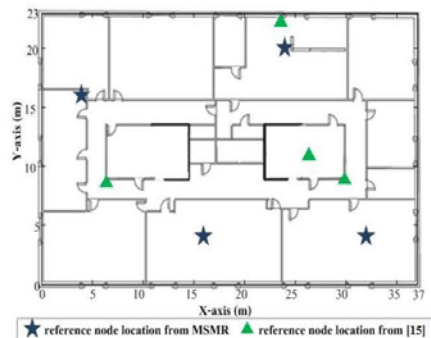


Fig. 4. Comparison of RN placement in the second service area

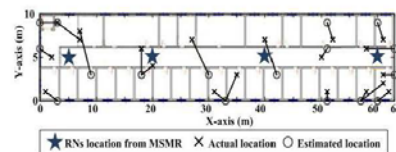


Fig. 5. Position estimation error of test 1 in the first service area

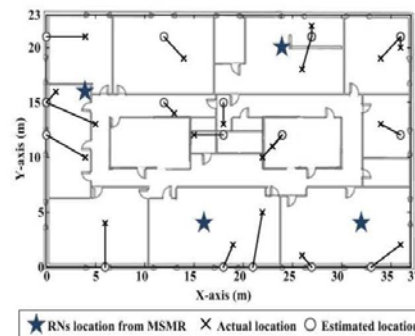


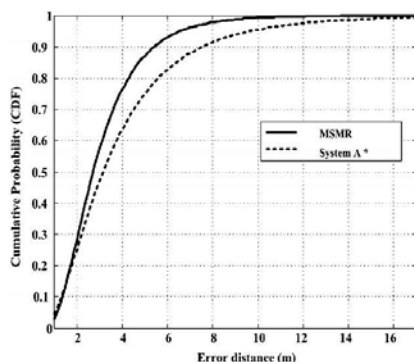
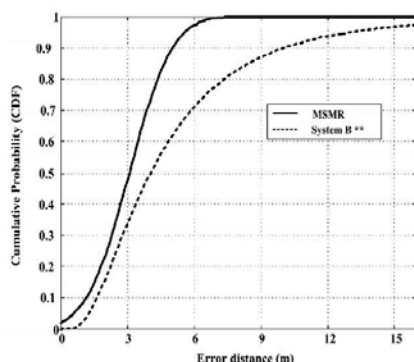
Fig. 6. Position estimation error of test 1 in the second service area

TABLE II. ACCURACY COMPARISON OF THE FIRST SERVICE AREA

| Experiment | MSMR | | | Positioning system deployed in [14] | | |
|------------|----------------|-------------|--------|-------------------------------------|-------------|--------|
| | Min, Max (m,m) | Average (m) | SD (m) | Min, Max (m,m) | Average (m) | SD (m) |
| Test 1 | 1, 5.38 | 2.99 | 1.35 | 1, 15 | 3.56 | 2.95 |
| Test 2 | 1, 7.07 | 3.64 | 1.62 | 1.41, 17 | 4.86 | 3.74 |
| Test 3 | 1, 6.08 | 2.69 | 1.58 | 1, 17.46 | 3.86 | 4.18 |

TABLE III. ACCURACY COMPARISON OF THE SECOND SERVICE AREA

| Experiment | MSMR | | | Positioning system deployed in [15] | | |
|------------|----------------|-------------|--------|-------------------------------------|-------------|--------|
| | Min, Max (m,m) | Average (m) | SD (m) | Min, Max (m,m) | Average (m) | SD (m) |
| Test 1 | 1, 5.39 | 2.76 | 1.34 | 1.4, 13.15 | 5.66 | 4.1 |
| Test 2 | 1.41, 6.1 | 3.61 | 1.61 | 1.4, 13.15 | 4.87 | 3.38 |
| Test 3 | 0, 5.1 | 2.88 | 1.52 | 1, 16.28 | 4.93 | 3.7 |

Fig. 7. CDF of error distance of the first service area
* System A means the positioning deployed in [14]Fig. 8. CDF of error distance of the second service area
** System B means the positioning deployed in [15]

We can see that the positioning systems designed by MSMR model yield higher positioning accuracy, i.e. less error distances, compared with those of the other systems in [14] and [15]. Particularly, 90% of tests using the positioning system designed by MSMR model result in error distance less than 5m whereas the other systems in [14] and [15] result in error distance up to 7.5m and 10m, respectively.

V. CONCLUSION

In this paper, the optimal placement problems of *reference nodes (RNs)* in wireless indoor positioning systems are investigated. We propose a novel mathematical formulation using a *Binary Integer Linear Programming (BILP)* approach that can determine optimal number and locations to install RNs in the target service area of the indoor positioning system. The proposed models incorporate essential factors suggested in the deployment framework for wireless indoor positioning systems. Experimental results and comparisons illustrated that the proposed models yield positioning systems that can operate at higher precision compared with other positioning systems. Our ongoing works will further investigate performance and effectiveness of the proposed models. Specifically, we are interested in studying the effects of increasing number of RNs on the precision of wireless indoor positioning systems.

REFERENCES

- [1] G. M. Djukic, and R. E. Richton, "Geolocation and assisted GPS," IEEE Computer, California USA, vol. 34, pp. 123-125, February 2001.
- [2] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, pp. 13-32, 2009.
- [3] S. Aomumpai and C. Prommak, "On the Impact of Reference Node Placement in Wireless Indoor Positioning Systems", World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 60, pp. 449-453, 2011
- [4] K. Kaemarungsi, "Efficient design of indoor positioning systems based on location fingerprinting," International Conference on Wireless Networks Communications and Mobile Computing, 2005, pp.181-186.
- [5] K. Kaemarungsi, and P. Krishnamurthy, "Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting," Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, March 2004, pp. 1012 - 1022.
- [6] T. Stoyanova, F. Kerasiotis, A. Prayati, and G. Papadopoulos, "Evaluation of Impact Factors on RSS Accuracy for Localization and Tracking Applications in Sensor Networks," Telecommunication System, July 2009, pp. 235-248.
- [7] M. Sugano, T. Kawazoe, Y. Ohta, and M. Murata, "Indoor Localization System Using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network Based on ZigBee Standard," Int. Conf. on Wireless Network and Emerging Technologies, July 2006.
- [8] Q. Yao, F. Wang, Fellow, H. Gao, K. Wang, and H.Zhao, "Location Estimation in ZigBee Network Based on Fingerprinting," IEEE Int. Conf. on Vehicular Electronics and Safety, pp. 1-6, December 2007.
- [9] I. Ch. Paschalidis, and D. Guo, "Robust and Distributed Stochastic Localization in Sensor Networks: Theory and Experimental Results," ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 5, pp. 1-22, November 2009.
- [10] O. Baala, Y. Zheng, and A. Caminada, "The Impact of AP Placement in WLAN-Based Indoor Positioning System," Int. Conf. on Networks, 2009, pp. 12-17.
- [11] O. E. Segou, S. A. Mitilneos, and S. C.A. Thomopoulos, "DALE: A Range-Free, Adaptive Indoor Localization Method Enhanced by Limited Fingerprinting," Int Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, September 2010.

- [12] A. Bari, D. Teng, and A. Jaekel, "Optimal relay node placement in hierarchical sensor networks with mobile data collector," *Computer Communications and Networks Proceedings*, 2009, pp. 1-6.
- [13] W. L. Winston and J. B. Goldberg, *Operations research: applications and algorithms*. University of California: Thomson Brooks/Cole, 2004.
- [14] D. Sánchez, M. A. Quintana, and J. L. Navarro, "WLAN Location Determination Using Probability Distributions with Search Area Reduction via Trilateration," *International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 2009, pp. 328-333.
- [15] K. Kaemarungsi, and P. Krishnamurthy, "Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting," *Proceedings of the First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, 2004, pp. 14-23.
- [16] Maxstream Incorporation, 2006, July, 12. "IEEE 802.15.4 OEM RF Modules." Available: <http://www.MaxStream.net>
- [17] K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, *Principles of Wireless Networks*. NJ USA: Prentice Hall, 2001, pp. 55-57.

ประวัติผู้เขียน

นายกิตติภพ คนดี เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 5 มกราคม พุทธศักราช 2533 ที่จังหวัดจันทบุรี เป็นบุตรของ นายสุธี คนดี และนางขจีนุช คนดี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากเทศบาลจันทบุรี (มารดาพิทักษ์) อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี ในปีการศึกษา 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปีการศึกษา 2551 ซึ่งในปีการศึกษา 2554 ได้ทำโครงการเรื่อง การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะไอพีทรานฟิสิกของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูติมา พรหมมาก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2554 จากนั้นได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารหลายชั้น จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้ผู้วิจัยมี ความรู้ และความเข้าใจทางด้านระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารเป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ได้แก่ งานประชุมวิชาการนานาชาติ ครั้งที่ 11 International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2014) ณ โรงแรมสีมาธานี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 14-17 พฤษภาคม 2557 งานประชุมวิชาการนานาชาติ World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET) สวิตเซอร์แลนด์ วันที่ 30-31 กรกฎาคม 2557 และงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Electrical Engineering Congress (IEECON 2015) จังหวัดภูเก็ต วันที่ 18-20 มีนาคม 2558 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ก