การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

นางสาวสุจิตรา โหมดหิรัญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

OPTIMAL RELAY STATION PLACEMENT FOR EFFICIENT ENERGY UTILIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Sujitra Modhirun

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 2010

การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย
ตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ชุติมา พรหมมาก)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)
กรรมการ

_____

(อ. ดร.วุฒิ ด่านกิตติกุล)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุจิตรา โหมดหิรัญ : การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (OPTIMAL RELAY STATION PLACEMENT FOR EFFICIENT ENERGY UTILIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก, 110 หน้า.

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การเฝ้าตรวจฟาร์มเกษตร การประยุกต์ใช้งานภายในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม และการควบคุมทางการทหาร สำหรับหน้าที่พื้นฐานของการใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย คือ การรวบรวมข้อมูลทางสิ่งแวดล้อม โดยโนดตรวจรู้จะกระจายตัวอยู่ในพื้นที่ที่เราสนใจ สถานีฐานถูกนำมาใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่รับมาจากโนดตรวจรู้ โนดตรวจรู้อาจจะส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานโดยตรงหรืออาจจะส่งผ่านโนดตรวจรู้ตัวอื่น ๆ ซึ่งโดยปกติแล้วโนดตรวจรู้จะทำงานด้วยการใช้แหล่งพลังงานที่จำกัด เช่น แบตเตอรี่ ซึ่งในการเปลี่ยนหรือชาร์ตประจุเข้าไปใหม่อาจต้องใช้ต้นทุนสูงดังนั้นจึงได้มีการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้เพื่อทำหน้าที่รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐาน ซึ่งทำให้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่จำกัดนั้นมีเพียงพอตลอดอายุการใช้งานเครือข่ายในการปฏิบัติงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายภายใต้พลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้นั้น ในทางปฏิบัติเราจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านต่าง ๆ เช่น งบประมาณที่จำกัด พลังงานที่จำกัด และรัศมีในการสื่อสารระหว่างโนดที่อยู่ภายในเครือข่าย เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ในการออกแบบได้พิจารณาการป้องกันการสูญเสียการไหลของข้อมูลและต้นทุนในการออกเครือข่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหาในการกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดด้วยการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุดและหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม ซึ่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดยังรับประกันการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ที่อยูภายในเครือข่ายและรับประกันการปฏิบัติงานของเครือข่ายในช่วงเวลาที่กำหนดให้ได้ โดยมีการพิจารณาการส่งข้อมูลแบบหลายโนดและการออกแบบเครือข่ายในงานวิจัยนี้ยังสามารถลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มและใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE ในการหาคำตอบของปัญหา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

SUJITRA MODHIRUN : OPTIMAL RELAY STATION PLACEMENT FOR EFFICIENT ENERGY UTILIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHUTIMA PROMMAK, Ph.D., 110 PP.

WIRELESS SENSOR NETWORKS/SENSOR NODE/RELAY STATION/ENERGY CONSUMPTION

Wireless Sensor Networks (WSNs) have become potential solutions for a wide range of applications such as farm monitoring, building and factory management, and military controls. Gathering environmental information is a common function that makes use of WSNs, in which the Sensor Nodes (SNs) are deployed in the sensing field and the Base Station (BS) is used to collect and analyze the sensing data. SNs send data to BS directly or indirectly via other intermediate SN(s). SNs usually operate by using limited energy sources such as batteries. It may be undesirable to replace or recharge SNs due to high maintenance cost. In this case, Relay Stations (RSs) are deployed to receive and forward data from SNs to BS so that the energy-limited SNs can live for a desired period of the network lifetime. In order to operate WSNs under efficient energy utilization of SNs, we need effective network design approaches considering practical issues such as limitation of network cost, energy, and radio communication range.

This research proposes a novel WSN design approach, accounting for the flow conservation and the network cost consideration in the network design process. Specifically, we solved the RS placement and assignment problem for WSNs with

the objective function to minimize the number of RSs and find optimal locations to install them so that the radio communication between nodes in the network and the required network operation period can be guaranteed. The proposed WSN design problem is formulated as Integer Linear Programming (ILP) models and solved by the ILOG OPL IDE.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2010 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำคำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑิพย์พา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา และอาจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

สุจิตรา โหมดหิรัญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 สมมติของการวิจัย 3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น 3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย 4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน 4
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย 4
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย 5
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 5
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล 5
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล 5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ 5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและความรู้พื้นฐานเครือข่ายตรวจจู้ไร้สาย 7
2.1 กล่าวนำ 7
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมาและนวัตกรรมของงานวิจัยนี้ 10
2.4 มาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 11
2.4.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4 11
2.4.2 ชั้นกายภาพ 12
2.4.3 ชั้นควบคุมการเข้าใช้สื่อ 14
2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 15
2.5.1 ส่วนประกอบของโนดตรวจรู้ 16
2.5.2 โครงสร้างทางกายภาพของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 20
2.5.3 สถานีถ่ายทอด 22
2.6 แบบจำลองการสูญเสียจากระยะทางอย่างง่าย 24
2.7 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ 26
2.7.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง 27
2.7.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ 28
2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 29
2.9 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 31
3 แนวคิดและเทคนิคในการออกแบบวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 34
3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 34
3.2 การกำหนดปัญหาของการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 35
3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ 36
3.4 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 42
3.5 ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้
โปรแกรม ILOG OPL IDE 46
**4 การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ** 52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1 การออกแบบเครือข่ายโดยมีการเพิ่มตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ 53
4.2 การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเครือข่ายเพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งที่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด 61
4.3 การวิเคราะห์ผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและผลกระทบทางด้านพลังงานเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน 73
4.4 การเปรียบเทียบการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยใช้วิธีการออกแบบที่แตกต่างกัน 84
4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของการใช้พลังงานในทางปฏิบัติและในทางทฤษฎี 93
5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ 95
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 95
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 96
5.3 งานวิจัยในอนาคต 96
รายการอ้างอิง 97
ภาคผนวก 99
ภาคผนวก ก. ความซับซ้อนของปัญหา 99
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 102
ประวัติผู้เขียน 110

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ 25

3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่าย 41

3.2 การแปลงสมการคณิตศาสต์องโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นรูปแบบคำสั่ง ในโปรแกรม ILOG OPL IDE 45

3.3 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบเครือข่ายและ จำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด 47

4.1 จำนวนสถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งในพื้นที่ทดสอบในหัวข้อ 4.1 57

4.2 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย ค่าเฉลี่ยของพลังงานโนดตรวจรู้ แต่ละโนดใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 60

4.3 ค่าเฉลี่ยของพลังงานโนดตรวจรู้แต่ละโนดที่เหลืออยู่ พลังงานที่เหลือมากที่สุด และน้อยที่สุดของโนดตรวจรู้ เปอร์เซ็นต์ของจำนวนโนดตรวจรู้ ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล 60

4.4 จำนวนสถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งในพื้นที่ทดสอบในหัวข้อ 4.2 68

4.5 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไป และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 68

4.6 ค่าเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 2 3 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไป และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 68

4.7 ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ค่าเฉลี่ยพลังงานโนดตรวจรู้แต่ละโนด ที่เหลืออยู่ พลังงานที่เหลือมากที่สุดและน้อยที่สุดของโนดตรวจรู้ เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนโนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล 69

4.8 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น 73

4.9 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งและพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในเครือข่าย เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างกัน 77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.10 พลังงานสูงสุดและต่ำสุดที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 78
4.11 พลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่ายและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 79
4.12 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน 84
4.13 เปรียบพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานที่ถูกใช้ไปสูงสุดและต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการใช้พลังงานและจำนวนของโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้ เมื่อใช้วิธีการออกแบบที่แตกต่างกัน 90
4.14 อายุการใช้งานของเครือข่ายจากทฤษฎี งานวิจัยที่ผ่านมา การทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดและเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานของเครือข่าย 94
ก.1 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบเครือข่ายและจำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การจัดสรรช่องความถี่ในย่าน 2.4 GHz 13
2.2 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูล 14
2.3 โครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 16
2.4 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ของเครือข่ายไร้สาย 17
2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบเมช 21
2.6 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบสตาร์ 22
2.7 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 23
2.8 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ 27
3.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE 42
3.2 Data file editing area 43
3.3 Setting file editing area 44
3.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ประกอบด้วย 1 สถานีฐาน โนดตรวจรู้ 5 โนด และตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 6 สถานี 47
3.5 สมการคณิตศาสตร์ในโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE 48
3.6 อินพุตของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE 49
3.7 เอาต์พุตจากโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE 51
4.1 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (BS=1, SN=30) 55
4.2 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 30 ตำแหน่ง 55
4.3 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 50 ตำแหน่ง 56
4.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 99 ตำแหน่ง 56
4.5 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.6 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 17 โนด 58
4.7 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 16 โนด 59
4.8 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 13 โนด 59
4.9 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด ครั้งที่ 1 61
4.10 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด ครั้งที่ 2 62
4.11 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด ครั้งที่ 3 62
4.12 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด ครั้งที่ 1 63
4.13 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด ครั้งที่ 2 63
4.14 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด ครั้งที่ 3 64
4.15 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ครั้งที่ 1 64
4.16 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ครั้งที่ 2 65
4.17 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ครั้งที่ 3 65
4.18 การเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาด 30 โนด 67
4.19 การเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาด 50 โนด 67
4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 โนดโดยทำการสุ่มตำแหน่ง 3 ครั้ง 70
4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โนดโดยทำการสุ่มตำแหน่ง 3 ครั้ง 71
4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 80โนด โดยทำการสุ่มตำแหน่ง 3 ครั้ง 71
4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนด โดยพิจารณาการสุ่มตำแหน่งครั้งที่ 2 72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.24 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 โนด สำหรับการใช้ฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน 80
4.25 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โนด สำหรับการใช้ฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน 81
4.26 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่ายขนาด รู้ 80 โนด สำหรับการใช้ฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน 81
4.27 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี MERP1 ซึ่งมีจำนวนโนดตรวจรู้
ในเครือข่ายแตกต่างกัน 82
4.28 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี MERP2 ซึ่งมีจำนวนโนดตรวจรู้
ในเครือข่ายแตกต่างกัน 82
4.29 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี RPAP ซึ่งมีจำนวนโนดตรวจรู้
ในเครือข่ายแตกต่างกัน 83
4.30 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี RPAP โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 17 สถานี 86
4.31 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี Uniform โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 9 สถานี 87
4.32 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี Uniform โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 16 สถานี 87
4.33 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี Uniform โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 25 สถานี 88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.34 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี CM โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 9 สถานี 88
4.35 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี CM โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 17 สถานี 89
4.36 ผลจากการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี CM โดยทำการติดตั้ง
สถานีถ่ายทอด 25 สถานี 89
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโนดที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้
เมื่อใช้วิธี CM และ Uniform ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 91
4.38 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โนด เมื่อใช้วิธี CM RPAP และ MERP2
ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 92

บทที่ 1
บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) เป็นเครือข่ายที่ใช้เฝ้าตรวจและส่งข้อมูลที่เก็บสะสมไว้ให้กับตัวประมวลผล ซึ่งในปัจจุบันเครือข่ายประเภทนี้ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในทางการแพทย์จะใช้โนดตรวจรู้ในการเก็บบันทึกข้อมูลทางร่างกายของคนไข้ เช่น อุณหภูมิของร่างกาย จังหวะการเต้นของหัวใจ ในทางการทหารจะใช้ในการตรวจจับระเบิดหรือเก็บข้อมูลทางด้านสภาพแวดล้อมในบริเวณเขตชายแดน เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยของ Sadagopan, N., and Krishnamachari, B. (2000) ได้กล่าวถึงการนำประโยชน์ของโนดตรวจรู้มาใช้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง เช่น ในป่าทึบซึ่งเป็นบริเวณที่เข้าไปสำรวจได้ยากจึงทำให้การเฝ้าระวังไฟป่าใช้เวลานานและทำได้ยาก รวมถึงในกรณีที่ฝนตกหนักจึงจำเป็นต้องวัดระดับน้ำในแม่น้ำเพื่อเป็นการแจ้งเตือนเหตุอุทกภัย เป็นต้น เนื่องจากโนดตรวจรู้มีขนาดเล็ก ราคาถูก ทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และยังมีความเที่ยงตรงอีกด้วย จึงเหมาะแก่การเก็บสะสมข้อมูลที่เราเฝ้าตรวจ หลังจากเก็บสะสมข้อมูลแล้วจะทำการส่งต่อข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผล ซึ่งในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีข้อจำกัดทางด้านพลังงาน ซึ่งแสดงให้เห็นในงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) ได้มีการวัดสมรรถนะของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยวัดจากอายุการใช้งานของโนดตรวจรู้ ความจุของการส่งข้อมูล เป็นต้น

โครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบไปด้วย โนดตรวจรู้ (Sensor Node : SN) มีหน้าที่ชี้ทิศทางและสะสมข้อมูลที่เราสนใจและส่งข้อมูลนั้นให้กับสถานีถ่ายทอด (Relay Station : RS) หรือส่งให้กับสถานีฐาน (Base Station : BS) สำหรับสถานีถ่ายทอดเปรียบเสมือนเป็นสถานีฐานที่ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และทำการขยายสัญญาณที่รับได้หลังจากนั้นจะทำการส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐาน ซึ่งทำให้การส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับโนดตรวจรู้จะใช้พลังงาน

ในการส่งข้อมูลน้อยลง ในส่วนของสถานีฐานจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้หรือสถานีถ่ายทอดแล้วทำการส่งต่อข้อมูลให้ตัวประมวลผลเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาวิธีการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ โดยหัวข้องานวิจัยที่ได้รับความนิยม คือ การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐานและการหาการเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ จากงานวิจัยของ Younis, M., Bangad, M., and Akkaya, K., (2003); Edoardo, S., and Biagioni, G. (2003) ได้ทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐาน โดยการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานให้อยู่ใกล้กับโนดตรวจรู้มากที่สุด เพื่อลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน สำหรับตัวอย่างหัวข้องานวิจัยที่ให้ความสำคัญกับการหาเส้นทางที่เหมาะสม คือ งานวิจัยของ Luo, J., and Hubaux, J.P. (2005); Ang Z., Tan, H.P., Winston,. K., and Seah, G. (2009) ซึ่งได้เสนอเทคนิคการหาเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยใช้อัลกอริธึมในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งเส้นทางที่สั้นที่สุดจะส่งผลให้การใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ลดลง ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานมากขึ้นและได้ออกแบบเครือข่ายภายใต้เงื่อนไขพลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้ แต่จะเห็นว่างานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้พิจารณาการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งสถานีถ่ายทอดจะทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ซึ่งจะทำให้เป็นการประหยัดพลังงานของโนดตรวจรู้ซึ่งสถานีถ่ายทอดที่นำมาใช้ออกแบบนี้จะถือว่าไม่มีข้อจำกัดทางด้านพลังงานในการส่งข้อมูลเหมือนกับโนดตรวจรู้

ดังนั้นงานวิจัยที่จะนำเสนอนี้ ได้มุ่งพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขด้านพลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดยังเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อช่วยประหยัดพลังงานของโนดตรวจรู้ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1.2.3 เพื่อศึกษาและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ เป็นต้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 โนดตรวจรู้จะติดต่อกับโนดตรวจรู้อื่นได้ก็ต่อเมื่อได้รับความแรงของสัญญาณจากโนดนั้น ๆ ต้องมากค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ

1.3.2 โนดตรวจรู้จะติดต่อกับสถานีถ่ายทอดได้ก็ต่อเมื่อความแรงของสัญญาณที่รับได้ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ

1.3.3 โนดตรวจรู้จะติดต่อกับสถานีฐานได้ก็ต่อเมื่อความแรงของสัญญาณที่รับได้ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ

1.3.4 สถานีถ่ายทอดมีพลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานตลอดอายุการใช้งานเครือข่าย

1.3.5 สถานีถ่ายทอดสามารถส่งข้อมูลให้สถานีฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 รู้ถึงตำแหน่งการติดตั้งของโนดตรวจรู้

1.4.2 ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ ณ. โนดตรวจรู้ สถานีฐานและสถานีถ่ายทอดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ

1.4.3 อัตราเร็วการสร้างข้อมูลของโนดตรวจรู้เป็นค่าคงที่

1.4.4 พลังงานของโนดตรวจรู้แต่ละตัวมีค่าจำกัด

1.4.5 พลังงานในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ปรับค่าได้ตามระยะห่างจากภาครับ

1.4.6 พลังงานในการรับข้อมูลของโนดตรวจรู้เป็นค่าคงที่

1.4.7 อายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นค่าคงที่

1.4.8 ใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming : ILP) ในการกำหนดปัญหา

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายรวมถึงทฤษฎีการรับและส่งข้อมูล

1.5.2 กำหนดข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการตัดสินใจในการหาตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่เหมาะสม

1.5.3 ใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

3) ศึกษาวิธีการวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

4) ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

5) ศึกษาเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อใช้ในการวางแผนเครือข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

6) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อใช้ในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยพิจารณาข้อจำกัดทางด้านพลังงาน

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) กำหนดวัตถุประสงค์และเงื่อนไขในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

3) กำหนดปัญหาและพัฒนาสมการโดยการกำหนดปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

4) ใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE ในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

5) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการแก้ปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

6) สรุปผลการทดลองและรวบรวมข้อมูลเพื่อเขียนเป็นรายงาน

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)

2) โปรแกรม Microsoft Excel

3) โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการรวบรวมข้อมูลจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและผลการทดลองจากการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีการกำหนดปัญหาแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มและใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE ในการหาคำตอบสำหรับงานวิจัยนี้

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลจากการหาคำตอบโดยใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE นำมาเปรียบเทียบกับค่าของคำตอบที่หาจากทฤษฎี

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อให้เครือข่ายมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำให้ประหยัดเวลาและงบประมาณในการดำเนินงาน เป็นการลดความยุ่งยากในการออกแบบ

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย แบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่าย แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย การกำหนดปัญหาของการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์และโปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบเครือข่ายโดยมีการเพิ่มตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้เพื่อศึกษาผลกระทบต่อจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ การออกแบบเครือข่ายโดยเพิ่มขนาดของเครือข่ายเพื่อศึกษาผลกระทบเมื่อจำนวนโนดตรวจรู้ไร้สายเพิ่มขึ้น การออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งที่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด การออกแบบเครือข่ายโดยใช้วิธีการกำหนดตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ที่แตกต่างกัน

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหาและแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและความรู้พื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

สำหรับเนื้อหาในบทนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายและทฤษฎีที่ใช้ในการกำหนดปัญหา เนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วยหัวข้อดังนี้ 2.1 กล่าวนำ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาวัตถุประสงค์และการแก้ปัญหาของงานวิจัยที่ผ่านมา 2.3 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมาและนวัตกรรมของงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการสรุปปัญหาและวิธีการออกแบบเครือข่ายในงานวิจัยที่ผ่านมาและเสนอการออกแบบเครือข่ายในงานวิจัยนี้ 2.4 มาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เป็นการศึกษามาตรฐานของอุปกรณ์ที่ใช้งานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพและหน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเครือข่าย 2.6 แบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่าย ทำการศึกษาผลกระทบของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้รับได้ 2.7 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ เพื่อศึกษาการใช้พลังงานและความสัมพันธ์ของการใช้พลังงานกับอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 2.9 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติของโนดตรวจรู้ที่มีราคาถูก ขนาดเล็กและมีความสามารถใช้ในการชี้ทิศทางของสิ่งแวดล้อมที่เราสนใจ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การสังเกตและเฝ้าตรวจความชื้นภายในฟาร์มเกษตร การควบคุมระบบไฟฟ้าภายในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรม และการเฝ้าสังเกตทางการทหาร โดยใช้เฝ้าตรวจความเคลื่อนไหวของศัตรู เป็นต้น จากหนังสือของ Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. (2007) ได้อธิบายหน้าที่ของโนดตรวจรู้ไว้ดังนี้ ใช้ในการสังเกต เฝ้าตรวจและชี้ทิศทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากโนดตรวจรู้มีขนาดเล็กจึงเหมาะที่จะใช้งานโดยทำการฝังโนดตรวจรู้ไว้ในสิ่งแวดล้อม ด้วยขนาดที่เล็ก จึงทำให้แหล่งพลังงานที่อยู่ภายในโนดตรวจรู้มีขนาดเล็กตามไปด้วย เมื่อต้องการใช้งานโนดตรวจรู้เป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จากข้อจำกัด

ทางด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ จึงได้มีงานวิจัยหลายงานที่มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้และกระบวนการเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เพื่อหาผลเฉลยของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ได้มีการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่มีการพัฒนาเทคนิคและการวิเคราะห์ปัญหาการออกแบบเครือข่าย เพื่อให้ครอบคลุมปัญหามากยิ่งขึ้น ดังนี้

2.2.1 จากงานวิจัยของ Narayanan, S., and Bhaskar, K. (2004) พบว่า ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การออกแบบเครือข่ายเพื่อให้สถานีฐานเก็บสะสมข้อมูลจากโนดตรวจรู้ให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยใช้อัลกอริธึม 3 แบบเมตริกเอกซ์โพเนนเชียล (E-MAX) เมตริกระยะทาง (DIST-MAX) และเพื่อใช้ประมาณหาค่าเส้นทางที่เหมาะสมที่ใกล้เคียงกับอัลกอริธึมที่ใช้หาเส้นทางสั้นที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ว่าอัลกอริธึมใดที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุด

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยโดยการเลือกอัลกอริธึมในการประมาณค่าหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ภายใต้เงื่อนไขการป้องกันการสูญเสียการไหลข้อมูลและข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ โดยอัลกอริธึมที่ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับอัลกอริธึมที่ใช้หาเส้นทางที่สั้นที่สุด คือ เมตริกเอกซ์โพเนนเชียลอัลกอริธึม ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์การใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ดีที่สุด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : ถึงแม้เมตริกเอกซ์โพเนนเชียลอัลกอริธึม ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การใช้พลังงานในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ใกล้เคียงกับอัลกอริธึมเส้นทางที่สั้นที่สุด แต่ในการรับและส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐานยังคงทำการส่งผ่านโนดตรวจรู้ระหว่างทาง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของโนดตรวจรู้และยังขาดการพิจารณาความสามารถในการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกตัวภายในเครือข่าย จึงทำให้เครือข่ายนี้ไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริง

2.2.2 จากงานวิจัยของ Chang, J.H., and Tassiulas, L., (2004) พบว่าปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีอายุการใช้งานยาวนานที่สุด

ลักษณะงานวิจัย : งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิจัยโครงสร้างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยใช้อัลกอริธึมที่ใช้หาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการรับและส่งข้อมูลระหว่าง

โนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ซึ่งคิดจากค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูล โดยขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างโนดตรวจรู้

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการพิจารณารับประกันว่าข้อมูลจากโนดตรวจรู้ทุกโนดในเครือข่ายสามารถส่งถึงสถานีฐานได้อย่างครบถ้วนและไม่ได้พิจารณาความสามารถในการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกตัวภายในเครือข่าย

2.2.3 จากงานวิจัยของ Azad, A.P., and Chockalingam, A., (2006) พบว่า ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐานแบบเคลื่อนที่

ลักษณะงานวิจัย : งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิจัยโครงสร้างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยหาตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐานแบบเคลื่อนที่เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการพิจารณารับประกันว่าข้อมูลจากโนดตรวจรู้ทุกโนดในเครือข่ายสามารถส่งถึงสถานีฐานได้อย่างครบถ้วน ไม่ได้พิจารณาความสามารถในการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกตัวภายในเครือข่ายและยังได้จำกัดจำนวนสถานีฐานที่สามารถทำการติดตั้งได้ ซึ่งอาจจะไม่ใช่จำนวนที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครือข่าย

2.2.4 จากงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A., (2009) พบว่า ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาอายุการใช้งานของเครือข่ายที่มากที่สุด

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยโครงสร้างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีฐาน โดยกำหนดข้อจำกัดต่าง ๆได้แก่ ข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ การป้องกันการสูญเสียการไหลข้อมูล

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการพิจารณาการรับประกันว่าข้อมูลจากโนดตรวจรู้ทุกตัวในเครือข่ายสามารถส่งถึงสถานีฐานได้อย่างครบถ้วน ไม่ได้พิจารณาความสามารถในการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกตัวภายในเครือข่าย ซึ่งทำให้ในทางปฏิบัติเครือข่ายนี้จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง

2.2.5 จากงานวิจัยของ Kim, H., Seok, Y., Choi, N., Choi, Y., and Kwon, T. (2005) พบว่า ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐานหลายสถานี

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยโครงสร้างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐาน โดยการจัดสรรปริมาณข้อมูล

ของโนดตรวจรู้ให้มีปริมาณน้อยที่สุดและใช้เส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดที่สั้นที่สุด เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการพิจารณาการรับประกันว่าข้อมูลจากโนดตรวจรู้ทุกตัวในเครือข่ายสามารถส่งถึงสถานีฐานได้อย่างครบถ้วน ในการออกแบบได้กำหนดจำนวนของสถานีฐานในการติดตั้ง ซึ่งจำนวนที่กำหนดมาให้นี้อาจจะไม่ใช่จำนวนที่น้อยที่สุด จึงทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการติดตั้งหรืออาจจะไม่เพียงพอที่จะรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกตัวภายในเครือข่าย ซึ่งทำให้ในทางปฏิบัติเครือข่ายนี้จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง

2.2.6 จากงานวิจัยของ Fadi, M., Hossam, S., Hassanein, W., and Mohamed, A.I. (2009) พบว่าปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการเชื่อมต่อที่เหมาะสมซึ่งมีข้อจำกัดของอายุการใช้งานเครือข่ายจริงสำหรับการวางโนดตรวจรู้เพื่อเฝ้าตรวจสิ่งแวดล้อม

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยโครงสร้างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับหัวหน้ากลุ่ม (Cluster head) หรือ สถานีฐานให้มากที่สุดและได้กำหนดช่วงอายุของเครือข่ายจากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของโนดตรวจรู้ที่ยังมีชีวิตและต้องเชื่อมต่อกับหัวหน้ากลุ่มซึ่งต้องตกลงภายใต้ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ (Threshold) ที่กำหนด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยนี้ได้นำสถานีถ่ายทอดมาติดตั้งเพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างหัวหน้ากลุ่มหรือสถานีฐาน แต่ในการออกแบบได้ออกแบบในระนาบ 3 มิติ ซึ่งถือว่ามีความยุ่งยากในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่นิยมนำมาใช้

2.3 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมาและนวัตกรรมของงานวิจัยนี้

จากการสำรวจงานวิจัยข้างต้น พบว่ากลุ่มงานวิจัยทั้งหมดได้มุ่งเน้นการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายเป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งประเภทการออกแบบเครือข่ายเป็น 3 กลุ่มได้แก่ กลุ่มแรก ทำการพิจารณาหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน โดยทำการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูล กลุ่มที่สองมีการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีฐาน โดยพิจารณาการป้องกันการสูญเสียการไหลข้อมูลและข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ และกลุ่มที่สาม ได้ทำการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยพิจารณาการนำสถานีถ่ายทอดมาติดตั้งเพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสถานีฐานให้มากที่สุด แต่ไม่ได้พิจารณา

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับโนดตรวจรู้ สำหรับการออกแบบเครือข่ายในงานวิจัยมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการใช้งานจริงเนื่องจากต้องหาความสูงในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงมุ่งคิดค้นวิธีการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบเครือข่าย ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการกำหนดปัญหาซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด ซึ่งในการออกแบบได้คำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น พลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้ การรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้ทุกโนดในเครือข่าย สมดุลการไหลข้อมูล (flow balance) การรับประกันความครบถ้วนของข้อมูล (guarantee packet delivery) สถานีถ่ายทอดสามารถรองรับปริมาณข้อมูลจากโนดตรวจรู้ได้ทั้งหมดและได้กำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

2.4 มาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

เนื่องจากในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network) เป็นหัวข้อวิจัยที่แพร่หลายเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้ถูกสร้างขึ้นโดยกลุ่มของบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ซึ่งต่างโรงงานกัน ตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตโนดตรวจรู้ โดยโนดตรวจรู้มีความสามารถในการสังเกต เฝ้าตรวจและชี้ทิศทางของพารามิเตอร์ที่ต้องการตามลักษณะทางกายภาพได้แตกต่างกันจำนวนมากมาย เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ก๊าซ ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น โนดตรวจรู้อาจจะถูกประกอบขึ้นโดยต่าง Application Programming Interface (API) ตามแต่ละโรงงานและการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ต่างชนิดกันตามความต้องการในการสื่อสาร สำหรับการรวมข้อมูล การเข้าใช้ช่องสัญญาณ การกระจายข้อมูลจะขึ้นอยู่กับการกำหนดมาตรฐานของอุปกรณ์ต่อร่วมและรูปแบบข้อมูลของโนดตรวจรู้ โดยจุดประสงค์ของการกำหนดมาตรฐาน คือ การทำให้โนดตรวจรู้ต่างชนิดกันที่ผลิตจากต่างโรงงานสามารถใช้งานร่วมกันได้ โดยไม่ต้องมีมนุษย์คอยควบคุมตลอดเวลา จากหนังสือของ Sohraby, K., Minoli, D. and Znati, T. (2007). ได้กล่าวถึงมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และการทำงานในชั้นกายภาพและชั้นการควบคุมการใช้สื่อไว้ดังนี้

2.4.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) กลุ่มทำงานผู้ก่อตั้งมุ่งเน้นสร้างมาตรฐาน IEEE 802.15.1 สำหรับชั้นกายภาพ (Physical layer : PHY) และการควบคุมการเข้าใช้สื่อ (Medium Access Control layer : MAC) บนมาตรฐาน

เทคโนโลยีบลูทูธ (IEEE 2002) กลุ่มผู้ทำงานได้สร้างกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม มาตรฐานแรก IEEE 802.15.3 โดยมุ่งเน้นการให้บริการเครือข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง สำหรับมัลติมีเดียแอพพลิเคชั่น มาตรฐานที่สอง คือ IEEE 802.15.4 เป็นการให้บริการเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลอัตราเร็วต่ำ โดยเริ่มต้นด้วยความซับซ้อนต่ำ ราคาถูกและใช้พลังงานในการสื่อสารไร้สายต่ำท่ามกลางอุปกรณ์สื่อสารอื่น ๆ สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานย่อยที่ใช้กำหนดในชั้นกายภาพและชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อ

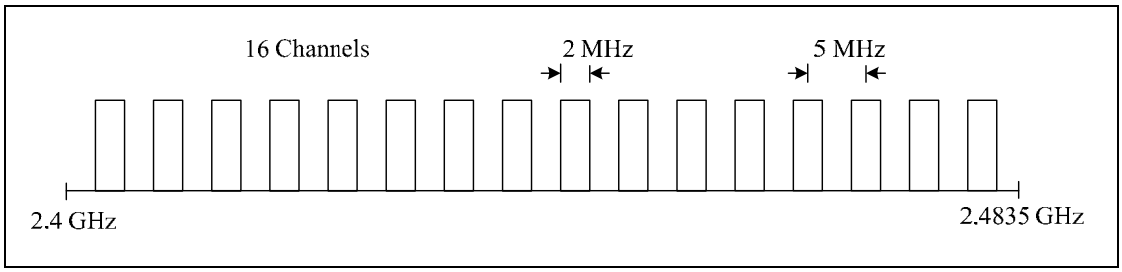
สำหรับ Zigbee ได้กำหนดการทำงานในชั้นที่สูงขึ้น คือ ระเบียบวิธีสื่อสารและการพัฒนาโปรไฟล์แอพลิเคชั่นต่าง ๆ ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันได้ท่ามกลางโรงงานต่าง ๆ สำหรับ Zigbee เป็นการระบุมาตรฐานเครือข่ายไร้สายพลังงานต่ำ โดย Zigbee Alliance เป็นองค์กรอิสระไม่ได้หวังผลกำไร ได้ก่อตั้งใน ค.ศ. 2002 สำหรับเวอร์ชั่นแรกได้มีการใช้ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2004 และปรับแต่งสเป็คอุปกรณ์และเปิดใช้ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2006 นอกจากนี้ Zigbee Alliance ยังได้พัฒนาการรับรองและการใช้โปรแกรมปฏิบัติการ รวมถึงชื่อทางการตลาดและการศึกษาของผู้ใช้

การประยุกต์ใช้งาน Zigbee มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมและเฝ้าสังเกตสิ่งที่เราสนใจ โดยมีการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น การสื่อสารเซ็นเซอร์ไร้สาย การควบคุมแสงและการเฝ้าระวังภัยธรรมชาติ สำหรับจุดมุ่งหมายในพื้นที่ทางการตลาด คือ การควบคุมในที่พักอาศัย ควบคุมภายในอาคารพาณิชย์และการจัดการวางแผนในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.4.2 ชั้นกายภาพ (Physical Layer)

เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลอัตราเร็วต่ำกับ Zigbee รวมกันเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพมากสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม ด้านการเกษตรและด้านการแพทย์ เป็นต้น มาตรฐาน IEEE 802.15.4 นี้ได้ทำการนิยามกลไกการเข้าใช้ช่องสัญญาณ การส่งเฟรมตอบรับ การสร้างเครือข่ายและการแยกเครือข่าย ซึ่งมาตรฐานนี้สนับสนุน Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ในชั้นกายภาพซึ่งใช้ทำงานในภาคอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ที่ความถี่ 868 MHz หรือ 915 MHz โดยมีอัตราเร็วที่ 20 kbps หรือ 40 kbps สำหรับแถบความถี่สูงในชั้นกายภาพจะทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz โดยมีอัตราเร็ว 250 kbps โดยสามารถแบ่งช่องความถี่ออกเป็น 16 ช่อง แต่ละช่องความถี่มีแบนด์วิดท์ (bandwidth) 2 MHz และความถี่กลางของแต่ละช่องห่างกัน 5 MHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับความถี่ย่านนี้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาดใหญ่ อัตราเร็วที่สูงสามารถลดเวลาในการส่งเฟรมข้อมูลและพลังงานในการรับและส่งข้อมูล

การทำงานของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจะมีการทำงาน 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์ที่ทำงานแบบ Full-function device (FFD) เป็นอุปกรณ์ที่มีหน่วยความจำและทรัพยากรที่สามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อื่น ๆ ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ต่างเครือข่ายได้ ส่วนอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบ Reduced-function device (RFD) ถือว่าอุปกรณ์พื้นฐานราคาถูก ความซับซ้อนต่ำ โดยทั่วไปจะใช้เป็นอินเตอร์เฟสระหว่างสิ่งแวดล้อมกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย โดยที่อุปกรณ์ชนิดนี้จะมีการส่งข้อมูลตามความต้องการและมีช่วงเวลาที่ไม่ได้ส่งข้อมูล สำหรับในช่วงเวลาที่ส่งข้อมูลสำเร็จจะมีการใช้พลังงานสูง



รูปที่ 2.1 การจัดสรรช่องความถี่ในย่าน 2.4 GHz

เครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้สนับสนุนอุปกรณ์ 3 ชนิด คือ ตัวประสานงานระหว่างเครือข่ายส่วนบุคคล (PAN coordinator) ตัวประสานงานภายในเครือข่ายส่วนบุคคล (Coordinator) และอุปกรณ์ปลายทาง (End device) ในเครือข่ายส่วนบุคคลต้องมีอุปกรณ์ดังนี้

1) ตัวประสานงานระหว่างเครือข่ายส่วนบุคคล ภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจะมีอุปกรณ์ชนิดนี้เพียง 1 ตัวเท่านั้นโดยมีหน้าที่สร้างการเชื่อมโยงระหว่างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายหรือระหว่างอุปกรณ์ปลายทางกับตัวประสานงานภายในเครือข่ายส่วนบุคคล โดยมีการกำหนดที่อยู่ให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเครือข่ายไม่ให้ซ้ำกันและจัดสรรเส้นทางการสื่อสารภายในเครือข่าย

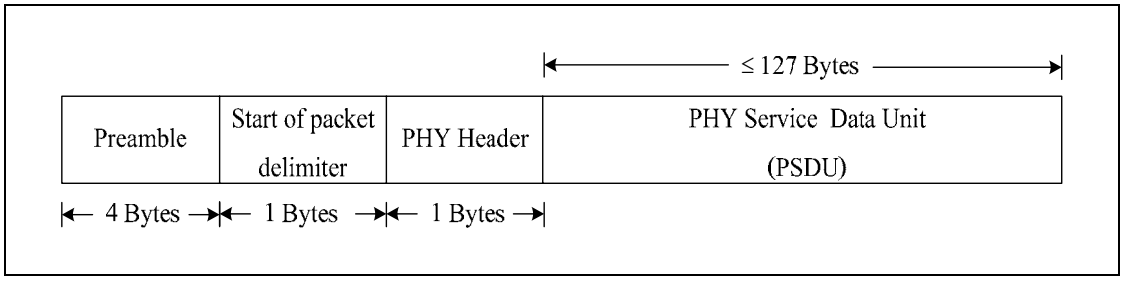
2) ตัวประสานงานภายในเครือข่ายส่วนบุคคลมีหน้าที่รับและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ปลายทาง และทำการหาเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังปลายทางและมีความสามารถจัดการเครือข่ายด้วยตัวเอง

3) อุปกรณ์ปลายทาง มีความสามารถในการชี้ทิศทางของพารามิเตอร์ที่สนใจและสามารถรับสัญญาณจากอุปกรณ์ปลายทางตัวอื่น ๆ อุปกรณ์ปลายทางนี้ใช้พลังงาน

ในการทำงานต่ำ แต่อุปกรณ์ชนิดนี้ไม่มีความสามารถในการหาเส้นทางในการส่งข้อมูล แต่จะสามารถสื่อสารกับตัวประสานงานภายในเครือข่ายส่วนบุคคลได้เท่านั้น

จากรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของกลุ่มข้อมูล ในส่วนแรกจะเป็นพรีมเบิล (preamble) ซึ่งมีขนาด 32 bits โดยโครงสร้างส่วนนี้จะทำการเข้าจังหวะของสัญลักษณ์ (symbol synchronization) ในส่วนถัดไปการเริ่มจำกัดแพ็คเก็จข้อมูลโดยมีขนาด 8 bits ซึ่งนำมาใช้ในการเข้าจังหวะของเฟรม (frame synchronization) สำหรับ PHY header มีขนาด 8 bits ใช้ระบุความยาวของข้อมูลในพีเอสดียู (PSDU) และส่วนของพีเอสดียูเป็นส่วนของข้อมูล โดยข้อมูลจะมีความยาวไม่เกิน 127 bytes

สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.14.5 สนับสนุนขนาดของ long address ซึ่งมีความยาว 64 bits และ short address มีความยาว 16 bits โดย long address จะใช้เพื่อระบุความถูกต้องของอุปกรณ์ ส่วนการสร้างเครือข่ายหรือรวมเครือข่ายจะใช้ short address ในการดำเนินงานในเครือข่าย สำหรับจำนวนโนดในเครือข่ายตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.4 มีได้สูงสุดประมาณ 65,000 โนด



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูล

2.4.3 ชั้นควบคุมการเข้าใช้สื่อ (Medium Access Control Layer : MAC)

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีการควบคุมการเข้าใช้สื่อตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานภายในที่อยู่อาศัยหรือภายในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการประยุกต์ใช้งานเหล่านี้จะมีความต้องการอัตราเร็วในการส่งข้อมูลต่ำและมีค่าเฉลี่ยของการหน่วงเวลาปานกลางโดยมีการรับประกันค่าของการหน่วงเวลาที่ยืดหยุ่น นอกจากนี้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีการใช้พลังงานน้อยมากและยังสามารถสร้างเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้

ปัญหาในการวางแผนประยุกต์ใช้งานเครือข่ายในขณะที่มีการกระจายตัวของอุปกรณ์ที่ใช้สังเกตและควบคุมจำนวนมากแต่ต้องการลดต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เหล่านั้น โดยการควบคุมการเข้าใช้สื่อตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีการระบุลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แต่ละชนิด เพื่อความยืดหยุ่นในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และเพื่อเป็นการใช้พลังงานให้น้อยที่สุด โดยภายในเครือข่ายต้องมีลักษณะดังนี้

1) อุปกรณ์ที่นำมาใช้ต้องสามารถเข้ากับลักษณะทางกายภาพและอุปกรณ์ภายในเครือข่ายได้อย่างหลากหลาย

2) สามารถซุปเปอร์เฟรมมาใช้เพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเครือข่ายได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน

3) สามารถส่งข้อมูลแบบระบุทิศทางและไม่ระบุทิศทางได้

4) มีวิธีในการแข่งขันเพื่อเข้าใช้สื่อสารได้ตามตารางเวลา

5) มีวิธีการทำงานแบบมีสัญญาณบีคอน (beacon) และแบบไม่มีสัญญาณบีคอน (non-beacon)

6) มีการจัดการผลกระทบของพลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ โดยมีการปรับตัวให้อยู่ในแบบวิธีหลับ (sleep mode) ได้

7) มีความยืดหยุ่นในการกำหนดที่อยู่ (addressing) ให้อุปกรณ์ทุกชนิดที่อยู่ในเครือข่ายเพื่อสนับสนุนการขยายตัวของเครือข่าย

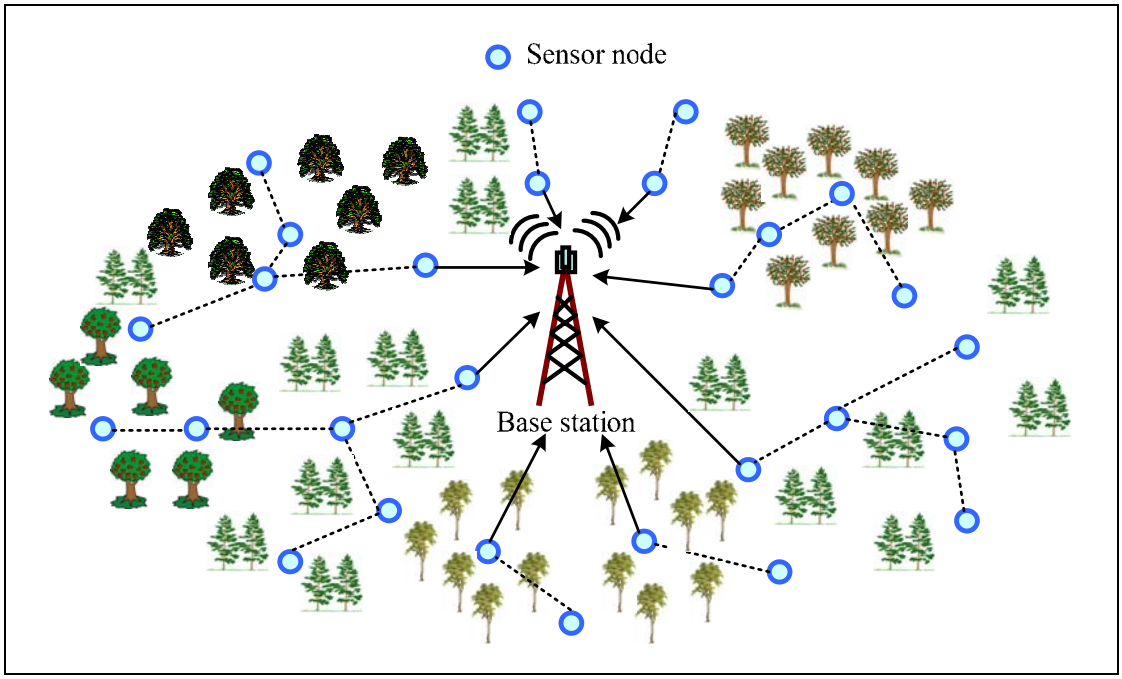
โดยชั้นควบคุมการเข้าใช้สื่อได้กำหนดให้กลุ่มข้อมูลมีขนาด 128 bytes โดยมี payload ขนาดสูงสุด 104 bytes ซึ่งถือว่าเพียงพอสำหรับมาตรฐานเพื่อใช้ในการออกแบบระบบที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลต่ำและสามารถทำงานในแบบวิธีที่เปิดสัญญาณบีคอนและแบบไม่มีสัญญาณบีคอน สำหรับแบบวิธีที่ไม่มีสัญญาณบีคอนจะใช้ระเบียบวิธีสื่อสาร Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลที่ได้ส่งออกไป

2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

โครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อใช้ในการตรวจจับการคำนวณและการสื่อสารข้อมูล ซึ่งโนดตรวจรู้จะมีคุณสมบัติในการเป็นเครื่องตรวจวัด เฝ้าสังเกตและตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ รวมถึงปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น การนำมาใช้งานด้านการทหาร การเกษตร อุตสาหกรรม เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายถูกนำมาใช้เพื่อเฝ้าสังเกตเหตุการณ์สำคัญ ที่มีผลต่อความปลอดภัยและทรัพย์สินของมนุษย์ เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008) และหนังสือของ Sohraby, K.,

Minoli, D., and Znati, T. (2007) ได้มีการอธิบายโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งประกอบไปด้วย สถานีฐานและโนดตรวจรู้ แสดงดังรูปที่ 2.3

- **สถานีฐาน** มีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้หรือสถานีถ่ายทอดหลังจากนั้นจะทำการประมวลผลข้อมูลหรือส่งข้อมูลให้กับศูนย์กลางการเฝ้าสังเกตต่อไป



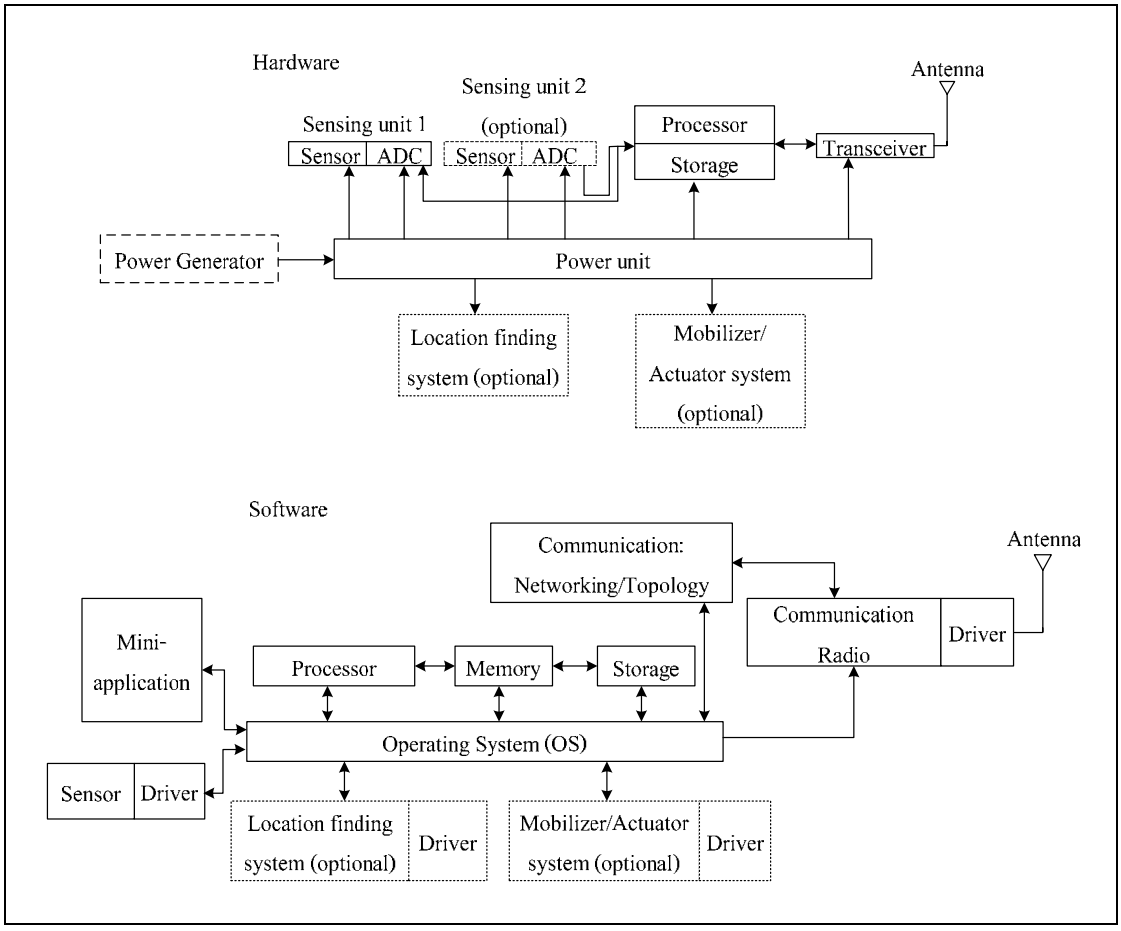
รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

- **โนดตรวจรู้** มีหน้าที่ในการชี้ทิศทางและส่งข้อมูลให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียงหรือส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานโดยตรง แต่โนดตรวจรู้ไม่สามารถค้นหาเส้นทางหรือส่งข้อมูลข้ามเครือข่ายหรือส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ต่างชนิดกันด้วยตัวเอง มีตำแหน่งที่แน่นอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุในย่านความถี่สาธารณะที่ความถี่ 2.4 GHz และพลังงานของโนดตรวจรู้มีอยู่อย่างจำกัดซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนหรือเติมพลังงานเข้าไปได้

2.5.1 ส่วนประกอบของโนดตรวจรู้

โนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายจะมีหน้าที่พื้นฐานที่สำคัญ คือ การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) ซึ่งประกอบด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (digital signal processing) การบีบอัดข้อมูล การแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลและการเข้ารหัสสัญญาณ การหาเส้นทางและการส่งข้อมูลและการจัดการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโนดที่อยู่ในเครือข่าย

สำหรับการสนับสนุนหน้าที่ต่าง ๆ นี้ คือ ฮาร์ดแวร์ โดยมีส่วนประกอบดังนี้ หน่วยของการตรวจจับ หน่วยประมวลผล หน่วยของการสื่อสาร หน่วยของพลังงานและส่วนของการประยุกต์การทำงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน จากรูปที่ 2.4 เป็นส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ โดยความซับซ้อนและโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 4 อย่างซึ่งได้แก่



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ของเครือข่ายไร้สาย

1) เซ็นเซอร์หรือโนดตรวจรู้ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ต่อร่วมระหว่างสิ่งแวดล้อมกับโนดตรวจรู้ซึ่งทำหน้าที่วัดค่าต่าง ๆ โดยโนดตรวจรู้มีความสามารถในการตรวจวัดสภาพแวดล้อมพื้นฐานต่าง ๆ ตามแต่ชนิดของโนดตรวจรู้ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ควัน ความเร่ง แรงสั่นสะเทือน ความเคลื่อนไหว ความลึก ความเป็นกรดหรือด่าง ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ความดัน เป็นต้น

2) หน่วยรับและส่งข้อมูลไร้สาย (Transceiver unit) ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลแบบไร้สายในย่านความถี่สาธารณะ เพื่อรับและส่งข้อมูลระหว่างหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ข้างเคียง โดยเครือข่ายไร้สายต้องสามารถรองรับการสื่อสารทั้งแบบเมชและแบบสตาร์หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง มีงานวิจัยหลายงานที่พยายามพัฒนาส่วนประกอบนี้ โดยมีประเด็นที่น่าสนใจ เช่น รัศมีการส่งข้อมูล เทคนิคการมอดูเลต การหาเส้นทางและโทโปโลยีของเครือข่าย สำหรับระยะทางอาจอยู่ห่างกันตั้งแต่ระยะใกล้ ๆ ไม่กี่เมตรไปจนถึงหลายกิโลเมตรได้ การพิจารณาสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ปริมาณงานที่เครือข่ายสามารถให้ได้จะอยู่ระหว่าง 10 ถึง 256 kbps ซึ่งขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน

3) หน่วยประมวลผล (Processing unit) จะทำหน้าที่ติดต่อกับโนดตรวจรู้ เพื่อสั่งงานหรือรับข้อมูลที่วัดได้จากโนดตรวจรู้ เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูลและจัดเก็บลงในหน่วยความจำเพื่อรอการร้องขอข้อมูลหรืออาจส่งข้อมูลทันทีผ่านทางหน่วยรับและส่งข้อมูลไร้สาย หน่วยประมวลผลกลางอาจรับข้อมูลจากระบบระบุตำแหน่งเพื่อช่วยในการประมวลผลต่าง ๆ หรือหน่วยประมวลผลกลางอาจทำหน้าที่ควบคุม การเคลื่อนที่ของโนดตรวจรู้ผ่านทางระบบเคลื่อนที่ นอกจากนี้หน่วยประมวลผลกลางยังทำหน้าที่ประมวลผลเครือข่ายและหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ด้วย

4) แหล่งพลังงาน (Power unit) เป็นที่เก็บสะสมพลังงานและให้พลังงานกับทุกส่วนประกอบบนโนดตรวจรู้ การใช้พลังงานนั้นจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งเครือข่ายบางประเภทอาจมีความต้องการใช้งานเป็นวันหรือเดือนหรือปี เป็นต้น

นอกเหนือจากส่วนประกอบหลักของโนดตรวจรู้แล้วยังมีส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับโนดตรวจรู้ด้วยเช่นกัน ดังนี้

1) ระบบระบุตำแหน่ง (Positioning unit) เป็นหน่วยระบุตำแหน่งของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์โดยใช้ GPS เพื่อนำข้อมูลตำแหน่งไปใช้ประมวลผล เช่น หาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูล หาตำแหน่งสำหรับการเคลื่อนที่ของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ เป็นต้น

2) ระบบเคลื่อนที่ (Mobilizing unit) ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งของเซ็นเซอร์เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ เช่น จัดรูปแบบโครงสร้างเครือข่าย ติดตามวัตถุ เคลื่อนที่หาสัญญาณสื่อสาร เป็นต้น

3) แหล่งกำเนิดพลังงาน (Power generator unit) ทำหน้าที่กำเนิดพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานลม ความร้อน ปฏิกิริยาเคมี การสั่นสะเทือน เป็นต้น โดยจะแปลงให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมไว้ใช้ต่อไป เพื่อชดเชยพลังงานที่ถูกใช้ไปทำให้โนดตรวจรู้ทำงานได้เป็นเวลานาน

โดยทั่วไปซอฟท์แวร์พื้นฐานของโนดตรวจรู้จะประกอบด้วย 5 ซอฟท์แวร์ ได้แก่

1) ระบบปฏิบัติการรหัสไมโคร (Operation system microcode) เป็นซอฟท์แวร์มาตรฐานสำหรับฟังก์ชันการทำงานพื้นฐาน โดยทั่วไปแล้วจะมี open-sort operating system designed ที่เฉพาะเจาะจงในการออกแบบการใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยคำสั่งปฏิบัติการที่ใช้จะมีขนาดเล็กและสามารถติดตั้งใช้งานได้อย่างรวดเร็ว

2) ตัวขับโนดตรวจรู้ (Sensor Driver) เป็นซอฟท์แวร์มาตรฐานเพื่อใช้ควบคุมการทำงานพื้นฐานในการเป็นเครื่องรับและเครื่องส่ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจมีการใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่หรือจากแหล่งจ่ายอื่น โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและการทำงานและต้องทำการใส่ข้อมูลเพื่อทำการติดตั้งและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างที่เหมาะสมให้กับโนดตรวจรู้

3) หน่วยประมวลผลการสื่อสาร (Communication processor) เป็นชุดคำสั่งที่ใช้จัดการการสื่อสาร เช่น คำสั่งในการหาเส้นทาง การรองรับและส่งต่อข้อมูล การเข้าใช้สื่อช่องสัญญาณ การเข้ารหัสสัญญาณและการแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูล เป็นต้น

4) ตัวขับการสื่อสาร (Communication Driver) เป็นซอฟท์แวร์มาตรฐานที่ใช้ในการจัดการเกี่ยวกับช่องสื่อสารสัญญาณวิทยุ ซึ่งประกอบด้วย สัญญาณนาฬิกาและการซิงโครไนส์ การเข้ารหัสสัญญาณ ระดับสัญญาณและการมอดูเลต เป็นต้น

5) กระบวนประมวลผลข้อมูล (Data processing mini app.) ในส่วนนี้จะเป็นกระบวนการเชิงตัวเลข ได้แก่ การประมวลผลข้อมูลและการจัดเก็บค่าของสัญญาณหรือสำหรับการสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ อาจมีการประมวลผลในระดับภายในเครือข่าย

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสนับสนุนการเชื่อมต่อทางกายภาพ โดยการเชื่อมต่อแบบไร้สายระหว่างโนดเดียวหรือหลายโนด อาจมีระยะห่าง 10 100 หรือ 1,000 เมตร สำหรับหลักการของเหตุผลที่ใช้พิจารณาการเชื่อมต่อนั้น เป็นการสนับสนุนการรักษาโครงสร้างของเครือข่ายและการหาเส้นทางแบบหลายโนด โดยโนดตรวจรู้มีการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งทรัพยากรที่จำกัดของโนดตรวจรู้ ได้แก่

1) พลังงานที่ใช้หมดไป (Power consumption) เกือบจะเป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ เครือข่ายไร้สายมีพลังงานที่จำกัดในการทำงาน ซึ่งทำให้การออกแบบเพื่อรักษาพลังงานเป็นหลักสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการพิจารณาการออกแบบเครือข่าย

2) การสื่อสาร (Communication) โดยปกติแล้วเครือข่ายไร้สายมีการจำกัดแบนด์วิดท์เครือข่ายอาจจะมีการรบกวนของช่องสัญญาณและช่องสัญญาณสื่อสารอาจถูกรบกวนโดยแถบความถี่ ซึ่งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือลดลงและคุณภาพของการให้บริการต่ำและความปลอดภัยลดลงด้วย

3) การคำนวณ (Computation) ปกติแล้วเครือข่ายไร้สายมีแหล่งพลังงานที่ใช้ในการคำนวณและหน่วยความจำที่จำกัด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งอัลกอริธึมที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลของโนดตรวจรู้

4) ความไม่แน่นอนในการวัดค่าพารามิเตอร์ (Uncertainty in measured parameter) โดยแท้จริงแล้วสัญญาณที่ทำการตรวจวัดและการเก็บสะสมนั้นมีความไม่แน่นอนอยู่แล้ว เนื่องจากในการสื่อสารไร้สายจะมีสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณแทรกสอดจากสิ่งแวดล้อมทำให้การตรวจจับและการเก็บข้อมูลของโนดตรวจรู้มีความสามารถลดลง

จากการศึกษาองค์ประกอบของโนดตรวจรู้และทรัพยากรที่มีจำกัดของโนดตรวจรู้ พบว่าในการทำงานในส่วนของหน่วยเฝ้าตรวจหรือการประมวลผลข้อมูลของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์นั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานในการทำงาน ซึ่งพลังงานของโนดตรวจรู้นี้มีอยู่อย่างจำกัดและใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำมาเปลี่ยนหรือเติมพลังงานเข้าไปใหม่ได้ จึงถือได้ว่าเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการออกแบบเครือข่ายโดยให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุดหรือทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด

2.5.2 โครงสร้างทางกายภาพของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ในการออกแบบเครือข่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงความต้องการและลักษณะการใช้งานเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานเพื่อให้เครือข่ายที่ออกแบบมีประสิทธิภาพและให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ โดยโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

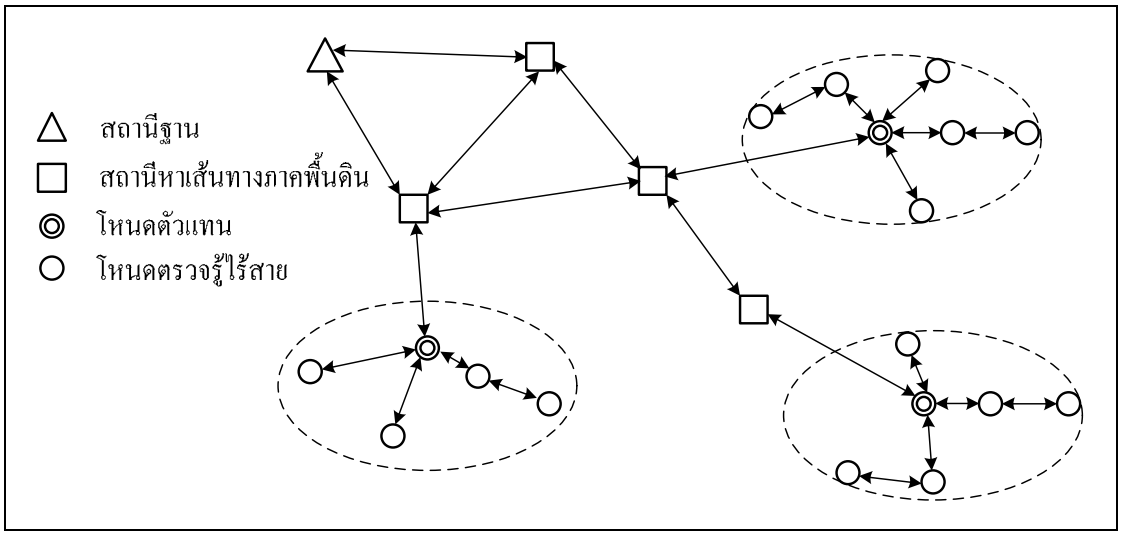
2.5.2.1 โครงสร้างแบบเมช (mesh-based) มีโครงสร้างของเครือข่ายแบบตาข่าย สามารถสื่อสารไร้สายแบบหลายโนดได้ อาจเป็นการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ด้วยกันเองหรือสื่อสารไปยังโนดตัวแทนได้โดยตรง ซึ่งเส้นทางในการสื่อสารสามารถเปลี่ยนแปลงได้ (dynamic routing) ทั้งในส่วนของการสื่อสารไร้สายและการสื่อสารแบบมีสายในบางส่วนของเครือข่าย โดยแสดงดังรูปที่ 2.4 ลักษณะสำคัญของโครงสร้างเครือข่ายประเภทนี้ คือ

1) โนดตรวจรู้สามารถเป็นโนดตัวแทนในการส่งข้อมูลต่อให้กับตัวตรวจรู้ตัวอื่น ๆ ได้

2) โนดตัวแทนมีการหาเส้นทางแบบเปลี่ยนแปลงได้และมีการเชื่อมต่อกับสถานีภาคพื้นดินหลายเส้นทาง

3) การสื่อสารไร้สายสามารถตรวจวัดได้ไกลถึง 1,000 เมตร

4) โนดตัวแทนมีความสามารถในการประมวลผลหรือการลดลงของการเป็นโนดตัวแทน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ทางด้านการทหารใช้ตรวจจับและติดตามศัตรู หุ่นยนต์กู้ภัย การเฝ้าระวังการเกิดภัยธรรมชาติ (แผ่นดินไหว ไฟป่า น้ำท่วม) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบเมช

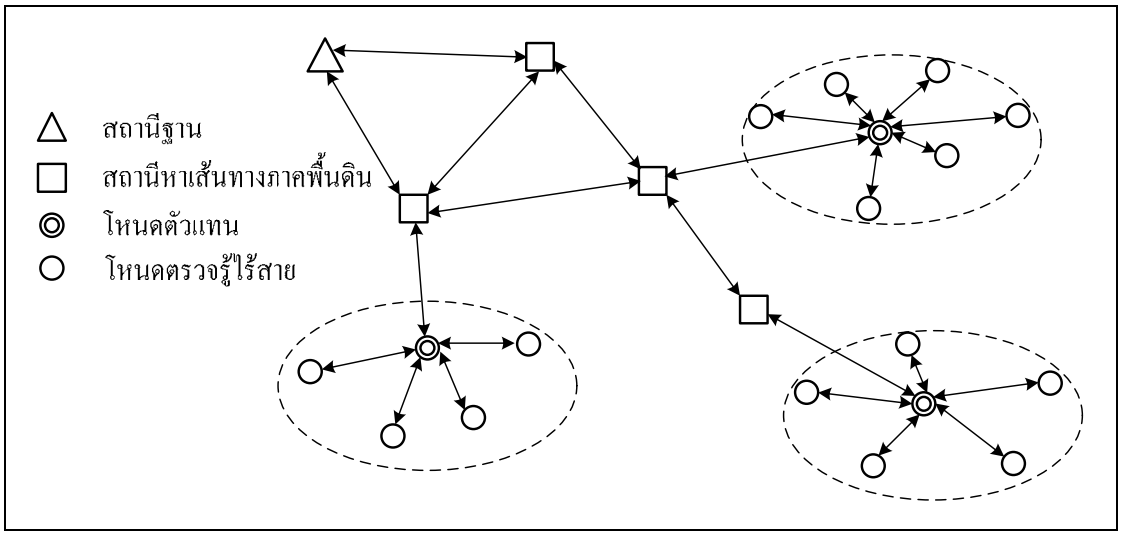
2.5.2.2 โครงสร้างแบบสตาร์ (star-based) มีการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (point-to-point) หรือหลายจุดต่อจุด (multipoint-to-point) โดยทั่วไปแล้วเป็นการสื่อสารแบบจุดต่อจุด เส้นทางการสื่อสารเป็นแบบคงที่ (static routing) สำหรับการสื่อสารแบบไร้สายปกติแล้วเส้นทางจากเครือข่ายไร้สายไปยังสถานีภาคพื้นดินจะมีเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้นแสดงดังรูปที่ 2.5 คุณลักษณะสำคัญของโครงสร้างเครือข่ายประเภทนี้ คือ

1) โนดตรวจรู้ไร้สายไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวแทนในการรับข้อมูลจากตัวตรวจรู้อื่น ๆ เพื่อส่งต่อได้ สำหรับโนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลไปยังสถานีภาคพื้นดินจะใช้เส้นทางเดิมเท่านั้น

2) การสื่อสารไร้สายสามารถตรวจวัดได้ไกลถึง 100 เมตร

3) โนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลไม่สามารถประมวลผลข้อมูลหรือทำการลดโนดตัวแทนได้ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน ด้านการแพทย์ใช้ตรวจวัดความดันหรืออุณหภูมิของผู้ป่วย ในโรงงานอุตสาหกรรมใช้ตรวจวัดปริมาณก๊าซพิษในอากาศ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายก็ยังเป็นที่แพร่หลายในการนำมาใช้งานเพื่อเฝ้าสังเกตเหตุการณ์ต่าง ๆ โดยโนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีข้อดีและข้อจำกัด ดังนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบสตาร์

ข้อดีของการใช้โนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1) ราคาถูก

2) มีขนาดเล็กเหมาะแก่การฝังตัวในสิ่งแวดล้อม

3) โนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสามารถจัดการตัวเองได้ โดยไม่ต้องมีมนุษย์เข้าไปควบคุมหรือช่วยเหลือ

4) โนดตรวจรู้จำนวนมากสามารถกระจายตัวครอบคลุมบริเวณพื้นที่ทำการของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อเก็บข้อมูล

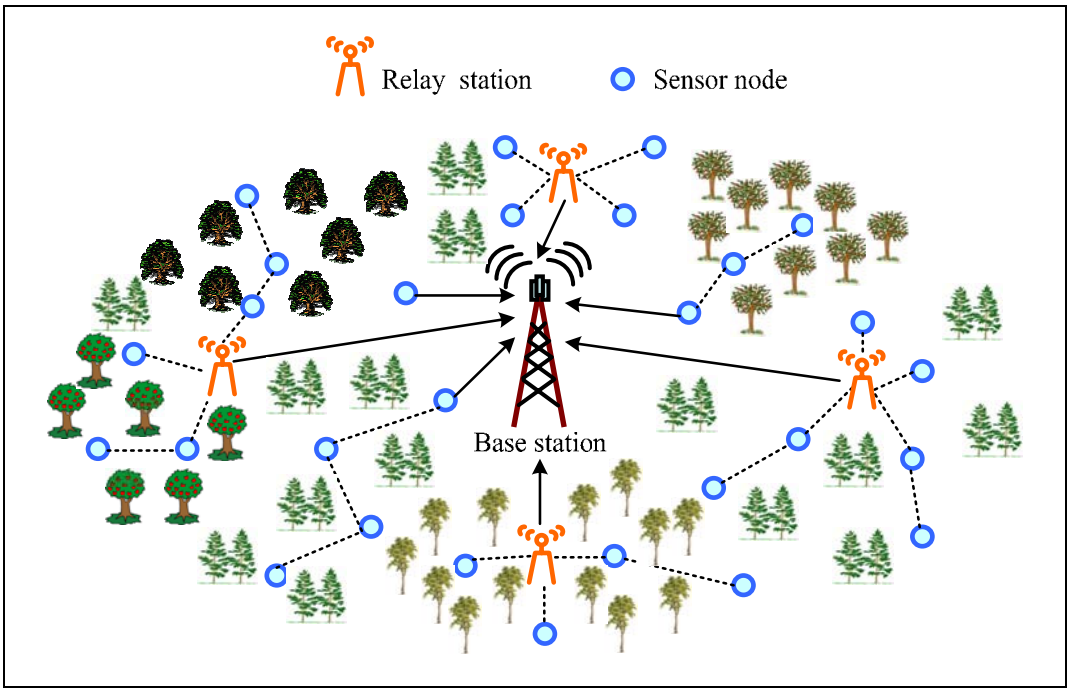
ข้อจำกัดของการใช้โนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1) โนดตรวจรู้มีแหล่งพลังงานและความสามารถในการประมวลผลจำกัด

2) โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นโครงสร้างที่ไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงได้อยู่ตลอดเวลา

2.5.3 สถานีถ่ายทอด (Relay Station)

จากการศึกษาส่วนประกอบและหลักการทำงานของโนดตรวจรู้มาแล้วนั้น พบว่าในความเป็นจริงสถานีฐานอาจตั้งอยู่ห่างไกลจากโนดตรวจรู้ ซึ่งอาจทำให้มีโนดตรวจรู้บางโนดไม่สามารถทำการเชื่อมต่อกับโนดอื่น ๆ ได้ ทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอดได้ รวมถึงข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรที่สำคัญ คือ พลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยนำสถานีถ่ายทอด (Relay Station) มาใช้ในการออกแบบเครือข่าย ซึ่งสถานีถ่ายทอดมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายและทำการส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐาน ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการรับประกันว่าโนดตรวจรู้ทุกตัวที่อยู่ในเครือข่ายสามารถสร้างการเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้อย่างครบถ้วนและประเด็นสำคัญ คือ เป็นการลดพลังงานในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้อีกด้วย ซึ่งเรากำหนดให้สถานีถ่ายทอดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการหาเส้นทางในการส่งข้อมูล สามารถรองรับปริมาณข้อมูลจากอุปกรณ์ต่างชนิดภายในเครือข่ายเดียวกันได้และทำการส่งต่อข้อมูลไปให้สถานีฐาน โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยมีสถานีถ่ายทอดแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยกำหนดคุณสมบัติของสถานีถ่ายทอด ดังนี้ พลังงานของสถานีถ่ายทอดนั้นมีอย่างไม่จำกัด ซึ่งในทางปฏิบัติเราอาจใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม โดยสามารถเก็บพลังงานเหล่านี้ไว้ในแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ ซึ่งเหมาะต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานที่ต้องใช้ระยะเวลานาน ๆ

ข้อดีของสถานีถ่ายทอด

1) มีแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ สามารถใช้งานได้โดยที่มีพลังงานไม่จำกัด

2) เป็นอุปกรณ์แบบ FFD ซึ่งสามารถรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐานได้ ทำให้เป็นการประหยัดพลังงานของโนดตรวจรู้

3) สามารถรองรับปริมาณข้อมูลได้มาก

ข้อเสียของสถานีถ่ายทอด

1) สถานีถ่ายทอดเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่

2) สถานีถ่ายทอดมีราคาแพง

3) ใช้งบประมาณในการติดตั้งสูง

จากการศึกษาข้อดีและข้อเสียของสถานีถ่ายทอดมาแล้วนั้น เราจึงสนใจที่จะนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้แต่เนื่องจากสถานีถ่ายทอดมีราคาแพงและต้องใช้งบประมาณในการติดตั้งสูง ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุดและตำแหน่งที่ทำการติดตั้งนั้นยังเป็นตำแหน่งเหมาะสมที่สุดอีกด้วยเพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณในการลงทุน

2.6 แบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path-loss Model)

เนื่องจากการสื่อสารระหว่างโนดภายในเครือข่ายเป็นแบบไร้สาย ทำให้การส่งสัญญาณที่มาถึงปลายทางไม่ได้มีแค่เพียงสัญญาณเดียว เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาต้องเดินทางผ่านสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย ในการหาตำแหน่งเพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้เหมาะสมที่สุดจึงสามารถหาได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่ายหรือจากการวัดสัญญาณจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการคำนวณการสูญเสียเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมซึ่งถือว่ามีอิทธิพลต่อการสื่อสารเป็นอย่างมาก บางทีอาจทำให้มีโนดตรวจรู้บางโนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการคำนวณเพื่อประมาณค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้เพื่อให้โนดทุกโนดในเครือข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้ โดยใช้แบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่ายจากหนังสือของ Goldsmith, A. (2007) มาคำนวณหาความแรงของสัญญาณที่รับได้จากโนดทุกตัวที่อยู่ภายในเครือข่าย โดยใช้สมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2)

โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยเราเลือกใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz ส่วนกำลังที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นได้มาจากอุปกรณ์จริง ในการออกแบบเราได้พิจารณาบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางหนาแน่น ๆ เช่น ในป่าทึบ หรือภายในอาคาร

ที่มีผนังหรือกำแพงอยู่มากจึงกำหนดให้ดรรชนีการสูญเสียเนื่องจากสิ่งแวดล้อมให้มีค่าเท่ากับ 4 และใช้ระยะห่างอ้างอิงในสนามระยะใกล้ของสายอากาศเท่ากับ 1 เมตร

$$P_r = P_t + K - 10n\log_{10}\left[\frac{d}{d_0}\right] \tag{2.1}$$

$$K(dB) = 20\log_{10}\frac{\lambda}{4\pi d_0} \tag{2.2}$$

โดยที่ P_r คือ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ (dBm)

P_t คือ ความแรงของสัญญาณที่ส่งภาคส่ง (dBm)

n คือ ดรรชนีการสูญเสียเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม

d คือ ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ (m)

d_0 คือ ระยะห่างอ้างอิงในสนามระยะใกล้ของสายอากาศ (m)

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

K คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสายอากาศและการลดทอนเฉลี่ยของช่องความถี่

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่ที่ใช้ทำงาน	2.4 GHz
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	32 mW
ระยะอ้างอิง	1 m.
ดรรชนีการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4

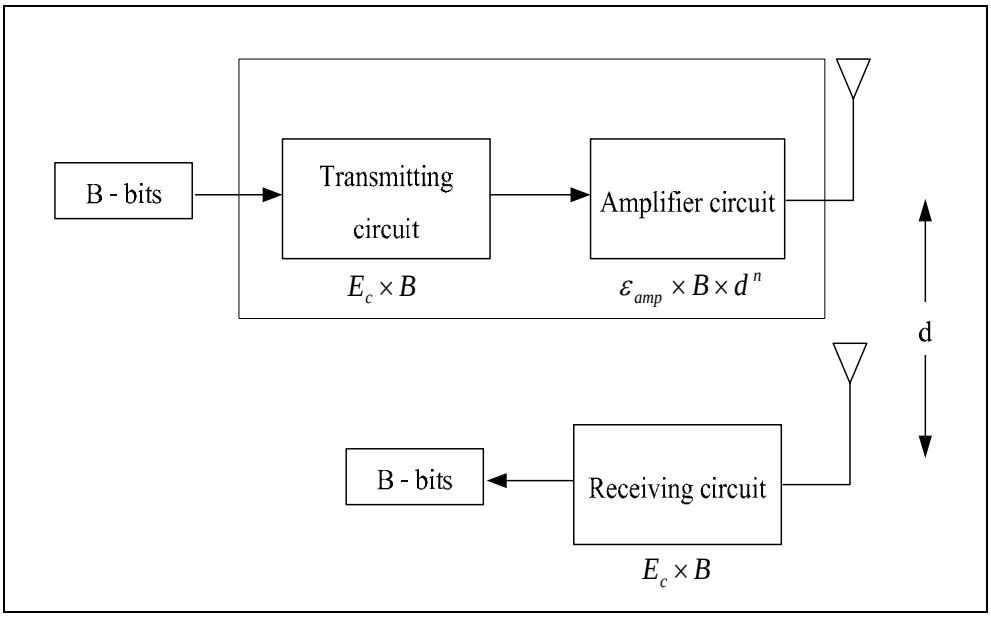
ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โครงสร้างแบบเมช เนื่องจากมีการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ได้มากกว่า 1 โนด และโนดตรวจรู้ยังสามารถรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้อื่น ๆ และทำการส่งข้อมูลต่อให้กับสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอด ในการออกแบบเครือข่ายได้ใช้แบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่าย ในการคำนวณความแรงของสัญญาณเพื่อเป็นการรับประกันการเชื่อมต่อของโนดทุกตัวภายในเครือข่ายและยังคำนึงถึงพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ ดังนั้นจึงมีการนำสถานี

ถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบเครือข่าย โดยกำหนดให้คุณสมบัติของสถานีถ่ายทอดมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และส่งต่อข้อมูลไปยังสถานีฐานเทียบได้กับเป็นอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบ FFD สถานีถ่ายทอดจะทำให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลน้อยลง ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานเครือข่ายยาวนานมากขึ้น

2.7 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ (Energy Consumption Model)

ในการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกำหนดสมมติฐานเกี่ยวกับการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ต่างกันไป สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองวิทยุอันดับหนึ่ง (First Order Radio Model) จากงานวิจัยของ Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishman, H., (2000) ในการคำนวณหาพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการส่งข้อมูล เนื่องจากรูปแบบการใช้พลังงานนี้มีความสะดวกในการคำนวณและยังเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งแบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ได้แสดงดังรูปที่ 2.8

พลังงานของโนดตรวจรู้นั้นมีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นอย่างมาก ถ้าเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีขนาดใหญ่จะทำให้การส่งข้อมูลผ่านระหว่างโนดตรวจรู้ด้วยกันมาก ซึ่งจะทำให้มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้มากตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครือข่ายสั้นลง ตัวอย่างเช่น โนดตรวจรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานมากที่สุด พลังงานของโนดตรวจรู้อาจจะหมดลงก่อนโนดอื่น ๆ เพราะว่าโนดที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานต้องทำหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดอื่น ๆ เพื่อส่งข้อมูลต่อไปให้กับสถานีฐาน ทำให้ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการรับและส่งข้อมูลต่อให้กับสถานีฐาน เป็นเหตุให้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานหมดลงก่อนโนดอื่น ๆ ที่อยู่ภายในเครือข่าย โดยการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้แบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ดังนี้



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้

2.7.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง (Energy consumption for transmitter)

จากรูปแบบการใช้พลังงานจากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าพลังงานในส่วนของภาคส่งนั้นประกอบไปด้วย 2 พจน์ โดยพจน์แรกเป็นพลังงานที่ใช้ไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์และพจน์ที่ 2 เป็นพลังงานที่ใช้ในวงจรขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลไปยังไปปลายทาง โดยที่ E_c เป็นพลังงานที่ใช้ไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ ε_{amp} เป็นพลังงานที่ใช้ในวงจรขยายสัญญาณก่อนส่งออกไปยังภาครับจะเห็นว่าในพจน์ที่ 2 นี้จะมีการพิจารณาระยะห่าง d (เมตร) ระหว่างโนด ถ้าโนดภาครับอยู่ห่างจากโนดที่เป็นภาคส่งมากจะทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการส่งไปให้ถึงภาครับ สำหรับค่า n เป็นดรรชนีของการสูญเสียจากระยะทาง ในการกำหนดค่า n นั้นจะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่เราพิจารณาในการออกแบบ เช่น ในอากาศว่าง ชานเมือง ภายในอาคาร เป็นต้น ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการพลังงานที่ใช้ในภาคส่งได้ดังนี้

$$Tx = (E_c \times B) + (\varepsilon_{amp} \times B \times d^n) \tag{2.3}$$

2.7.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ (Energy consumption for receiver)

เมื่อพิจารณาด้านภาครับจะเห็นว่ามีการใช้พลังงานเพียงแค่ส่วนเดียว คือ พลังงานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (E_c) โดยไม่มีการพิจารณาระยะห่างระหว่างโนดตรวจรู้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 และสามารถเขียนสมการพลังงานที่ภาครับได้ดังนี้

$$Rx = E_c \times B \tag{2.4}$$

จากงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) ได้มีการกำหนดค่าของพลังงานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ $E_c = 1nJ/bit$ และ $\varepsilon_{amp} = 3\,pJ/bit/m^4$ หรืออาจจะมีการกำหนดค่า E_c และ ε_{amp} ขึ้นเอง โดย B คือ จำนวนบิตข้อมูลที่ต้องการส่ง (bits)

ในการหาอายุการใช้งานของเครือข่ายนั้น สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (จูล) กับกระแสไฟฟ้าและแรงดันในช่วงระยะเวลาที่ต้องการ โดยเขียนเป็นสมการดังนี้

$$E = v \times i \times t \quad (joules) \tag{2.5}$$

โดยที่ E คือ พลังงาน (*joules*)

v คือ แรงดันของแหล่งจ่าย (*volt*)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร (*mAH*)

$t_{Lifetime}$ คือ อายุการใช้งานของแหล่งพลังงาน (*Hours*)

ซึ่งหาได้จาก $t_{Lifetime} = \dfrac{\text{Spec. Battery}\,(AH)}{\text{Current of circuit}\,(A)} \quad (Hours)$ (2.6)

ตัวอย่าง กำหนดให้ใช้ถ่านไฟฉาย Panasonic 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน ซึ่งมีความจุ 2850 mAh จงหาอายุการใช้งานของถ่านไฟฉายและพลังงานของถ่านไฟฉาย

- หาอายุการใช้งานของถ่านไฟฉาย

<u>วิธีทำ</u>

$$t_{Lifetime} = \frac{2850mAh}{100mA} = 28.5\ hours$$

- หาพลังงานของถ่านไฟฉาย

วิธีทำ

$$E = v \times i \times t$$

$$E = (6volt \times 100mA) \times 28.5hours$$

$$E = (600mW) \times 102{,}600\,\text{sec}.$$

$$E = 61{,}560\ joules$$

เพราะฉะนั้นถ่านไฟฉายขนาด 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน จะให้พลังงาน 61,560 จูล ตลอดอายุการใช้งาน 28 ชั่วโมง 30 นาที

2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming)

โปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) เป็นคณิตศาสตร์ประยุกต์แขนงหนึ่งที่คิดค้นขึ้น เพื่อแก้ปัญหาให้เป็นไปตามจุดประสงค์ของมนุษย์ โดยมีแนวคิดที่ว่าให้เพียงพออย่างสูงสุดในทรัพยากรที่มีจำกัด สามารถใช้คำนวณเพื่อแก้ปัญหาได้หลายอย่าง รูปแบบหรือโมเดลทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่ใช้แทนปัญหาและหาทางแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด การใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ จึงเป็นหนทางและวิธีการที่เหมาะสมและได้ประโยชน์อย่างยิ่ง ตัวอย่างปัญหา เช่น คำนวณการผลิตสินค้าให้ได้มากที่สุด แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การหาวิธีการเคลื่อนย้ายทหารให้มากที่สุดโดยที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การผลิตสินค้าจำนวนน้อยที่สุด แต่ทำกำไรได้มากที่สุด หรือหาว่า หากบริษัทหนึ่งผลิตสินค้า 2 ประเภท ต้องผลิตอย่างละกี่ชิ้นจึงจะได้กำไรสูงสุด โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดให้ เช่น สภาวะตลอด การขาดแคลนวัตถุดิบ กำลังคน เงินทุน สถานที่ นโยบายขององค์กร ซึ่งการใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นตรงที่ใช้กับการแก้ปัญหาทางด้านอุตสาหกรรมจะต้องเกี่ยวข้องโดยตรงกับวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิต

สุชาติ จันทริกานนท์ (2541) ได้กล่าวถึงการสร้างตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เพื่อให้เข้ากับปัญหาที่ทำการศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ของปัญหา ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดจะอยู่ในรูปของการหาค่าสูงสุด (maximization) หรือค่าต่ำสุด (minimization) ของปัญหาโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ในการค้นหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดที่ต้องการและกำหนดให้คำตอบของปัญหาอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ (linear constraints) ที่ได้ทำการพิจารณา ซึ่งรูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมีโครงสร้างดังนี้

1) สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุน กำไร ฯลฯ เพื่อให้กำหนดเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด (maximize or minimize)

2) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข ในปัญหาหนึ่ง ๆ อาจจะกำหนดตัวแปรได้หลายลักษณะดังนั้นตัวแปรที่ต้องตัดสินใจคือสิ่งที่เราต้องการหาผลลัพธ์ เราต้องทำการระบุหน่วยของตัวแปรเหล่านั้นด้วยเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งคำตอบที่ได้จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกเท่านั้น

3) สมการแสดงขอบข่ายหรือสมการเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งแสดงความจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากร โดยวัตถุประสงค์ของปัญหาจะบรรลุค่าที่สูงที่สุดหรือต่ำที่สุดตามที่ต้องการได้ดีมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของปัญหา เช่น ข้อจำกัดด้านทรัพยากร ความต้องการ นโยบายหรือเงื่อนไขต่าง ๆ ของปัญหาดังนั้นจึงมีการเรียกโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มว่าเป็นตัวแบบที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดในเงื่อนไขบังคับ (constrained optimization model) โดยที่เงื่อนไขบังคับอาจจะอยู่ในรูปสมการหรืออสมการ (inequality) ก็ได้

4) ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่าง ๆ ของรูปแบบแทนระบบต้องมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง (linear form) คือ ตัวแปรทุกตัวในสมการเป้าหมายและสมการหรืออสมการของขอบข่ายจะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเป็นกำลังเดียว (กำลังหนึ่ง)

5) ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (All positive value)

จะเห็นได้ว่าทุกการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มจะมีลักษณะของสมการเงื่อนไขเหมือนกันทั้งหมด คือ เงื่อนไขต้องอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นนั่นคือ ใช้เครื่องหมายเท่ากับ (=) โดยที่ตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1 หรืออยู่ในรูปอสมการเชิงเส้น นั่นคือใช้เครื่องหมายมากกว่าเท่ากับ ($\geq$) หรือน้อยกว่าเท่ากับ ($\leq$) และตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1

รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่พิจารณานั้นเป็นปัญหาลักษณะที่ต้องการหาค่าสูงสุดหรือต้องการหาค่าต่ำสุดโดยเขียนได้ดังนี้ หาค่าสูงสุด หรือ ค่าต่ำสุดของ Maximize หรือ Minimize $z = c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_nx_n$ ภายใต้ข้อจำกัดดังนี้ (Subject to)

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + ... + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + ... + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$x_1, x_2, ..., x_n \geq 0$

โดยที่ x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variable) หรือจำนวนหน่วยของกิจกรรม j ที่ตัดสินใจทำ

c_j คือ ผลตอบแทน (Profit หรือ return) ที่ได้จากการตัดสินใจเลือกหรือต้นทุน (cost) ของตัวแปรตัดสินใจ x_j

a_{ij} คือ จำนวนทรัพยากรชนิดที่ i ส่วนหนึ่งที่ถูกใช้ไปจากจำนวนทรัพยากรชนิด i ทั้งหมดที่มีอยู่ อันเนื่องจากการเลือกตัวแปรตัดสินใจ x_j (Resource consumption rate)

b_i คือ จำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ (Resource) ชนิดที่ i เพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจ

วัตถุประสงค์ในตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม คือ ความต้องการที่จะหาค่าของตัวแปรตัดสินใจ x_j ต่าง ๆ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด โดยที่ตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรจำนวน m ข้อจำกัด ซึ่งหมายถึงการใช้ทรัพยากรไม่เกินปริมาณที่มีอยู่อย่างจำกัดและมีค่ามากกว่าศูนย์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เนื่องจากการหาคำตอบในงานวิจัยนี้ต้องการหาตำแหน่งที่เหมาะสมและจำนวนในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด ซึ่งคำตอบที่ต้องการเป็นเลขจำนวนเต็ม

2.9 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ในปัจจุบันเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (WSN) ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เนื่องจากเป็นเครือข่ายที่มีความยืดหยุ่น ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ไม่แพง เป็นเครือข่ายที่สามารถจัดการตัวเองได้ โดยไม่ต้องมีมนุษย์เข้าไปควบคุมหรือช่วยเหลือ กระจายตัวครอบคลุมบริเวณที่เฝ้าสังเกตเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งโนดตรวจรู้มีขนาดเล็กจึงสามารถฝังตัวในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ง่าย

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบด้วย การกระจายตัวของกลุ่มโนดตรวจรู้ซึ่งมีหน้าที่ในการรับผิดชอบเฝ้าตรวจพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ที่โนดตรวจรู้ครอบคลุม สำหรับการเฝ้าตรวจพารามิเตอร์ต่าง ๆ โนดตรวจรู้มีความสามารถในการสื่อสารไร้สายและมีระบบตรรกะสำหรับการประมวลผลสัญญาณ การจัดการโครงสร้างและการควบคุมการส่งสัญญาณ เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการรวมการชี้ทิศทางพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ แสง และการคำนวณเหตุการณ์เกี่ยวกับแผ่นดินไหว เป็นต้น ความสำเร็จในการพัฒนาเรื่องราคา

ความทนทานขนาดที่เล็กและอุปกรณ์ในการชี้ทิศทางหรือเฝ้าตรวจของโนดตรวจรู้ถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมาก

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้วางอยู่บนข้อบังคับต่าง ๆ เช่น อัลกอริธึมการสร้างเครือข่าย กระบวนการเข้าถึงฐานข้อมูลและความแพร่หลายของระบบปฏิบัติการ นอกจากนี้แล้วทางด้านวิศวกรรมได้มีการพัฒนาเครือข่ายไร้สายและเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายไปพร้อม ๆ กัน โดยหน้าที่พื้นฐานของเครือข่ายไร้สายโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน จากหนังสือของ Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. (2007) ได้ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ดังนี้

1) การตัดสินใจค่าของพารามิเตอร์จากตำแหน่งที่กำหนดให้ ตัวอย่างการใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายด้านเกษตรกรรม เป็นการนำระบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมาพัฒนาใช้ในด้านการเกษตร โดยให้ความสำคัญกับการตรวจสอบสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเป็นกรดหรือด่าง ที่ส่งผลกระทบต่อพืชผลที่ปลูกไว้ โดยเฉพาะพืชผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ตัวอย่างเช่น ไร่องุ่น สวนยางพารา เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้ต่างชนิดกัน ความแตกต่างของโนดแต่ละชนิด คือ อัตราการแซมปลิ้งและรัศมีการทำงานของโนดตรวจรู้

2) การเฝ้าตรวจเหตุการณ์ที่สนใจและประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ด้านความปลอดภัย โดยใช้โนดตรวจรู้ในการค้นหาและบอกจำนวนวัตถุและสสารมีพิษที่สามารถระเบิดได้ เช่น สารปรอท สารตะกั่วและก๊าซพิษ โดยสามารถบอกได้ตั้งแต่ระดับต่ำสุดที่จะป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบกับคนส่วนใหญ่ได้หรือการเตือนภัยธรรมชาติที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แผ่นดินไหว การเตือนภัยสึนามิ การแจ้งเตือนเหตุอุทกภัย การตรวจจับการเคลื่อนไหวของยานพาหนะและทำการประมาณค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ สำหรับการใช้งานในด้านสุขภาพ โดยนำโนดตรวจรู้ไปติดตามร่างกายของผู้ป่วยเพื่อตรวจวัดความดันโลหิต อุณหภูมิของร่างกายและส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปยังศูนย์สังเกตอาการ เมื่อมีความผิดปกติทางร่างกายเกิดขึ้นหน่วยกู้ชีพก็สามารถเข้าไปช่วยเหลือได้ทันท่วงที

3) การจัดกลุ่มของวัตถุและติดตามความเคลื่อนไหวของวัตถุ ตัวอย่างเช่น การจำแนกประเภทของยานพาหนะที่อยู่บนถนน เช่น รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสารประจำทาง รถบรรทุก เป็นต้น

4) การติดตามวัตถุ ตัวอย่างเช่น เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสำหรับการใช้งานด้านการทหาร โดยจะนำโนดตรวจรู้ไปวางไว้หรือทำการโปรยไปในพื้นที่ต่าง ๆ ที่เราสนใจ อาจเป็นพื้นที่ที่เข้าถึง

ยากหรือแถบชายแดนที่มีความอันตราย เพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวของศัตรูที่แอบบุกรุกเข้ามา หรืออาจใช้ในการตรวจหาวัตถุระเบิดก็ได้และในด้านอุตสาหกรรม จะเป็นการส่งสัญญาณของโนดตรวจรู้เพื่อจับเวลาการสั่นสะเทือน ใช้บ่งชี้หาชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือโครงสร้างอันหนึ่งอันใดที่มีค่าใกล้จุดล้มเหลว (Point of Failure) และถึงเวลาที่จะต้องซ่อมแซมหรือจัดหามาทดแทน เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณ

สำหรับความสำเร็จในการพัฒนาเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีการพิจารณาเรื่องของขนาด ราคา และพลังงานของโนดตรวจรู้น้อยลงแต่จะให้ความสำคัญกับความฉลาดที่เพิ่มมากขึ้น โดยต่อไปในอนาคตอาจจะมีการทำงานร่วมกันของโนดตรวจรู้ต่างชนิดกันหรือการรวมเทคโนโลยีไร้สายข้างเคียงเข้าด้วยกัน แนวโน้มของการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายและเครือข่ายไร้สายประกอบด้วย (1) ความสามารถในการตอบสนองต่อสารพิษตัวใหม่ ระเบิดหรือแม้แต่การเปลี่ยนแปลงด้านชีววิทยา (2) ความว่องไวในการตรวจวัดที่เพิ่มขึ้น ความเร็ว ความทนทานเพิ่มขึ้นและความผิดพลาดในการแจ้งเตือนลดลง (3) ความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่เพิ่มขึ้น เช่น มีการทำงานของเครือข่ายแบบอัตโนมัติ ภายใต้สภาวะที่ซับซ้อนทางสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ประเด็นหลักในการพัฒนามีจุดมุ่งหมายที่จะลดขนาดของโนดตรวจรู้เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน ซึ่งขนาดที่เล็กลงนั้นจะส่งผลต่อแหล่งพลังงานของโนดตรวจรู้เล็กลงตามไปด้วยทำให้มีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะทำการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยพิจารณาเงื่อนไขด้านพลังงานของโนดตรวจรู้

บทที่ 3
แนวคิดและเทคนิคในการออกแบบวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

หลังจากได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 มาแล้ว จะเห็นว่าเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว การตรวจสอบการรั่วไหลของสารเคมีอันตราย การควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารและการควบคุมเครื่องจักรกลภายในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย 3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จะกล่าวถึงหลักการและสมมุติฐานในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 3.2 การกำหนดปัญหาของการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย อธิบายถึงวัตถุประสงค์ในการออกแบบรวมทั้งเงื่อนไขที่เป็นข้อจำกัดในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ 3.4 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 3.5 ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE

3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

เนื่องจากเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่ยืดหยุ่นและโนดตรวจรู้มีขนาดเล็ก ทำให้ในปัจจุบันเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจึงได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้กล่าวในบทที่ 2 นั้น ประกอบด้วยสถานีฐานและโนดตรวจรู้ โดยโนดตรวจรู้มีหน้าที่ในการชี้ทิศทางข้อมูลและนำข้อมูลที่ได้ชี้ทิศทางส่งไปยังสถานีฐาน สำหรับสถานีฐานมีหน้าที่รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลต่อไป การชี้ทิศทางและการรับและส่งข้อมูลจะเกิดขึ้นระหว่างโนดตรวจรู้ด้วยกันหรือโนดตรวจรู้กับสถานีฐานโดยตรงซึ่งขึ้นอยู่กับรัศมีการทำงานของโนดตรวจรู้และสิ่งกีดขวาง สำหรับโนดตรวจรู้ที่อยู่ไกลจากสถานีฐานการส่งข้อมูลจะต้องทำการส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้ตัวอื่น ๆ เพื่อส่งต่อให้ถึงสถานีฐานซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของโนดตรวจรู้ตัวอื่น เนื่องจากโนดตรวจรู้มีขนาดเล็ก แบตเตอรี่ที่ใช้ก็มีขนาดเล็กเช่นกัน ทำให้โนดตรวจรู้มีอายุการใช้งานที่จำกัด ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครือข่าย จากการศึกษางานวิจัยของ Turjman, A., Hassanein, F.M., H.S., and Ibnkahla, M.A. (2009) เราจึงเลือกใช้นิยามของอายุการใช้งานเครือข่ายที่ว่า “ ถ้าโนดตรวจรู้ตัวใดตัวหนึ่งหมดอายุการใช้งานจะถือว่าอายุการใช้งานของเครือข่ายสิ้นสุดลง

เช่นกัน" เพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จากข้อจำกัดทางด้านพลังงานของโนดตรวจรู้นั้นทำให้เราสนใจศึกษาและหาวิธีใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ให้มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการหาวิธีเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายโดยหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน โดยพิจารณาจำนวนโนดที่ต้องการส่งข้อมูลผ่านหรือการจัดสรรปริมาณข้อมูลและอัตราเร็วการส่งข้อมูลที่เหมาะสมและการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐาน เพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่าย แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดในการออกแบบโดยการนำสถานีถ่ายทอดมาติดตั้งเพื่อลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอดจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ เมื่อโนดตรวจรู้ต้องการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานแทนที่จะส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้อื่น ๆ แต่จะทำการส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอด ทำให้เป็นการลดพลังงานในการรับและส่งข้อมูลต่อของโนดตรวจรู้ ซึ่งจะส่งผลต่ออายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานมากขึ้น

3.2 การกำหนดปัญหาของการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ได้รับการพิสูจน์ให้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่ามีประโยชน์และสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ได้ดีและกว้างขวางที่สุดตัวแบบหนึ่งก็คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming model) ลักษณะปัญหาที่ใช้สามารถทำให้อยู่ในรูปการโปรแกรมเชิงเส้นและใช้หลักการวิเคราะห์มีมาช้านานและยิ่งในปัจจุบันเราจะเห็นได้ว่าความจำเป็นในภาคธุรกิจที่ขยายตัวและมีความซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ที่ต้องการการตัดสินใจที่ถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการใช้การตัดสินใจที่ถูกต้องโดยมีตัวแบบทางคณิตศาสตร์ช่วยเป็นกรอบในพิจารณาเพราะถ้าหากตัดสินใจผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถส่งผลให้เกิดความสูญเสียอย่างมหาศาลและเนื่องจากประสิทธิภาพในตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการช่วยแก้ไขปัญหาในหลาย ๆ ด้าน ประกอบกับการพัฒนาเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งทั้งทางด้านความรวดเร็วในการประมวลผลและราคาที่ต่ำลง จึงส่งผลให้การพัฒนาในการคิดค้นและพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการแก้ไขปัญหาของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นมีมากมายและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถช่วยขยายขอบเขตของปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้น

ในการออกแบบและวางแผนเครือข่าย เราได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ สมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข สมการวัตถุประสงค์ คือ สมการที่เราต้องการหาคำตอบ เช่น การหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน การหาอายุการใช้งานสูงสุดของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายหรือปริมาณข้อมูลสูงสุดที่โนดตรวจรู้สามารถส่ง

ได้ในระยะเวลาหนึ่ง ๆ เป็นต้น ส่วนสมการเงื่อนไข คือ สมการที่เป็นข้อจำกัดของสมการวัตถุประสงค์ เช่น อัตราการไหลของข้อมูล โดยอัตราการไหลเข้าโนดตรวจรู้ต้องเท่ากับอัตราการไหลออกจากโนดตรวจรู้หรือพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายต้องมีค่าไม่เกินพลังงานเริ่มต้นของโนดตรวจรู้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดปัญหา โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุด สำหรับสมการเงื่อนไข ได้แก่ การรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้และ/หรือโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอดและ/หรือโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน โดยสัญญาณที่รับได้ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่รับได้ที่โนดใด ๆ (threshold) การป้องกันการสูญเสียการไหลข้อมูล (flow conservation) สถานีถ่ายทอดต้องรองรับปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่โนดตรวจรู้สร้างขึ้นได้อย่างเพียงพอ พลังงานในการใช้รับและส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งานต้องมีค่าไม่เกินพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ หลังจากที่เราทำการกำหนดปัญหาแล้วจะทำการแปลงปัญหาดังกล่าวให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.3

3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะทำการนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยเริ่มจากการกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ทางกายภาพที่นำมาวิเคราะห์อันได้แก่ ชนิดของอุปกรณ์ที่กระจายอยู่ในพื้นที่ทดลอง ปริมาณงานที่โนดตรวจรู้สร้างขึ้น ระดับของจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่รับได้ อายุการใช้งานของเครือข่าย รวมถึงพลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้เป็นต้น

ในกระบวนการการแก้ไขปัญหาการออกแบบด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยทำการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด โดยเลือกจากจำนวนและตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถมั่นใจได้ว่าคำตอบที่ได้ คือ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดและจำนวนของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดและมีการรับประกันได้ว่าโนดตรวจรู้ทุกโนดในเครือข่ายสามารถสร้างการเชื่อมต่อได้ทุกโนดและยังรับประกันได้ว่าปริมาณข้อมูลจากโนดตรวจรู้ส่งไปถึงสถานีฐานอย่างครบถ้วน โดยโนดตรวจรู้มีพลังงานที่เพียงพอตลอดอายุการใช้งานเครือข่าย โดยผลที่ได้จากการออกแบบจะอยู่ในข้อจำกัดของการออกแบบเครือข่ายที่กำหนดไว้

เมื่อทำการกำหนดปัญหาได้แล้ว ต่อไปเราทำการแปลงเป็นสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้สะดวกและประหยัดเวลาในการออกแบบและวางแผนเครือข่าย โดยนิยามตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบดังนี้

เซตตัวแปร :

J คือ เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้

I คือ เซตของโนดตรวจรู้

M คือ เซตของสถานีฐาน

ตัวแปรตัดสินใจ :

x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j

s_{ik} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปโนดตรวจรู้ k ; $i,k \in I, i \neq k$ (*bits*)

r_{ij} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปสถานีถ่ายทอด j ; $j \in J$ (*bits*)

b_{im} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน m ; $m \in M$ (*bits*)

ตัวแปรค่าคง :

C_{t_SN} คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ (*joules/bit*)

C_{t_RS} คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีถ่ายทอด (*joules/bit*)

C_{t_BS} คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน (*joules/bit*)

C_r คือ พลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ (*joules/bit*)

P_{t_SN} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้รับได้จากโนดตรวจรู้อื่น ๆ (*dBm*)

P_{t_RS} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่สถานีถ่ายทอดรับได้จากโนดตรวจรู้ (*dBm*)

P_{t_BS} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่สถานีฐานรับได้จากโนดตรวจรู้ (*dBm*)

P_{ik} คือ ความแรงของสัญญาณที่โนดตรวจรู้ k รับได้จากโนดตรวจรู้ i ; $i,k \in I$ (*dBm*)

P_{ij} คือ ความแรงของสัญญาณที่สถานีถ่ายทอด j รับได้จากโนดตรวจรู้ i ; $i \in I, j \in J$ (*dBm*)

P_{im} คือ ความแรงของสัญญาณที่สถานีฐาน m รับได้จากโนดตรวจรู้ i ; $i \in I$ and $m \in M$ (*dBm*)

V คือ ปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่สถานีถ่ายทอดรองรับได้ (*bits*)

T คือ อายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (*sec*)

E_i คือ พลังงานเริ่มต้นของโนดตรวจรู้ i ; $i \in I$ (*joules*)

g_i คือ อัตราการสร้างข้อมูลของโนดตรวจรู้ i ; $i \in I$ ($bit/\sec$)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่มีวัตถุประสงค์ในการหาจำนวนที่น้อยที่สุดของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งตัวแปรตัดสินใจออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรก เป็นการระบุค่าของตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ให้อยู่ในรูปของจำนวนไบนารี คือ 0 หรือ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดหรือมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและตัวแปรตัดสินใจกลุ่มที่สอง คือ ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้แต่ละโนดจะส่งให้โนดอื่น ๆ ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 จากการกำหนดค่าตัวแปรตัดสินใจดังกล่าว ดังนั้นในการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้การพิจารณาหลักการของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมากำหนดปัญหา โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้กำหนดให้ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังนี้

3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ต้องการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดและจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งน้อยที่สุดด้วย สามารถเขียนเป็นสมการ ดังนี้

$$Minimixe \quad \sum_{\forall j \in J} x_j \tag{3.1}$$

3.3.2 สมการเงื่อนไข

สมการที่เป็นข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุด มีด้วยกันทั้งหมด 7 สมการ โดยแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโนดใด ๆ

ภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1. การเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โดยที่ความแรงของสัญญาณที่โนดตรวจรู้ k รับได้จากโนดตรวจรู้ i ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

$$s_{ik}(P_{ik} - P_{T1}) \geq 0 \quad \forall i,k \in I, i \neq k \tag{3.2}$$

2. การเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด โดยที่ความแรงของสัญญาณที่สถานีถ่ายทอด *j* รับได้จากโนดตรวจรู้ *i* ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

$$r_{ij}(P_{ij} - P_{T2}) \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \tag{3.3}$$

3. การเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน โดยที่ความแรงของสัญญาณที่สถานีฐาน *m* รับได้จากโนดตรวจรู้ *i* ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

$$b_{im}(P_{im} - P_{T3}) \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M \tag{3.4}$$

ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณที่โนดตรวจรู้รับจากโนดตรวจรู้ (P_{ik}) สถานีถ่ายทอดรับได้จากโนดตรวจรู้ (P_{ij}) และสถานีฐานรับได้จากโนดตรวจรู้ (P_{im}) ต้องมีค่ามากกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ ซึ่งความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขด้านการรองรับปริมาณข้อมูลภายในเครือข่าย

1. สมดุลการไหลของข้อมูล คือ ปริมาณข้อมูลที่ไหลเข้าโนดตรวจรู้ต้องเท่ากับปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งออก ซึ่งปริมาณข้อมูลที่รับมาจะประกอบด้วยข้อมูลที่โนดตรวจรู้สร้างขึ้นตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายและปริมาณข้อมูลที่รับมาจากโนดตรวจรู้อื่น ๆ ปริมาณข้อมูลที่ไหลออกประกอบด้วยปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งไปยังโนดตรวจรู้อื่น ๆ หรือส่งไปยังสถานีถ่ายทอด หรือส่งไปยังสถานีฐาน

$$(T * g_i) + \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} = \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} \quad \forall i \in I \tag{3.5}$$

2. การรองรับปริมาณข้อมูลของสถานีถ่ายทอด ปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ส่งมาให้กับสถานีถ่ายทอดต้องมีค่าไม่เกินกว่าปริมาณข้อมูลที่สถานีถ่ายทอดสามารถรองรับได้

$$\sum_{\forall j \in J} r_{ij} \leq Vx_j \quad \forall i \in I \tag{3.6}$$

3. ผลรวมปริมาณข้อมูลของโนดตรวจรู้ทั้งหมดที่อยู่ในเครือข่ายต้องส่งให้กับสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐาน เงื่อนไขข้อนี้เป็นการป้องกันข้อมูลสูญหายระหว่างการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐาน

$$\sum_{\forall i \in I} (T * g_i) = \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall i \in I} r_{ij} + \sum_{\forall m \in M} \sum_{\forall i \in I} b_{im} \tag{3.7}$$

4. ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i ส่งให้โนดตรวจรู้ k ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$s_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \in I, i \neq k \tag{3.8}$$

5. ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i ส่งให้สถานีถ่ายทอด j ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$r_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \tag{3.9}$$

6. ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i ส่งให้สถานีฐาน m ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$b_{im} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M \tag{3.10}$$

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขทางข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้

1. พลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ต้องมีค่าไม่เกินพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้มีอยู่ ซึ่งการใช้พลังงานแบ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดอื่น ๆ และพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ไปยังโนดตรวจรู้ด้วยกันเองหรือไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐานนั้นต้องมีค่าไม่เกินพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้

$$\sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} C_r + \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} C_{t_sn} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} C_{t_RS} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} C_{t_Bs} \leq E_i \quad \forall i \in I \tag{3.11}$$

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยได้ทำการพิจารณาตัวอย่างในการออกแบบในพื้นที่ขนาด 500 ตารางเมตร ซึ่งแสดงในบทที่ 4 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเครือข่ายเพื่อใช้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) เราจึงกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบที่มีค่าเหมือนกัน ได้แก่ อัตราการสร้างข้อมูลของโนดตรวจรู้เท่ากับ 2.5 kbps และค่าพลังงานเริ่มต้นของโนดตรวจรู้เท่ากับ 2000 joules และจากการศึกษาอุปกรณ์โนดตรวจรู้ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่าย

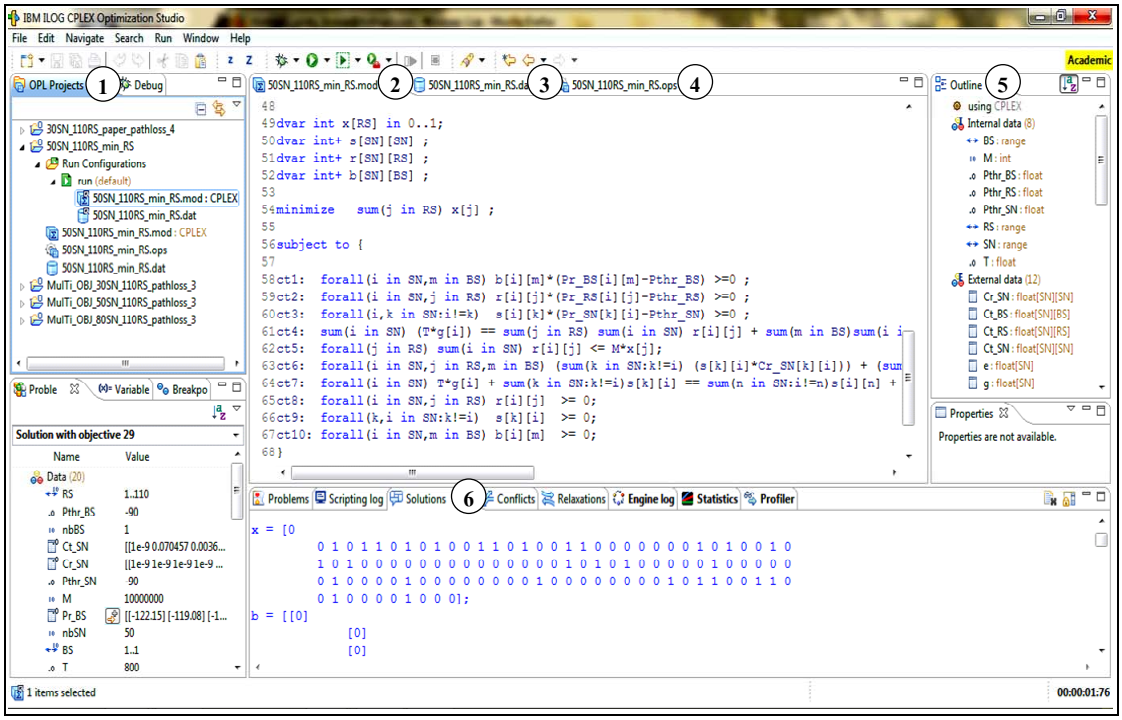
พารามิเตอร์	ค่า
จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ (threshold)	-90 dBm
อัตราเร็วการสร้างข้อมูลของโนดตรวจรู้	2.5 kbps
ความถี่ที่ใช้ทำงาน	2.4 GHz
พลังงานเริ่มต้นของโนดตรวจรู้	2000 joules
ปริมาณข้อมูลสูงสุดที่สถานีถ่ายทอดรองรับได้	1,000,000 bits
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	32 mW
ระยะอ้างอิง	1 m.
ดรรชนีการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4

จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1 จะใช้ในการออกแบบการทดลองที่ 4.1 และ 4.2 เท่านั้น สำหรับการทดลองที่ 4.3 และ 4.4 ได้มีการเปลี่ยนค่าพลังงานเริ่มต้นของโนดตรวจรู้และปริมาณข้อมูลสูงสุดที่สถานีถ่ายทอดรองรับได้เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง โดยได้คำนวณพลังงานเริ่มต้นจากถ่านไฟฉายขนาด 1.5 volt จำนวน 4 ก้อน ในหัวข้อ 2.7 ซึ่งได้ค่าพลังงานเท่ากับ 61,560 joules และปริมาณข้อมูลสูงสุดที่สถานีถ่ายทอดรองรับได้ต้องมีค่าเพียงพอซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10,000,000 bits

3.4 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

สำหรับเครื่องมือประยุกต์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันมีมากมาย ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ง่าย มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย สำหรับแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ในโปรแกรมแกรม ILOG OPL IDE มีฟังก์ชันของการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีซิมเพล็กซ์อัลกอริธึม (Simplex Algorithms) ดังนั้นจึงเป็นเรื่องง่ายที่จะนำไปใช้ในการหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยจากการศึกษา IBM ILOG OPL IDE TUTORIAL, (2009) ได้อธิบายรายละเอียดของหน้าต่างโปรแกรม ILOG OPL IDE ดังรูปที่ 3.1

1. หมายเลข 1 (OPL Project) แสดงไฟล์โครงการ (Project) ที่เปิดอยู่ สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) ดาต้าไฟล์ (*.dat) และ เซตติ้งไฟล์ (*.ops)



รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE

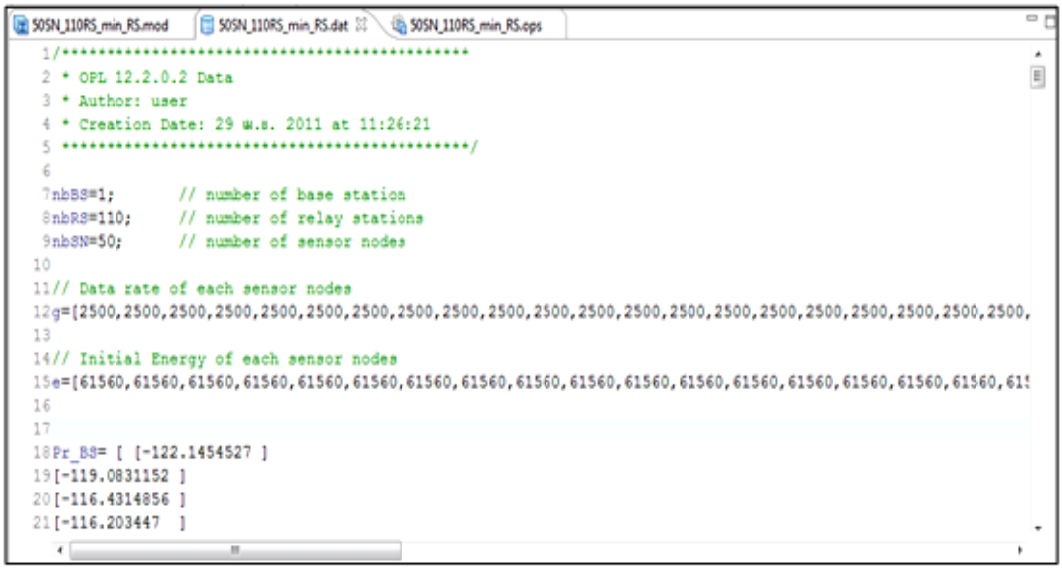
2. หมายเลย 2 (Model file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข

3. หมายเลข 3 (Data file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียวและในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ 3.2

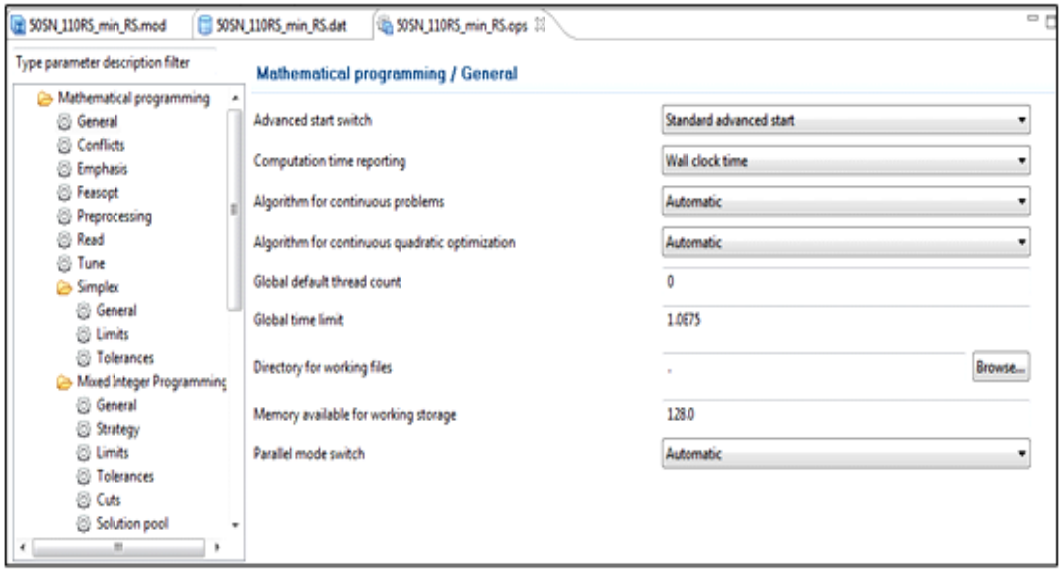
4. หมายเลข 4 (Setting file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้โครงการ เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (Memory) ที่ใช้ในการคำนวณ จำนวนการวนซ้ำ (iteration) ของซิมเพล็กซ์อัลกอริธึมและจัดการเกี่ยวกับข้อมูลล็อก (Log data) ที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 3.3

5. หมายเลข 5 (Outline view) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของโมเดลไฟล์ ดาต้าไฟล์และเซตติ้งไฟล์ จัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบและค้นหา

6. หมายเลข 6 (Solutions log area) แสดงคำตอบที่โปรแกรมทำการคำนวณพบและพิจารณาว่าน่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Feasible solution) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้เรื่อย ๆ จนกระทั่งโปรแกรมทำการคำนวณพบคำตอบที่ดีที่สุด (Final Solution)



รูปที่ 3.2 Data file editing area



รูปที่ 3.3 Setting file editing area

คำสั่งของโปรแกรม ILOG OPL IDE ที่แสดงในตารางที่ 3.2 เป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มจากหัวข้อที่ 3.3 เพื่อคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากการที่ได้อธิบายรายละเอียดโปรแกรมมาพอสังเขป ILOG OPL IDE ถือว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับสมการคณิตศาสตร์ ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้ยังต้องศึกษาหลักการและกระบวนการใช้เครื่องมือนี้อย่างละเอียดใน ในคู่มือสำหรับอ้างอิงจาก http://www.ibm.com โดยศึกษาการเขียนตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความถูกต้องของคำตอบที่ดีที่สุดตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

ตารางที่ 3.2 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม
เป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE

สมการจากหัวข้อ 3.3	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
x_j	dvar int x[RS] in 0..1;
s_{ik}	dvar int+ s[SN][SN] ;
r_{ij}	dvar int+ r[SN][RS] ;
b_{im}	dvar int+ b[SN][BS] ;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective Function
สมการ(3.1)	Minimize sum(j in RS) x[j]
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(3.2)	ct1 : forall(i,k in SN:i!=k) s[i][k]*(Pr_SN[k][i]-Pthr_SN) >=0 ;
สมการ(3.3)	ct2 : forall(i in SN,j in RS) r[i][j]*(Pr_RS[i][j]-Pthr_RS) >=0
สมการ(3.4)	ct3 : forall(i in SN,m in BS) b[i][m]*(Pr_BS[i][m]-Pthr_BS) >=0 ;
สมการ(3.5)	ct4 : forall(i in SN) T*g[i] + sum(k in SN:k!=i)s[k][i] == sum(n in SN:i!=n)s[i][n] + sum(j in RS) r[i][j]+sum(m in BS) b[i][m];
สมการ(3.6)	ct5 : forall(j in RS) sum(i in SN) r[i][j] <= V*x[j];
สมการ(3.7)	ct6 : sum(i in SN) (T*g[i]) == sum(j in RS) sum(i in SN) r[i][j] + sum(m in BS)sum(i in SN) b[i][m]
สมการ(3.8)	ct7 : forall(k,i in SN:k!=i) s[k][i] >= 0;
สมการ(3.9)	ct8 : forall(i in SN,j in RS) r[i][j] >= 0;
สมการ(3.10)	ct9 : forall(i in SN,m in BS) b[i][m] >= 0;
สมการ(3.11)	ct 10 : forall(i in SN,j in RS,m in BS) (sum(k in SN:k!=i) (s[k][i]*Cr_SN[k][i])) + (sum(n in SN:n!=i) (s[i][n]*Ct_SN[i][n])) + (sum(j in RS) (r[i][j]*Ct_RS[i][j])) + (sum(m in BS)

3.5 ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE

ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด พื้นที่ทดสอบมีขนาด 100 ตารางเมตร โดยกำหนดให้มีโนดตรวจรู้ในเครือข่าย 5 โนด สถานีฐาน 1 สถานี จำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 6 สถานี ทำการส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแสดงดังรูปที่ 3.4 สำหรับความซับซ้อน (ความยาก) ของปัญหาการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายของตัวอย่างนี้พิจารณาได้จากจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาคำตอบ (y) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของปัญหา โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.12) ซึ่งทำการพิสูจน์ไว้ในภาคผนวก ก. โดยขนาดของปัญหาขึ้นอยู่กับจำนวนโนดตรวจรู้ (a) จำนวนสถานีฐาน (b) และจำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)

$$y = a(a + b + c - 1) + c \tag{3.12}$$

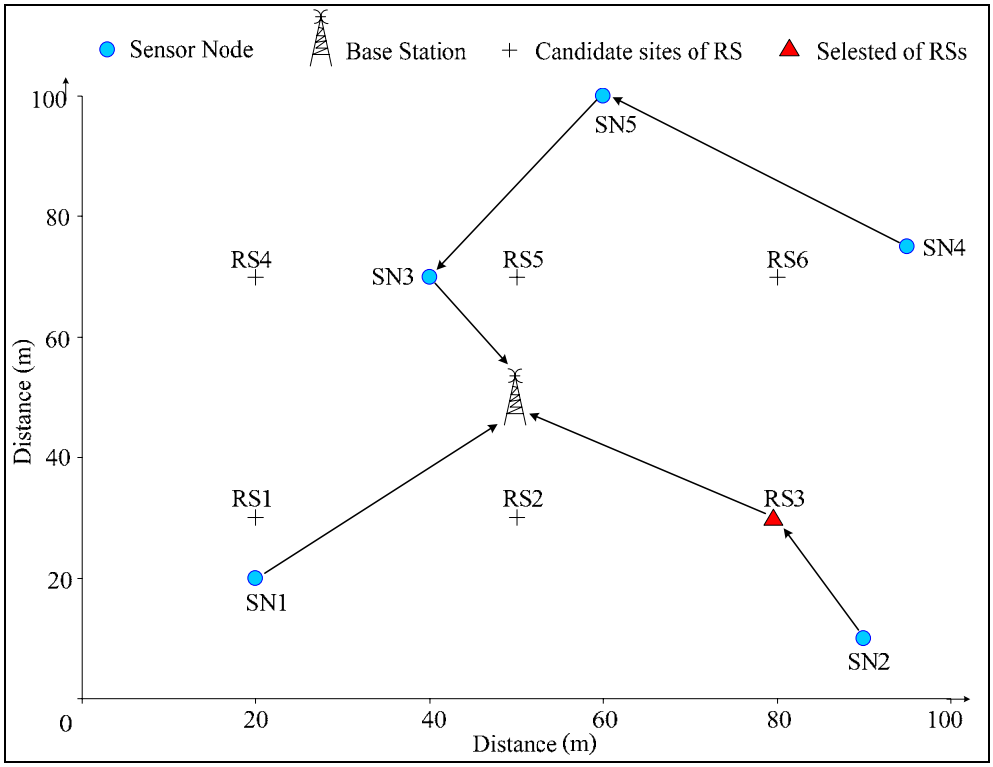
จากตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายที่พิจารณานี้ a=5, b=1 และ c=6 ดังนั้น y = 61 เราสามารถวิเคราะห์ความซับซ้อนของปัญหาการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยพิจารณาจากปัญหาการออกแบบขนาดต่าง ๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อขนาดของปัญหา (นั่นคือ a , b, c) เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นแต่ขนาดของตัวแปรตัดสินใจจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่จะทำให้ปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้สมการคณิตศาสตร์มาใช้ในการออกแบบเครือข่ายและใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE มาช่วยในการหาคำตอบ

ในการหาคำตอบให้กับตัวแปรตัดสินใจของปัญหานี้ได้ใช้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายดังกล่าวในหัวข้อ 3.3 ได้ถูกแปลงเป็นโปรแกรม ILOG OPL IDE แสดงดังรูปที่ 3.5 อินพุตในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในโปรแกรม ILOG OPL IDE แสดงดังรูปที่ 3.6

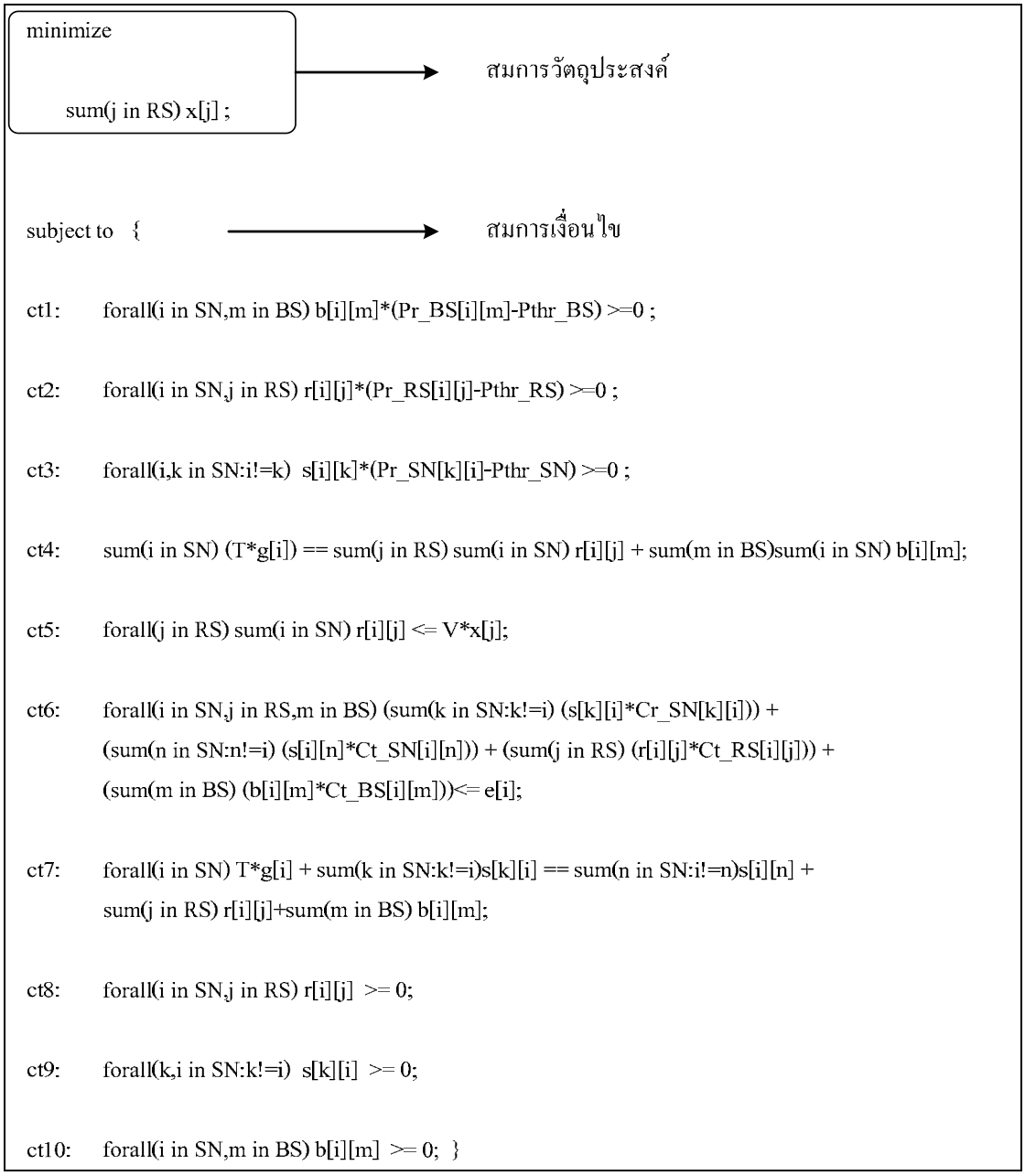
ตัวอย่างเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรม ILOG OPL IDE ได้แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งประกอบด้วยจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้ง 1 สถานี โดยเลือกติดตั้งตำแหน่งที่ 3 และมีการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดที่ 1 ไปยังสถานีฐาน โนดที่ 2 ไปยังสถานีถ่ายทอดตำแหน่งที่ 3 และโนดที่ 4 ส่งข้อมูลไปโนดที่ 5 และจากโนดที่ 5 ไปยังโนดที่ 3 และจากโนดตรวจรู้ที่ 3 ไปยังสถานีฐานโดยตรง ซึ่งปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งแสดงดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบเครือข่ายและจำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

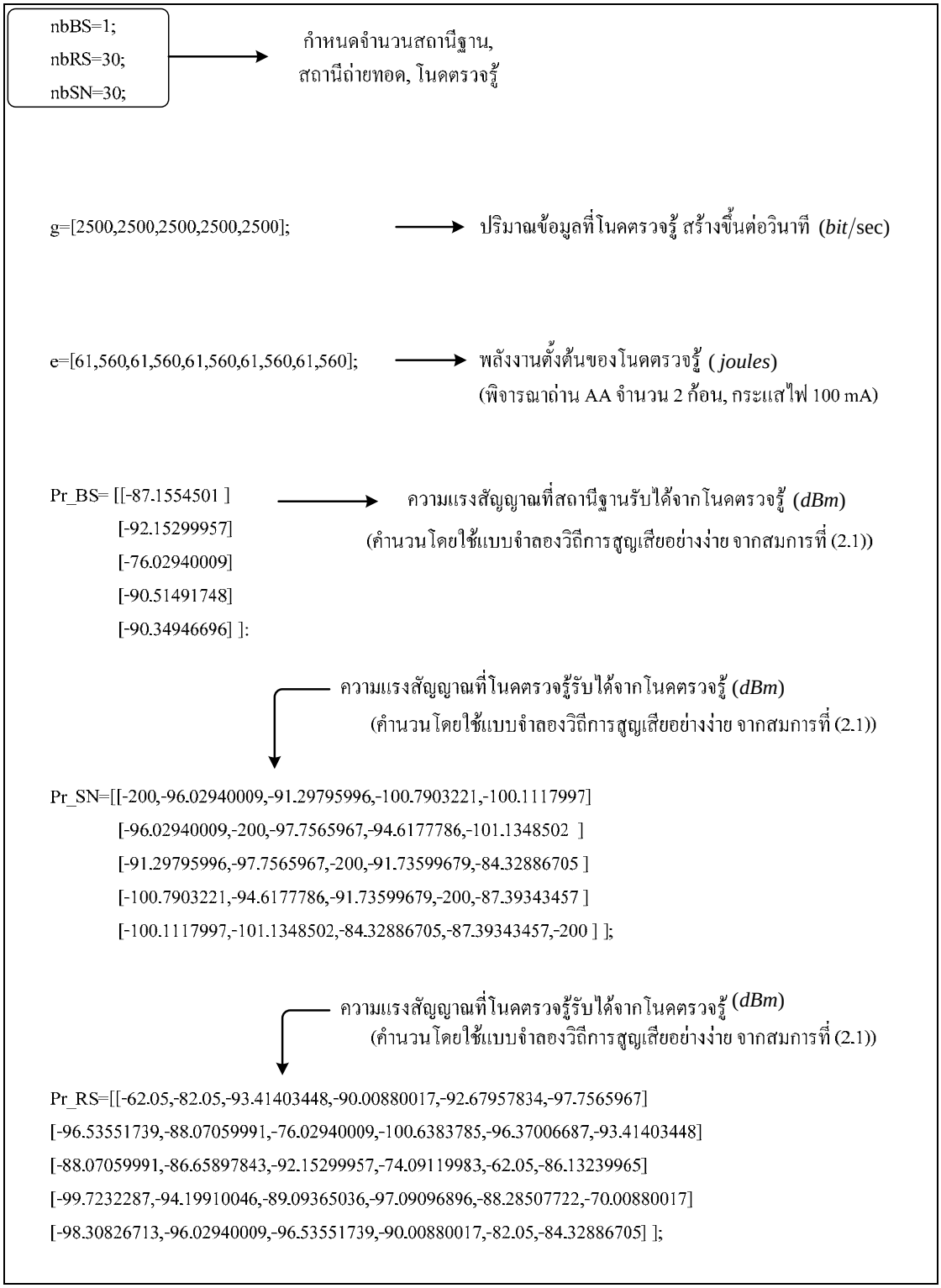
โนดตรวจรู้(a)	สถานีฐาน(b)	จำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)	จำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด (y)
5	1	6	61
5	3	6	71
5	1	10	85
50	1	6	2,806
50	3	6	2,906
50	6	10	3,260



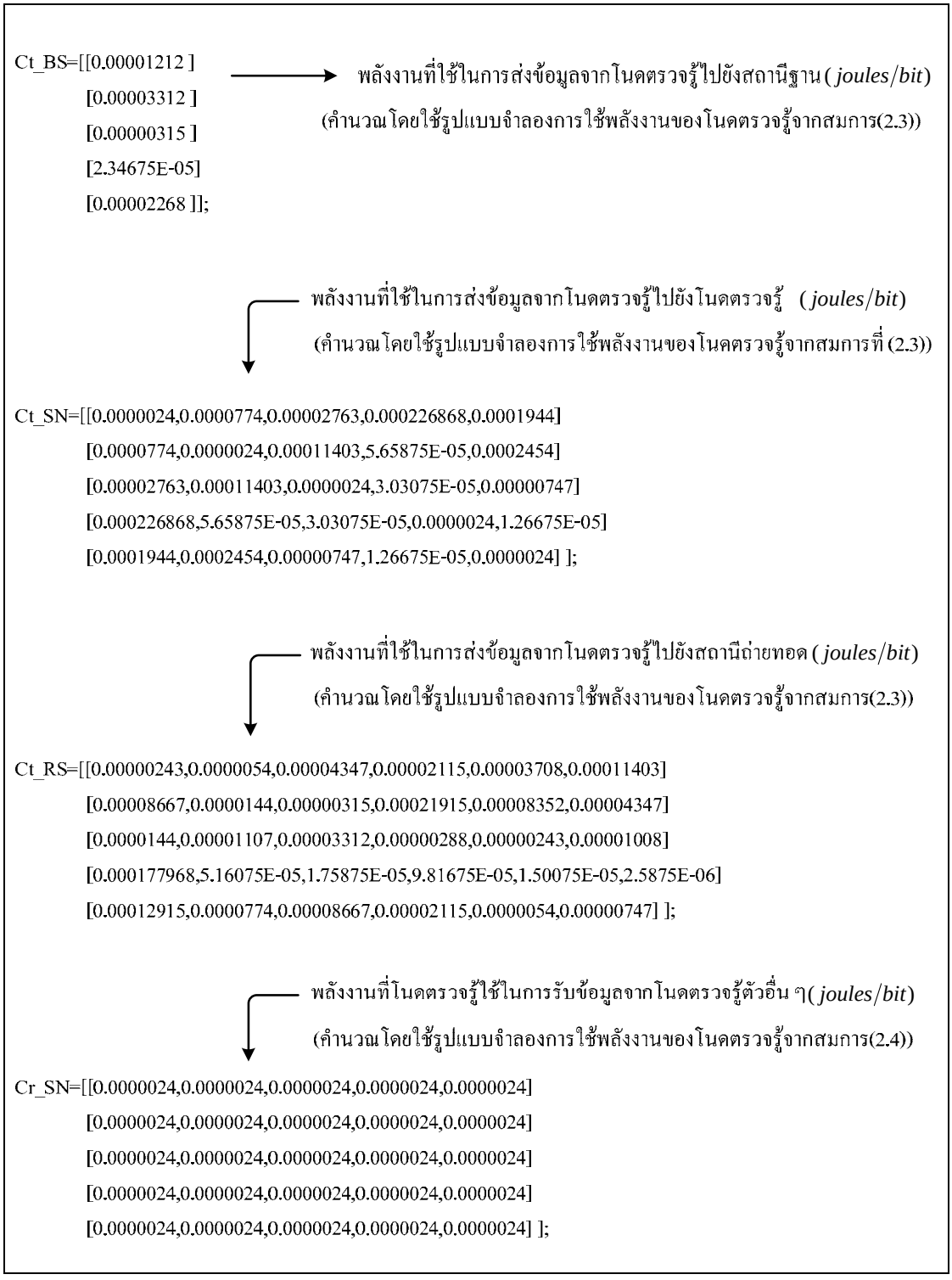
รูปที่ 3.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบด้วย 1 สถานีฐาน โนดตรวจรู้ 5 โนด และตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้จำนวน 6 สถานี



รูปที่ 3.5 สมการคณิตศาสตร์ในโปรแกรม ILOG OPL IDE



รูปที่ 3.6 อินพุตของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม ILOG OPL IDE



รูปที่ 3.6 อินพุตของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม ILOG OPL IDE (ต่อ)

Final solution with objective = 1: ⟶ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้ง

x = [0 0 1 0 0 0]; ⟶ ตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด

b = [[2000000] ⟶ ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งให้สถานีฐาน
[0]
[6000000]
[0]
[0]];

r = [[0 0 0 0 0 0] ⟶ ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งให้สถานีถ่ายทอด
[0 0 2000000 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0]];

s =[[0 0 0 0 0] ⟶ ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งให้โนดตรวจรู้
[0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 2000000]
[0 0 4000000 0 0]];

รูปที่ 3.7 เอาต์พุตจากโปรแกรม ILOG OPL IDE

สำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ILOG OPL IDE โดยมี CPLEX 5.2 optimization solver ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.4 เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบ และใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 1.83GHz ขนาด 2 GB RAM ในการประมวลผล ในส่วนของการทดลองวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้มีการสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้และพล็อตกราฟผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Microsoft Excel ซึ่งเป็นซอฟท์แวร์ที่ใช้ง่ายมีประสิทธิภาพและนิยมอย่างแพร่หลาย

บทที่ 4
การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เนื้อหาก่อนหน้านี้ได้เสนอแนวคิดของงานวิจัยโดยหาจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนและสมการที่ได้ยังสามารถประหยัดเวลาในการออกแบบและวางแผนเครือข่าย การทดลองในบทนี้ได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ รวมไปถึงจำนวนและตำแหน่งของโนดตรวจรู้ด้วยว่าจะส่งผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้อย่างไร

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายและวิเคราะห์เครือข่ายที่ถูกออกแบบโดยการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ หาอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายต้องยาวนานมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้โดยไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด สำหรับงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด โดยโนดตรวจรู้สามารถใช้งานได้ตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย ภายใต้เงื่อนไขซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (1) เงื่อนไขในการรับประกันการเชื่อมสัญญาณต่อระหว่างโนดตรวจรู้ด้วยกันเองหรือโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอดหรือโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน (2) เงื่อนไขด้านการรองรับปริมาณข้อมูลภายในเครือข่าย และ (3) เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3

ในบทที่ 4 นี้ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็นดังนี้ หัวข้อ 4.1 การออกแบบเครือข่ายโดยเพิ่มตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้เพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ หัวข้อ 4.2 การออกแบบเครือข่ายโดยเพิ่มขนาดของเครือข่ายเพื่อศึกษาผลกระทบเมื่อจำนวนโนดตรวจรู้เพิ่มขึ้น หัวข้อ 4.3 การออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งที่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด หัวข้อ 4.4 การออกแบบเครือข่ายโดยใช้วิธีการกำหนดตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ที่แตกต่างกัน หัวข้อ 4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานในทางปฏิบัติและในทางทฤษฎี

4.1 การออกแบบเครือข่ายโดยมีการเพิ่มตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้เพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้

ดังที่ได้กล่าวถึงหลักการใช้พลังงานภายในเครือข่าย ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพเราจึงนำสถานีถ่ายทอดมาช่วยในการรับข้อมูลและส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐาน

สำหรับการออกแบบนี้ก็เพื่อศึกษาผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุดและเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนและตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ โดยมีพื้นที่ทดสอบขนาด 500 ตารางเมตร ซึ่งบริเวณพื้นที่ทดสอบประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานีและมีโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) โดยมีการกระจายตัวของโนดตรวจรู้และตำแหน่งของสถานีฐาน ดังรูปที่ 4.1 ในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบเครือข่ายโดยมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนและตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ที่แตกต่างกันดังนี้ 30 50 และ 99 ตำแหน่ง ซึ่งมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยมีการใช้แบบจำลองการใช้พลังงานในการส่งและรับข้อมูลของงานวิจัย Heinzelman, W. and Chandrakasan, A., (2000) และงานวิจัยของ Yong, F., Zhang, X., Shihonh, D., and Dong, W. (2006) มาใช้ในการคำนวณพลังงานของการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลคำนวณจากสมการที่ (2.3) และพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลคำนวณจากสมการที่ (2.4)

ความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received signal strength) ณ โนดตรวจรู้ สถานีฐาน และสถานีถ่ายทอด ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่าย จากสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นการคำนวณความแรงสัญญาณที่รับได้เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้ทำการออกแบบนั้นได้ออกแบบตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และได้กำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบดังตารางที่ 3.1 ส่วนจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่ทำให้โนดตรวจรู้สามารถเชื่อมต่อสื่อสารกันได้นั้นมีค่าเท่ากับ -90 dBm

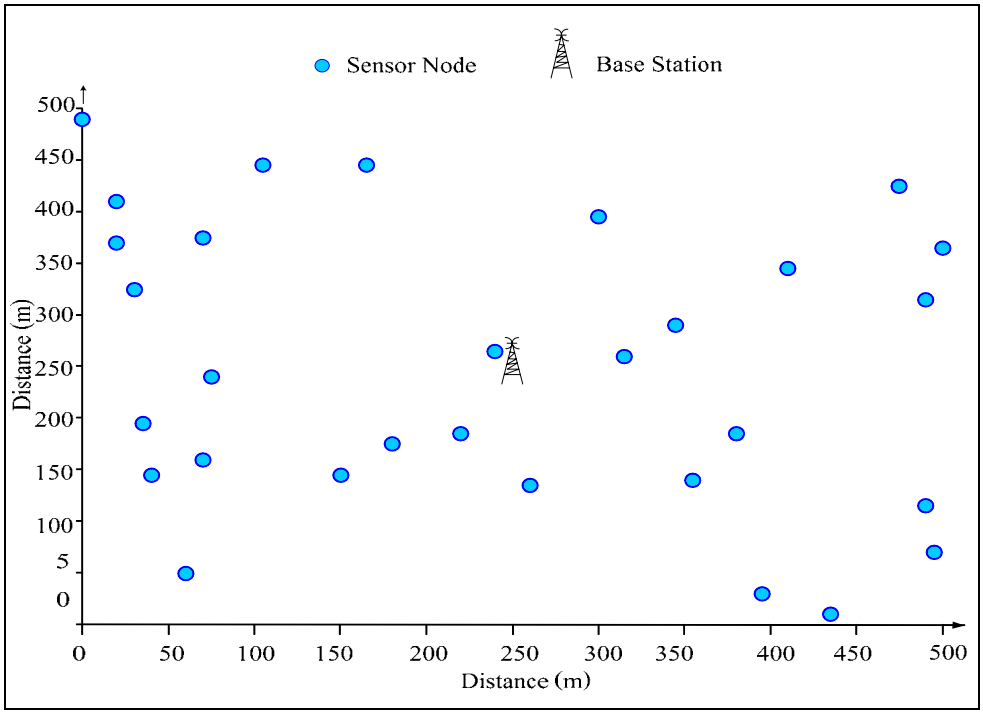
สำหรับการออกแบบการทดลองที่ 1 ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยได้ทำการหาอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดของเครือข่ายจากงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) เพื่อหาปริมาณข้อมูลที่เหมาะสมในการส่ง ภายใต้เงื่อนไขพลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัด

ซึ่งอายุการใช้งานที่หาได้นั้นมีค่าเท่ากับ 800 วินาทีและนำค่าที่ได้นี้ไปเป็นอายุการใช้งานของเครือข่ายในการออกแบบการทดลองที่ 2-4

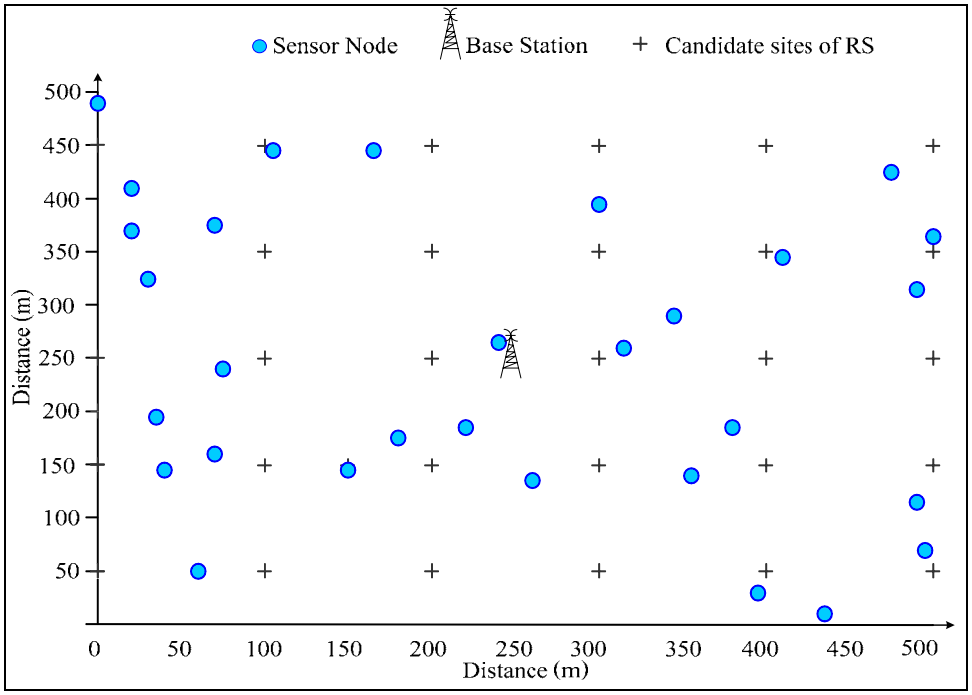
ในการออกแบบการทดลองที่ 2-4 ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนและตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ที่แตกต่างกันดังนี้ 30 50 และ 99 ตำแหน่ง ซึ่งมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ทดสอบ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยตำแหน่งของโนดตรวจรู้และสถานีฐานเป็นตำแหน่งเดิมเหมือนการทดลองที่ 1 และได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายดังตารางที่ 3.1 หลังจากนั้นทำการแก้ปัญหาการออกแบบเครือข่ายโดยใช้รูปแบบการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งใช้โปรแกรม ILOG-OPL development studio โดยมี CPLEX 5.2 optimization solver และใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 1.83 GHz ขนาด 2 GB RAM ในการประมวลผลเพื่อหาคำตอบ

ผลการทดลองที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานต้องทำการรับส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้หลายโนดกว่าจะถึงสถานีฐานทำให้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของโนดตรวจรู้ที่อยู่ระหว่างทางและโนดตรวจรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานพลังงานจะหมดลงก่อนโนดอื่น ๆ เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดอื่น ๆ และรวมถึงข้อมูลของโนดตัวนั้นเองด้วย จากการนิยามอายุการใช้งานของเครือข่ายสำหรับการทดลองนี้ คือ เมื่อพลังงานของโนดตรวจรู้โนดใดโนดหนึ่งหมดลง ถือว่าอายุการใช้งานของเครือข่ายหมดลงด้วยเช่นกัน

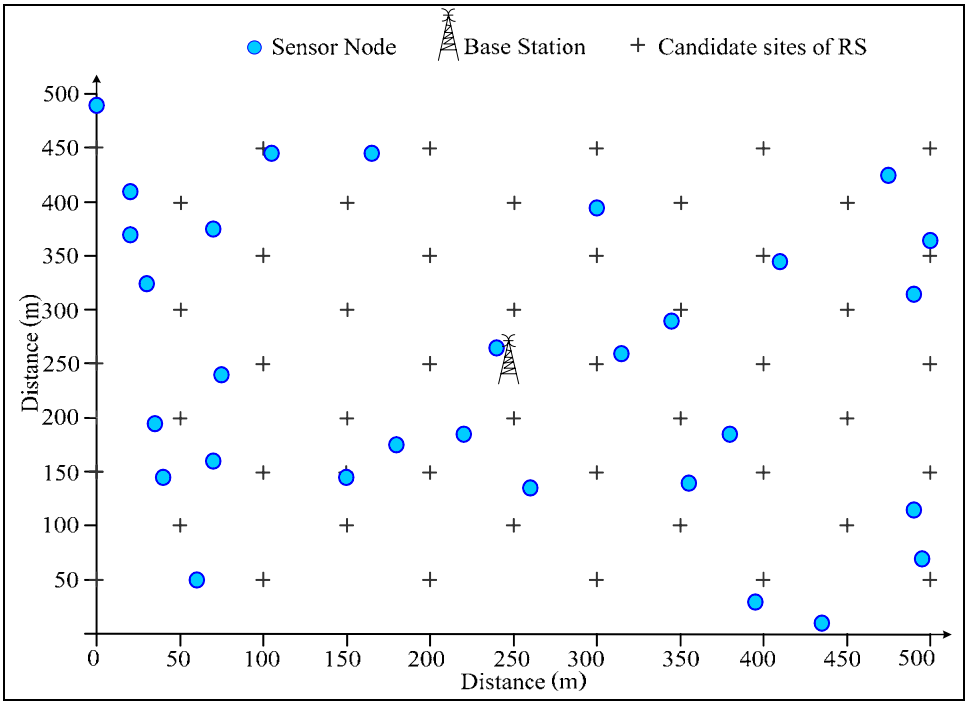
จากตารางที่ 4.1 ได้แสดงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้งภายในพื้นที่ทดสอบ สำหรับการทดลองที่ 1 ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเลย ซึ่งมีการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ผ่านโนดตรวจรู้หรือส่งไปยังสถานีฐานโดยตรง แต่การทดลองที่ 2-4 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งเป็น 17 16 และ 13 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6-4.8 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งลดลงเนื่องจากการทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด เมื่อมีจำนวนและตำแหน่งให้เลือกติดตั้งมากขึ้นทำให้การออกแบบนั้นตอบสนองกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามถ้ามีจำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากจะทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่



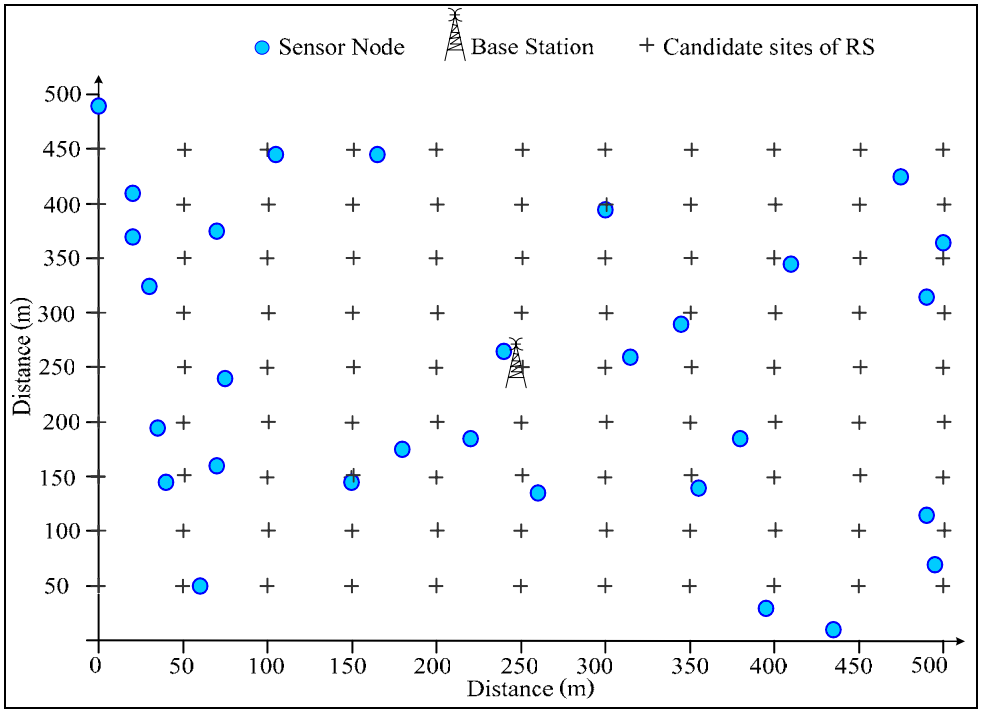
รูปที่ 4.1 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (BS=1, SN=30)



รูปที่ 4.2 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 30 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.3 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 50 ตำแหน่ง



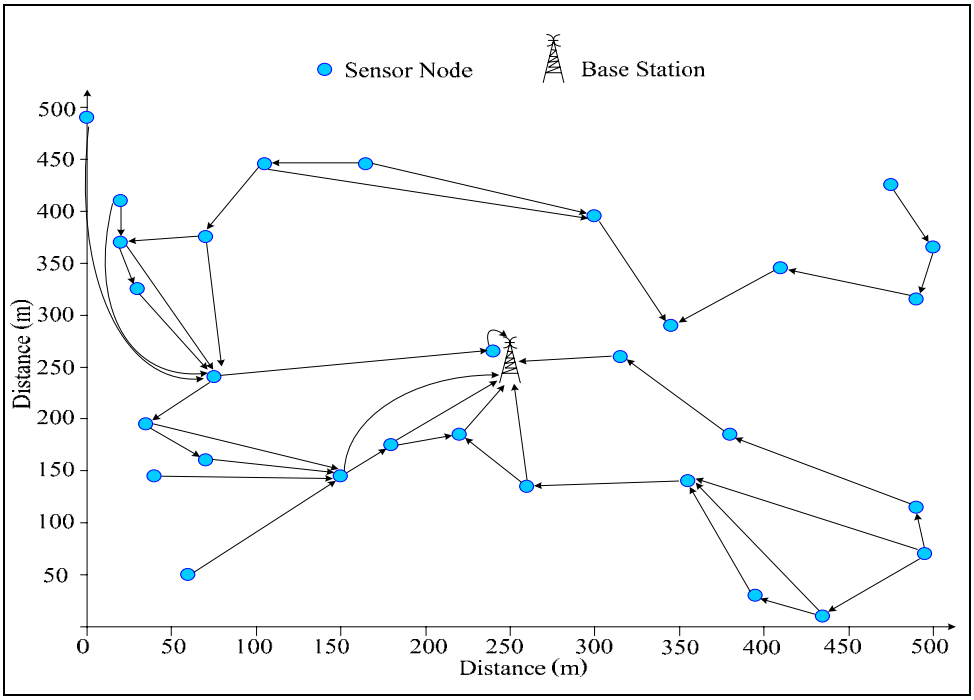
รูปที่ 4.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 99 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4.1 จำนวนสถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งในพื้นที่ทดสอบในหัวข้อ 4.1

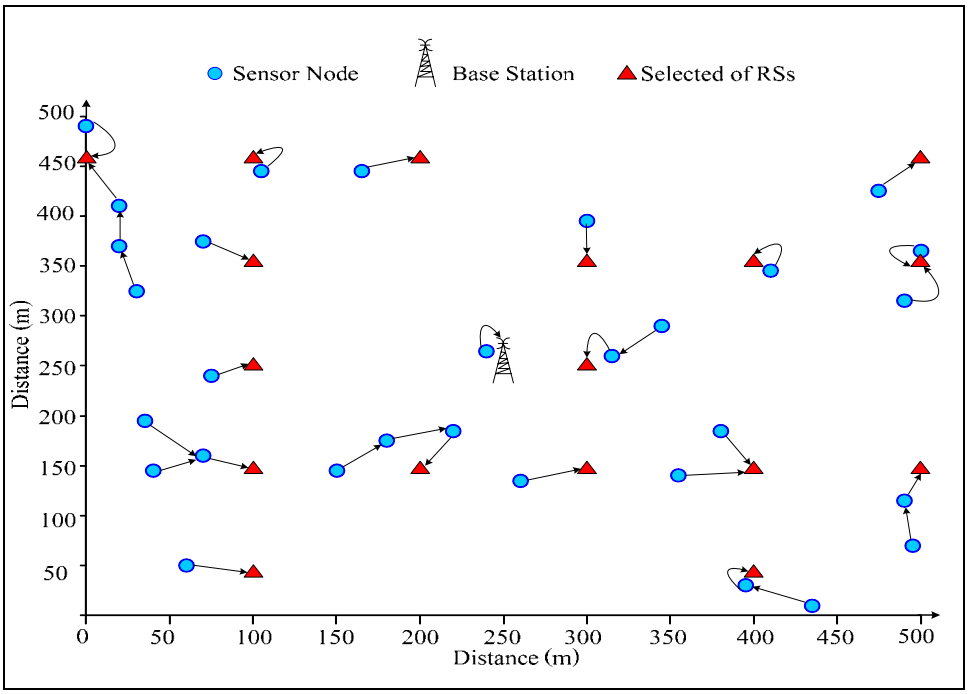
การทดลองที่	จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้ง
1	0
2	17
3	16
4	13

จากตารางที่ 4.2 เป็นการสรุปพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย จะเห็นว่าการทดลองที่ 1 มีการใช้พลังงานสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2-4 ทั้งนี้เพราะว่าการทดลองที่ 1 ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจึงทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน โดยมีการรับและส่งข้อมูลผ่านระหว่างโนดตรวจรู้ด้วยกันจำนวนมาก ในกรณีนี้มีสมมุติฐานว่าไม่มีการจำกัดรัศมีในการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นรัศมีการทำงานขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ไปในการทดลองที่ 2-4 ที่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้น จะเห็นว่าในการทดลองที่ 4 มีการใช้พลังงานสูงสุด เนื่องมาจากมีจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งน้อยที่สุด ซึ่งทำให้โนดตรวจรู้ต้องใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานมาก แต่อย่างไรก็ตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในการทดลองที่ 4 สามารถรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐานและ/หรือสถานีถ่ายทอดและ/หรือโนดตรวจรู้ด้วยกัน รวมไปถึงโนดตรวจรู้มีพลังงานเพียงพอตลอดอายุการใช้งาน

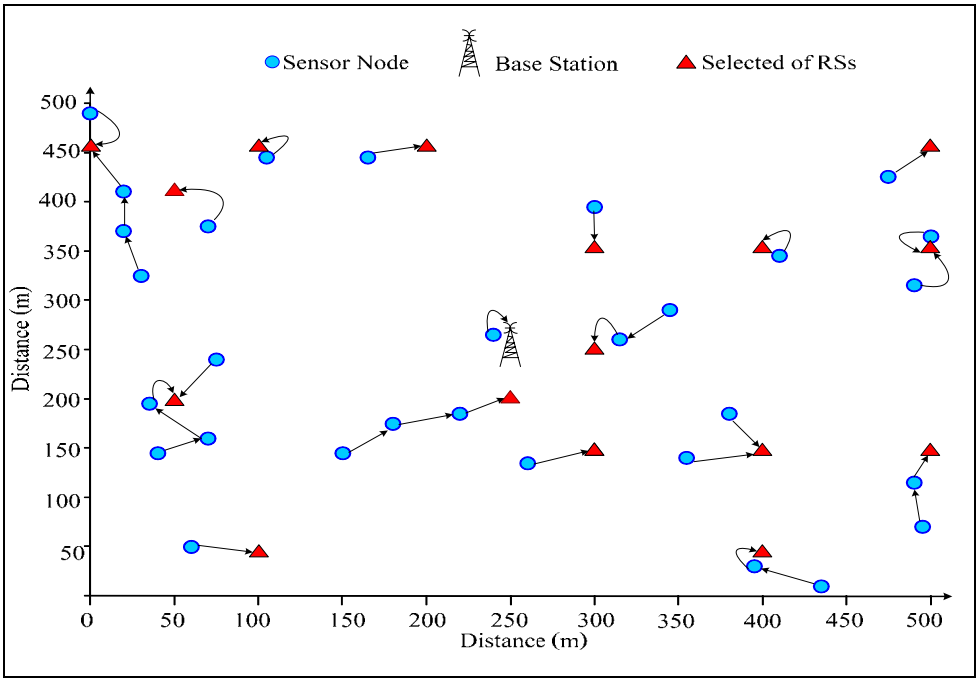
จากตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานที่เหลืออยู่ของโนดตรวจรู้ จะเห็นว่าในการทดลองที่ 2-4 นั้นมีพลังงานเหลือมากกว่าการทดลองที่ 1 เนื่องจากว่าการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้น้อยลงเพราะโนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลให้กับสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งแทน ทำให้การรับส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้น้อยลงจึงทำให้พลังงานของโนดตรวจรู้เหลือมากกว่าการทดลองที่ 1 ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้นและในการทดลองที่ 1 นั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงและมีโนดตรวจรู้ที่เหลือพลังงานน้อยกว่า 1 จูล มากถึง 56.67 เปอร์เซ็นต์



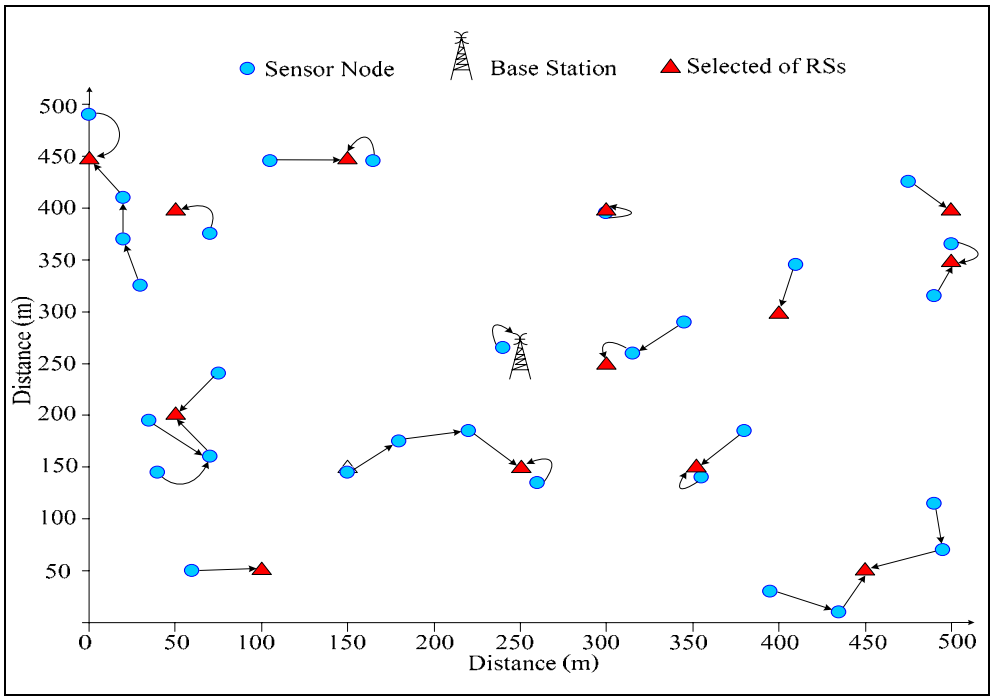
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 17 โนด



รูปที่ 4.7 ผลการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 16 โนด



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 13 โนด

ตารางที่ 4.2 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย ค่าเฉลี่ยของพลังงานโนดตรวจรู้แต่ละโนดใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดลอง	พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล)	ค่าเฉลี่ยของพลังงานโนดตรวจรู้แต่ละโนดใช้ไป (จูล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
การทดลองที่1	47763.446	1592.115	682.139
การทดลองที่2	1483.274	49.442	23.851
การทดลองที่3	566.598	18.886	17.921
การทดลองที่4	837.257	27.909	25.359

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของพลังงานโนดตรวจรู้แต่ละโนดที่เหลืออยู่ พลังงานที่เหลือมากที่สุดและน้อยที่สุดของโนดตรวจรู้ เปอร์เซ็นต์ของจำนวนโนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล

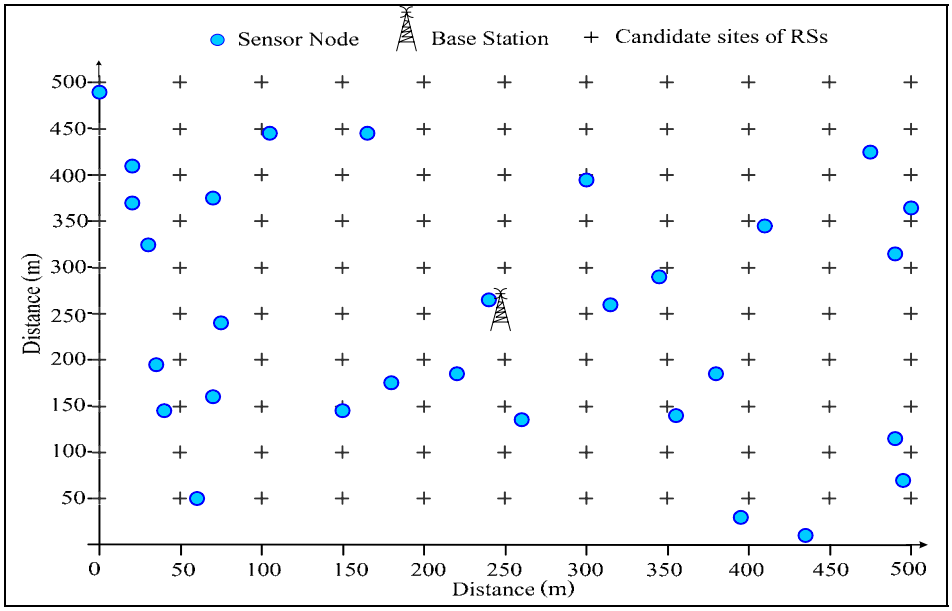
การทดลอง	ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่โนดตรวจรู้แต่ละโนดคงเหลืออยู่ (จูล)	พลังงานที่คงเหลือสูงสุด (จูล)	พลังงานที่คงเหลือน้อยที่สุด (จูล)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวนโนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล
การทดลองที่1	407.885	1999.16	0.000001	56.67
การทดลองที่2	1981.56	1999.98	1927.83	0
การทดลองที่3	1981.11	1999.98	1927.80	0
การทดลองที่4	1972.09	1999.99	1910.73	0

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้แสดงผลการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในพื้นที่ทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้และอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยมีการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดสื่อสารภายในเครือข่ายและกำหนดให้มีการส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่องและได้กำหนดตำแหน่งของสถานีฐานและโนดตรวจรู้ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในการทดลองที่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดทำให้การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ลดลงและพลังงานที่ยังคงเหลืออยู่ของโนดตรวจรู้มีมากกว่า

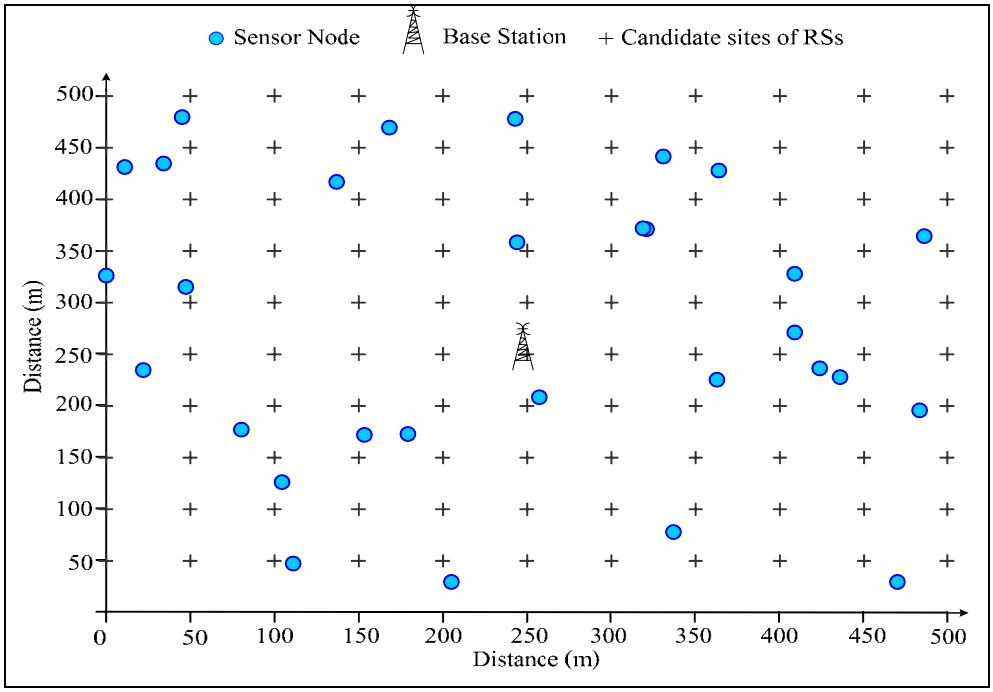
การทดลองที่ไม่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนโนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล ก็มีน้อยกว่าด้วยเช่นกัน

4.2 การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเครือข่ายเพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งที่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด

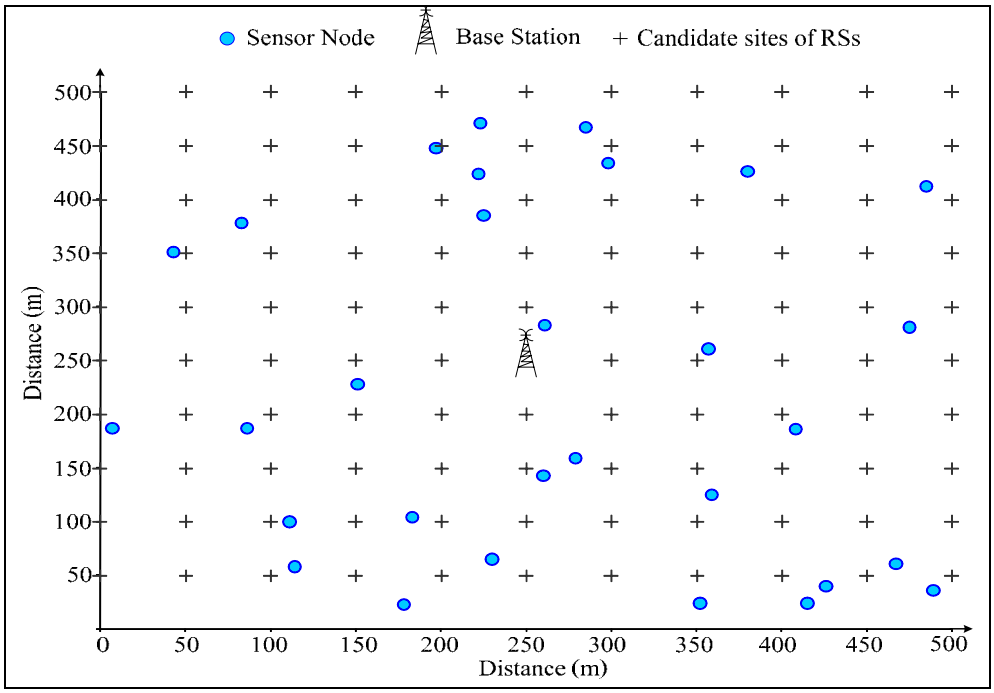
สำหรับหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด เมื่อภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีตำแหน่งและจำนวนของโนดตรวจรู้เปลี่ยนแปลงไป โดยมีพื้นที่ทดสอบขนาด 500 ตารางเมตร บริเวณพื้นที่ทดสอบประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานี ตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้จำนวน 110 ตำแหน่ง มีการเพิ่มจำนวนโนดตรวจรู้เป็น 30 50 และ 80 โนด ดังการทดลองที่ 5-7 ตามลำดับ ซึ่งมีการกระจายตัวของโนดตรวจรู้แบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ทดสอบและในการออกแบบการทดลองนี้ได้มีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.9-4.17 ตามลำดับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ได้จากการทดลอง โดยแต่ละครั้งของการทดลองได้ทำการสุ่มตำแหน่งของโนดตรวจรู้ใหม่ทุกครั้งและได้กำหนดอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายให้มีค่าเท่ากับ 800 วินาทีเท่ากันทุกการทดลอง สำหรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบมีค่าดังตารางที่ 3.1



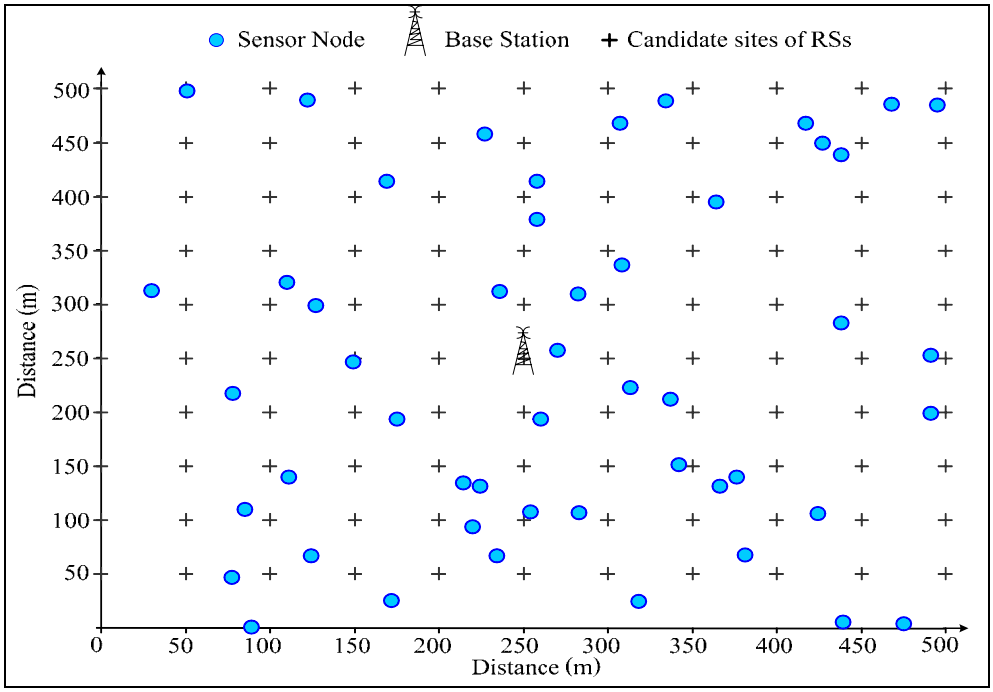
รูปที่ 4.9 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด ครั้งที่ 1



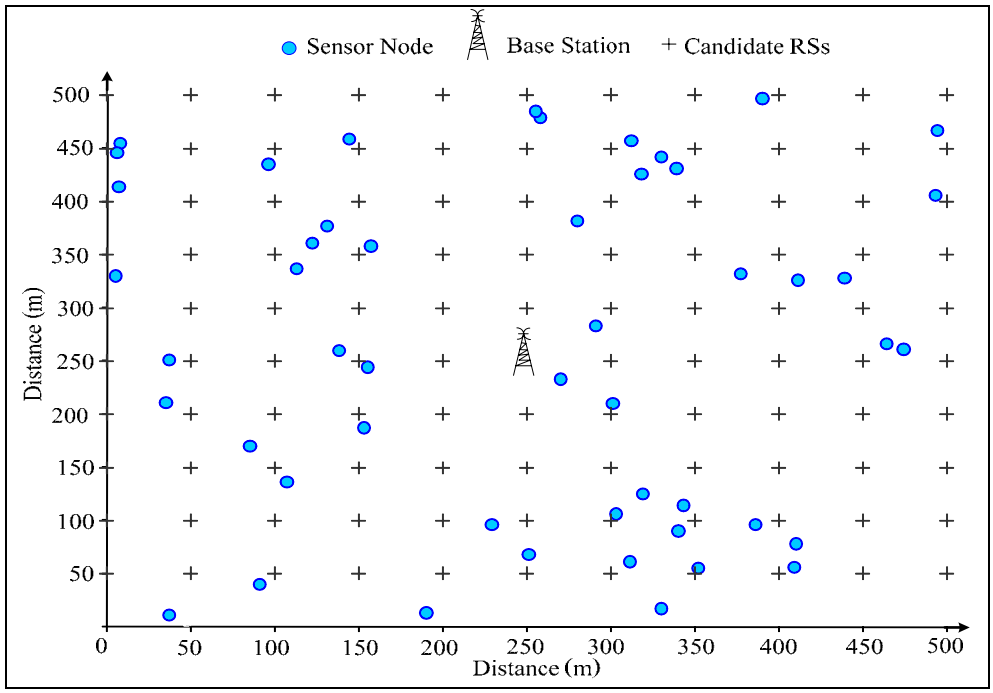
รูปที่ 4.10 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด ครั้งที่ 2



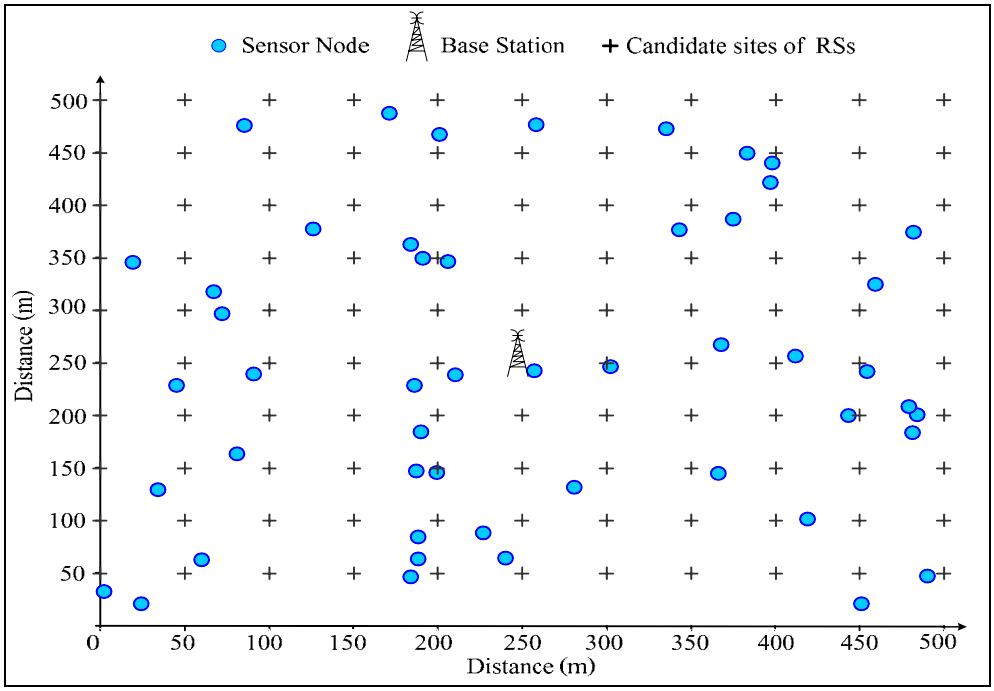
รูปที่ 4.11 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด ครั้งที่ 3



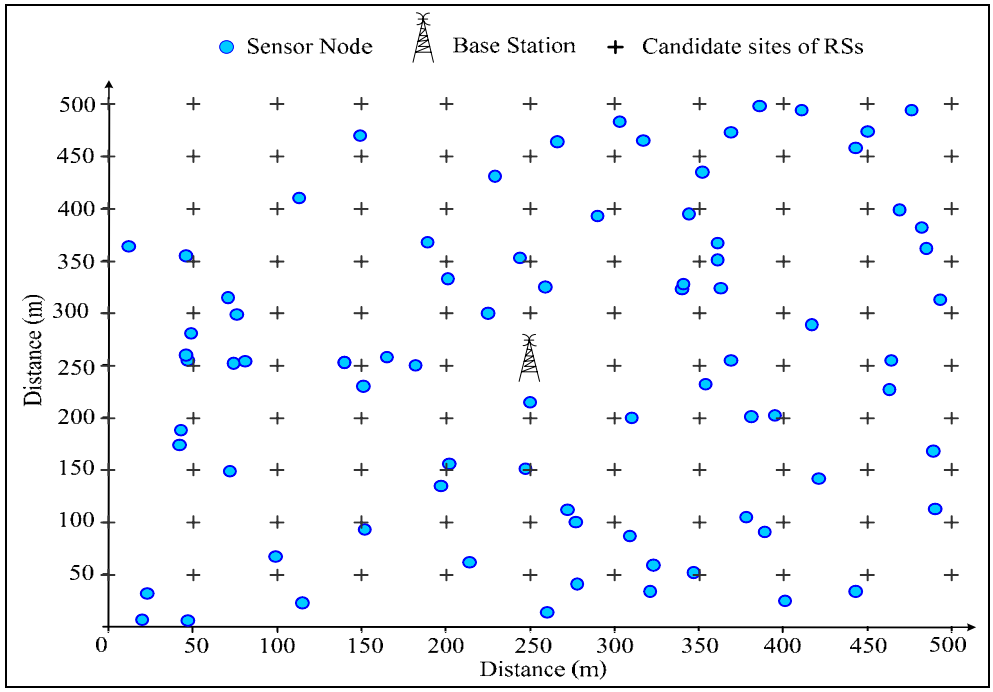
รูปที่ 4.12 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด ครั้งที่ 1



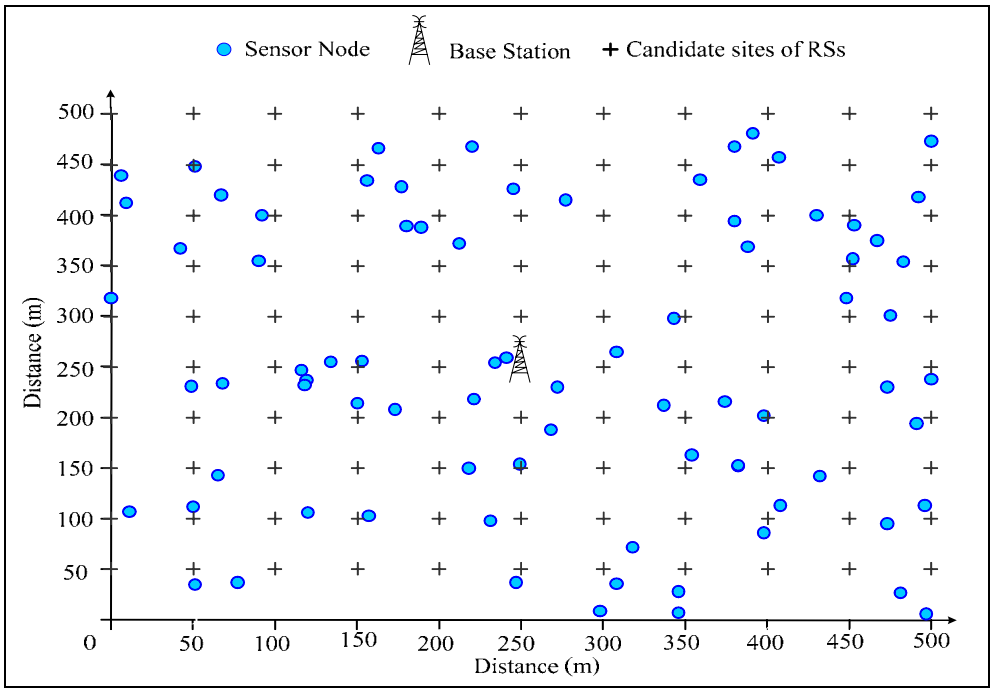
รูปที่ 4.13 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด ครั้งที่ 2



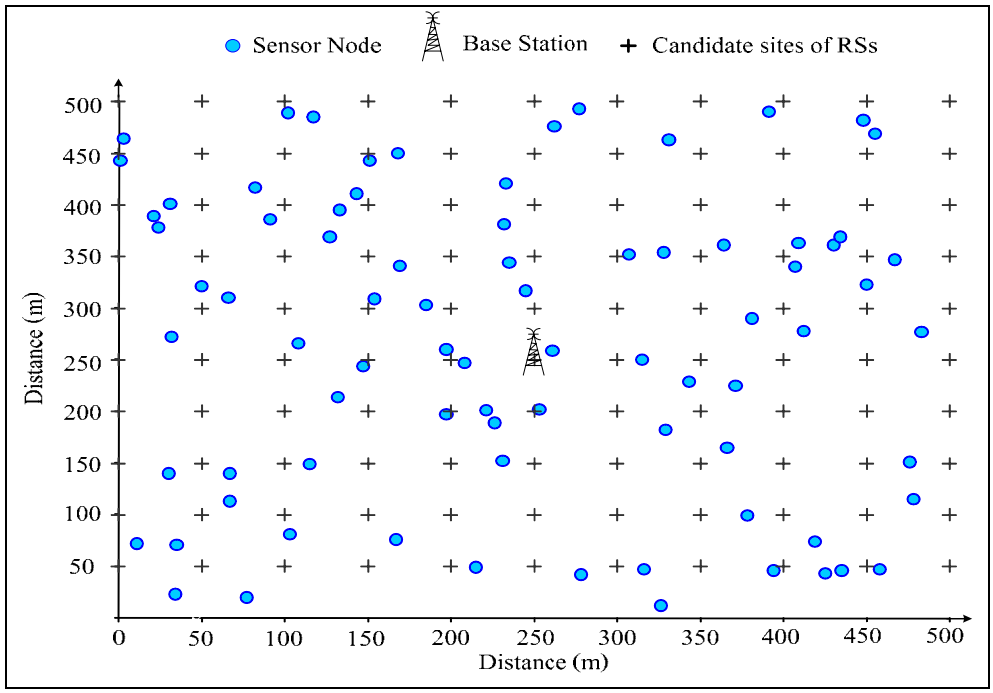
รูปที่ 4.14 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.15 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.16 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ครั้งที่ 2



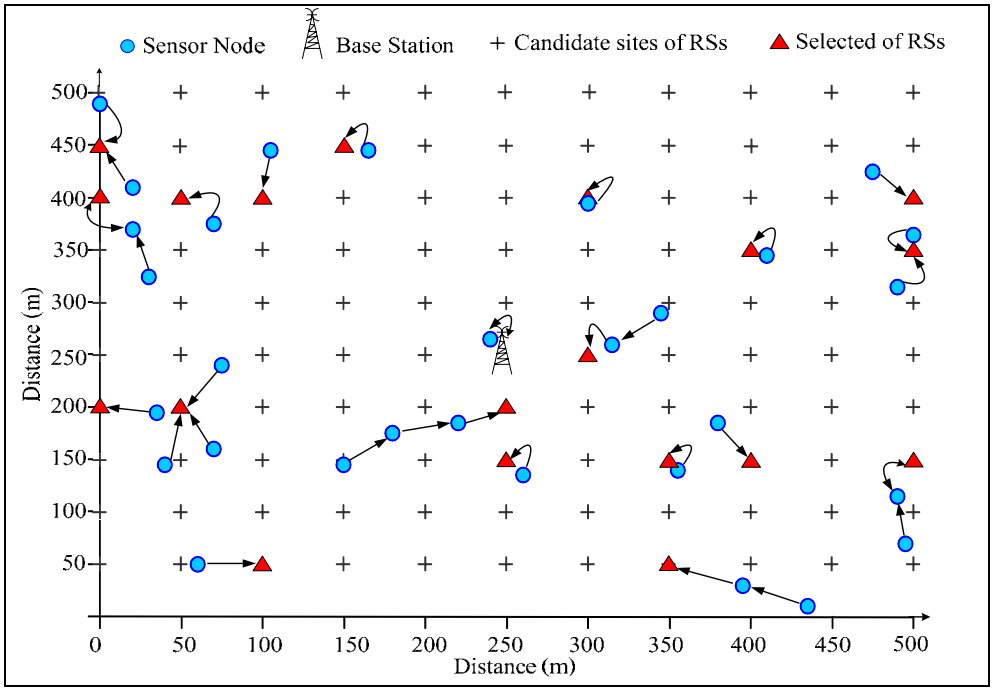
รูปที่ 4.17 การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ครั้งที่ 3

ผลการทดลองที่ 5-7 จากการกำหนดตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้เท่ากับ 110 ตำแหน่ง และหลังจากนั้นทำการออกเครือข่ายโดยเปลี่ยนจำนวนของโนดตรวจรู้เป็น 30 50 และ 80 โนด ตามลำดับ โดยทำการสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้แบบการกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งผลการทดลองครั้งที่ 1 ของการทดลองที่ 5 และ 6 ได้แสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 โดยจะเห็นว่าเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะมีโนดตรวจรู้บางโนดที่อยู่ไกลจากโนดอื่น ๆ จึงจำเป็นต้องทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่ม เพื่อให้โนดตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้

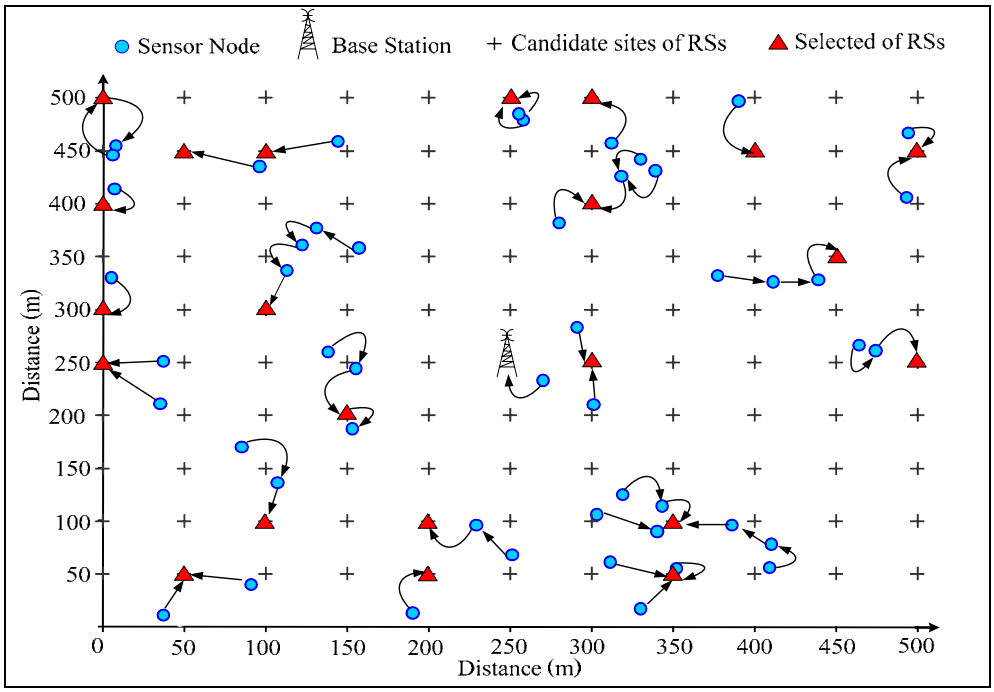
จากตารางที่ 4.4 ได้แสดงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งทั้ง 3 ครั้ง จากการทดลองที่ 5-7 พบว่าเมื่อพิจารณาเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้จำนวนเท่ากัน ผลของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจะมีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อดูผลของการเพิ่มจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายจะเห็นว่ามีแนวโน้มของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ทุกโนดภายในเครือข่ายได้สร้างขึ้นและเพื่อเป็นการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายอีกด้วย เมื่อโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้มากขึ้นจึงต้องทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในการทดลองที่ 6 ครั้งที่ 1 มีการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากกว่าการทดลองที่ 7 ซึ่งจากผลการทดลองนี้ กล่าวได้ว่าการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนโนดตรวจรู้ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายด้วย

จากตารางที่ 4.5 เป็นการสรุปพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่ายตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย รวมถึงพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวถูกใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ จากการทดลองที่ 5-7 จะเห็นว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้เท่ากัน จะมีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ต่างกัน แต่ก็มีการใช้พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่ายมีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อมีการเพิ่มจำนวนโนดตรวจรู้จะพบว่ามีการใช้พลังงานภายในเครือข่ายเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากมีการรับและส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้มากขึ้น

จากตารางที่ 4.6 เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 3 ครั้งของพลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะเห็นว่าในการทดลองที่ 5 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด จะมีการใช้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่ายมีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 6 และ 7 ส่วนการทดลองที่ 7 มีการใช้พลังงานมากที่สุดและพลังงานเฉลี่ยที่โนดแต่ละตัวใช้ไปนั้นก็มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองที่ 5-7 นี้กล่าวได้ว่าเมื่อจำนวนโนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.18 การเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาด 30 โนด



รูปที่ 4.19 การเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาด 50 โนด

ตารางที่ 4.4 จำนวนสถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งในพื้นที่ทดสอบในหัวข้อ 4.2

การทดลอง	จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้ง		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
การทดลองที่ 5 (SNs=30)	19	19	17
การทดลองที่6 (SNs=50)	29	22	22
การทดลองที่7 (SNs=80)	25	27	27

ตารางที่ 4.5 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดลองที่	พลังงานทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล) (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			พลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไป (จูล)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
5 (SNs=30)	557.72 (17.86)	529.91 (16.95)	468.52 (14.36)	18.59	17.66	15.62
6 (SNs=50)	787.97 (15.89)	984.65 (22.76)	970.97 (24.02)	15.76	19.69	19.42
7 (SNs=80)	2,198.48 (33.54)	2,355.32 (43.741)	1,920.82 (33.52)	27.48	29.44	24.01

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 2 และ 3 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดลองที่	พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล) (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	พลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ที่ใช้ (จูล) (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
5 (SNs=30)	518.72 (45.64)	17.29 (1.52)
6 (SNs=50)	914.53 (109.82)	18.29 (2.19)
7 (SNs=80)	2,158.21 (220.03)	26.98 (2.75)

จากตารางที่ 4.7 เป็นการหาค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปเป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวคงเหลืออยู่ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อโนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้พลังงานที่คงเหลืออยู่ของโนดตรวจรู้ลดลง เนื่องจากภายในเครือข่ายมีการรับและส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้ด้วยกันเองมากขึ้น ในการรับส่งข้อมูลจำเป็นต้องใช้พลังงาน จึงทำให้มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้มากขึ้น แต่จะเห็นว่าไม่มีโนดตรวจรู้ตัวใดเลยที่มีพลังงานคงเหลือน้อยกว่า 1 จูล

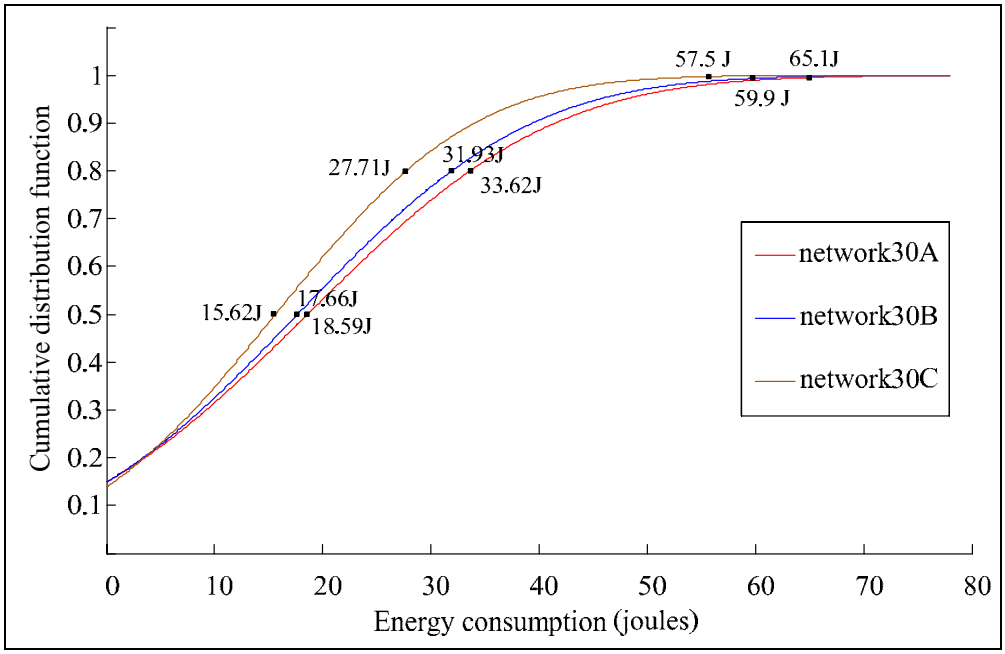
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ค่าเฉลี่ยพลังงานโนดตรวจรู้แต่ละโนดที่เหลืออยู่ พลังงานที่เหลือมากที่สุดและน้อยที่สุดของโนดตรวจรู้ เปอร์เซ็นต์ของจำนวนโนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล

การทดลอง	ค่าเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 2 และ 3 (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			
	ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่โนดตรวจรู้แต่ละโนดคงเหลืออยู่ (จูล)	พลังงานที่คงเหลือสูงสุด (จูล)	พลังงานที่คงเหลือน้อยที่สุด (จูล)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวนโนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล
การทดลองที่ 5	1,982.71 (1.52)	1,999.73 (0.47)	1,930.49 (9.88)	0 (0)
การทดลองที่ 6	1,981.71 (2.20)	1,999.88 (0.099)	1,897.18 (42.47)	0 (0)
การทดลองที่ 7	1,973.02 (2.75)	1,999.93 (0.12)	1,794.92 (76.65)	0 (0)

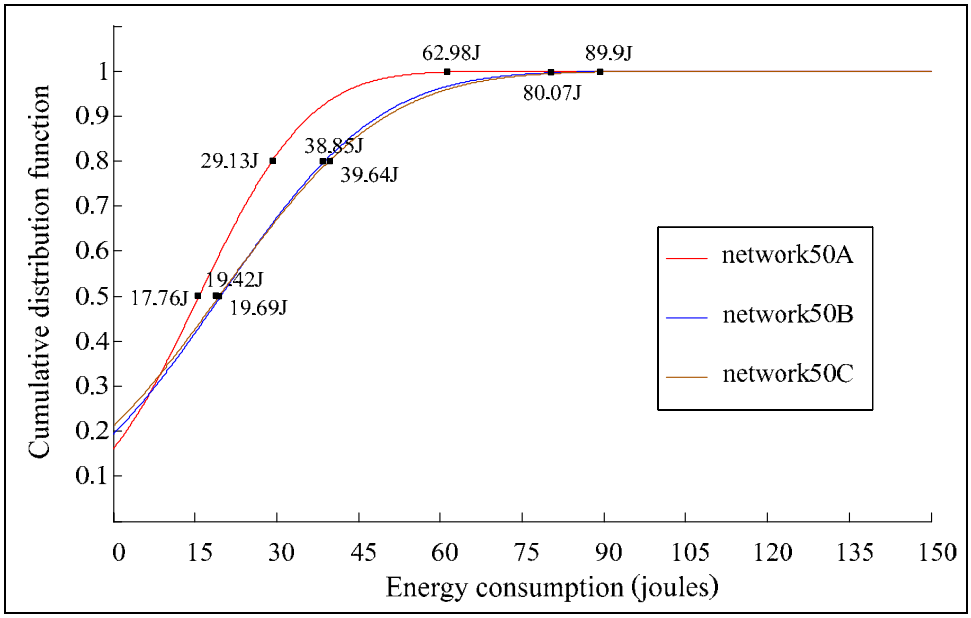
จากรูปที่ 4.20-4.22 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมในการเปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนด ตามลำดับ โดยกราฟแต่ละรูปแสดงค่าของฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่ใช้ไปในเครือข่ายที่มีขนาดเท่ากัน จากรูปที่ 4.9-4.11 จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีขนาดเท่ากัน 30 โนด แต่ตำแหน่งของโนดตรวจรู้เปลี่ยนไป พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากโนดตรวจรู้ทำการส่งข้อมูลไป

สถานีฐานโดยตรงหรือส่งให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียงหรือส่งให้กับสถานีถ่ายทอด ซึ่งค่าเฉลี่ยพลังงานของโนดตรวจรู้ขึ้นอยู่กับจำนวนโนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่าย

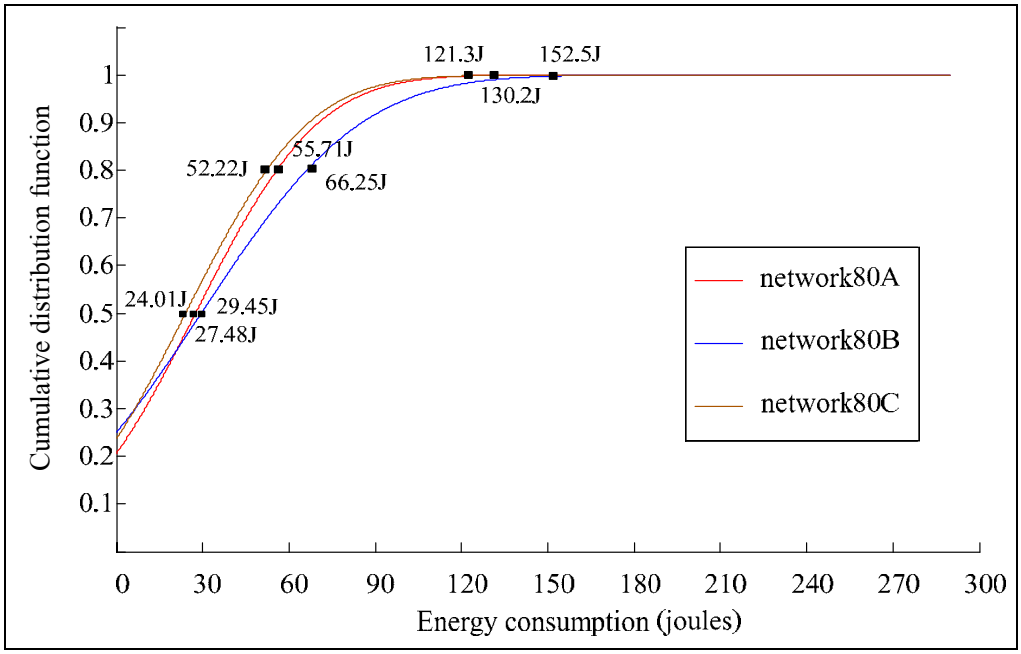
จากรูปที่ 4.23 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมในการเปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายที่มีขนาดต่างกัน พิจารณาเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนดจะเห็นว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานต่ำกว่า 32 จูล เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานของ 80 เปอร์เซ็นต์ของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายขนาด 50 และ 80 โนด โดยมีการใช้พลังงาน 39 จูล และ 66 จูล ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อขนาดของเครือข่ายใหญ่ขึ้นจะมีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้เพิ่มมาก เนื่องจากเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่จะมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้มากกว่าเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก



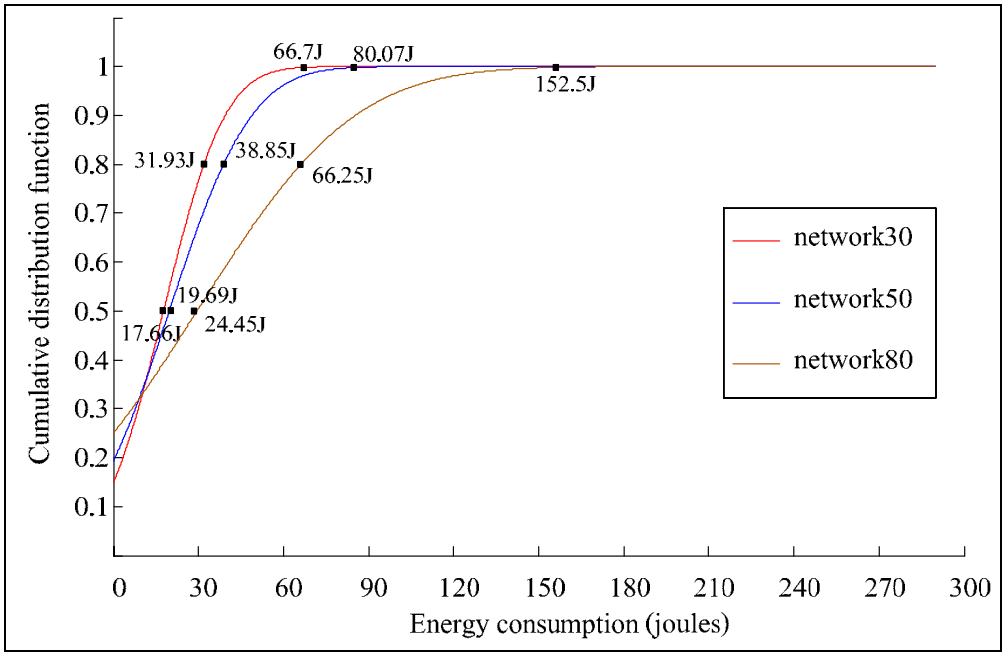
รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 โนด จากการสุ่มตำแหน่ง 3 ครั้ง



รูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย ขนาด 50 โนด จากการสุ่มตำแหน่ง 3 ครั้ง



รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย ขนาด 80 โนด จากการสุ่มตำแหน่ง 3 ครั้ง



รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย ขนาด 30 50 และ 80 โนด โดยพิจารณาการสุ่มตำแหน่งครั้งที่ 2

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้เสนอผลของการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในพื้นที่ทดสอบและกำหนดให้ตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นมีจำนวน 110 ตำแหน่ง จากนั้นทำการเปลี่ยนจำนวนและตำแหน่งของโนดตรวจรู้ โดยใช้วิธีการสุ่มแบบการกระจายสม่ำเสมอ ซึ่งผลที่ได้นั้นพบว่าขนาดของเครือข่ายที่เท่ากันจะมีการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนใกล้เคียงกันและเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีแนวโน้มของจำนวนการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้น แต่ยังมีบางกรณี เช่น การทดลองที่ 6 ครั้งที่ 1 ซึ่งมีโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด จะมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากกว่าการทดลองที่ 7 ที่มีโนดตรวจรู้จำนวน 80 โนด ซึ่งจะเห็นว่าปัจจัยในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งและจำนวนของโนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายด้วยเช่นกันและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้จากการทดลองจะเห็นว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้เท่ากันนั้นมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากตำแหน่งของโนดตรวจรู้ได้เปลี่ยนไปจึงทำให้มีการใช้พลังงานไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะเห็นว่ามีการใช้พลังงานทั้งหมดภายในเครือข่ายก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้มากกว่าเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น

การทดลองที่	เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (วินาที)			เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
5 (SNs=30)	7.51	7.00	7.29	7.27
6 (SNs=50)	10.75	11.00	11.03	10.93
7 (SNs=80)	20.31	16.50	21.03	19.28

จากตารางที่ 4.8 แสดงเวลาที่โปรแกรม ILOG OPL IDE ใช้ในการหาคำตอบ เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่มีขนาดเท่ากันจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

4.3 การวิเคราะห์ผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและผลกระทบด้านพลังงานเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน

สำหรับหัวข้อที่ผ่านมาได้ออกแบบการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุดโดยติดตั้งในตำแหน่งเหมาะสมที่สุด แต่สำหรับหัวข้อนี้ได้เสนอการออกแบบการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้ง และได้ทำการวิเคราะห์ผลของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้งต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ โดยได้ทำการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 แบบด้วยกัน และได้นิยามตัวแปรต่าง ๆ ในสมการคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

4.3.1. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดและเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด (Minimize Relay Station : $Min\ RS$) ซึ่งในการออกแบบการทดลองได้ให้ความสนใจจำนวนและตำแหน่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอด (RS Placement and Assignment Problem : RPAP) สำหรับการทดลองได้กำหนดให้มีตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ จากการออกแบบการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งตำแหน่งของโนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอดและสถานีฐานได้แสดงดังรูปที่ 4.13 ในหัวข้อที่ 4.2 โดยการออกแบบการทดลองนี้ได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

4.3.2. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาอายุการใช้งานของเครือข่ายที่ยาวนานที่สุด (Maximize Lifetime : $Max\,T_i$) จากงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A., (2009) ในการทดลองได้สนใจการหาอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Maximize Lifetime Problem : MLP)

ได้ทำการออกแบบการทดลอง โดยไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จากการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ภายในเครือข่าย เมื่อไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งภายในพื้นที่ทดสอบประกอบด้วย สถานีฐาน 1 สถานี และโนดตรวจรู้ สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข ดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เพื่อต้องการหาอายุการใช้งานของเครือข่ายที่ยาวนานที่สุด ได้สมการดังนี้

$$Maximize \quad T \tag{4.1}$$

สมการเงื่อนไข

สมการที่เป็นเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีด้วยกัน 3 สมการ ดังนี้

1. เงื่อนไขด้านสมดุลการไหลของข้อมูล ปริมาณข้อมูลที่ไหลเข้าโนดตรวจรู้ต้องเท่ากับปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งออกไป พจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการประกอบด้วยปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i สร้างขึ้นตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายและปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i รับมาจากโนดตรวจรู้ k ส่วนพจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการประกอบด้วย ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i ส่งไปให้โนดตรวจรู้ k หรือปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ i ส่งให้กับสถานีฐาน

$$(T * g_i) + \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} = \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} \quad \forall i \in I$$

2. เงื่อนไขทางข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ พลังงานที่โนดตรวจรู้ i ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ตัวอื่น ๆ และพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโนดตรวจรู้ตัวอื่น ๆ หรือไปยังสถานีถ่ายทอดต้องไม่เกินกว่าพลังงานตั้งต้นที่โนดตรวจรู้มีอยู่

$$\sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} C_r + \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} C_{t_sn} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} C_{t_Bs} \leq E_i \quad \forall i \in I$$

3. เงื่อนไขของอายุการใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งให้กับโนดตรวจรู้ได้กันเองและโนดตรวจรู้ส่งให้กับสถานีฐานและอายุการใช้งานของเครือข่ายต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ

$$T, s_{in}, b_{im} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M$$

จากการออกแบบการทดลองนี้จะเห็นว่าไม่มีเงื่อนไขในส่วนของการรับประกันการเชื่อมต่อ โดยโนดตรวจรู้จะไม่มีข้อจำกัดด้านรัศมีการทำงานและไม่มีสมการเงื่อนไขที่รับประกันว่าข้อมูลจะไม่มีการสูญหายระหว่างการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้

4.3.3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ให้น้อยที่สุด โดยการออกแบบการทดลองก็เพื่อทำให้โนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายมีการใช้พลังงานน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งานที่ได้กำหนดไว้ (Minimum Energy – RS Placement Problem : MERP) กำหนดให้มีตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้และภายในเครือข่ายมีตำแหน่งของโนดตรวจรู้และสถานีถ่ายทอด รวมถึงสถานีฐาน ดังรูปที่ 4.13 ในหัวข้อที่ 4.2 โดยการทดลองนี้ก็เพื่อศึกษาผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ให้น้อยที่สุด สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบการทดลอง 2 การทดลอง ในการทดลองแรกจะไม่มีการใส่เงื่อนไขการจำกัดจำนวนของสถานีถ่ายทอด (MERP1) โดยจะให้เลือกจากตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งได้และการทดลองที่สอง (MERP2) จะทำการเพิ่มเงื่อนไขในการจำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอด โดยให้มีค่าเท่ากับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ได้จากการออกแบบการทดลอง RPAP และสำหรับการออกแบบการทดลองนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เพื่อหาผลรวมของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย

$$Minimize \sum_{\forall i \in I}^{i \neq k \neq n} \left(\sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} C_r + \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} C_{t_sn} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} C_{t_RS} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} C_{t_Bs} \right) \quad (4.2)$$

สมการเงื่อนไข

สมการที่เป็นข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีด้วยกันทั้งหมด 8 สมการ โดยแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโนดใด ๆ

ภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1. การเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โดยที่ความแรงของสัญญาณที่โนดตรวจรู้ *k* รับได้จากโนดตรวจรู้ *i* ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ (3.2)

2. การเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด โดยที่ความแรงของสัญญาณที่สถานีถ่ายทอด *j* รับได้จากโนดตรวจรู้ *i* ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ (3.3)

3. การเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน ความแรงของสัญญาณที่สถานีฐาน m รับได้จากโนดตรวจรู้ i ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ (3.4)

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขด้านการรองรับปริมาณข้อมูลภายในเครือข่าย

1. สมดุลการไหลของข้อมูล คือ ปริมาณข้อมูลที่ไหลเข้าโนดตรวจรู้ต้องเท่ากับปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งออก ซึ่งปริมาณข้อมูลที่รับมาจะประกอบด้วยข้อมูลที่โนดตรวจรู้สร้างขึ้นตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายและปริมาณข้อมูลที่รับมาจากโนดตรวจรู้อื่น ๆ ปริมาณข้อมูลที่ไหลออกประกอบด้วยปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งไปยังโนดตรวจรู้อื่น ๆ หรือส่งไปยังสถานีถ่ายทอดหรือส่งไปยังสถานีฐาน ดังสมการที่ (3.5)

2. การรองรับปริมาณข้อมูลของสถานีถ่ายทอด ปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ส่งมาให้กับสถานีถ่ายทอดต้องมีค่าไม่เกินกว่าปริมาณข้อมูลที่สถานีถ่ายทอดสามารถรองรับได้ ดังสมการที่ (3.6)

3. ผลรวมปริมาณข้อมูลของโนดตรวจรู้ทั้งหมดต้องส่งให้กับสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐาน เงื่อนไขข้อนี้เป็นการป้องกันข้อมูลสูญหายระหว่างการส่งไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐาน ดังสมการที่ (3.7)

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขทางข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้

1. พลังงานที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ไร้สายต้องมีค่าไม่เกินพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้มีอยู่ ซึ่งการใช้พลังงานแบ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดอื่น ๆ และพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังโนดตรวจรู้ด้วยกันเองหรือไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐานนั้นต้องมีค่าไม่เกินกว่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ ดังสมการที่ (3.11)

กลุ่มที่ 4 เงื่อนไขการจำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้

1. จำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้ง (NR) โดยจำนวนสถานีถ่ายทอดนี้ได้จากการทดลอง RPAP ซึ่งเขียนดังสมการที่ (4.3)

$$\sum_{\forall j \in J} x_j \leq NR \tag{4.3}$$

ในการทดลองนี้ได้ออกแบบในพื้นที่ทดสอบขนาด 500 ตารางเมตร โดยการออกแบบการทดลอง MLP นั้นภายในพื้นที่ทดสอบจะประกอบด้วย สถานีฐานและโนดตรวจรู้เท่านั้น สำหรับการออกแบบการทดลอง RPAP และ MERP ภายในพื้นที่ทดสอบประกอบด้วย สถานีฐาน 1 สถานี โนดตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โนด ตามลำดับ และมีตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้จำนวน 110 ตำแหน่งเท่ากัน ซึ่งตำแหน่งของสถานีฐานและโนดตรวจรู้นั้นจะเหมือนกันทุกการทดลอง กำหนดให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเท่ากับ 13,825 วินาที ซึ่งได้มาจากการทดลอง MLP เครือข่ายขนาด 50 โนด โดยพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้มีค่าเท่ากับ 61,560 จูล เท่ากันทุกโนด

ตารางที่ 4.9 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งและพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้ง	พลังงานรวมทั้งหมดของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล)
เครือข่ายขนาด 30 โนด	MLP	-	1,514,307
	RPAP	16	12,621
	MERP1	27	3,628
	MERP2	16	7,254
เครือข่ายขนาด 50 โนด	MLP	-	2,748,142
	RPAP	17	27,014
	MERP1	37	5,865
	MERP2	17	15,405
เครือข่ายขนาด 80 โนด	MLP	-	3,295,265
	RPAP	17	75,661
	MERP1	59	9,099
	MERP2	17	26,575

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวนสถานีถ่ายที่ติดตั้งในเครือข่ายและพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP RPAP MERP1และ MERP2 สำหรับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนด ตามลำดับ จะเห็นว่าผลของการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP มีการใช้พลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับการ

ออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ และสำหรับการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานน้อยกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP เนื่องจากการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP ไม่มีการใช้สถานีถ่ายทอด ในการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานต้องทำการรับและส่งผ่านโนดตรวจรู้ตัวอื่น ๆ จึงทำให้ต้องใช้พลังงานของโนดตรวจรู้มาก จากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 จะสังเกตเห็นว่ามีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้น้อยที่สุด เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากที่สุด สำหรับการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 ในการออกแบบเครือข่ายพบว่าพลังงานรวมที่ใช้ในเครือข่ายสูงกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ RPAP กับ MERP2 จะเห็นว่าการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 สามารถปรับปรุงผลกระทบของการใช้พลังงานในเครือข่ายได้ โดยใช้จำนวนของสถานีถ่ายทอดเท่ากัน เพราะว่า MERP2 มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้พลังงานภายในเครือข่ายให้น้อยที่สุดและสำหรับ RPAP มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดการลงทุนในด้านการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.10 พลังงานสูงสุดและต่ำสุดของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่าย

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		พลังงานสูงสุดที่โนดตรวจรู้ใช้ไป (จูล)	พลังงานต่ำสุดที่โนดตรวจรู้ใช้ไป (จูล)
เครือข่ายขนาด 30 โนด	MLP	61,560	329
	RPAP	1,185	82
	MERP1	180	84
	MERP2	697	84
เครือข่ายขนาด 50 โนด	MLP	61,560	68
	RPAP	2611	83
	MERP1	379	83
	MERP2	1,185	83
เครือข่ายขนาด 80 โนด	MLP	61,560	186
	RPAP	8,341	82
	MERP1	413	82
	MERP2	1400	83

จากตารางที่ 4.10 แสดงพลังงานสูงสุดและต่ำสุดของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่ายที่มีขนาดต่างกัน จะเห็นว่าผลของการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP มีการใช้พลังงานสูงสุดและต่ำสุด มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ สำหรับ MERP1 มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด ในส่วนของพลังงานสูงสุดและต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้ RPAP และ MERP2 จะเห็นว่าการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ MERP2 มีค่าน้อยกว่า RPAP ถึงแม้ว่าจะใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากัน

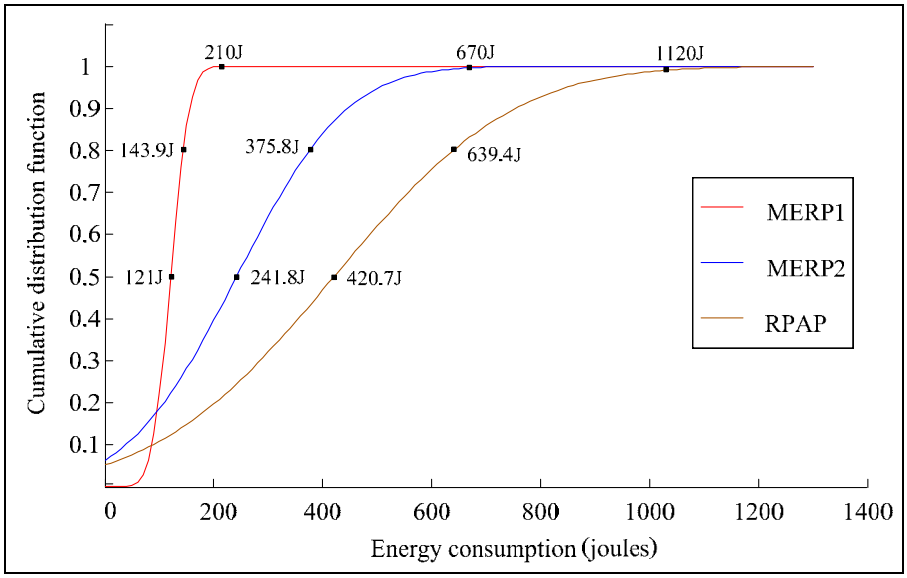
จากตารางที่ 4.11 แสดงพลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP มีการใช้พลังงานเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่สุด แต่สำหรับการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 มีค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.11 พลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่ายและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

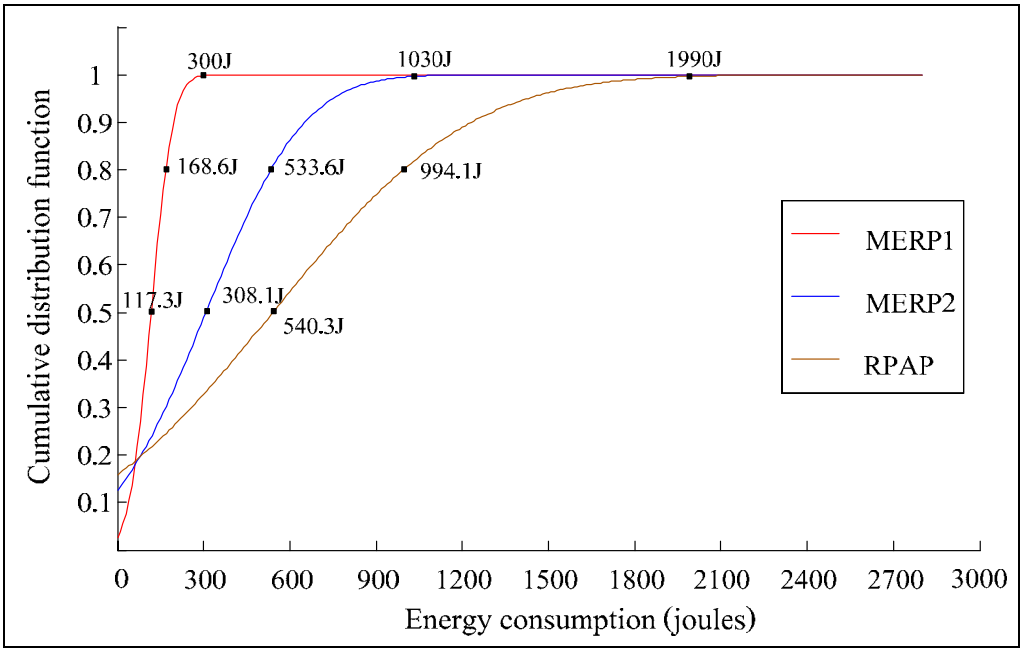
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (จูล)
เครือข่ายขนาด 30 โนด	MLP	50,476	20,902
	RPAP	420	259
	MERP1	120	26
	MERP2	241	159
เครือข่ายขนาด 50 โนด	MLP	54,962	16,722
	RPAP	540	539
	MERP1	117	60
	MERP2	308	267
เครือข่ายขนาด 80 โนด	MLP	41,190	212,105
	RPAP	945	1,359
	MERP1	113	50
	MERP2	332	288

จากรูปที่ 4.24-4.26 แสดงผลกระทบของการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันในการออกแบบเครือข่าย โดยออกแบบเครือข่ายที่มีขนาด 30 50 และ 80 โนด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.24 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสม จะเห็นว่าการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้สูงสุด เมื่อพิจารณาเครือข่ายขนาด 30 โนด พบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานมากถึง 639.4 จูลต่อโนด เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบเครือข่าย

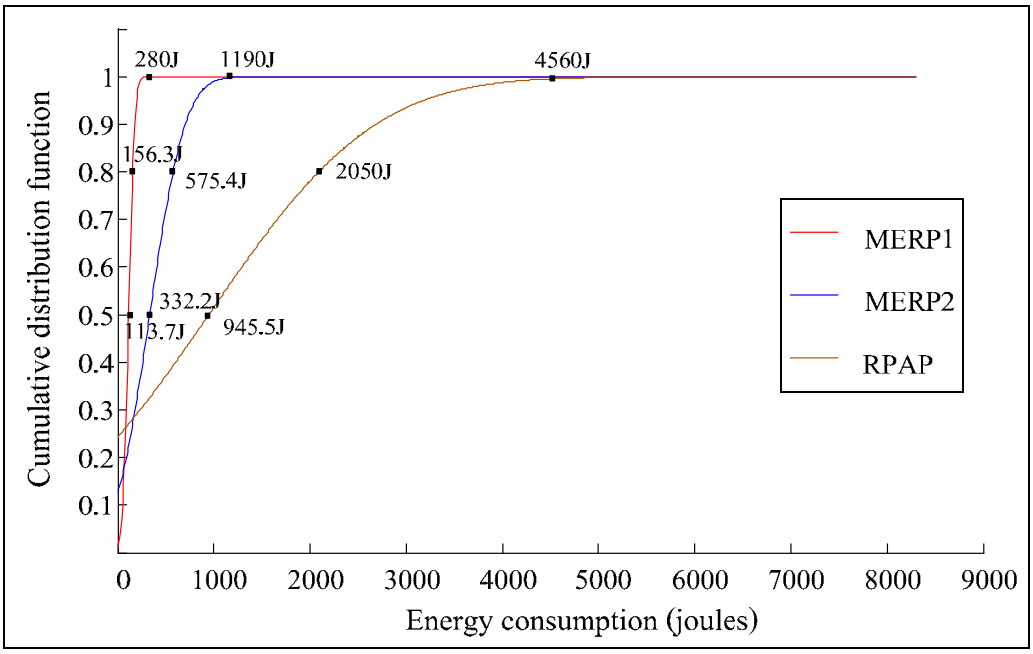
โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 และ MERP2 มีการใช้พลังงาน 143.9 และ 375.8 จูล ตามลำดับเพราะว่า RPAP มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขด้านพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ต้องเพียงพอตลอดอายุการใช้งาน สำหรับ MERP1 มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายให้น้อยที่สุด โดยต้องทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมาก สำหรับ MERP2 มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายให้น้อยที่สุด โดยใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากับผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP จะเห็นว่าการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้น้อยกว่าการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP เพราะว่า MERP2 มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายน้อยที่สุด แต่ต้องมีการกำหนดจำนวนสถานีถ่ายทอด จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 มีแนวโน้มการใช้พลังงานที่เหมือนกันในการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันในการออกแบบเครือข่ายขนาด 50 และ 80 โนด



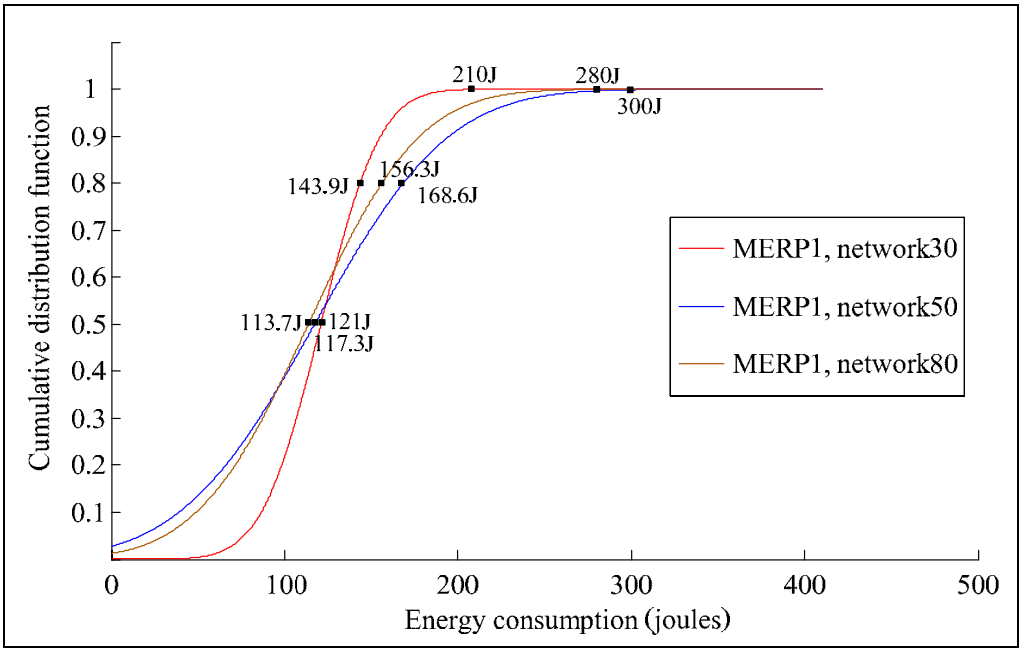
รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 โนด สำหรับการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน



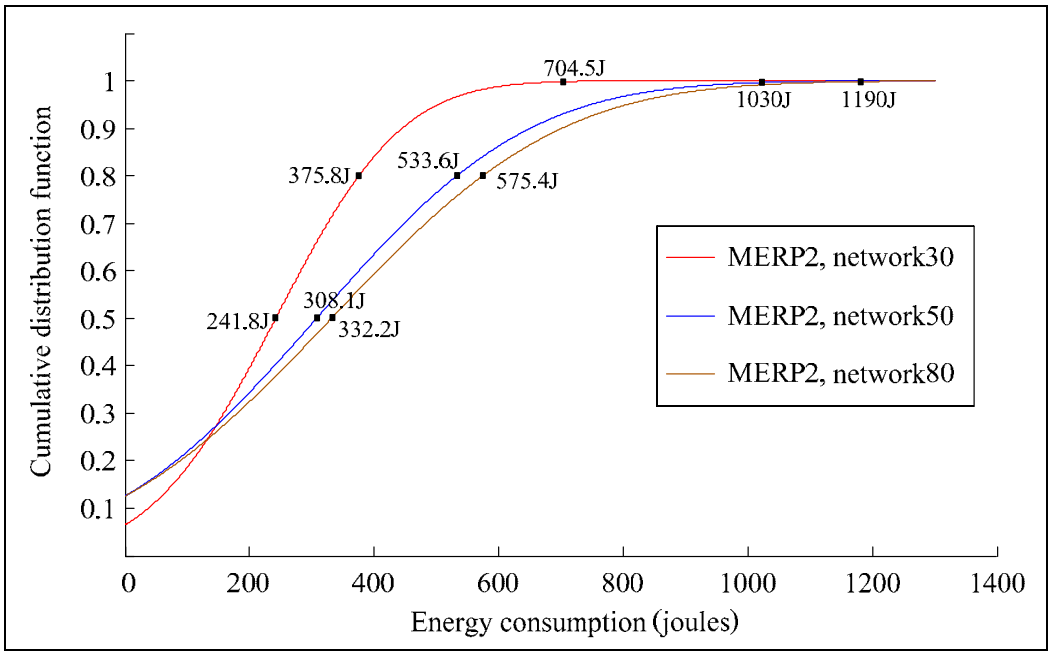
รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย ขนาด 50 โนด สำหรับการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน



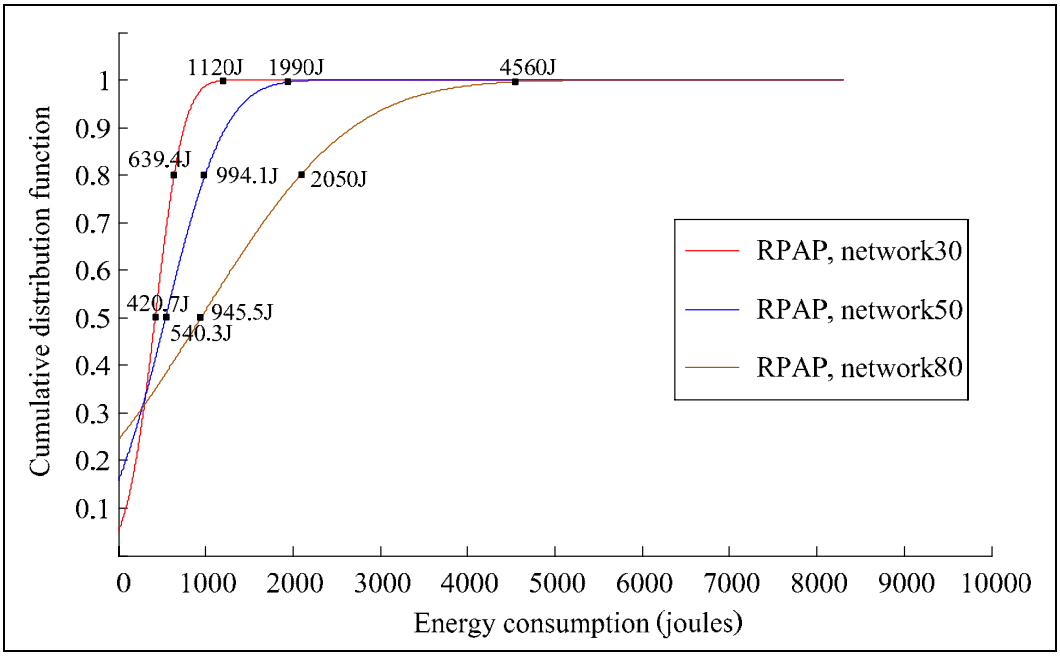
รูปที่ 4.26 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย ขนาด 80 โนด สำหรับการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.27 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี MERP1 ซึ่งมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายแตกต่างกัน



รูปที่ 4.28 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี MERP2 ซึ่งมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายแตกต่างกัน



รูปที่ 4.29 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี RPAP ซึ่งมีมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.27-4.29 แสดงผลกระทบของขนาดเครือข่ายที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน โดยต้องทำการรับและส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้หรือส่งให้กับสถานีถ่ายทอดมากขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น และสำหรับการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP และ MERP2 มีการใช้พลังงานมากกว่า MERP1 เพราะว่ามีการจำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้

สำหรับการออกแบบในหัวข้อนี้ได้ทำการเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้งและได้นำผลของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นมาวิเคราะห์การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ จะเห็นว่าการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 มีการใช้พลังงานน้อยที่สุดแต่ต้องทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมาก สำหรับการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 มีการใช้พลังงานมากกว่า MERP1 แต่น้อยกว่าการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP แต่ในการออกแบบต้องทำการเพิ่มเงื่อนไขข้อจำกัดของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มเข้าไป ถ้าในการออกแบบเครือข่ายมีงบประมาณที่จำกัด ในการออกแบบเครือข่ายด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 ถือว่าสามารถปรับปรุงคุณภาพของ RPAP ได้ เนื่องจากจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจะน้อยที่สุดแล้ว การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ก็น้อยที่สุดด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.12 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
เครือข่าย ขนาด 30 โนด	RPAP	10.79 วินาที
	MERP1	7.31 วินาที
	MERP2	10 วินาที
เครือข่าย ขนาด 50 โนด	RPAP	16.53 วินาที
	MERP1	9.75 วินาที
	MERP2	27 นาที 5 วินาที
เครือข่าย ขนาด 80 โนด	RPAP	21.96 วินาที
	MERP1	17.14 วินาที
	MERP2	20 ชั่วโมง 45 นาที

จากตารางที่ 4.12 แสดงเวลาที่โปรแกรม ILOG OPL IDE ใช้ในการหาคำตอบ เมื่อพิจารณาเครือข่าย 30 โนด จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากขึ้น เมื่อพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 จะเห็นว่าโปรแกรมจะใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ เพราะว่าได้มีเงื่อนไขที่จำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอดให้เท่ากับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP โปรแกรมจึงต้องใช้เวลาในการหาคำตอบนานขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้เพิ่มเข้าไป

4.4 การเปรียบเทียบการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยใช้วิธีการออกแบบที่แตกต่างกัน

ในหัวข้อนี้ได้เสนอการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยใช้วิธีในการออกแบบที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของจำนวนและตำแหน่งที่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งทำการออกแบบโดยมีพื้นที่ทดสอบขนาด 500 ตารางเมตรและกำหนดให้ภายในเครือข่ายประกอบด้วย สถานีฐาน 1 สถานีและมีโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด โดยโนดตรวจรู้มีการกระจายตัวดังรูปที่ 4.13 สำหรับการออกแบบเครือข่ายในหัวข้อนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบดังตารางที่ 3.1 และได้กำหนดอายุการใช้งานของเครือข่าย 13,825 วินาที จากนั้นทำการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยใช้วิธีในการออกแบบที่แตกต่างกัน 4 วิธีดังนี้

4.4.1 วิธีสมการคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

(Integer Linear Programming : RPAP)

จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ซึ่งเราได้สร้างสมการคณิตศาสตร์จากการกำหนดปัญหาจากสิ่งที่เราต้องการ ในการออกแบบการทดลองนี้ได้ทำการกำหนดให้โนดตรวจรู้มีการกระจายโนดอย่างอย่างสม่ำเสมอภายในพื้นที่ทดสอบ หลังจากนั้นได้ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นค่าเริ่มต้น เช่น ความแรงของสัญญาณที่โนดตรวจรู้รับได้จากโนดตรวจรู้หรือสถานีถ่ายทอดรับได้จากโนดตรวจรู้ ค่าของพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดต่าง ๆ เป็นต้น จากสมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดและเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วย จากสมการที่ (3.2)-(3.4) เป็นเงื่อนไขของการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดต่าง ๆ ภายในเครือข่าย จากสมการที่ (3.5)-(3.7) แสดงเงื่อนไขสมดุลการไหลของข้อมูลเพื่อไม่ให้ข้อมูลนั้นเกิดการสูญหาย สำหรับสมการที่ (3.8)-(3.10) คือ ปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งให้กับโนดตรวจรู้หรือสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐานต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และสมการที่ (3.11) คือเงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านพลังงานของโนดตรวจรู้ว่าจะต้องเพียงพอต่ออายุการใช้งานของเครือข่าย ซึ่งคำตอบที่ได้จากการใช้สมการคณิตศาสตร์ในการออกแบบนั้นได้เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวน 17 สถานี จากการทดลองสุ่มตำแหน่งครั้งที่ 2 ของเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด แสดงผลการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดดังรูปที่ 4.30

4.4.2 วิธีสมการคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

(Integer Linear Programming : MERP2)

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.3 ซึ่งเราได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์จากวิธี RPAP โดยทำการเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการใช้พลังงานภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายให้น้อยที่สุด (MERP2) และได้ใช้สมการเงื่อนไขในการออกแบบเหมือนกับวิธี RPAP ทุกข้อ และได้ทำการเพิ่มสมการเงื่อนไขในการจำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้งด้วยวิธี RPAP ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 17 สถานี

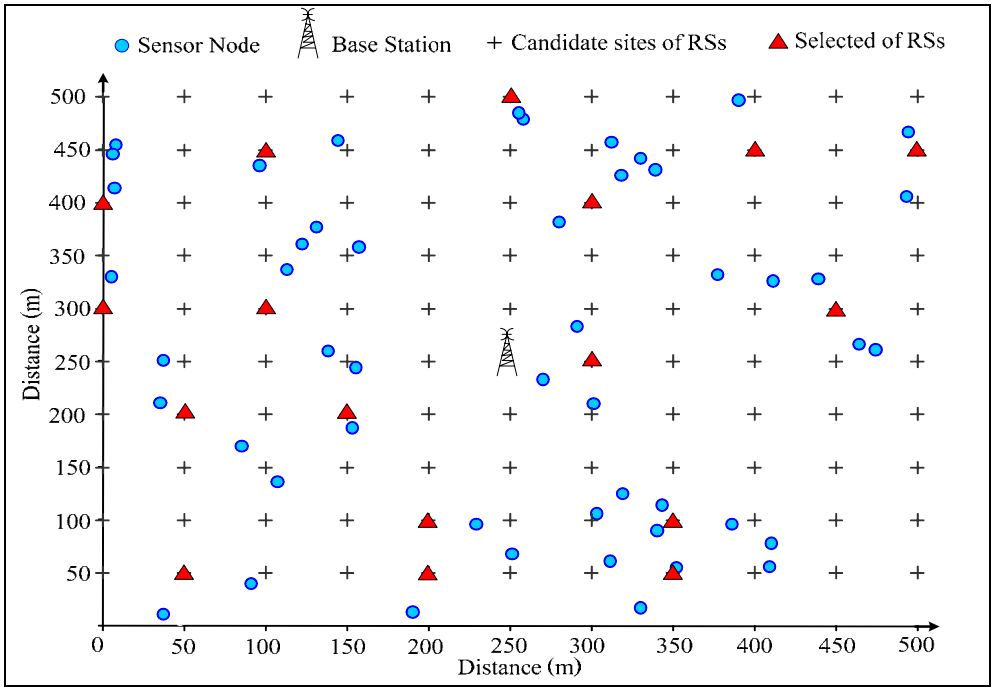
4.4.3 วิธีการกระจายสถานีถ่ายทอดอย่างสม่ำเสมอ (Uniform)

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายด้วยวิธีการกระจายสถานีถ่ายทอดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งกำหนดจำนวนของสถานีถ่ายทอดให้มีค่าเท่ากับ 17 สถานี ให้เท่ากับวิธี RPAP แต่เนื่องจากการกระจายตัวของสถานีถ่ายทอดแบบสม่ำเสมอนี้ไม่สามารถใช้สถานีถ่ายทอด 17 สถานี ได้จึงได้ทำการลดเป็น 16 สถานี โดยแสดงดังรูปที่ 4.32 ซึ่งหลักในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสถานีถ่ายทอดแต่ละสถานี

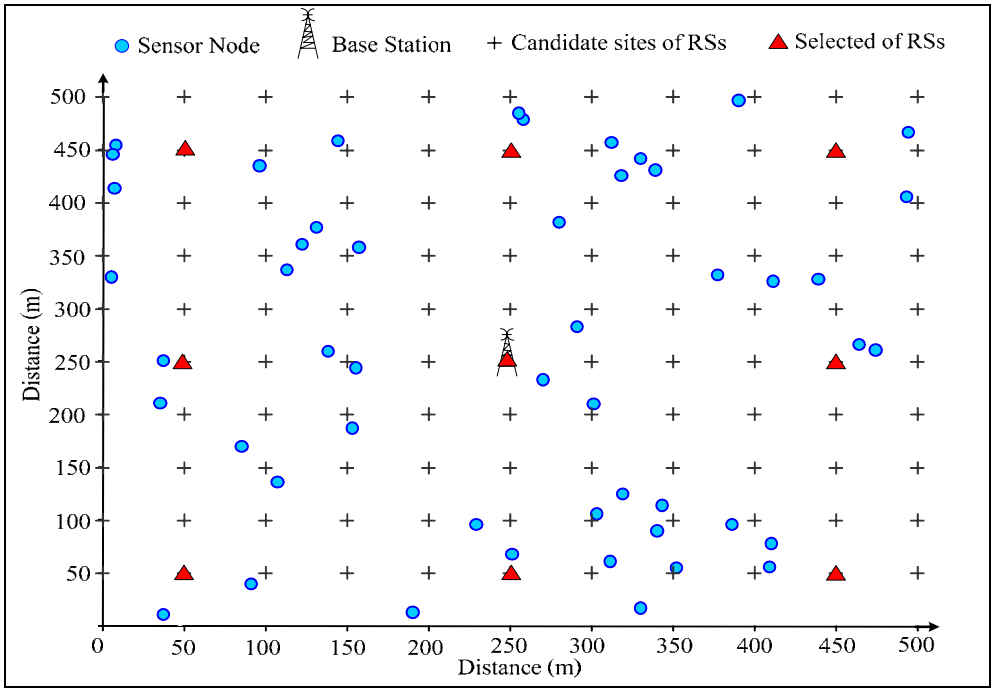
ต้องมีระยะห่างที่เท่ากันทุกสถานีและได้ทำการทดลองโดยการกำหนดให้จำนวนของสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 9 และ 25 สถานี แสดงดังรูปที่ 4.31 และ 4.33 ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ เมื่อมีการกำหนดจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้

4.4.4 วิธีจุดศูนย์กลางมวล (Center of mass : CM)

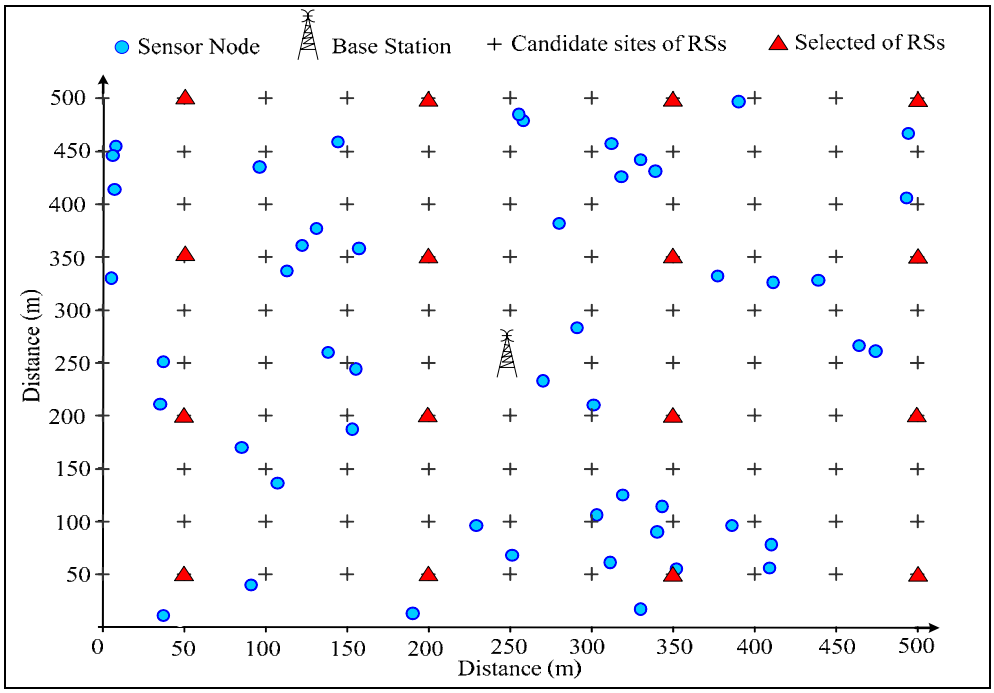
สำหรับการทดลองนี้มีหลักการสำคัญ คือ พิจารณาความหนาแน่นของการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ในพื้นที่ทดสอบ หลังจากนั้นทำการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยทำการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่บริเวณศูนย์กลางของกลุ่มโนดตรวจรู้ที่มีความหนาแน่นมาก โดยพยายามกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้โนดตรวจรู้ที่อยู่ในเครือข่ายสามารถสร้างการเชื่อมต่อได้มากที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดจำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 9 17 และ 25 สถานี โดยแสดงดังรูปที่ 4.34-4.36 เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งที่ทำการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ภายในเครือข่าย เมื่อทำการออกแบบเครือข่ายโดยมีการจำกัดจำนวนของสถานีถ่ายทอด



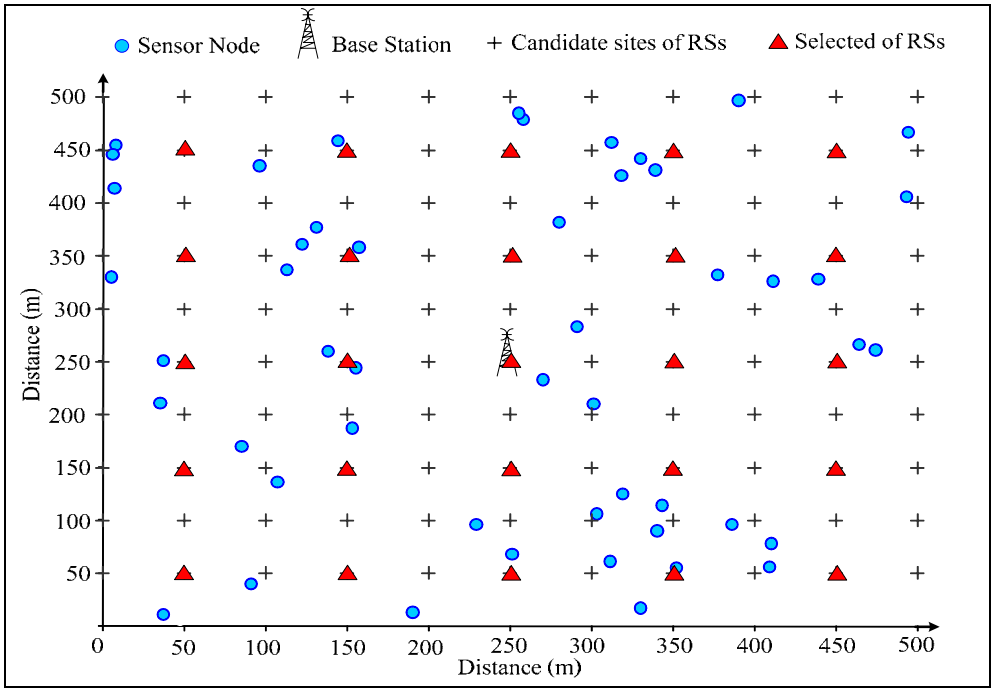
รูปที่ 4.30 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี RPAP โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 17 สถานี



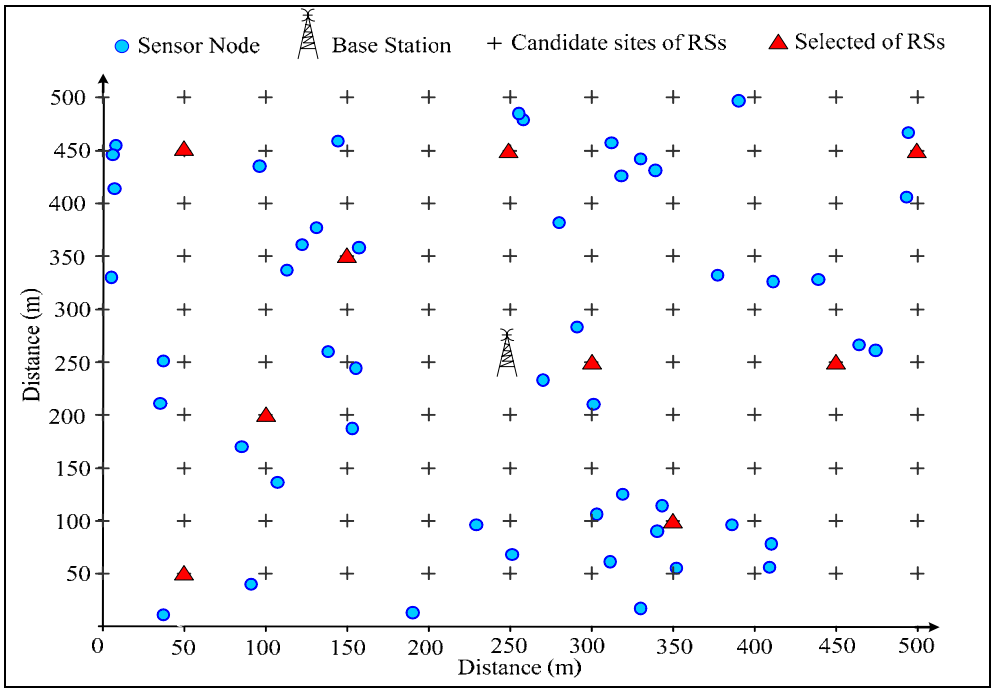
รูปที่ 4.31 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี Uniform โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 9 สถานี



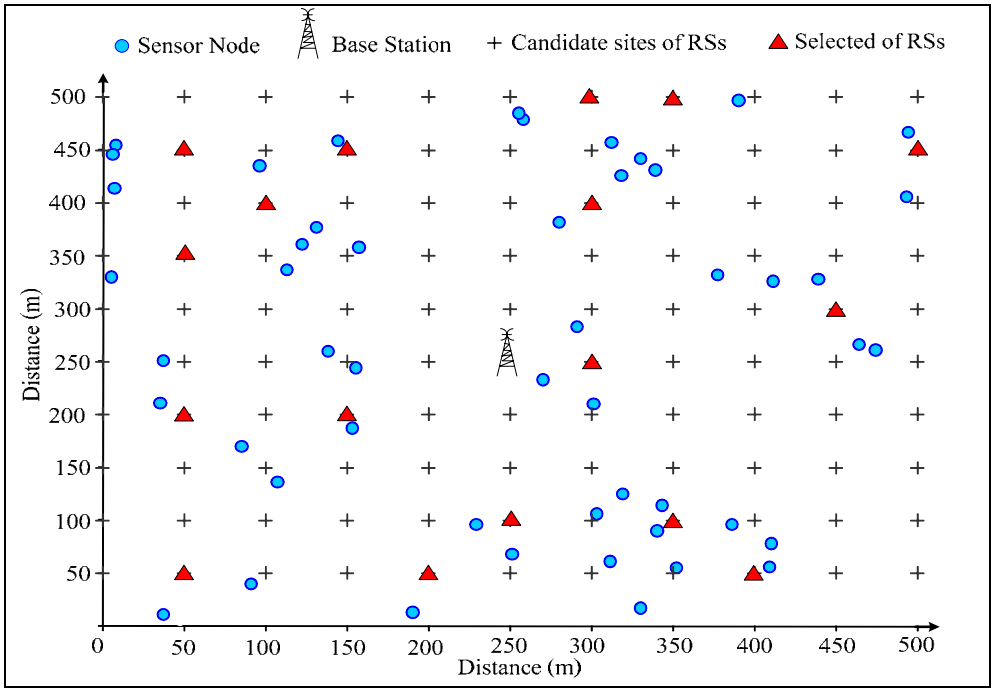
รูปที่ 4.32 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี Uniform โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 16 สถานี



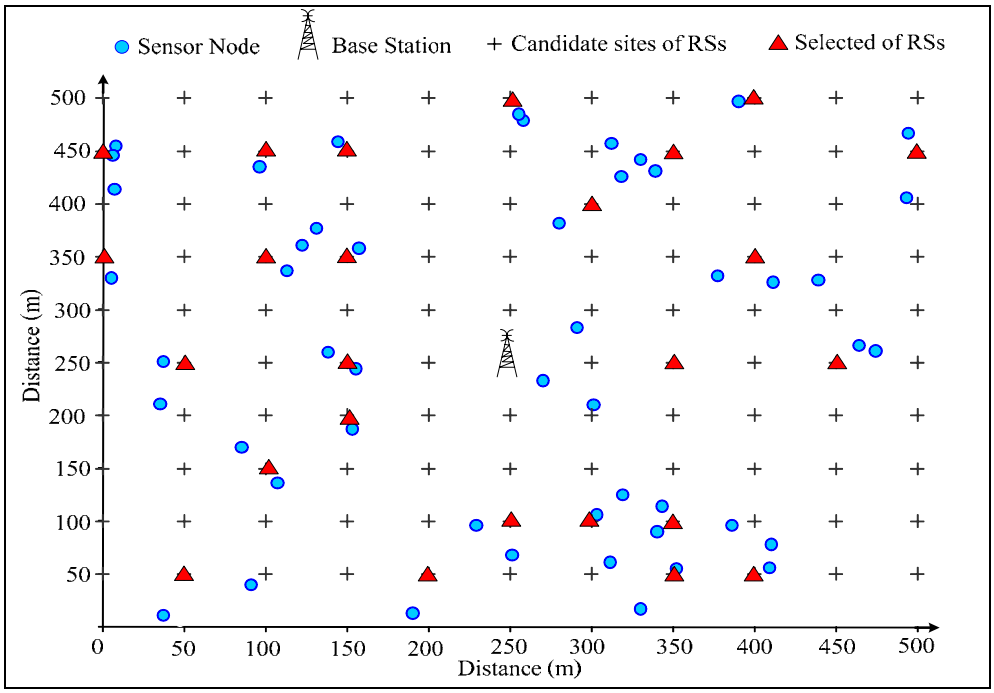
รูปที่ 4.33 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี Uniform โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 25 สถานี



รูปที่ 4.34 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี CM โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 9 สถานี



รูปที่ 4.35 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี CM โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 17 สถานี



รูปที่ 4.36 ผลจากออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี CM โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 25 สถานี

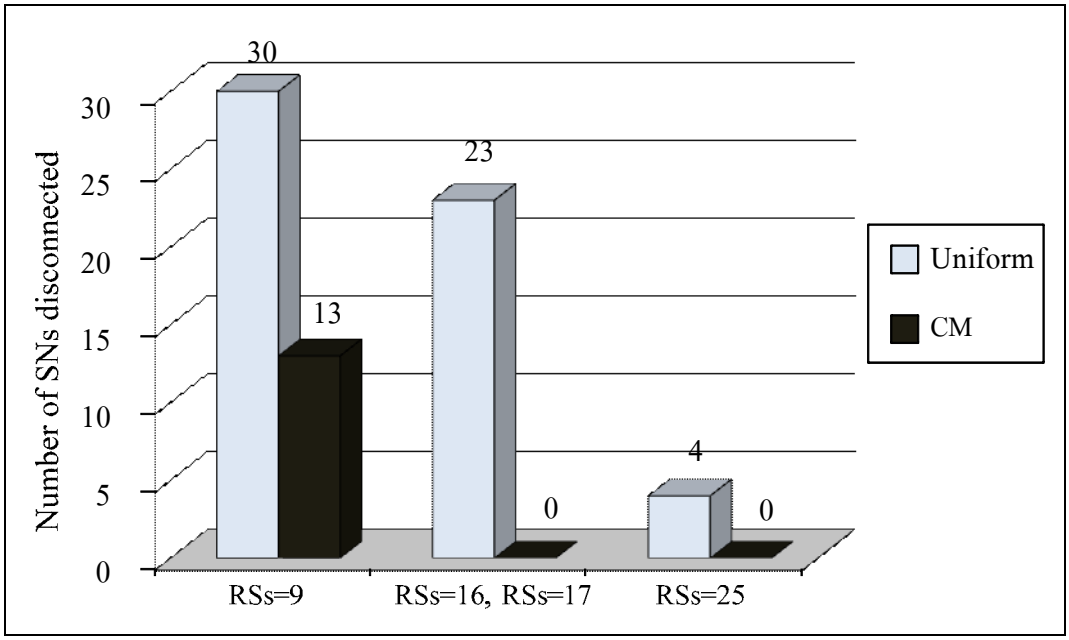
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานที่ถูกใช้ไปสูงสุดและต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการใช้พลังงานและจำนวนของโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้ เมื่อใช้วิธีการออกแบบที่แตกต่างกัน

การทดลอง		พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล)	พลังงานสูงสุดที่โนดตรวจรู้ใช้ไป (จูล)	พลังงานต่ำสุดที่โนดตรวจรู้ใช้ไป (จูล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนโนดที่ไม่สามารถเชื่อมต่อได้
Uniform, SNs=50,	RS=9	150.33	1427.46	85.95	295.22	30
	RS=16	309.56	2098.46	83.04	455.49	23
	RS=25	306.64	1427.46	83.04	268.78	4
CM, SNs=50,	RS=9	255.01	1249.81	84.27	254.00	13
	RS=17	403.34	1185.28	84.37	310.74	0
	RS=25	182.19	637.19	83.04	134.69	0
RPAP,SNs=50	RS=17	540.28	2611.05	83.16014	539.2631	0
MERP2,SNs=50	RS=17	308.11	1185.28	83.04	267.87	0

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยใช้วิธี Uniform นั้นเมื่อกำหนดจำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 9 สถานี พบว่ามีโนดตรวจรู้บางโนดที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้จำนวน 30 โนดและเมื่อกำหนดสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 16 และ 25 สถานี จะมีโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้จำนวน 23 และ 4 โนด ตามลำดับ ซึ่งการใช้วิธี Uniform นี้

ไม่สามารถรับประกันได้ว่าโนดตรวจรู้ทุกโนดในเครือข่ายจะสามารถสร้างการเชื่อมต่อระหว่างกันได้หรือกับสถานีถ่ายทอดได้

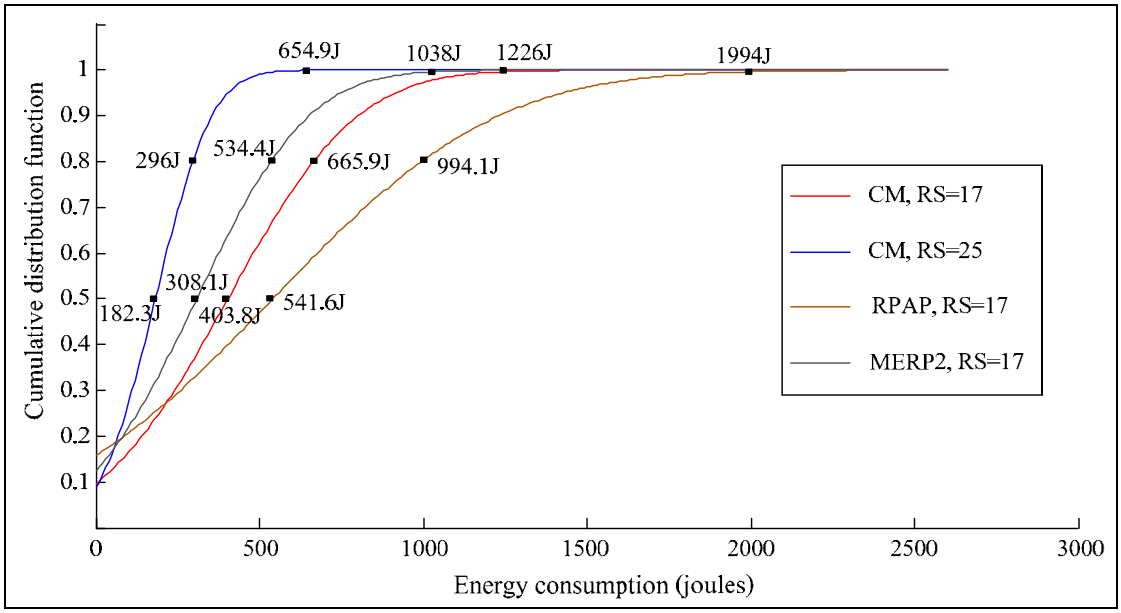
เมื่อพิจารณาการออกแบบโดยใช้วิธี CM กำหนดสถานีถ่ายทอด 9 สถานี จะมีโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้จำนวน 13 โนด เนื่องจากสถานีถ่ายทอดมีน้อยเกินไปจึงทำให้ไม่ครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการออกแบบ แต่เมื่อทำการกำหนดสถานีถ่ายทอด 17 สถานี ซึ่งเท่ากับวิธี RPAP พบว่าการออกแบบโดยใช้วิธี CM มีการใช้พลังงานทั้งหมดในเครือข่ายมีค่าเท่ากับ 403.34 จูล ซึ่งน้อยกว่าการออกแบบโดยใช้วิธี RPAP มีการใช้พลังงานทั้งหมดในเครือข่ายมีค่าเท่ากับ 540.28 จูล แต่การออกแบบโดยใช้วิธี CM มีการใช้พลังงานทั้งหมดในเครือข่ายมากกว่าการออกแบบด้วยวิธี MERP2 เนื่องจากมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลน้อยที่สุด



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโนดที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้ เมื่อใช้วิธี CM และวิธี Uniform ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากรูปที่ 4.37 แสดงจำนวนโนดที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้เมื่อใช้วิธีในการออกแบบเครือข่ายที่แตกต่างกัน จากการทดลองได้กำหนดให้จำนวนสถานีถ่ายทอดมีค่าเท่ากับ 9 17 และ 25 สถานี ทำการออกแบบโดยใช้วิธี CM Uniform และ RPAP เมื่อกำหนดจำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 9 สถานี จะเห็นว่าเมื่อใช้วิธี CM ในการออกแบบเครือข่ายจะมีจำนวนโนดตรวจรู้

ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้จำนวน 13 โนด และเมื่อใช้วิธี Uniform ในการออกแบบเครือข่าย จะมีจำนวนโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้จำนวน 30 โนด และเมื่อเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดให้มากขึ้นจะพบว่าวิธี Uniform มีจำนวนโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้มีจำนวนลดลง แต่เมื่อกำหนดจำนวนสถานีถ่ายทอดให้มากกว่าหรือเท่ากับ 17 สถานี สำหรับการออกแบบด้วยวิธี CM โนดตรวจรู้ทุกโนดสามารถสร้างการเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด



รูปที่ 4.38 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โนด เมื่อใช้วิธี CM RPAP และ MERP2 ในการออกแบบเครือข่าย

เนื่องจากการออกแบบเครือข่ายด้วยการใช้วิธี Uniform มีโนดตรวจรู้ที่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อได้จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบการใช้พลังงานได้ ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบด้วยวิธี CM RPAP และ MERP2 เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.38 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โนด เมื่อใช้วิธี CM RPAP และ MERP2 ในการออกแบบเครือข่าย กำหนดให้ใช้สถานีถ่ายทอด 17 สถานี จะเห็นว่าวิธี CM มีการใช้พลังงานน้อยกว่าการออกแบบโดยใช้วิธี RPAP และเมื่อกำหนดให้วิธี CM ใช้สถานีถ่ายทอด 25 สถานี จะเห็นว่ามีการใช้พลังงานลดลงเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี CM RPAP และ MERP2 โดยใช้สถานีถ่ายทอด 17 สถานี จากผลการออกแบบจะเห็นว่าวิธี CM จะมีการใช้พลังงานน้อยกว่าวิธี RPAP และวิธี Uniform เนื่องจากเครือข่ายที่

ออกแบบมีขนาดเล็กทำให้สามารถเลือกติดตั้งตำแหน่งได้อย่างเหมาะสม แต่เมื่อพิจารณาการออกแบบด้วยวิธี MERP2 จะเห็นว่ามีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้น้อยกว่าวิธี CM เนื่องจากวิธี MERP2 ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด สำหรับการออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี RPAP และ MERP2 ถือว่าเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็วและเป็นไปตามเงื่อนไขในการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ทุกประการ

จากการออกแบบการทดลองในหัวข้อนี้ จะเห็นว่าวิธีการใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นมานั้นมีความสะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น ๆ ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 4.8 ในหัวข้อ 4.2 ถ้าต้องการออกแบบเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่และมีเงื่อนไขจำนวนมาก การออกแบบด้วยวิธีอื่น ๆถือว่ามีความยุ่งยากและซับซ้อน ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ แต่การออกแบบเครือข่ายด้วยวิธี RPAPและ MERP2 จะสามารถช่วยให้การออกแบบเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดและคำตอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของการใช้พลังงานในทางปฏิบัติและในทางทฤษฎี

จากงานวิจัยของ Heinzelman, W., and Chandrakasan, A. (2000) เพื่อศึกษาแบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ พบว่า ในการใช้พลังงานได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลและพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล ซึ่งพลังงานที่ใช้ในวงจงของภาคส่ง ประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์และพลังงานที่ใช้ในภาคขยายสัญญาณ จากการทดลองโครงสร้างเครือข่ายของงานวิจัย ประกอบด้วยโนดตรวจรู้จำนวน 50 โนด โดยมีการส่งข้อมูลดังรูปที่ 4.5 ซึ่งหาอายุการใช้งานของเครือข่ายสูงสุดจากฟังก์ชัน MLP ได้อายุการใช้งานเครือข่ายเท่ากับ 31,621 วินาที ($\approx$8 ชั่วโมง 46 นาที)

สำหรับการคำนวณจากทฤษฎี กำหนดให้ใช้ถ่านไฟฉาย Panasonic 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน ซึ่งมีความจุ 2,850 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง ซึ่งหาอายุการใช้งานได้จากสมการที่ (2.6) จากทฤษฎีสามารถหาอายุการใช้งานได้ 28 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นได้ทำการทดลองจริง โดยกำหนดให้ใช้แหล่งพลังงานเหมือนกับการคำนวณทางทฤษฎี ในการทดลอง กำหนดให้ระยะห่างระหว่างโนดตรวจรู้ 1 เมตร ส่งข้อมูลขนาด 32 ไบต์ ทำการส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง รูปแบบการรับและส่งข้อมูลเป็นแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ซึ่งจากการทดลองพบว่า อายุการใช้งานจริงประมาณ 9 ชั่วโมง 40 นาที จากการสังเกตจะเห็นว่าเมื่อพลังงานใกล้จะหมดส่งผลให้การรับและส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาดมากขึ้น

จากตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าผลจากการออกแบบด้วยวิธี MLP มีอายุการใช้งานเครือข่ายใกล้เคียงกับการทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุด เนื่องจากในงานวิจัยมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้จำนวนมาก จึงทำให้โนดตรวจรู้ต้องใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลมากเพื่อส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานเครือข่ายสั้นกว่าการทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุด เพราะว่าการทดลองส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องนั้นได้ทำการส่งข้อมูลระหว่างโนดเพียงโนดเดียวและขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูลของงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) มีขนาดมากกว่าการทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดและระยะห่างระหว่างโนดที่ทำการทดลองใกล้กว่าระยะห่างในงานวิจัยและการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลที่แตกต่างกันซึ่งการทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดได้ดูจากอุปกรณ์จริงรวมไปถึงผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน จึงทำให้อายุการใช้งานของการทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009)

ตารางที่ 4.14 อายุการใช้งานของเครือข่ายจากทฤษฎี งานวิจัยที่ผ่านมาและการทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดและเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานของเครือข่าย

อายุการใช้งานของเครือข่าย	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ของอายุการใช้งาน (%)
ทฤษฎี	28 ชั่วโมง 30 นาที	100
การออกแบบด้วย MLP	8 ชั่วโมง 46 นาที	30.81
การทดลองส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุด	9 ชั่วโมง 40 นาที	32.50

บทที่ 5
สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากมีการนำระบบตรวจรู้ไร้สายมาใช้ทางด้านการแพทย์ การเฝ้าระวังภัยธรรมชาติและทางด้านการทหาร เป็นต้น เนื่องจากโนดตรวจรู้มีขนาดเล็ก ราคาถูกและเครือข่ายมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายได้ตลอดเวลา เป็นเครือข่ายที่มีการทำงานแบบอัตโนมัติ ไม่ต้องอาศัยมนุษย์ในการควบคุมเหมาะแก่การใช้ในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก และต้องการเฝ้าสังเกตเป็นเวลานาน สำหรับโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบด้วย สถานีฐานและโนดตรวจรู้ โดยสถานีฐานมีหน้าทำรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และทำการประมวลผล สำหรับโนดตรวจรู้มีหน้าที่ในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สนใจและทำการส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐาน เนื่องจากโนดตรวจรู้มีขนาดเล็ก จึงทำให้แหล่งพลังงานมีขนาดเล็กตามไปด้วย ส่งผลให้เมื่อมีการส่งข้อมูลจำนวนมากผ่านโนดตรวจรู้จะทำให้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดหมดลงอย่างรวดเร็ว มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการออกแบบเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ โดยทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีฐานหรือการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน จากปัญหาด้านพลังงานของโนดตรวจรู้และงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้มีการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจวิธีการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุดและตำแหน่งติดตั้งเหมาะสมที่สุดเพื่อช่วยในการรับและส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ซึ่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายจะช่วยลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ลงได้ แต่ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดอาจต้องใช้งบประมาณสูง ดังนั้นเราจึงออกแบบเครือข่ายเพื่อหาจำนวนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดและตำแหน่งติดตั้งเหมาะสมที่สุดและได้วิเคราะห์ผลของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ ในการออกแบบเครือข่ายเราได้ทำการกำหนดปัญหาโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสร้างสมการคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดให้กับปัญหานี้ สำหรับการออกแบบเราได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนจำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ ผลกระทบในการเปลี่ยนแปลงขนาดของเครือข่าย การใช้วิธีในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่แตกต่างกันเพื่อดูผลของจำนวนและตำแหน่งของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายและการเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบ

หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองด้านการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นว่าการใช้สถานีถ่ายทอดในการออกแบบเครือข่ายสามารถลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ได้เป็นอย่างดี

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้นำรูปแบบการใช้พลังงานจากงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) มาเปรียบเทียบกับการทดลองในหัวข้อ 4.5 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ เนื่องจากในงานวิจัยได้มีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ไม่เท่ากับการใช้งานจริงในทางปฏิบัติและจากการทดลองได้ทำการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดเท่านั้น ซึ่งไม่เหมือนกับงานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) ที่มีลักษณะการส่งผ่านหลายโนดและจากงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองวิถีการสูญเสียอย่างง่ายมาใช้ในการคำนวณความแรงสัญญาณที่รับได้ผลจากการทดลองพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎี เนื่องจากมีอิทธิพลทางสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันและมีปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น สัญญาณแทรกสอด สิ่งรบกวนจากธรรมชาติหรือจากบุคคล เป็นต้น จึงทำให้ผลที่ได้ในทางปฏิบัติเกิดความคลาดเคลื่อน

5.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้วิธีในการออกแบบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุดและเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด การนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบเป็นการช่วยลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งในอนาคตอาจจะใช้การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยใช้หลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์และอาจเพิ่มเงื่อนไขของสัญญาณแทรกสอดในบริเวณพื้นที่ทดสอบ เพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครือข่ายให้ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

Azad, A.P., and Chockalingam, A. (2006) **Mobile Base Stations Placement and Energy Aware Routing in Wireless Sensor Networks**, WCNC IEEE, Vol. 1, No. 1683475, 2006, pp. 264-269.

Bojkovic, Z., and Bakmaz, B. (2008). **A Survey on Wireless Sensor Networks Deployment**, WSEAS Transactions on Communications, Issue 12, Vol. 7, Dec. 2008, pp. 1172-1181.

Chang, J.H., and Tassiulas, L. (2004). **Maximize Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks,** IEEE/ACM Transactions on networking, Vol. 12, No. 4., pp. 609-619.

Chan, T.J., Chen, C.M., Huang, Y.F., Lin, J.Y., and Chen, T.R. (2008). **Optimal Cluster Number Selection in Ad-hoc Wireless Sensor Networks**, WSEAS Transactions on Communications, Issue 8, Vol. 7, Aug. 2008, pp. 837-846.

Ding, E.J., Wang, C.N., and Zhou, Q. (2007). **Wireless Model and Deployment of Sensor Networks in the Mine**, Proc. of the 2007 International Conference on Information Acquistion, 9-11 Jul. 2007.

Goldsmith, A., (2007)**. Wireless Communications**, Markono Print Media Pte Ltd, Singapore,

Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008). **On Relay Node Placement and Assignment for Two-tiered Wireless Networks**, Moblie Network Application, 2008, pp. 186-197.

Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishman, H. (2000). **Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks**, Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.

Levendovszky, J., Bojarszky, A., Karlocai, B., and Olah, A. (2008). **Energy Balancing by Combinatorial Optimization for Wireless Sensor Networks**, WSEAS Transactions on Communications, Issue 2, Vol. 7, Feb. 2008, pp. 27-32.

MaxStream Incorporation, (2006). **IEEE 802.15.4 OEM RF Modules,** www.MaxStream.net, 12 July 2006.

Narayanan, S., and Bhaskar, K. (2004). **Maximizing Data Extraction in Energy-Limited sensor Networks**, Proc. of IEEE INFOCOM 3, pp. 1717-1727,

Paul, B., Matin, M.A., Showkat, M.J., and Rahman, Z. (2010). **Optimal Placement of Base Stations in a Two Tiered Wireless Sensor Network**, WSEAS Transactions on Communications, Issue 1, Vol. 9, Jan. 2010, pp. 43-52.

Shi, Y., Thomas, Y., Hou, and Efrat, A. (2009). **Algorithm design for a class of base station location problems in sensor networks,** Wireless Networks, Vol. 15, No.1, pp. 21-38

Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. (2007). **WIRELESS SENSOR NETWORKS** (pp.176-178), AJOHN WIREY & SONS, INC., Publication.

Turjman, F.M., Hassanein, H.S., and Ibnkahla, M.A. (2009). **Connectivity Optimization with Realistic Lifetime Constraints for Node Placement in Environmental Monotoring**, IEEE 34th Conference on Local computer Networks (LCN 2009), 20-23 Oct. 2009.

Zahariadis, T., Leligou, H.C., Voliotis, S., Maniatis, S., Trakadas, P., and Karkazis, P. (2009). **Energy-Aware Secure Routing for Large Wireless Sensor Networks**, WSEAS Transactions on Communications, Issue 9, Vol. 8, Sep. 2009, pp. 981-991.

ภาคผนวก ก

ความซับซ้อนของปัญหา

ก.1 ความซับซ้อนของปัญหา

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด จากหัวข้อ 3.5 ได้ทำการศึกษาความซับซ้อนของปัญหาโดยพิจารณาจากจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาคำตอบ ซึ่งทำการออกแบบเครือข่ายภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 100 ตารางเมตร ประกอบด้วย โนดตรวจรู้ 5 โนด สถานีฐาน 1 สถานี และตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 6 ตำแหน่ง โดยขนาดของปัญหาจะขึ้นอยู่กับจำนวนโนดตรวจรู้ (a) จำนวนสถานีฐาน (b) และจำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)

จากการออกแบบเครือข่ายนี้ a=5, b=1, c=6 โดยตัวแปรตัดสินใจที่เราต้องการหาคำตอบมีดังนี้ x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j s_{ik} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปโนดตรวจรู้ k ; $i,k \in I, i \neq k$ (*bits*) r_{ij} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปสถานีถ่ายทอด j ; $j \in J$ (*bits*) b_{im} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน m ; $m \in M$ (*bits*) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

x_j ; j = 6 =c

s_{ik} ; i = k = a = 5 : $a(a\text{-}1)$

r_{ij} ; i = a = 5, j= c = 6 : ac

b_{im} ; i =a = 5, m = b = 1 : ab

เพราะฉะนั้น y = c+ $a(a\text{-}1)$ + ac+ab

จัดรูป y = a(a+b+c-1) +c

แทนค่า y = 5(5+1+6-1) +6 = 61

จากนั้นได้ทำการเพิ่มขนาดของปัญหาเพื่อศึกษาความซับซ้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งได้กำหนดจำนวนโนดตรวจรู้ สถานีฐานและจำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อขนาดของปัญหา (นั่นคือ a, b, c) เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นแต่ขนาดของตัวแปรตัดสินใจจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล จากการศึกษาจะให้เห็นว่าในการออกแบบเครือข่ายเราควรนำสมการคณิตศาสตร์มาช่วยในการออกแบบ เนื่องจากเมื่อตัวแปรเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาคำตอบที่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ทุกประการ

ตารางที่ ก.1 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบเครือข่ายและจำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

โนดตรวจรู้(a)	สถานีฐาน(b)	จำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)	จำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด (y)
5	1	6	61
5	3	6	71
5	1	10	85
50	1	6	2,806
50	3	6	2,906
50	6	10	3,260

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Prommak, C., and Modhirun, S. (2011). **Optimal Wireless Sensor Network Design for Efficient Energy Utilization,** Aina 25th IEEE International Conference on Advanced Information Networking And Applications, 2011. Biopolis, Singapore, March 22 - 25, pp: 814-819, 2011.

2011 Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications

Optimal Wireless Sensor Network Design for Efficient Energy Utilization

Chutima Prommak and Sujitra Modhirun
Department of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand
cprommak@sut.ac.th

Abstract- This paper presents a study of the optimal network design for efficient energy utilization in continuous data-gathering Wireless Sensor Networks (WSNs). We examine the problem of minimizing the network cost through the minimum number of relay-station installation. We model the network design problem as a mixed integer linear programming. Our key contribution is that the proposed model not only guarantee the network lifetime but also ensure the radio communication between the energy-limited sensor nodes so that the network can guarantee packet delivery from sensor nodes to the base station. Numerical experiments were conducted to evaluate and demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key-Words: Wireless Sensor Network, Network Design, Energy Consumption

I. INTRODUCTION

Wireless Sensor Networks (WSNs) has become potential solutions for a wide range of applications such as farm monitoring, building and factory management, and military controls. Gathering environmental information is a common function that makes use of WSNs, in which the Sensor Nodes (SNs) are deployed in the sensing field and the Base Station (BS) is used to collect and analyze the sensing data. SNs send data to BS directly or indirectly via other intermediate SN(s). SNs usually operate by using limited energy sources such as batteries. It may be undesirable to replace or recharge SNs due to high maintenance cost. In this case, Relay Stations (RSs) are deployed to receive and forward data from SNs to BS so that the energy-limited SNs can live for a desired period of network lifetime. RSs may equip with more sophisticated energy sources such as solar cells with larger batteries. In order to operate WSNs under efficient energy utilization of SNs, it is required effective network design approaches considering practical issues such as limitation of network cost, energy, and radio communication range.

Several works have devoted to the study of WSN design problems in which the energy limitation of sensor nodes is the main concern [1-5]. In [1-2], the authors present the study of the WSN design in term of the base station placement problems. In [1], the objective is to maximize the network lifetime for a given number of base stations to be installed in the network. Besides optimal base station placement, in [2], the authors consider determining the optimal number of base stations. Other approaches proposed to address the network lifetime problems include optimal routing [3] and optimal rate allocation. Assuming the transmitting power level of sensor nodes can be adjusted based on the distance, [3] focuses on the shortest path problems to find optimal route from sensor nodes to BS. In [4], the focus is on the problems of the maximum data extraction, considering limitation of SN battery energy.

In [5], the authors proposed a Binary Integer Programming (BIP) for the relay node placement and assignment problems. The objective is to maximize the number of packets received at the base station and achieve a specified network lifetime. While their contribution is significant, the proposed method did not consider flow conservation constraints and could not provide packet delivery guarantee. Furthermore, the network cost was not taking into account and the number of hops between SN and BS is limited to two hops. For this reason, more flexible and effective approaches for the WSN design with the use of relay stations are needed.

In our paper we propose a novel WSN design approach, accounting for the flow conservation and the network cost consideration in the network design process. Specifically, we aim to solve the RS placement and assignment problem (RPAP) for WSN that can guarantee network lifetime and guarantee packet delivery from all SNs in the network by utilizing multiple hop RSs at the minimum network cost.

The rest of the paper is organized as followed. Section II provides the problem definition and describes the problem formulation. Section III presents numerical results and discussion which focus on studying the effects of using RSs on the energy consumption of the networks. Finally, section IV concludes the paper.

II. PROBLEM DEFINITION AND FORMULATION

A. *Problem Definition*

The proposed WSN design in this paper focuses on RS placement and assignment problems which involve selecting locations to install RSs from a set of candidate sites and determining a set of SNs and their routes to deliver sensing information to suitable RS for efficient energy utilization. Here the network configuration is formed in the way that SNs can communicate directly to BS or indirectly via other SNs and/or the selected RS which connect to BS. Specifically, the proposed model aims to determine the minimum number of RSs and the optimal locations to install them in the sensing

978-0-7695-4338-3/11 $26.00 © 2011 IEEE
DOI 10.1109/WAINA.2011.89

IEEE computer society

field. Moreover, the proposed model aims to determine routes to deliver sensing information from a set of SNs to the suitable RS so that the resulting network configuration can guarantee the required network lifetime and ensure the radio communication between SNs so that the network can guarantee packet delivery from SNs to BS.

Here the network lifetime is defined as the duration from starting the network until the first SN depletes its battery power. This is a common definition of the WSN lifetime [6]. It is assumed that the SNs are distributed across the sensing field and the sensing data can be delivered continuously through other SNs and/or RS in a multi-hop manner.

B. Problem Formulation

The proposed WSN design problem is formulated as a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model, denoted as a RPAP model. Table I shows the notation used in the model. The RPAP model aims to minimize the number of RSs and find optimal locations to install them so that the radio communication between nodes in the network and the required network operation period can be guaranteed. We incorporate the network design requirements into the following mathematical model, consisting of the objective function (1) and constraints (2) – (12).

$$Minimize \sum_{\forall j \in J} x_j \quad (1)$$

Constraints:

$$s_{ik}\left(P_{ik} - P_{t_SN}\right) \geq 0,\ \forall i,k \in I,\ i \neq k \quad (2)$$

$$r_{ij}\left(P_{ij} - P_{t_RS}\right) \geq 0,\ \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

$$b_{im}\left(P_{im} - P_{t_BS}\right) \geq 0,\ \forall i \in I, \forall m \in M \quad (4)$$

$$g_i + \sum_{\forall n \in I}^{n \neq i} s_{ni} = \sum_{\forall k \in I}^{i \neq k} s_{ik} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + \sum_{\forall m \in M} b_{im},\ \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{\forall i \in I} g_i = \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall i \in I} r_{ij} + \sum_{\forall m \in M} \sum_{\forall i \in I} b_{im},\ \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{\forall i \in I} r_{ij} = M x_j,\ \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{\forall n \in I}^{n \neq i} C_r s_{ni} T + \sum_{\forall k \in I}^{i \neq k} C_{t_SN} s_{ik} T + \sum_{\forall j \in J} C_{t_RS} r_{ij} T + \sum_{\forall m \in M} C_{t_BS} b_{im} T \leq E_i,\ \forall i \in I \quad (8)$$

$$x_j \in \{0,1\},\ \forall j \in J \quad (9)$$

$$s_{ik} \geq 0,\ \forall i \in I,\ \forall k \in I,\ i \neq k \quad (10)$$

$$r_{ij} \geq 0,\ \forall i \in I, \forall j \in J \quad (11)$$

$$b_{im} \geq 0,\ \forall i \in I, \forall m \in M \quad (12)$$

Table I Notations

Sets:	
I	A set of Sensor Nodes (SNs)
J	A set of candidate sites to install Relay Station (RSs)
M	A set of Base Stations (BSs)
Decision variables:	
x_j	A binary {0, 1} variable that equals 1 if the RS is installed at site j; $j \in J$; 0 otherwise
s_{ik}	Data sent from SN i to SN k; i and $k \in I$
r_{ij}	Data sent from SN i to RS j; $i \in I$ and $j \in J$
b_{im}	Data sent from SN i to BS m; $i \in I$ and $m \in M$
Constant parameters:	
C_{t_SN}	Energy consumption coefficient for transmitting data from sensor node i to SN k; i and $k \in I$
C_{t_RS}	Energy consumption coefficient for transmitting data from sensor node i to RS j; $i \in I$, $j \in J$
C_{t_BS}	Energy consumption coefficient for transmitting data from sensor node i to BS m; $i \in I$, $m \in M$
C_r	Energy consumption coefficient for receiving data
P_{t_SN}	The received signal strength threshold for SNs
P_{t_RS}	The received signal strength threshold for RSs
P_{t_BS}	The received signal strength threshold for BS
P_{ik}	The signal strength that a SN k receives from SN i; i and $k \in I$
P_{ij}	The signal strength that a RS j receives from SN i; $i \in I$ and $j \in J$
P_{im}	The signal strength that a BS m receives from SN i; $i \in I$ and $m \in M$
M	Buffer size limitation of RSs
T	The required network lifetime
E_i	Initial energy of battery of SNs
g_i	Data generating rate of SNs

The objective function (1) aims to minimize the number of RSs that will be installed in the network. Constraints (2) – (4) ensure the radio communication between nodes in the network by assessing the signal strength received at each node. These constraints enforce that the received signal strength must be greater than the specified threshold. Constraint (5) is a flow balancing equation of each SN in the network. It states that sensing information g_i generated by SN i plus all incoming bits from other SNs is equal to total outgoing bits sent from SN i to other SNs or RSs or BS. Constraint (6) states that all sensing information generated by SNs can be sent to RSs or BS. It guarantees packet delivery from SNs to RSs or BS. Constraint (7) enforces that RS must be installed at the site j if a communication link between SN i and RS at site j is established. Moreover it specifies the buffer size limitation of the RS j. Constraint (8) specifies the energy limitation of each SN. It states that the total energy consumption (for receiving

and transmitting the sensing information) at each SN during the required network lifetime cannot exceed the initial node energy. Constraint (9) states that x_j are binary 0-1 variables. Finally, constraint (10)-(12) state that s_{ik}, r_{ij} and b_{im} are non-negative variables.

III. Numerical Results And Discussion

In this section we present numerical study and analysis demonstrating the WSN design using the proposed RPAP model. We compare our model with those presented in [1] of which the objective function is to maximize the network lifetime with constraints on SNs' battery energy and RSs are not used. We call it a MNL (Maximize Network Lifetime) model. Our model, on the other hands, aims to minimize the RS installation cost while maintaining the required period of the network lifetime. We incorporate the path loss function in the constraints where we calculate the received signal strength to guarantee sufficient signal strength that can ensure the radio communication between nodes in WSNs. Moreover, we enforce the flow conservation rule to guarantee packet delivery from SNs to BS.

In numerical experiments, we consider the sensing field of size 500m×500m as shown in Figure 1, in which there are 30 SNs [1]. To observe effects of deploying RSs in WSN and effects of using different number of candidate sites to install RSs, we conduct four network design scenarios. The first scenario applies the MNL model as presented in [1] and RS is not deployed. Scenario 2 – 4 deploy RSs in the network where the number of candidate sites to install RSs are 30, 50 and 100, respectively. Figure 2 – 4 show distribution of the candidate sites to install RSs.

In our experiments, the energy model (Figure 5) is used to compute the energy consumption for transmitting and receiving signal which are rewritten here in Eq. (13) and (14) [7, 8].

$$Tx = (E_c \times B) + (\varepsilon_{amp} \times B \times d^n) \quad (13)$$

$$Rx = E_c \times B \quad (14)$$

where E_c = Energy consumption in transmitting and receiving circuit (nJ/bit)

ε_{amp} = Energy consumption in amplifier ($pJ/bit/m^n$)

B = Number of bits ($bits$)

d = Distance between transmitter and receiver ($m.$)

n = Index path-loss exponent

The received signal strength at SNs, RSs and BS (P_{ik}, P_{ij}, and P_{im}) are pre-computed by using the simplify path loss model presented in [9] and it is written here in Eq. (15). The pre-computed values are input into the RPAP model to find the optimal locations to install RSs.

$$P_r = P_t + K - 10n\log_{10}\left[\frac{d}{d_0}\right] \quad (15)$$

$$K(dB) = 20\log_{10}\frac{\lambda}{4\pi d_0} \quad (16)$$

where P_r is the received signal strength (dBm), P_t is the transmit power (dBm), n is the index path loss exponent, d is a distance between the transmitting node and the receiving node ($m.$), d_0 is a reference distance for the antenna far field ($m.$)and λ is signal wavelength ($m.$).

We consider the WSN standards IEEE 802.15.4 in the numerical experiments. Table II shows the parameters used in the numerical experiments (see [9, 10] for more details). The received signal strength threshold to ensure the radio communication between nodes in the network is set to -90 dBm [10].

For scenario 1 in which the RSs are not deployed, we solve the problem of maximizing the network lifetime using the MNL model [1] to find optimal flow assignment with constraints on SNs' battery energy. We obtained the network lifetime of 801.82 seconds. Then we set this value as a required network lifetime for the WSN design in scenario 2 – 4.

In the experiment scenario 2 – 4, we input the set of RS candidate sites, the required network lifetime, and other parameters to the RPAP model. We then solve the WSN design by implementing the RPAP model with the ILOG-OPL development studio and solving with CPLEX 5.2 optimization solver. Computations are performed on an Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz and 2GB of RAM.

Table II Parameters Used in Numerical Experiments

Parameters	Value
Receiver sensitivity threshold	-90 dBm
Communication data rate	2.5 kbps
Operating frequency	2.4 GHz
Initial energy of sensor nodes	2,000 joules
Buffer size at relay stations	1,000,000 bits
Transmit power	32mW
Reference distance	1m.
Path loss exponent	4

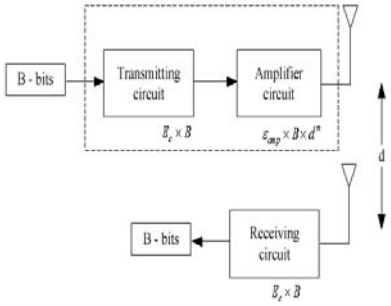


Figure 5. Transmitting and receiving node model

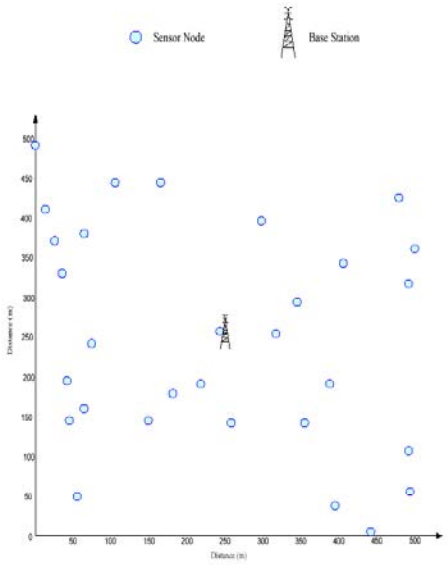


Figure 1. Sensing field and sensor nodes distribution

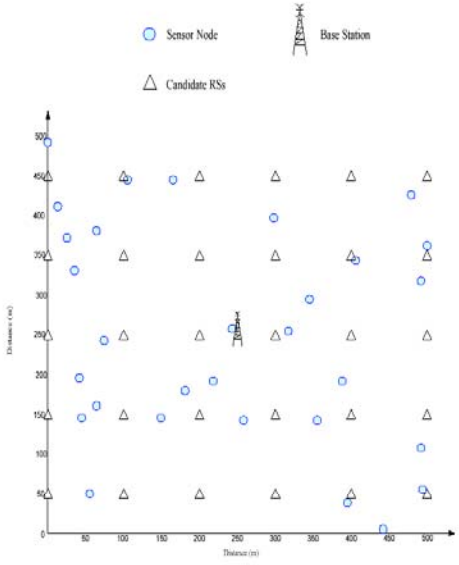


Figure 2. Distribution of 30 candidate sites to install RSs

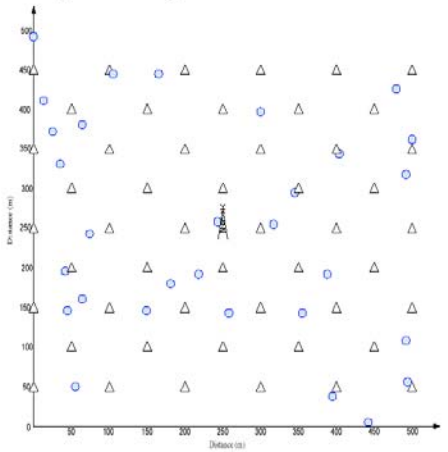


Figure 3. Distribution of 50 candidate sites to install RSs

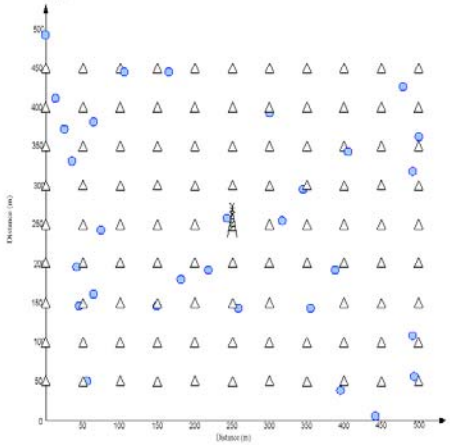


Figure 4. Distribution of 100 candidate sites to install RSs

Table III shows the number of RSs selected in the sensing field of the experimental scenarios. In scenario 1, no relay station is deployed; sensing data is sent from SN via other intermediate SN(s) to BS or sent directly to BS. In scenario 2 – 4, the number of selected RSs is 17, 16, and 13, respectively. It can be observed that as the number of candidate sites increases, the number of selected RSs decreases. The reason is that the RPAP model can minimize the number of selected RSs better when there are more choices of locations that can satisfy all the network design constraints. However, high number of candidate sites could lead to longer computational time, especially in a big network (containing a lot of SNs).

Figure 6 illustrates the selected location to install RSs and the flow assignment from SNs to BS. We can see that the sensing data can be sent from SN via other intermediate SN(s) to RS or sent directly to RS and then RS send the received data to BS. The selection of RS locations and the flow assignment are based on the consideration of the communication range of the SNs.

Table IV summarizes the energy consumption of SNs. We can see that scenario 1 results in highest energy consumption whereas in scenario 2 – 4 SNs use much less energy. The reason is that scenario 1 does not deploy RS and the intermediate SNs use lot of energy to receive and forward

sensing data to BS. In this case, MNL model [1] assumes that SNs can communicate with other SNs without a communication range restriction. This may not be true in the practical environments. Comparing the energy consumption of scenario 2, 3, and 4, we can observe that the energy consumption is highest in scenario 4 because it deploys the least number of RSs. Thus, SNs have to receive and forward more sensing data to BS. Nevertheless, the number of installed RSs in scenario 4 is sufficient to guarantee the required network lifetime and communication ranges among SNs, RSs and BS.

Table V shows the residual energy of SNs at the end of the network lifetime. We can see that the residual energy of SNs in scenario 2 – 4 is much higher that in scenario 1. From the standard deviation value, we can say that most of SNs in scenario 2 – 4 remain high energy whereas more than 50% of SNs in scenario 1 almost deplete their power energy (i.e., have residual energy less than 1 joule).

These results show that the proposed RPAP model yields the network configuration that can guarantee the required network lifetime and ensure the radio communication between SNs, which in turn guarantee the packet delivery from SNs to BS at the minimum network cost.

Table III Number of relay stations selected in the sensing field

Scenario	Numbers of selected RSs
1	0
2	17
3	16
4	13

Table IV Energy consumption of sensor nodes

Scenario	Total energy consumption of all SNs (joules)	Average energy consumption of each SN (joules)	SD. of energy consumption of each SN (joules)
1	47763.446	1592.115	682.139
2	553.27	18.44	15.82
3	566.60	18.89	17.92
4	837.25	27.91	25.36

Table V Residual energy at sensor nodes

Scenario	Average residual energy at each SN (joules)	SD. of residual energy at each SN (joules)	Percentage of energy-depleting SNs*
1	407.885	682.139	56.67%
2	1981.56	15.82	0
3	1981.11	17.92	0
4	1972.09	25.36	0

* Energy-depleting SNs are defined as nodes that have residual energy less than 1 joule

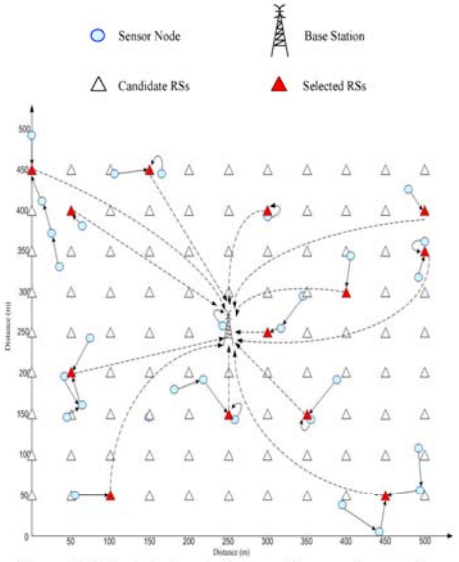


Figure 6. Selected relay stations and flow assignment in scenario 4

IV. Conclusion

In this paper, the optimal network design for efficient energy utilization in continuous data-gathering wireless sensor networks (WSNs) is investigated. Given location of base station (BS) and sensor nodes (SNs) with specified sensing rate, the proposed network design method determines the optimal locations of relay stations (RSs) and the sensing flow assignment from SNs to BS with constraints on the SNs' radio communication range and the required network lifetime. Numerical experiments show that the proposed method yield WSNs with more efficient energy utilization compared with other methods in term of the residual energy and the percentage of energy-depleting sensor nodes.

Acknowledgement

This work was supported by the research fund from Suranaree University of Technology, Thailand.

References

[1] Yi Shi, Y. Thomas Hou, Alon Efrat, "Algorithm design for a class of base station location problems in sensor networks," Wireless Networks, vol.15, No.1, pp. 21-38, 2009.

[2] A. P. Azad and A. Chockalingam, "Mobile Base Stations Placement and Energy Aware Routing in Wireless Sensor Networks," vol.1, No. 1683475, pp. 264-269, 2006.

[3] Jae-Hwan Chang, and Leandros Tassiulas, "Maximize Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM Transactions on networking, vol.12, No.4, pp. 609-619Aug 2004.

[4] S. Narayanan and K. Bhaskar, "Maximizing Data Extraction in Energy-Limited sensor Networks," in Proc. of IEEE INFOCOM 3, pp. 1717-1727, 2004.

[5] W. Guo, X. Huang, W. Lou, and C. Liang, "On Relay Node Placement and Assignment for Two-tiered Wireless Networks," Mobile Network Application, vol.13, No.1-2, pp.186-197, 2008.
[6] Fadi M. Al-Turjman, Hossam S. Hassanein and Mohamed A. Ibnkahla, "Connectivity Optimization with Realistic Lifetime Constraints for Node Placement in Environmental Monitoring," in Proc. of IEEE 34th Conference on Local computer Networks (LCN 2009), pp. 617-624, 20-23 October 2009.
[7] En-Jie Ding, Chao-Nan Wang, and Qiang Zhou, "Wireless Model and Deployment of Sensor Networks in the Mine," in Proc. of the International Conference on Information Acquisition, No. 4295791, pp. 538-542, 9-11 July 2007.
[8] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishman, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 223, 2000.
[9] Andrea Goldsmith, "Wireless Communications," Markono Print Media Pte Ltd, Singapore, pp. 46-48, 2007.
[10] MaxStream Incorporation, "IEEE 802.15.4 OEM RF Modules," www.MaxStream.net, 12 July 2006.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุจิตรา โหมดหิรัญ เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่ จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนอนุบาลสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1 ถึง 5 จากโรงเรียนสวรรค์อนันต์วิทยา แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนศรีสำโรงชนูปถัมภ์ จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา หลังจากจบการศึกษาปริญญาตรี ได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี