

รายงานการวิจัย
การจัดตั้งกลุ่มคลัสเตอร์ด้วยตนเองภายในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
Self Organized Cluster in Wireless Sensor Networks

ชื่อผู้วิจัย
รศ. ดร. โชติพัชร ภารณวลัย
นายศรายุทธ ชเนศกุลวัฒนา
Prof. Goutam Chakraborty

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553
คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การจัดตั้งกลุ่มคลัสเตอร์ด้วยตนเองภายในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Self Organized Cluster in Wireless Sensor Networks

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2553 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 100,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ เดือนเมษายน 2553 ถึง เดือนมีนาคม 2554

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมลล์

รศ.ดร. โชติพัชร ภรณ์วลัย (หัวหน้าโครงการ)

หน่วยงานต้นสังกัด คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

อีเมลล์ chotipat@it.kmitl.ac.th

นายศรายุทธ ธเนศสกุลวัฒนา (ผู้ร่วมโครงการ)

หน่วยงานต้นสังกัด คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

อีเมลล์ sarayoot@gmail.com

Prof. Goutam Chakraborty (ผู้ร่วมโครงการ)

หน่วยงานต้นสังกัด Department of Software and Information Science,

Iwate Prefectural University, Japan

อีเมลล์ goutam@soft.iwate-pu.ac.jp

คำสำคัญ (Keywords) เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย การใช้พลังงานของตัวรับรู้ ปัญหาในการหาตำแหน่งที่เหมาะสม

บทคัดย่อ

เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงาน (Energy-Aware Routing Protocol) บนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) โดยส่วนใหญ่ที่พบจะเลือกใช้การแบ่งเครือข่ายออกเป็นกลุ่ม (Cluster) โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) ซึ่งเป็นตัวรับรู้ (Sensor) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้อื่นๆ ภายในกลุ่ม แล้วส่งไปยังสถานีฐาน (Base Station) ถึงกระนั้นก็ตามจะยังคงมีตัวรับรู้บางตัวที่มีการใช้พลังงานมากกว่าตัวรับรู้อื่นๆ เนื่องจากระยะทางในการส่งคลื่นวิทยุที่ห่างไกล หรือจำนวนข้อมูลที่ต้องส่งต่อ (Relay) เป็นจำนวนมาก การปรับกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายและหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลา จะทำให้พลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในกลุ่มใกล้เคียงกัน แต่การปรับกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายจะมีค่าใช้จ่ายอื่น (Overhead) และต้องสูญเสียพลังงานในการติดต่อสื่อสารเพื่อการปรับเปลี่ยนกลุ่มทุกครั้ง ในงานวิจัยนี้จะขอเสนอการใช้ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) เข้ามาช่วยในการทำให้การกระจายตัวของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีระดับใกล้เคียงกัน โดยการคำนวณอัตราส่วนของข้อมูลที่จะต้องส่งในตัวรับรู้แต่ละตัวที่จะถูกส่งออกไปยังตัวรับรู้อื่น ก่อนจะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐาน ทำให้ระดับพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวอยู่ในระดับใกล้เคียงกันโดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่ม

ABSTRACT

A large portion of energy-aware routing protocol for wireless sensor networks are cluster-based. In cluster based approaches, power of the cluster head (CH) nodes are drained more rapidly compared to other member nodes. While dynamic CH approach is more efficient than static one, reconfiguring the sensor nodes to form a new set of clusters at intervals has a lot of overhead. We also found that, even with dynamic CH approach, the energy is not uniformly dissipation among all nodes. In this paper, we propose a new energy-aware routing protocol where the topology of the network is cellular and fixed. We analyze the energy model that can lead to uniform power dissipation of nodes by sending data to sink via different intermediate nodes. Therefore reconfiguring of cluster is not necessary. The simulation results show that the proposed protocol has longer node lifetime and better distribution of energy dissipation than original LEACH protocol.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ที่ได้ช่วยสนับสนุนงานวิจัยนี้ จนประสบผลสำเร็จ

รศ.ดร.โชติพัชร ภรณ์วลัย

สารบัญ

หน้า

รายละเอียดของโครงการวิจัย	I
บทคัดย่อ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย	6
2.1 วิธีการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ (Media Access Control)	7
2.1.1 Circuit Mode Media Access Control.....	7
2.1.2 Packet Mode Media Access Control	10
2.2 เทคนิควิธีการหาเส้นทาง (Routing Protocol)	14
2.2.1 Multi-Hop Routing.....	14
2.2.2 Clustering Approach	15
บทที่ 3 การกระจายการใช้พลังงานของตัวรับรู้ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย.....	17
3.1 เป้าหมายและเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสม	17
3.1.1 แบบจำลองและสมมติฐานของปัญหา	17
3.1.2 ระบุเงื่อนไขของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม.....	18
3.2 การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสม.....	20
3.2.1 การคำนวณในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายกระจายบนเส้นตรง เมื่อ $N=3$	20
3.2.2 การคำนวณในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายกระจายบนเส้นตรง เมื่อ $N=4$	21
3.2.3 การคำนวณในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายกระจายบนระนาบ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดลองและหาค่าสมรรถนะของระบบ	30
4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของระบบ	30
4.2 ค่าชี้วัดสมรรถนะของระบบ.....	31
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ	31
4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ	32
4.5 ค่าสมรรถนะของระบบ.....	33
บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าของอัตราส่วน x_{ji} เมื่อโหนดกระจายบนเส้นตรง $N=4$	23
3.2 ค่าของอัตราส่วน x_{ji} เมื่อตัวรับรู้กระจายอย่างสม่ำเสมอบนระนาบ	29
4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ	32
4.2 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 ถึง 35 เมตร	37
4.3 จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายทั้งหมดส่งได้เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 ถึง 35 เมตร	38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเทียบกับจำนวนตัวรับรู้	2
2.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามเวลา	7
2.2 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่	8
2.3 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยการเข้ารหัส	9
2.4 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยพื้นที่	10
2.5 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี Pure ALOHA	11
2.6 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี Slotted ALOHA	12
3.1 แบบจำลองเครือข่ายอย่างง่าย	17
3.2 แบบจำลองการใช้พลังงานเฉพาะส่วนของการขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ	18
3.3 แบบจำลองแสดงอัตราส่วนของการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนด	18
3.4 แบบจำลองการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดเมื่อ $N=3$	20
3.5 แบบจำลองการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดเมื่อ $N=4$	21
3.6 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ	24
3.7 ส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงเศษหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย	25
4.1 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ	30
4.2 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้ในวิธี LEACH เมื่อ k มีค่า 1 ถึง 36 โหนด	31
4.3 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร	34
4.4 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร	34
4.5 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร	35
4.6 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร	35
4.7 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร	36
4.8 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร	39
4.9 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร	39
4.10 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร	40
4.11 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร	40
4.11 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร	42
4.14 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร	42
4.15 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร	43
4.16 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร	43
4.17 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร	44
4.18 พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานใน 200 รอบแรกที่ระยะ d ต่าง ๆ	44
4.19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร	45
4.20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร	46
4.21 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร	46
4.22 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร	47
4.23 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ประกอบด้วย ตัวรับรู้ (Sensor) พร้อมตัวรับส่งคลื่นวิทยุ (Transceiver) เชื่อมต่อกันด้วยคลื่นวิทยุ (Radio) เพื่อค้นคืนข้อมูลต่างๆ และส่งข้อมูลที่ได้กลับไปให้สถานีฐาน (Base Station) นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทำให้ตัวรับรู้ไร้สายมีราคาที่ถูกกลง มีความน่าเชื่อถือสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

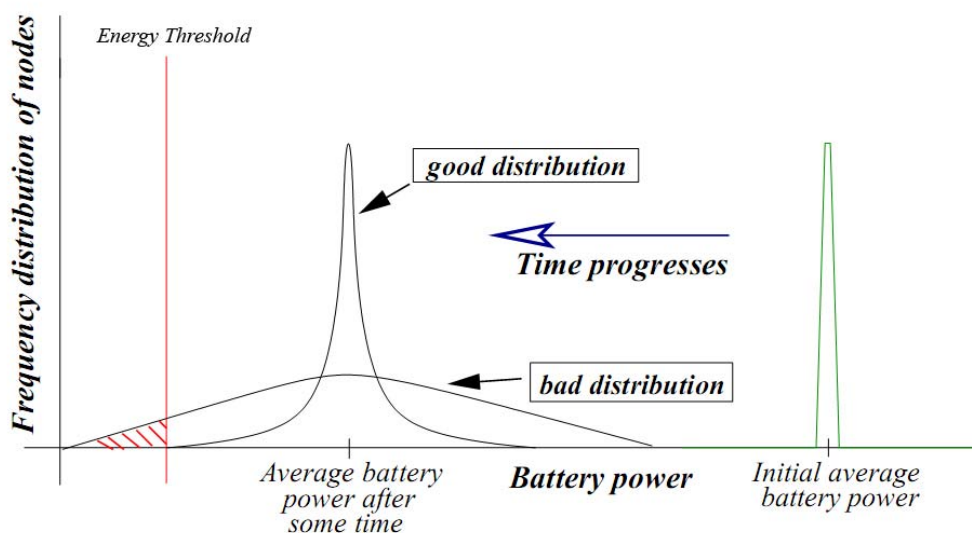
การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นเป้าหมายหลักของการวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งมีหลากหลายมุมมองตั้งแต่ระบบปฏิบัติการในงานวิจัยของ P. Levis [2] การได้มาของข้อมูลในงานวิจัยของ S. R. Madden [3] การแพร่กระจายข้อมูลในงานวิจัยของ C. Intanagonwiwat [4] กระบวนการสอบถามข้อมูลในงานวิจัยของ D. Braginsky [5] การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในงานวิจัยของ W. Ye [6] ข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสารในงานวิจัยของ W. R. Heinzelman [7] [10] B. Krishnamachari [8] และ A. Rogers [11] ไปจนถึงทอพอโลยีของเครือข่ายในงานวิจัยของ A. Cerpa [9] ซึ่งงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปในด้านข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสาร โดยตระหนักถึงการใช้พลังงาน

การใช้งานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ตามจุดมุ่งหมายของข้อมูลที่กำหนดให้ตัวรับรู้ไร้สายตรวจสอบคือ

- 1) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวตรวจจับได้มีความสำคัญสูง ตัวอย่าง เช่น ในระบบสัญญาณเตือนอัคคีภัย กล้องตรวจตราเพื่อความมั่นคง ระบบตรวจสอบสถานะของโครงสร้างสะพานหรืออาคาร

- 2) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวรวบรวมมาได้ สามารถทดแทนด้วยข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากสิ่งที่ผู้ใช้ต้องการคือข้อมูลที่ถูกรวบรวมให้เห็นภาพรวมของบริเวณนั้น ๆ การใช้งานลักษณะนี้มักใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

จากการใช้งานด้านบนทั้งสองลักษณะ การยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้งานในลักษณะที่ 1 ซึ่งข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวไม่สามารถใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายอื่น ๆ ที่อยู่รอบข้างมาทดแทนได้



รูปที่ 1.1 การกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเทียบกับจำนวนตัวรับรู้

จากรูปที่ 1.1 แสดงการกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเทียบกับจำนวนตัวรับรู้ในระดับพลังงานนั้นๆ โดยเส้น Energy Threshold แสดงค่าพลังงานที่ตัวรับรู้ไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ในสถานะเริ่มต้นตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่าย มีพลังงานสูงและมีระดับพลังงานใกล้เคียงกัน ดังกราฟด้านขวามือในรูปที่ 1.1 เมื่อเวลาผ่านไป พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายจะลดลงเรื่อยๆ จากขวามาซ้าย การกระจายตัวของพลังงานที่เหลือของตัวรับรู้ไร้สายที่คืนนั้นควรจะใกล้เคียงกัน กราฟของพลังงานในตัวรับรู้ไร้สายที่มีการกระจายตัวที่ดี (good distribution) คือกราฟด้านซ้ายที่มีฐานแคบ พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวมีระดับใกล้เคียงกัน สำหรับการกระจายตัวของพลังงานที่ไม่ดี (bad distribution) เป็นดังกราฟด้านซ้ายที่มีฐานกว้าง พลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายที่มีพลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุดมีค่าแตกต่างกันมาก ตัวรับรู้ไร้สายที่มีพลังงานน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Threshold) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกแรเงาในรูปที่ 1.1 จะไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ทำให้ข้อมูลที่จะได้รับจากตัวรับรู้ไร้สายนั้นขาดหายไปจากระบบ

เป้าหมายของเกณฑ์วิธีคิดต่อสื่อสารในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่ดีควรจะ (1) ลดการใช้พลังงานโดยรวมของตัวรับรู้ไร้สาย และ (2) ลดการกระจายของระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายให้มีระดับพลังงานใกล้เคียงกัน ซึ่งรายงานการวิจัยนี้จะเน้นไปใน 2 เป้าหมายนี้

ตามสมมติฐานของงานวิจัยนี้ ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวในระบบสามารถจะปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการข้อมูลได้ ซึ่งพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายต้องใช้ในการส่งข้อมูล จะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองถึงกำลังสี่ของระยะทาง ในวิธีส่งโดยตรง (Direct Transmission) ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายทำการส่งข้อมูลของตนเองไปยังสถานีฐานโดยตรง ซึ่งเป็นผลให้ตัวรับรู้ไร้

สายที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมาก ๆ หมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ในเครือข่าย และสำหรับวิธีการ Minimum Transmission Energy (MTE) ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายจะพยายามใช้พลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งให้น้อยที่สุด โดยทำการส่งต่อข้อมูลผ่านไปยังตัวรับรู้อื่นที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า ที่อยู่ใกล้ตัวมันเองมากที่สุด โดยทำการส่งต่อกันไปเรื่อย ๆ จนถึงสถานีฐาน ทำให้ตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องส่งต่อข้อมูลจากตัวรับรู้อื่น ๆ เป็นจำนวนมาก และหมดพลังงานไปก่อนตัวรับรู้อื่น ๆ ในเครือข่าย ทั้งในวิธี Direct Transmission และ Minimum Transmission Energy ตัวรับรู้ที่หมดพลังงานก่อนจะอยู่ในบริเวณเดียวกัน ทำให้ข้อมูลที่ควรจะเก็บคืนได้จากบริเวณนั้นหายไป

เพื่อแก้ปัญหาตัวรับรู้ในพื้นที่เดียวกันหมดพลังงานในวิธีการ Direct และ MTE เกณฑ์วิธี LEACH ซึ่งเป็นงานวิจัยของ W. R. Heinzelman [7] [10] ได้ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อให้ตัวรับรู้หมดพลังงานแบบสลับ ซึ่งตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ในบริเวณใกล้เคียงกับตัวรับรู้ที่หมดพลังงานสามารถที่จะส่งข้อมูลในบริเวณนั้นทดแทนได้ จะแบ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายออกเป็นกลุ่ม (Cluster) โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่มทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้อื่น ๆ แล้วส่งต่อไปให้สถานีฐาน การทำงานในลักษณะนี้ตัวรับรู้ไร้สายที่จะต้องใช้พลังงานมากคือหัวหน้ากลุ่ม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มและหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลา เพื่อเฉลี่ยการใช้พลังงานออกไปยังตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่น ๆ ซึ่งการปรับเปลี่ยนกลุ่มจะมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสมาชิกในกลุ่มเพื่อยกเลิกกลุ่มเดิม และการติดต่อระหว่างตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวเครือข่ายในการสร้างกลุ่มใหม่ หากมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้งพลังงานที่จะต้องเสียไปกับการนี้ก็จะมากตามไปด้วย ตามงานวิจัยของ P. Dutta [13]

รายงานการวิจัยนี้ได้เห็นความจำเป็น ณ จุดนี้ จึงพยายามทำให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกันโดยไม่จำเป็นจะต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้ง โดยตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายจะส่งต่อข้อมูลให้กับตัวรับรู้ไร้สายอื่นๆ ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า การส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวจะส่งข้อมูลในหลายระดับพลังงานไปยังตัวกลางหลาย ๆ ตัว โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวใช้ในกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน ในรายงานการวิจัยนี้ได้นำปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) เข้ามาช่วยในการหาค่าของอัตราส่วนดังกล่าว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงการใช้พลังงานของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ที่ใช้วิธีการ Uniform เปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่น ๆ

2. เพื่อศึกษาถึงการกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในระบบ ที่ใช้วิธีการ Uniform เปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่น ๆ
3. เพื่อลดการใช้พลังงานรวมของตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมดในระบบ
4. เพื่อลดการกระจายของระดับพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่าย
5. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ที่ใช้วิธีการ Uniform

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย จะมีการใช้พลังงานในแต่ละตัวรับรู้ไม่เท่ากัน ซึ่งในเกณฑ์วิธีดั้งเดิม การส่งข้อมูลจะถูกส่งจากตัวรับรู้ต้นทางกลับไปยังสถานีฐานในครั้งเดียว ซึ่งระยะทางจากตัวรับรู้ไปยังสถานีฐานยิ่งห่าง ตัวรับรู้ก็ต้องใช้พลังงานมากเป็นกำลังสองของระยะทางเพื่อส่งข้อมูล ทำให้ตัวรับรู้เหล่านั้นหมดพลังงานไปก่อน และในบางเกณฑ์วิธีเพื่อลดการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลให้น้อยที่สุด จะใช้การส่งข้อมูลเป็นระยะทางสั้นๆ ผ่านตัวรับรู้ระหว่างทางกลับไปยังสถานีฐาน ซึ่งวิธีนี้ตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องทำการส่งต่อข้อมูลเป็นจำนวนมากๆ ทำให้สูญเสียพลังงานจำนวนมากในการส่งต่อข้อมูล

เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น จึงได้มีการแบ่งตัวรับรู้ไร้สายออกเป็นกลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่มทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้ส่งต่อไปให้สถานีฐาน แล้วทำการปรับเปลี่ยนกลุ่ม และหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลาเพื่อกระจายการใช้พลังงานออกไปยังตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ในกลุ่ม ซึ่งการปรับเปลี่ยนกลุ่มจะต้องมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสมาชิกในกลุ่มเพื่อยกเลิกกลุ่มเดิม และการติดต่อระหว่างตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวเครือข่ายในการสร้างกลุ่มใหม่ หากมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้งพลังงานที่จะต้องเสียไปกับการนี้ก็จะมากตามไปด้วย

สมมติฐานของรายงานการวิจัยนี้คือ ถ้าหากสามารถทำให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในกลุ่มมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน จะทำให้ความจำเป็นของการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายมีน้อยลงจะช่วยลดการใช้พลังงานของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายโดยรวม และยืดอายุการใช้งานของระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการกระจายการใช้พลังงาน ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เพื่อให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายมีการใช้พลังงานในระดับที่ใกล้เคียงกัน โดยงานวิจัยนี้เสนอวิธีการที่อนุญาตให้ตัวรับรู้ไร้สายส่งข้อมูลออกไปได้หลายเส้นทาง โดยในแต่ละเส้นทางจะมีค่าอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำเสนอการเชิงเส้นเข้ามาหาค่าที่เหมาะสมที่เหล่านี้

รายงานการวิจัยนี้จะทำการประเมินค่าสมรรถนะ (Performance Evaluation) วิธีการที่ได้คิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับ วิธีการ Direct Transmission (Direct) วิธีการ Minimum Transmission Energy (MTE) และวิธีการ LEACH โดยสร้างแบบจำลองระบบขึ้นมา วิเคราะห์ด้วย MATLAB ทำการหาค่าพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายใช้ หากการกระจายของพลังงานที่ใช้โดยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ และดูอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่าย

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ตั้งสมมติฐานของการวิจัย
2. สร้างแบบจำลองการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สาย
3. สร้างสมการของการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สาย
4. นำสมการของการใช้พลังงานที่ได้ มาคำนวณหาอัตราส่วนที่ทำให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในระบบมีการใช้พลังงานในระบบอย่างเท่าเทียมกัน
5. สร้างแบบจำลองระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายขึ้นมา โดยนำอัตราส่วนที่เหมาะสมที่คำนวณได้มาใช้ในวิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการ Direct Transmission วิธีการ Minimum Transmission Energy และวิธีการ LEACH
6. ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย พลังงานที่เหลืออยู่ พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้ไปในแต่ละรอบ รวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่
7. สรุปผลของการวิเคราะห์ระบบ

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ตัวรับรู้ไร้สายในระบบสามารถจะปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุ ที่ใช้ในการข้อมูลได้ตามระยะทางที่ต้องการ
2. การคำนวณพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้ จะคำนึงถึงเฉพาะพลังงานในส่วนของการขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุเท่านั้น โดยจะไม่นำค่าพลังงานที่ใช้เลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ไร้สายทั้งในขณะรับและส่งข้อมูล
3. ตัวรับรู้ไร้สายถูกกระจายบนทอพอโลยีอย่างสม่ำเสมอและไม่มีการเคลื่อนที่
4. ไม่มีการชนกันของข้อมูลในช่องสัญญาณ
5. ค่าใช้จ่าย (Overhead) ต่าง ๆ บนชั้นดาต้าลิงค์ไม่ถูกนำมาคำนวณ
6. ค่าใช้จ่ายในส่วน of เฮดเดอร์ (Header) ไม่ถูกนำมาคำนวณ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเป็นเครือข่ายซึ่งประกอบด้วยตัวรับรู้ซึ่งถูกวางกระจายออกไปบนระนาบ เชื่อมต่อกันด้วยคลื่นวิทยุ และมีสถานีฐานทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมด แล้วสรุปผลข้อมูลที่ตรวจจับได้จากตัวรับรู้ไร้สายออกมาเป็นข้อมูลที่ใช้ต้องการ

ระบบเครือข่ายไร้สายจะมีข้อจำกัดบางอย่างที่ไม่พบในระบบแบบใช้สายแบบต่างๆ ไป ซึ่งการออกแบบเกณฑ์วิธีต่างๆ จะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดเหล่านี้ด้วย

- ข้อจำกัดของช่องสัญญาณ ในระบบเครือข่ายไร้สาย ความกว้างของช่องสัญญาณ และกำลังส่งของอุปกรณ์ไร้สายจะถูกจำกัดตามมาตรฐานของ Federal Communication Commission (FCC)
- ข้อจำกัดด้านพลังงาน อุปกรณ์ไร้สายมักเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งจะทำงานโดยใช้แบตเตอรี่เป็นหลัก ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ไร้สาย
- การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นวิทยุซึ่งใช้งานในอุปกรณ์ไร้สายจะถูกแพร่กระจายออกไปยังรอบข้างอย่างกระจัดกระจาย ซึ่งระดับสัญญาณที่ผู้รับ (Receiver) จะต้องมีขนาดที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) โดยระดับสัญญาณจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างผู้ส่ง (Transmitter) และผู้รับ รวมถึงสถานะของสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น
- การเกิดข้อผิดพลาดในช่องสัญญาณ ในระบบเครือข่ายไร้สาย ข้อผิดพลาดสามารถเกิดขึ้นได้จากสภาพแวดล้อมเช่น การบังสัญญาณของสิ่งกีดขวาง การสะท้อนของสัญญาณกับสิ่งต่างๆ ในสภาพแวดล้อม และการชนกันในช่วงสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณมากกว่า 1 แหล่ง
- ระยะเวลารับส่งที่ไม่แน่นอน ระยะเวลาในการส่งข้อมูลจากผู้ส่งและผู้รับไม่มีความแน่นอน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะนั้น
- การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ไร้สาย มีผลในการหาเส้นทางไปยังอุปกรณ์ และผลกระทบจะรุนแรงขึ้นเมื่ออุปกรณ์เคลื่อนที่ออกไปพ้นระยะการส่งสัญญาณ

การลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไร้สาย จะช่วยแก้ไขปัญหาคือข้อจำกัดทางด้านพลังงาน โดยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไร้สายให้นานขึ้น

2.1 วิธีการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ (Media Access Control)

วิธีการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ ถูกนำมาใช้เพื่อให้ผู้ใช้หลายๆ คนสามารถใช้ช่องสัญญาณได้พร้อมกัน ซึ่งการใช้งานช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

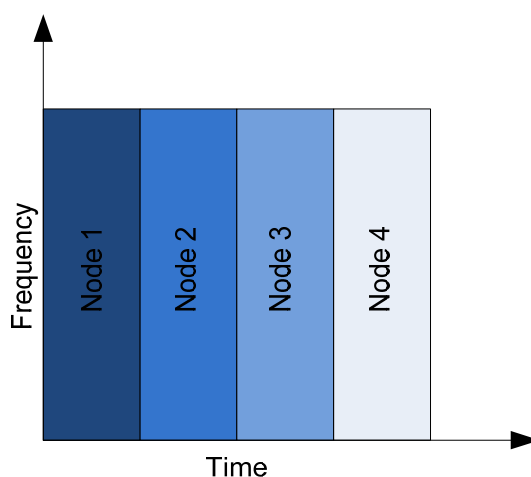
1. จอการใช้งานช่องสัญญาณที่แน่นอนให้แก่ผู้ใช้แต่ละรายไว้ล่วงหน้า (Circuit Mode) เช่น การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยการใช้รหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) และการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยพื้นที่ (Space Division Multiple Access: SDMA)

2. ผู้ใช้แต่ละรายจะเข้าถึงช่องสัญญาณโดยไม่มีการจองช่องสัญญาณไว้ก่อน (Packet Mode) เช่น การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี ALOHA (Pure ALOHA) การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี ALOHA โดยใช้ช่วงเวลา (Slotted ALOHA) และการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธีรับรู้คลื่นพาห์ (Carrier Sense Multiple Access: CSMA)

2.1.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยการจองช่องสัญญาณไว้ล่วงหน้า (Circuit Mode Channel Access Method)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณในลักษณะนี้ ก่อนที่เครื่องลูกข่ายจะเข้าใช้ช่องสัญญาณได้นั้น จะต้องมีการจองสัญญาณสำหรับเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องซึ่งอาจแบ่งได้ตามนี้

2.1.1.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามเวลา (TDMA)

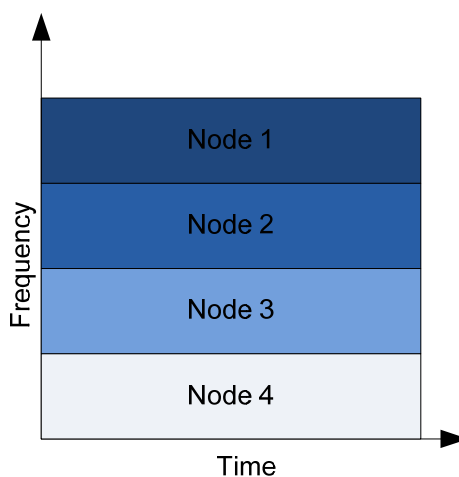


รูปที่ 2.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามเวลา

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามเวลานั้น จะแบ่งช่วงเวลาออกเป็นช่วงเวลา (Time slot) เล็กๆ แล้วกำหนดให้ผู้ใช้แต่ละรายหรืออุปกรณ์แต่ละเครื่อง การรับส่งข้อมูลจะต้องทำในช่วงเวลาของตนเอง ด้วยความถี่ของคลื่นวิทยุทั้งหมดที่ได้รับอนุญาตให้ใช้งาน

จากรูปที่ 2.1 แสดงการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่ แกนนอนแสดงช่วงเวลาในการเข้าถึงช่องสัญญาณ ส่วนแกนตั้งแสดงความถี่ของช่องสัญญาณ แต่ละโหนดจะสลับกันเข้าใช้ช่องสัญญาณในแต่ละช่วงเวลาไปเรื่อย ๆ โดยสามารถใช้งานช่องสัญญาณได้เต็มความถี่

2.1.1.2 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่ (FDMA)

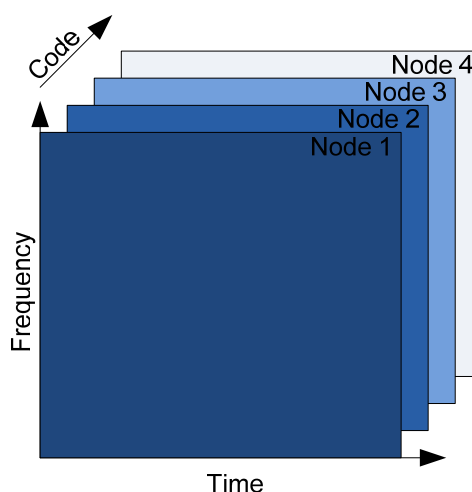


รูปที่ 2.2 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่ จะทำความถี่ของคลื่นวิทยุทั้งหมดที่ได้รับอนุญาตออกเป็นช่วงความถี่ (Frequency band) เล็กๆ แล้วแบ่งให้ผู้ใช้แต่ละรายหรืออุปกรณ์แต่ละเครื่อง การรับส่งข้อมูลจะสามารถรับส่งได้ทุกช่วงเวลา แต่จะใช้ได้เฉพาะช่วงความถี่ที่กำหนดให้เท่านั้น

จากรูปที่ 2.2 แสดงการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามความถี่ แกนนอนแสดงช่วงเวลาในการเข้าถึงช่องสัญญาณ ส่วนแกนตั้งแสดงความถี่ของช่องสัญญาณ แต่ละโหนดจะถูกจัดสรรความถี่ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณให้ โดยสามารถใช้ความถี่ที่ได้รับมานั้นในช่วงเวลาใดก็ได้ ซึ่งระหว่างช่วงความถี่ที่แต่ละโหนดได้รับการจัดสรรจะมีช่วงความถี่แคบ ๆ ช่วงหนึ่ง เรียกว่า Guard Band ใช้ในการป้องกันการทับซ้อนของช่วงความถี่ที่อยู่ติดกัน

2.1.1.3 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยใช้รหัส (CDMA)



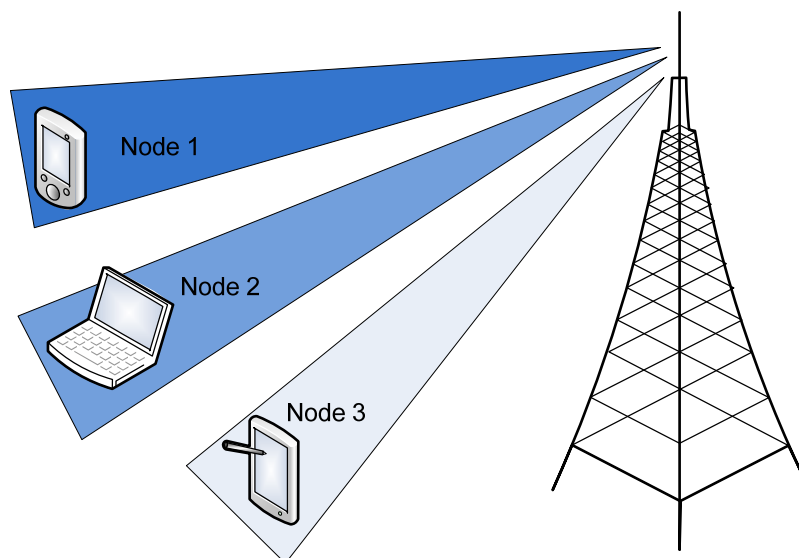
รูปที่ 2.3 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยใช้รหัส

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยใช้รหัส ผู้รับและผู้ส่งจะต้องทำการตกลงกันก่อนว่าจะให้รหัส (Code) ใดในการรับส่ง การเข้าถึงแบบนี้ผู้ใช้ทุกรายสามารถใช้ความถี่ได้ตลอดเวลา และรับส่งข้อมูลในช่วงเวลาใดก็ได้ ซึ่งผู้รับจะนำสัญญาณซึ่งถูกผสมเข้าด้วยกันบนคลื่นพาห์มาถอดรหัส (Decode) เพื่อให้ได้เหลือเฉพาะสัญญาณที่ส่งถึงตนเอง

จากรูปที่ 2.3 แสดงการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยใช้รหัส แกนนอนแสดงช่วงเวลาในการเข้าถึงช่องสัญญาณ ส่วนแกนตั้งแสดงความถี่ของช่องสัญญาณ อุปกรณ์แต่ละตัวจะสามารถใช้ความถี่ของช่องสัญญาณได้เต็มย่านความถี่ และสามารถเข้าถึงช่องสัญญาณได้ตลอดเวลา แต่ในการรับส่งข้อมูล จะต้องนำรหัสที่ผ่านตกลงกันไว้แล้วกับฝั่งผู้รับสัญญาณ มาใช้ในการส่งสัญญาณ เมื่อผู้รับสัญญาณนำสัญญาณที่ได้จากการผสมของสัญญาณต่างๆ มาทำการถอดรหัสโดยใช้รหัสเดียวกันกับที่ใช้ในการส่ง ก็จะได้สัญญาณที่ผู้ส่งต้องการจะส่งถึงผู้รับ

2.1.1.4 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยพื้นที่ (SDMA)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยพื้นที่ จะมีการใช้เสาอากาศแบบ Smart Antenna ซึ่งประกอบด้วยเสาอากาศย่อย ๆ สามารถบีบลำของคลื่นวิทยุเพื่อส่งสัญญาณไปยังผู้รับได้ โดยไม่ต้องกระจายสัญญาณออกทุกทิศทาง (Omni-directional) ของเสาอากาศ ทำให้ไม่เกิดการรบกวนกันของสัญญาณที่ส่งไปยังเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่อง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยพื้นที่

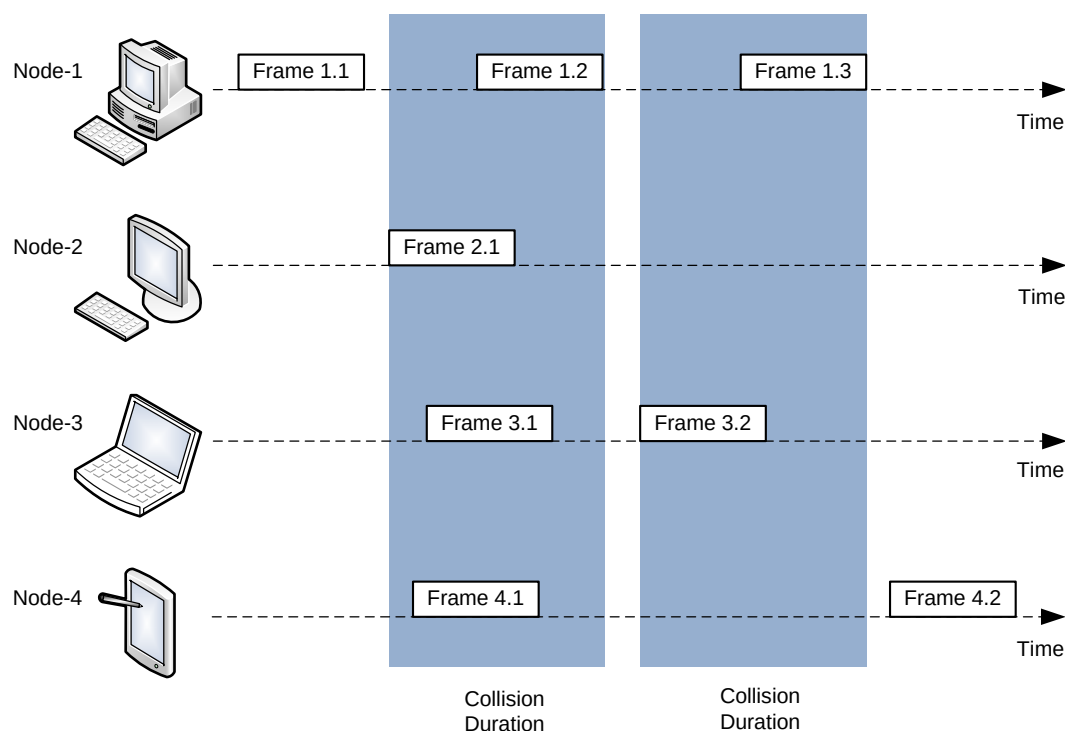
2.1.2 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยไม่จองช่องสัญญาณไว้ก่อน (Packet Mode Channel Access Method)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณในลักษณะนี้จะอยู่บนพื้นฐานของการรวมส่งสัญญาณร่วมสื่อด้วยเวลา (Time-Domain Multiplexing) แต่ไม่มีการทำซ้ำเป็นรอบดังเช่นใน TDMA ซึ่งการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณลักษณะนี้จะไม่มีการจองช่องสัญญาณไว้ล่วงหน้าก่อนที่เครื่องลูกข่ายแต่ละตัวจะทำการส่งข้อมูล

2.1.2.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธีการสุ่มบนพื้นฐานของการแข่งขัน (Contention Based Random Multiple Access)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ ALOHA (Pure ALOHA)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบนี้ เมื่ออุปกรณ์มีข้อมูลที่จะส่ง ก็จะทำการส่งข้อมูลนั้นลงบนช่องสัญญาณทันที โดยไม่มีการตรวจสอบใดๆ ว่าช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่ หากมีการชนกันของข้อมูล ก็จะทำการส่งข้อมูลซ้ำในภายหลังจนกว่าจะทำการส่งข้อมูลนั้นสำเร็จ

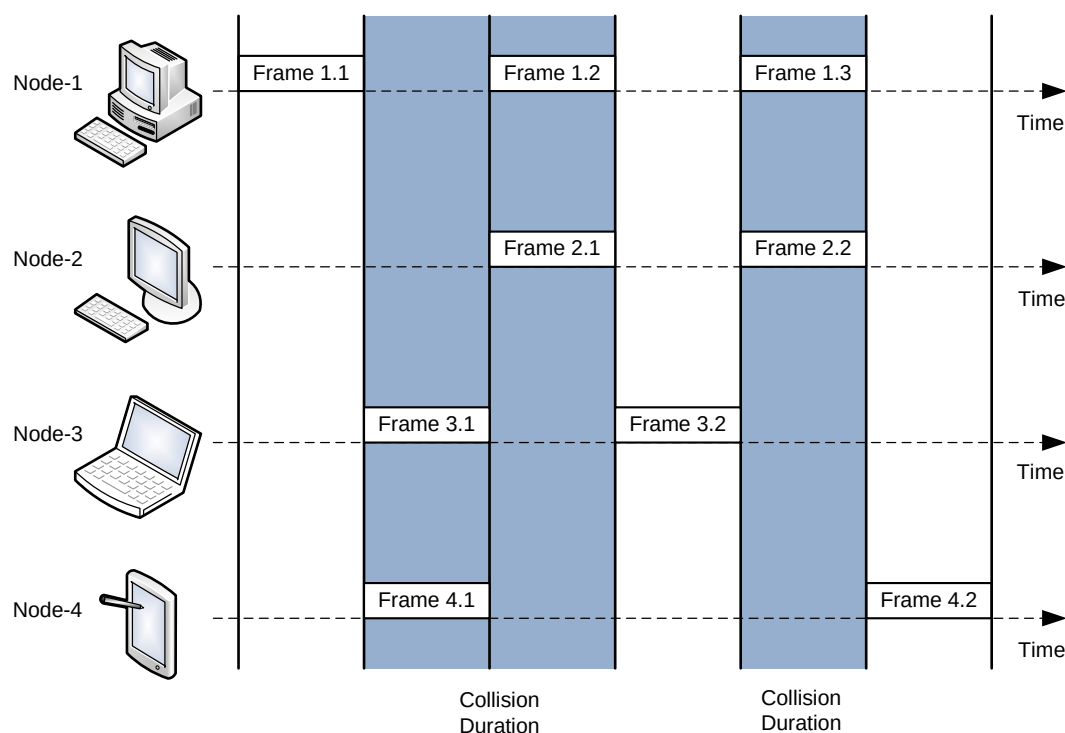


รูปที่ 2.5 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี Pure ALOHA

จากรูปที่ 2.5 แสดงการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี Pure ALOHA เมื่อมีอุปกรณ์ 4 ตัวต้องการเข้าถึงช่องสัญญาณเดียวกัน ช่วงที่ถูกแรเงาจะเป็นช่วงเวลาที่มีข้อมูลที่ส่งเกิดการชนกันในช่องสัญญาณ ทำให้ข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวเสียหาย จากรูปที่ 2.5 จะมีเพียงเฟรมที่ 1.1 และเฟรมที่ 4.2 เท่านั้นที่สามารถส่งไปยังผู้รับปลายทางได้โดยไม่เกิดการชนกันในช่องสัญญาณ ปริมาณงาน (Throughput) สูงสุดของวิธี Pure ALOHA มีค่าอยู่ที่ 18.4%

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ ALOHA โดยใช้ช่วงเวลา (Slotted ALOHA)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบนี้ เป็นการส่งข้อมูลที่พัฒนาต่อมาจาก Pure ALOHA โดยจะแบ่งเวลาออกเป็นช่วงเวลาเล็กๆ (Slot) อุปกรณ์ทั้งหมดในระบบจะต้องมีการประสานเวลา (Time Synchronized) เพื่อให้ช่วงเวลาของทุกอุปกรณ์ตรงกัน เมื่ออุปกรณ์มีข้อมูลที่จะส่ง จะต้องรอให้หมดช่วงเวลาปัจจุบันก่อน แล้วทำการส่งข้อมูลนั้นลงบนช่องสัญญาณเมื่อช่วงเวลาใหม่เริ่มขึ้น โดย Slotted ALOHA ก็ไม่มีการตรวจสอบช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่เช่นเดียวกันกับ Pure ALOHA



รูปที่ 2.6 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี Slotted ALOHA

จากรูปที่ 2.6 แสดงการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยวิธี Slotted ALOHA เมื่อมีอุปกรณ์ 4 ตัวต้องการเข้าถึงช่องสัญญาณเดียวกัน ช่วงที่ถูกแรงแงจะเป็นช่วงเวลาที่ข้อมูลที่ส่งเกิดการชนกันในช่วงสัญญาณ ทำให้ข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวเสียหาย จากรูปที่ 2.6 เมื่อมีการแบ่งเวลาออกเป็นช่วงเวลาที่เล็ก ๆ จะทำให้โอกาสที่เกิดการชนกันในช่วงสัญญาณลดลง โดยเฟรมที่ 1.1 เฟรมที่ 3.2 และเฟรมที่ 4.2 สามารถส่งไปยังผู้รับปลายทางได้โดยไม่เกิดการชนกัน ปริมาณงาน (Throughput) สูงสุดของวิธี Slotted ALOHA มีค่าอยู่ที่ 36.8% หรือประมาณสองเท่าของวิธี Pure ALOHA

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยการรับรู้คลื่นพาห์ (Carrier Sense Multiple Access; CSMA)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบนี้จะมีการตรวจสอบช่องสัญญาณ ว่าในขณะนั้น มีการใช้งานช่องสัญญาณอยู่หรือไม่ ก่อนที่จะทำการส่งข้อมูล หากช่องสัญญาณว่างอุปกรณ์จะทำการส่งข้อมูลลงไปในช่องสัญญาณ โดย CSMA ถูกพัฒนาต่อไปเป็น CSMA/CD และ CSMA/CA ที่มีกลไกเพิ่มเติมขึ้นจาก CSMA ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่ดีขึ้น

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยการรับรู้คลื่นพาห์โดยมีการตรวจจับการชนกัน ในช่องสัญญาณ (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection; CSMA/CD)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบนี้จะมีการตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนทำการส่งข้อมูล เช่นเดียวกับการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยการรับรู้คลื่นพาห์แบบปกติ แต่มีการเพิ่มการตรวจสอบการชน (Collision) กันของข้อมูลในช่องสัญญาณขณะส่ง ซึ่งหากตรวจสอบได้ว่าการชนกันของข้อมูล ก็จะทำการส่งสัญญาณรบกวน (Jam Signal) เพื่อบอกให้อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกันทราบว่ามีการชนกันในช่องสัญญาณ หลังจากนั้นอุปกรณ์ก็จะทำการสุ่มค่าหน่วงเวลาขึ้นมาเพื่อเริ่มส่งข้อมูลใหม่อีกครั้ง วิธีการนี้ใช้ในเครือข่ายไร้สาย

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยการรับรู้คลื่นพาห์โดยมีการหลีกเลี่ยงการชนกัน ในช่องสัญญาณ (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance; CSMA/CA)

เป็นการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณที่พัฒนาจากการควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยการรับรู้คลื่นพาห์ โดยมีจุดประสงค์ในการใช้งานบนระบบเครือข่ายไร้สาย โดยก่อนจะเข้าใช้ช่องสัญญาณอุปกรณ์จะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณว่าช่องสัญญาณว่างหรือไม่ หากช่องสัญญาณว่างอุปกรณ์จะยังไม่ส่งข้อมูลในทันที แต่จะสุ่มค่าหน่วงเวลาขึ้นมาค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อหมดช่วงหน่วงเวลาจึงจะทำการส่งข้อมูลลงไปในช่องสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดโอกาสที่ข้อมูลจะเกิดการชนกันในช่องสัญญาณได้ และนอกจากนี้ยังมีการนำเฟรม RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send) เข้ามาใช้งานด้วย ซึ่ง RTS จะเป็นกลุ่มข้อมูลขนาดเล็กๆ ใช้แจ้งให้อุปกรณ์อื่นๆ รับทราบว่าผู้จะทำการส่งข้อมูลลงไปในช่องสัญญาณ ซึ่งหากผู้รับปลายทางได้รับ RTS จะทำการตอบกลับด้วย CTS เป็นการแจ้งให้อุปกรณ์ต้นทางทราบว่าสามารถส่งข้อมูลลงบนช่องสัญญาณได้ โดยทั่วไปการส่งข้อมูลด้วยวิธี CSMA/CA จะไม่ได้นำ RTS/CTS มาใช้ โดย RTS/CTS จะถูกนำมาใช้งานก็ต่อเมื่อขนาดของข้อมูลใหญ่กว่าค่าที่ตั้งไว้ (Threshold) เท่านั้น

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยมีการหลีกเลี่ยงการชนกันในช่องสัญญาณ (Multiple Access with Collision Avoidance; MACA)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณวิธีนี้ถูกเสนอโดย Phil Karn [14] มีแนวคิดว่า ในกรณีของ Hidden Terminal นั้นถึงแม้ผู้ส่งจะไม่ได้ยินว่ามีการใช้ช่องสัญญาณอยู่ ก็ไม่ได้หมายความว่าข้อมูลที่ส่งไปยังปลายทางจะไม่เกิดการชนกันในช่องสัญญาณ ในทางกลับกันในกรณีของ Exposed Terminal แม้ผู้ส่งจะรับรู้ได้ว่ามีผู้ใช้ช่องสัญญาณอยู่ แต่ไม่ได้หมายความว่าผู้ส่งจะไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางโดยไม่เกิดการชนกันในช่องสัญญาณ ดังนั้น MACA จึงได้พัฒนา RTS/CTS ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการเพิ่มบิตของความยาวข้อมูลที่ผู้ส่งต้องการส่งลงไปใน RTS/CTS เพื่อบอกให้อุปกรณ์อื่นๆ ในเครือข่ายที่ไม่ได้เข้าร่วมกับการรับส่งได้รับรู้ว่า ช่วงเวลาเท่าใดที่จะมี

การส่งข้อมูลให้ทำการหลีกเลี่ยงการใช้ช่องสัญญาณในช่วงเวลานั้น สำหรับวิธีการ MACA กลุ่มข้อมูล RTS/CTS จะถูกใช้งานเสมอเมื่อมีการรับส่งข้อมูล

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยมีการหลีกเลี่ยงการชนกันในช่วงสัญญาณสำหรับเครือข่ายไร้สาย (Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless; MACAW)

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณในวิธีนี้ถูกเสนอโดย V. Bharghavan [15] เป็นงานวิจัยพัฒนาต่อเนื่องมาจาก MACA โดยในการส่งข้อมูล ผู้ส่งจะทำการส่ง RTS ที่บอกความยาวของข้อมูลที่ต้องการส่ง เมื่อผู้รับได้รับเฟรม RTS ผู้รับจะตอบกลับด้วย CTS ที่ระบุขนาดของข้อมูลที่ต้องส่ง เมื่อผู้ส่งได้รับ CTS ก็จะส่งข้อมูลไปให้ผู้รับ หากข้อมูลที่ต้องการส่งมีความยาวมาก ผู้ส่งจะทำการประกาศเฟรม DS (Data Sending Frame) ซึ่งเป็นเฟรมขนาดเล็กที่ระบุขนาดของข้อมูลที่จะส่ง เพื่อแจ้งให้อุปกรณ์รอบข้างรับรู้อีกครั้ง ก่อนที่จะส่งข้อมูลจริงไปยังผู้รับ เมื่อผู้รับได้รับเฟรมข้อมูลแล้ว ผู้รับจะทำการตอบกลับด้วยเฟรม ACK (Acknowledge Frame) เพื่อยืนยันว่าได้รับข้อมูลแล้ว นอกจากนี้ MACAW ยังมีการเพิ่มเติมเฟรมพิเศษอีกหนึ่งเฟรมคือ RRTS (Request for Request to Send) ซึ่งจะถูกใช้ในกรณีดังต่อไปนี้ เมื่อผู้รับปลายทางได้รับเฟรม RTS จากผู้ส่ง แต่ผู้รับรับรู้ได้ถึงารรับส่งข้อมูลในช่วงสัญญาณโดยอุปกรณ์อื่น เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันในช่วงสัญญาณ ผู้รับจะยังไม่ส่ง CTS กลับไปแจ้งให้ผู้ส่ง ทำให้ผู้ส่งต้องสุ่มค่าเพื่อรอส่ง RTS อีกครั้ง เมื่อผู้รับรับรู้ได้ว่าช่องสัญญาณว่างจากการใช้งาน ผู้รับจะทำการส่ง RRTS เพื่อแจ้งให้ผู้ส่งทำการส่งเฟรม RTS อีกครั้ง โดยอุปกรณ์อื่นรอบข้างที่ไม่ใช่ผู้ส่งได้รับเฟรม RRTS จะหยุดรอระยะเวลาหนึ่ง เป็นโอกาสให้การส่งเฟรม RTS-CTS ระหว่างผู้ส่งกับผู้รับสามารถได้เสร็จสิ้น หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการส่งข้อมูลตามปกติของ MACAW ในงานวิจัยฉบับนี้มีมุมมองว่า MACAW น่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับขั้นตอนการดำเนินการในวิธีที่งานวิจัยนี้เสนอ เพื่อลดโอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลในช่วงสัญญาณ

2.2 แนวทวิวิธีการหาเส้นทาง (Routing Protocol)

2.2.1 การหาเส้นทางแบบส่งต่อหลายครั้ง (Multi-Hop Routing)

แนวทวิวิธีหาเส้นทางบนเครือข่ายใช้สาย (Wired Routing Protocol) ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ Distance Vector และ Link State ซึ่งแนวทวิวิธีแบบ Distance Vector จะหาเส้นทางไปยังปลายทางโดย ทุกโหนด (Node) ในเครือข่ายทำการประกาศระยะทางจากตัวมันไปยังเครือข่ายต่างๆ ที่มันรู้จัก ให้เพื่อนบ้าน (Neighbor) รับรู้ จากนั้นแต่ละโหนดจะนำข้อมูลที่รับฟังจากเพื่อนบ้านมาประมวลผลเพื่อหาเส้นทางที่มีค่าใช้จ่าย (Cost) น้อยที่สุด เพื่อใช้เป็นเส้นทางไปยังปลายทาง แล้วบันทึกลงในตารางเส้นทางเพื่อใช้ในการเลือกส่งข้อมูลต่อไป สำหรับแนวทวิวิธีแบบ Link State ทุก

โหนดในเครือข่ายจะต้องรับรู้ถึงทอพอโลยีทั้งหมดของเครือข่ายแล้วทำการสร้างตารางเส้นทางของตนเองขึ้นมา โดยใช้ขั้นตอนวิธี (Algorithm) แบบเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) เพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง

วิธีการค้นหาเส้นทางบนเครือข่ายไร้สายข้างต้นได้ถูกนำมาปรับปรุงแล้วใช้กับเครือข่ายไร้สาย อันได้แก่ Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) และ Adhoc On-demand Distance Vector (AODV) อย่างไรก็ตามการนำขั้นตอนวิธี DSDV และ AODV ที่กล่าวมาข้างต้นมาใช้กับเครือข่ายไร้สายยังมีปัญหาบางประการคืออุปกรณ์ต้องมีการประกาศข้อมูลออกมาตามคาบเวลาเพื่อทำการรักษาตารางเส้นทาง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์ไร้สายซึ่งมีพลังงานจำกัด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาขั้นตอนวิธี Dynamic Source Routing (DSR) ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดย DSR จะทำการค้นหาเส้นทางในลักษณะตามความคำขอ (On-demand) เมื่อมีข้อมูลต้องการส่งเท่านั้น ทำให้สามารถลดพลังงานที่อุปกรณ์ต้องการใช้ลงไปได้

2.2.2 การส่งข้อมูลโดยวิธีการตั้งกลุ่ม (Clustering Approach)

การติดต่อสื่อสารในเครือข่ายไร้สายอีกวิธีหนึ่งคือการตั้งกลุ่ม (Cluster) ซึ่งวิธีการนี้อุปกรณ์ในเครือข่ายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม สมาชิกในกลุ่มจะทำการส่งข้อมูลของตัวเองไปให้หัวหน้ากลุ่ม (cluster head) ซึ่งจะทำการส่งต่อข้อมูลที่รวบรวมได้ไปยังปลายทาง การสร้างกลุ่มทำให้สามารถนำข้อสัญญาณกลับมาใช้ซ้ำได้ ทำให้สมรรถภาพของเครือข่ายโดยรวมดีขึ้น

Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

LEACH เป็นงานวิจัยของ W. R. Heinzelman [7] [10] เป็นเกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงาน (Energy-Aware Routing Protocol) ในการส่งข้อมูลด้วยวิธีการตั้งกลุ่ม ซึ่งในเกณฑ์วิธีของ LEACH กลุ่มของตัวรับรู้ไม่ถูกแบ่งอย่างตายตัว แต่จะมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มและเปลี่ยนหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลา เพื่อให้มีการกระจายการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไร้สายออกไป ทำให้อุปกรณ์แต่ละตัวมีระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกัน เป็นการยืดอายุการใช้งานของระบบออกไป

ใน LEACH ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวจะเลือกตนเองเป็นหัวหน้ากลุ่มเมื่อเริ่มต้นรอบที่ $r+1$ ด้วยค่าความน่าจะเป็น $P_i(t)$

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * (r \bmod \frac{N}{k})} : C_i(t) = 1 \\ 0 : C_i(t) = 0 \end{cases}$$

โดย k คือ จำนวนของหัวหน้ากลุ่มที่คาดหวังไว้

N คือ จำนวนตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมด

r คือ รอบที่ผ่านมาก่อนหน้านี้

ค่าของ $C_i(t)$ จะมีค่าเป็น 0 เมื่อ ตัวรับรู้ i ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มแล้วใน $r \bmod \frac{N}{k}$ รอบล่าสุด และมีค่าเป็น 1 เมื่อตัวรับรู้ i ยังไม่ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มใน $r \bmod \frac{N}{k}$ รอบล่าสุด

ในแต่ละรอบตัวรับรู้ทุกตัวที่ยังไม่ได้ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มใน $r \bmod \frac{N}{k}$ รอบล่าสุด จะทำการสุ่มค่าซึ่งอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ขึ้นมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าของ $P_i(t)$ ในรอบนั้นๆ หากค่าที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่าค่า $P_i(t)$ ตัวรับรู้ตัวนั้นก็จะทำหน้าที่เป็น หัวหน้ากลุ่มในรอบนั้นๆ ซึ่งแต่ละรอบจะได้จำนวนของหัวหน้ากลุ่มไม่เท่ากัน โดยในบางรอบอาจจะไม่ได้จำนวนหัวหน้ากลุ่มตามค่า k ที่กำหนด

ใน LEACH เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีของเครือข่าย หรือมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสถานีฐาน ค่าพารามิเตอร์ k หรือ จำนวนหัวหน้ากลุ่มที่เหมาะสมของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายในวิธีการของ LEACH จะไม่สามารถที่จะประเมินได้ล่วงหน้า ต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าของ k ตั้งแต่ 1% จน 100% เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าค่า k ที่ตำแหน่งใด ทำให้ตัวรับรู้ไร้สายในระบบมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด

หลังจากที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวทราบแล้วว่าตนเองเป็นหัวหน้ากลุ่มหรือไม่ ตัวรับรู้ไร้สายที่ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มจะประกาศข้อมูลให้ตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่นๆ ทุกตัวในเครือข่ายทราบว่ามันทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่ม ตัวรับรู้ไร้สายอื่นจะทำการเลือกหัวหน้ากลุ่มซึ่งใช้พลังงานในการส่งข้อมูลน้อยที่สุด พิจารณาตามความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากหัวหน้ากลุ่มแต่ละตัว

ตัวรับรู้สมาชิกที่เลือกหัวหน้ากลุ่มแล้วจะทำการส่งสัญญาณกลับไปแจ้งให้หัวหน้ากลุ่มทราบว่าตัวรับรู้ใดบ้างที่เข้าร่วมกลุ่ม หลังจากนั้นหัวหน้ากลุ่มจะทำการจัดเวลาในการรับส่งข้อมูลของสมาชิกในกลุ่มด้วย TDMA แล้วแจ้งให้สมาชิกทุกตัวทราบ

เมื่อถึงช่วงเวลาของตนเอง ตัวรับรู้สมาชิกจะทำการส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้กลับไปให้หัวหน้ากลุ่ม ซึ่งหัวหน้ากลุ่มจะทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้สมาชิกทั้งหมด นำส่งต่อไปยังสถานีฐานต่อไป

บทที่ 3

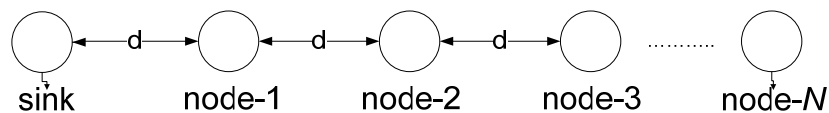
การกระจายการใช้พลังงานของตัวรับรู้ ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.1 งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนกลุ่มในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายต้องใช้พลังงานจำนวนมาก จึงมีแนวคิดที่จะทำให้ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกันโดยไม่จำเป็นจะต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้ง โดยตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะส่งต่อข้อมูลให้กับตัวรับรู้อื่นๆ ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า การส่งข้อมูลของตัวรับรู้แต่ละตัวจะส่งข้อมูลในหลายระดับพลังงานไปยังตัวกลางหลายๆตัว โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พลังงานที่ตัวรับรู้ทุกตัวใช้ในกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จะนำปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการหาค่าของอัตราส่วนดังกล่าว

3.1 เป้าหมายและเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสม

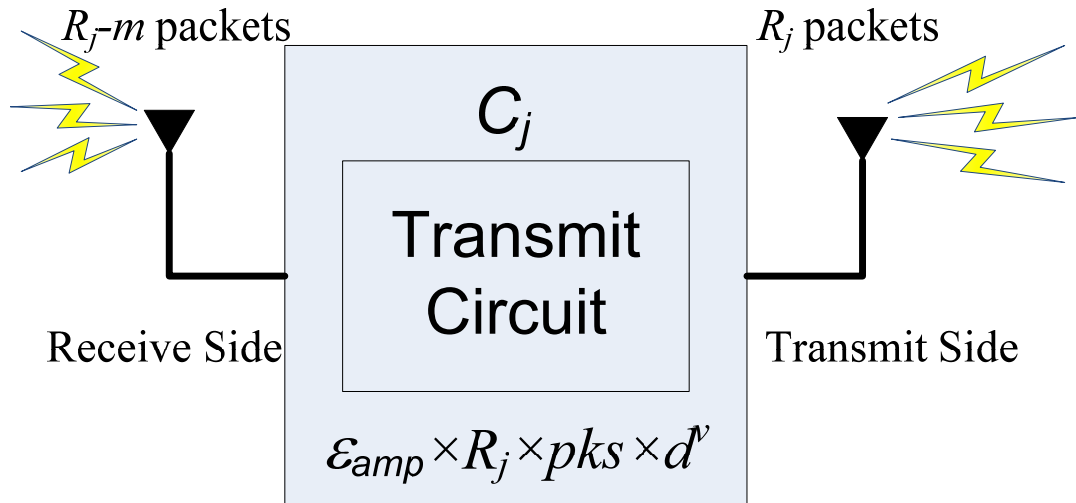
3.1.1 แบบจำลองของเครือข่ายและสมมติฐาน

เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา ในงานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากเครือข่ายอย่างง่าย ที่ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางไว้บนเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 3.1 สมมติให้ตัวรับรู้ไร้สายจำนวน N โหนด วางห่างกันในระยะเท่าๆกัน เป็นระยะ d



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายอย่างง่าย

สมมติให้ตัวรับรู้แต่ละโหนดสามารถปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุเพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังตัวรับรู้อื่นในระยะทางต่างๆ ได้ สำหรับการคำนวณพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดใช้งานงานวิจัยนี้จะนำพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้ในการขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ (Transmission Amplify Energy) มาใช้ในการคำนวณ โดยจะไม่นำพลังงานที่เลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ไร้สายทั้งในฝั่งรับและฝั่งส่งมาใช้ในการคำนวณ เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ จะได้แบบจำลองของการใช้พลังงานดังรูปที่ 3.2

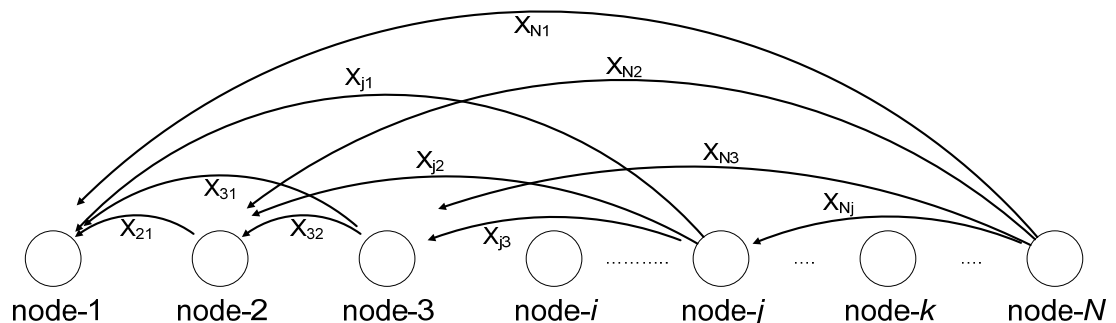


รูปที่ 3.2 แบบจำลองการใช้พลังงานเฉพาะส่วนของการขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ

จากรูปที่ 3.2 เมื่อ R_j เป็นจำนวนกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ตัวรับรู้โหนดที่ j จะต้องทำการส่ง m เป็นจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ตัวรับรู้โหนดที่ j สร้างขึ้น pks เป็นขนาดของกลุ่มข้อมูลมีหน่วยเป็นบิต d เป็นระยะทางในการส่งมีหน่วยเป็นเมตร v มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 พลังงานที่ตัวรับรู้โหนดที่ j ใช้ในการส่งข้อมูล (C_j) มีค่าแปรผันโดยตรงกับจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่จะส่ง และระยะทางยกกำลัง v โดยมีค่าคงที่ของการแปรผันเป็น $\mathcal{E}_{amp}$

3.1.2 ระบุเงื่อนไขของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม

แบบจำลองมีตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมด N โหนด วางห่างกันด้วยระยะ d โดยแต่ละโหนดมีการสร้างข้อมูลขนาด m แพ็กเก็ต จำนวนข้อมูลที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดส่งเป็นผลรวมของข้อมูลที่ตัวเองสร้างขึ้นกับข้อมูลที่โหนดรับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไป โดยจะทำการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุไปยังสถานีฐานและโหนดตัวกลางด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างตามระยะทางที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองแสดงอัตราส่วนของการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนด

ถ้าให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่โหนด j จะต้องส่งมีจำนวน R_j โดยรวมข้อมูลที่โหนด j สร้างกับข้อมูลที่โหนด j รับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไป โดย k ซึ่งเป็นโหนดที่ถูกละทิ้ง อยู่ห่างจากสถานีฐานมากกว่าโหนด j ซึ่งโหนด k จะส่งข้อมูลมาให้โหนด j ด้วยอัตราส่วน x_{jk} จากข้อมูลทั้งหมดของโหนด k ซึ่งมีจำนวนข้อมูลเป็น R_k โดยจะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} R_j &= m + \sum_{k=j+1}^N R_k x_{kj} \\ &= m \times [1 + \{x_{(j+1)j}\} + \{x_{(j+2)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+2)j}\} \\ &\quad + \{x_{(j+3)(j+2)}x_{(j+2)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+3)(j+2)}x_{(j+2)j} \\ &\quad + x_{(j+3)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+3)j}\} \dots] \end{aligned} \quad (3.1)$$

ถ้าให้พลังงานทั้งหมดที่โหนด j ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวน R_j กลุ่มผ่านทางคลื่นวิทยุมีค่าเป็น C_j และ C_j มีการแปรผันโดยตรงกับระยะทางที่ส่งยกกำลัง v โดย $2 \leq v \leq 4$ ถ้าให้ $\mathcal{E}_{amp}$ เป็นค่าคงที่ในการขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็น Joule/bit/m² และ pks เป็นขนาดของกลุ่มข้อมูล (packet) จะเขียนสมการของพลังงานที่โหนด j ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ว่า

$$C_j = \mathcal{E}_{amp} \times R_j \times pks \times \left[\sum_{i=j-1}^1 x_{ji} \{(j-i) \times d\}^v \right] \quad (3.2)$$

ขอบเขตปัญหาคือการหาค่า x_{ji} ทั้งหมด เมื่อ $i < j$ ที่ทำให้ค่า C_j มีค่าน้อยที่สุดและสอดคล้องตามสมการดังต่อไปนี้

$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (3.3)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1 \quad (3.5)$$

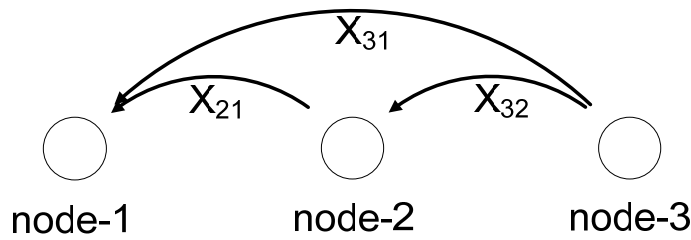
สมการที่ (3.3) แสดงเงื่อนไขว่าค่าพลังงานที่แต่ละโหนดใช้จะต้องเท่าเทียมกัน สมการที่ (3.4) กำหนดขอบเขตบนและล่างของ x_{ji} อยู่ระหว่าง 0 และ 1 สมการที่ (3.5) ระบุเงื่อนไขว่าผลรวมอัตราส่วนของแต่ละโหนดจะต้องรวมกันได้เท่ากับ 1 เสมอ การแก้ปัญหานี้ จะต้องหาค่าของ x_{ji} แยกเป็นกรณี ตามค่าของ N โดยงานวิจัยนี้จะแสดงการแก้ปัญหาเมื่อ $N=2, 3$ และ 4

3.2 การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem)

งานวิจัยนี้จะทำการแก้ปัญหาที่เฉพาะเจาะจงสำหรับกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายที่มีรัศมีเท่ากับ 2 3 และ 4 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ v มีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในกรณีทั่วไป

สำหรับกรณีที่ $N=2$ ข้อมูลทั้งหมดของโหนด 2 จะถูกส่งไปยังสถานีฐานโดยตรง เนื่องจากมีเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลเพียงเส้นทางเดียว ดังนั้น x_{21} มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

3.2.1 การคำนวณในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายกระจายบนเส้นตรง เมื่อ $N=3$



รูปที่ 3.4 แบบจำลองการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดเมื่อ $N=3$

จากรูปที่ 3.4 นอกเหนือจากตัวรับรู้โหนดที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสถานีฐานแล้ว จะมีตัวรับรู้อีก 2 โหนดคือ โหนดที่ 2 และโหนดที่ 3 เป็นสมาชิกของกลุ่มตัวรับรู้ ก่อนอื่นจะต้องทำการคำนวณหาจำนวนข้อมูลที่โหนดที่ 2 และโหนดที่ 3 จะทำการส่งผ่านคลื่นวิทยุ

$$R_3 = m \quad (3.6)$$

$$R_2 = R_3 x_{32} + m = m \times (x_{32} + 1) \quad (3.7)$$

เนื่องจากโหนดที่ 2 เป็นตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากที่สุด ข้อมูลทั้งหมดของโหนดที่ 2 จะถูกส่งไปยังสถานีฐาน ฟังก์ชันที่จะใช้ในการหาค่าที่เหมาะสม ในกรณีนี้จะใช้สมการพลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดใช้ในไปมาทำการคำนวณ โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times R_3 \times (x_{32}(d)^2 + x_{31}(2d)^2) = \varepsilon_{amp} \times md^2 \times (x_{32} + 4x_{31}) \quad (3.8)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times (x_{32} + 1) \times (d^2 \times x_{21}) = \varepsilon_{amp} \times md^2 \times (x_{32}x_{21} + x_{21}) \quad (3.9)$$

โดยเงื่อนไขจากสมการและอสมการที่ (3.3) (3.4) และ (3.5) จะได้ว่า

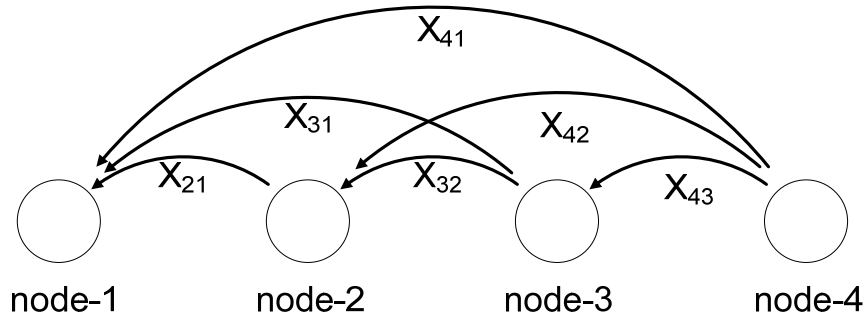
$$C_2 = C_3 \quad (3.10)$$

$$x_{32} + x_{31} = 1 \quad (3.11)$$

$$0 \leq x_{32} \leq 1; 0 \leq x_{31} \leq 1 \quad (3.12)$$

เมื่อทำการแก้สมการ (3.10) และ (3.11) จะได้ค่า $4 \times x_{31} = 1$ ดังนั้นคำตอบของสมการหรืออัตราส่วนในการส่งข้อมูลซึ่งจะทำให้โหนดที่ 2 และโหนดที่ 3 ใช้พลังงานเท่ากันคือ $x_{32} = 0.75$, $x_{31} = 0.25$ และ $x_{21} = 1$

3.2.2 การคำนวณในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายกระจายบนเส้นตรง เมื่อ $N = 4$



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดเมื่อ $N=4$

นอกเหนือจากโหนดที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสถานีฐานแล้ว ในกลุ่มตัวรับรู้นี้ยังมีสมาชิกอีก 3 โหนด คือ โหนดที่ 2 โหนดที่ 3 และโหนดที่ 4 ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งก่อนหน้านี้จะต้องทำการหาจำนวนข้อมูลที่แต่ละโหนดจะต้องทำการส่งต่อไปยังโหนดอื่นๆ

$$R_4 = m \quad (3.13)$$

$$R_3 = x_{43} \times R_4 + m = (x_{43} + 1) \times m \quad (3.14)$$

$$R_2 = R_4 x_{42} + R_3 x_{32} + m = (x_{42} + x_{43} x_{32} + x_{32} + 1) \times m \quad (3.15)$$

ค่าพลังงานในการส่งผ่านคลื่นวิทยุของแต่ละโหนด ที่ใช้ในการส่งข้อมูลทั้งหมดกลับไปยังสถานีฐานคือ

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times R_4 \times pks \times [x_{43}(d)^2 + x_{42}(2d)^2 + x_{41}(3d)^2]$$

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times md^2 \times pks \times (x_{43} + 4x_{42} + 9x_{41}) \quad (3.16)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times R_3 \times pks \times (x_{32}(d)^2 + x_{31}(2d)^2)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times md^2 \times pks \times (x_{32} + 4x_{31} + x_{43}x_{32} + 4x_{43}x_{31}) \quad (3.17)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times R_2 \times pks \times d^2$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (x_{42} + x_{43}x_{32} + x_{32} + 1) \quad (3.18)$$

สิ่งที่ต้องการจากการแก้ปัญหาคือพลังงานที่โหนดที่ 2 โหนดที่ 3 และโหนดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด และเท่าเทียมกันในทุกๆ โหนด จากสมการที่ (3.17) และ (3.18) จะเห็นว่าสมการที่ได้จากการ

แทนค่า R_j ไม่ได้เป็นสมการเชิงเส้น เพื่อเปลี่ยนสมการทั้งคู่อ้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น ทำได้โดยแทนค่า x_{43} ด้วยค่าคงที่ α ในสมการ (3.16) (3.17) และ (3.18) จะได้สมการดังนี้

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{42} + 9x_{41} + \alpha) \quad (3.19)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times ((1 + \alpha)x_{32} + 4(1 + \alpha)x_{31}) \quad (3.20)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (x_{42} + (1 + \alpha)x_{32} + 1) \quad (3.21)$$

จากจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ ต้องการให้แต่ละโหนดใช้พลังงานเท่าเทียมกัน เมื่อนำสมการ (3.19) มาเท่ากับสมการ (3.20) จะได้สมการ (3.22) และ นำสมการ (3.19) มาเท่ากับสมการ (3.21) จะได้สมการที่ (3.23)

$$4x_{42} + 9x_{41} - (1 + \alpha)x_{32} - 4(1 + \alpha)x_{31} = -\alpha \quad (3.22)$$

$$3x_{42} + 9x_{41} - (1 + \alpha)x_{32} + 0 \times x_{31} = (1 - \alpha) \quad (3.23)$$

และจากเงื่อนไข $\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1$ จะได้

$$x_{43} + x_{42} + x_{41} = 1 \quad (3.24)$$

$$x_{32} + x_{31} = 1 \quad (3.25)$$

แทนค่า $x_{43} = \alpha$ ลงไปในสมการ (3.24) และ (3.25)

$$1 \times x_{42} + 1 \times x_{41} + 0 \times x_{32} + 0 \times x_{31} = 1 - \alpha \quad (3.26)$$

$$0 \times x_{42} + 0 \times x_{41} + 1 \times x_{32} + 1 \times x_{31} = 1 \quad (3.27)$$

จากสมการเชิงเส้นด้านบนค่าที่ต้องการหาคือ

$$X = [x_{42} \ x_{41} \ x_{32} \ x_{31}]$$

จากสมการ (3.25) (3.26) (3.23) และ (3.24) สามารถเขียนในรูปของสมการเชิงเส้น ในรูปของ $A_{eq} X = b_{eq}$ เพื่อหาค่าของ X ได้โดย

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 9 & -(1 + \alpha) & -4(1 + \alpha) \\ 3 & 9 & -(1 + \alpha) & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 \\ -\alpha \\ 1 - \alpha \end{bmatrix}$$

ซึ่งมีขอบเขตบนและล่างของอัตราส่วน x_{ji} แต่ละตัวดังนี้

$$0 \leq x_{42} \leq 1, 0 \leq x_{41} \leq 1, 0 \leq x_{32} \leq 1, 0 \leq x_{31} \leq 1$$

จากการกำหนดค่าของ $x_{43}=\alpha$ ซึ่งมีขอบเขตล่างที่ 0 และขอบเขตบนที่ 1 ทำการแทนค่าของ α ตั้งแต่ค่า 0 จนถึง 1 โดยทำการเพิ่มค่าของ α ขึ้นทีละ 0.01 แล้วทำการแก้สมการเชิงเส้นด้านบน

คำตอบของสมการเชิงเส้นมีค่าที่เป็นไปได้เมื่อ $0.47 \leq x_{43} \leq 0.80$ โดยแต่ละค่าของ x_{43} จะสามารถหาคำตอบของชุดอัตราส่วน x_{42} x_{41} x_{32} และ x_{31} ได้ 1 ชุด ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งข้อมูลในตารางจะแสดงเฉพาะส่วนที่สำคัญ โดยตัดข้อมูลในส่วนที่ซ้ำซ้อนและไม่จำเป็นออกไป

ตารางที่ 3.1 ค่าของอัตราส่วน x_{ji} เมื่อโหนดกระจายบนเส้นตรง $N=4$

Flag	Cost	x_{43}	x_{42}	x_{41}	x_{32}	x_{31}
-2	2.617391	0.45	0.556522	-0.0065	0.731634	0.268366
-2	2.61565	0.46000	0.54087	-0.0009	0.73615	0.26385
1	2.61391	0.47000	0.52522	0.00478	0.74061	0.25939
1	2.61217	0.48000	0.50957	0.01043	0.74501	0.25499
1	2.61043	0.49000	0.49391	0.01609	0.74934	0.25066
1	2.60870	0.50000	0.47826	0.02174	0.75362	0.24638
1	2.56000	0.78000	0.04000	0.18000	0.85393	0.14607
1	2.55826	0.79000	0.02435	0.18565	0.85693	0.14307
1	2.55652	0.80000	0.00870	0.19130	0.85990	0.14010
-2	2.55478	0.81000	-0.007	0.19696	0.86284	0.13716
-2	2.553043	0.82	-0.0226	0.202609	0.865743	0.134257

จากสมการแรกของตารางที่ 3.1 ในช่องของ Flag บ่งชี้ว่าอัตราส่วนในแถวนั้นของตารางเป็นไปได้หรือไม่ ถ้าหาก Flag มีค่าเป็น -2 อัตราส่วนในแถวนั้นของตารางไม่สามารถเป็นจริงได้เนื่องจากมีบางค่าที่ติดลบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เป็นไปไม่ได้ หาก Flag มีค่าเท่ากับ 1 บ่งชี้ว่าอัตราส่วนในแถวนั้นของตารางมีความเป็นไปได้ สำหรับสองแถวแรกของตาราง ค่าของ x_{41} เป็นลบ อัตราส่วนดังกล่าวจึงเป็นอัตราส่วนที่เป็นจริงไม่ได้ เช่นเดียวกันกับข้อมูลในสองแถวสุดท้ายของตารางซึ่งมีค่าของ x_{42} ติดลบ ทำให้อัตราส่วนในสองแถวดังกล่าวไม่เป็นจริง เมื่อพิจารณาในสมการที่ 2 ค่าของ Cost ในที่นี้หมายถึงพลังงานที่แต่ละโหนดใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการให้แต่ละโหนดมีปริมาณการใช้พลังงานน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ คำตอบที่

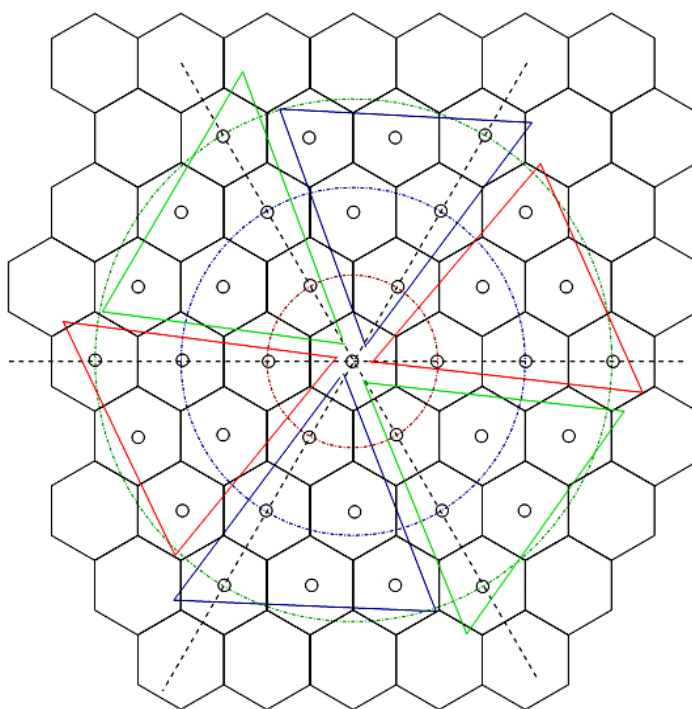
ต้องการคือชุดของอัตราส่วน x_{ji} ที่ทำให้ค่าพลังงานของแต่ละโหนดใช้มีค่าน้อยที่สุด จึงได้คำตอบในตำแหน่งที่ $x_{43}=0.800$ โดยคำตอบที่ได้คือ

$$x_{43}=0.800; x_{42}=0.009; x_{41}=0.191; x_{32}=0.860; x_{31}=0.140; x_{21}=1$$

อัตราส่วนจากด้านบน ทำให้ค่าพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดใช้มีค่าน้อยที่สุด และมีระดับใกล้เคียงกันในตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนด

โดยตัวรับรู้โหนดที่ 4 จะต้องส่งข้อมูล 80% ที่สร้างขึ้นผ่านไปยังตัวรับรู้โหนดที่ 3 ส่วนที่เหลืออีก 20% นั้นข้อมูล 1% จะส่งผ่านไปยังตัวรับรู้โหนดที่ 2 และข้อมูลอีก 19% จะทำการส่งไปยังสถานีฐานโดยตรง สำหรับตัวรับรู้โหนดที่ 3 จะทำการส่งข้อมูล 86% ของข้อมูลทั้งหมดผ่านทางโหนดที่ 2 และที่เหลืออีก 14% จะถูกส่งไปยังสถานีฐานโดยตรง และสำหรับตัวรับรู้โหนดที่ 2 ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปยังสถานีฐานโดยตรง เนื่องจากมีเส้นทางการส่งเพียงเส้นทางเดียว

3.2.3 การคำนวณในกรณีที่โหนดกระจายบนระนาบ



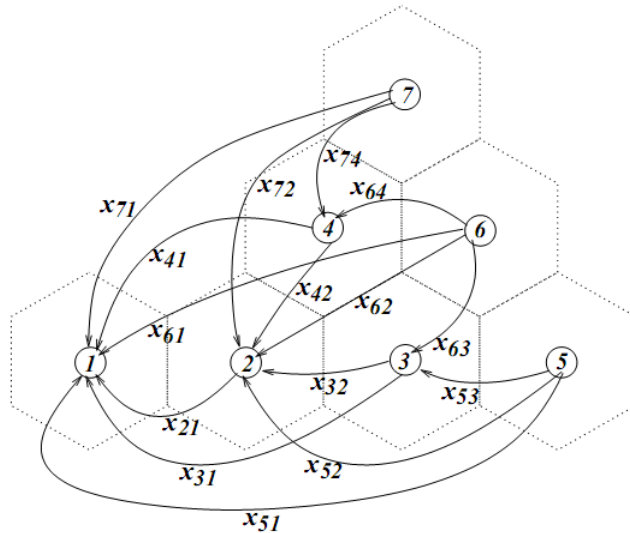
รูปที่ 3.6 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ กลุ่มตัวรับรู้ไร้สายถูกจัดเรียงอยู่ในแนวเส้นตรงด้วยระยะทาง d เท่าๆ กัน โดยสามารถทำให้ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวใช้พลังงานในระดับใกล้เคียงกันจากการส่งต่อข้อมูลในระยะทางที่ต่างกัน ผ่านตัวรับรู้อื่นๆ ไปยังสถานีฐานด้วยค่าอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ในความเป็นจริง ตัวรับรู้จะถูกวางกระจายไปทั่วบนระนาบ ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้สามารถขยายขึ้นมาอธิบายในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายไว้บนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

ซึ่งในที่นี้ขอสมมติให้ตัวรับรู้ไร้สายถูกจัดวางอยู่บนระนาบ 2 มิติ อย่างสม่ำเสมอ โดยตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวจะมีขอบเขตการตรวจสอบเป็นรูป 6 เหลี่ยมด้านเท่า รัศมีของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายมีค่าเท่ากับ 3 สอป ซึ่งมีแนวทางมาจากการวิจัยของ G. Chakraborty [16] เกี่ยวกับขนาดที่เหมาะสมของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย ดังในรูปที่ 3.6

ถ้าหากทำการแบ่งกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายนี้ออกเป็น 6 ส่วนเท่าๆ กัน จะได้ส่วนตัดของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายที่มีลักษณะเดียวกันดังในรูปที่ 3.7 จำนวน 6 ส่วน ทำให้สามารถจะนำค่าอัตราส่วนต่างๆ ที่คำนวณได้ส่วนตัดเพียงส่วนเดียว ไปใช้กับส่วนตัดส่วนอื่นๆ ได้



รูปที่ 3.7 ส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงเศษหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย

จากรูปที่ 3.7 เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.2.2 กำหนดให้ x_{ji} เป็นอัตราส่วนของข้อมูลที่ถูกล่งจากโหนด j ไปยังโหนด i โดยอัตราส่วนทั้งหมดของ x_{ji} จะถูกแสดงในเมทริกซ์ X ด้านล่าง ซึ่งสดมภ์ของเมทริกซ์จะหมายถึงโหนดที่รับข้อมูลเริ่มตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 7 ส่วนแถวของเมทริกซ์หมายถึงโหนดที่เป็นฝ่ายส่งข้อมูลเริ่มต้นด้วยโหนดที่ 2

$$X_{ji} = \begin{bmatrix} x_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{31} & x_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{41} & x_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} & x_{64} & 0 & 0 & 0 \\ x_{71} & x_{72} & 0 & x_{74} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{node}-2 \\ \text{node}-3 \\ \text{node}-4 \\ \text{node}-5 \\ \text{node}-6 \\ \text{node}-7 \end{matrix}$$

$$\text{โดย } x_{ji} = \frac{\text{packets transmitted from node-}j \text{ to node-}i}{\text{total packets transmitted from node-}j}$$

ระยะห่างของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดในรูปที่ 3.8 จะแสดงได้โดยเมทริกซ์ D ด้านล่าง เมื่อหน่วยข้อมูล d_{ji} เป็นระยะทางจากโหนด j ไปยังโหนด i ค่า “NA” ในตารางเป็นระยะทางที่ไม่ทำการคำนวณเนื่องจากการไม่มีการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุระหว่างโหนดนั้น

$$D = \begin{bmatrix} NA & NA & NA & NA & NA & NA & NA \\ d & NA & NA & NA & NA & NA & NA \\ 2d & d & NA & NA & NA & NA & NA \\ \sqrt{3}d & d & NA & NA & NA & NA & NA \\ 3d & 2d & d & NA & NA & NA & NA \\ \sqrt{7}d & \sqrt{3}d & d & d & NA & NA & NA \\ \sqrt{7}d & 2d & NA & d & NA & NA & NA \end{bmatrix}$$

เช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้านี้ กำหนดให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งโดยโหนด j มีจำนวนเป็น R_j โดย R_j เป็นผลรวมของข้อมูลที่โหนด j สร้างขึ้น (m) กับข้อมูลที่โหนด j รับจากโหนดอื่น ดังนั้น

$$R_7 = R_6 = R_5 = 0 \quad (3.28)$$

$$R_4 = \sum_{i=5,6,7} (R_i + m) \times x_{i4} \quad (3.29)$$

$$R_3 = \sum_{i=5,6,7} (R_i + m) \times x_{i3} \quad (3.30)$$

$$R_2 = \sum_{i=3,4} (R_i + m) \times x_{i2} + \sum_{i=5,6,7} (R_i + m) \times x_{i2} \quad (3.31)$$

จากระยะทางในเมทริกซ์ D สามารถคำนวณหาพลังงานที่แต่ละโหนดจะใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ ซึ่งในที่นี้จะไม่นำพลังงานในการเลี้ยงวงจรของของตัวรับรู้ไร้สายในขณะรับและส่งข้อมูลมาคำนวณด้วย เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ กำหนดให้พลังงานที่ใช้โดยโหนด j มีค่าเป็น C_j และพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดใช้มีค่าเท่าเทียมกัน โดยคำตอบที่ต้องการคือชุดของอัตราส่วนที่ทำให้พลังงานที่ใช้ในแต่ละโหนดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเงื่อนไขดังสมการและอสมการที่ (3.32) ถึง (3.34) ด้านล่าง

$$\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1 \quad (3.32)$$

$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (3.33)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (32) จะแทนค่า $x_{74} = x_{53} = \alpha$ และแทนค่า $x_{64} = x_{63} = \beta$ เพื่อแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ได้ชุดของสมการดังนี้

$$x_{74} + x_{72} + x_{71} = \alpha + x_{72} + x_{71} = 1 \quad (3.35)$$

$$x_{64} + x_{63} + x_{62} + x_{61} = 2\beta + x_{62} + x_{61} = 1 \quad (3.36)$$

$$x_{53} + x_{52} + x_{51} = \alpha + x_{52} + x_{51} = 1 \quad (3.37)$$

$$x_{42} + x_{41} = 1 \quad (3.38)$$

$$x_{32} + x_{31} = 1 \quad (3.39)$$

$$x_{21} = 1 \quad (3.40)$$

จากสมการ (3.35) ถึง (3.40) จะมี x_{ji} ซึ่งยังไม่ทราบค่าทั้งหมด 10 ค่าและมีสมการเชิงเส้นทั้งหมด 5 สมการ นำสมการที่ (3.28) ถึง (3.31) มาเขียนใหม่โดยแทนค่า $\lambda = (1 + \alpha + \beta)$ ลงไปเพื่อลดรูปสมการ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$R_7 = R_6 = R_5 = 0 \quad (3.41)$$

$$R_4 = (\lambda - 1) \times m \quad (3.42)$$

$$R_3 = (\lambda - 1) \times m \quad (3.43)$$

$$R_2 = m \times (x_{72} + x_{62} + x_{52} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32}) \quad (3.44)$$

ใช้ระยะทางจากเมทริกซ์ D และอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ x_{ji} มาสร้างสมการพลังงานที่ใช้ของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนด

$$C_7 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{72} + 7x_{71} + \alpha) \quad (3.45)$$

$$C_6 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (3x_{62} + 7x_{61} + 2\beta) \quad (3.46)$$

$$C_5 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{52} + 9x_{51} + \alpha) \quad (3.47)$$

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (\lambda x_{42} + 3\lambda x_{41}) \quad (3.48)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (\lambda x_{32} + 4\lambda x_{31}) \quad (3.49)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (x_{72} + x_{62} + x_{52} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32} + 1) \quad (3.50)$$

จากสมการ (3.45) ถึง (3.50) นำสมการ (3.45) มาจับคู่กับสมการ (3.46) ถึง (3.50) แล้วแก้สมการจะได้สมการเชิงเส้นอีก 5 สมการคือ

$$4x_{72} + 7x_{71} - 3x_{62} - 7x_{61} = 2\beta - \alpha \quad (3.51)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - 4x_{52} - 9x_{51} = 0 \quad (3.52)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - \lambda x_{42} - 3\lambda x_{41} = -\alpha \quad (3.53)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - \lambda x_{32} - 4\lambda x_{31} = -\alpha \quad (3.54)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - x_{62} - x_{52} - \lambda x_{42} - \lambda x_{32} = 1 - \alpha \quad (3.55)$$

ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้นทั้งหมด 10 ตัวแปร คือสมการ (3.35) ถึง (3.39) และสมการ (3.51) ถึง (3.55) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนด คำตอบที่ต้องการหาคือค่าของ

$$X = [x_{72} \ x_{71} \ x_{62} \ x_{61} \ x_{52} \ x_{51} \ x_{42} \ x_{41} \ x_{32} \ x_{31}]$$

โดยต้องการค่าที่ทำให้พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดใช้มีค่าน้อยที่สุด นำสมการ (3.35) ถึง (3.39) และสมการ (3.51) ถึง (3.55) มาเขียนใหม่ในรูปของเมทริกซ์ $A_{eq} \times X = b_{eq}$ ได้ดังนี้

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 7 & -3 & -7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & -4 & -9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & -3\lambda & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & -4\lambda \\ 3 & 7 & -1 & 0 & -1 & 0 & -\lambda & 0 & -\lambda & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 - 2\beta \\ 1 - \alpha \\ 1 \\ 1 \\ 2\beta - \alpha \\ 0 \\ -\alpha \\ -\alpha \\ 1 - \alpha \end{bmatrix}$$

เนื่องจาก ค่าของ $x_{74}=x_{53}=\alpha$ และ $x_{74}=x_{53}=\beta$ มีขอบเขตล่างที่ 0 และขอบเขตบนที่ 1 งานวิจัยนี้จะทำการแทนค่าของ α และ β ตั้งแต่ค่า 0 จนถึง 1 โดยทำการเพิ่มค่าของ α และ β ขึ้นทีละ 0.01 แล้วทำการแก้สมการเชิงเส้นด้านบน

แต่ละคู่ของ α และ β จะได้อัตราส่วนที่เป็นคำตอบของสมการเชิงเส้นที่เป็นไปได้ 1 ชุด ดังที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าของอัตราส่วน x_{ji} เมื่อตัวรับรู้กระจายอย่างสม่ำเสมอบนระนาบ

Cost	$x_{74}=x_{53}$ $=\alpha$	$x_{64}=x_{63}$ $=\beta$	x_{72}	x_{71}	x_{62}	x_{61}	x_{52}	x_{51}	x_{42}	x_{41}	x_{32}	x_{31}
10.5760	0.579	0.289	0	0.421	0.002	0.42	0.169	0.252	0.556	0.444	0.704	0.296
10.5762	0.579	0.288	0	0.421	0.005	0.419	0.169	0.252	0.556	0.444	0.704	0.296
10.5764	0.579	0.287	0	0.421	0.008	0.418	0.169	0.252	0.555	0.445	0.704	0.296
10.5766	0.579	0.286	0	0.421	0.011	0.417	0.168	0.253	0.555	0.445	0.703	0.297
10.5767	0.579	0.285	0	0.421	0.014	0.416	0.168	0.253	0.554	0.446	0.703	0.297

จากตารางที่ 3.2 แสดงค่าของอัตราส่วน x_{ji} เมื่อตัวรับรู้กระจายอย่างสม่ำเสมอบนระนาบ ในตารางตัดเฉพาะส่วนที่สำคัญมาแสดง ค่าอัตราส่วนที่ทำให้ตัวรับรู้ใช้พลังงานน้อยที่สุดมีค่า $\alpha = 0.57$ และ $\beta = 0.28$ ซึ่งจะได้ค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนดดังนี้

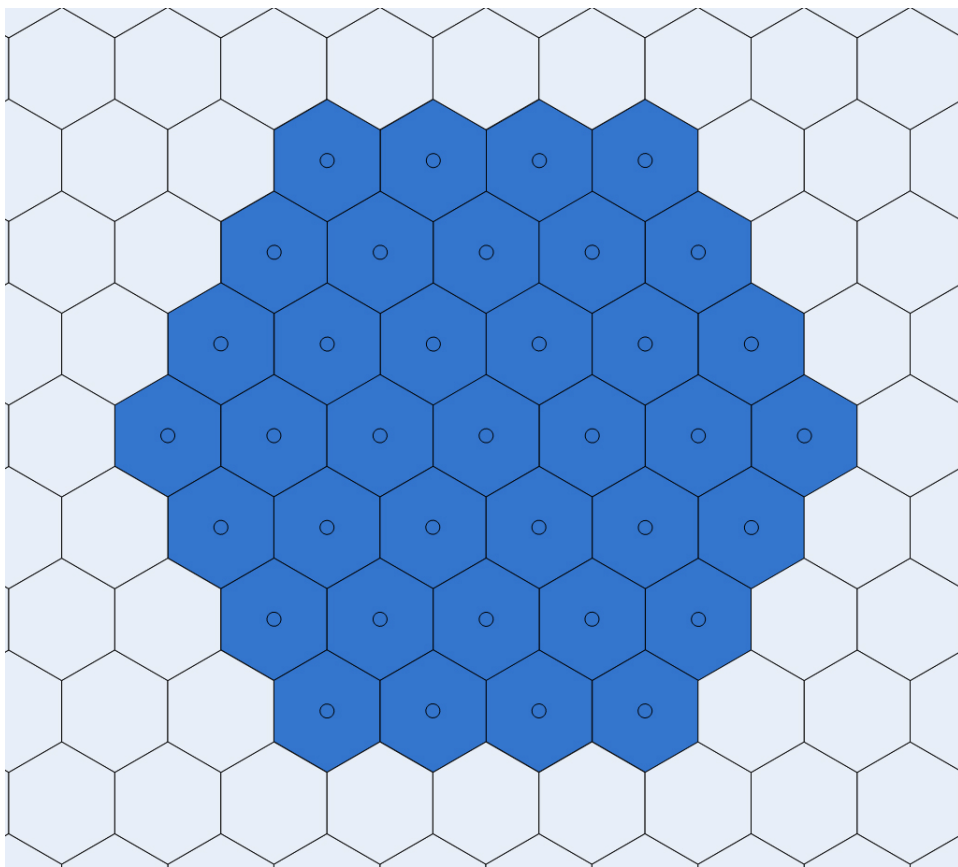
$x_{74}= 0.57$; $x_{72}=0.0172$; $x_{71}=0.4128$; $x_{64}=0.28$; $x_{63}=0.28$; $x_{62}=0.0279$; $x_{61}=0.4121$; $x_{53}=0.57$; $x_{52}=0.1823$; $x_{51}=0.2477$; $x_{42}=0.5463$; $x_{41}=0.4537$; $x_{32}=0.6976$; $x_{31}=0.3024$; $x_{21}= 1$

บทที่ 4

การทดลองและหาค่าสมรรถนะของระบบ

ในบทนี้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบและผลที่ได้จากการจำลองระบบโดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นสมรรถนะของระบบ เมื่อนำวิธีการที่งานวิจัยนำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการของ LEACH วิธีการ Minimum Transmission Energy และ วิธีการ Direct Transmission

4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ



รูปที่ 4.1 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าสมรรถนะของระบบ งานวิจัยจะใช้ MATLAB ในการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย โดยตัวรับรู้ไร้สายถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอบนระนาบ 2 มิติ ค่าอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์วิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้นำเสนอ

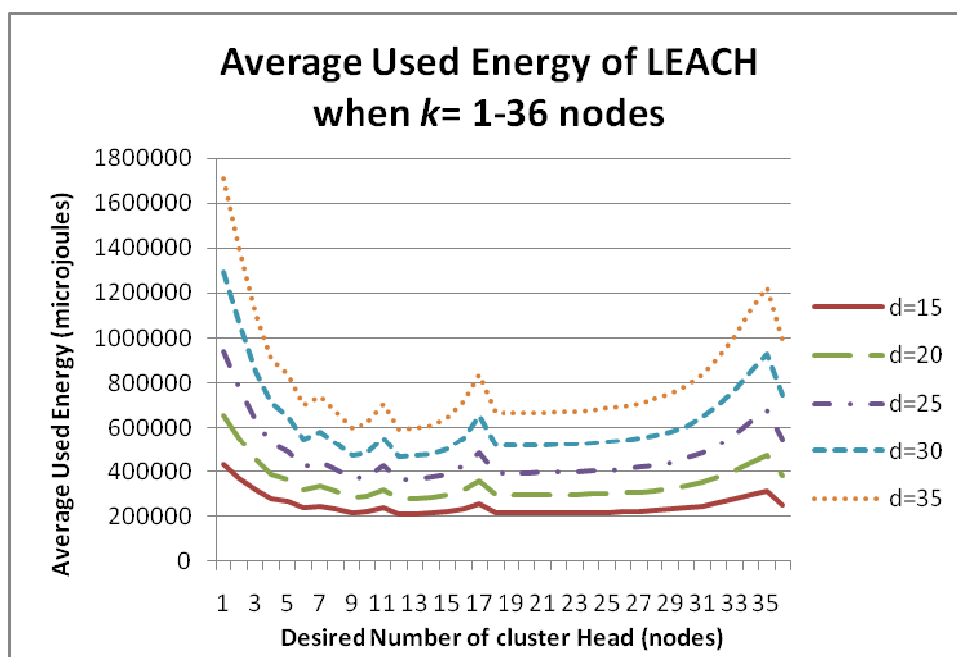
4.2 ค่าชี้วัดสมรรถนะ

ในส่วนนี้จะทำการเลือกค่าชี้วัดสมรรถนะอันได้แก่

- ค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย (Average remaining energy)
- ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้ในแต่ละรอบ (Average used energy)
- จำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายในระบบสามารถทำงานได้ (Lifetime of sensor nodes)
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย (Standard deviation of remaining energy)

4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในส่วนนี้จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 โดยอ้างอิงตามค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการจำลองระบบเครือข่าย โดยการทดลองแต่ละวิธีจะมีทำซ้ำ 100 รอบ แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าพารามิเตอร์ k จำนวนหัวหน้ากลุ่มที่คาดหวังที่เหมาะสมของ LEACH จะเปลี่ยนแปลงไปตามทอพอโลยี และตำแหน่งของสถานีฐาน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์ k ที่เหมาะสมที่ทำให้ LEACH ใช้พลังงานเฉลี่ยน้อยที่สุดบนทอพอโลยีดังรูป 4.1 คือ จำนวนของหัวหน้ากลุ่มมีจำนวน 1 ใน 3 ของจำนวนตัวรับรู้สมาชิกทั้งหมด ตามกราฟในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายวิธี LEACH เมื่อ k มีค่า 1 ถึง 36 โหนด

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ตัวรับรู้ในวิธี LEACH โดยแกนนอนแสดงจำนวนของหัวหน้ากลุ่มในทอพอโลยี และแกนตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ใช้ไป ซึ่งค่าเฉลี่ยของพลังงานจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อ พารามิเตอร์ k มีค่าเป็น 12 โหนด

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
พลังงานเริ่มต้นของตัวรับรู้	E_i	จูล	0.5
พลังงานที่ถือว่าตัวรับรู้หมดพลังงาน	E_t	จูล	0.05
ระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกัน	d	เมตร	15 ถึง 35
จำนวนตัวรับรู้สมาชิกในระบบ	n	โหนด	36
จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ตัวรับรู้สร้างในแต่ละรอบ	m	แพ็คเกจ	1
ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ	$\mathcal{E}_{amp}$	จูลต่อบิตต่อเมตร ยกกำลังสอง	100×10^{-12}
ขนาดของกลุ่มข้อมูล	pks	บิต	2000
จำนวนหัวหน้ากลุ่มที่คาดหวัง (เฉพาะวิธี LEACH)	k	โหนด	12

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้จะมุ่งเป้าหมายไปที่การลดการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายเพื่อให้อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้ตัวรับรู้ไร้สายบางตัวในระบบหมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่นๆ เป็นเหตุให้สูญเสียข้อมูลที่ควรจะได้รับจากตัวรับรู้ที่เหล่านั้ ในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มเป้าหมายในการกระจายพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายทุกโหนดในระบบให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เพื่อให้สามารถได้รับข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายทุกโหนดในเครือข่าย ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบเครือข่ายคือ พลังงานเริ่มต้นของตัวรับรู้ และระยะห่างระหว่างตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของตัวรับรู้ไร้สาย

การส่งข้อมูลเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม ตามการคำนวณในบทที่ 3 นั้น ในวิธีการของ Uniform สามารถมีการส่งได้ใน 2 ลักษณะ คือ

1) ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลที่ต้องการจะส่ง ออกเป็นกลุ่มข้อมูลที่เล็กกว่าเดิมตามอัตราส่วนที่คำนวณได้ แล้วทำการส่งกลุ่มข้อมูลย่อยเหล่านี้ไปตามเส้นทางต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน ที่ได้คำนวณไว้แล้ว การส่งข้อมูลวิธีนี้ เมื่อข้อมูลถูกส่งไปถึงปลายทางแล้ว จำเป็นจะต้องมีการนำข้อมูลกลับเข้ามาเรียงต่อกัน เพื่อให้ได้กลุ่มข้อมูลเดิมก่อนที่จะมีการแบ่ง และจำเป็นจะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนของเฮดเดอร์ (Header) ของกลุ่มข้อมูลย่อยที่เพิ่มขึ้นมา การส่งวิธีนี้จะสามารถรักษาอัตราส่วนของการส่งข้อมูลได้ตามค่าที่เราคำนวณไว้อย่างเที่ยงตรง ทำให้ค่าเบี่ยงมาตรฐานของการใช้พลังงานในวิธีนี้ใกล้เคียงกับ 0

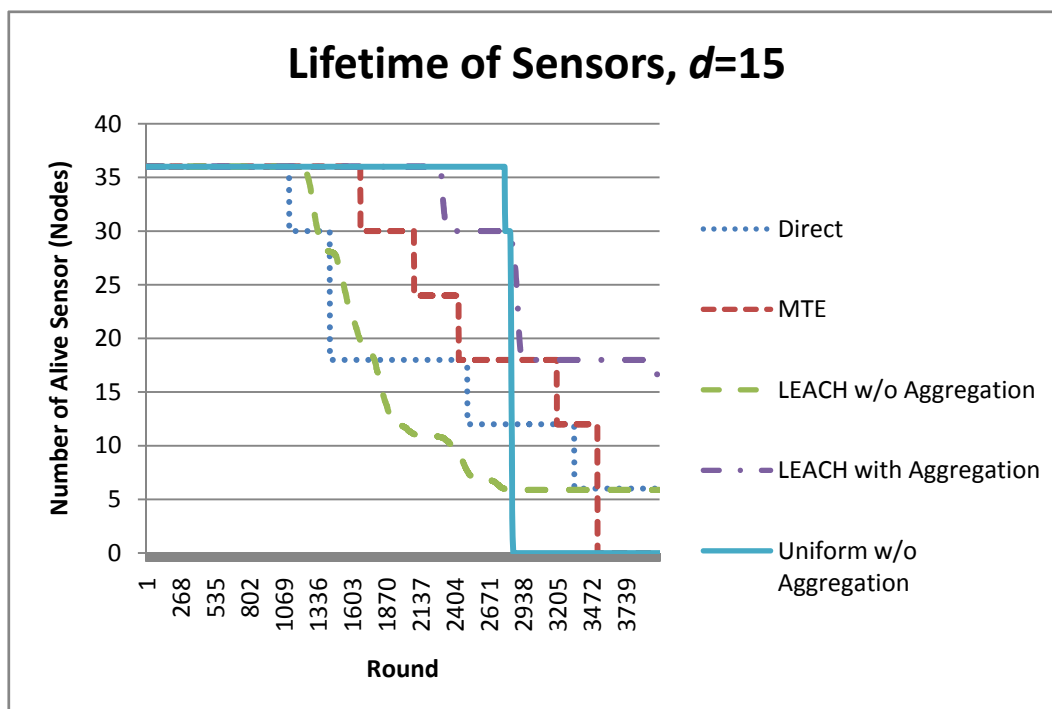
2) ทำการส่งกลุ่มข้อมูลทั้งกลุ่มออกไปโดยไม่มีการแบ่งเป็นกลุ่มข้อมูลย่อย ๆ โดยทำการสุ่มเส้นทางที่จะส่งกลุ่มข้อมูลนั้นออกไป จากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งการสุ่มเส้นทางจะเป็นการสุ่มในเงื่อนไขที่จะพยายามรักษาจำนวนกลุ่มข้อมูลในแต่ละเส้นทางให้ได้ตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้แล้ว การส่งข้อมูลวิธีนี้การรักษาอัตราส่วนตามการคำนวณให้แม่นยำจะเป็นไปได้ยาก ผลที่ได้อาจจะไม่เที่ยงตรงกับค่าอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้นัก แต่เนื่องจากการส่งวิธีนี้ไม่มีการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นกลุ่มย่อย จึงลดค่าใช้จ่ายในส่วนของเฮดเดอร์ของกลุ่มข้อมูล รวมสามารถนำการรวมข้อมูลเข้ามาประยุกต์ใช้ได้ง่ายกว่า ดังนั้นการสร้างแบบจำลองของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเพื่อวิเคราะห์ในรายงานการวิจัยฉบับนี้ จะใช้วิธีการนี้ในการส่งข้อมูล

ในแบบจำลองของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายนี้ เราจะขอละค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ของ MACA ในวิธีการ Uniform ค่าใช้จ่ายของ TDMA ในวิธีการของ LEACH รวมถึงค่าใช้จ่าย CDMA ในวิธีการของ Direct Transmission และ Minimum Transmission Energy ไว้ เพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณ

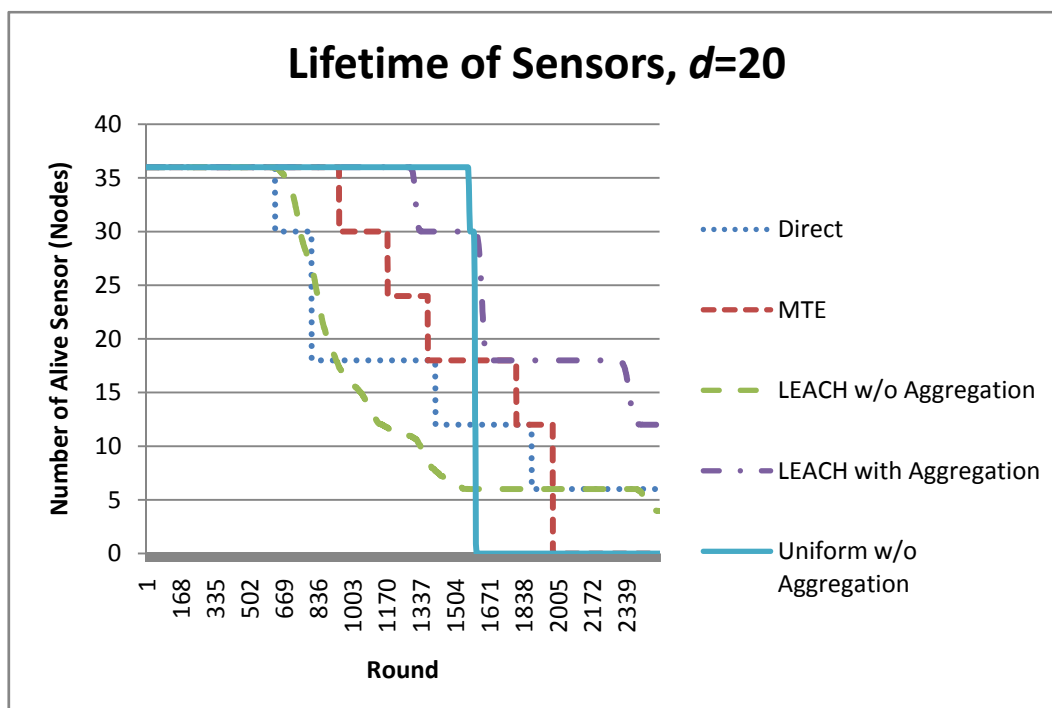
4.5 สมรรถนะของระบบ

เนื่องจากในวิธีการ Direct Transmission วิธีการ Minimum Transmission Energy และวิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ ไม่มีการรวมข้อมูล ดังเช่นที่ใช้ในวิธีการ LEACH ดังนั้นเพื่อความเสมอภาค ในรายงานการวิจัยจะประเมินวิธีการ LEACH ทั้งในแบบที่มีการรวมข้อมูลและไม่มีการรวมข้อมูล เนื่องจากข้อมูลบางประเภทอาจจะไม่สามารถนำการรวมข้อมูลเข้ามาประยุกต์ใช้ได้

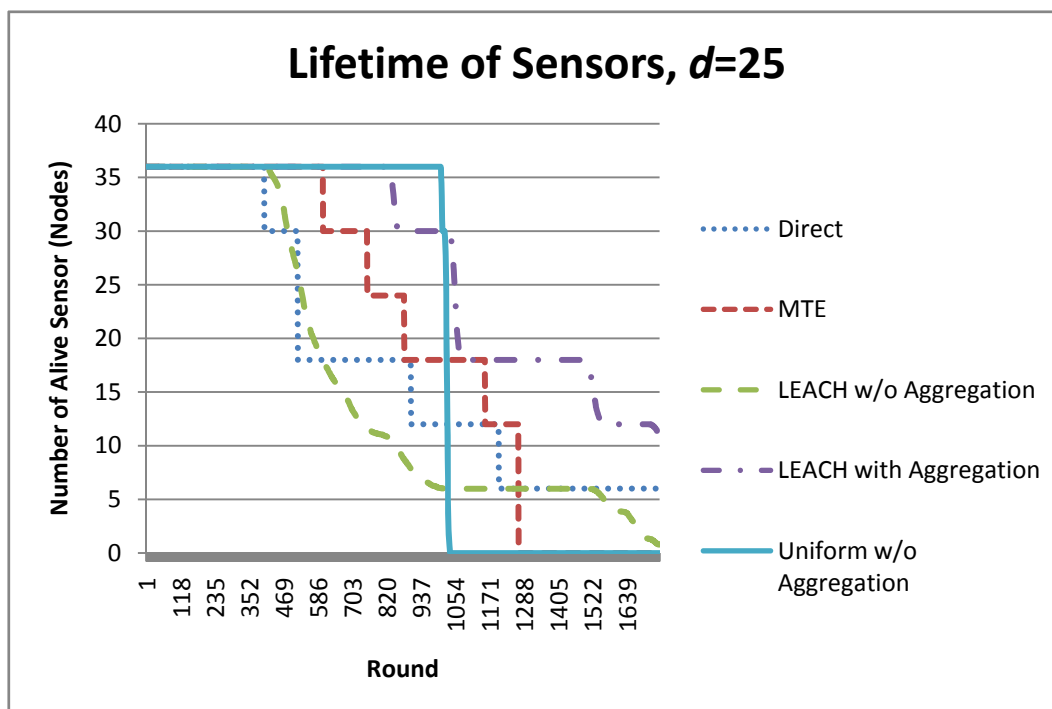
ในรูปที่ 4.3 ถึง 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้วิธีการต่างๆ กัน เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร โดยแกนนอนแสดงจำนวนรอบซึ่งตัวรับรู้ไร้สายสามารถปฏิบัติงานได้ และแกนตั้งแสดงจำนวนของตัวรับรู้ไร้สายที่ยังสามารถปฏิบัติงานได้ในรอบนั้น ๆ ซึ่งหากพิจารณากรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายเริ่มหมดพลังงาน จะเห็นได้ว่าวิธีการที่งานวิจัยนี้นำเสนอ จะมีจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายสามารถปฏิบัติงานได้ก่อนที่ตัวรับรู้ไร้สายจะเริ่มหมดพลังงานมากกว่าจำนวนรอบในวิธีการอื่นๆ



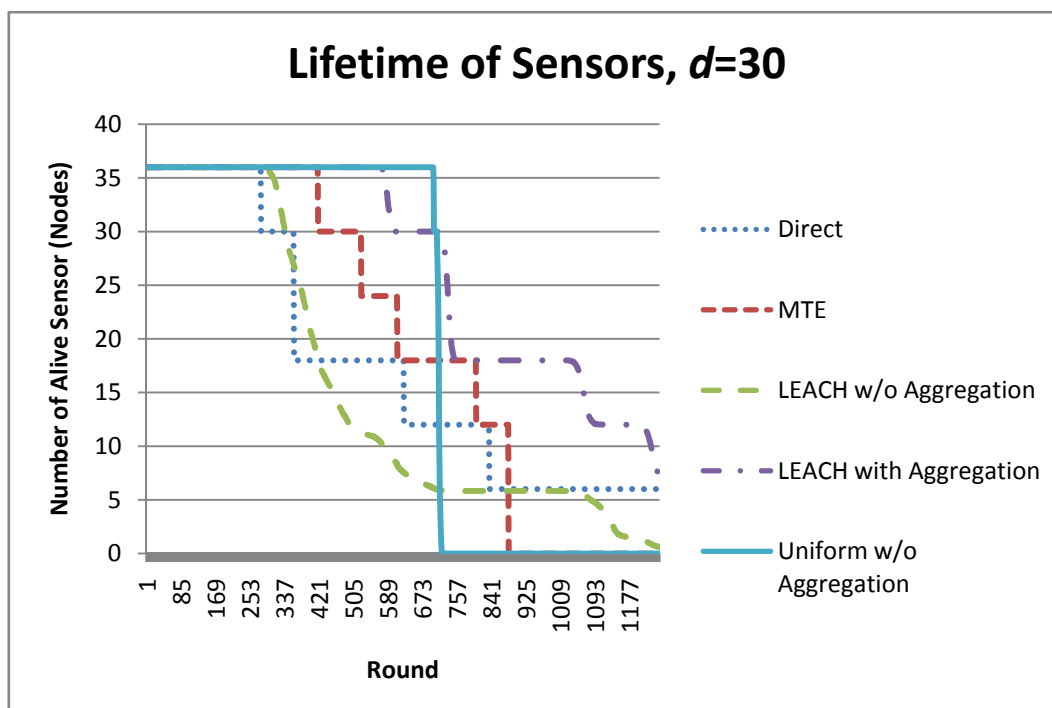
รูปที่ 4.3 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



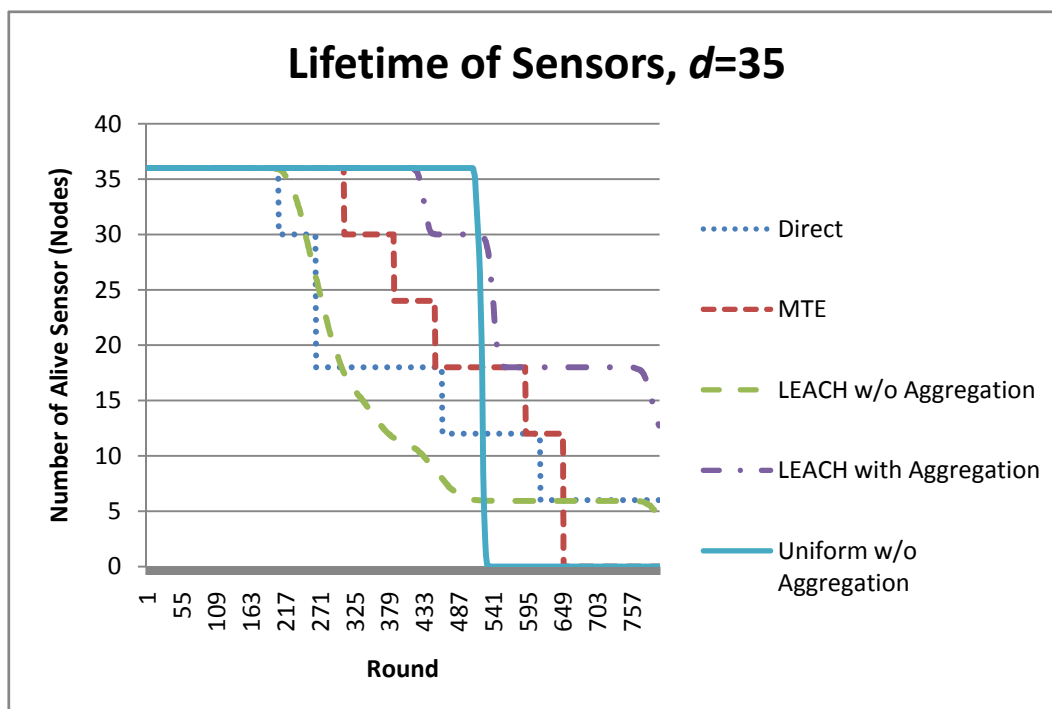
รูปที่ 4.4 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 4.5 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



รูปที่ 4.6 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



รูปที่ 4.7 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

รูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.7 แนวโน้มของกราฟอยู่ในลักษณะเดียวกัน คือวิธีการ Uniform จะมีตัวรับรู้เริ่มหมดพลังงานช้ากว่าวิธีการอื่น แต่เมื่อเทียบจำนวนรอบที่ตัวรับรู้จำนวนครึ่งหนึ่งหมดพลังงาน วิธีการของ LEACH แบบมีการรวมข้อมูลจะมีจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ครึ่งหนึ่งหมดพลังงานมากกว่าวิธีการ Uniform

อย่างไรก็ตามหากในงานประยุกต์ (Application) บางอย่างข้อมูลที่ตัวรับรู้รับได้รับมาจากตัวรับรู้ตัวอื่นๆ ไม่สามารถจะทำการรวมข้อมูลได้ วิธีการ Uniform จะมีอายุการใช้งานของตัวรับรู้ยาวนานกว่าวิธีการอื่นๆ ทั้งจำนวนรอบที่ตัวรับรู้เริ่มหมดพลังงาน และจำนวนรอบที่ตัวรับรู้จำนวนครึ่งหนึ่งหมดพลังงาน

จากรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.7 สามารถนำรอบซึ่งตัวรับรู้เริ่มหมดพลังงาน รอบที่ตัวรับรู้จำนวนครึ่งหนึ่งหมดพลังงาน และรอบที่ตัวรับรู้จำนวนสองส่วนสามหมดพลังงาน มาสรุปเป็นตารางแสดงอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อายุการใช้งานของตัวรับรู้เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 ถึง 35 เมตร

d (m)	Protocol	Round that 1st sensor node die	Round that 1/2 of sensor nodes die	Round 2/3 of sensor nodes die
15	Direct	1114	1431	2503
	MTE	1669	2435	3200
	LEACH w/o Aggregation	1260	1779	1942
	LEACH with Aggregation	2301	2941	4173
	Uniform	2794	2845	2850
20	Direct	628	806	1409
	MTE	940	1374	1803
	LEACH w/o Aggregation	680	925	1150
	LEACH with Aggregation	1302	1670	2415
	Uniform	1570	1601	1602
25	Direct	403	517	903
	MTE	603	880	1156
	LEACH w/o Aggregation	433	601	738
	LEACH with Aggregation	836	1087	1577
	Uniform	1006	1026	1027
30	Direct	280	360	628
	MTE	419	612	804
	LEACH w/o Aggregation	309	420	499
	LEACH with Aggregation	581	756	1116
	Uniform	700	713	715
35	Direct	207	265	462
	MTE	309	451	593
	LEACH w/o Aggregation	221	304	378
	LEACH with Aggregation	426	559	816
	Uniform	514	524	526

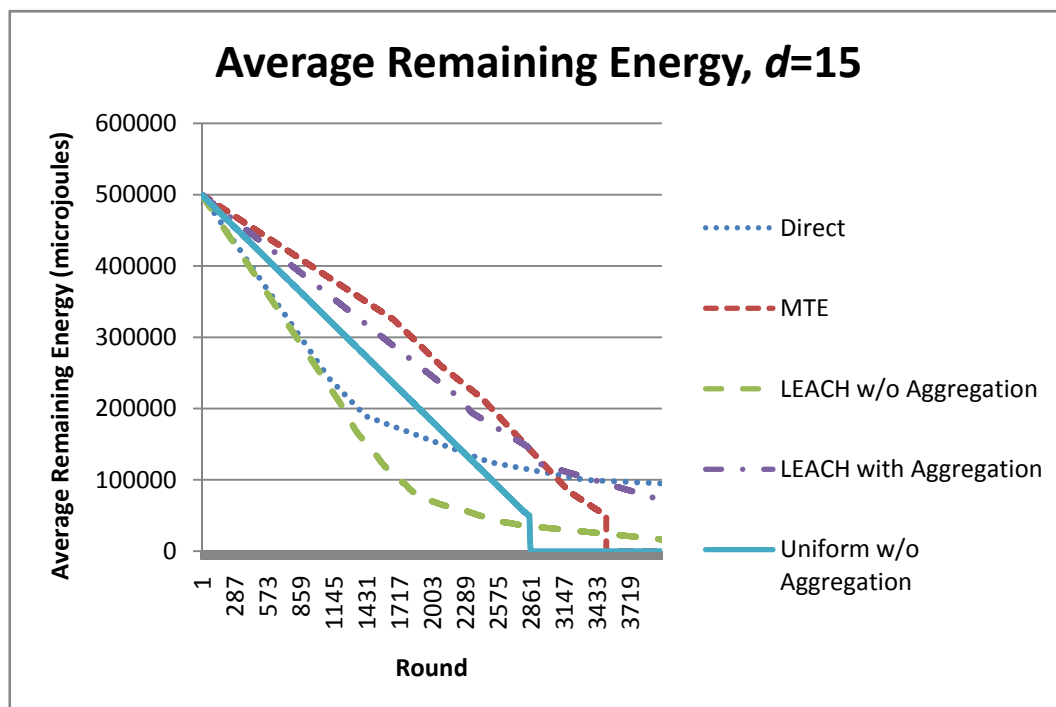
และจากรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.7 สามารถคำนวณหาจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่แต่ละวิธีสามารถทำการส่งได้จากพื้นที่ได้กราฟ ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายทั้งหมดส่งได้
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 ถึง 35 เมตร

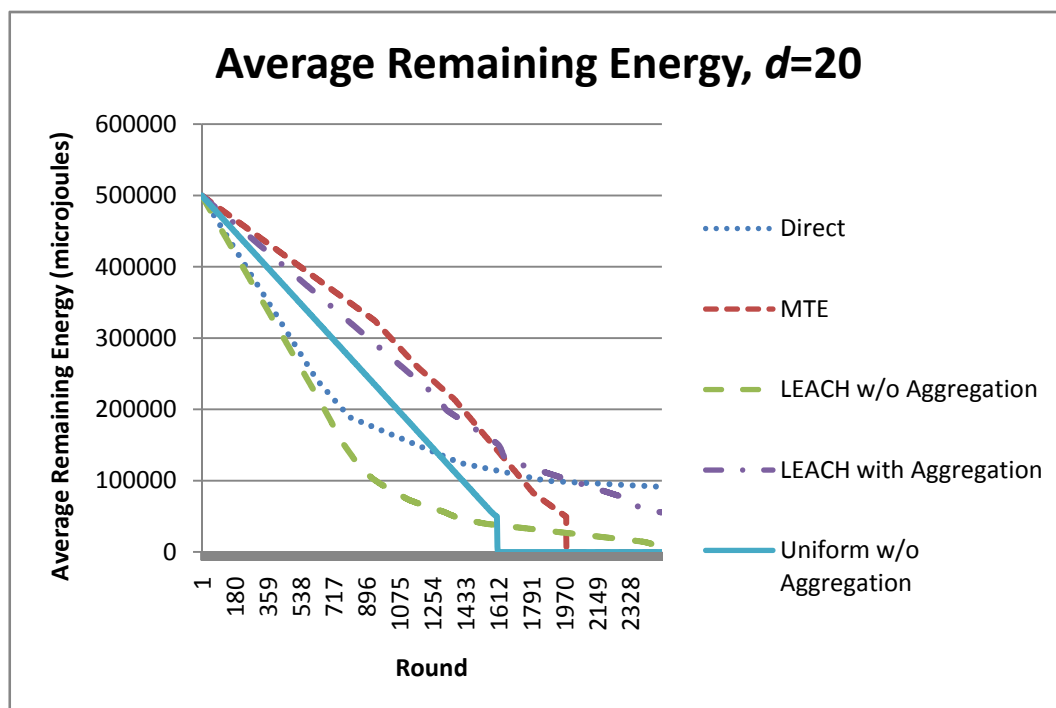
d (m)	Protocol	Number of Sending Packets	Number of Rounds
15	Direct	82860+	4000
	MTE	98514	4000
	LEACH w/o Aggregation	75768.59+	4000
	LEACH with Aggregation	120439.83++	4000
	Uniform	102149.1	4000
20	Direct	48132+	2500
	MTE	55482	2500
	LEACH w/o Aggregation	43485.02+	2500
	LEACH with Aggregation	71583.87++	2500
	Uniform	57482.58	2500
25	Direct	31728+	1750
	MTE	35562	1750
	LEACH w/o Aggregation	28248.44	1750
	LEACH with Aggregation	47833.77++	1750
	Uniform	36810.24	1750
30	Direct	21954+	1200
	MTE	24714	1200
	LEACH w/o Aggregation	19518.73	1200
	LEACH with Aggregation	33130.35++	1200
	Uniform	25582.5	1200
35	Direct	15654+	800
	MTE	18210	800
	LEACH w/o Aggregation	14139.32+	800
	LEACH with Aggregation	23402.12++	800
	Uniform	18801.42	800

จากตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายทั้งหมดส่งได้ ในช่วงที่มีเครื่องหมาย + อยู่แสดงให้เห็นว่าวิธีการนั้นยังมีตัวรับรู้ที่ยังไม่หมดพลังงานเหลืออยู่อีกเล็กน้อย และมีโอกาสส่งข้อมูลได้อีก สำหรับเครื่องหมาย ++ แสดงว่าวิธีการนั้นยังเหลือตัวรับรู้อยู่มากกว่าหนึ่งในสี่ จะเห็นได้ว่าวิธีการ Uniform จะสามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าวิธีการอื่นๆ เมื่อการประยุกต์ใช้ไม่สามารถทำการรวมข้อมูลได้ โดยจะมีจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลรวมน้อยกว่าก็เพียงวิธีการ LEACH แบบที่มีการรวมข้อมูล

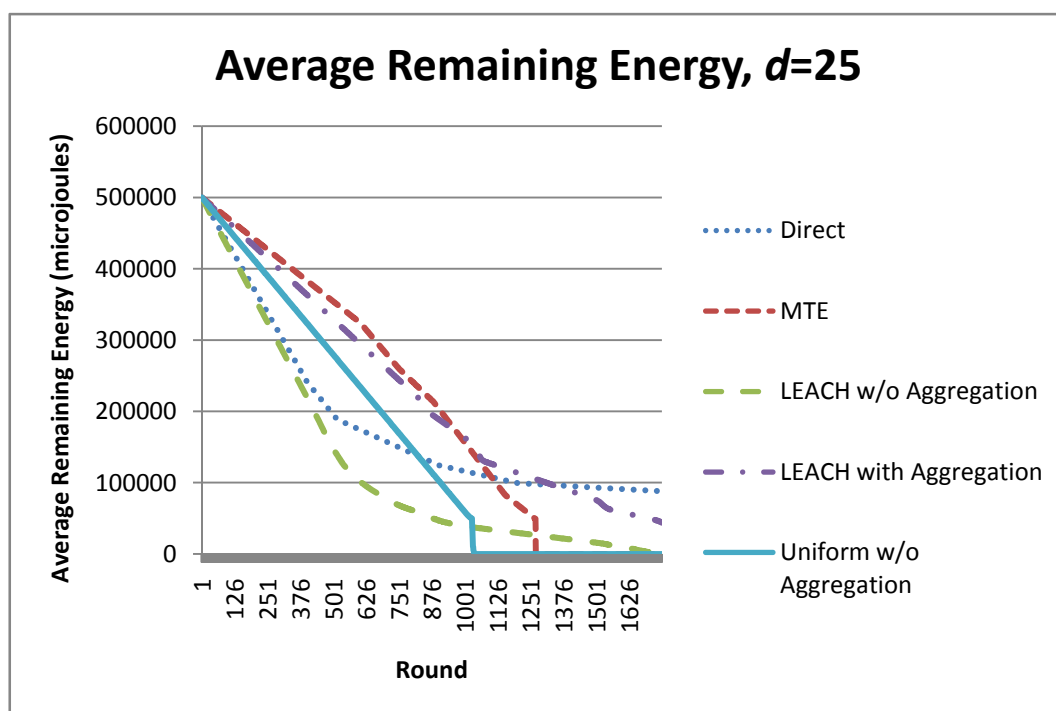
ในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้วิธีการต่างๆ กัน เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร โดยแกนนอนแสดงรอบของการปฏิบัติงาน แกนตั้งแสดงค่าพลังงานที่แต่ละวิธีใช้ในแต่ละรอบ



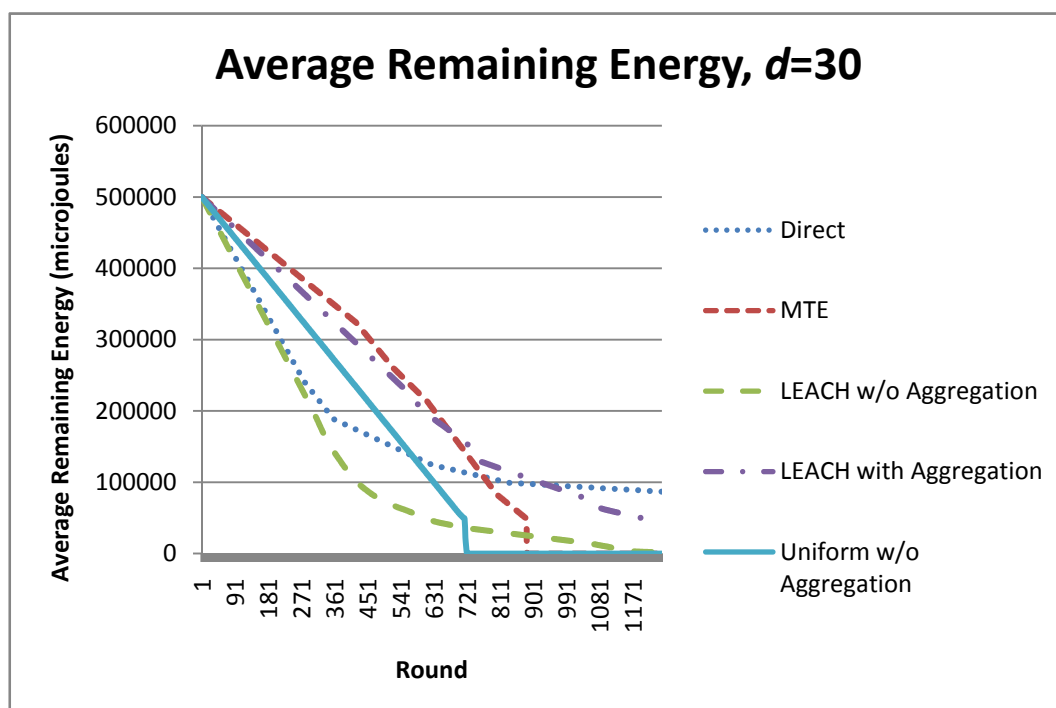
รูปที่ 4.8 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



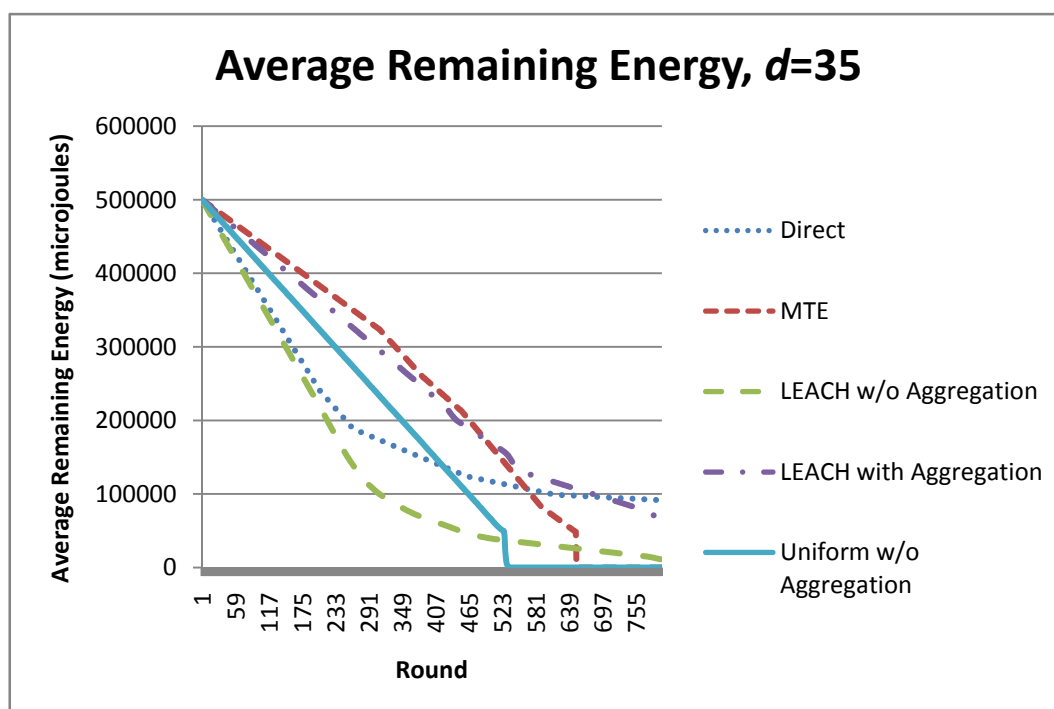
รูปที่ 4.9 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 4.10 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



รูปที่ 4.11 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



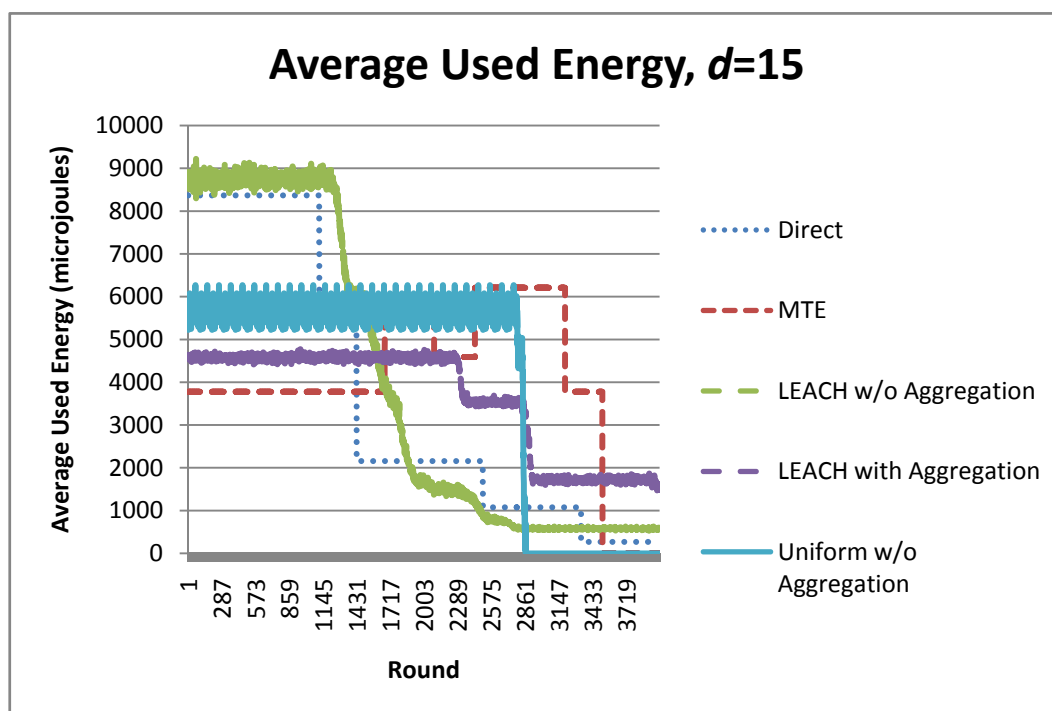
รูปที่ 4.12 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายซึ่งใช้วิธีการ Uniform มีค่าน้อยกว่า ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายซึ่งใช้วิธีของ Minimum Transimission Energy และ LEACH แบบมีการรวมข้อมูล และแม้ตัวรับรู้ในวิธีการ Uniform จะหมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ในวิธีการอื่นๆ ตัวรับรู้มากกว่าครึ่งในวิธีการอื่นๆ ก็หมดพลังงานเช่นกัน ทำให้พื้นที่ในการตรวจสอบข้อมูลของตัวรับรู้ในวิธีการอื่นๆ แคบลงอย่างมาก

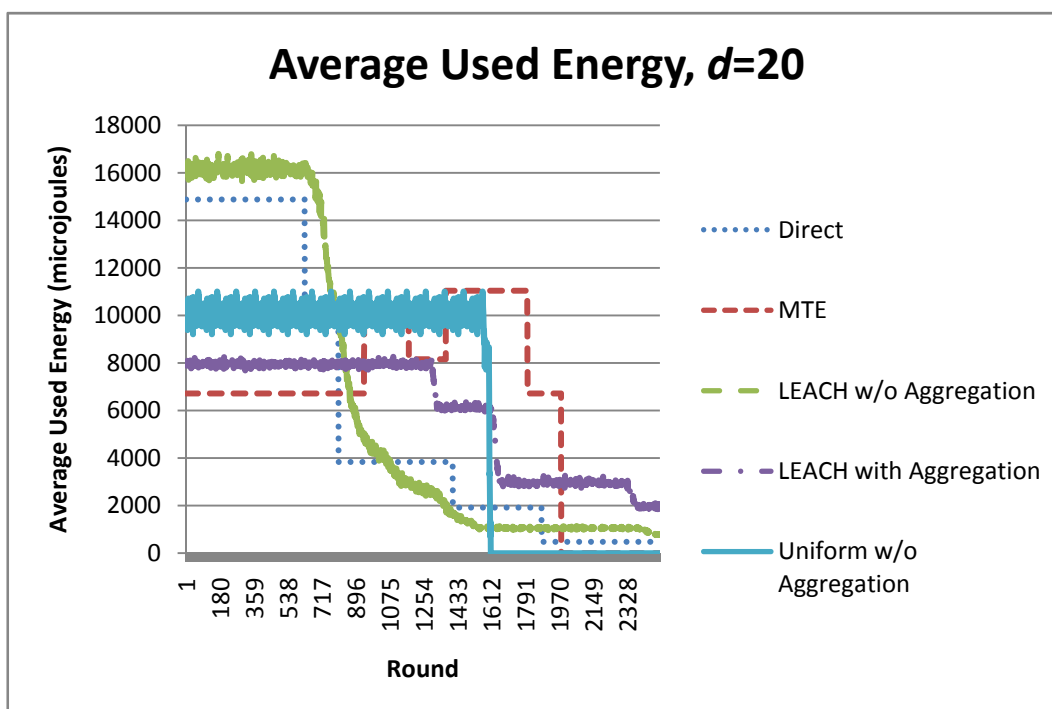
ในวิธีการ Uniform ตัวรับรู้ทุกตัวหมดพลังงานในเวลาใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ในวิธีการอื่นๆ ทำให้สามารถทำการติดตั้งตัวรับรู้ใหม่ทั้งระบบได้ในครั้งเดียว โดยไม่ต้องตรวจสอบตัวรับรู้ทีละตัวว่าตัวรับรู้ตัวใดหมดพลังงาน แล้วค่อยๆ ทำการเปลี่ยนตัวรับรู้ที่หมดพลังงาน

ซึ่งหากนำวิธีการรวมข้อมูลเข้ามาประยุกต์ใช้กับวิธีการ Uniform คาดว่าพลังงานที่ใช้ในวิธีการ Uniform จะต่ำกว่าที่แสดงในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.12 และตัวรับรู้ในวิธีการ Uniform จะมีอายุที่ยาวนานกว่าที่เป็นแสดงในตารางที่ 4.2

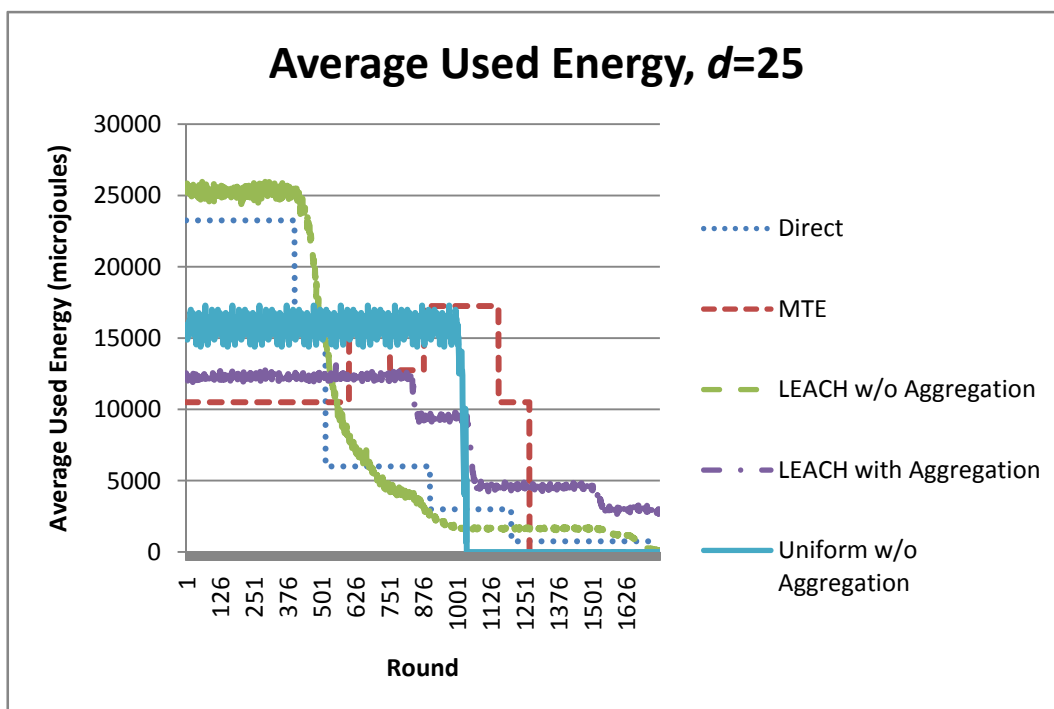
ในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.17 แสดงพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานในแต่ละรอบ โดยแกนนอนแสดงจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายทำงาน แกนตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ใช้ไปในตัวรับรู้



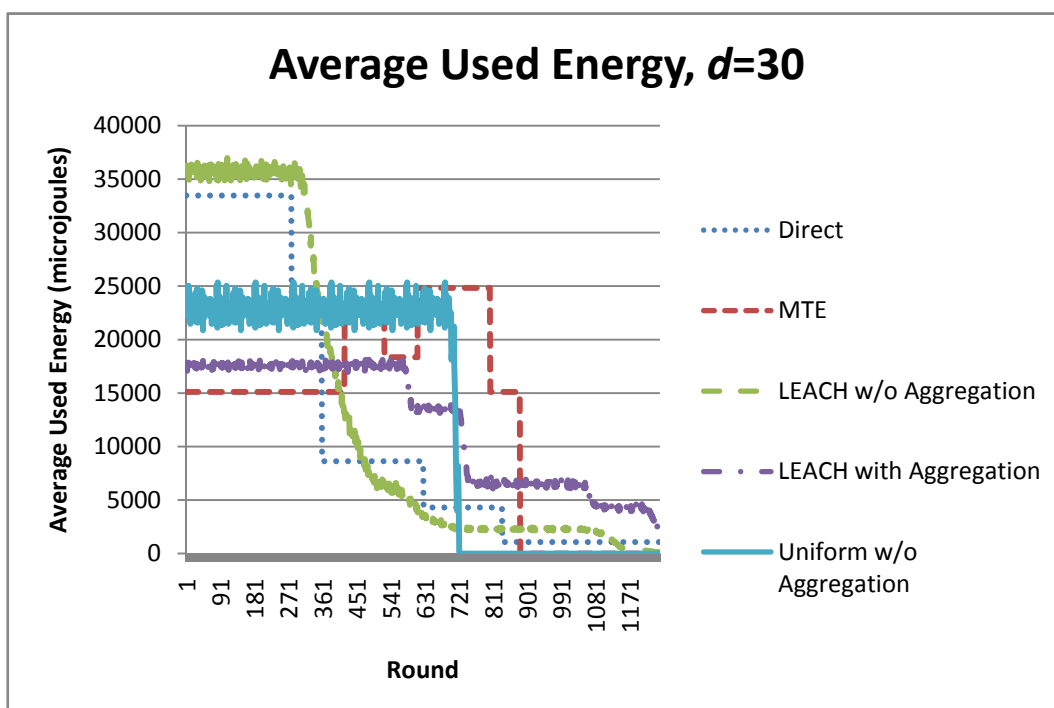
รูปที่ 4.13 พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



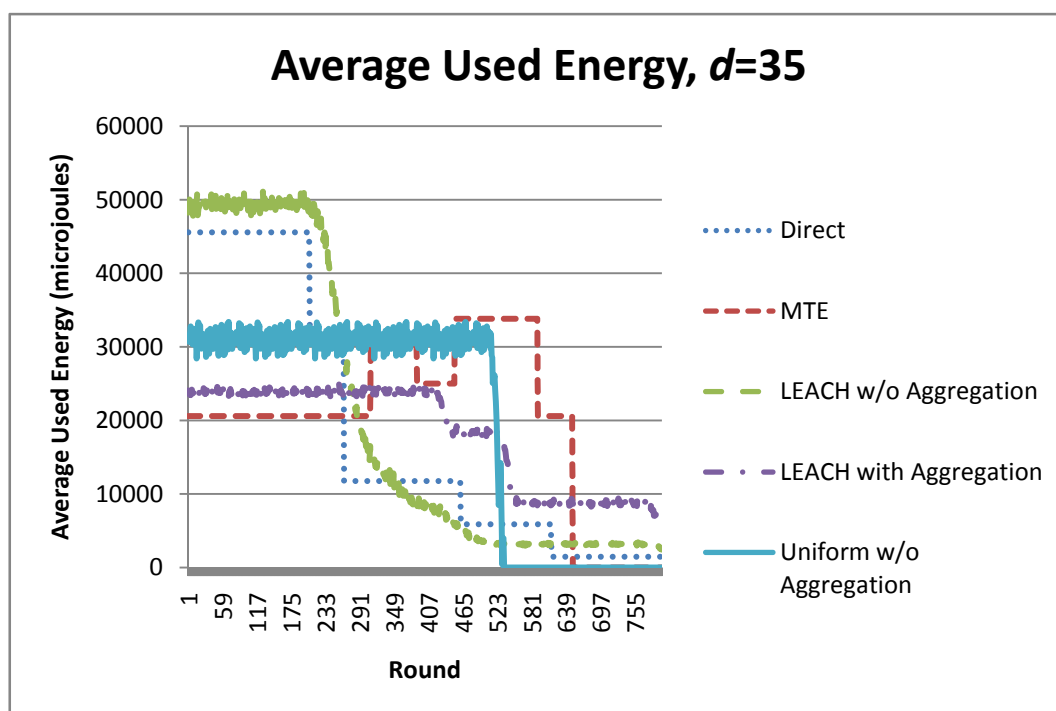
รูปที่ 4.14 พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 4.15 พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร

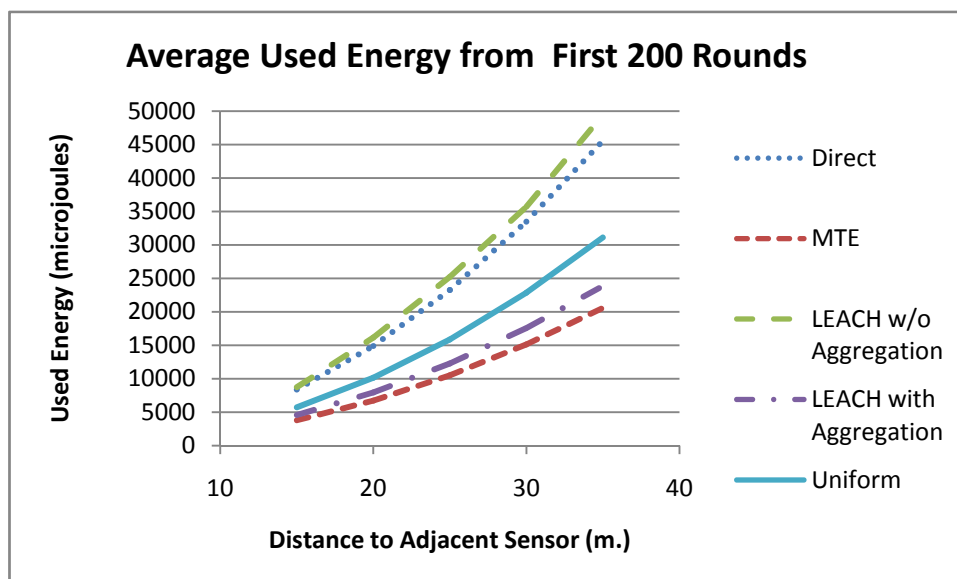


รูปที่ 4.16 พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



รูปที่ 4.17 พลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

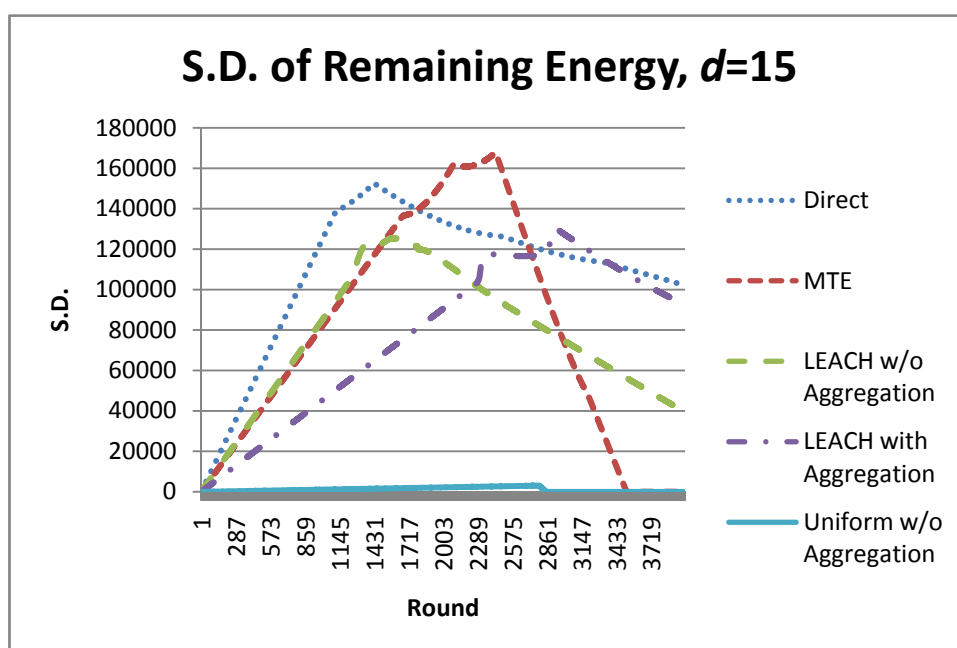
จากรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.17 เมื่อเราทำการเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ใช้ใน 200 รอบแรกซึ่งยังไม่มีการรับรู้ใดหมดพลังงาน นำมาสร้างเป็นกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 4.18



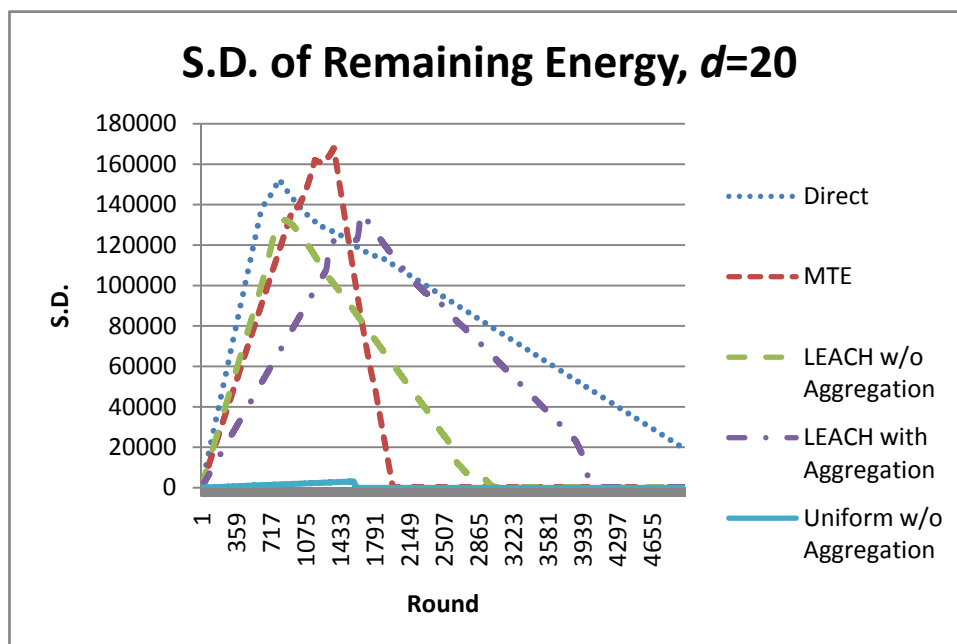
รูปที่ 4.18 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานใน 200 รอบแรกที่ระยะ d ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.18 แสดงพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานใน 200 รอบแรกที่ระยะ d ต่าง ๆ โดยแกนนอนแสดงระยะทางระหว่างตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ติดกัน แกนตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใน 200 รอบแรกของการปฏิบัติงาน พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ไร้สายในวิธีการ Uniform มีค่าน้อยกว่าวิธี Direct Transmission ประมาณ 32% และน้อยกว่าวิธี LEACH ที่ไม่มีการรวมข้อมูลประมาณ 37% แต่มีค่ามากกว่า วิธีของ Minimum Transimission Energy อยู่ประมาณ 51% และมากกว่า LEACH ที่มีการรวมข้อมูลประมาณ 30% ซึ่งหากนำการรวมข้อมูลเข้ามาใช้กับวิธีการ Uniform คาดว่าพลังงานที่ใช้ในวิธีการ Uniform จะต่ำกว่าที่แสดงในรูปที่ 4.18

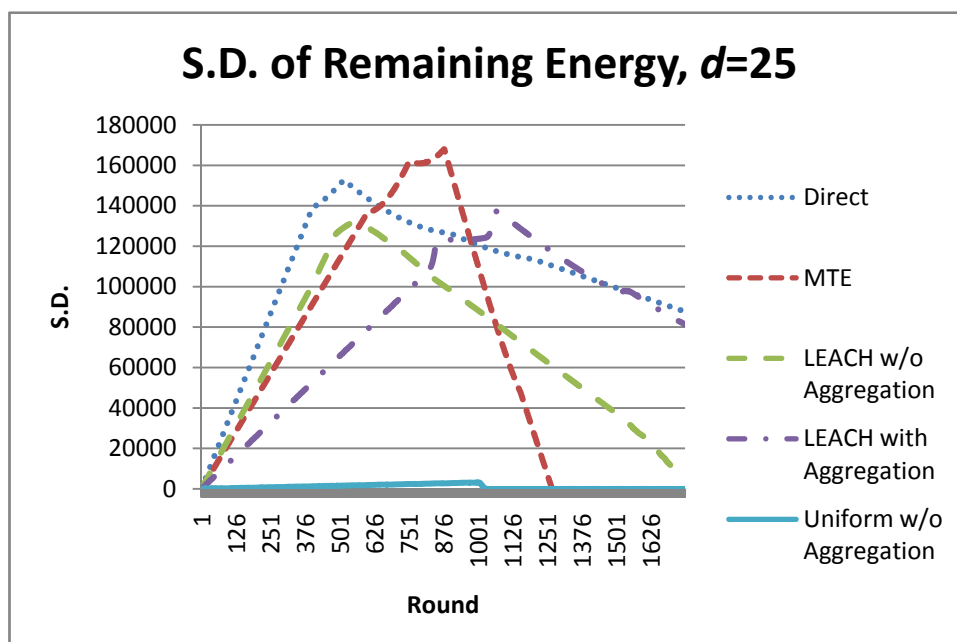
รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.23 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายในแต่ละรอบ เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร โดยแกนนอนแสดงรอบของการปฏิบัติงาน แกนตั้งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่คงเหลืออยู่ในแต่ละวิธีการ



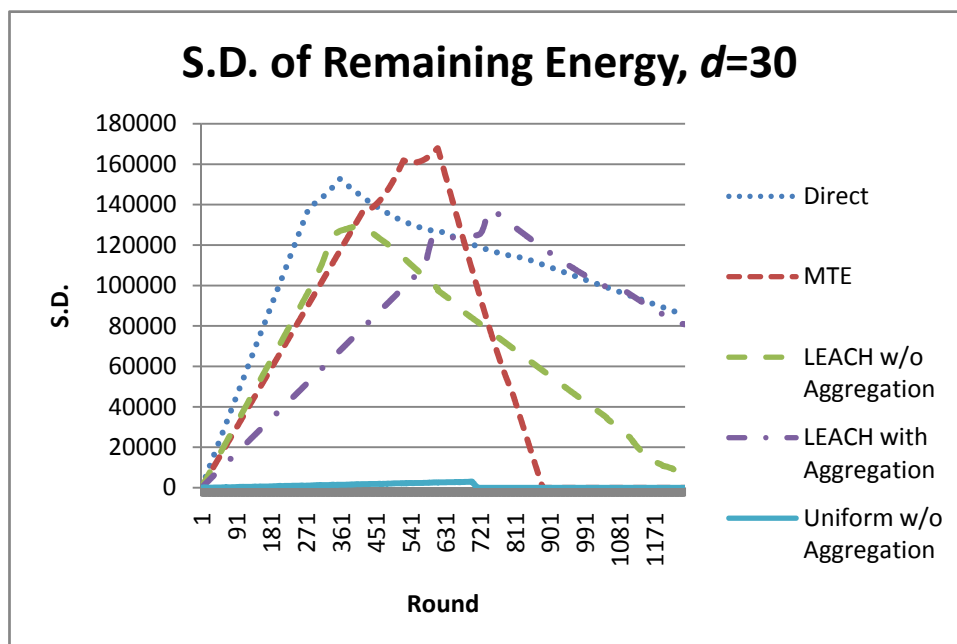
รูปที่ 4.19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



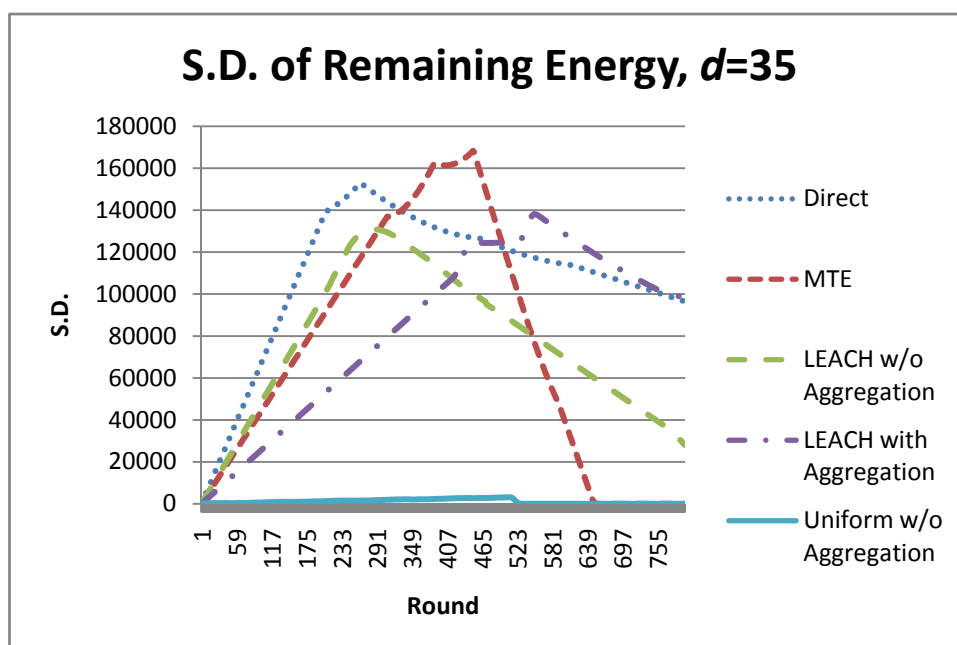
รูปที่ 4.20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 4.21 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



รูปที่ 4.22 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



รูปที่ 4.23 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.23 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายทุกตัว ในวิธีการต่าง ๆ แล้ว วิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้นำเสนอมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เนื่องจากว่าในวิธีการ Uniform ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในระบบมีพลังงานที่เหลืออยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ในทุก ๆ รอบของการทำงาน

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายอยู่บนพื้นฐานของการหาเส้นทางแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตัวรับรู้ไร้สายซึ่งเป็นสมาชิกในกลุ่มจะทำการส่งข้อมูลของตนเองให้กับหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งตัวรับรู้ไร้สายที่ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มจะส่งข้อมูลที่รวบรวมมาได้ไปให้สถานีฐาน ตัวรับรู้ไร้สายที่ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มจึงต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเป็นปริมาณมาก เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่น ๆ ในกลุ่ม เพื่อกระจายการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวในระบบให้เหลือใกล้เคียงกัน เมื่อครบคาบเวลาหนึ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายจะมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย แต่การยกเลิกกลุ่มปัจจุบันแล้วทำการสร้างกลุ่มใหม่ ก่อให้เกิดการส่งข้อมูลจำนวนมากในการติดต่อสื่อสารระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสมาชิกในกลุ่ม

เพื่อหลีกเลี่ยงการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อครบคาบเวลาโดยปกติ ซึ่งก่อให้เกิดการใช้พลังงานปริมาณมาก งานวิจัยนี้จึงเสนอให้ตัวรับรู้สมาชิกในกลุ่ม สามารถส่งข้อมูลไปยังตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ใกล้กว่า ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ตามระยะทาง ก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐานต่อไป โดยอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้นำเสนอทำให้ระดับพลังงานตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวในระบบอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน

อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อพิจารณาจำนวนรอบที่เริ่มมีตัวรับรู้ไร้สายหมดพลังงาน ในวิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ ตัวรับรู้ไร้สายจะมีอายุการใช้งานนานกว่าวิธีการ Direct Transmission ประมาณ 150% นานกว่าวิธีการ Minimum Transmission Energy ประมาณ 67% นานกว่า LEACH ที่ไม่มีการรวมข้อมูล ประมาณ 130% และนานกว่า LEACH ที่มีการรวมข้อมูล 20%

เมื่อพิจารณาจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายหมดพลังงานไปครึ่งหนึ่งของจำนวนทั้งหมด ในวิธีการ Uniform ตัวรับรู้จะมีอายุการใช้งานนานกว่าวิธีการ Direct Transmission ประมาณ 98% นานกว่าวิธีการ Minimum Transmission Energy ประมาณ 17% นานกว่า LEACH ที่ไม่มีการรวมข้อมูล ประมาณ 73% แต่สั้นกว่าอายุการใช้งานในวิธี LEACH ที่มีการรวมข้อมูล ประมาณ 5%

และจากนั้นเมื่อพิจารณาจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายหมดพลังงานไปเศษสองส่วนสามของจำนวนตัวรับรู้ทั้งหมด ในวิธีการ Uniform ตัวรับรู้จะมีอายุการใช้งานนานกว่าวิธีการ Direct Transmission ประมาณ 14% นานกว่า LEACH ที่ไม่มีการรวมข้อมูล ประมาณ 40% แต่มีอายุ

การใช้งานที่สั้นกว่าวิธีการ Minimum Transmission Energy ประมาณ 11% รวมถึงสั้นกว่าในวิธีการ LEACH ที่มีการรวมข้อมูลประมาณ 34%

จะเห็นได้ว่าแม้ว่าอายุการใช้งานโดยรวมของตัวรับรู้ไร้สายในวิธี Uniform จะยาวนานกว่าวิธีการอื่น ๆ แต่อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายบางส่วนในวิธีการอื่นมีอายุการใช้งานมากกว่าวิธีการ Uniform เนื่องจากการที่ตัวรับรู้ไร้สายในวิธีการ Uniform หมดพลังงานในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน จากการที่ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวใช้พลังงานในระดับที่ใกล้เคียงกัน เทียบกับวิธีการอื่นซึ่งตัวรับรู้มีการใช้พลังงานไม่เท่าเทียมกันทำให้ตัวรับรู้ไร้สายบางส่วนยังมีพลังงานหลงเหลืออยู่ แม้ว่าตัวรับรู้ส่วนใหญ่จะหมดพลังงานไปแล้ว

เนื่องจากตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในวิธี Uniform มีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นวิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ จึงมีความเหมาะสมในลักษณะการประยุกต์ที่ต้องการข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในระบบ ไม่สามารถขาดข้อมูลจากตัวรับรู้ตัวใดตัวหนึ่งได้ เช่น ในระบบสัญญาณเตือนอัคคีภัย หรือระบบตรวจตราเพื่อความมั่นคง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ยังมีข้อจำกัดในการทำงานคือ สามารถทำงานได้เฉพาะบนทอพอโลยีที่ตัวรับรู้ไร้สายกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนระนาบโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ไร้สาย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น วิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้นำเสนอมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า และเฉพาะเจาะจงกับการประยุกต์ใช้งานบางประเภทมากกว่าวิธีการอื่น ๆ

ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ ความสามารถในการขยายขนาดของเครือข่าย เนื่องจากการคำนวณจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อขนาดของเครือข่ายใหญ่ขึ้น จากทอพอโลยีในบทที่ 4 เมื่อระยะห่างระหว่างตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ติดกัน d มีระยะ 35 เมตร จำนวนชั้นของตัวรับรู้ N มีค่าเท่ากับ 4 ชั้น มีจำนวนตัวรับรู้ทั้งหมดรวมสถานีฐานทั้งหมด 37 โหนด จะมีพื้นที่ทำการของตัวรับรู้ไร้สายครอบคลุมพื้นที่ 19,626.3 ตารางเมตร ถ้าหากต้องการเครือข่ายที่มีจำนวนตัวรับรู้มากขึ้น เช่น เครือข่ายที่มีจำนวนตัวรับรู้ไร้สายอย่างน้อย 1,000 โหนด ในวิธีการของเราจะต้องใช้จำนวนชั้นของตัวรับรู้ N ทั้งหมดถึง 19 ชั้น เพื่อให้ได้จำนวนตัวรับรู้ไร้สาย 1,027 โหนด ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณจะมีความซับซ้อนของสมการมาก แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการ Uniform จะทำการคำนวณอัตราส่วนในครั้งแรกเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นสามารถนำอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นไปใช้งานได้โดยไม่ต้องมีการคำนวณซ้ำอีก

สิ่งหนึ่งที่งานวิจัยฉบับนี้ยังคงละไว้โดยยังมิได้นำมาใช้ในการคำนวณคือ โอกาสของการชนกัน (Collision) ของข้อมูลในช่องสัญญาณที่จะเกิดขึ้นในเครือข่าย ซึ่งความเป็นไปได้ที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลจะมีมากขึ้นเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นสูงขึ้น เป็นผลให้ตัวรับรู้ไร้สายต้องมีการส่งข้อมูลที่เกิดการชนกันซ้ำ รวมถึงยังมิได้นำค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในชั้นดาตาลิงก์ อันได้แก่ ค่าใช้จ่ายของ TDMA CSMA และ MACAW เข้ามาใช้ในการจำลองเครือข่าย ปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย

แบบจำลองพลังงานในงานวิจัยนี้ ได้นำเฉพาะพลังงานในส่วนของการขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ โดยมีได้นำพลังงานในส่วนที่ใช้เลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของตัวรับรู้ไร้สายทั้งในภาคส่งและภาครับเข้ามาใช้ในการคำนวณ เป็นอีกจุดหนึ่งที่ยังต้องมีการพัฒนาให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

นอกจากการปรับปรุงแบบจำลองพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นแล้ว ในงานวิจัยต่อไปจะต้องหาวิธีการที่ทำให้สามารถกระจายพลังงานที่เหลืออยู่ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ที่มีการวางตัวรับรู้ไร้สายแบบสุ่มลงบนระนาบ รวมถึงต้องพิจารณากรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายมีการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมอีกด้วย

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สาย แนวความคิดที่จะนำการรวมข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวรับเข้ามาจากตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่น ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้ เป็นทางเลือกที่ทำให้ปริมาณข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายต้องทำการส่งต่อลดลงได้ และจะช่วยลดการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายลง ส่งผลให้ตัวรับรู้ไร้สายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Meng T., and Volkan R. “Distributed Network Protocols for Wireless Communications,” **Proc. The IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2010)**, Vol. 4. May 1998. pp. 600 - 603.
- [2] Levis P., Madden S., et.al. “Tiny OS: An Operating System for Wireless Sensor Networks,” **Ambient Intelligence**. New York: Springer-Verlag. 2005. pp. 115-148,
- [3] Madden S. R., Franklin M. J., Hellerstein J. M., and Hong W. “Tiny DB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks,” **ACM Trans. on Database Systems**, Vol. 30, Issue. 1, March 2005. pp. 122-173
- [4] Intanagonwiwat C., Govindan R., and Estrin D. “Directed Diffusion: A Scalable Robust Communication Paradigm for Sensor Networks,” **Proc. of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks. (MobiCOM 2000)**, Boston, Massachusetts, USA, August 2000. pp. 56 - 67.
- [5] Braginsky D., and Estrin D. “Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks,” **Proc. of the Second ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA’02)**, Atlanta, Georgia, September 2002. pp. 22-30.
- [6] Ye W., and Heidemann J. “Ultra-low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling,” **Proc. of Forth International Conferences on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys’06)**, Boulder, Colorado, USA, October 31 - November 3, 2006. pp. 321-334.
- [7] Heinzelman W., Chandrakasan A., and Balakrishnan H. “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks,” **IEEE Trans. on Wireless Communications**, Vol. 1, No. 4, October 2002. pp. 660-670.
- [8] Bhaskar Krishnamachari. **Networking Wireless Sensors**. Cambridge : Cambridge University Press. January 2006.
- [9] Cerpa A., and Estrin D. “ASCENT: Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies,” **IEEE Trans. on Mobile Computing**, Vol. 3, No. 3, 2004. pp. 272-285.
- [10] Heinzelman W. R., Chandrakasan A., and Balakrishnan H. “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks,” **Proc. of the Hawaii International Conference on System Sciences**, Maui, Hawaii, USA, January 2000. pp. 3005-3014.

- [11] Rogers A., David E., and Jennings N. R. "Self-Organized Routing for Wireless Microsensor Networks," **IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part A**, Vol. 35, No. 3, May 2005. pp. 349 - 359.
- [12] Cui S., Goldsmith A. J., and Bahai A. "Energy Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks," **IEEE Journal on Selected Areas in Communication**, Vol. 22, No. 6, August 2004. pp. 1089-1098.
- [13] Dutta P., Culler D., and Shenker S. "Procrastination Might Lead to a Longer and More Useful Life," **Proc. of Sixth Workshop on Hot Topics in Networks (Hotnets-VI)**, Atlanta, Georgia, USA, November 2007. pp. 1-7.
- [14] Karn P. "MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio," **Proc. of the Ninth ARRL Computer Networking Conference**, London, Ontario, Canada, September 1990. pp. 134-140.
- [15] Bharghavan V., et al. "MACAW: A Medium Access Protocol for Wireless LAN's," **Proc. of ACM SIGCOMM Conference (SIGCOMM '94)**, London, UK, August 1994. pp. 212-225.
- [16] Chakraborty G., "A Note on Cluster Size of WSN," **Proc. of the 4th International Conference on Computers & Devices for Communication (CODEC 2009)**, Kolkata, India, December 2009. pp. 1-6.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ศราวุธ ฐนสกุลวัฒนา, โชติพัชร ภรณ์วลัย และ Goutam Chakraborty, "การยืดอายุของ
เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยกระจายการใช้พลังงานอย่างเท่าเทียม", In the Proceedings of the
3rd National Conference on Information Technology: NCIT2010, Bangkok, Thailand,
October 2010, pp. 28-29.

IEEE
THAILAND SECTION



The 3rd National Conference
on Information Technology: NCIT 2010

"IT Innovation for Global Awareness"

28-29 October 2010, Bangkok, Thailand



ISBN : 216846-565468-41656

<http://www.ncit.in.th>

Sponsored by



การยืดอายุของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยกระจายการใช้พลังงานอย่างเท่าเทียม

ศรายุทธ ธเนศสกุลวัฒนา¹ โชติพัชร ภรณ์วลัย¹ และ Goutam Chakraborty²

¹คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

²Department of Software and Information Science, Iwate Prefectural University, Japan

Emails: sarayoot@gmail.com, chotipat@it.kmitl.ac.th, goutam@soft.iwate-pu.ac.jp

บทคัดย่อ

เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงาน (Energy-Aware Routing Protocol) บนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless sensor networks) โดยส่วนใหญ่ที่พบ จะเลือกใช้การแบ่งเครือข่ายออกเป็นกลุ่ม (Cluster) โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) ซึ่งเป็นตัวรับรู้ (Sensor) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้อื่น ๆ ภายในกลุ่ม แล้วส่งไปยังสถานีฐาน (Base Station) ถึงกระนั้นก็ตามจะยังคงมีตัวรับรู้บางตัวที่มีการใช้พลังงานมากกว่าตัวรับรู้อื่น ๆ เนื่องจากระยะทางในการส่งคลื่นวิทยุที่ห่างไกล หรือจำนวนข้อมูลที่ต้องส่งต่อ (Relay) เป็นจำนวนมาก การปรับกลุ่มของตัวรับรู้และหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลา จะทำให้พลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในกลุ่มใกล้เคียงกัน แต่การปรับกลุ่มของตัวรับรู้จะมีค่าใช้จ่ายอื่น (Overhead) และต้องสูญเสียพลังงานในการติดต่อสื่อสารเพื่อการปรับเปลี่ยนกลุ่มทุกครั้ง ในงานวิจัยนี้เราจึงได้นำเสนอการใช้ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) เข้ามาช่วยในการทำให้การกระจายตัวของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีระดับใกล้เคียงกัน โดยการคำนวณอัตราส่วนของข้อมูลที่จะต้องส่งในตัวรับรู้แต่ละตัวที่จะถูกส่งออกไปยังตัวรับรู้อื่นก่อนจะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐาน ทำให้ระดับพลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวอยู่ในระดับใกล้เคียงกันโดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่ม

คำสำคัญ— เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย; การใช้พลังงานของตัวรับรู้; ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม

1. บทนำ

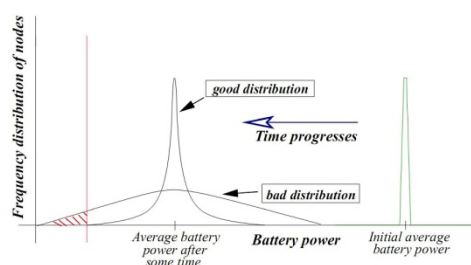
เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ประกอบด้วย ตัวรับรู้พร้อมตัวรับส่ง เชื่อมต่อกันด้วยคลื่นวิทยุ เพื่อตรวจวัดข้อมูลต่าง ๆ และส่งข้อมูลที่ได้กลับไปให้สถานีฐาน นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทำให้ตัวรับรู้ไร้สายมีราคาที่ถูกลง มีความน่าเชื่อถือ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นเป้าหมายหลักของการวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งมีหลากหลายมุมมองตั้งแต่ระบบปฏิบัติการ [2] การได้มาของข้อมูล [3] การแพร่กระจายข้อมูล [4] กระบวนการสอบถามข้อมูล [5] การควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง [6] ข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสาร [7] [8] [10] และ [11] ไปจนถึงทอพอโลยีของเครือข่าย [9]

ซึ่งงานวิจัยของเราฉบับนี้มุ่งเน้นไปในด้านข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสารโดยตระหนักถึงการใช้พลังงาน

การใช้งานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ตามจุดมุ่งหมายของข้อมูลที่ตัวรับรู้ตรวจสอบคือ 1) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวตรวจจับได้มีความสำคัญสูง ตัวอย่างเช่น ในระบบสัญญาณเตือนอัคคีภัย ก็ต้องตรวจตราเพื่อความมั่นคง ระบบตรวจสอบสถานะของโครงสร้างสะพานหรืออาคาร 2) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวรวบรวมมาได้ สามารถใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้ตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียงทดแทนได้ เนื่องจากสิ่งที่เราต้องการคือข้อมูลที่ถูกรวบรวมให้เห็นภาพรวมของบริเวณนั้น ๆ การใช้งานลักษณะนี้มักใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเช่น การตรวจจับอุณหภูมิ ความชื้นของแสง

จากการใช้งานด้านบนทั้งสองลักษณะ การยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้งานในลักษณะที่ 1 ซึ่งข้อมูลจากตัวรับรู้แต่ละตัว ไม่สามารถใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้ที่อยู่รอบข้างมาทดแทนได้



รูปที่ 1. การกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้เทียบกับจำนวนตัวรับรู้

จากรูปที่ 1 แสดงการกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ ในสถานะเริ่มต้นตัวรับรู้ทุกตัว มีพลังงานสูงและใกล้เคียงกัน ดังกราฟในรูปที่ 1 ด้านขวามือ เมื่อเวลาผ่านไป พลังงานของตัวรับรู้จะลดลงเรื่อย ๆ จากขวามาซ้าย การกระจายตัวของพลังงานที่เหลือของตัวรับรู้ที่คืนนั้นควรจะใกล้เคียงกัน กราฟของพลังงานในตัวรับรู้ที่มีการกระจายตัวที่ดี (good distribution) คือกราฟที่มีฐานแคบ พลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวมีระดับใกล้เคียงกัน สำหรับการกระจายตัวของพลังงานที่ไม่ดี (bad distribution) เป็นกราฟที่มีฐานกว้าง พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ที่มีพลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุดมีค่าแตกต่างกันมาก ตัวรับรู้ที่มีพลังงานน้อยกว่าค่าที่กำหนด

ไว้ (Threshold) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกแรงในรูปที่ 1 จะไม่สามารถทำงานต่อได้ ทำให้ข้อมูลที่ควรจะได้รับจากตัวรับนั้นขาดหายไปจากระบบ

เป้าหมายของเกณฑ์วิธีคิดต่อสื่อสารในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่ดีควรจะเป็น (1) ลดการใช้พลังงานโดยรวมของตัวรับรู้ และ (2) ลดการกระจายของระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ในเครือข่ายให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ซึ่งงานวิจัยของเรานี้จะเน้นไปใน 2 เป้าหมายนี้

ตามสมมติฐานของงานวิจัยนี้ ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวในระบบสามารถจะปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการสื่อสารได้ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล จะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของระยะทาง ในวิธี Direct Transmission (Direct) ตัวรับรู้ทุกตัวทำการส่งข้อมูลของตนเองไปยังสถานีฐานโดยตรง ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมาก ๆ หมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ และสำหรับวิธี Minimum Transmission Energy (MTE) [1] [7] ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งให้น้อยที่สุด โดยส่งต่อข้อมูลผ่านตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้ตนเองมากที่สุดและใกล้สถานีฐานไปเรื่อย ๆ ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องส่งต่อข้อมูลเป็นจำนวนมาก และหมดพลังงานไปก่อนตัวรับรู้อื่น

เพื่อแก้ปัญหาของวิธี Direct และ MTE วิธี LEACH [7] [10] จะแบ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายออกเป็นกลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่มทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้สมาชิกส่งต่อไปให้สถานีฐาน การทำงานในลักษณะนี้ตัวรับรู้จะต้องใช้พลังงานมากคือหัวหน้ากลุ่ม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มและหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานออกไปยังตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ซึ่งการปรับเปลี่ยนกลุ่มจะต้องมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสมาชิกในกลุ่มเพื่อยกเลิกกลุ่มเดิม และทำการสร้างกลุ่มใหม่ หากมีการเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้งพลังงานที่จะต้องเสียไปกับการนี้ก็จะมากตามไปด้วย [13]

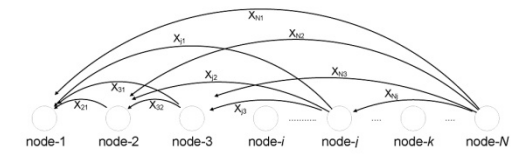
งานวิจัยของเราได้เห็นความจำเป็น ณ จุดนี้จึงพยายามทำให้ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน โดยไม่จำเป็นจะต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้ง ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะส่งต่อข้อมูลให้กับตัวรับรู้อื่น ๆ ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า การส่งข้อมูลของตัวรับรู้แต่ละตัวจะส่งข้อมูลโดยใช้หลายระดับพลังงานไปยังตัวกลางหลาย ๆ ตัว ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พลังงานที่ตัวรับรู้ทุกตัวใช้ในกลุ่มนี้อาจใกล้เคียงกัน เราจะนำปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) เข้ามาช่วยในการหาค่าของอัตราส่วนดังกล่าว

งานวิจัยนี้เป็นงานที่หนึ่งในกลุ่มนักวิจัยของเราได้วิจัยมาก่อนหน้านี้ [14] โดยดัดแปลงเพื่อแก้ปัญหาบนระนาบ 2 มิติ พร้อมสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบเปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่น ๆ เพื่อดูพลังงานที่ตัวรับรู้ในเครือข่ายใช้รวมถึงการกระจายตัวของค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ในระบบ

2. เป้าหมายและเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสม

สมมติแบบจำลองมีตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมด N โหนด (Node) วางห่างกันด้วยระยะ d โดยตัวรับรู้แต่ละโหนดมีการสร้างกลุ่มข้อมูลจำนวน m แพ็คเก็ต จำนวนข้อมูลที่แต่ละโหนดส่งเป็นผลรวมของข้อมูลที่ตัวเองสร้างขึ้นกับข้อมูลที่โหนดรับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไป โดยจะทำการส่งข้อมูลผ่าน

คลื่นวิทยุไปยังโหนดที่ 1 (node-1) และโหนดตัวกลางด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามระยะทาง ดังรูปในที่ 2 การแก้ปัญหาการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะไม่นำค่าพลังงานที่ใช้เลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ทั้งในขณะรับและส่งข้อมูล เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ



รูปที่ 2. แบบจำลองแสดงอัตราส่วนของการส่งข้อมูลของแต่ละโหนด

ถ้าให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่โหนด j จะต้องส่งมีจำนวน R_j โดยรวมข้อมูลที่โหนด j สร้างกับข้อมูลที่โหนด j รับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไปให้ k ซึ่งเป็นโหนดใด ๆ ที่อยู่ทางอยู่ห่างจากสถานีฐานมากกว่าโหนด j ซึ่งโหนด k จะส่งข้อมูลมาให้โหนด j ด้วยอัตราส่วน x_{jk} จากข้อมูลทั้งหมดของโหนด k ซึ่งมีจำนวนข้อมูลเป็น R_k เราเขียนได้ว่า

$$R_j = m + \sum_{k=j+1}^N R_k x_{jk} \quad (1)$$

$$= m \times [1 + \{x_{(j+1)j}\} + \{x_{(j+2)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+2)j}\} + \{x_{(j+3)(j+2)}x_{(j+2)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+3)(j+2)}x_{(j+2)j} + x_{(j+3)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+3)j}\} + \dots] \quad (2)$$

ถ้าให้พลังงานทั้งหมดที่โหนด j ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุมีค่าเป็น C_j และ C_j มีการแปรผันโดยตรงกับระยะทางที่ส่งยกกำลัง v โดย $2 \leq v \leq 4$ ถ้าให้ $\mathcal{E}_{amp}$ เป็นค่าคงที่ในการขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็น Joule/bit/m² และ p_{ks} เป็นขนาดของแพ็คเก็ต ในหน่วยบิต จะเขียนสมการของพลังงานที่โหนด j ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ว่า [7]

$$C_j = \mathcal{E}_{amp} \times R_j \times p_{ks} \times \left[\sum_{i=j-1}^1 x_{ji} \{(j-i) \times d\}^v \right] \quad (3)$$

ขอบเขตปัญหาของเราคือการหาค่า x_{ji} ทั้งหมด เมื่อ $i < j$ ที่ทำให้ค่า C_j มีค่าน้อยที่สุดและสอดคล้องตามสมการดังต่อไปนี้

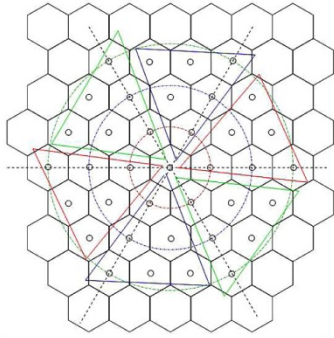
$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (4)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1 \quad (6)$$

สมการที่ (4) แสดงเงื่อนไขว่าค่าพลังงานที่แต่ละโหนดใช้จะต้องเท่าเทียมกัน สมการที่ (5) กำหนดขอบเขตบนและล่างของ x_{ji} อยู่ระหว่าง 0 และ 1 สมการที่ (6) ระบุเงื่อนไขว่าผลรวมอัตราส่วนของแต่ละโหนดจะต้องรวมกันได้เท่ากับ 1 เสมอ การแก้ปัญหานี้ จะต้องหาค่าของ x_{ji} แยกเป็นกรณีตามค่าของ N

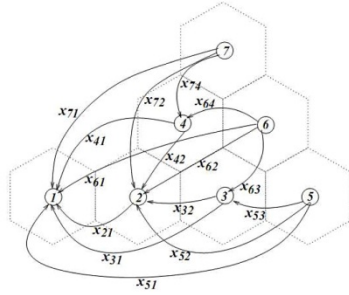
3. การคำนวณในกรณีที่โหนดกระจายบนระนาบ



รูปที่ 3. ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

ในงานวิจัยนี้ที่สมมติให้โหนดตัวรับรู้ไร้สายถูกจัดวางอยู่บนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ โดยกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายมีรัศมีเท่ากับ 3 ซีโอป ดังในรูปที่ 3

ถ้าหากเราแบ่งกลุ่มของตัวรับรู้นี้ออกเป็น 6 ส่วนเท่า ๆ กัน เราจะได้ส่วนตัดของกลุ่มตัวรับรู้ที่มีลักษณะเดียวกันดังในรูปที่ 4 จำนวน 6 ส่วน ซึ่งเราสามารถจะทำการคำนวณค่าต่าง ๆ ของส่วนตัดเพียงส่วนเดียวแล้วนำค่าที่ได้ไปใช้กับส่วนตัดส่วนอื่น ๆ ได้



รูปที่ 4. ส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงส่วนหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้

จากรูปที่ 4 แสดงส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงส่วนหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้ เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 3 เรากำหนดให้ x_{ji} เป็นอัตราส่วนของข้อมูลที่ส่งจากโหนด j ไปยังโหนด i โดยอัตราส่วนทั้งหมดของ x_{ji} จะถูกแสดงในเมทริกซ์ X ด้านล่าง ซึ่งสมการของเมทริกซ์จะหมายถึงโหนดที่รับข้อมูลเริ่มต้นที่ 1 ไปจนถึง 7 ส่วนแถวของเมทริกซ์หมายถึงโหนดที่เป็นฝ่ายส่งข้อมูลเริ่มต้นด้วยโหนดที่ 2

$$X_{ji} = \begin{bmatrix} x_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{31} & x_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{41} & x_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} & x_{64} & 0 & 0 & 0 \\ x_{71} & x_{72} & 0 & x_{74} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{node}-2 \\ \text{node}-3 \\ \text{node}-4 \\ \text{node}-5 \\ \text{node}-6 \\ \text{node}-7 \end{matrix}$$

$$\text{โดย } x_{ji} = \frac{\text{packets transmitted from node-}j \text{ to node-}i}{\text{total packets transmitted from node-}i}$$

ระยะห่างของตัวรับรู้แต่ละโหนดในรูปที่ 4 จะแสดงได้โดยเมทริกซ์ D ด้านล่าง เมื่อหน่วยข้อมูล d_{ji} เป็นระยะทางจากโหนด j ไปยังโหนด i ค่า "NA" ในตารางเป็นระยะทางที่เราไม่สนใจเนื่องจากไม่มีการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุระหว่างโหนดนั้น

$$D = \begin{bmatrix} NA & NA & NA & NA & NA & NA & NA \\ d & NA & NA & NA & NA & NA & NA \\ 2d & d & NA & NA & NA & NA & NA \\ \sqrt{3}d & d & NA & NA & NA & NA & NA \\ 3d & 2d & d & NA & NA & NA & NA \\ \sqrt{7}d & \sqrt{3}d & d & d & NA & NA & NA \\ \sqrt{7}d & 2d & NA & d & NA & NA & NA \end{bmatrix}$$

เช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้านี้ เรากำหนดให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งโดยโหนด j มีจำนวนเป็น R_j โดย R_j เป็นผลรวมของข้อมูลที่โหนด j สร้างขึ้น (m) กับข้อมูลที่โหนด j รับจากโหนดอื่น ดังนั้น

$$R_7 = R_6 = R_5 = m \quad (7)$$

$$R_4 = m + \sum_{i=5,6,7} R_i \cdot x_{i4} \quad (8)$$

$$R_3 = m + \sum_{i=5,6,7} R_i \cdot x_{i3} \quad (9)$$

$$R_2 = m + \sum_{i=3,4} R_i \cdot x_{i2} + \sum_{i=5,6,7} R_i \cdot x_{i2} \quad (10)$$

จากระยะทางในเมทริกซ์ D เราสามารถคำนวณหาพลังงานที่แต่ละโหนดจะใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ ซึ่งในที่นี้เราจะไม่นำพลังงานในการเลี้ยงวงจรของของตัวรับรู้ในขณะรับและส่งข้อมูลมาคำนวณด้วย เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ เรากำหนดให้พลังงานที่ใช้โดยโหนด j มีค่าเป็น C_j และพลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดใช้มีค่าเท่าเทียมกัน โดยค่าที่เราต้องการคือชุดของอัตราส่วนที่ทำให้พลังงานที่ใช้ในแต่ละโหนดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเงื่อนไขของสมการดังสมการที่ (11) ถึง (13) ด้านล่าง

$$\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1 \quad (11)$$

$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (12)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (13)$$

จากสมการที่ (11) เราจะแทนค่า $x_{7i} = x_{i3} = \alpha$ และแทนค่า $x_{6i} = x_{i3} = \beta$ เพื่อแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ได้ชุดของสมการดังนี้

$$x_{74} + x_{72} + x_{71} = \alpha + x_{72} + x_{71} = 1 \quad (14)$$

$$x_{64} + x_{63} + x_{62} + x_{61} = 2\beta + x_{62} + x_{61} = 1 \quad (15)$$

$$x_{53} + x_{52} + x_{51} = \alpha + x_{52} + x_{51} = 1 \quad (16)$$

$$x_{42} + x_{41} = 1 \quad (17)$$

$$x_{32} + x_{31} = 1 \quad (18)$$

$$x_{21} = 1 \quad (19)$$

เราจะมี x_{ji} ซึ่งยังไม่ทราบค่าทั้งหมด 10 ค่าและมีสมการเชิงเส้นทั้งหมด 5 สมการ นำสมการที่ (7) ถึง (10) มาเขียนใหม่โดยแทนค่า $\lambda=(1+\alpha+\beta)$ ลงไปเพื่อลดรูปสมการ เราจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$R_7 = R_6 = R_5 = m \quad (20)$$

$$R_4 = \lambda m \quad (21)$$

$$R_3 = \lambda m \quad (22)$$

$$R_2 = m(1 + x_{72} + x_{62} + x_{53} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32}) \quad (23)$$

ใช้ระยะทางจากเมทริกซ์ D และอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุมาสร้างสมการพลังงานที่ใช้ของตัวรับแต่ละ โหนด

$$C_7 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{72} + 7x_{71} + \alpha) \quad (24)$$

$$C_6 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (3x_{62} + 7x_{61} + 2\beta) \quad (25)$$

$$C_5 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{52} + 9x_{51} + \alpha) \quad (26)$$

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (\lambda x_{42} + 3\lambda x_{41}) \quad (27)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (\lambda x_{32} + 4\lambda x_{31}) \quad (28)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (x_{72} + x_{62} + x_{52} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32} + 1) \quad (29)$$

จากสมการ (24) ถึง (29) นำสมการ (24) มาจับคู่กับสมการ (25) ถึง (29) เราจะได้สมการเชิงเส้นอีก 5 สมการคือ

$$4x_{72} + 7x_{71} - 3x_{62} - 7x_{61} = 2\beta - \alpha \quad (30)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - 4x_{52} - 9x_{51} = 0 \quad (31)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - \lambda x_{42} - 3\lambda x_{41} = -\alpha \quad (32)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - \lambda x_{32} - 4\lambda x_{31} = -\alpha \quad (33)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - x_{62} - x_{52} - \lambda x_{42} - \lambda x_{32} = 1 - \alpha \quad (34)$$

เราจะได้สมการเชิงเส้นทั้งหมด 10 ตัวแปร คือสมการ (24) ถึง (28) และสมการ (30) ถึง (34) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับไร้สายแต่ละ โหนด สิ่งที่เราต้องการหาคือค่าของ

$$X = [x_{72} \ x_{71} \ x_{62} \ x_{61} \ x_{52} \ x_{51} \ x_{42} \ x_{41} \ x_{32} \ x_{31}]$$

โดยเราต้องการค่าที่ทำให้พลังงานที่ตัวรับแต่ละตัวใช้มีค่าน้อยที่สุด นำสมการ (24) ถึง (28) และสมการ (30) ถึง (34) มาเขียนใหม่ในรูปของเมทริกซ์ $A_{eq} \cdot X = b_{eq}$ ได้ดังนี้

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 7 & -3 & -7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & -4 & -9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & -3\lambda & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & -4\lambda \\ 3 & 7 & -1 & 0 & -1 & 0 & -\lambda & 0 & -\lambda & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 - 2\beta \\ 1 - \alpha \\ 1 \\ 1 \\ 2\beta - \alpha \\ 0 \\ -\alpha \\ -\alpha \\ 1 - \alpha \end{bmatrix}$$

เนื่องจากเรากำหนดค่าของ $x_{74}=x_{53}=\alpha$ และ $x_{74}=x_{53}=\beta$ ซึ่งมีขอบเขตล่างที่ 0 และขอบเขตบนที่ 1 เราจะทำการแทนค่าของ α และ β ตั้งแต่ค่า 0 จนถึง 1 โดยทำการเพิ่มค่าของ α และ β ขึ้นทีละ 0.01 แล้วทำการแก้สมการเชิงเส้นด้านบน

เราจะได้คำตอบของสมการเชิงเส้นที่เป็นไปได้ในบางช่วงของ $0.11 \leq \alpha \leq 0.57$ และ $0.01 \leq \beta \leq 0.28$ โดยจะมีค่าพลังงานน้อยที่สุดเมื่อ $\alpha = 0.57$ และ $\beta = 0.28$ ซึ่งจะได้ค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับแต่ละโหนดดังนี้

$$x_{74}=0.57; x_{72}=0.0172; x_{71}=0.4128; x_{64}=0.28; x_{63}=0.28; x_{62}=0.0279;$$

$$x_{61}=0.4121; x_{53}=0.57; x_{52}=0.1823; x_{51}=0.2477; x_{42}=0.5463; x_{41}=0.4537;$$

$$x_{32}=0.6976; x_{31}=0.3024; x_{21}=1$$

4. การทดลองและการประเมินผล

จากหัวข้อก่อนหน้าเราได้ค่า x_{ji} ที่ทำให้พลังงานที่ใช้ของตัวรับแต่ละตัวเท่าเทียมกัน เราจะนำค่าเหล่านั้นมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB สร้างตามทอพอโลยีในรูปที่ 4 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพลังงาน เปรียบเทียบวิธีการของเรา (Uniform) กับเกณฑ์วิธี LEACH [7] และ Direct Transmission โดยทำการเฉลี่ยผลที่ได้จากการทดลอง 100 ครั้ง จากกลุ่มของตัวรับในรูปที่ 3 เราจะให้หัวหน้ากลุ่ม (ตัวรับโหนดที่ 1 ในรูปที่ 4) ทำหน้าที่เป็นสถานีฐานของเครือข่าย ในการทดลองมีค่าตัวแปรเสริมดังต่อไปนี้

E_j – พลังงานเริ่มต้นของตัวรับแต่ละ โหนด (0.5 J)

d – ระยะห่างระหว่าง 2 โหนดที่อยู่ติดกัน (10-35 m)

m – จำนวนแพ็คเกจที่ตัวรับสร้างในแต่ละรอบ (1 packet/round)

k – Desired percentage of cluster head สำหรับ LEACH (16.66%)

n – จำนวนโหนดสมาชิกในกลุ่ม, $n=36$

E_d – พลังงานที่ถือว่าตัวรับไม่สามารถทำงานต่อได้ (0.05 J)

$\mathcal{E}_{amp}$ – ค่าคงที่สำหรับการขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ (100 pJ/bit/m²)

pks – ขนาดของแพ็คเกจ (2000 bits)

จากตารางที่ 1 เปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวรับในแต่ละเกณฑ์วิธี วิเคราะห์ที่ค่า $d=15$ จะเห็นว่าวิธี Direct Transmission จะมีตัวรับเริ่มหมดพลังงานในรอบที่ 1236 สำหรับ LEACH ตัวรับจะเริ่มหมดพลังงานในรอบที่ 1832 และท้ายสุดวิธีการของเรา Uniform ตัวรับจะเริ่มหมดพลังงานในรอบที่ 2794

เปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวรับในแต่ละเกณฑ์วิธี จะเห็นได้ว่าเกณฑ์วิธีแบบ Direct Transmission จะมีตัวรับที่หมดพลังงานก่อนอย่าง

รวดเร็ว จากนั้นก็จะเป็นเกณฑ์ LEACH และสุดท้ายคืองานของเราที่จะเริ่มมีตัวรับรู้หมดพลังงานช้าที่สุดจากการเฉลี่ยค่าพลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดใช้อย่างสม่ำเสมอ

ในการทดลองนี้เรายังไม่ได้รวมพลังงานที่ LEACH จะต้องใช้ในการปรับเปลี่ยนกลุ่มเข้าไปในสมการ ซึ่งหากเพิ่มค่าพลังงานในส่วนนี้เข้าไป จะทำให้จำนวนรอบในวิธี LEACH มีค่าน้อยกว่าที่ถูกแสดงในตารางที่ 1

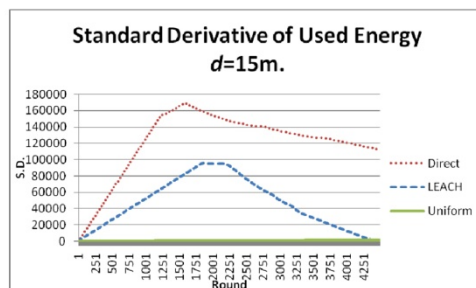
ตาราง 1. อายุการใช้งานของตัวรับรู้ที่ค่า d แตกต่างกัน

d (m)	Protocol	Round that 1st node die	Round that 1/2 of nodes die
10	Direct	2780	3573
	LEACH	4039	4907
	Uniform	6284	6395
15	Direct	1236	1589
	LEACH	1832	2326
	Uniform	2794	2844
20	Direct	696	894
	LEACH	1034	1326
	Uniform	1571	1601
25	Direct	446	573
	LEACH	661	870
	Uniform	1007	1025
30	Direct	310	398
	LEACH	457	606
	Uniform	700	713
35	Direct	228	293
	LEACH	338	457
	Uniform	513	524

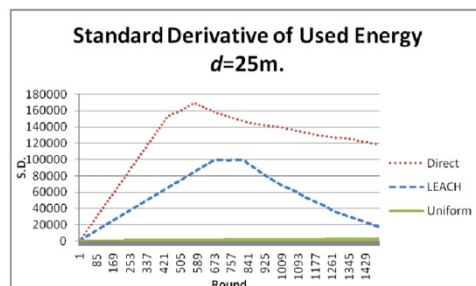
จากรูปที่ 5 และ 7 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อระยะ d มีค่าเท่ากับ 15 25 และ 35 เมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในงานของเรามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีของ LEACH ตามเป็นลำดับที่ 2 และสุดท้ายคือเกณฑ์วิธี Direct Transmission ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงมาก แสดงให้เห็นว่าวิธีการของเรามีการกระจายพลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในแต่ละรอบใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับ LEACH และ Direct Transmission

จากรูปที่ 8 แสดงการใช้พลังงานรวมในเครือข่าย กราฟเหล่านี้ได้จากค่าผลรวมของพลังงานที่ตัวรับรู้ใช้ไปทั้งหมดใน 200 รอบแรก นำมาหาค่าเฉลี่ยต่อรอบ จากตาราง 2 แสดงอายุการใช้งานของตัวรับรู้ จะเห็นว่าใน 200 รอบแรกของการจำลองแบบ เมื่อ d อยู่ระหว่าง 10 ถึง 35 ยังไม่มีตัวรับรู้ตัวใดหมดพลังงาน จากกราฟในรูปที่ 8 กราฟของ Direct Transmission อยู่บนสุด แสดงถึงการที่วิธี Direct Transmission ใช้พลังงานในแต่ละรอบมากที่สุด เส้นต่ำลงมาคือกราฟของ LEACH และกราฟเส้นล่างสุดคือ Uniform งานของเรา แสดงให้เห็นว่างานของเราใช้พลังงานน้อยกว่าในวิธี LEACH และในการทดลองนี้สำหรับ LEACH เรายังไม่ได้รวมพลังงานที่

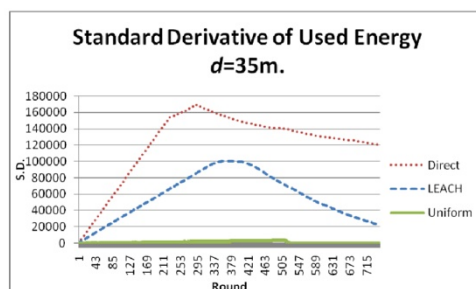
ต้องใช้ในการปรับเปลี่ยนกลุ่มเข้าไปซึ่งหากรวมค่าพลังงานดังกล่าวเข้าไป ด้วยระยะห่างระหว่างกราฟของ LEACH และวิธีการของเราก็น่าจะมีมากกว่าค่าที่แสดงในรูปที่ 8



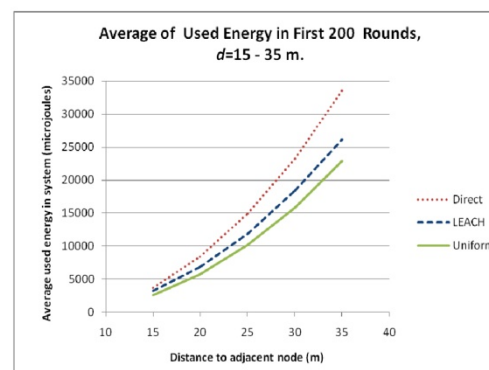
รูปที่ 5. กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อ $d=15$



รูปที่ 6. กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อ $d=25$



รูปที่ 7. กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อ $d=35$



รูปที่ 8. กราฟแสดงการใช้พลังงานรวมในเครือข่ายเฉลี่ยจาก 200 รอบแรก

5. สรุปผล

ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายอยู่บนพื้นฐานของการหาเส้นทางแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตัวรับรู้แต่ละโหนดในกลุ่มจะทำการส่งข้อมูลของตนเองให้กับหัวหน้ากลุ่ม แม้ระยะทางในกลุ่มจะไม่ห่างไกลมากนัก แต่ตัวรับรู้ที่ทำหน้าเป็นหัวหน้ากลุ่มก็จะต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเป็นปริมาณมาก เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ในกลุ่ม เพื่อเฉลี่ยพลังงานของตัวรับรู้แต่ละตัวในระบบให้เหลือใกล้เคียงกัน เมื่อครบเวลาหนึ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายจะมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้ แต่การยกเลิกกลุ่มปัจจุบันแล้วทำการสร้างกลุ่มใหม่ ก่อให้เกิดการส่งข้อมูลจำนวนมาก [13] เพื่อหลีกเลี่ยงการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้เมื่อครบเวลาปกติ เราจึงเสนอให้โหนดสมาชิกในกลุ่ม สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดที่อยู่ใกล้กว่า ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ตามระยะทางก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐานต่อไป ทำให้สามารถเฉลี่ยค่าการใช้พลังงานของแต่ละโหนดให้เท่ากันได้

งานชิ้นนี้อยู่ในขั้นพัฒนา เราจะหาวิธีที่สามารถเฉลี่ยพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายที่ถูกส่งตำแหน่งบนพื้นระนาบ รวมถึงการทำการรวมข้อมูลเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่จะผ่านคลื่นวิทยุไปยังสถานีฐาน มุมมองอีกข้อหนึ่งซึ่งเราละไว้ในงานนี้คือ พลังงานที่ใช้ในการเลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ไร้สายทั้งในขณะที่ทำการส่งข้อมูลและทำการรับข้อมูล ซึ่งในส่วนนี้เราจะทำการเพิ่มเข้ามาในงานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Meng and R. Volkan, "Distributed Network Protocols for Wireless Communications." In the Proceedings of IEEE ISCAS, Vol. 4, pp. 600 - 603, May 1998.
- [2] P. Levis, S. Madden, et.al., "Tiny OS: An Operating System for Wireless Micro-sensor Networks." In Ambient Intelligence, pp. 115-148, New York, 2005, Springer-Verlag.
- [3] S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong, "Tiny DB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks." ACM Transactions on Database Systems, Vol. 30, Issue. 1, pp. 122-173, March 2005.
- [4] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable Robust Communication Paradigm for Sensor Networks." In the Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), pp. 56 - 67, Boston, Massachusetts, August 2000.
- [5] D. Braginsky, and D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks." In the Proceedings of Wireless Sensor Network Algorithms (WSNA '02) , pp. 22-30, Atlanta, Georgia, September 28, 2002.
- [6] W. Ye, and J. Heidemann, "Ultra-low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling." In the Proceedings of fourth International Conferences on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06), pp. 321-334, 2006.
- [7] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, October 2002.
- [8] Bhaskar Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors.", Cambridge University Press, January 2006.
- [9] A. Cerpa, and D. Estrin, "ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies.", IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol 3, 3, pp. 1-14, 2004.
- [10] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks." in the Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000.
- [11] Alex Rogers, Esther David, and Nicholas R. Jennings, "Self-Organized Routing for Wireless Microsensor Networks." IEEE Transactions on SMC - Part A, Vol. 35, No. 3, pp. 349 - 359, May 2005.
- [12] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks." IEEE Journal on Selected areas in Communication, pp 1089-1098, 2004.
- [13] Prabal Dutta, David Culler, and Scott Shenker, "Procrastination Might Lead to a Longer and More Useful Life.", In the Sixth Workshop on Hot Topics in Networks (Hotnet-VI), Atlanta, Georgia, USA, November 2007.
- [14] Goutam Chakraborty, "A Note on Cluster Size of WSN", In the Proceeding of the 4th International Conference on Computers & Devices for Communication (CODEC 2009), pp. 1-6, Kolkata, India, December 2009.