



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงานโดยการใช้หลายเส้นทางบน  
เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

**Optimal Multi-path Energy-aware Routing on Wireless Sensor Networks**

รศ. ดร. โชติพัชร ภรณ์วลัย  
ศรายุทธ ธีเนตสกุลวัฒนา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงาน โดยการใช้หลายเส้นทางบน  
เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Optimal Multi-path Energy-aware Routing on Wireless Sensor Networks  
แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 966,400 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2556 .

ผู้วิจัย รศ. ดร. โชติพัทธ์ ภรณ์วลัย

อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02-723-4962 E-Mail [chotipat@it.kmitl.ac.th](mailto:chotipat@it.kmitl.ac.th) .

นาย ศรายุทธ ธเนศสกุลวัฒนา

ผู้ช่วยนักวิจัย คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

ในการวิจัยทางด้านเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย มีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งเน้นการแก้ปัญหาที่ตัวรับรู้  
ไร้สายซึ่งอยู่ใกล้สถานีฐานใช้พลังงานสูง เนื่องจากจะต้องส่งข้อมูลจำนวนมากที่รับมาจากตัวรับรู้ที่อยู่  
ไกลออกไปกลับไปยังสถานีฐาน ซึ่งวิธีการหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมคือการสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายที่  
มีขนาดแตกต่างกัน โดยกลุ่มที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะมีขนาดเล็กเพื่อลดการใช้พลังงานในการรับส่งข้อมูล  
ภายในกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งจะนำไปชดเชยกับพลังงานในการส่งข้อมูลจำนวนมากกลับไปยังสถานี  
ฐาน การแก้ไขปัญหาในลักษณะนี้ทำให้รายละเอียดของข้อมูลในกลุ่มข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มของตัวรับรู้ไร้  
สายที่อยู่ห่างออกไปมีความหยابขาดรายละเอียดเนื่องจากจะต้องสรุปรวมข้อมูลจากจำนวนตัวรับรู้  
จำนวนมากกว่าและจากพื้นที่ที่ใหญ่กว่ากลุ่มที่อยู่ใกล้สถานีฐานซึ่งมีขนาดของกลุ่มเล็กกว่า การแก้ปัญหา  
โดยวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดของข้อมูลสม่ำเสมอ การวิจัยของเราจึงนำเสนอ  
การเกณฑ์วิธีที่สามารถแก้ปัญหานี้โดยการส่งข้อมูลหลายเส้นทาง และสามารถควบคุมขนาดของกลุ่มใน  
แต่ละส่วนของพื้นที่ให้มีขนาดใกล้เคียงกันได้ ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลที่ได้รับจากกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายในแต่  
ละพื้นที่สามารถรักษารายละเอียดของข้อมูลได้ในระดับที่ใกล้เคียงกัน

**Research Title: Optimal Multi-path Energy-aware Routing on Wireless Sensor Networks**

**Researcher: Assoc. Prof. Dr. Chotipat Pornavalai**

**Sarayoot Tanessajulwattana**

**Faculty: Information Technology**

## **ABSTRACT**

In wireless sensor network researches, there are many approaches to mitigate high energy usage of sensor nodes near base station that we know as hotspot problem. Some of these researches proposed unequal sized of cluster that clusters near base station are smaller size than faraway cluster to reduce energy usage of cluster near base station, although unequal sized of cluster lead to differentiate of information accuracy. Clusters faraway from base station are large and information in these cluster must be aggregated from large number of sensor nodes in cluster and from large area size. Information that forward to sink from these faraway cluster might less accuracy than nearer clusters. We proposed uniform cluster sized protocol and algorithm using multipath routing to mitigate hotspot problem that still keep uniform information accuracy for all clusters.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

รศ. ดร. โชติพัชร์ ภรณ์วลัย

ศรายุทธ ธเนศสกุลวัฒนา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญภาพ.....	viii
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 การสร้างกลุ่มแบบเปลี่ยนแปลงได้ (Dynamic Clustering).....	7
2.1.1 การหาเส้นทางแบบส่งต่อหลายครั้ง (LEACH).....	7
2.1.2 LEACH ที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายทอด (LEACH with Multi-hop Transmission).....	8
2.2 บริเวณที่มีการใช้งานพลังงานในปริมาณสูง (Hot Spot).....	8
<b>บทที่ 3 การกระจายการใช้พลังงานในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยมีการกำหนดตำแหน่งของตัวรับรู้.....</b>	<b>10</b>
3.1 เป้าหมายและเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสม.....	11
3.1.1 แบบจำลองของเครือข่ายและสมมติฐาน.....	11
3.1.2 ระบุเงื่อนไขของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม.....	12
3.2 การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสม.....	14

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดลองและการหาค่าสมรรถนะของระบบ.....	20
3.3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ .....	20
3.3.2 ค่าชี้วัดสมรรถนะ.....	21
3.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	21
3.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ .....	23
3.3.5 สมรรถนะของระบบ .....	24
<b>บทที่ 4 การกระจายการใช้พลังงานโดยวิธีการส่งข้อมูลหลายเส้นทางสำหรับเครือข่ายตัวรับรู้ไร้ โดยผู้ม</b> <b>วางตำแหน่งของตัวรับรู้.....</b>	<b>37</b>
4.1 แบบจำลองของระบบ.....	37
4.2 แบบจำลองพลังงาน .....	38
4.3 รายละเอียดเกณฑ์วิธี .....	38
4.3.1 การเลือกหัวหน้ากลุ่ม .....	38
4.3.2 การสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย.....	40
4.3.3 การติดต่อสื่อสารภายในกลุ่มและการประมวลผลข้อมูล .....	40
4.3.4 การเลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลออกไปนอกกลุ่ม .....	40
4.3.5 การติดต่อสื่อสารกับภายนอกกลุ่ม.....	42
4.3.6 การใช้พลังงานในแต่ละพื้นที่ย่อย.....	43
4.3.7 การหาค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างสองพื้นที่ย่อยใดๆ .....	44
4.3.8 การหาค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยใดๆ กับสถานีฐาน .....	45
4.3.9 การหาจำนวนพื้นที่ย่อย .....	46
4.3.10 การหาขอบเขตของจำนวนรอบ .....	47
4.3.11 การหาค่าอัตราส่วน $x_{i,i-1}$ และ $x_{i,i-2}$ สำหรับพื้นที่ย่อย $i$ .....	48
4.3.12 การชะลอการสร้างกลุ่มย่อย .....	50

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดสอบ.....	52
4.4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	52
4.4.2 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย.....	53
4.4.3 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลง.....	54
4.4.4 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของพื้นที่.....	55
4.4.3 รัศมีเฉลี่ยของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายเมื่อความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลง .....	56
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....</b>	<b>57</b>
<b>บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>58</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>60</b>
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>61</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนหนึ่งของอัตราส่วนในการส่งข้อมูลที่ทำให้ตัวรับรู้มีการใช้พลังงานเท่าเทียมกัน .....	19
3.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ .....	22
3.3 อายุการใช้งานของตัวรับรู้เมื่อระยะระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ ติดกันมีค่า 15 ถึง 35 เมตร .....	27
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	52

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้เทียบกับจำนวนตัวรับรู้.....	6
3.1 แบบจำลองเครือข่ายอย่างง่าย.....	11
3.2 แบบจำลองแสดงอัตราส่วนของการส่งข้อมูลของแต่ละโหนด.....	12
3.3 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ.....	14
3.4 ส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงเศษหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้.....	15
3.5 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ.....	20
3.6 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ใช้ในวิธี LEACH เมื่อ $k$ มีค่า 1 ถึง 36 ตัวรับรู้.....	23
3.7 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร.....	24
3.8 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร.....	24
3.9 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร.....	25
3.10 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร.....	25
3.11 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร.....	26
3.12 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร.....	28
3.13 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร.....	28
3.14 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร.....	29
3.15 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร.....	29
3.16 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร.....	30
3.17 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร.....	31
3.18 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร.....	31
3.19 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร.....	32
3.20 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร.....	32
3.21 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร.....	33
3.22 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร.....	34
3.23 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร.....	34

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร.....	35
3.25 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร.....	35
3.26 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร.....	36
4.1 แบบจำลองของระบบ.....	37
4.2 การส่งข้อมูลออกนอกกลุ่มจากพื้นที่ย่อย $i$ .....	41
4.3 ระยะทางระหว่างสองพื้นที่ย่อย.....	44
4.4 ระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยกับสถานีฐาน .....	45
4.5 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย .....	53
4.6 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลง .....	54
4.7 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของพื้นที่.....	55
4.8 รัศมีเฉลี่ยของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายเมื่อความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลง.....	56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ประกอบด้วย ตัวรับรู้ (Sensor) พร้อมตัวรับส่ง (Transceiver) เชื่อมต่อกันด้วยคลื่นวิทยุ (Radio) เพื่อค้นหาข้อมูลต่างๆและส่งข้อมูลที่ได้กลับไปให้สถานีฐาน (Base Station) นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทำให้ตัวรับรู้ไร้สายมีราคาที่ถูกลง มีความน่าเชื่อถือสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากตัวรับรู้ไร้สายใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีปริมาณพลังงานจำกัด การยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายออกไปจึงเป็นเรื่องสำคัญมากประการหนึ่ง ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวในระบบสามารถจะปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการขอมูลได้ ซึ่งพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายต้องใช้ในการส่งข้อมูล จะแปรผันโดยตรงกับกำลังส่งถึงกำลังสี่ของระยะทาง ในวิธีส่งโดยตรง (Direct Transmission) [1][2] ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายทำการส่ง ข้อมูลของตนเองไปยังสถานีฐานโดยตรง ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมากๆหมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่นๆ และสำหรับวิธี Minimum Transmission Energy (MTE) [1][2] ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งให้น้อยที่สุด โดยส่งต่อข้อมูลผ่านตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่าไปเรื่อยๆ ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องส่งต่อข้อมูลเป็นจำนวนมาก และหมดพลังงานไปก่อนตัวรับรู้อื่น

เพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) จึงมีการเสนอวิธีการสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย (Cluster) โดยมีหัวหน้ากลุ่ม (Cluster head) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากสมาชิกภายในกลุ่ม แล้วทำการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน (Base station) โดยสมาชิกภายในกลุ่มจะทำการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้กลับไปให้หัวหน้ากลุ่มเป็นระยะทางสั้น ๆ ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานโดยรวมของทั้งกลุ่มลงได้เป็นปริมาณมาก จากนั้นหัวหน้ากลุ่มจะทำการรวมข้อมูลที่ได้รับมาได้ส่งกลับไปยังสถานีฐาน เนื่องจากหัวหน้ากลุ่มต้องใช้พลังงานมากกว่าสมาชิกกลุ่มมาก เพื่อกระจายการใช้พลังงานจึงต้องมีการเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สายในระบบตัวอื่น ๆ ขึ้นมาเป็นหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งการสร้างกลุ่มในลักษณะเรียกว่า Dynamic Clustering นี้ถูกเสนอในเกณฑ์วิธี LEACH [1][2]

ใน LEACH ฉบับดั้งเดิมการส่งข้อมูลจากหัวหน้ากลุ่มกลับไปยังสถานีฐานแบบทอดเดียว (Single hop) หัวหน้ากลุ่มซึ่งอยู่ห่างไกลจากสถานีฐานออกไปจะต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงมาก ทำให้หมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่นๆ ในเครือข่าย เพื่อเป็นการลดพลังงานที่จะต้องใช้ในการส่งกลับไปยังสถานีฐาน จึงได้มีการนำเสนอการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานแบบหลายทอด (Multi hop) ในการส่งแบบนี้หัวหน้ากลุ่มที่อยู่ห่างไกลออกไปจะทำการส่งข้อมูลที่รวมจากภายในกลุ่มไปให้หัวหน้ากลุ่มที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่าทำการส่งต่อข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานเป็นทอด ๆ ทำให้พลังงานที่หัวหน้ากลุ่มที่อยู่ห่างออกไปต้องใช้ในการส่งข้อมูลข้ามกลุ่มลดลง [3][4][5][6] โดยพัฒนาต่อยอดมาจากเกณฑ์วิธี LEACH แต่วิธีการนี้ทำให้ตัวรับรู้ไร้สายที่ทำหน้า

หน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มในบริเวณที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน จะต้องทำการรับส่งข้อมูลในปริมาณที่มากขึ้น จาก การที่ต้องรับข้อมูลจากหัวหน้ากลุ่มที่อยู่ไกลออกไปเพื่อส่งไปให้กับสถานีฐาน ทำให้หัวหน้ากลุ่มเหล่านี้ใช้พลังงานมากกว่าและทำให้อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายในบริเวณนี้สั้นลง ปัญหานี้ถูกเรียกว่าปัญหา Hotspot

ในการแก้ไขปัญหา Hot spot มีผู้เสนอหลากหลายวิธีในการแก้ปัญหาลักษณะ การเพิ่มจำนวนตัวรับรู้เข้าไปในบริเวณที่เกิดปัญหา การเพิ่มอุปกรณ์ที่มีลักษณะพิเศษเพื่อช่วยลดปัญหา Hotspot ในบริเวณนั้น การสร้างกลุ่มตัวรับรู้ให้มีขนาดแตกต่างกันตามระยะทาง รวมถึงการส่งข้อมูลหลายๆ เส้นทางเพื่อกระจายการใช้พลังงาน

ในการแก้ปัญหานั้นขมก้นในช่วงหลังๆ นี้มักจะใช้วิธีการสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ที่มีขนาดแตกต่างกัน เนื่องจากวิธีนี้ไม่มีความยุ่งยากในการเตรียมอุปกรณ์เพิ่มเติมพิเศษเหมือนในวิธีอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งในกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ห่างจากสถานีฐานจะมีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่ากลุ่มที่อยู่ใกล้สถานีฐาน และรวมถึงมีจำนวนสมาชิกในกลุ่มที่มากกว่าด้วยเช่นเดียวกัน ทำให้ข้อมูลที่หัวหน้ากลุ่มรวบรวมจากสมาชิกในกลุ่มที่อยู่ห่างไกลสถานีฐานมีรายละเอียดของข้อมูลน้อยกว่าข้อมูลของกลุ่มที่อยู่ใกล้สถานีฐานด้วยเช่นกัน วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดของข้อมูลจากแต่ละกลุ่มของตัวรับรู้ใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยของเราจึงได้นำเสนอเกณฑ์วิธีที่สามารถจะลดปัญหา Hotspot ในบริเวณใกล้กับสถานีฐานโดยการใช้การส่งข้อมูลหลายๆ เส้นทาง โดยกำหนดให้กลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายให้มีขนาดเท่าเทียมกัน และไม่จำเป็นต้องเตรียมอุปกรณ์เพิ่มเติมพิเศษ แต่จำเป็นจะต้องมีการกำหนดค่าบางอย่างให้กับตัวรับรู้ไร้สายก่อนที่จะนำไปติดตั้ง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงขนาดของกลุ่มตัวรับรู้ ที่ใช้วิธีการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่นๆ
2. เพื่อศึกษาถึงวิธีการแก้ปัญหาการใช้พลังงานปริมาณสูงในกลุ่มตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน
3. เพื่อศึกษาการกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในระบบ ที่ใช้วิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่นๆ
4. เพื่อลดการกระจายของระดับพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่าย
5. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้วิธีการที่นำเสนอ

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เพื่อการแก้ปัญหาการใช้พลังงานปริมาณสูงในกลุ่มตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน จึงได้มีการนำวิธีการสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายที่มีขนาดแตกต่างกันเข้ามาใช้ แต่การใช้วิธีการนี้ทำให้ข้อมูลที่ได้จากแต่ละกลุ่มมีความละเอียดแตกต่างกัน โดยกลุ่มอยู่ห่างจากสถานีฐานออกไปซึ่งมีขนาดของกลุ่มใหญ่กว่าจะมีความละเอียดของข้อมูลที่ต่ำกว่า ทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดของข้อมูลใกล้เคียงกัน

สมมติฐานของงานวิจัยนี้คือ ถ้าหากสามารถทำให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกกลุ่มในเครือข่ายมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยยังสามารถจะรักษาสมดุลของพลังงานคงเหลือของตัวรับรู้ไร้สายในส่วนต่าง ๆ ของเครือข่ายให้ใกล้เคียงกัน เราจะสามารถได้ข้อมูลที่มีความละเอียดใกล้เคียงกันจากกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย โดยจะต้องสามารถแก้ปัญหาการใช้พลังงานปริมาณสูงในกลุ่มตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานได้อีกด้วย

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการกระจายการใช้พลังงานของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายให้มีการใช้พลังงานในระดับที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ยังสามารถรักษาให้ขนาดของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายมีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ โดยงานวิจัยนี้เสนอวิธีการที่อนุญาตให้ตัวรับรู้ไร้สายส่งข้อมูลออกไปได้หลายเส้นทาง โดยในแต่ละเส้นทางจะมีค่าอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำสมการเชิงเส้นเข้ามาหาค่าที่เหมาะสมที่เหล่านี้

งานวิจัยนี้จะทำการประเมินค่าสมรรถนะ (Performance evaluation) วิธีการที่ได้คิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับ เกณฑ์วิธีอื่น ๆ โดยสร้างแบบจำลองระบบขึ้นบน MATLAB ทำการหาขนาดของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย และอายุการใช้งานโดยรวมของตัวรับรู้ไร้สาย

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

**บทที่ 1** กล่าวถึง ความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ การเปรียบเทียบ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา ข้อตกลงเบื้องต้น และคำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

**บทที่ 2** กล่าวถึงเกณฑ์วิธีหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย และปัญหาที่เกิดขึ้นการทำงานของวิธีการนั้นๆ

**บทที่ 3** กล่าวถึงการกระจายการใช้พลังงานในเครือข่ายโดยเท่าเทียม เพื่อให้ตัวรับรู้ไร้สายในระบบมีอายุการใช้งานใกล้เคียงกัน ในบทนี้ตัวรับรู้ไร้สายจะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่กำหนดและไม่มีการสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย และตำแหน่งสถานีฐานอยู่ตรงกลางของทอพอโลยี โดยตัวรับรู้จะมีการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานในหลายๆ เส้นทาง เพื่อสร้างความเท่าเทียมในการใช้พลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในระบบ เมื่อตัวรับรู้ไร้สายหมดพลังงานพร้อมกัน ทำให้ง่ายต่อการนำตัวรับรู้ชุดใหม่เข้าไปติดตั้งแทนที่ชุดเดิม

**บทที่ 4** กล่าวถึงการแก้ไขปัญหาการใช้พลังงานปริมาณสูงในกลุ่มตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน โดยยังสามารถรักษาความละเอียดของข้อมูลจากกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่าย ในบทนี้เป็นการต่อยอดจากบทที่ 3 ตัวรับรู้ไร้สายจะถูกสุ่มติดตั้งลงบนพื้นที่ตรวจวัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งแบ่งออกเป็นหลายพื้นที่ที่มีขนาดเท่ากัน ตัวรับรู้จะทำการสร้างกลุ่มขึ้นมาเพื่อรวบรวมข้อมูลจากภายในกลุ่มก่อนจะส่งข้อมูลเป็นทอๆ ในหลายๆ เส้นทาง ไปยังสถานีฐานซึ่งอยู่นอกพื้นที่ตรวจวัด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการซึ่งสามารถกระจายการใช้งานพลังงานของกลุ่มตัวรับรู้ เพื่อให้พลังงานที่ใช้ในกลุ่มตัวรับรู้มีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยยังรักษาขนาดของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายให้มีขนาดใกล้เคียงกัน

**บทที่ 5** เป็นการสรุปผลการวิจัยที่เราได้ดำเนินการมาจากบทที่ 1-4

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการทำงานของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย และการประเมินสมรรถนะเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

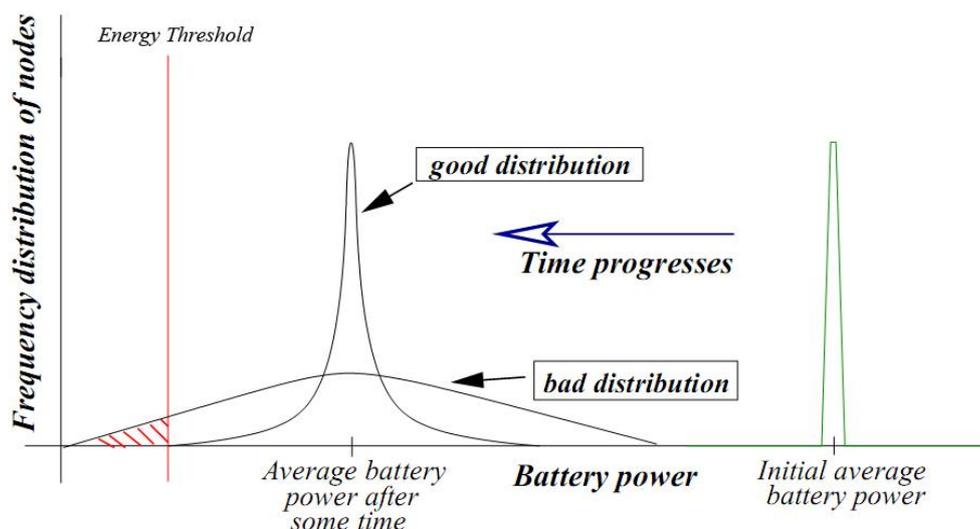
เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ประกอบด้วย ตัวรับรู้ (Sensor) พร้อมตัวรับส่งคลื่นวิทยุ (Transceiver) เชื่อมต่อกันด้วยคลื่นวิทยุ (Radio) เพื่อค้นคืนข้อมูลต่างๆ และส่งข้อมูลที่ได้กลับไปให้สถานีฐาน (Base Station) นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทำให้ตัวรับรู้ไร้สายมีราคาที่ถูกลง มีความน่าเชื่อถือสูง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

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นเป้าหมายหลักของการวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย การใช้งานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ตามจุดมุ่งหมายของข้อมูลที่กำหนดให้ ตัวรับรู้ไร้สายตรวจสอบคือ

1) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวตรวจจับได้มีความสำคัญสูง ตัวอย่าง เช่น ในระบบสัญญาณเตือนอัคคีภัย กล้องตรวจตราเพื่อความมั่นคง ระบบตรวจสอบสถานะของโครงสร้างสะพานหรืออาคาร

2) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวรวบรวมมาได้ สามารถทดแทนด้วยข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากสิ่งที่ใช้ต้องการคือข้อมูลที่ถูกรวบรวมให้เห็นภาพรวมของบริเวณนั้น ๆ การใช้งานลักษณะนี้มักใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

จากการใช้งานด้านบนทั้งสองลักษณะ การยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้งานในลักษณะที่ 1 ซึ่งข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัว ไม่สามารถใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้ไร้สายอื่น ๆ ที่อยู่รอบข้างมาทดแทนได้



รูปที่ 2.1 การกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเทียบกับจำนวนตัวรับรู้

จากรูปที่ 2.1 แสดงการกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายเทียบกับจำนวนตัวรับรู้ในระดับพลังงานนั้นๆ โดยเส้น Energy Threshold แสดงค่าพลังงานที่ตัวรับรู้ไม่สามารถทำงานต่อได้ ในสถานะเริ่มต้นตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่าย มีพลังงานสูงและมีระดับพลังงานใกล้เคียงกัน ดังกราฟด้านขวามือในรูปที่ 2.1 เมื่อเวลาผ่านไป พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายจะลดลงเรื่อยๆ จากขวามาซ้าย การกระจายตัวของพลังงานที่เหลือของตัวรับรู้ไร้สายที่คืนนั้นควรจะใกล้เคียงกัน กราฟของพลังงานในตัวรับรู้ไร้สายที่มีการกระจายตัวที่ดี (good distribution) คือกราฟด้านซ้ายที่มีฐานแคบ พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวมีระดับใกล้เคียงกัน สำหรับการกระจายตัวของพลังงานที่ไม่ดี (bad distribution) เป็นดังกราฟด้านซ้ายที่มีฐานกว้าง พลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สายที่มีพลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุดมีค่าแตกต่างกันมาก ตัวรับรู้ไร้สายที่มีพลังงานน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Threshold) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกแรเงาในรูปที่ 2.1 จะไม่สามารถทำงานต่อได้ ทำให้ข้อมูลที่ควรจะได้รับจากตัวรับรู้ไร้สายนั้นขาดหายไปจากระบบ

## 2.1 Dynamic Clustering

### 2.1.1 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

LEACH เป็นเกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงาน (Energy-Aware Routing Protocol) ในการส่งข้อมูลด้วยวิธีการตั้งกลุ่ม ซึ่งในเกณฑ์วิธีของ LEACH กลุ่มของตัวรับรู้จะไม่ถูกแบ่งอย่างตายตัว แต่จะมีการปรับเปลี่ยนกลุ่ม และเปลี่ยนหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลา เพื่อให้มีการกระจายการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไร้สายออกไป ทำให้อุปกรณ์แต่ละตัวมีระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกัน เป็นการยืดอายุการใช้งานของระบบออกไป

ใน LEACH ตัวรับรู้  $i$  จะเลือกตนเองเป็นหัวหน้ากลุ่มเมื่อเริ่มต้นรอบที่  $r+1$  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 จำนวนตัวรับรู้ทั้งหมด

$r$  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

หลังจากที่ตัวรับรู้แต่ละตัวทราบแล้วว่าตนเองเป็นหัวหน้ากลุ่มหรือไม่ ตัวรับรู้ที่ทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มจะประกาศข้อมูลให้ตัวรับรู้ตัวอื่นๆ ทุกตัวในเครือข่ายทราบว่ามันทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่ม ตัวรับรู้อื่นจะทำการเลือกหัวหน้ากลุ่มซึ่งใช้พลังงานในการส่งข้อมูลน้อยที่สุด พิจารณาตามความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากหัวหน้ากลุ่มแต่ละตัว

ตัวรับรู้สมาชิกที่เลือกหัวหน้ากลุ่มแล้วจะทำการส่งสัญญาณกลับไปแจ้งให้หัวหน้ากลุ่มทราบว่าตัวรับรู้ใดบ้างที่เข้าร่วมกลุ่ม หลังจากนั้นหัวหน้ากลุ่มจะทำการจัดเวลาในการรับส่งข้อมูลของสมาชิกในกลุ่มด้วย TDMA แล้วแจ้งให้สมาชิกทุกตัวทราบ เมื่อถึงช่วงเวลาของตนเอง ตัวรับรู้สมาชิกจะทำการส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้กลับไปให้หัวหน้ากลุ่ม ซึ่งหัวหน้ากลุ่มจะทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้สมาชิกทั้งหมด นำส่งต่อไปยังสถานีฐานต่อไป

### 2.1.2 LEACH with Multi-hop Transmission

เนื่องจากในเกณฑ์วิธี LEACH เมื่อหัวหน้ากลุ่มแต่ละตัวทำการรวมข้อมูลของสมาชิกภายในกลุ่มของตนเองแล้ว หัวหน้ากลุ่มจะทำการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานโดยตรงโดยไม่ผ่านตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ในเครือข่าย ทำให้หัวหน้ากลุ่มที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมาก ๆ จะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานมากตามไปด้วย ทำให้หัวหน้ากลุ่มเหล่านี้หมดพลังงานอย่างรวดเร็ว เพื่อแก้ปัญหาในข้อนี้ จึงได้มีการเสนอวิธีการส่งข้อมูลจากหัวหน้ากลุ่มแต่ละตัวใหม่ โดยยอมให้หัวหน้ากลุ่มแต่ละตัวส่งข้อมูลไปยังหัวหน้ากลุ่มตัวอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งต่อไปเป็นทอด ๆ จนไปถึงสถานีฐาน หัวหน้ากลุ่มที่อยู่ห่างออกไปก็จะสามารถลดการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานได้ เกณฑ์วิธีที่พัฒนาในแนวทางนี้มีอยู่หลายตัวเช่น M-LEACH[3] MR-LEACH[4] และ Multi-hop LEACH[5] [6]

## 2.2 Hot Spot

ในเกณฑ์วิธี LEACH ที่ได้มีการปรับปรุงให้ส่งข้อมูลในลักษณะหลายทอด สามารถลดการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลออกนอกกลุ่มในกลุ่มที่อยู่ไกลจากสถานีฐานได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม หัวหน้ากลุ่มในบริเวณที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องรับข้อมูลที่ถูส่งมาจากหัวหน้ากลุ่มอื่น ๆ ที่อยู่ด้านหลังเพื่อส่งต่อกลับไปให้สถานีฐานทำให้ตัวรับรู้ไร้สายในบริเวณนี้หมดพลังงานอย่างรวดเร็ว ปัญหานี้ถูกเรียกว่า Hot Spot ในการแก้ไขปัญหานี้ได้มีการนำเสนอวิธีการต่าง ๆ เพื่อลดการใช้งานพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายในบริเวณใกล้กับสถานีฐาน อาทิเช่น

1) การเพิ่มจำนวนของตัวรับรู้ไร้สายในบริเวณใกล้กับสถานีฐานเพื่อกระจายการใช้พลังงานในบริเวณนี้ไปสู่ตัวรับรู้ไร้สายจำนวนมากขึ้น และยืดอายุการใช้งานตัวรับรู้ไร้สายในบริเวณนี้ออกไป [7]

2) การเพิ่มสถานีฐานจากเดิมที่มีเพียง 1 ให้มีมากขึ้นแล้วกระจายสถานีฐานออกไปโดยรอบพื้นที่ซึ่งจะช่วยลดปัญหา Hot Spot ในบริเวณใกล้กับสถานีฐาน และยังคงลดการใช้พลังงานโดยรวมของระบบได้ด้วย เนื่องจากตัวรับรู้ไร้สายสามารถเลือกส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานที่ใกล้ที่สุด [8]

3) ติดตั้งสถานีฐานเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถเคลื่อนไปทั่วทั้งพื้นที่ตรวจวัดของตัวรับรู้ไร้สายแล้วทำการเก็บค่าที่ตรวจวัดได้จากบริเวณต่าง ๆ ของพื้นที่ ทำให้ตัวรับรู้ไร้สายสามารถส่งข้อมูลในระยะทางสั้น ๆ ซึ่งจะยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายออกไป [9][10]

4) เพิ่มตัวรับส่งสัญญาณเคลื่อนที่เข้าไประหว่างบริเวณที่มีการใช้พลังงานสูงและสถานีฐาน เพื่อหน้าที่รับส่งข้อมูลแทนหัวหน้ากลุ่มในบริเวณนั้น [11]

5) การกระจายตัวรับรู้ไร้สายที่มีประสิทธิภาพสูงหรือบรรจุด้วยแบตเตอรี่ความจุสูงเข้าไปในเครือข่าย เพื่อให้ตัวรับรู้ไร้สายที่มีความสามารถสูงเหล่านี้เข้าไปทำเป็นหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของระบบโดยรวมออกไปได้ [12][13]

6) การสร้างกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายต่างขนาดกัน โดยให้กลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ใกล้สถานีฐานมีขนาดของกลุ่มที่เล็กกว่ากลุ่มที่อยู่ห่างออกไป วิธีการนี้ทำให้กลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ใกล้สถานีฐานมีการใช้พลังงานภายในกลุ่มลดลงจากการที่จำนวนสมาชิกมีน้อย และระยะในส่งข้อมูลสั้น เพื่อไปชดเชยกับพลังงานที่จะต้องทำการรับส่งข้อมูลจำนวนมาก จากกลุ่มตัวรับรู้ที่อยู่ห่างออกไปกลับไปยังสถานีฐาน [14] [15][16]

7) การส่งข้อมูลในหลาย ๆ เส้นทางเพื่อกระจายการใช้พลังงาน [18] เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้วิธีการนี้จะอนุญาตให้ตัวรับรู้ไร้สายสามารถส่งข้อมูลไปยังตัวรับรู้ตัวอื่นๆ ได้หลายเส้นทางทำให้สามารถรักษาสมดุลการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายได้

ในวิธีที่ 1-5 ด้านบนจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นรวมถึงความซับซ้อนของตัวรับรู้ไร้สายที่เพิ่มขึ้น สำหรับในวิธีที่ 6 เนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายทำให้กลุ่มที่อยู่ห่างไกลออกไปมีขนาดที่ใหญ่ทั้งจำนวนสมาชิกและรัศมีของกลุ่ม ทำให้ข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายเหล่านี้มีความละเอียดของข้อมูลต่ำกว่ากลุ่มที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า ซึ่งไม่เหมาะสมกับงานบางประเภทที่ต้องการความละเอียดของข้อมูลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันจากกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สาย ทำให้เราเลือกใช้วิธีการที่ 7 ในการทำวิจัยเพื่อลดปัญหาการเกิด Hotspot

### บทที่ 3

## การกระจายการใช้พลังงานในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยมีการ กำหนดตำแหน่งของตัวรับรู้

จากการที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีความจุจำกัด และการเปลี่ยนแบตเตอรี่หลังจากที่ติดตั้งตัวรับรู้ไร้สายในสถานะแวดล้อมจริงเป็นไปได้ยาก และเป็นความลำบากอย่างยิ่งหากตัวรับรู้ไร้สายหมดพลังงานไม่พร้อมกัน ผู้ดูแลจะต้องเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สายที่หมดพลังงานกับตัวรับรู้ไร้สายตัวใหม่ทุกครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลจากการตรวจสอบพื้นที่ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณที่ต้องการ หากตัวรับรู้ไร้สายหมดพลังงานพร้อมกัน ผู้ดูแลสามารถเข้าไปเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สายทั้งระบบโดยลงพื้นที่เพียงครั้งเดียว ซึ่งจะลดความยุ่งยากในการติดตั้งระบบใหม่ ไม่ต้องคอยทยอยเปลี่ยนอุปกรณ์ครั้งละไม่กี่ตัวในการลงพื้นที่แต่ละครั้ง

เป้าหมายของเกณฑ์วิธีติดต่อสื่อสารในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ควรจะ (1) ลดการใช้พลังงานโดยรวมของตัวรับรู้ และ (2) ลดการกระจายของระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ในเครือข่าย ซึ่งงานเราจะเน้นไปใน 2 เป้าหมายนี้

ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวในระบบสามารถจะปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการขอมูลได้ พลังงานที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลจะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของระยะทาง ในวิธี Direct Transmission (Direct) ตัวรับรู้ทุกตัวทำการส่งข้อมูลของตนเองไปยังสถานีฐานโดยตรง ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมากๆ หมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่นๆ และสำหรับวิธี Minimum Transmission Energy (MTE) ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งให้น้อยที่สุด โดยส่งต่อข้อมูลผ่านตัวรับรู้อื่นที่อยู่ใกล้สถานีฐานไปเรื่อยๆ ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องส่งต่อข้อมูลเป็นจำนวนมาก และหมดพลังงานไปก่อนตัวรับรู้อื่น

เพื่อแก้ปัญหาของวิธี Direct และ MTE วิธี LEACH จะแบ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายออกเป็นกลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่มทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้ส่งต่อไปให้สถานีฐาน การทำงานในลักษณะนี้ตัวรับรู้ที่จะต้องใช้พลังงานมากคือหัวหน้ากลุ่ม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มและหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลาเพื่อเฉลี่ยการใช้พลังงานออกไปยังตัวรับรู้ตัวอื่นๆ ซึ่งการปรับเปลี่ยนกลุ่มจะต้องมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสมาชิกในกลุ่มเพื่อยกเลิกกลุ่มเดิม และทำการสร้างกลุ่มใหม่ หากมีการเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้งพลังงานที่จะต้องเสียไปกับการนี้ก็จะมากตามไปด้วย

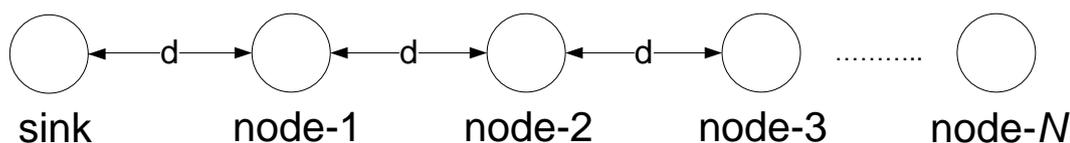
งานวิจัยของเราได้เห็นความจำเป็น ณ จุดนี้จึงพยายามทำให้ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกันโดยไม่จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้ง โดยตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะส่งต่อข้อมูลให้กับตัวรับรู้อื่นๆ ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า การส่งข้อมูลของตัวรับรู้แต่ละตัวจะส่ง

ข้อมูลในหลายระดับพลังงานไปยังตัวกลางหลายๆตัว โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พลังงานที่ตัวรับรู้ทุกตัวใช้ในกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน เราจะนำปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการหาค่าของอัตราส่วนดังกล่าว งานวิจัยนี้เป็นงานที่หนึ่งในกลุ่มนักวิจัยของเราได้วิจัยมาก่อนหน้านี้ [18] เราจึงนำมาต่อยอดเพื่อแก้ปัญหาบนระนาบ 2 มิติ พร้อมสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบเปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่นๆ เพื่อดูพลังงานที่ตัวรับรู้ในเครือข่ายใช้ รวมถึงการกระจายตัวของค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ในระบบ

### 3.1. เป้าหมายและเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสม

#### 3.1.1 แบบจำลองของเครือข่ายและสมมติฐาน

เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา เราจะเริ่มต้นจากเครือข่ายอย่างง่าย บนเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 3.2. เราสมมติให้โหนดจำนวน  $N$  โหนด วางห่างกันในระยะเท่าๆ กัน เป็นระยะ  $d$

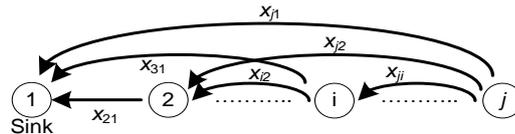


รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครือข่ายอย่างง่าย

สมมติให้แต่ละโหนดสามารถปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุเพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังปลายทางได้ พลังงานที่แต่ละโหนดใช้ในเบื้องต้นนี้เราจะคำนวณพลังงานที่โหนดใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ รวมกับพลังงานที่เลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ไร้สายมาใช้ในการคำนวณ

### 3.1.2. ระบุเงื่อนไขของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม

แบบจำลองมีตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมด  $N$  โหนด วางห่างกันด้วยระยะ  $d$  โดยแต่ละโหนดมีการสร้างข้อมูลขนาด  $m$  แพ็คเก็ต จำนวนข้อมูลที่แต่ละโหนดส่งเป็นผลรวมของข้อมูลที่ตัวเองสร้างขึ้นกับข้อมูลที่โหนดรับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไป โดยจะทำการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุไปยังสถานีฐานและโหนดตัวกลางด้วยอัตราส่วน  $X_{ji}$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนในการส่งข้อมูลจากตัวรับรู้  $j$  ไปยังตัวรับรู้  $i$  ที่แตกต่างกันตามระยะทางที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองแสดงอัตราส่วนของการส่งข้อมูลของแต่ละโหนด

ถ้าให้พลังงานทั้งหมดที่โหนด  $j$  ใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุมีค่าเป็น  $C_j$  แล้ว  $C_j$  จะประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล  $C_{jRx}$  พลังงานที่ใช้ในการรวมข้อมูล  $C_{jAgg}$  และพลังงานที่ใช้เพื่อส่งข้อมูล  $C_{jTx}$  จะเขียนสมการของพลังงานที่โหนด  $j$  ใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ว่า

$$C_j = C_{jRx} + C_{jAgg} + C_{jTx} \quad (3.1)$$

โดยค่าของของพลังงานที่โหนด  $j$  ใช้ในการรับข้อมูล  $C_{jRx}$  คือพลังงานที่ใช้ในการเลี้ยงวงจรภาครับตามสมการด้านล่าง เมื่อ  $E_{elec}$  เป็นค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลแต่ละบิต  $R_j$  เป็นจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่โหนด  $j$  รับเข้ามา และ  $p_{ks}$  เป็นขนาดของแต่ละกลุ่มข้อมูล

$$C_{jRx} = E_{elec} \times R_j \times p_{ks} \quad (3.2)$$

พลังงานในการรวมข้อมูล  $C_{jAgg}$  จะเป็นพลังงานที่โหนดใช้ในการรวมข้อมูลที่โหนด  $j$  ได้รับเข้ามาจากโหนดอื่น ๆ เข้ากับข้อมูลที่แต่ละโหนด  $j$  สร้างขึ้น สามารถเขียนได้ตามสมการด้านล่าง เมื่อ  $E_{agg}$  เป็นค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการรวมข้อมูลแต่ละบิต  $R_j$  เป็นจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่โหนด  $j$  รับเข้ามา  $m$  เป็นจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่โหนด  $j$  สร้างขึ้น โดยกลุ่มข้อมูลที่ี้ได้จากการรวมข้อมูลแล้วจะเท่ากับจำนวนกลุ่มข้อมูลที่โหนด  $j$  สร้างขึ้นคือ  $m$  กลุ่มข้อมูล และ  $p_{ks}$  เป็นขนาดของแต่ละกลุ่มข้อมูล

$$C_{jAgg} = E_{agg} \times (m + R_j) \times p_{ks} \quad (3.3)$$

พลังงานในการส่งข้อมูล  $C_{jTx}$  จะประกอบด้วย พลังงานในการเลี้ยงวงจรภาคส่ง และพลังงานในการขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุ เมื่อ  $E_{elec}$  เป็นค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลแต่ละบิต  $\mathcal{E}_{amp}$  เป็นค่าคงที่ของในการขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็น Joule/bit/m<sup>2</sup> เราสามารถเขียนพลังงานในการส่งข้อมูลของโหนด  $j$  ได้ตามสมการต่อไปนี้

$$C_{jTx} = E_{elec} \times m \times pks + \mathcal{E}_{amp} \times m \times pks \times \sum_{i=j-1}^1 (x_{ji} \times d_{ji}^2) \quad (3.4)$$

จากค่าของ  $C_{jRx}$   $C_{jRx}$  และ  $C_{jRx}$  เราสามารถเขียนพลังงานที่โหนด  $j$  ใช้ในการรับส่งข้อมูล  $C_{jRx}$  ตามสมการด้านล่างนี้

$$C_j = E_{elec} \times (m + R_j) \times pks + E_{agg} \times (m + R_j) \times pks + \mathcal{E}_{amp} \times m \times pks \times \sum_{i=j-1}^1 x_{ji} \times d_{ji}^2 \quad (3.5)$$

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

$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (3.6)$$

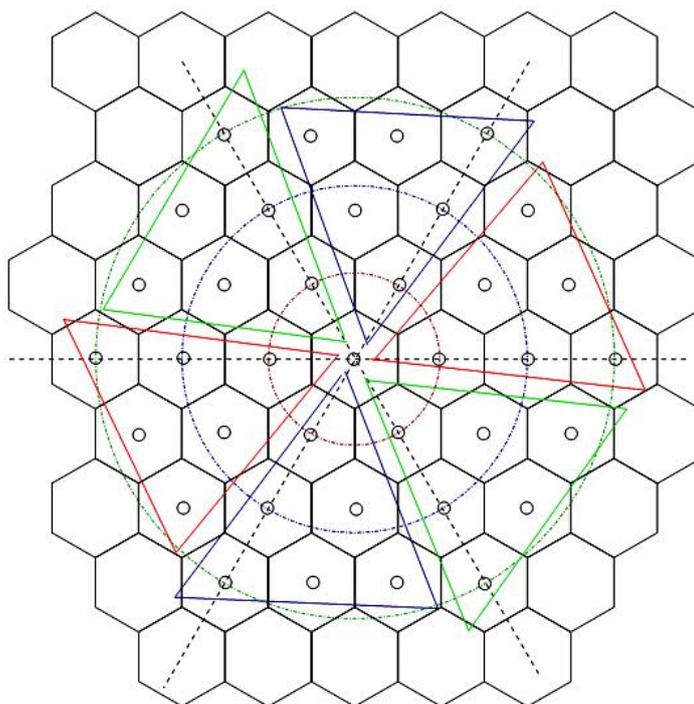
$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=j-1}^1 x_{ji} = 1 \quad (3.8)$$

สมการที่ (3.6) แสดงเงื่อนไขว่าค่าพลังงานที่แต่ละโหนดใช้จะต้องเท่าเทียมกัน สมการที่ (3.7) กำหนดขอบเขตบนและล่างของ  $x_{ji}$  อยู่ระหว่าง 0 และ 1 สมการที่ (3.8) ระบุเงื่อนไขว่าผลรวมอัตราส่วนของแต่ละโหนดจะต้องรวมกันได้เท่ากับ 1 เสมอ การแก้ปัญหานี้ จะต้องหาค่าของ  $x_{ji}$  ที่ให้ค่าตามวัตถุประสงค์ที่เราตั้งเป้าไว้

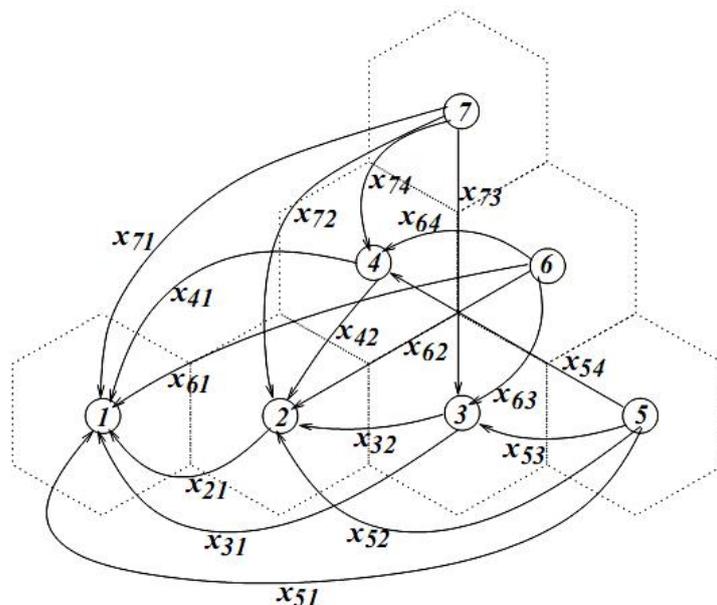
### 3.2. การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

ในบทนี้ตัวรับรู้ไร้สายถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอด้วยระยะห่างเท่า ๆ กันบนระนาบ 2 มิติ ในลักษณะรั้งดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีสถานีฐานอยู่ตรงกลาง



รูปที่ 3.3 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 3.3 เมื่อเราตัดแบ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายออกเป็น 6 ส่วน โดยมีสถานีฐานเป็นศูนย์กลาง เราจะได้ส่วนของเครือข่ายที่เหมือนกันดังรูปที่ 3.4 จำนวน 6 ส่วน ซึ่งเราสามารถใช้การคำนวณหาค่า  $x_{ji}$  ในแต่ละส่วนของเครือข่ายเพื่อใช้กับส่วนของเครือข่ายที่เหลือได้



รูปที่ 3.4 ส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงเศษหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้

จากรูปที่ 3.4 เรากำหนดให้  $x_{ji}$  เป็นอัตราส่วนของข้อมูลที่ถูส่งจากโหนด  $j$  ไปยังโหนด  $i$  โดยอัตราส่วนทั้งหมดของ  $x_{ji}$  จะถูกแสดงในเมทริกซ์  $X$  ด้านล่าง ซึ่งสมาชิกของเมทริกซ์จะหมายถึงโหนดที่รับข้อมูลเริ่มตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 7 ส่วนแถวของเมทริกซ์หมายถึงโหนดที่เป็นฝ่ายส่งข้อมูลเริ่มต้นด้วยโหนดที่ 2

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

โดย  $x_{ji}$  คือจำนวนแพ็คเก็ตที่ส่งจากตัวรับรู้  $j$  ไปยังตัวรับรู้  $i$  หากด้วยจำนวนแพ็คเก็ตทั้งหมดที่ถูกส่งจากตัวรับรู้  $j$

ระยะห่างของตัวรับรู้แต่ละโหนดในรูปที่ 3.4 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 เรากำหนดให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่โหนด  $j$  ได้รับจากโหนดอื่น มีจำนวนเป็น  $R_j$  ดังนั้น

$$R_7 = R_6 = R_5 = 0 \quad (3.9)$$

$$R_4 = \sum_{i=5,6,7} (R_i + m) \times x_{i4} \quad (3.10)$$

$$R_3 = \sum_{i=5,6,7} (R_i + m) \times x_{i3} \quad (3.11)$$

$$R_2 = \sum_{i=3,4} (R_i + m) \times x_{i2} + \sum_{i=5,6,7} (R_i + m) \times x_{i2} \quad (3.12)$$

จากระยะทางในเมทริกซ์  $D$  เราสามารถคำนวณหาพลังงานที่แต่ละโหนดจะใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้เรากำหนดให้พลังงานที่ใช้โดยโหนด  $j$  มีค่าเป็น  $C_j$  และพลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดใช้มีค่าเท่าเทียมกัน โดยค่าที่เราต้องการคือชุดของอัตราส่วนที่ทำให้พลังงานที่ใช้ในแต่ละโหนดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเงื่อนไขของสมการดังสมการที่ (3.6) ถึง (3.8) ที่กล่าวไปข้างต้น

จากสมการที่ (3.6) เราจะแทนค่า  $x_{74} = x_{53} = \alpha$  และแทนค่า  $x_{64} = x_{63} = \beta$  เพื่อแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ได้ชุดของสมการดังนี้

$$x_{74} + x_{72} + x_{71} = \alpha + x_{72} + x_{71} = 1 \quad (3.13)$$

$$x_{64} + x_{63} + x_{62} + x_{61} = 2\beta + x_{62} + x_{61} = 1 \quad (3.14)$$

$$x_{53} + x_{52} + x_{51} = \alpha + x_{52} + x_{51} = 1 \quad (3.15)$$

$$x_{42} + x_{41} = 1 \quad (3.16)$$

$$x_{32} + x_{31} = 1 \quad (3.17)$$

$$x_{21} = 1 \quad (3.18)$$

เราจะมี  $x_{ji}$  ซึ่งยังไม่ทราบค่าทั้งหมด 10 ค่าและมีสมการเชิงเส้นทั้งหมด 5 สมการ นำสมการที่ (3.9) ถึง (3.12) มาเขียนใหม่โดยแทนค่า  $\lambda = (1 + \alpha + \beta)$  ลงไปเพื่อลดรูปสมการ เราจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$R_7 = R_6 = R_5 = 0 \quad (3.19)$$

$$R_4 = (\lambda - 1) \times m \quad (3.20)$$

$$R_3 = (\lambda - 1) \times m \quad (3.21)$$

$$R_2 = m \times (x_{72} + x_{62} + x_{52} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32}) \quad (3.22)$$

ใช้ระยะทางจากเมทริกซ์  $D$  และอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุมาสร้างสมการพลังงานของตัวรับรู้แต่ละโหนดที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลทำการแทนที่  $E_{elec}$  ด้วย  $e \times \mathcal{E}_{amp}$  และแทนที่  $E_{agg}$  ด้วย  $f \times \mathcal{E}_{amp}$  จะได้ค่าพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวใช้ในการรับส่งข้อมูล

$$C_7 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times (4d^2 x_{72} + 7d^2 x_{71} + \alpha d^2 + e) \quad (3.23)$$

$$C_6 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times (3d^2 x_{62} + 7d^2 x_{61} + 2\beta d^2 + e) \quad (3.24)$$

$$C_5 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times (4d^2 x_{52} + 9d^2 x_{51} + \alpha d^2 + e) \quad (3.25)$$

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times [d^2 x_{42} + 3d^2 x_{41} + (e + f)(1 + \alpha + \beta)] \quad (3.26)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times [d^2 x_{32} + 4d^2 x_{31} + (e + f)(1 + \alpha + \beta)] \quad (3.27)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times [d^2 + (e + f)(x_{72} + x_{62} + x_{52} + x_{42} + x_{32} + 1)] \quad (3.28)$$

จากสมการ (3.23) ถึง (3.28) นำสมการ (3.23) มาจับคู่กับสมการ (3.24) ถึง (3.28) แล้วแก้สมการ เราจะได้สมการเชิงเส้นอีก 5 สมการคือ

$$4x_{72} + 7x_{71} - 3x_{62} - 7x_{61} = 2\beta - \alpha \quad (3.29)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - 4x_{52} + 9x_{51} = 0 \quad (3.30)$$

$$4d^2 x_{72} + 7d^2 x_{71} - d^2 x_{42} - 3d^2 x_{41} = (e + f)(\alpha + \beta) - \alpha d^2 \quad (3.31)$$

$$4d^2 x_{72} + 7d^2 x_{71} - d^2 x_{32} + 4d^2 x_{31} = (e + f)(\alpha + \beta) - \alpha d^2 \quad (3.32)$$

$$(4d^2 - e - f)x_{72} + 7d^2 x_{71} - (e + f)x_{72} - (e + f)x_{62} - (e + f)x_{52} - (e + f)x_{42} - (e + f)x_{32} = (1 - \alpha)d^2 \quad (3.33)$$

ดังนั้นเราจะได้สมการเชิงเส้นทั้งหมด 10 สมการ คือสมการ (3.13) ถึง (3.17) และสมการ (3.29) ถึง (3.33) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละโหนด ที่เราต้องการหาคือค่าของ

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

โดยเราต้องการค่าที่ทำให้พลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละตัวใช้มีค่าน้อยที่สุดนำสมการ (3.13) ถึง (3.17) และสมการ (3.29) ถึง (3.33) มาเขียนใหม่ในรูปของเมทริกซ์  $A_{eq} \cdot X = b_{eq}$  ได้ดังนี้

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 7 & -3 & -7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & -4 & -9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4d^2 & 7d^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d^2 & -3d^2 & 0 & 0 \\ 4d^2 & 7d^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d^2 & -4d^2 \\ 4d^2 - e - f & 7d^2 & -e - f & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 - 2\beta \\ 1 - \alpha \\ 1 \\ 1 \\ 2\beta - \alpha \\ 0 \\ (e + f)(\alpha + \beta) + f - \alpha d^2 \\ (e + f)(\alpha + \beta) + f - \alpha d^2 \\ f + (1 - \alpha)d^2 \end{bmatrix}$$

เนื่องจากเรากำหนดค่าของ  $x_{74}=x_{53}=\alpha$  และ  $x_{74}=x_{53}=\beta$  ซึ่งมีขอบเขตล่างที่ 0 และขอบเขตบนที่ 1 เราจะทำการแทนค่าของ  $\alpha$  และ  $\beta$  ตั้งแต่ค่า 0 จนถึง 1 โดยทำการเพิ่มค่าของ  $\alpha$  และ  $\beta$  ขึ้นทีละ 0.01 แล้วทำการแก้สมการเชิงเส้นด้านบน เราจะได้ค่าตัวแปร  $\alpha$ ,  $\beta$  และค่าของตัวแปร  $x_{ji}$  ที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 3.1 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนหนึ่งของอัตราส่วนในการส่งข้อมูลที่ทำให้ตัวรับรู้มีการใช้พลังงานเท่าเทียมกัน

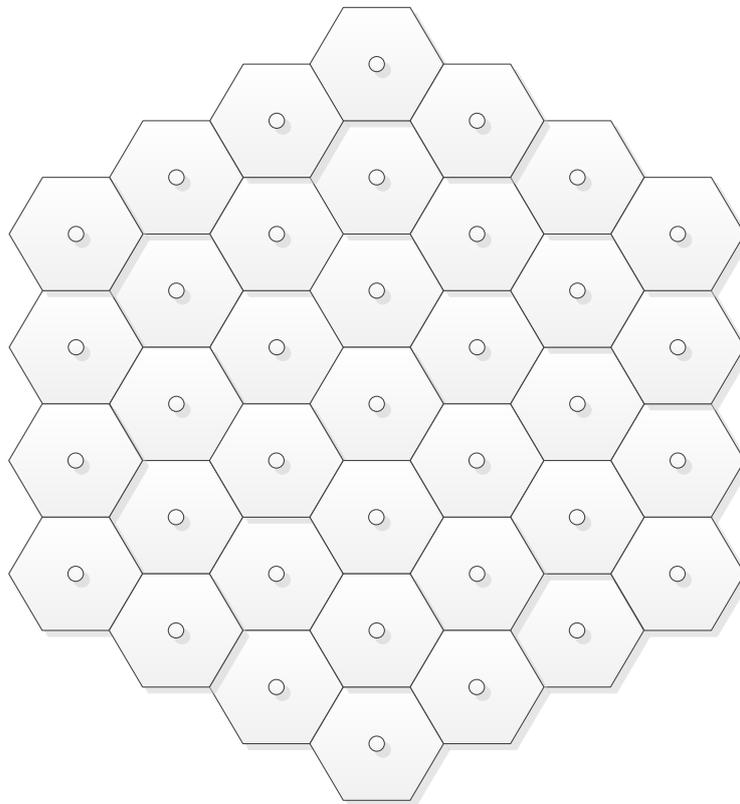
$\alpha$	$\beta$	$x_{72}$	$x_{71}$	$x_{62}$	$x_{61}$	$x_{52}$	$x_{51}$	$x_{42}$	$x_{41}$	$x_{32}$	$x_{31}$
0.224	0.114	0.011669	0.764331	0.002752	0.769248	0.317401	0.458599	5.89E-05	0.999941	0.333373	0.666627
0.225	0.113	0.009781	0.765219	0.005836	0.768164	0.315869	0.459131	0.000227	0.999773	0.333485	0.666515
0.225	0.114	0.009389	0.765611	0.002542	0.769458	0.315634	0.459366	0.002695	0.997305	0.33513	0.66487
0.226	0.112	0.007894	0.766106	0.00892	0.76708	0.314336	0.459664	0.000396	0.999604	0.333597	0.666403
0.226	0.113	0.007502	0.766498	0.005626	0.768374	0.314101	0.459899	0.002864	0.997136	0.335243	0.664757
0.226	0.114	0.00711	0.76689	0.002332	0.769668	0.313866	0.460134	0.005332	0.994668	0.336888	0.663112
0.227	0.111	0.006006	0.766994	0.012004	0.765996	0.312804	0.460196	0.000564	0.999436	0.33371	0.66629
0.227	0.112	0.005614	0.767386	0.008711	0.767289	0.312568	0.460432	0.003032	0.996968	0.335355	0.664645
0.227	0.113	0.005222	0.767778	0.005417	0.768583	0.312333	0.460667	0.0055	0.9945	0.337	0.663
0.227	0.114	0.004831	0.768169	0.002123	0.769877	0.312098	0.460902	0.007968	0.992032	0.338645	0.661355
0.228	0.11	0.004118	0.767882	0.015089	0.764911	0.311271	0.460729	0.000733	0.999267	0.333822	0.666178
0.228	0.111	0.003726	0.768274	0.011795	0.766205	0.311036	0.460964	0.003201	0.996799	0.335467	0.664533
0.228	0.112	0.003335	0.768665	0.008501	0.767499	0.310801	0.461199	0.005669	0.994331	0.337112	0.662888
0.228	0.113	0.002943	0.769057	0.005207	0.768793	0.310566	0.461434	0.008137	0.991863	0.338758	0.661242
0.228	0.114	0.002551	0.769449	0.001913	0.770087	0.310331	0.461669	0.010604	0.989396	0.340403	0.659597
0.229	0.109	0.002231	0.768769	0.018173	0.763827	0.309738	0.461262	0.000901	0.999099	0.333934	0.666066
0.229	0.11	0.001839	0.769161	0.014879	0.765121	0.309503	0.461497	0.003369	0.996631	0.33558	0.66442
0.229	0.111	0.001447	0.769553	0.011585	0.766415	0.309268	0.461732	0.005837	0.994163	0.337225	0.662775
0.229	0.112	0.001055	0.769945	0.008291	0.767709	0.309033	0.461967	0.008305	0.991695	0.33887	0.66113
0.229	0.113	0.000663	0.770337	0.004998	0.769002	0.308798	0.462202	0.010773	0.989227	0.340515	0.659485
0.229	0.114	0.000272	0.770728	0.001704	0.770296	0.308563	0.462437	0.013241	0.986759	0.34216	0.65784
0.23	0.108	0.000343	0.769657	0.021257	0.762743	0.308206	0.461794	0.00107	0.99893	0.334047	0.665953

เมื่อหาค่าอัตราส่วนในการส่งข้อมูลที่ทำให้ตัวรับรู้มีการใช้พลังงานเท่าเทียมกันได้ดังตารางที่ 3.1 แล้ว เราจะทำการแทนค่าของแต่ละแถวของข้อมูลในตารางที่ 3.1 ลงในสมการที่ 3.23 เพื่อเลือกอัตราส่วนที่ทำให้ตัวรับรู้ไร้สายมีการใช้พลังงานน้อยที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.3 การทดลองและหาค่าสมรรถนะของระบบ

ในส่วนนี้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบและผลที่ได้จากการจำลองระบบ โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นสมรรถนะของระบบ เมื่อนำวิธีการที่งานวิจัยนำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการของ LEACH วิธีการ Minimum Transmission Energy และ วิธีการ Direct Transmission

#### 3.3.1 ทอพอโลยีที่ใช้ในการจำลองระบบ



รูปที่ 3.5 ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

ทอพอโลยีที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าสมรรถนะของระบบ จะใช้ MATLAB ในการสร้างแบบจำลองของระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย โดยตัวรับรู้ไร้สายถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอบนระนาบ 2 มิติ ตามรูปที่ 3.5 ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำค่าอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.2 มาใช้กับแบบจำลองที่ใช้วิธีการที่งานวิจัยนี้เสนอ

### 3.3.2 ค่าชี้วัดสมรรถนะ

ในส่วนนี้จะทำการเลือกค่าชี้วัดสมรรถนะอันได้แก่

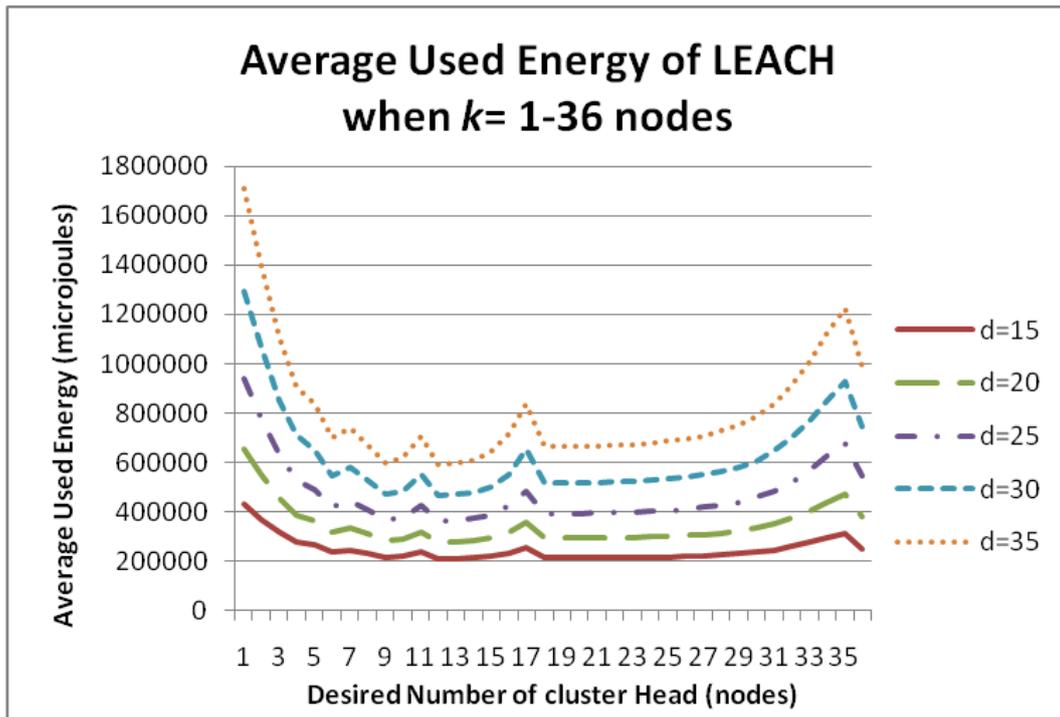
- ค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ (Average remaining energy)
- ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ใช้ในแต่ละรอบ (Average used energy)
- จำนวนรอบที่ตัวรับรู้ในระบบสามารถทำงานได้ (Lifetime of sensor nodes)
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ไร้สาย (Standard derivative of remaining energy)

### 3.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในส่วนนี้จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายซึ่งแสดงในตารางที่ 3.2 โดยอ้างอิงตามค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของ Simulation โดยการทดลองแต่ละวิธี จะมีทำซ้ำ 100 รอบ แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าพารามิเตอร์  $k$  จำนวนหัวหน้ากลุ่มที่คาดหวังที่เหมาะสมของ LEACH จะเปลี่ยนแปลงไปตามทอพอโลยี และตำแหน่งของสถานีฐาน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์  $k$  ที่ทำให้ LEACH ใช้พลังงานเฉลี่ยน้อยที่สุดบนทอพอโลยีดังรูป 3.5 คือ จำนวนของหัวหน้ากลุ่มมีจำนวน 1 ใน 3 ของจำนวนตัวรับรู้สมาชิกทั้งหมด หรือ 12 ตัวรับรู้ ตามค่าดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.2 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
จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ตัวรับรู้สร้าง ในแต่ละรอบ	$m$	แพ็คเกจ	1
ค่าคงที่ของพลังงาน ที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ	$E_{elec}$	จูลต่อบิตต่อเมตร ยกกำลังสอง	$50 \times 10^{-6}$
ค่าคงที่ของพลังงาน ที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ	$E_{agg}$	จูลต่อบิตต่อเมตร ยกกำลังสอง	$5 \times 10^{-6}$
ค่าคงที่ของพลังงาน ที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ	$\mathcal{E}_{amp}$	จูลต่อบิตต่อเมตร ยกกำลังสอง	$100 \times 10^{-9}$
ขนาดของกลุ่มข้อมูล	$pks$	บิต	2000
จำนวนหัวหน้ากลุ่มที่คาดหวัง (เฉพาะวิธี LEACH)	$k$	โหนด	12



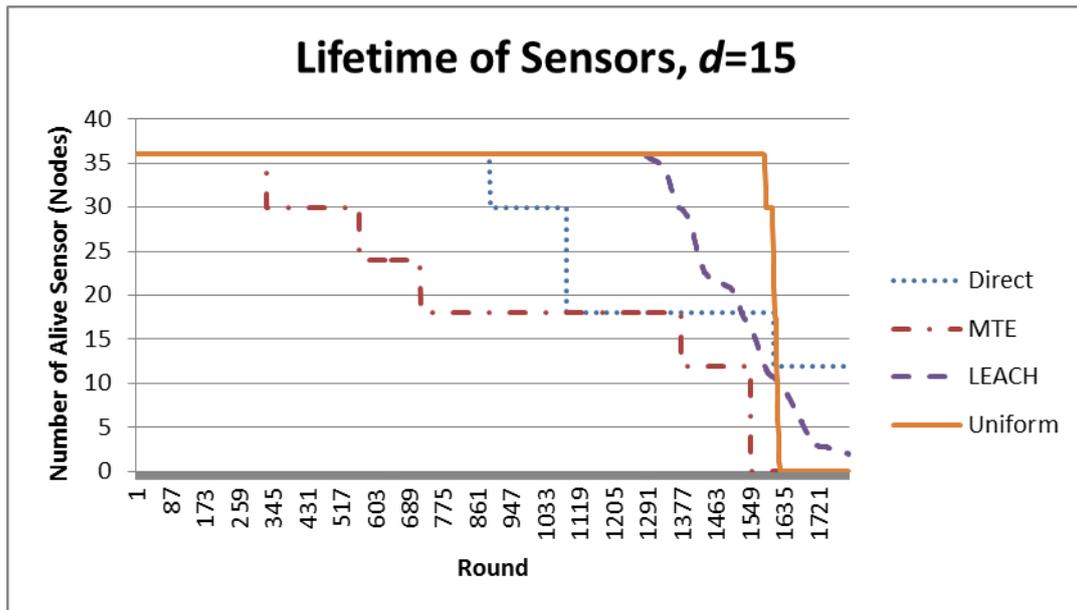
รูปที่ 3.6 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ตัวรับรู้ใช้ในวิธี LEACH เมื่อ  $k$  มีค่า 1 ถึง 36 โหนด

### 3.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ

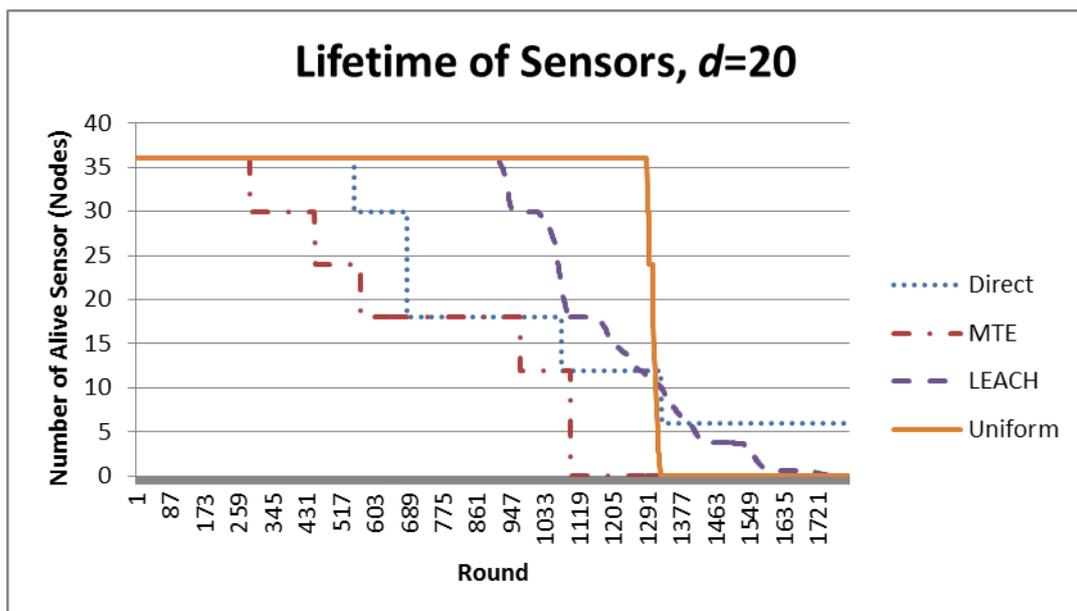
จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้จะมุ่งเป้าหมายไปที่การลดการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สาย เพื่อให้อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้ตัวรับรู้ไร้สายบางตัวในระบบหมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่นๆ เป็นเหตุให้ผู้ใช้งานสูญเสียข้อมูลที่ควรจะได้รับจากตัวรับรู้ที่เหล่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มเป้าหมายในการกระจายพลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในระบบให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถได้รับข้อมูลจากตัวรับรู้ทุกตำแหน่งในเครือข่าย ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบเครือข่ายคือ พลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้แต่ละตัว

### 3.3.5 สมรรถนะของระบบ

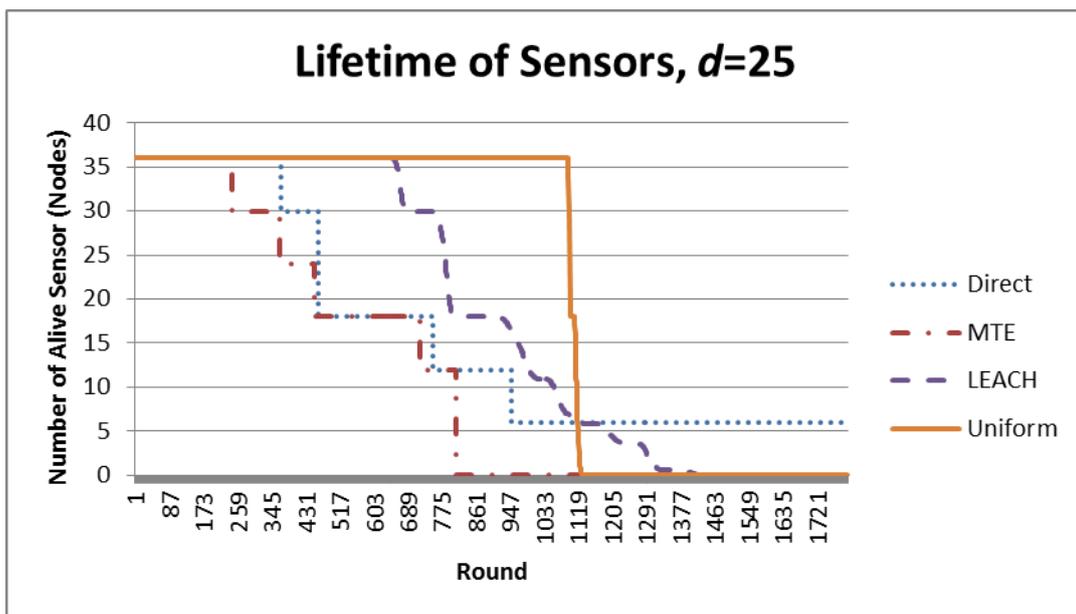
ในรูปที่ 3.7 ถึง 3.11 แสดงค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้วิธีการต่างๆ กัน เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร ซึ่งหากพิจารณารอบที่ตัวรับรู้ไร้สายเริ่มหมดพลังงาน จะเห็นได้ว่าวิธีการ Uniform ที่งานวิจัยนี้นำเสนอ ตัวรับรู้ไร้สายเริ่มหมดพลังงานช้ากว่าวิธีการอื่นๆ



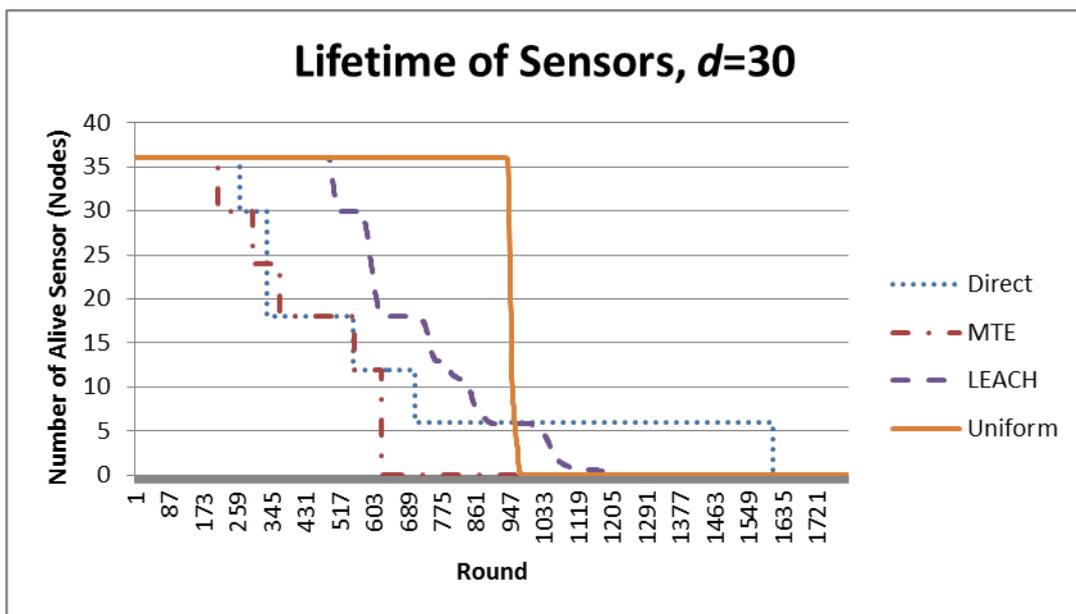
รูปที่ 3.7 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



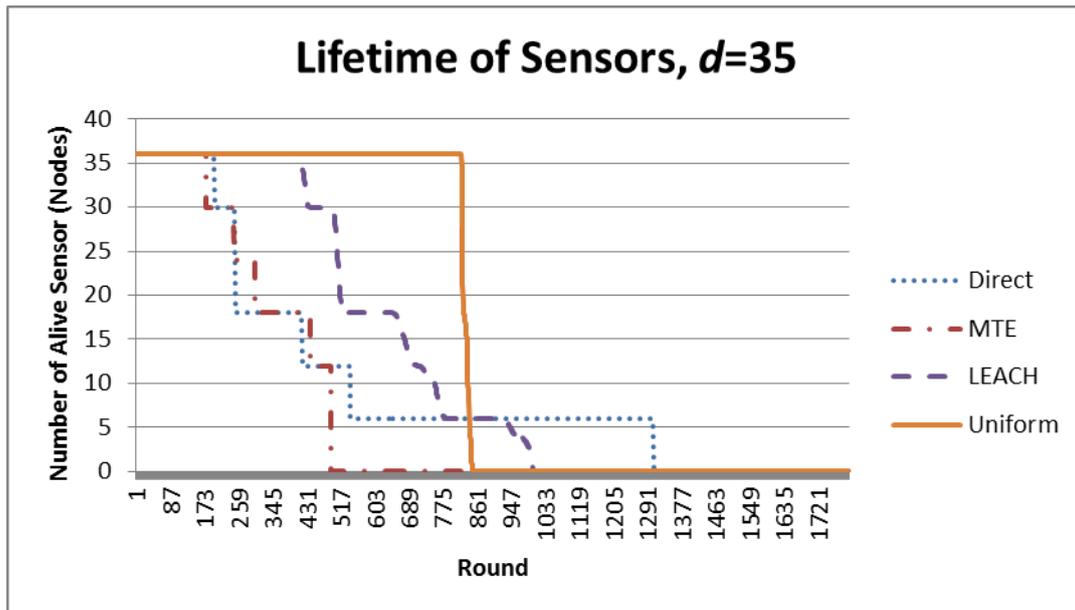
รูปที่ 3.8 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 3.9 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



รูปที่ 3.10 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



รูปที่ 3.11 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

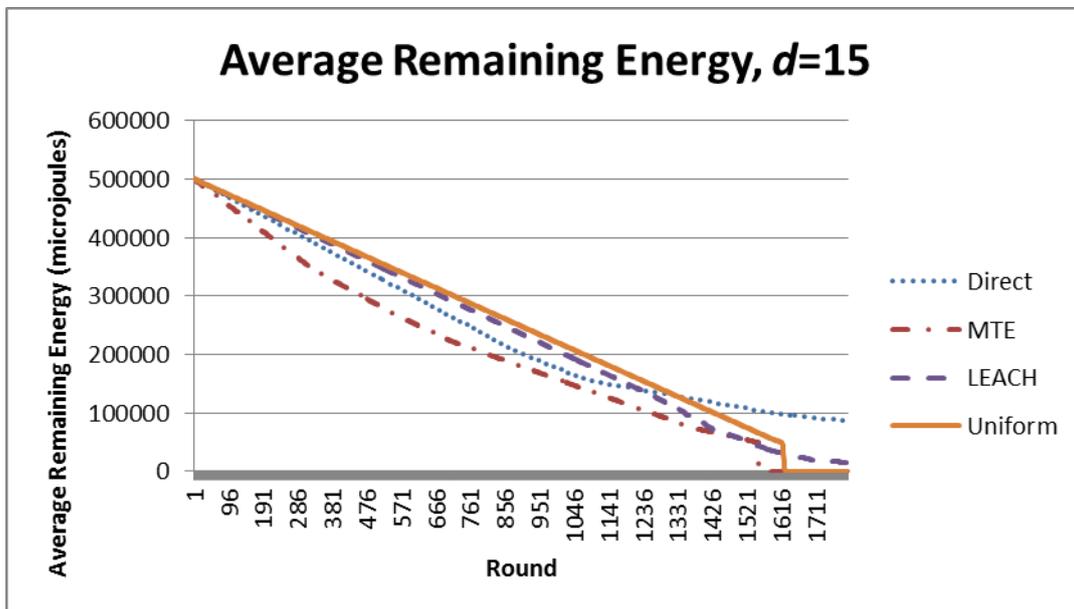
รูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.11 แนวโน้มของกราฟอยู่ในลักษณะเดียวกัน คือในวิธีการ Uniform ที่เรานำเสนอ ตัวรับรู้ไร้สายจะเริ่มหมดพลังงานช้ากว่าวิธีการอื่น ตามด้วยวิธีการ LEACH ตามด้วย Direct Transmission และ Minimum Transmission Energy ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.11 สามารถนำจำนวนรอบซึ่งตัวรับรู้เริ่มหมดพลังงาน รอบที่ตัวรับรู้จำนวนครึ่งหนึ่งหมดพลังงาน และรอบที่ตัวรับรู้จำนวนสองส่วนสามหมดพลังงาน มาสรุปเป็นตารางแสดงอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายได้ดังตารางที่ 3.3

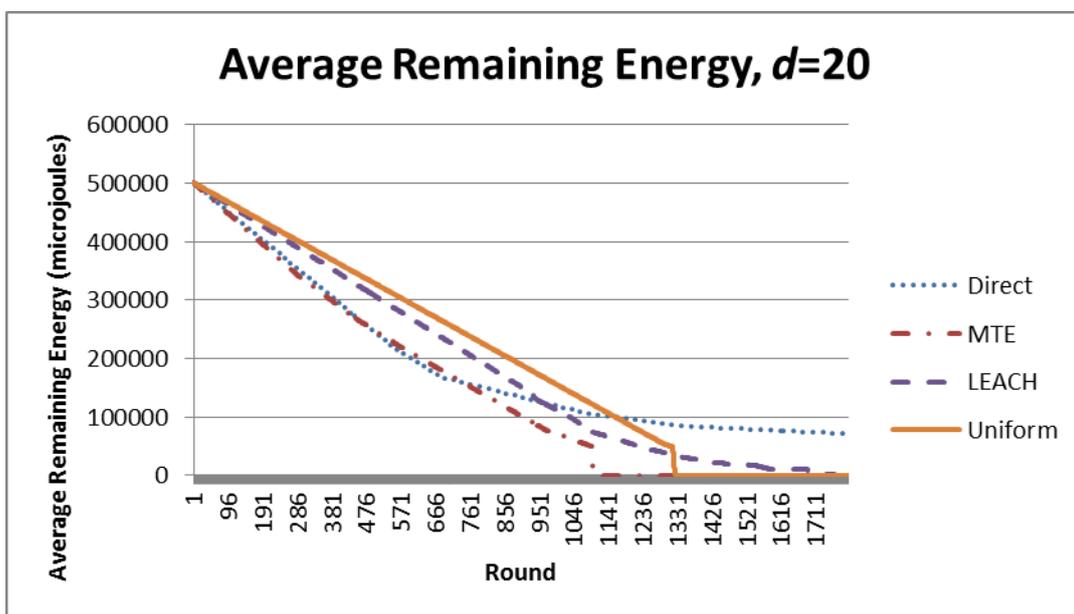
ตารางที่ 3.3 อายุการใช้งานของตัวรับรู้เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 ถึง 35 เมตร

$d$ (m)	Protocol	Round that 1st node die	Round that 1/2 of nodes die	Round 2/3 of nodes die
15	Direct	894	1087	1610
	MTE	331	718	1377
	LEACH	1321	1529	1589
	Uniform	1588	1613	1618
20	Direct	551	684	1074
	MTE	287	568	971
	LEACH	923	1101	1270
	Uniform	1290	1306	1310
25	Direct	370	464	753
	MTE	246	453	721
	LEACH	661	812	993
	Uniform	1093	1100	1112
30	Direct	264	333	551
	MTE	209	366	555
	LEACH	495	629	793
	Uniform	942	949	950
35	Direct	198	250	419
	MTE	178	300	441
	LEACH	419	527	712
	Uniform	822	827	836

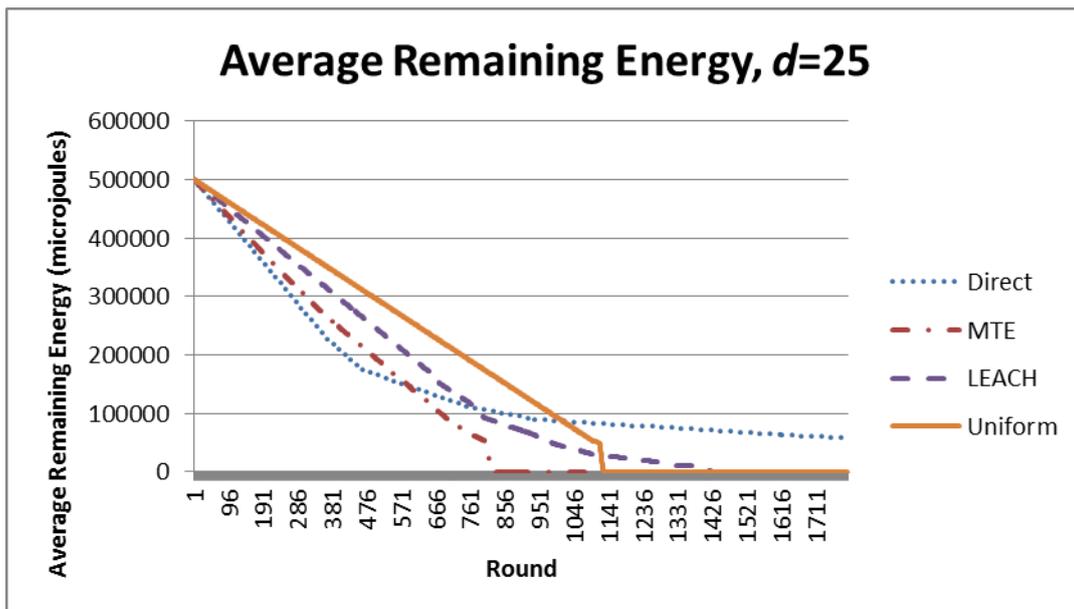
ในรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.16 แสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรูไร้สายที่ใช้วิธีการต่างๆ กัน เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรูที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร



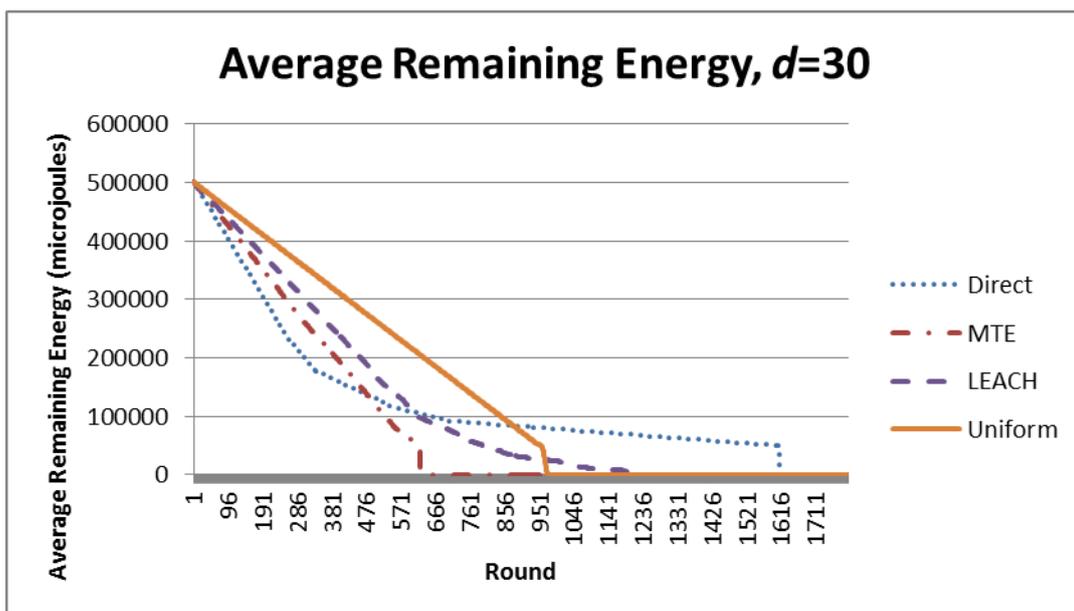
รูปที่ 3.12 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรูไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรูที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



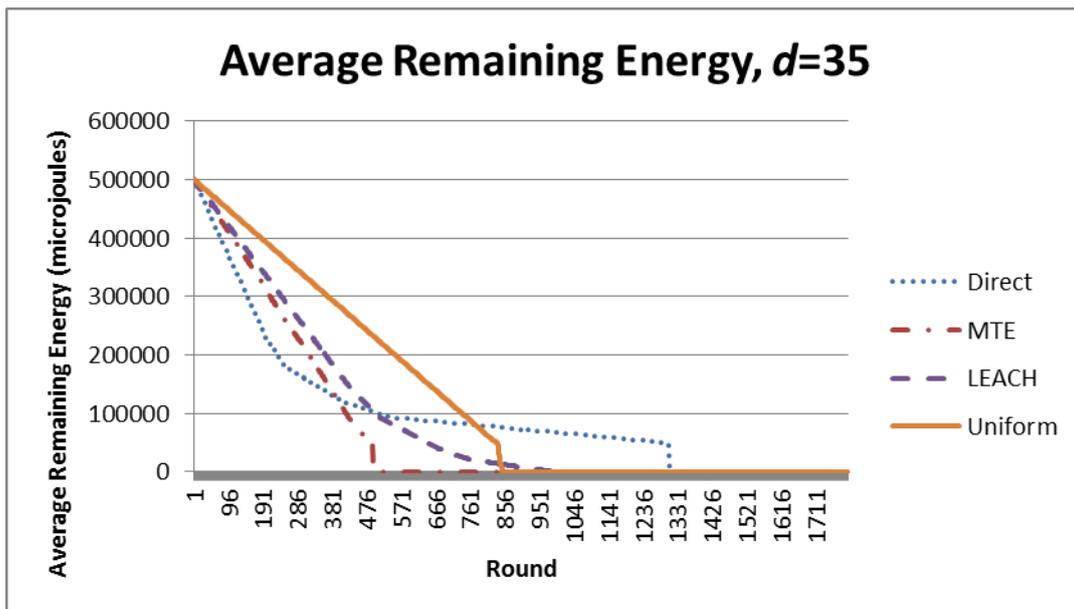
รูปที่ 3.13 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรูไร้สายเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรูที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 3.14 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



รูปที่ 3.15 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร

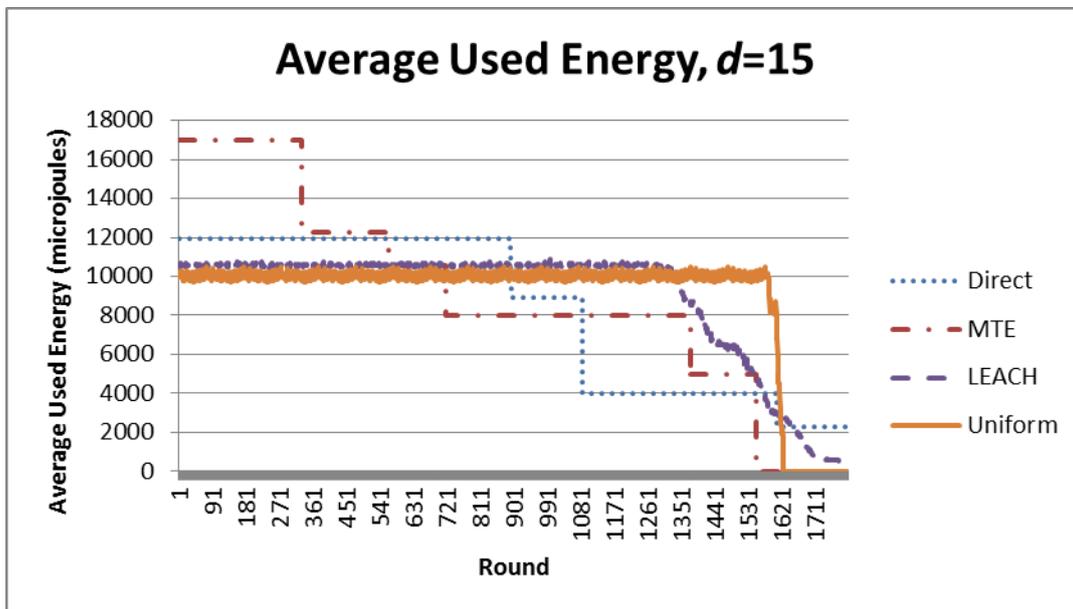


รูปที่ 3.16 พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

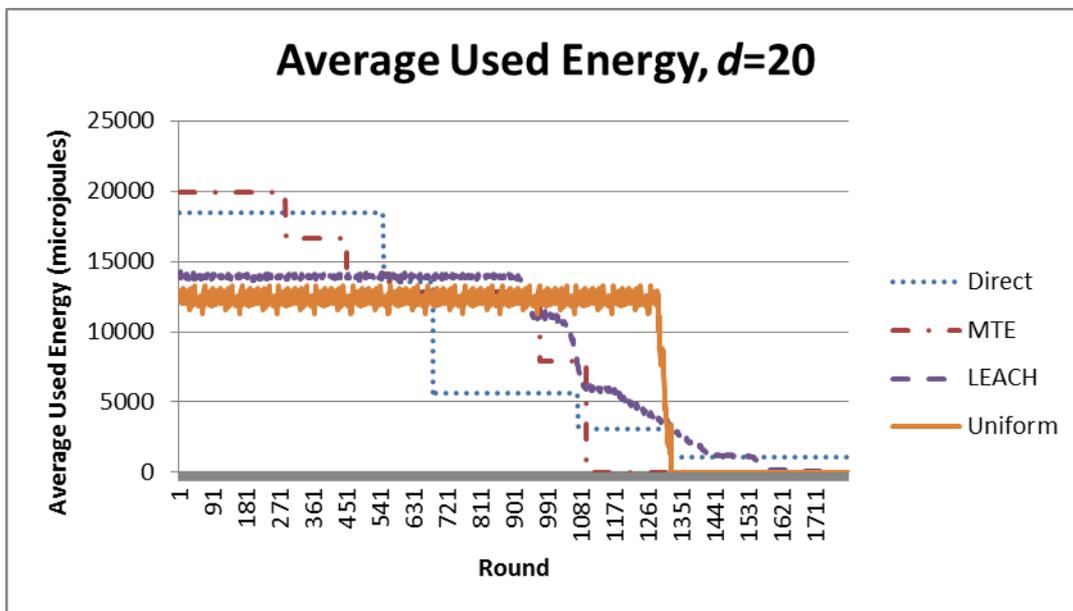
พลังงานเฉลี่ยที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ซึ่งใช้วิธีการ Uniform มีค่ามากกว่าพลังงานเฉลี่ยของตัวรับรู้ซึ่งใช้วิธีของ Minimum Transimission Energy และ LEACH ทำให้ตัวรับรู้ในวิธีการ Uniform หมดพลังงานช้ากว่าตัวรับรู้ในวิธีการอื่นๆ

รวมทั้งวิธีการ Uniform ทำให้ตัวรับรู้ทุกตัวหมดพลังงานในเวลาใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ในวิธีการอื่นๆ จึงสามารถทำการติดตั้งตัวรับรู้ใหม่ทั้งระบบได้ในครั้งเดียว โดยไม่ต้องตรวจสอบตัวรับรู้ทีละตัวว่าตัวรับรู้ตัวใดหมดพลังงาน แล้วค่อยๆ ทำการเปลี่ยนตัวรับรู้ที่หมดพลังงาน

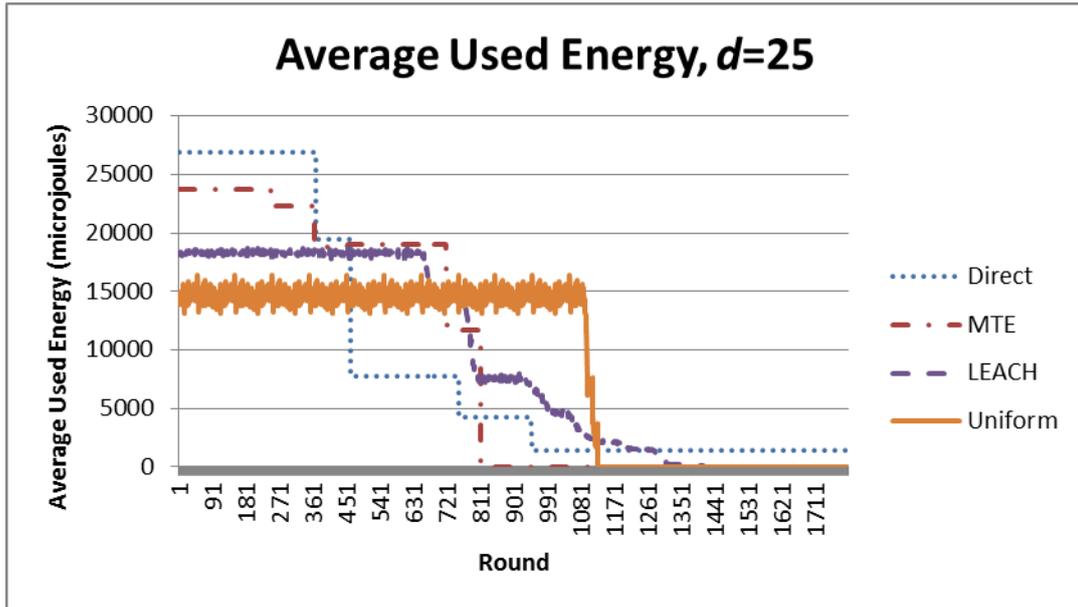
ในรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.21 แสดงพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายใช้งานในแต่ละรอบ เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร



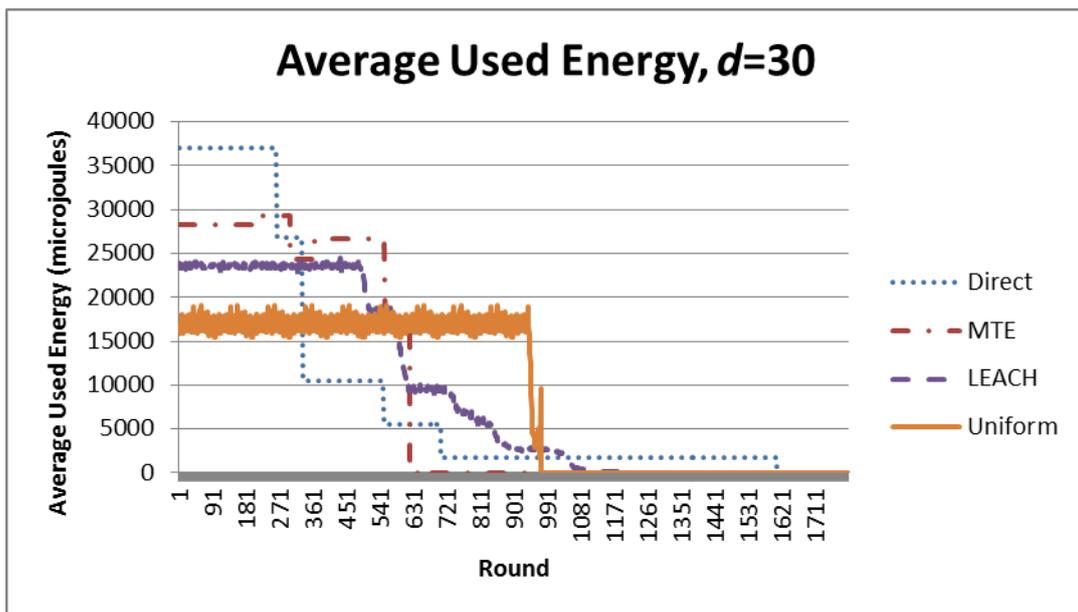
รูปที่ 3.17 พลังงานที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



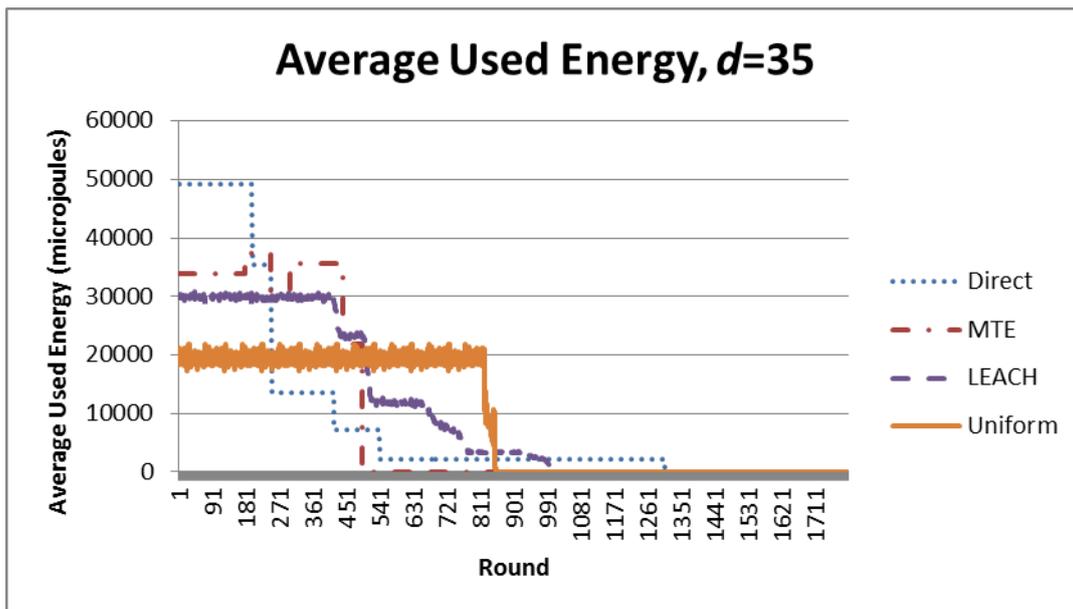
รูปที่ 3.18 พลังงานที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 3.19 พลังงานที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



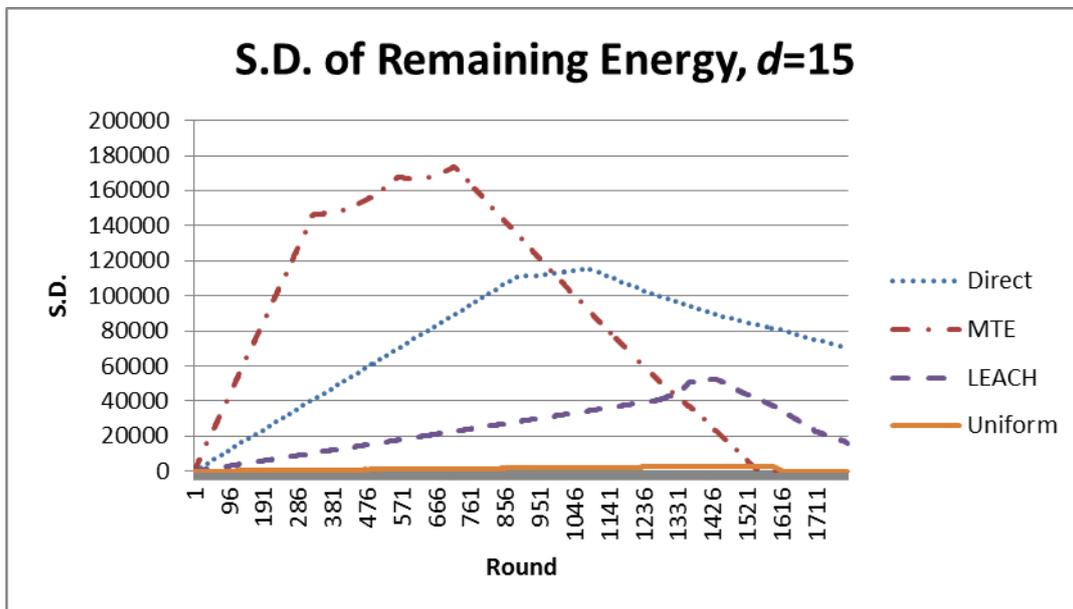
รูปที่ 3.20 พลังงานที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



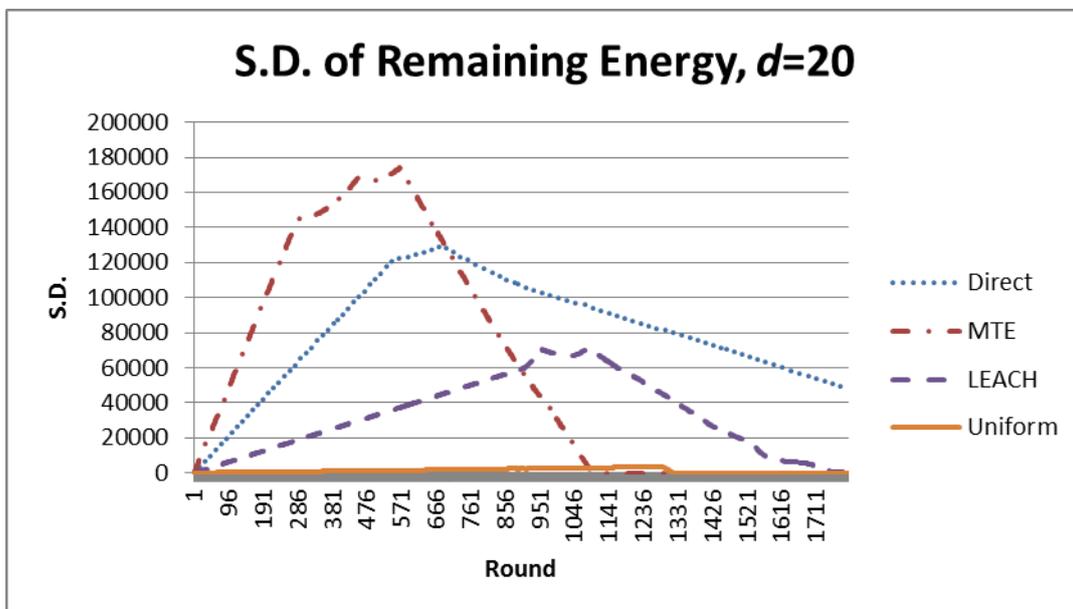
รูปที่ 3.21 พลังงานที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

จากรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.21 พลังงานเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้ในวิธีการ Uniform ในแต่ละรอบมีค่าคงที่ โดยจะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในการใช้พลังงานวิธีของ Minimum Transimission Energy และ LEACH ทำให้อายุการใช้งานของตัวรับรู้ในวิธีการ Uniform ยาวกว่าวิธีอื่นๆ

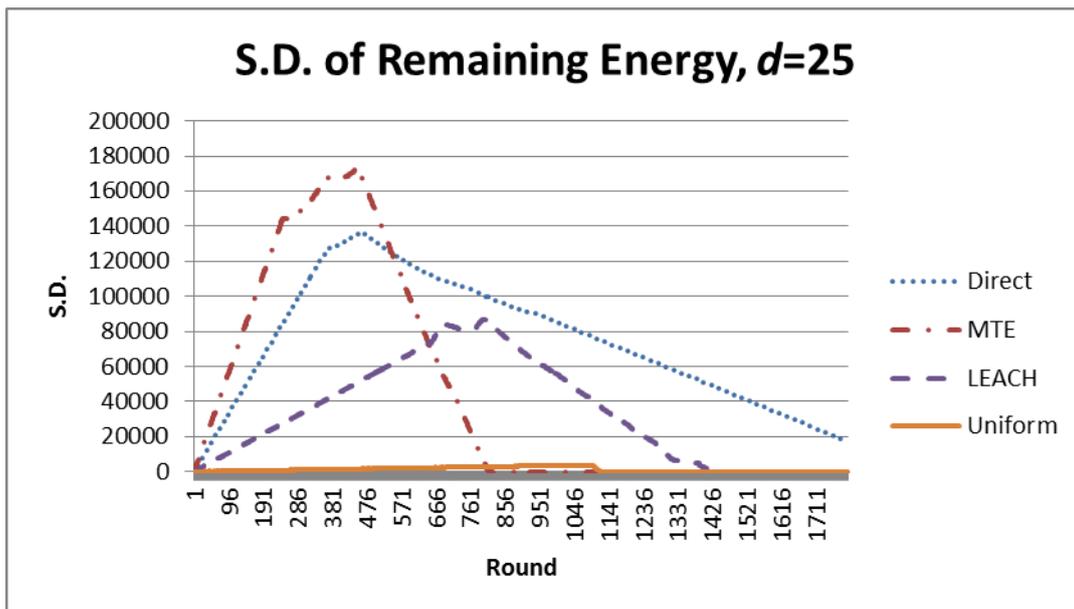
รูปที่ 3.22 ถึง 3.26 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ไร้สายในแต่ละรอบ เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ 15 ถึง 35 เมตร



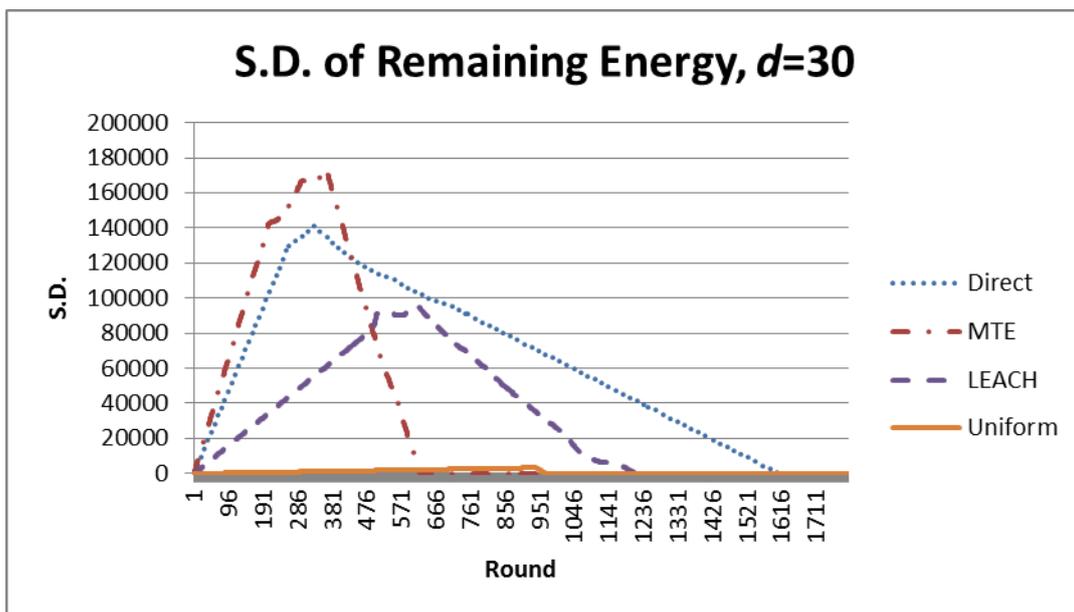
รูปที่ 3.22 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งาน เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 15 เมตร



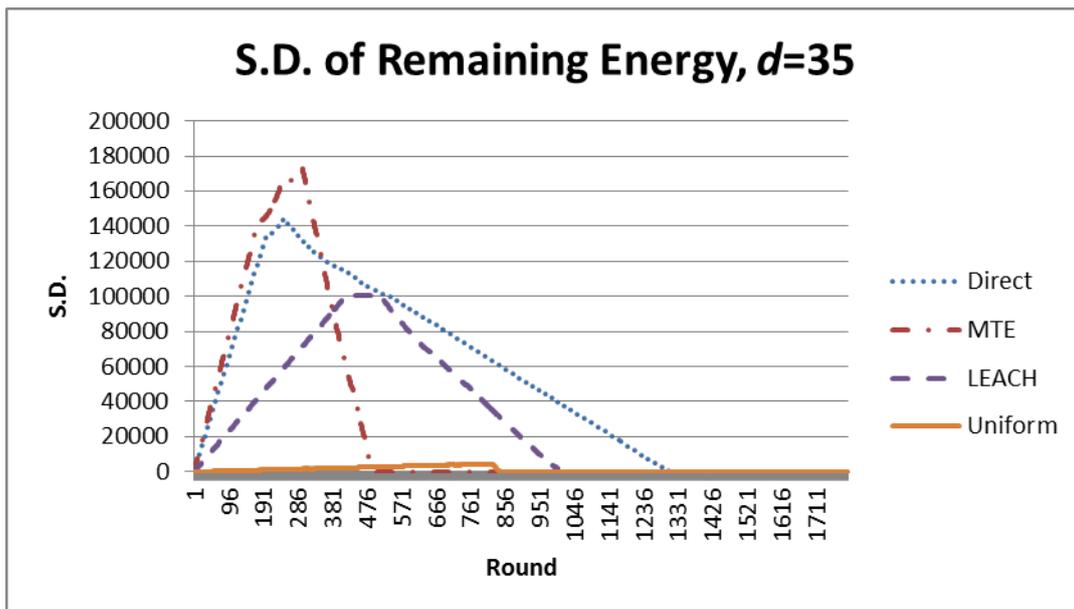
รูปที่ 3.23 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งาน เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 20 เมตร



รูปที่ 3.24 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งาน  
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 25 เมตร



รูปที่ 3.25 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ใช้งาน  
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่อยู่ติดกันมีค่า 30 เมตร



รูปที่ 3.26 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับผู้ใช้งาน  
เมื่อระยะทางระหว่างตัวรับที่อยู่ติดกันมีค่า 35 เมตร

จากรูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.26 จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับผู้รับรายทุกตัว เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว วิธีการ Uniform มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ

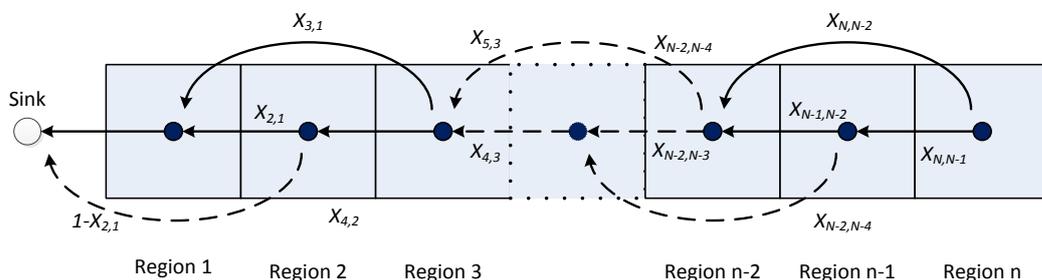
## บทที่ 4

### การกระจายการใช้พลังงานโดยวิธีการส่งข้อมูลหลายเส้นทาง สำหรับเครือข่ายตัวรับรู้ไว้ โดยส่ววางตำแหน่งของตัวรับรู้ไว้

จากหัวข้อที่ 2.2 เราต้องการจะนำเสนองานวิจัยที่สามารถลดปัญหาการใช้พลังงานปริมาณมากในบริเวณที่ใกล้สถานีฐาน โดยไม่ต้องการเพิ่มเติมอุปกรณ์พิเศษอื่นใดและยังคงความละเอียดของข้อมูลจากกลุ่มตัวรับรู้ไว้สายให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ในบทที่ 3 เราได้กล่าวถึงงานวิจัยซึ่งมีการติดตั้งตัวรับรู้ไว้สายบนระนาบ 2 มิติในลักษณะของรังผึ้ง โดยมีสถานีฐานอยู่ตรงกลาง ซึ่งการติดตั้งในลักษณะนี้อาจจะไม่เหมาะกับงานที่ต้องการจำนวนของตัวรับรู้ไว้สายที่มาก เนื่องจากการเพิ่มจำนวนชั้นของตัวรับรู้ไว้สายจะทำให้การคำนวณมีความซับซ้อน ในบทที่ 4 นี้ เราจึงได้นำเสนองานวิจัยที่สามารถกระจายตัวรับรู้ไว้สายลงบนพื้นที่แบบสุ่ม โดยสถานีฐานอยู่ภายนอกพื้นที่ที่ตรวจวัดดังรูปที่ 4.1 โดยในเกณฑ์วิธีในงานวิจัยของเรามีชื่อว่า Multipath Energy Balance (MEB)

#### 4.1. แบบจำลองของระบบ

ให้ตัวรับรู้ไว้สายถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่ที่ตรวจวัด แล้วทำการแบ่งพื้นที่ที่ตรวจวัดออกเป็นพื้นที่ย่อย (Region) ซึ่งกลุ่มตัวรับรู้ไว้สายในแต่ละพื้นที่ย่อยสามารถส่งข้อมูลของตนเองออกไปสองเส้นให้กับกลุ่มตัวรับรู้ไว้สาย 2 พื้นที่ย่อยด้านหน้า ดังรูปที่ 4.1 โดยค่าอัตราส่วน  $x_{j,i}$  เป็นอัตราส่วนในการส่งข้อมูลจากพื้นที่ย่อย  $j$  ไปยังพื้นที่ย่อย  $i$  ซึ่งเราจะทำการหาจำนวนพื้นที่ย่อยที่เหมาะสมรวมถึงอัตราส่วน  $x_{j,i}$  ที่สามารถทำให้กลุ่มของตัวรับรู้ไว้ในทุกพื้นที่ย่อยมีการใช้พลังงานอย่างเท่าเทียม



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของระบบ

## 4.2. แบบจำลองพลังงาน

แบบจำลองการใช้พลังงานในงานวิจัยนี้เราได้อ้างอิงมาจากแบบจำลองพลังงานที่ใช้กันแพร่หลายในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [2] [4] [5][8][14][15][16]

พลังงานในการรับข้อมูลขนาด  $l$  บิต  $E_{Rx}(l)$  มีค่าดังสมการที่ 4.1

$$E_{Rx}(l) = l\varepsilon_{elec} \quad (4.1)$$

$E_{Tx}(l, d)$  เป็นพลังงานในการส่งข้อมูลขนาด  $l$  บิตไปเป็นระยะทาง  $d$  มีค่าดังสมการที่ 2 ซึ่งหากระยะทาง  $d$  มีค่าน้อยกว่าระยะ  $d_0$  จะใช้ค่าตามบรรทัดแรกของสมการที่ 2 หากว่าระยะทาง  $d$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $d_0$  จะใช้ค่าตามบรรทัดที่สองของสมการที่ 2

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l(\varepsilon_{elec} + \varepsilon_{fs}d^2) & ,d < d_0 \\ l(\varepsilon_{elec} + \varepsilon_{mp}d^4) & ,d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{elec}$  คือค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการเลี้ยงวงจรภาครับและภาคส่ง

$\varepsilon_{fs}$  คือค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการขยายสัญญาณเพื่อส่งแบบ friss-free space

$\varepsilon_{mp}$  คือค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการขยายสัญญาณเพื่อส่งแบบ multi-path fading

$d_0$  คือระยะทางที่เปลี่ยนการส่งจาก friss-free space เป็น multi-path fading มีค่าประมาณ

87 เมตร

## 4.3 รายละเอียดเกณฑ์วิธี

### 4.3.1 การเลือกหัวหน้ากลุ่ม

กระบวนการเลือกหัวหน้ากลุ่มในเกณฑ์วิธีนี้จะทำการเลือกหัวหน้ากลุ่มชั่วคราว (Tentative Cluster Head) จากตัวรับรู้ทั้งหมดในแต่ละพื้นที่ย่อย ด้วยค่าความน่าจะเป็นของหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวของตัวรับรู้  $j$  ใด ๆ  $P_t(j)$

$$P_t(j) = T \frac{E_0(j)}{\bar{E}_0} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $T$  เป็นอัตราส่วนของหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวที่ต้องการ

$E_0(j)$  เป็นค่าพลังงานเริ่มต้นของตัวรับรู้  $j$

$\bar{E}_0$  เป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานเริ่มต้นของตัวรับรู้ทุกตัวในระบบ

ขั้นตอนการหาค่า  $P_i(j)$  จะทำเพียงครั้งเดียวหลังจากเริ่มการทดลอง ตัวรับรู้ใดที่มีพลังงานเริ่มต้นสูงก็จะมีค่า  $P_i(j)$  ที่สูงตามไปด้วย หากพลังงานเริ่มต้นของตัวรับรู้ทุกตัวในระบบมีค่าเท่ากันค่าของ  $P_i(j)$  ก็จะมีค่าเท่ากัน

หลายจากที่ได้หัวหน้ากลุ่มชั่วคราวขึ้นมาแล้ว หัวหน้ากลุ่มชั่วคราวจะทำการประกาศค่าพลังงานคงเหลือของตนเองให้หัวหน้ากลุ่มชั่วคราวตัวอื่น ๆ ในรัศมี  $r_i$  ว่าตนเองเป็นมีพลังงานคงเหลือเท่าใดด้วย CH-Advertisement จากนั้นหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวที่มีพลังงานคงเหลือมากที่สุดเปรียบเทียบกับหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวในรัศมี  $r_i$  ของตัวมันเองก็จะขึ้นมาทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่ม

วิธีการเลือกหัวหน้ากลุ่มนี้มาจาก UCR [15] ใน EC ซึ่งพัฒนาให้ขั้นตอนในการเลือกหัวหน้ากลุ่มให้ใช้พลังงานลดลงจาก EC ค่า  $r_i$  ซึ่งเป็นค่ารัศมีของกลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i$  ใน EC [16] จะใช้ค่า

$$r_i = \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma P_{ch}(i)}} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $\sigma$  เป็นความหนาแน่นของตัวรับรู้ในพื้นที่ตรวจวัดและ  $P_{ch}(i)$  เป็นความน่าจะเป็นของการเป็นหัวหน้ากลุ่มในแต่ละพื้นที่ย่อย แต่หลังจากที่เราทดสอบค่า  $r_i$  ที่ได้จาก EC เมื่อนำมาสร้างกลุ่มตัวรับรู้ไร้สาย จะได้จำนวนหัวหน้ากลุ่มมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากความน่าจะเป็น  $P_{ch}(i)$

ดังนั้นเพื่อให้จำนวนกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายในพื้นที่ย่อยมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากความน่าจะเป็น  $P_{ch}(i)$  เราจึงทำการหาค่าของ  $r_i$  ด้วยวิธี Monte Carlo Method โดยการสร้างพื้นที่ขนาดเท่าพื้นที่ย่อยแล้วทำการสุ่มจุดเพื่อใช้เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมรัศมีลงบนพื้นที่ย่อย โดยเราจะทำการเปลี่ยนรัศมีของวงกลมหลังจากทำการสุ่มจุดลงไป 10,000 จุด ทำการวัดพื้นที่ของวงกลมโดยไม่รวมพื้นที่ของวงกลมที่อยู่ภายนอกพื้นที่ย่อย นำมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่ในพื้นที่ย่อยที่ค่ารัศมีต่างๆ กัน

เมื่อเรานำค่าที่  $r_i$  ได้จากวิธี Monte Carlo Method ไปใช้ในขั้นตอนการเลือกหัวหน้ากลุ่มจะได้จำนวนหัวหน้ากลุ่มเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากความน่าจะเป็น  $P_{ch}(i)$  พลังงานที่ใช้ในการเลือกหัวหน้ากลุ่มเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$E_{Adv}^i = n_i T [E_{Tx}(l_c, r_i) + (\pi r_i^2 \sigma T - 1) E_{Rx}(l_c)] \quad (4.5)$$

เมื่อ $l_c$	เป็นขนาดของแพ็คเกจควบคุม (Control Packet)
$n_i$	เป็นจำนวนตัวรับรู้ในพื้นที่ย่อย $i$
T	เป็นอัตราส่วนของหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวที่ต้องการ
$\pi r_i^2 \sigma T$	เป็นจำนวนหัวหน้ากลุ่มชั่วคราวทั้งหมดภายในวงกลมรัศมี $r_i$

### 4.3.2 การสร้างกลุ่มย่อยของตัวรับรู้ไร้สาย

หลังจากที่ได้หัวหน้ากลุ่มแล้ว หัวหน้ากลุ่มแต่ละตัวจะทำการประกาศ CH-Announcement ออกไปให้ตัวรับรู้ไร้สายในรัศมี  $\alpha r_i$  ทราบว่าตัวมันทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่ม เมื่อ  $\alpha = \sqrt{2 \ln 10}$  เป็นตัวคูณซึ่งทำให้ตัวรับรู้ 99% ในพื้นที่ย่อยได้ยินการประกาศ CH-Announcement [16]

เมื่อตัวรับรู้แต่ละตัวได้ยิน CH-Announcement มันจะทำการเลือกหัวหน้ากลุ่มของตนเองตามค่า RSSI ที่สูงที่สุด จากนั้นมันจะทำการส่ง CH-Association ไปหาหัวหน้ากลุ่มที่มันเลือกไว้ แล้วรอการตอบกลับด้วย CH-Confirmation จากหัวหน้ากลุ่ม พลังงานที่ใช้ในขั้นตอนเหล่านี้เป็นไปตามสมการ 4.6-4.8 ด้านล่างตามลำดับ

$$E_{Ann}^i = n_{ch} [E_{Tx}(l_c, \alpha r_i) + (\pi \alpha^2 r_i^2 \sigma - 1) E_{Rx}(l_c)] \quad (4.6)$$

$$E_{Assoc}^i = n_i (1 - P_{ch}^i) [E_{Tx}(l_c, \frac{2}{3} \alpha r_i) + E_{Rx}(l_c)] \quad (4.7)$$

$$E_{Conf}^i = n_{ch} E_{Tx}(l_c, \alpha r_i) + N_i (1 - P_{ch}^i) E_{Rx}(l_c) \quad (4.8)$$

เมื่อ  $n_{ch}$  เป็นจำนวนตัวรับรู้หัวหน้ากลุ่มในแต่ละพื้นที่ย่อย  
 $\pi \alpha^2 r_i^2 \sigma$  เป็นจำนวนตัวรับรู้ทั้งหมดภายในวงกลมรัศมี  $\alpha r_i$   
 $\frac{2}{3} \alpha r_i$  เป็นค่าเฉลี่ยระยะทางจากจุดใด ๆ ไปยังจุดศูนย์กลางในวงกลมรัศมี  $\alpha r_i$

พลังงานในการสร้างกลุ่มของพื้นที่  $i$  ต่อรอบมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานในการเลือกหัวหน้ากลุ่ม และพลังงานในขั้นตอนการสร้างกลุ่มย่อยในพื้นที่  $i$  ซึ่งสามารถเขียนใหม่จากสมการที่ 4.5-4.8 ได้ดังนี้

$$E_{cluster}^i = n_i T [E_{Tx}(l_c, r_i) + (\pi r_i^2 \sigma T - 1) E_{Rx}(l_c)] + n_{ch} [E_{Tx}(l_c, \alpha r_i) + (\pi \alpha^2 r_i^2 \sigma - 1) E_{Rx}(l_c)] \\ + n_i (1 - P_{ch}^i) [E_{Tx}(l_c, \frac{2}{3} \alpha r_i) + E_{Rx}(l_c)] + n_{ch} E_{Tx}(l_c, \alpha r_i) + N_i (1 - P_{ch}^i) E_{Rx}(l_c) \quad (4.9)$$

### 4.3.3 การติดต่อสื่อสารภายในกลุ่มและการประมวลผลข้อมูล

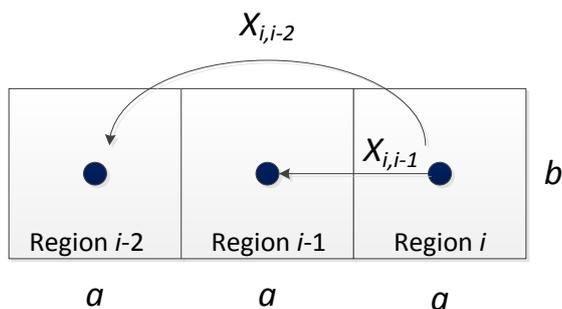
หลังจากที่ทำการสร้างกลุ่มเสร็จแล้ว สมาชิกภายในกลุ่มจะทำการส่งค่าที่ตรวจวัดได้จากรอบข้างกลับไปให้หัวหน้ากลุ่มของตนเอง หัวหน้ากลุ่มจะทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากสมาชิกกลุ่มแล้วทำการประมวลผล ก่อนจะส่งต่อข้อมูลออกไปนอกกลุ่มไปยังสถานีฐาน พลังงานที่ใช้ในขั้นตอนเป็นไปตามสมการด้านล่าง พลังงานในการแลกเปลี่ยนข้อมูลภายในกลุ่มของพื้นที่ย่อย  $i$  และพลังงานในการประมวลผลข้อมูลของพื้นที่ย่อย  $i$  ต่อรอบมีค่าตามสมการด้านล่างต่อไปนี้ตามลำดับ

$$E_{intra}^i = n_i (1 - P_{ch}^i) [E_{Tx}(l_d, \frac{2}{3} r_i) + E_{Rx}(l_d)] \quad (4.10)$$

$$E_{proc}^i = n_i l_d \varepsilon_{agg} \quad (4.11)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{agg}$  เป็นค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการประมวลผลต่อบิต  
 $l_d$  เป็นขนาดของแพ็คเกจข้อมูล (Data Packet)

#### 4.3.4 การเลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลภายนอกกลุ่ม



รูปที่ 4.2 การส่งข้อมูลออกนอกกลุ่มจากพื้นที่ย่อย  $i$

ในการเลือกเส้นทางเพื่อส่งต่อข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i$  สามารถเลือกได้ว่าจะทำการส่งข้อมูลออกไปหาหัวหน้ากลุ่มที่อยู่ในพื้นที่ย่อย  $i-1$  หรือหัวหน้ากลุ่มที่อยู่ในพื้นที่ย่อย  $i-2$  ด้วยสัดส่วน  $x_{i,i-1}$  และ  $x_{i,i-2}$  ดังรูปที่ 4.2 ในการหาหัวหน้ากลุ่มที่จะส่งต่อหัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i$  จะส่ง Route-request ออกไปด้วยระยะทาง  $\sqrt{b^2 + 9a^2}$  เมื่อ  $a$  คือความยาวของพื้นที่ย่อย และ  $b$  คือความกว้างของพื้นที่ย่อย เพื่อให้ครอบคลุมหัวหน้ากลุ่มทุกตัวที่อยู่ในสองพื้นที่ย่อยด้านหน้า หัวหน้ากลุ่มในสองพื้นที่ย่อยด้านหน้าที่มีพลังงานมากที่สุดจะเป็นผู้ตอบ Route-response กลับไปให้หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i$  ที่ทำการส่ง Route-request มา พลังงานในการค้นหาเส้นทางของพื้นที่ย่อย  $i$  ต่อรอบมีค่าเท่ากับ

เนื่องจากในแต่ละพื้นที่จะมีการส่งและรับข้อมูลเส้นทางไม่เท่าเทียมกัน ในพื้นที่แรกด้านหน้าติดกับสถานีฐานไม่จำเป็นต้องขอข้อมูลเส้นทางจากพื้นที่อื่น แต่จะคอยให้บริการข้อมูลเส้นทางให้แก่พื้นที่ที่สองและสามที่อยู่ด้านหลัง พื้นที่ที่สองจะขอข้อมูลเส้นทางจากพื้นที่แรกเท่านั้นและคอยให้บริการแก่พื้นที่สามและสี่ สำหรับพื้นที่  $N$  ซึ่งอยู่ท้ายสุดไม่ต้องบริการข้อมูลเส้นทางให้กับพื้นที่อื่นแต่ตัวมันจะขอข้อมูลเส้นทางจาก 2 พื้นที่ที่อยู่ด้านหน้าคือ พื้นที่  $N-1$  และพื้นที่  $N-2$  และสำหรับพื้นที่  $N-1$  จะให้บริการเส้นทางแก่พื้นที่  $N$  เท่านั้น และจะขอข้อมูลเส้นทางจากพื้นที่  $N-2$  และพื้นที่  $N-3$  สำหรับพื้นที่อื่นๆ นอกเหนือจากนี้จะขอข้อมูลเส้นทางจาก 2 พื้นที่ด้านหน้าและให้บริการเส้นทางกับ 2 พื้นที่ที่อยู่ด้านหลัง ดังนั้นพลังงานในส่วนของการหาเส้นทางจึงถูกแยกออกเป็น 5 กรณีดังสมการที่ 4.12

$$E_{route}^i = \begin{cases} \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch} E_{Tx}(l_c, \bar{d}_{i,j}) + \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch}^2 E_{Rx}(l_c) & ,i = 1 \\ n_{ch} E_{Tx}(l_c, \sqrt{W^2 + 4a^2}) + n_{ch} E_{Rx}(l_c) \\ + \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch} E_{Tx}(l_c, \bar{d}_{i,j}) + \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch}^2 E_{Rx}(l_c) & ,i = 2 \\ n_{ch} E_{Tx}(l_c, \sqrt{W^2 + 9a^2}) + 2n_{ch} E_{Rx}(l_c) \\ + \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch} E_{Tx}(l_c, \bar{d}_{i,j}) + \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch}^2 E_{Rx}(l_c) & ,3 \leq i \leq N-2 \\ n_{ch} E_{Tx}(l_c, \sqrt{W^2 + 9a^2}) + 2n_{ch} E_{Rx}(l_c) \\ + n_{ch} E_{Tx}(l_c, \bar{d}_{i,i+1}) + n_{ch}^2 E_{Rx}(l_c) & ,i = N-1 \\ n_{ch} E_{Tx}(l_c, \sqrt{W^2 + 9a^2}) + 2n_{ch} E_{Rx}(l_c) & ,i = N \end{cases} \quad (4.12)$$

#### 4.3.5 การติดต่อสื่อสารกับภายนอกกลุ่ม

ก่อนที่หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i$  จะทำการส่งข้อมูลแต่ละแพ็คก็่ตออกไป หัวหน้ากลุ่มจะทำการเลือกก่อนว่าจะทำการส่งข้อมูลออกไปออกไปหาหัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i-1$  หรือหัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i-2$  ด้วยอัตราส่วน  $x_{i,i-1}$  และ  $x_{i,i-2}$  ตามลำดับ ซึ่งการส่งข้อมูลตามค่าอัตราส่วน  $x_{j,i}$  นี้จะทำให้สามารถรักษาสมดุลของการใช้พลังงานสำหรับทุกพื้นที่ย่อยได้พลังงานในการส่งข้อมูลออกไปนอกกลุ่มของพื้นที่ย่อย  $i$  ต่อบรรณมีค่าเท่ากับ

$$E_{inter}^i = \sum_{h=i-1}^{i-2} n_{ch} x_{i \rightarrow h} E_{Tx}(\lambda_T l_d, \bar{d}_{h \rightarrow i}) + \sum_{j=i+1}^{i+2} n_{ch} x_{j \rightarrow i} \lambda_T^j E_{Rx}(l_d) \quad ,h \geq 0 \text{ and } j \leq n \quad (4.13)$$

เมื่อ  $x_{i \rightarrow h}$  เป็นอัตราส่วนของข้อมูลที่ถูส่งจากพื้นที่ย่อย  $i$  ไปยังพื้นที่ย่อย  $h$   
 $x_{j \rightarrow i}$  เป็นอัตราส่วนของข้อมูลที่ถูส่งจากพื้นที่ย่อย  $j$  ไปยังพื้นที่ย่อย  $i$   
 $\bar{d}_{h \rightarrow i}$  เป็นค่าเฉลี่ยระยะทางจากจุดใด ๆ บนพื้นที่พื้นที่ย่อย  $h$  ไปยังจุดใดๆ บนพื้นที่ย่อย  $i$

#### 4.3.6 การใช้พลังงานในแต่ละพื้นที่ย่อย

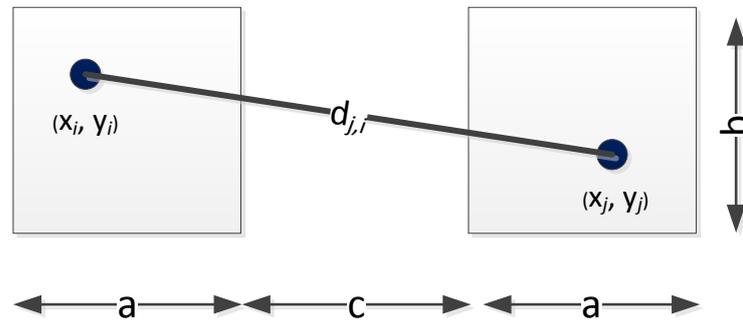
ในการคำนวณหาค่า  $x_{i,j}$  ในแต่ละพื้นที่ย่อย เราจะต้องทราบพลังงานที่ตัวรับรู้ไร้สายในแต่ละพื้นที่ย่อยใช้ ในแต่ละรอบของการเก็บข้อมูล

$E_{DCR}^i$  เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายตรวจวัดได้ในแต่ละรอบ (Data Collection Round) ของพื้นที่  $i$  ประกอบด้วยพลังงานในการสร้างกลุ่มรวมพลังงานในการเลือกหัวหน้ากลุ่ม ( $E_{cluster}^i$ ) พลังงานในการส่งข้อมูลภายในกลุ่ม ( $E_{intra}^i$ ) พลังงานที่ใช้ในการประมวลผลกลุ่มข้อมูล ( $E_{proc}^i$ ) พลังงานในการหาเส้นทาง ( $E_{route}^i$ ) และพลังงานในการส่งข้อมูลออกไปภายนอกกลุ่ม ( $E_{inter}^i$ ) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{DCR}^i = E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{proc}^i + E_{route}^i + E_{inter}^i \quad (4.14)$$

แต่ละพจน์ของสมการที่ 4.14 สามารถหาได้จากสมการที่ 4.9-4.13 เมื่อตัวรับรู้ในเครือข่ายมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และขนาดของพื้นที่ย่อยแต่ละส่วนมีขนาดเท่ากันจะทำให้  $E_{cluster}^i$   $E_{intra}^i$  และ  $E_{proc}^i$  ในแต่ละพื้นที่ย่อยมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะมี  $E_{route}^i$  และ  $E_{inter}^i$  ที่จะแตกต่างกันออกไปตามแต่ละพื้นที่ย่อย โดยจะมีเพียง  $E_{inter}^i$  เท่านั้นที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าของ  $x_{j,i}$  ของแต่ละพื้นที่ย่อย

### 4.3.7 การหาค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างสองพื้นที่ย่อยใด ๆ



รูปที่ 4.3 ระยะทางระหว่างสองพื้นที่ย่อย

จากรูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างสองพื้นที่ย่อยใด ๆ  $E[d_{j,i}]$  หาได้จาก

$$d_{ji}^2 = (x_j - x_i)^2 + (y_i - y_j)^2$$

$$E[d_{ji}^2] = \frac{1}{a^2 b^2} \int_0^b \int_0^{2a+c} \int_0^a (x_j - x_i)^2 + (y_i - y_j)^2$$

$$E[d_{ji}^2] = \frac{7a^2 + b^2}{6} + 2ac + c^2$$

$$\bar{d}_{ji} = E[d_{ji}] = \sqrt{\frac{7a^2 + b^2}{6} + 2ac + c^2}$$

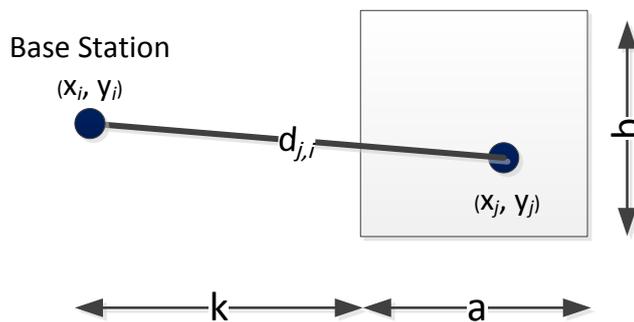
ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างจุดบนสองพื้นที่ย่อยที่อยู่ติดกันมีค่า

$$\bar{d}_{i,i-1} = E[d_{i,i-1}] = \sqrt{\frac{7a^2 + b^2}{6}} \quad (4.15)$$

ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างจุดบนสองพื้นที่ย่อยที่มีพื้นที่ย่อย 1 ผืนกั้นกลางมีค่า

$$\bar{d}_{i,i-2} = E[d_{i,i-2}] = \sqrt{\frac{25a^2 + b^2}{6}} \quad (4.16)$$

### 4.3.8 การหาค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยใด ๆ กับสถานีฐาน



รูปที่ 4.4 ระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยกับสถานีฐาน

จากรูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยใด ๆ กับสถานีฐาน  $E[d_{j,BS}]$  หาได้จาก

$$d_{j,BS}^2 = (x_j - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$$

$$E[d_{j,BS}^2] = \frac{1}{ab} \int_k^{a+k} \int_0^b (x_j - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$$

$$E[d_{j,BS}^2] = \frac{a^2 + b^2}{3} + ak + k^2 - (a + 2k)x_0 - by_0 + y_0$$

$$\bar{d}_{j,BS} = E[d_{j,BS}] = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{3} + ak + k^2 - (a + 2k)x_0 - by_0 + y_0} \quad (4.17)$$

### 4.3.9 การประมาณการจำนวนของพื้นที่ย่อย

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เราจะต้องทราบจำนวนของพื้นที่ย่อยที่เหมาะสมกับการทดลอง เนื่องจากขนาดของพื้นที่ย่อยและจำนวนกลุ่มในพื้นที่ย่อยในแต่ละพื้นที่ย่อยมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าของ  $E_{cluster}^i$ ,  $E_{intra}^i$  และ  $E_{process}^i$  ในแต่ละพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกันด้วย และจากการทดลองของเราค่าของ  $E_{route}^i$  มีค่าน้อยกว่าค่าของพจน์อื่นๆ ในการประมาณการนี้เราจะละทิ้งค่าของ  $E_{route}^i$  ซึ่งจะได้ว่า

$$E_{inter}^1 = E_{inter}^N \quad (4.18)$$

เพื่อให้ค่าจำนวนของพื้นที่มีมากที่สุดและทำให้ระยะทางระหว่างพื้นที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เราจะตั้งสมมติฐานตัวรับรู้ในพื้นที่  $N$  ทำการส่งข้อมูลออกไปยังพื้นที่  $N-2$  ทั้งหมด เมื่อแทนค่าสมการแบบจำลองพลังงานลงในสมการที่ 4.18 จะได้ว่า

$$E_{Tx}(N_{max} n_{ch} ml_{data}, \bar{d}_{1 \rightarrow sink}) + E_{Rx}((N_{max} - 1)n_{ch} ml_{data}) = E_{Tx}(n_{ch} ml_{data}, \bar{d}_{N \rightarrow N-2}) \quad (4.19)$$

จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานในการรับส่งข้อมูลแปรผันโดยตรงกับจำนวนของข้อมูล ดังนั้นเราจะสามารถดึง  $N_{max}$ ,  $n_{ch}$ ,  $m$  และ  $l_{data}$  ออกนอกจากฟังก์ชัน  $E_{Tx}$  และ  $E_{Rx}$  ของสมการ 4.19 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_{Tx}(N_{max} ml_{data}, \bar{d}_{1 \rightarrow sink}) + E_{Rx}((N_{max} - 1)ml_{data}) &= E_{Tx}(ml_{data}, \bar{d}_{N \rightarrow N-2}) \\ N_{max} ml_{data} E_{Tx}(1, \bar{d}_{1 \rightarrow sink}) + N_{max} ml E_{Rx}(1) - ml E_{Rx}(1) &= ml E_{Tx}(1, \bar{d}_{N \rightarrow N-2}) \\ N_{max} E_{Tx}(1, \bar{d}_{1 \rightarrow sink}) + N_{max} E_{Rx}(1) &= E_{Tx}(1, \bar{d}_{N \rightarrow N-2}) + E_{Rx}(1) \end{aligned} \quad (4.19)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่เพื่อหาค่าของ  $N_{max}$  ได้ดังสมการที่ 4.20

$$N_{max} = \frac{E_{Tx}(1, \bar{d}_{N \rightarrow N-2}) + E_{Rx}(1)}{E_{Tx}(1, \bar{d}_{1 \rightarrow sink}) + E_{Rx}(1)} \quad (4.20)$$

ในเงื่อนไขที่  $d_{1 \rightarrow sink} \leq d_0$  และ  $d_0 < d_{N \rightarrow N-2}$  เราจะเขียนสมการที่ 4.20 ใหม่โดยแทนค่าสมการที่ 4.1 และ 4.2 ได้ว่า

$$N_{max} = \frac{2\epsilon_{elec} + \epsilon_{mp} d_{N \rightarrow N-2}^4}{2\epsilon_{elec} + \epsilon_{fs} d_{1 \rightarrow sink}^2} \quad (4.21)$$

#### 4.3.10 การหาขอบเขตของจำนวนรอบ

สิ่งที่เราต้องการหาคือขอบเขตของจำนวนรอบสูงสุดที่ตัวรับรู้ทำงานได้ ถ้า  $L$  เป็นจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายในทุกพื้นที่ที่ย่อยทำงานได้จะได้ว่า

$$L = \frac{\bar{E}_0^1 n_1}{E_{DCR}^1} = \frac{\bar{E}_0^2 n_2}{E_{DCR}^2} = \dots = \frac{\bar{E}_0^N n_N}{E_{DCR}^N} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ 4.22 เราจะได้ค่าจำนวนรอบที่น้อยที่สุด  $L_{\min}$  เมื่อ  $E_{DCR}^i$  มีค่ามากที่สุดซึ่งเป็นกรณีที่หัวหน้ากลุ่มทุกตัวในพื้นที่ย่อย  $i$  ทำการส่งข้อมูลออกไปให้หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i-2$  และจะได้ค่า  $L_{\max}$  เมื่อ  $E_{DCR}^i$  มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเป็นกรณีที่หัวหน้ากลุ่มทุกตัวในพื้นที่ย่อย  $i$  ทำการส่งข้อมูลออกไปให้หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i-1$  ทั้งหมดคั้งนั้นจากสมการที่ 4.19 เราสามารถเขียนสมการขอบเขตของค่า  $L$  ได้ดังต่อไปนี้

$$L_i = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{proc}^i + E_{route}^i + E_{inter}^i} \quad (4.23)$$

เมื่อค่าหัวหน้ากลุ่มทุกตัวในพื้นที่ย่อย  $i$  ทำการส่งข้อมูลออกไปให้หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i-1$  และไม่มีการรับข้อมูลจากพื้นที่ย่อยด้านหลังจะได้ว่า

$$L_i^{\max} = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{(E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{proc}^i + E_{route}^i + E_{Tx}(n_{ch} ml_{data}, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}))} \quad (4.24)$$

ค่าขอบเขตบนของจำนวนรอบจะหาได้จากสมการ 4.24

$$L^{\max} = \min(L_1^{\max}, L_2^{\max}, L_3^{\max}, \dots, L_N^{\max}) \quad (4.25)$$

เมื่อค่าหัวหน้ากลุ่มทุกตัวในพื้นที่ย่อย  $i$  ทำการส่งข้อมูลออกไปให้หัวหน้ากลุ่มในพื้นที่ย่อย  $i-2$  และรับข้อมูลทั้งหมดจากพื้นที่ย่อยด้านหลังจะได้ว่า

$$L_i^{\min} = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{(E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{proc}^i + E_{route}^i + E_{Tx}((N-i+1)n_{ch} ml_d, d_{i \rightarrow i-1}) + E_{Rx}((N-i)n_{ch} ml_d))} \quad (4.26)$$

ค่าขอบเขตล่างของจำนวนรอบจะหาได้จากสมการ 4.27

$$L^{\min} = \max(L_1^{\min}, L_2^{\min}, L_3^{\min}, \dots, L_N^{\min}) \quad (4.27)$$

#### 4.3.11 การหาค่าอัตราส่วน $x_{i \rightarrow i-1}$ และ $x_{i \rightarrow i-2}$ สำหรับพื้นที่ย่อย $i$

สิ่งที่เราต้องการหาคือค่าจำนวนรอบสูงสุดที่ตัวรับรู้ทำงานได้ และค่า  $x_{i \rightarrow i-1}$ ,  $x_{i \rightarrow i-2}$  ที่ทำให้ทุกพื้นที่ย่อยในเครือข่ายใช้พลังงานอย่างสมดุล ถ้า  $L$  เป็นจำนวนรอบที่ตัวรับรู้ไร้สายในทุกพื้นที่ย่อยทำงานได้ จะได้ว่า

$$L = \frac{\bar{E}_0^1 n_1}{E_{DCR}^1} = \frac{\bar{E}_0^2 n_2}{E_{DCR}^2} = \dots = \frac{\bar{E}_0^N n_N}{E_{DCR}^N} \quad (4.28)$$

ที่พื้นที่ย่อย  $i$  ใดๆ

$$L = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{E_{DCR}^i} \quad (4.29)$$

$$E_{DCR}^i = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{L} \quad (4.30)$$

จากสมการที่ 4.5

$$E_{inter}^i = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{L} - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{process}^i + E_{route}^i) \quad (4.31)$$

จากสมการที่ 4.9

$$\begin{aligned} n_{ch} (x_{i \rightarrow i-1} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) + x_{i \rightarrow i-2} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2})) \\ = \frac{\bar{E}_0^i n_i}{L} - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{process}^i + E_{route}^i) \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} x_{i \rightarrow i-1} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) + x_{i \rightarrow i-2} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}) \\ = \frac{\frac{\bar{E}_0^i n_i}{L} - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{process}^i + E_{route}^i)}{n_{ch}} \end{aligned} \quad (4.33)$$

เนื่องจาก  $x_{j,i}$  เป็นค่าอัตราส่วนในการส่งข้อมูลของพื้นที่ย่อย  $j$  ดังนั้น  $x_{i \rightarrow j}$  จะต้องมีค่าเป็นไปตามข้อกำหนดตามสมการต่อไปนี้

$$0 \leq x_{i \rightarrow j} \leq 1 \quad \text{for all } i \geq 1, j > 1 \quad (4.34)$$

$$\sum_{j=i-1}^{i-2} x_{i \rightarrow j} = 1 \quad (4.35)$$

จากสมการที่ 4.27 แทนค่า  $x_{i \rightarrow i-2} = 1 - x_{i \rightarrow i-1}$  ลงในสมการที่ 4.33 ได้เป็นสมการที่ 4.36

$$\begin{aligned}
& x_{i \rightarrow i-1} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) + (1 - x_{i \rightarrow i-1}) E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}) \\
&= \frac{\bar{E}_0^i n_i - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{process}^i + E_{route}^i)}{L} \\
& \qquad \qquad \qquad n_{ch}
\end{aligned} \tag{4.36}$$

ทำการแก้สมการที่ 4.36 เพื่อหาค่าของ  $x_{i \rightarrow i-1}$  และ  $x_{i \rightarrow i-2}$

$$\begin{aligned}
& x_{i \rightarrow i-1} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) + E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}) - x_{i \rightarrow i-1} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}) \\
&= \frac{\bar{E}_0^i n_i - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{process}^i + E_{route}^i)}{L} \\
& \qquad \qquad \qquad n_{ch}
\end{aligned} \tag{4.37}$$

$$\begin{aligned}
& x_{i \rightarrow i-1} (E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) - E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2})) + E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}) \\
&= \frac{\bar{E}_0^i n_i - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{process}^i + E_{route}^i)}{L} \\
& \qquad \qquad \qquad n_{ch}
\end{aligned} \tag{4.38}$$

$$x_{i \rightarrow i-1} = \frac{\bar{E}_0^i n_i - (E_{cluster}^i + E_{intra}^i + E_{proc}^i + E_{route}^i) - n_{ch} E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2})}{n_{ch} (E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) - E_{Tx}(\lambda_{Ti} l, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}))} \tag{4.39}$$

และจากสมการที่ 4.35 เราจะหาค่าของ  $x_{i \rightarrow i-2}$

$$x_{i \rightarrow i-2} = 1 - x_{i \rightarrow i-1} \tag{4.40}$$

จากนั้นทำการเพิ่มค่าของ  $L$  ขึ้นทีละ 1 เพื่อหาค่าสูงสุดของ  $L$  ที่เป็นไปได้ พร้อมกับค่าของ  $x_{i \rightarrow j}$  ทุกตัวที่เกี่ยวข้องได้

เราจะหาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จาก Algorithm 1 โดยเราจะเริ่มต้นสร้างลิสต์  $NLX$  และเมตริกซ์  $XZJ$  ขึ้นมาพื้นใช้เก็บข้อมูล กำหนดจำนวนพื้นที่ให้มีค่าเท่ากับค่าพิเศษขึ้นของ  $N_{max}$  ทำการเพิ่มค่าจำนวนรอบ  $L$  ขึ้นทีละรอบจากขอบเขตล่างไปจนถึงขอบเขตบน ทำการหาค่า  $x_{i \rightarrow j}$  ของทุกพื้นที่สำหรับแต่ละรอบของ  $L$  จากนั้นทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของพื้นที่ที่ 1 ซึ่งอยู่ติดกับสถานีฐานไม่ให้มากหรือน้อยกว่าพลังงานที่พื้นที่อื่นใช้จนเกินไป โดยเราจะควบคุมส่วนนี้ด้วยค่าคงที่  $\delta_1 \bar{E}_0$  ซึ่งจะเป็นสัดส่วนของพลังงานเริ่มต้นเฉลี่ย โดย  $\delta_1$  เป็นค่าคงที่จำนวนน้อยๆ หากจำนวนรอบมากที่สุดที่ให้ค่า  $x_{i \rightarrow j}$  ทุกตัวอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 และมีความแตกต่างของการใช้พลังงานไม่เกินค่า  $\delta_1 \bar{E}_0$

---

Algorithm 1 MEB Algorithm

---

```

1:      Initialize  $NLX$  list
2:      Initialize  $XIJ$  matrix
3:      for  $N = \text{ceiling}(N_{\max})$  to 3 step -1
4:          for  $L = L_{\min}$  to  $L_{\max}$ 
5:              For  $i = N$  to 2 step -1
6:                  compute  $x_{i \rightarrow i-1}, x_{i \rightarrow i-2}$  from (22) and (1)
7:                  if  $0 \leq x_{i \rightarrow i-1} \leq 1, 0 \leq x_{i \rightarrow i-2} \leq 1$ 
8:                      store  $x_{i \rightarrow i-1}, x_{i \rightarrow i-2}$  in  $XIJ$  matrix
9:                  else
10:                     break
11:                 end
12:                 compute  $E_{inter}^2, E_{route}^2, E_{inter}^1, E_{route}^1$ 
13:                 if  $|E_{inter}^2 + E_{route}^2 - E_{inter}^1 - E_{route}^1| \leq \delta_1 \bar{E}_0$ 
14:                     store  $N, L$  and associated  $XIJ$  in  $NLX$  list
15:                 end if
16:             end for
17:         end for
18:     end for
19:     return  $N$  with  $\max(L)$  and associated  $XIJ$ 

```

---

#### 4.3.12 การชะลอการสร้างกลุ่มย่อย

เนื่องจากพลังงานในการสร้างกลุ่มย่อยใหม่และพลังงานในการหาเส้นทางเป็น overhead ที่ไม่ได้ใช้ในการส่งข้อมูล เพื่อลดพลังงานในสองส่วนนี้เราจึงได้มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยใหม่ จากเดิมที่เมื่อสิ้นสุดรอบของการรวบรวมข้อมูลหนึ่งรอบก็จะทำการสร้างกลุ่มย่อยใหม่ทันที ก็เลื่อนออกไปเป็นให้กลุ่มย่อยเดิมสามารถทำงานได้หลายรอบของการรวบรวมข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้ลดการใช้พลังงานในการสร้างกลุ่มย่อยและการหาเส้นทางลง และยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย โดยเราจะแทนจำนวนรอบของการรวบรวมข้อมูลก่อนที่จะทำการสร้างกลุ่มย่อยใหม่ด้วย  $R_f$

เมื่อมีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยใหม่ เราจะสามารถเขียนสมการที่ 4.39 ใหม่โดยการแทนค่าของ  $R_{rf}$  ลงไปได้ดังสมการต่อไปนี้

$$x_{i \rightarrow i-1} = \frac{\frac{\bar{E}_0^i n_i}{L} - \frac{(E_{cluster}^i + E_{route}^i)}{R_{rf}} - (E_{proc}^i + E_{intra}^i) - n_{ch} E_{Tx}(\lambda_T^i l_d, \bar{d}_{i \rightarrow i-2})}{n_{ch} (E_{Tx}(\lambda_T^i l_d, \bar{d}_{i \rightarrow i-1}) - E_{Tx}(\lambda_T^i l_{data}, \bar{d}_{i \rightarrow i-2}))} \quad (4.41)$$

และเราจะนำ Algorithm 1 มาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเมื่อมีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยโดยทำการเรียกใช้ Algorithm 1 ใน Algorithm 2 ที่ได้เขียนขึ้นมาใหม่ เริ่มแรกเราจะหาค่าจำนวนรอบที่ได้เมื่อไม่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยก่อน จากนั้นทำการหาค่าจำนวนรอบที่ได้จากการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยโดยทำการเพิ่มค่า  $R_{rf}$  ขึ้นทีละ 1 จากนั้นทำการเปรียบเทียบจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นกับจำนวนรอบที่ไม่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยหรือกับจำนวนรอบที่ได้จาก  $R_{rf} - 1$  โดยเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากอัตราส่วนมีการเพิ่มของจำนวนรอบมากกว่าค่าคงที่  $\delta_2$  ซึ่งเป็นค่าคงที่จำนวนน้อยๆ ก็แสดงว่าค่า  $R_{rf}$  ที่ใช้ยังมีความเหมาะสม สามารถทดลองเพิ่มค่าของ  $R_{rf}$  ขึ้นไปได้อีก ถ้าหากเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของจำนวนรอบน้อยกว่าค่าคงที่  $\delta_2$  ให้หยุดการทำงานแล้วเลือกใช้ค่า  $R_{rf}$  สุดท้ายที่ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของจำนวนรอบมากกว่าค่าคงที่  $\delta_2$

---

Algorithm 2 MEB Algorithm with procrastinated cluster re-formation

---

- 1: calculate  $\max(L)$  from Algorithm 1.
  - 2:  $L(1) \leftarrow \max(L)$
  - 3:  $R_{rf} \leftarrow 1$
  - 4: do
  - 5:      $R_{rf} \leftarrow R_{rf} + 1$
  - 6:     call Algorithm 1 by substitute (22) with (33) in line 6
  - 7:      $L(R_{rf}) \leftarrow \max(L)$
  - 8:     while  $|(L(R_{rf}) - L(R_{rf} - 1)) / L(R_{rf} - 1)| > \delta_2$
  - 9:     return  $R_{rf} - 1, L(R_{rf} - 1)$  and associate  $N, \mathbf{XIJ}$
-

## 4.4 ผลการทดสอบ

### 4.4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในการจำลองการทำงานของเกณฑ์วิธีเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ เราใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.1 ด้านล่าง

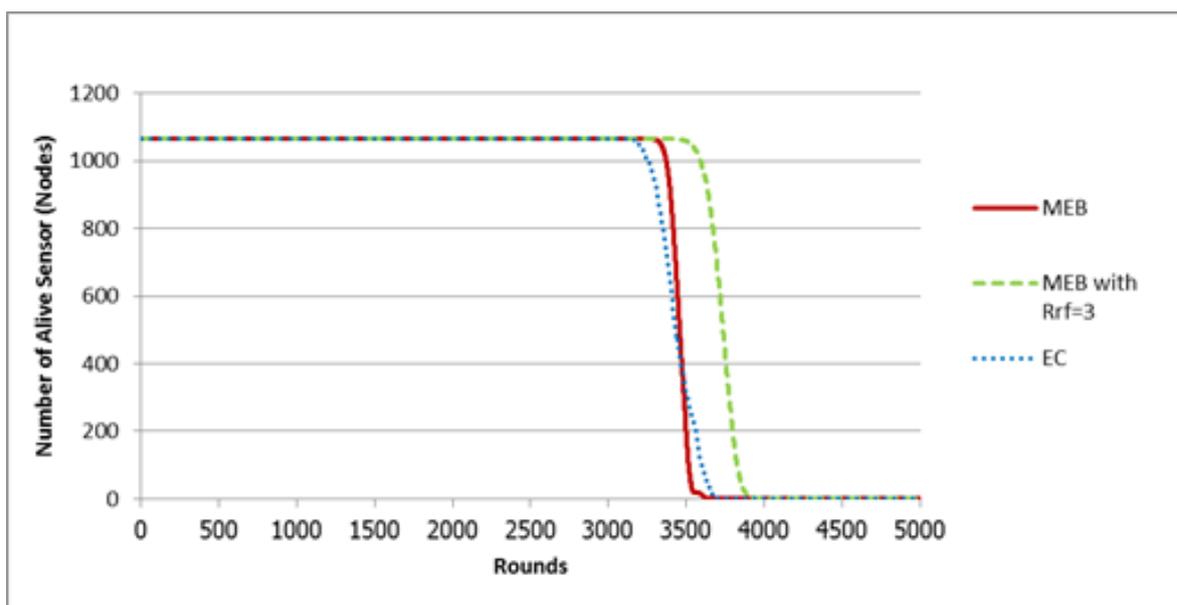
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	Value
ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการเลี้ยววงจร ทั้งฝั่งรับและฝั่งส่ง ( $E_{elec}$ )	50 nJ/bit
ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการขยายสัญญาณ แบบ friis free space ( $\mathcal{E}_f$ )	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการขยายสัญญาณ แบบ multi path fading ( $\mathcal{E}_{mp}$ )	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการรวมข้อมูล ( $\mathcal{E}_{agg}$ )	5 nJ/bit/Signal
ค่าความน่าจะเป็นของหัวหน้ากลุ่มชั่วคราว ( $T$ )	10%
ค่าความน่าจะเป็นของหัวหน้ากลุ่ม ( $P_{ch}$ )	1.1%-1.8%
จำนวนของตัวรับรู้ไร้สาย ( $n$ )	1000 nodes
ขนาดของแพ็คเกจข้อมูล ( $l_d$ )	4000 bits
ขนาดของแพ็คเกจข้อมูล ( $l_c$ )	200 bits
ความกว้างของพื้นที่ ( $W$ )	100 m
ความยาวของพื้นที่ ( $A$ )	284-568 m.
พลังงานเริ่มต้นของตัวรับรู้ไร้สาย ( $E_0$ )	2-4 J
ค่าเฉลี่ยของพลังงานเริ่มต้น ( $\bar{E}_0$ )	3 J
จำนวนพื้นที่ย่อย ( $N$ )	4-7 regions

#### 4.4.2 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย

การสร้างกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายเพียงเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลเพียงรอบเดียวไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมนัก ในแง่ที่พลังงานที่ใช้ในการสร้างกลุ่มและหาเส้นทางเป็นค่าใช้จ่ายส่วนเกิน การชะลอการสร้างกลุ่มใหม่เพื่อใช้กลุ่มเดิมในการเก็บข้อมูลหลาย ๆ รอบ จะเป็นวิธีที่ยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายได้นานกว่า [17]

ในรูป 4.5 ด้านล่างแสดงอายุการใช้งาน ในเกณฑ์วิธี MEB ของเรากับเกณฑ์วิธี EC โดยเกณฑ์วิธี MEB จะแสดงทั้งกราฟที่ไม่มี การชะลอการสร้างกลุ่มย่อย และมีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อย โดยเราเลือกกราฟที่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยมา  $R_{rf} = 3$  ซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายได้นานที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้เราได้ควบคุมขนาดของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายในเกณฑ์วิธี MEB ให้มีขนาดใกล้เคียงกับกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายในพื้นที่ด้านหลังสุดของเกณฑ์วิธี EC โดยกำหนดค่าความน่าจะเป็นของหัวหน้ากลุ่มย่อยในเกณฑ์วิธี MEB เป็น 0.011 ขนาดของพื้นที่ในการทดลองคือ  $426 \times 100$  ตารางเมตร

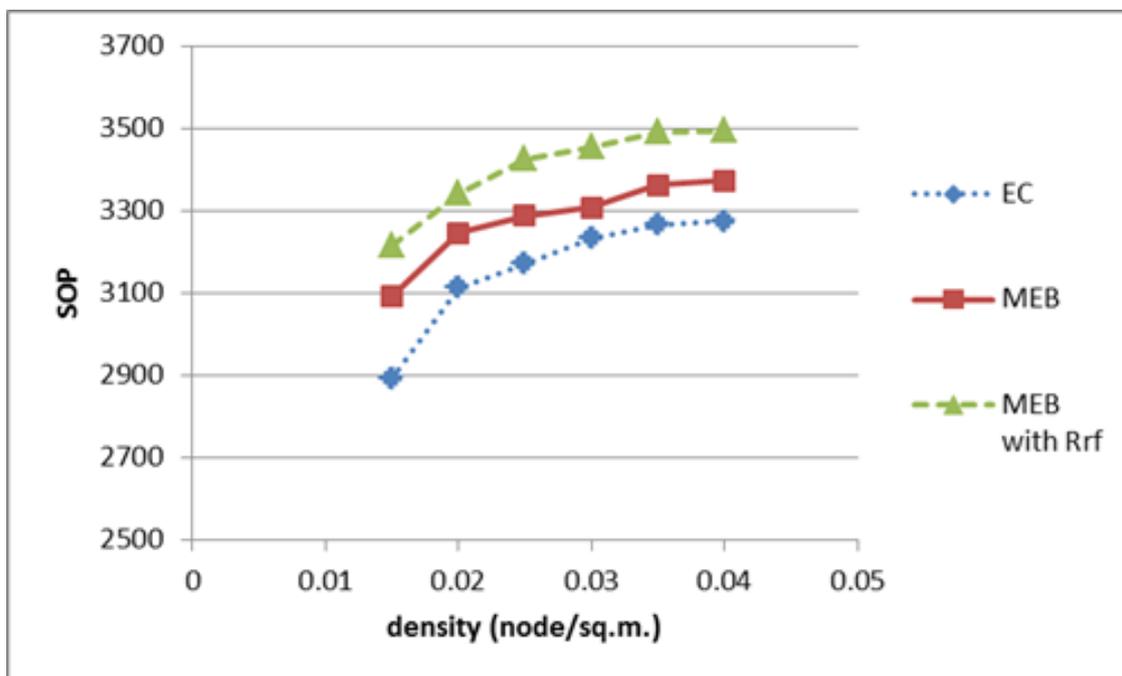


รูปที่ 4.5 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สาย

จากรูปที่ 4.5 อายุการใช้งานในเกณฑ์วิธี MEB เมื่อมีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยจะมากกว่าอายุการใช้งานในเกณฑ์วิธี EC อยู่ ประมาณ 8%

#### 4.4.3 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลง

ในการทดลองนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวรับรู้ไร้สายในระบบจากค่า 0.015 ตัวต่อตารางเมตรไปจนถึง 0.04 ตัวต่อตารางเมตร และขนาดของพื้นที่ในการทดลองคือ  $426 \times 100$  ตารางเมตร จะได้อายุการใช้งานตามรูปที่ 4.6

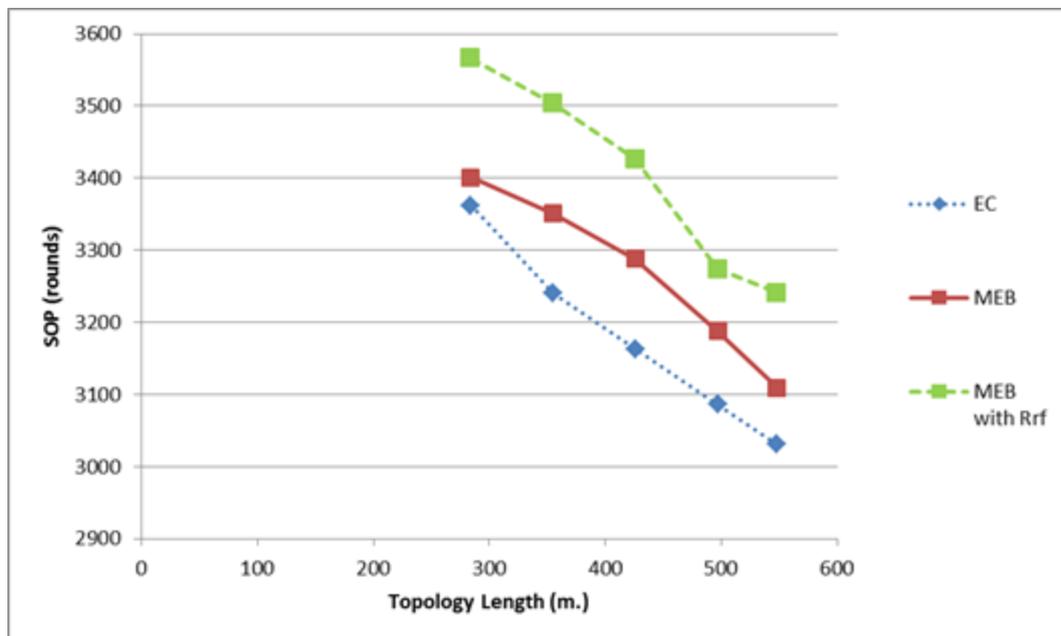


รูปที่ 4.6 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

จากรูปที่ 4.6 เราจะใช้ Steady Operation Period (SOP) หรือช่วงที่ไม่มีตัวรับรู้ตัวใดหมดพลังงานในการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของแต่ละเกณฑ์วิธี เมื่อความหนาแน่นของตัวรับรู้ไร้สายมีการเพิ่มขึ้นอายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายก็จะมีเพิ่มขึ้นด้วย โดยในช่วงที่ความหนาแน่นต่ำ การเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานจะเพิ่มค่อนข้างมาก แต่เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นมาก อายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นจะค่อยๆ ลดลง อายุการใช้งานของเกณฑ์วิธี MEB ที่ไม่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยจะมากกว่าเกณฑ์วิธี EC อยู่ 2.3-6.9% ส่วนอายุการใช้งานของเกณฑ์วิธี MEB ที่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยจะมากกว่าเกณฑ์วิธี EC อยู่ 6.7-11.2%

#### 4.4.4 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของพื้นที่

ในการทดลองนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของพื้นที่ทดลองตั้งแต่ 284 เมตร ไปจนถึง 568 เมตร โดยความกว้างของพื้นที่อยู่ที่ 100 เมตร และความหนาแน่นของตัวรับรู้ไร้สายอยู่ที่ 0.025 ตัวต่อตารางเมตร

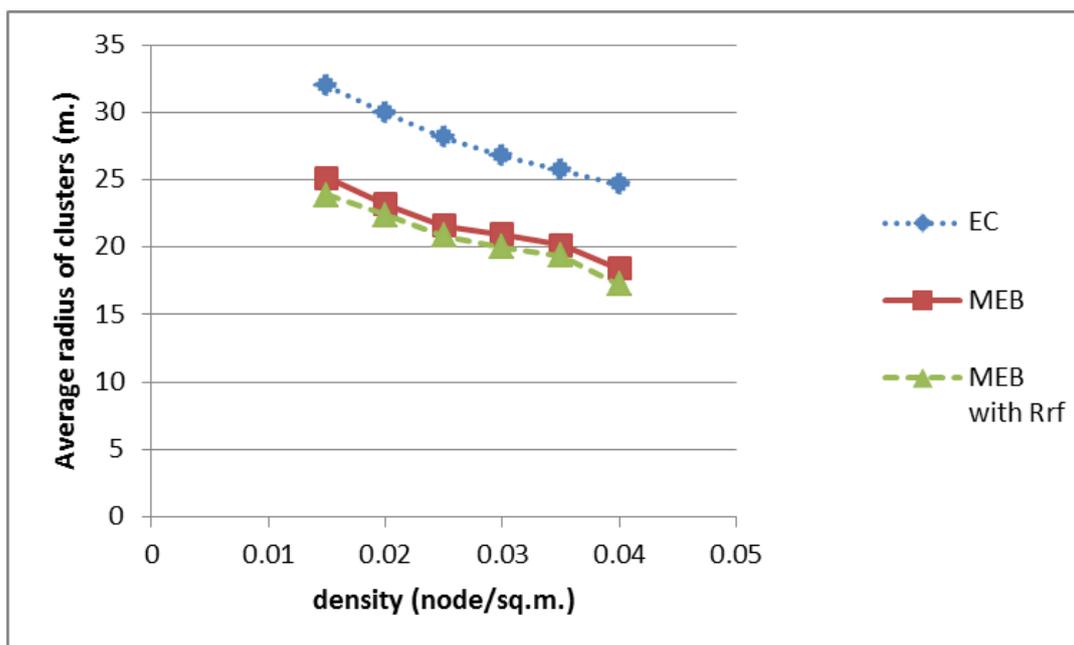


รูปที่ 4.7 อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของพื้นที่

จากรูปที่ 4.7 เมื่อความยาวของพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น อายุการใช้งานของตัวรับรู้ไร้สายทั้งในเกณฑ์วิธี MEB และ EC จะค่อยๆ ลดลง อายุการใช้งานของเกณฑ์วิธี MEB ที่ไม่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยจะมากกว่าเกณฑ์วิธี EC อยู่ 1.1-3.9% ส่วนอายุการใช้งานของเกณฑ์วิธี MEB ที่มีการชะลอการสร้างกลุ่มย่อยจะมากกว่าเกณฑ์วิธี EC อยู่ 6.0-8.3%

#### 4.4.5 ขนาดของกลุ่มตัวรับรู้

ในการทดลองนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวรับรู้ไร้สายในระบบจากค่า 0.015 ตัวต่อตารางเมตรไปจนถึง 0.04 ตัวต่อตารางเมตร และขนาดของพื้นที่ในการทดลองคือ  $426 \times 100$  ตารางเมตร เช่นเดียวกันกับ 4.4.3 ซึ่งเราจะทำการวัดค่าเฉลี่ยของรัศมีของกลุ่มย่อยในแต่ละเกณฑ์วิธี ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามรูปด้านล่างนี้ ขนาดของรัศมีเฉลี่ยในเกณฑ์วิธี MEB จะเล็กกว่ารัศมีเฉลี่ยในเกณฑ์วิธี EC อยู่ 21-25%



รูปที่ 4.8 รัศมีเฉลี่ยของกลุ่มย่อยของตัวรับรู้ไร้สายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย หากการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายในระบบเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ตัวรับรู้ไร้สายที่หมดพลังงานเกาะกลุ่มกันอยู่ในบางส่วนของพื้นที่ เราจะสูญเสียข้อมูลที่ควรจะได้จากตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ในบริเวณนั้น เพื่อให้การวัดค่าของข้อมูลในพื้นที่ที่มีความครบถ้วน เราจึงได้นำเสนอวิธีการที่จะทำให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวใช้พลังงานอย่างเท่าเทียมกัน เพื่อให้ตัวรับรู้ทุกตัวในระบบมีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน และทำให้เราสามารถได้รับข้อมูลจากการตรวจวัดครบถ้วนเสมอตลอดเวลาที่ตัวรับรู้ไร้สายทำงาน ในพื้นที่ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์ทำได้ยาก หากตัวรับรู้ไร้สายหมดอายุไม่พร้อมกัน การเข้าไปเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สายในพื้นที่จะเป็นเรื่องที่ลำบาก เราจะต้องเข้าไปตรวจสอบว่าตัวรับรู้ไร้สายตัวใดหมดพลังงานแล้ว จึงเปลี่ยน ทำให้จะต้องเดินทางเข้าไปในพื้นที่หลายครั้งเพื่อเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สาย หากเราสามารถทำให้ตัวรับรู้ไร้สายในระบบมีอายุการใช้งานที่เท่าเทียมกัน เราสามารถจะเข้าไปเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สายทั้งหมดในระบบในคราวเดียวเมื่อตัวรับรู้ไร้สายหมดพลังงานลง งานวิจัยของเราจะเป็นประโยชน์ในการตรวจวัดข้อมูลที่ได้อย่างมาก สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางเข้าไปเปลี่ยนตัวรับรู้ไร้สาย

ในบทที่ 3 เราได้นำเสนองานวิจัยที่ตัวรับรู้ไร้สายมีการกระจายบนพื้นที่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะรังผึ้ง โดยมีสถานีฐานอยู่ตรงกลาง โดยทำการคำนวณอัตราส่วนการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวให้สามารถใช้พลังงานใกล้เคียงกัน โดยตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวจะทำการส่งข้อมูลได้หลายเส้นทาง ตามปริมาณอัตราส่วนที่คำนวณไว้ เพื่อให้ตัวรับรู้ไร้สายทุกตัวในเครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน

ในบทที่ 4 เราได้นำวิธีการส่งข้อมูลหลายๆ เส้นทางจากในบทที่ 3 มาพัฒนาต่อยอด เพื่อให้สามารถทำงานกับทอพอโลยีที่ตัวรับรู้ไร้สายถูกส่งกระจายลงบนพื้นที่ จากปัญหาการใช้พลังงานอย่างไม่เท่าเทียมกันในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เราได้ทำการวิจัยเพื่อหาวิธีการที่จะช่วยเฉลี่ยการใช้พลังงานของตัวรับรู้ไร้สายในระบบออกไปให้เท่าเทียมกัน โดยการให้ตัวรับรู้ไร้สายในพื้นที่ย่อยต่างๆ ทำการส่งข้อมูลออกไปยังพื้นที่ที่อยู่ใกล้สถานีฐานในลักษณะหลายเส้นทาง โดยการรักษาสมดุลของการใช้พลังงานในทุกพื้นที่ เกิดจากค่าอัตราส่วนที่เราทำการคำนวณไว้ล่วงหน้า ทำให้ทุกพื้นที่ย่อยมีการใช้พลังงานในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน และปัจจัยสำคัญประการหนึ่งคือ เราต้องการให้ขนาดของกลุ่มตัวรับรู้ไร้สายมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่หัวหน้ากลุ่มทำการรวมมาจากข้อมูลจากสมาชิกทุกตัวภายในกลุ่ม จากทุก ๆ กลุ่มตัวรับรู้ไร้สายมีความละเอียดของข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน เภณฑ์วิธี MEB ที่เรานำเสนอสามารถสร้างสมดุลการใช้พลังงานในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย โดยเกณฑ์วิธี MEB มีอายุการใช้งานมากกว่าเกณฑ์วิธี EC 6.7-11.2% โดยมีขนาดของกลุ่มตัวรับรู้เล็กกว่า 21-25% ซึ่งให้ความแม่นยำของข้อมูลในการตรวจวัดมากกว่า

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] V. Mhatre, and C. Rosenberg, "Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks: a comparative study," Communications, 2004 IEEE International Conference on , vol.6, no., pp.3646,3651 Vol.6, 20-24 June 2004
- [4] M.O. Farooq, AB. Dogar, and G.A Shah, "MR-LEACH: Multi-hop Routing with Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy," Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), 2010 Fourth International Conference on , vol., no., pp.262,268, 18-25 July 2010
- [5] R.V.Biradar, S.R. Sawant, R. R. Mudholkar , and V.C. Patil, "Multihop Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks" IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 1, January 2011
- [6] R.V.Biradar , S. R. Sawant , R. R. Mudholkar , and V.C. Patil, Inter-Intra Cluster Multihop-LEACH Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks. International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS), Vol.2, No.1, pp. 88-95, March 2011.
- [7] J. Lian, K. Naik, and G.B. Agnew, "Data Capacity Improvement of Wireless Sensor Networks Using Non-Uniform Sensor Distribution," Int'l J. Distributed Sensor Networks, vol. 2, no. 2, pp. 121-145, Apr.-June 2006.
- [8] E.I. Oyman and C. Ersoy, "Multiple sink network design problem in large scale wireless sensor networks", In Proceedings of the International Conference on Communications, June 2004.
- [9] S.R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash and S. Venkatesan, "Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations", In Proceedings of IEEE IEEE Global Telecommunications Conference, December 2003, pp. 377-381
- [10] Z.M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis and C. Petrioli, "Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime", In Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences, January 2005.

- [11] W. Wang, V. Srinivasan and K.C. Chua, "Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks", In Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), August 2005, pp. 270– 283.
- [12] S. Soro and W. Heinzelman, "Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering", in: Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), April 2005.
- [13] M. Ye; C. Li; G. Chen; J. Wu, "EECS: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks", Performance, Computing, and Communications Conference, 2005. IPCCC 2005. 24th IEEE International , vol., no., pp.535,540, 7-9 April 2005
- [14] D. Kumar, T. C. Aseri, and R.B. Patel, "EEHC: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks", Computer Communications, Volume 32, Issue 4, 4 March 2009, Pages 662-667.
- [15] G. Chen, C. Li, M. Ye, J. Wu. An unequal cluster-based routing strategy in wireless sensor networks. *Wireless Networks*. 2009, 15, 193–207.
- [16] D. Wei, Y. Jin, S. Vural, K. Moessner, R. Tafazolli, "An Energy-Efficient Clustering Solution for Wireless Sensor Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , Vol.10, No.11, pp.3973-3983, November 2011
- [17] Prabal Dutta, David Culler, and Scott Shenker, "Procrastination Might Lead to a Longer and More Useful Life.", In Proceedings of SIGCOMM 2007
- [18] Goutam Chakraborty. "A Note on cluster size of WSN", In Proceeding of the 4th International Conference on Computers & Devices for Communication (CODEC 2009), Kolkata, India, December, 2009

ภาคผนวก

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) รศ. ดร. โชติพัทธ์ ภรณ์วัลย์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assoc. Prof. Dr. Chotipat Pornavalai

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก)	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบัน
2535	ตรี	วศ.บ.	อิเล็กทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2538	โท	MS	Information Sciences	Tohoku University
2541	เอก	Ph.D.	Information Sciences	Tohoku University

### ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ

1. Sarayoot Tanessakulwattana, Chotipat Pornavalai, and Goutam Chakraborty, "Adaptive Multi-hop Routing for Wireless Sensor Networks", Proceeding of the 10th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE2013), May 29-31, 2013, Khonkaen, Thailand
2. Chayanon Sub-r-pa and Chotipat Pornavalai, "A Virtual Timeslot Algorithm for Safety Alert Application on VANET, The 27th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, July 15-18, 2012, Sapporo, Japan
3. Sarayoot Tanessakulwattana, Chotipat Pornavalai, and Goutam Chakraborty, "Optimal Multi-path Energy-aware Routing Protocol for WSN", Proceeding of the 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012), May 16-18, 2012, Petchaburi, Thailand

4. Natthanon Junsathiean, Ekkalak Thongthanomjul, Panwit Tuwanut, Chotipat Pornavalai, "Analysis and Performance Evaluation of Expressway Pay Toll System", The 2012 First ICT International Senior Project Conference, 20 April 2012, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand
5. ศรายุทธ ฐเนศสกุลวัฒนา, โชติพัชร์ ภรณ์วลัย และ Goutam Chakraborty "การยืดอายุของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยกระจายการใช้พลังงานอย่างเท่าเทียม", Proceeding of The 3rd National Conference on Information Technology (NCIT2010), 28-29 October 2010, Bangkok, Thailand (Best Student Paper)
6. Chayanon Sub-r-pa and Chotipat Pornavalai, "Proximity Neighbor Selection using Longest IP Prefix Matching for Kademia", Proceeding of the 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), 19-21 May 2010, Chiang Mai, Thailand

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย ศรายุทธ ธเนศสกุลวัฒนา

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีจบ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วิศวกรรมไฟฟ้า	สจล.	2540
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	เทคโนโลยีสารสนเทศ	สจล.	2553

### ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ

1. Sarayoot Tanessakulwattana, Chotipat Pornavalai, and Goutam Chakraborty, "Adaptive Multi-hop Routing for Wireless Sensor Networks", Proceeding of the 10th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE2013), May 29-31, 2013, Khonkaen, Thailand
2. Sarayoot Tanessakulwattana, Chotipat Pornavalai, and Goutam Chakraborty, "Optimal Multi-path Energy-aware Routing Protocol for WSN", Proceeding of the 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012), May 16-18, 2012, Petchaburi, Thailand
3. ศรายุทธ ธเนศสกุลวัฒนา, โชติพัชร ภรณวลัย และ Goutam Chakraborty "การยืดอายุของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยกระจายการใช้พลังงานอย่างเท่าเทียม", Proceeding of The 3rd National Conference on Information Technology (NCIT2010), 28-29 October 2010, Bangkok, Thailand (Best Student Paper)

Proceeding in 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics,  
Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2012

# OPTIMAL MULTI-PATH ENERGY-AWARE ROUTING PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Sarayoot Tanessakulwattana<sup>1</sup>, Chotipat Pornavalai<sup>1</sup>, Goutam Chakraborty<sup>2</sup> and Sagar Naik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>Department of Software and Information Science, Iwate Prefectural University, Japan

<sup>3</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Canada

sarayoot@gmail.com, chotipat@it.kmitl.ac.th, goutam@soft.iwate-pu.ac.jp, s.naik@ece.uwaterloo.ca

**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. Dynamic CH approach could partially alleviate this problem. But even with dynamic CH approach, energy is not uniformly dissipated among all nodes. In this paper, we propose a new energy-aware routing protocol where the communication protocol is such that, even when the clusters are fixed, power dissipation is same over all nodes (except CHs). Every node co-operates with each other to carry the payload to the CH so as the power dissipation is uniform. Therefore reconfiguration of cluster is not necessary, thereby saving a huge signalling cost and interruption in service. Simulation results show that the proposed protocol has longer node lifetime and better distribution of energy dissipation than the original LEACH protocol.

**Keywords**— component; wireless sensor; energy dissipation; constrained optimization; linear programming

## I. INTRODUCTION

Research aspects in WSN range from data dissemination [1], query processing [2], media access control [3], communication protocol [4][5][6][7] to network topology [8]. In this work, our motivation is a novel communication protocol to uniformly distribute usage energy among sensor nodes.

Communication protocol of wireless sensor networks must optimize both criteria - (1) maximize the average lifetime of the nodes, and (2) minimize the variance of sensor nodes' remaining energy. All existing works in energy-aware protocol emphasize criteria (1).

Early approaches such as direct transmission (Direct) and minimum energy hop-by-hop transmission protocol (MTE), cannot reduce dissipated energy much and sensor nodes in some region will rapidly lose their energy and die. In LEACH [4][6], sensor nodes are randomly selected as cluster heads (CH) and reconfigures clusters time to time. This can reduce variance of remaining energy in sensor nodes, but still cannot uniformly distribute dissipated energy.

In this work, sensor nodes forward different proportion of their packets to nodes at different distances towards the sink. With proper proportion, their energy dissipation could be

made uniform. We formulate this as constrained optimization problem. This work is an improvement of our previous work [10][13][14]. In this paper, we use more realistic energy model by adding receiving energy and energy to run on transceiver circuitry. We also analyze and present how to scale up the propose routing to larger networks.

In section II, we will formally define the problem (the optimization criteria and constrain) for simple linear networks. In section III we present the proposed solution for nodes spread over a plane. In section IV, we give simulation results, comparing the performance of our protocol with direct transmission protocol, minimum energy hop-by-hop transmission protocol, and LEACH. Finally, in Section V, the suggestions on how to apply the proposed solution to larger size network are discussed along with conclusion and plan for future work.

## II. PROBLEM DEFINITION: OTIMIZATION CRITERIA AND CONSTRAINTS

### A. Network Model and Assumptions

In our protocol, we assume that nodes can control their transmission power to transmit data at different distances. We also assume that the energy required to transmit to a distant  $d$  is directly proportional to  $d^v$  where  $v$  is somewhere between 2 and 3, in this paper we use  $v=2$ , acceptable for general scenarios.

To simplify the problem, we assume that every node creates on an average same number of packets (information gathered by sensors), say  $m$ , in a specific time interval.

We use simple energy model as in LEACH to calculate receiving energy and transmitting energy of sensor nodes. Receiving energy is the energy required to run radio receiver circuitry. Energy required to run both the receive circuitry and the transmit circuitry per bit of data are assumed to be equal. In case data aggregation is done, the total number of packets the node- $j$  received from nodes further from CH, is  $R_j$ . Node- $j$  aggregates received packets with its information by beamforming [11] [12] to generate  $m$  packets. In short, the number of packets a node transmits in unit time is  $m$ .

### B. Defining the Constrained Optimization Problem

Nodes in topology generate  $m$  packets, which they need to send to the sink via intermediate nodes. The proportion or fraction of packets is distributed with predefined value,  $x_{ji}$ , where  $j$  is the node number of sender and  $i$  is the intermediate node number or sink.

At every intermediate nodes, data aggregation to reduce number of forwarding packet is done. This is pictorially explained in Fig. 1.

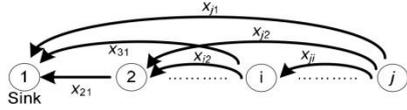


Figure 1. The linear network showing proportions of packets transmitted to different nodes towards the sink (node-1).

The total cost of receiving and forwarding packets from node- $j$  toward sink is denoted as  $C_j$ .

$$C_j = C_{jRx} + C_{jTx} \quad (1)$$

$C_{jRx}$  is a cost to receive  $R_j$  packets at node- $j$ , that is energy to run receiving circuit. We denote  $pks$  as the size of a packet. Energy dissipated per bit to run both transmitting and receiving circuitry is  $E_{elec}$ .  $C_{jRx}$  can be written as

$$C_{jRx} = E_{elec} \times R_j \times pks \quad (2)$$

$C_{jTx}$  is the cost to transmit  $m$  packets at node- $j$ . This is the sum of energy to aggregate received data of  $R_j$  packets, energy to run transmission circuit for  $m$  packets, and energy to amplify radio wave for  $m$  packets.

We denote  $E_{agg}$  as energy dissipated for data aggregation per bit and  $\epsilon_{amp}$  as constant for transmission amplify energy.  $C_{jTx}$  can be written as

$$C_{jTx} = E_{agg} \times (m + R_j) \times pks + E_{elec} \times m \times pks + \epsilon_{amp} \times m \times pks \times \sum_{i=j-1}^1 (x_{ji} \times d_{ji}^2) \quad (3)$$

From Eq. (2) and (3), we can write  $C_j$  as

$$C_j = E_{elec} \times (m + R_j) \times pks + E_{agg} \times (m + R_j) \times pks + \epsilon_{amp} \times m \times pks \times \sum_{i=j-1}^1 x_{ji} \times d_{ji}^2 \quad (4)$$

The problem is to find all  $x_{ji}$ s, where  $i < j$ . The optimization criteria are to minimize  $C_j$ s. The constraints are as Equation (5)-(7).

Equation (5) says that the battery of all nodes should drain equally. Equation (6) says that fraction of packets forwarded to different nodes should be between 0 and 1. Equation (7) says that every node must transmit all packets it needs to service.

$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (5)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i \geq 1, j > 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=j-1}^1 x_{ji} = 1 \quad (7)$$

### III. NODES SPREAD OVER A PLANE.

In this section, we will show that the same analysis for nodes distributed on a plane, not linear as in section II.B.

Let us consider that sensor nodes are distributed uniformly over a plane. Nodes are put at center of imaginary hexagons. Node density is related to distance to adjacent node, say  $d$ . When  $d$  is increased, density decreases. And  $N$  is number of layers from central node. Node distribution for  $N=2, 3, 4$  are shown in Fig. 2.

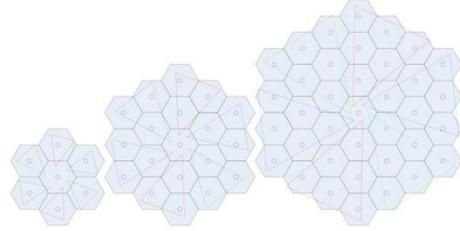


Figure 2. Sensor nodes spread uniformly over a plane for  $N=2, 3, 4$

From Fig. 2 where  $N=4$ , where the whole cluster is divided into 6 triangular sections. One such section is shown in Fig. 3.

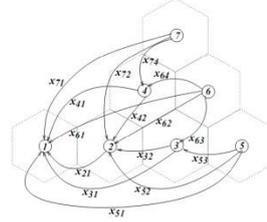


Figure 3. Triangular section showing one-sixth of cluster.

From constraints (5), (6), and (7) using distance between nodes in Fig. 3, replacing  $E_{elec}$  with  $e \times \epsilon_{amp}$  and  $E_{agg}$  with  $f \times \epsilon_{amp}$ , dissipation power of each node,  $C_j$ s, can be written as follows:

$$C_7 = \epsilon_{amp} \times m \times pks \times (4d^2 x_{72} + 7d^2 x_{71} + \alpha d^2 + e) \quad (8)$$

$$C_6 = \epsilon_{amp} \times m \times pks \times (3d^2 x_{62} + 7d^2 x_{61} + 2\beta d^2 + e) \quad (9)$$

$$C_5 = \epsilon_{amp} \times m \times pks \times (4d^2 x_{52} + 9d^2 x_{51} + \alpha d^2 + e) \quad (10)$$

$$C_4 = \epsilon_{amp} \times m \times pks \times [d^2 x_{42} + 3d^2 x_{41} + (e + f)(1 + \alpha + \beta)] \quad (11)$$

$$C_3 = \epsilon_{amp} \times m \times pks \times [d^2 x_{32} + 4d^2 x_{31} + (e + f)(1 + \alpha + \beta)] \quad (12)$$

$$C_2 = \epsilon_{amp} \times m \times pks \times [d^2 + (e + f)(x_{72} + x_{62} + x_{52} + x_{42} + x_{32} + 1)] \quad (13)$$

Equating  $C_7$  with  $C_i$ , where  $i$  are 6 to 2, we get another set of 5 linear equations of  $x_{ij}$ s as (14) to (18)

$$4x_{72} + 7x_{71} - 3x_{62} - 7x_{61} = 2\beta - \alpha \quad (14)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - 4x_{52} + 9x_{51} = 0 \quad (15)$$

$$4d^2x_{72} + 7d^2x_{71} - d^2x_{42} - 3d^2x_{41} = (e+f)(\alpha+\beta) - \alpha d^2 \quad (16)$$

$$4d^2x_{72} + 7d^2x_{71} - d^2x_{32} + 4d^2x_{31} = (e+f)(\alpha+\beta) - \alpha d^2 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (4d^2 - e - f)x_{72} + 7d^2x_{71} - (e+f)x_{72} - (e+f)x_{62} \\ - (e+f)x_{52} - (e+f)x_{42} - (e+f)x_{32} = (1-\alpha)d^2 \end{aligned} \quad (18)$$

We can write constraint (7) and (14) to (18) in form of  $A_{eq} \cdot X = b_{eq}$  where  $X = [x_{72} \ x_{71} \ x_{62} \ x_{61} \ x_{52} \ x_{51} \ x_{41} \ x_{32} \ x_{31}]$  and  $A_{eq}$  is matrix of portions that minimized  $C_j$ s,

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 4 & 7 & -3 & -7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & -4 & -9 & 0 & 0 & 0 \\ 4d^2 & 7d^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d^2 & -3d^2 & 0 \\ 4d^2 & 7d^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d^2 \\ 4d^2 - e - f & 7d^2 - e - f & 0 & 0 & -e - f & 0 & -e - f & 0 & -e - f \end{bmatrix}$$

and

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 - 2\beta \\ 1 - \alpha \\ 1 \\ 1 \\ 2\beta - \alpha \\ 0 \\ (e+f)(\alpha+\beta) + f - \alpha d^2 \\ (e+f)(\alpha+\beta) + f - \alpha d^2 \\ f + (1-\alpha)d^2 \end{bmatrix}$$

We know value of  $d$  (distance to adjacent node), assumed  $e$  (ratio of  $E_{elec}/E_{amp}$ ) = 500 and  $f$  (ratio of  $E_{agg}/E_{amp}$ ) = 50. To find value of matrix  $A_{eq}$ ,  $0 \leq x_{ij} \leq 1$  is upper and lower bound of  $x_{ij}$ s, we got optimized value of  $x_{ij}$ s that minimized optimization equation by varying  $\alpha$  and  $\beta$  in a step of 0.001.

#### IV. SIMULATION AND EVALUATION

Using the values of the elements of matrix as in section III, now we simulate WSN for topology as shown in Fig. 2, where  $N = 4$ . Simulation was done with MATLAB to evaluate our approach (named Uniform) and compared with LEACH, MTE, and direct transmission (Direct). Node-1 in Fig. 3 is the sink of this topology. We have parameters as following:

- $E_i$  – Initial energy of each node (0.5 J)
- $d$  – Distance between 2 adjacent nodes (15-35 m.)
- $m$  – Numbers of generated packet at each node (1 packet/round)
- $n$  – Number of member nodes,  $n=36$
- $k$  – Desired percentage of cluster head for LEACH ( $P=0.333$ )
- $E_d$  – Threshold energy to declare dead nodes (0.05 J)
- $\epsilon_{amp}$  – Constant for transmit amplifier (100 pJ/bit/m<sup>2</sup>)
- $E_{elec}$  – Constant for Tx/Rx circuitry (50 nJ/bit)
- $E_{agg}$  – Constant for data aggregation (5 nJ/bit)
- $pk_s$  – Size of generated packet (2000 bits)

Fragmenting a packet is costly in terms of overhead. Therefore, in this simulation, we used to randomly send the packet to the specified intermediate nodes or sink with the calculated predefined ratio  $x_{ij}$ s.

Fig. 4 shows the number of alive nodes in each simulation round, when distance to adjacent node ( $d$ ) is 25 m. Using our protocol (Uniform), sensor nodes have longer lifetime than Direct, MTE, and LEACH.

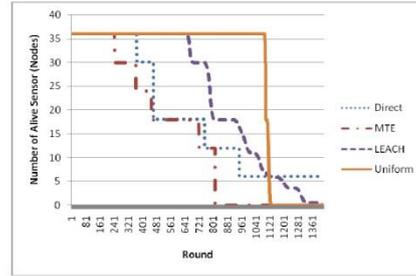


Figure 4. Number of alive nodes in each round when  $d=25$  m.

Fig. 5 shows standard derivative of remaining energy of all nodes in system when  $d = 25$  m. This shows that the remaining energy of sensor nodes in our protocol is uniformly distributed in every round compare to other protocols.

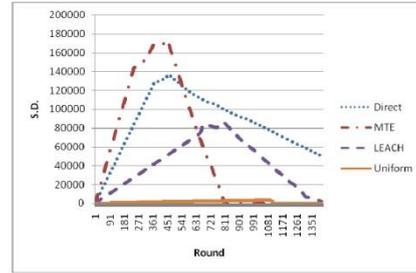


Figure 5. Standard derivative of remaining energy,  $d=25$  m.

Fig. 6 shows average dissipation energy of each protocol collected from first 150 rounds when all nodes in any protocol are still alive. Distance to adjacent node is varied from 15 to 35 m. In addition to uniformly distribution of energy usage, our protocol successfully reduces energy usage of all sensor nodes.

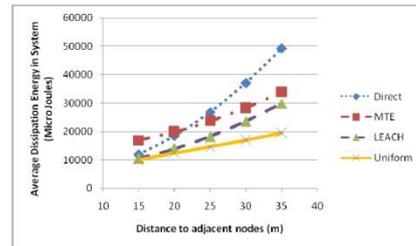


Figure 6. Average dissipation energy of each protocol collect from 150 first rounds.

Fig. 7 shows average cumulative energy dissipation of sensor nodes and sink at 500<sup>th</sup> round, that is the round before any node die. Distance is varied from 10 to 35 m. Graph of member nodes and sink energy dissipated cross at distance approximate 16.37 meters. Thus if we can fix the position of nodes and distant  $d$  is set to 16.37 meters, the energy consumption at member nodes and sink are equal.

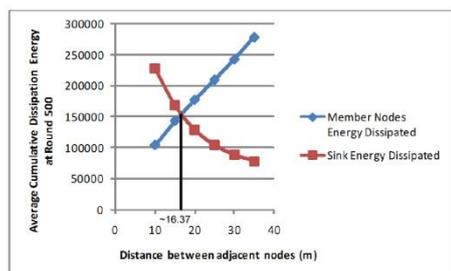


Figure 7. Average cumulative energy dissipation of sensors and sink at round 500th.

## V. CONCLUSION AND FUTURE WORKS

In WSN, the existing energy aware routing protocols are based on clustering the nodes. All members of cluster forward their information to cluster head, and then cluster heads forward information of their cluster to base-station. Some node in cluster may dissipate energy more than others. So cluster must be reconfigured at regular intervals. But reconfiguring cluster requires a lot of signaling packets to dismantle old cluster and set up new cluster [10]. Moreover, the service is interrupted. To avoid this situation, we purposed protocol that nodes in cluster may not send their packet to cluster head directly; they also send their packets to intermediate nodes in different portions to distribute energy dissipation of all nodes in cluster uniformly

Our work can distribute remaining energy of sensor nodes uniformly compared to LEACH, MTE, and direct transmission approach. It uses energy less than original LEACH by about 33%, MTE by about 42%, and direct transmission approach by about 60%. Lifetime of sensor nodes in our work increases from original LEACH by about 20-118%, from MTE about 361-380%, and from direct transmission by about 77-315% when  $d$  varied from 15 to 35m.

To increase number of sensor nodes in our work to cover larger area, we must increase number of hexagon layer (to  $N=5, 6 \dots$ ). Though possible, but that will increase complexity of calculation. Another possibility is to increase number of clusters as in Fig. 8. By configuring the sensor nodes with distant 16.37 meters, we can ensure that the sink (the center) of each clusters, and all member nodes consumes energy equally.

However, in this work, we assume that topology is fixed and static. In our future works, we intend to improve algorithm to work with random and dynamic networks. We also assume that there is no error in communication channel. We will add error model in our future works.

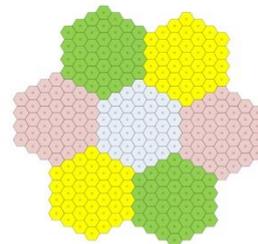


Figure 8. Extended Clusters Spread to the Plane.

## REFERENCES

- [1] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: A scalable robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile computing and networks (MobiCOM 2000)*, Boston, Massachusetts, August 2000.
- [2] D. Braginsky, D. Estrin. Rumor Routing algorithm for sensor networks. In *Proceedings of Wireless Sensor Network Algorithms (WSNA '02)*, pp. 22-30, Atlanta, Georgia, September 28, 2002.
- [3] W. Ye, and J. Heidemann. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling. In *Proceedings of fourth International conferences on embedded networked sensor systems (SenSys'06)*, pp. 321-334, 2006.
- [4] 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.
- [5] Bhaskar Krishnamachari. *Networking Wireless Sensors*. Cambridge University Press, January 2006.
- [6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. in *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, January 4-7, 2000.
- [7] Alex Rogers, Esther David, and Nicholas R. Jennings. Self-Organized Routing for Wireless Microsensor Networks. *IEEE trans. on SMC - Part A*. Vol. 35, No. 3, May 2005.
- [8] A. Cerpa, and D. Estrin. ASCENT: Adaptive Self-Configuring sEnSor Networks Topologies. *IEEE transactions on mobile computing*. Vol 3, 3, pp. 1-14, 2004.
- [9] Prabal Dutta, David Culler, and Scott Shenker. "Procrastination Might Lead to a Longer and More Useful Life.", In *Proceedings of SIGCOM 2007*
- [10] Goutam Chakraborty. A Note on cluster size of WSN. In *Proceeding of the 4th International Conference on Computers & Devices for Communication (CODEC 2009)*, Kolkata, India, December, 2009
- [11] Ed. Oppenheim, A. *Application of Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, Inc., 1978
- [12] K. Yao, R. Hudson, C.Reed, D. Chen, and F. Lorenzelli. Blind Beamforming on a Randomly Distributed Sensor Array System. In *Proceeding of the 1998 IEEE Workshop on Signal Processing System (SiPS'98)*, October 1988.
- [13] Wireless Sensor Networks Prolongation with Uniformly Distributed Energy Dissipation (In Thai). In *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> National Conference on Information Technology (NCIT 2010)*, October 2010.
- [14] Goutam Chakraborty. Optimum Cluster Size for Cluster Based Communication in Wireless Sensor Network. In *Proceeding of the Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM 2010)*, pp. 328-333, Florence, Italy, October 25-30, 2010.