โพรโทคอลค้นหาเส้นทางบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่คำนึงถึงพลังงาน

Energy Awareness Routing Protocol in Wireless Sensor Networks

ธนวัฒน์ หอจตุรพิธพร

Thanawat Horjaturapittaporn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Computer Engineering

Prince of Songkla University

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ โพรโทคอลค้นหาเส้นทางบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่คำนึงถึงพลังงาน
ผู้เขียน นายธนวัฒน์ หอจตุรพิธพร
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	**คณะกรรมการสอบ**
…….....	……..ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร วิทูสุรพจน์)
	…….....กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ชัย ทิพย์จักษุรัตน์)
	…….....กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

……..……
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ Energy Awareness Routing Protocol in Wireless Sensor Networks
ผู้เขียน นายธนวัฒน์ หอจตุรพิธพร
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกันอย่างแพร่หลาย ข้อจำกัดของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายคือแหล่งจ่ายพลังงานของโหนด เครือข่ายจะต้องทำงานได้อย่างต่อเนื่องและให้ยาวนานมากที่สุด แม้ว่าโหนดบางตัวอาจจะหมดพลังงานและไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ และเพื่อให้รองรับการทำงานของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่มีโหนดจำนวนมาก จึงมีโพรโทคอลในกลุ่ม Hierarchical จำนวนมากถูกนำเสนอในช่วงหลายปีที่ผ่านมา วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน โดยได้ทำการพัฒนามาจากพื้นฐานของโพรโทคอล Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) ให้สามารถทำงานบนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ จากผลการทดลองพบว่าโพรโทคอลที่ได้ออกแบบขึ้นใหม่มีการทำงานที่ดีกว่า LEACH ในขนาดเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้นได้ โดยมีค่า Packet Delivery Ratio (PDR) ที่สูงกว่า LEACH ถึง 50% สำหรับการจำลองเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร มีค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในเครือข่าย 38.14 จูล, 39.5 จูล และ 40.31 จูล บนเครือข่ายขนาด 100x100, 250x250 และ 400x400 เมตรตามลำดับ และมีระยะเวลาการทำงานนานถึง 832 วินาที ก่อนที่โหนดตัวแรกจะหมดพลังงาน ซึ่งมีอายุการทำงานนานกว่าโพรโทคอล LEACH 1.42 เท่า

คำสำคัญ: เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย, โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง, การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ, LEACH

Thesis Title	Energy Awareness Routing Protocol in Wireless Sensor Networks
Author	Mr.Thanawat Horjaturapittaporn
Major Program	Computer Engineering
Academic year	2010

Abstract

Nowadays, the sensor network has been advance developed and widely used. The outstanding limitation of the sensor network is the limited power source of nodes. These nodes are expected to continually function as long as possible though some nodes may run out of batteries and cannot perform expected functionalities. So there were a number of Hierarchical protocols group presented from many researches during the past years to support the large sensor network which consists of a large number of nodes to function properly. The above information is an inspiration for this research which its purpose is finding the route by consider the power consumption. The implementation is done based on Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol while it is able to function in a large network. The test results indicate the Packet Delivery Ratio (PDR) is 50% higher than LEACH from simulation of the network size 250x250. The average power consumption by the network is 38.14, 39.5 and 40.31 joule on 100x100, 250x250 and 400x400 network size respectively. And the continual function duration is 832 seconds before the first node ran out of battery which is 1.42 times longer than LEACH.

Keywords: wireless sensor network, routing protocol, energy efficiency, LEACH

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงคำขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนและฝึกฝนการทำวิจัย กรุณาอุทิศเวลาในการให้คำปรึกษา แนะนำและให้แนวคิดในการทำวิจัย เอกสาร ข้อมูลต่างๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งการขัดเกลากระบวนการคิดและให้กำลังใจในการแก้ไขปัญหาที่เกี่ยวกับการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทร วิทูสุรพจน์ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อการวิจัยตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์ชัย ทิพย์จักษุรัตน์ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อการวิจัยตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัยแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดีเสมอมา

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอน้อมรำลึกถึงพระคุณของ บิดามารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริม สนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเสมอมาแก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ธนวัฒน์ หอจตุรพิธพร

สารบัญ

บทคัดย่อ 3

Abstract 4

กิตติกรรมประกาศ 5

สารบัญ 6

รายการตาราง 9

รายการภาพประกอบ 10

สัญลักษณ์คำย่อ 12

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง 3

1.2.1 รายละเอียดของกลุ่มโพรโทคอล 4

1.2.1.1 โพรโทคอลที่ยึดข้อมูลเป็นศูนย์กลาง 4

1.2.1.2 โพรโทคอลแบบลำดับชั้น 5

1.2.1.3 โพรโทคอลแบบยึดตำแหน่งที่ตั้ง 5

1.2.2 โพรโทคอลในกลุ่มแบบลำดับชั้น 6

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 8

1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์ 8

1.5 ขั้นตอนและระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ 8

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 9

2.1 เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย 9

2.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4 12

2.2.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer) 13

2.2.2 ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง(Medium Access Control Layer) 13

2.2.3 ระดับชั้นบน (Upper Layer) 13

2.3 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) 14
2.3.1 กระบวนการทำงานของ LEACH 16
2.3.2 ปัญหาของโพรโทคอล LEACH 18
2.3.2.1 กระบวนการเลือกโหนดหัวหน้า 18
2.3.2.2 ช่วงเวลาการสับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า 19
2.4 แนวความคิดของโพรโทคอลที่ออกแบบ 19
2.4.1 การเลือกโหนดหัวหน้า 19
2.4.2 ช่วงเวลาในการปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า 19
บทที่ 3 การออกแบบโพรโทคอล 21
3.1 แพ็กเก็ตควบคุมที่ออกแบบ 21
3.1.1 ข้อความประกาศ(Advertise message หรือ ADV) 21
3.1.2 ข้อความร้องขอเข้าร่วม(Join message หรือ JOIN) 22
3.1.3 ข้อความกำหนดโหนดหัวหน้า(Select message หรือ SCT) 23
3.1.4 ข้อความเสร็จสิ้นการจัดการเครือข่าย(Finale message หรือ FIN) 23
3.1.5 ข้อความกำหนดตารางค่า TDMA (Time Division Multiple Access)
หรือ SCH 24
3.1.6 ข้อความร้องขอเปลี่ยนโหนดหัวหน้า(Change message หรือ CHG) 25
3.1.7 ข้อความหยุด(Stop message หรือ STP) 26
3.2 การทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบ 26
3.2.1 ส่วนเริ่มต้นจัดการเครือข่าย (Setup phase) 27
3.2.1.1 การทำงานในส่วนของสถานีฐาน 28
3.2.1.2 การทำงานในส่วนของตัวโหนด 30
3.2.2 ส่วนดำเนินการรับส่งข้อมูล (Steady state phase) 32
3.2.3 ส่วนการปรับปรุงเครือข่าย (Improved cluster head phase) 32
3.3 สรุปเปรียบเทียบการทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบและ LEACH 33

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล....35
4.1 จำลองการทำงาน LEACH....35
4.2 ทดลองหาช่วงค่าหน่วงเวลาที่เหมาะสม....37
4.3 จำลองการทำงานรวมทั้งระบบของโพรโทคอล....39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....48
5.1 สรุปผลการวิจัย....48
5.2 ปัญหาที่พบ....49
5.3 ข้อเสนอแนะ....51
บรรณานุกรม....52
ภาคผนวก....54
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์....55
ประวัติผู้เขียน....62

รายการตาราง

ตารางที่ 3-1 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต ADV 22
ตารางที่ 3-2 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต JOIN 22
ตารางที่ 3-3 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต SCT 23
ตารางที่ 3-4 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต FIN 24
ตารางที่ 3-5 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต SCH 24
ตารางที่ 3-6 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต CHG 25
ตารางที่ 3-7 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต STP 26
ตารางที่ 4-1 ค่าตัวแปรพื้นฐานในการจำลองการทำงาน LEACH 35
ตารางที่ 4-2 ค่าตัวแปรพื้นฐานในการจำลองการส่งแพ็กเก็ตควบคุมการ
ร้องขอเข้าร่วมกลุ่มของโหนดในเครือข่าย 38
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าตัวแปรในการจำลองการทำงานบน NS-2 39

รายการภาพประกอบ

รูปที่ 2-1เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย 9
รูปที่ 2-2 สถาปัตยกรรมเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย 10
รูปที่ 2-3 ค่าพลังงานที่ใช้ในการทำงานของตัวโหนดแต่ละส่วน 11
รูปที่ 2-4แผนภาพโครงสร้าง IEEE 802.15.4.....12
รูปที่ 2-5 ช่วงการทำงานในแต่ละรอบของ LEACH.....15
รูปที่ 2-6 แผนภาพการทำงานของ LEACH.....16
รูปที่ 2-7 ลักษณะเครือข่ายของโพรโทคอล LEACH.....17
รูปที่ 2-8 การพลาดการเชื่อมต่อระหว่างโหนดหัวหน้ากับสถานีฐาน 18
รูปที่ 3-1 รูปแบบแพ็กเก็ต ADV 21
รูปที่ 3-2 รูปแบบแพ็กเก็ต JOIN 22
รูปที่ 3-3 รูปแบบแพ็กเก็ต SCT.....23
รูปที่ 3-4 รูปแบบแพ็กเก็ต FIN 23
รูปที่ 3-5 รูปแบบแพ็กเก็ต SCH 24
รูปที่ 3-6 รูปแบบแพ็กเก็ต CHG 25
รูปที่ 3-7 รูปแบบแพ็กเก็ต STP.....26
รูปที่ 3-8 ผังงานลำดับการทำงานของระบบ 27
รูปที่ 3-9 ผังงานการทำงานในส่วนของสถานีฐาน.....28
รูปที่ 3-10 แผนภาพการประกาศของสถานีฐานและตอบกลับของโหนด.....28
รูปที่ 3-11 ระยะรัศมีในการรับส่งข้อมูลของแต่ละระดับชั้น.....29
รูปที่ 3-12 ผังงานการทำงานในส่วนของตัวโหนด 30
รูปที่ 3-13 แผนภาพการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า.....33
รูปที่ 4-1 ค่า PDR ของโพรโทคอล LEACH ในเครือข่ายจำลอง.....36
รูปที่ 4-2 ผลการจำลองการตอบกลับของตัวโหนดข้างเคียง 38
รูปที่ 4-3 ค่า PDR ของโพรโทคอลที่ออกแบบ.....40
รูปที่ 4-4 ค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้บนเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร 41
รูปที่ 4-5 ค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้บนเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร 42
รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบเวลาที่โหนดตัวแรกหมดพลังงาน
ของโพรโทคอลที่ออกแบบและ LEACH ในเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร 43

รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบเวลาที่โหนดตัวแรกหมดพลังงาน
ของโพรโทคอลที่ออกแบบและ LEACH ในเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร 44
รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบค่า PDR ที่ได้จากโพรโทคอลที่ออกแบบ
และ LEACH บนเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร 45
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่า PDR ของโพรโทคอลที่ออกแบบ
และ LEACH บนเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร 46
รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบค่า PDR ของของโพรโทคอลที่ออกแบบ
และ LEACH บนเครือข่าย 400x400 เมตร.....47
รูปที่ 5-1 ผลการจำลองการสร้างแครือข่ายของจำนวนโหนด 100 ตัว 50
รูปที่ 5-2 เปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างโพรโทคอลที่ออกแบบ
และโพรโทคอล LEACH 51

สัญลักษณ์คำย่อ

APTEEN	Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network
BS	Base Station
CH	Cluster Head
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CCA	Clear Chanel Assessment
ED	Energy Detection
ENAT	Estimated Node Active Time
GBR	Gradient Based Routing
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GEAR	Geographical and Energy Aware Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
LQI	Link Quality Indicator
LLC	Logical Link Control
MN	Member Node
MAC	Medium Access Control
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information System
PHY	Physical Layer
PDR	Packet Delivery Ratio
SPIN	Sensor Protocol for Information Negotiation
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
SAP	Service Access Point
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network
TDMA	Timer Division Multiple Access
WSN	Wireless Sensor Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

เทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกันอย่างแพร่หลาย โดยการทำงานจะอาศัยเครือข่ายไร้สายที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สมองกลฝังตัวขนาดเล็กที่เรียกว่าโหนดเป็นจำนวนมาก โหนดทำหน้าที่รับและประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ รวมถึงติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดด้วยกันโดยผ่านทางสัญญาณคลื่นวิทยุ ส่งผ่านข้อมูลระหว่างกัน ทำให้การเก็บข้อมูล การเฝ้าระวัง หรือควบคุมสภาพแวดล้อมทางกายภาพนั้นๆเป็นไปอย่างทั่วถึง แม้จะอยู่ในที่ห่างไกลจากเครือข่ายสื่อสารอื่นๆ

ข้อจำกัดของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ต้องคำนึงถึงในการใช้งานคือ ข้อจำกัดด้านพลังงาน ความสามารถในการประมวลผล และทรัพยากรของตัวโหนด เช่น หน่วยความจำ หรือทรัพยากรด้านการสื่อสารเป็นต้น

- พลังงาน : ด้วยขนาดของโหนดที่มีขนาดเล็กลงในปัจจุบัน ทำให้แหล่งจ่ายพลังงานมีขนาดเล็กลงไปด้วย เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะใช้พลังงานส่วนใหญ่ไปกับส่วนภาครับ-ส่งข้อมูล เพราะฉะนั้นการจะรักษาระดับพลังงานของตัวโหนดจะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวเป็นลำดับแรก
- การคำนวณ : เนื่องด้วยข้อจำกัดของประสิทธิภาพ ของหน่วยประมวลผลในโหนด ทำให้การคำนวณหรือการใช้เทคนิคที่ซับซ้อนมากมีความไม่เหมาะสม
- การสื่อสาร : แบนด์วิดท์ของเครือข่ายไร้สายที่ใช้เชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างตัวโหนดนั้นสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ที่ความเร็วในหน่วยกิโลบิตต่อวินาที(kbps)

ในอนาคตเทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีความต้องการให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและการได้รับข้อมูลต้องมีคุณภาพเนื่องจากการทำงานร่วมกันของตัวโหนดจำนวนมากทำให้ได้ซึ่งข้อมูลของสภาพแวดล้อมทางกายภาพที่สนใจ ตัวโหนดจะทำงานโดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องมีศูนย์กลางในการควบคุมดูแลเครือข่าย และสิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนั้นคือ ตัวโหนดสามารถทำงานโดยตัวมันเองได้สามารถทำการซ่อมแซมเครือข่ายได้ด้วยตัวเอง ซึ่งทำให้การทำงานของเครือข่ายมีประสิทธิภาพ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายทำงานโดยใช้วิธีการกระจายการประมวลผลของข้อมูลจำนวนมากออกไปยังโหนดต่างๆภายในเครือข่าย การกระจายการประมวลผมกระทำโดยแบ่งโหนดในเครือข่ายออกเป็นกลุ่มๆ และรวมแต่ละกลุ่มโหนดเข้าเป็นเครือข่ายไร้สาย โหนดแต่ละกลุ่มจะทำการเก็บข้อมูล ควบคุม ดูแลสภาพแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ของกลุ่มนั้นๆ ทำให้การควบคุมสามารถเจาะจงหรือมุ่งเน้นไปยังเหตุการณ์ ณ กลุ่มหรือจุดที่สนใจได้ ข้อสำคัญของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะต้องยังคงทำงานได้แม้ว่าโหนดบางตัวจะไม่สามารถทำงานได้ก็ตาม ดังนั้นเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหา เพื่อให้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายยังคงทำงานต่อไปได้แม้มีโหนดที่ทำงานผิดพลาดก็ตามอย่างเช่น การมีเส้นทางสำรองในการเชื่อมต่อเครือข่ายหรือการเปลี่ยนเส้นทางรับส่งข้อมูล จึงได้นำไปสู่การคิดค้นโพรโทคอลขึ้นเป็นจำนวนมาก เพื่อให้การติดต่อสื่อสาร ควบคุม และรับส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยโหนดจำนวนมากโดยแต่ละโหนดจะทำการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพ โหนดภายในเครือข่ายจะถูกรวมกันเป็นกลุ่มย่อยที่เรียกว่า cluster จำนวนสมาชิกในแต่ละ cluster อาจจะแตกต่างกันได้ ทั้งนี้เพื่อลดภาระงานของโหนดที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงเครื่องแม่ข่ายและลดจำนวนแพ็กเก็ตที่จะกระจายอยู่ในเครือข่าย เนื่องจากจะมีเพียงโหนดหัวหน้าของแต่ละ cluster หรือเรียกว่า Cluster Head (CH) เป็นตัวแทนในการส่งข้อมูลกลับไปเก็บยังฐานข้อมูล ดังนั้นประเด็นที่น่าสนใจของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายคือการจัดเครือข่ายให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งในการจัดการเครือข่ายคือตัวกลางที่เรียกว่าโพรโทคอล โพโทคอลเป็นตัวกลางที่โหนดใช้ร้องขอสั่งการ หรือแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างโหนด

โพรโทคอลค้นหาเส้นทางทำหน้าที่ค้นหาและกำหนดเส้นทางการเดินทางของข้อมูลภายในเครือข่าย ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเส้นทางที่ประหยัดพลังงาน หรือเส้นทางที่สั้นที่สุด ความซับซ้อนของการค้นหาเส้นทางจะขึ้นกับขนาดของเครือข่าย เครือข่ายที่มีขนาดใหญ่หมายถึง เครือข่ายที่มีพื้นที่กว้าง (large area) หรือมีความหนาแน่นของตัวโหนด (node density) จากข้อจำกัดของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในเรื่องพลังงาน ทำให้การการออกแบบโพรโทคอลสำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่จะต้องคำนึงถึงการใช้พลังงาน การค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแตกต่างจากเครือข่ายในปัจจุบันคือ การจดจำหรือระบุตำแหน่งของโหนดจำนวนมากด้วยเทคนิค IP-base protocols ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เพราะมีความซับซ้อนและจะต้องใช้หน่วยความจำสูง นอกจากนี้การรับส่งข้อมูลภายในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายขนาดใหญ่อาจจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลได้สูง เพราะฉะนั้นเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจึงต้องการโพรโทคอลหรือเทคนิคที่จะทำการหาเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน แบนด์วิดท์ และทรัพยากรต่างๆที่มีอยู่อย่างจำกัด

ในการแก้ปัญหาของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่มีขนาดใหญ่คือ แนวคิดของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบลำดับชั้น (Hierarchical routing protocols) ที่แบ่งโหนดในเครือข่ายออกเป็นกลุ่มย่อยในลักษณะเป็นลำดับชั้น โหนดในลำดับชั้นที่อยู่บนหรือใกล้กับสถานีฐานมากที่สุดจะมีหน้าที่รับผิดชอบในการรวบรวมและจัดการข้อมูลของโหนดในลำดับชั้นล่าง โหนดในลำดับชั้นล่างจะมีหน้าที่รับผิดชอบในส่วนของการเก็บหรือตรวจจับข้อมูลที่ต้องการรอบๆตัวมัน โพรโทคอลค้นหาเส้นทางในกลุ่มนี้สามารถจัดการส่วนของพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลในรูปแบบอื่นๆ

วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบลำดับชั้น โพรโทคอลภายในกลุ่มนี้ตัวที่รู้จักกันมากคือ Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchical (LEACH) เนื่องจาก LEACH เป็นโพรโทคอลที่มีการทำงานในรูปแบบกลุ่มที่เกิดขึ้นเป็นลำดับต้นๆ การทำงานของโพรโทคอลนี้ถูกออกแบบให้ทำงานได้เฉพาะเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก โหนดทั้งหมดภายในเครือข่ายสามารถสื่อสารโดยตรงกับสถานีฐาน (BS) และตัวโหนดทุกตัวดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะทำการนำเสนอโพรโทคอลที่สามารถทำงานพื้นฐานได้เหมือน LEACH แต่มีความยืดหยุ่นกว่าสามารถทำงานบนเครือข่ายที่มีขนาดหลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

1.2 การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างการเชื่อมต่อหรือรับส่งข้อมูลสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เป็นไปไม่ได้ที่จะระบุหรือกำหนดสิ่งที่ใช้ระบุตำแหน่งที่อยู่ให้ตัวโหนดแต่ละตัว โดยเฉพาะในกรณีที่มีโหนดจำนวนมาก ดังนั้นการเชื่อมต่อตัวโหนดจึงมีความซับซ้อนสูงทำให้ไม่เกิดประสิทธิภาพในส่วนของการใช้พลังงาน จึงมีการพัฒนาโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่สามารถเลือกตัวโหนด ใช้การรวมข้อมูลและบีบอัดข้อมูลในระหว่างการส่งต่อข้อมูลไปยังสถานีฐาน เพื่อลดจำนวนข้อมูลที่ทำการส่ง ตลอดจนนำไปสู่การค้นหาเส้นทางโดยยึดข้อมูลเป็นศูนย์กลาง กล่าวคือเน้นการส่งเมื่อต้องการข้อมูลเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างไปจากการค้นหาเส้นทางโดยยึดตำแหน่งที่อยู่ของตัวโหนดเป็นหลัก โดยจะยึดการหาเส้นทางเชื่อมต่อกันระหว่างตัวโหนดเท่านั้นไม่ใช่เป็นการหาเส้นทางที่จะไปให้ถึงข้อมูลที่ต้องการ ทำให้การนำเทคนิคอื่นๆที่นอกจากการค้นหาเส้นทางเข้ามาช่วยเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาเส้นทางภายในเครือข่ายและเกิดการเสนอขบวนการต่างๆเพื่อแก้ไขปัญหาของการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ขบวนการในการค้นหาเส้นทางจะต้องพิจารณาถึงลักษณะของตัวโหนดในเครือข่าย และโครงสร้างที่จำเป็น โพรโทคอลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางทั้งหมดสามารถแบ่งแยกออกเป็นกลุ่มๆ[1]ได้คือ แบบยึดข้อมูลเป็นศูนย์กลาง (Data-centric), แบบลำดับชั้น (Hierarchical) และ แบบยึดตามตำแหน่งที่ตั้ง (Location-based) โดย

กลุ่มเหล่านี้เหมือนกันตรงที่มีการทำงานอยู่บนพื้นฐานของ Network flow และตระหนักถึง Quality of Service (QoS)

โพรโทคอลแบบยึดข้อมูลเป็นศูนย์กลาง[1][2] เป็นโพรโทคอลที่ทำงานบนพื้นฐานของการร้องขอข้อมูล และขึ้นกับชื่อของข้อมูลที่ต้องการโดยจะช่วยลดปัญหาในเรื่องการส่งข้อมูลซ้ำซ้อนได้ ส่วนโพรโทคอลในแบบลำดับชั้น จะมีเป้าหมายที่จะเน้นไปยังกลุ่มของตัวโหนดที่ต้องการ ทำให้สามารถทำการรวบรวมและลดข้อมูลเพื่อประหยัดพลังงานในการส่งได้ โพรโทคอลในกลุ่มสุดท้ายคือ แบบยึดตามตำแหน่งที่ตั้ง ใช้ประโยชน์จากตำแหน่งของตัวโหนดเพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังพื้นที่ที่ต้องการแทนที่จะส่งข้อมูลออกไปยังตัวโหนดทั้งหมดในเครือข่าย

1.2.1 รายละเอียดของกลุ่มโพรโทคอล

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของกลุ่มโพรโทคอลหลักทั้ง 3 กลุ่ม ลักษณะการทำงานของโพรโทคอลในแต่ละกลุ่มมีดังนี้

1.2.1.1 โพรโทคอลที่ยึดข้อมูลเป็นศูนย์กลาง

โพรโทคอลในกลุ่มนี้เมื่อตัวโหนดต้องการข้อมูลจะทำการส่งข้อความไปถามยังโหนดที่อยู่ในบริเวณที่สนใจ และรอข้อมูลจากตัวโหนดที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าว โดยข้อมูลจะได้จากการร้องขอผ่านการไต่ถาม attribute-based naming ที่เป็นคุณสมบัติที่เฉพาะของข้อมูล ซึ่งมีการติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโหนดเพื่อกำจัดข้อมูลที่มากเกินไปและเพื่อให้ประหยัดพลังงานในการรับส่งข้อมูล และอีกหลายๆโพรโทคอลในกลุ่มนี้นั้นเน้นในเรื่องของข้อมูลที่ต้องการภายในเครือข่าย โดยตัวโหนดทุกตัวจะมีอำนาจหน้าที่เท่าเทียมกันทุกตัว และการเชื่อมการต่อระหว่างตัวโหนดแต่ละตัวจะมีระยะทางที่สั้นเพื่อที่จะสร้างการสื่อสารระหว่างตัวโหนดผ่านทางคลื่นวิทยุ การค้นหาเส้นทางของข้อมูลภายในเครือข่ายนั้นจะสามารถทำได้โดยวิธีการกระจายข้อความแบบ flooding หรือ broadcasting โดยจะมุ่งเน้นหาเส้นทางซึ่งให้ได้ข้อมูลที่ต้องการมากกว่าการเชื่อมต่อกันระหว่างโหนด โพรโทคอลแบบยึดข้อมูลเป็นศูนย์กลางจะทำการกระจายข้อมูลออกไปยังตัวโหนดทุกตัวที่สามารถส่งถึงกันได้ภายในเครือข่ายโดยไม่มีการจัดการใดๆจุดประสงค์เพียงเพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบโหนดต่อโหนดจนไปถึงปลายทาง โพรโทคอลในกลุ่มนี้มีเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น Flooding[1][2], Gossiping, SPIN[2][3][6], Direct Diffusion[3][4][5], Rumor Routing[2][3][7], Gradient-Based Routing[2][3][6][7], Constrained anisotropic diffusion routing[3] และ COUGAR[2] เป็นต้น

1.2.1.2 โพรโทคอลแบบลำดับชั้น

สถาปัตยกรรมที่มีเส้นทางการส่งข้อมูลทางเดียวนั้นไม่สามารถขยายขนาดสำหรับตัวโหนดที่มีจำนวนมากเพื่อครอบคลุมพื้นที่ที่มีขนาดกว้างได้ จุดมุ่งหมายหลักของการค้นหาเส้นทางแบบลำดับชั้นคือประสิทธิภาพในการการใช้พลังงานของตัวโหนดโดยในการติดต่อสื่อสารจะกระทำแบบเป็นช่วงๆซึ่งจะทำเป็นกลุ่มและการรวบรวมข้อมูลและรวมคำสั่ง ทำให้สามารถลดจำนวนการส่งข้อความออกไปยังเส้นทางได้เนื่องจากตัวโหนดจำนวนมากภายในเครือข่ายจะถูกจัดวางแบบสุ่ม การค้นหาเส้นทางแบบลำดับชั้นจะทำการแบ่งกลุ่มตัวโหนดแยกออกเป็นกลุ่มๆ และรวมกลุ่มตัวโหนดแต่ละกลุ่มเข้าเป็นเครือข่ายโดยแบ่งเป็นลำดับชั้น โดยตัวโหนดแต่ละตัวจะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไปภายในเครือข่าย ตัวโหนดที่มีพลังงานเหลือมากจะสามารถทำการคำนวณและส่งข้อมูลได้ดี ส่วนตัวโหนดที่มีพลังงานเหลือต่ำจะถูกให้ทำหน้าที่ตรวจจับเหตุการณ์ในพื้นที่นั้นๆ วิธีการหาเส้นทางแบบลำดับชั้นนี้ใช้หลักการดังกล่าวทำการตัดสินใจในการกำหนดหน้าที่ให้กับตัวโหนดแต่ละตัวในกลุ่มภายในเครือข่ายโดยหน้าที่ของตัวโหนดแต่ละตัวจะสอดคล้องไปกับระดับพลังงานที่เหลือของตัวโหนด รูปแบบของกลุ่มตัวโหนดภายในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะต้องมีการกำหนดตัวโหนดที่จะทำหน้าที่เป็นหัวหน้าของแต่ละกลุ่ม โดยวิธีการนี้จะทำให้ระยะเวลาทำงานของเครือข่าย ประสิทธิภาพในด้านพลังงาน ความยืดหยุ่นของเครือข่ายดีขึ้น ตัวอย่างโพรโทคอลในกลุ่มนี้คือ LEACH[1][2][3][6], PEGASIS[9], Hierarchical-PEGASIS, TEEN[1][3]และ APTEEN[8]

1.2.1.3 โพรโทคอลแบบยึดตำแหน่งที่ตั้ง

โพรโทคอลค้นหาเส้นทางในแบบยึดตำแหล่งที่ตั้งจะใช้ตำแหน่งทางกายภาพของตัวโหนดภายในเครือข่ายเพื่อทำการหาเส้นทาง หากตำแหน่งของตัวโหนดภายในเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลง การเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่มีการเปลี่ยนแปลงจะต้องมีการหาเส้นทางใหม่เพื่อสร้างการเชื่อมต่อให้กับโหนดที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งนั้นๆ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายไม่มีรูปแบบการระบุตำแหน่งที่อยู่เหมือนการใช้ IP-address ทำให้การหาเส้นทางแบบยึดตำแหน่งที่ตั้งจะใช้การระบุตำแหน่งทางกายภาพของมันแทนเช่น ระยะทางระหว่างตัวโหนดที่อยู่ใกล้เคียงโดยรอบสามารถที่จะคำนวณหาได้จากความเข้มของสัญญาณที่เข้ามายังตัวโหนด ส่วนตำแหน่งของตัวโหนดโดยรอบจะรู้ได้โดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างโหนด หากทราบถึงตำแหน่งของตัวโหนดพื้นที่ที่ต้องการตรวจจับข้อมูลหรือหตุการณ์ การร้องขอข้อมูลสามารถระบุการกระจายไปยังพื้นที่ที่ต้องการได้ซึ่งจะเป็นการลดจำนวนข้อมูลที่กระจายไปส่วนอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องในเครือข่ายได้ อย่างไรก็ตามมีโพรโทคอลหลายตัวในกลุ่มนี้ที่ไม่เหมาะกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเนื่องจากไม่มี

ข้อมูลพลังงานคงเหลือของแต่ละโหนด ตัวอย่างโพรโทคอลในกลุ่มนี้คือ MECN[1][3], SMECN[10], GAF[10][11] และ GEAR[3][10]

ความสามารถในการขยายขนาดของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นสิ่งสำคัญของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เครือข่ายขนาดใหญ่ที่มีโหนดจำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ของการใช้งานได้กว้างมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลลดต่ำลง ตัวอย่างเช่น การมีโหนดจำนวนมากส่งผลให้ข้อมูลที่กระจายอยู่ในเครือข่ายก็มากขึ้น มีโอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลได้มากขึ้น ทำให้ข้อมูลที่สามารถรับส่งได้สำเร็จมีจำนวนลดน้อยลง นอกจากนี้ยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครือข่ายเช่น โหนดที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลจากโหนดอื่นเป็นจำนวนมาก จึงทำให้พลังงานของโหนดที่อยู่ใกล้สถานีฐานหมดก่อนโหนดอื่น การเชื่อมต่อโหนดรอบนอกจึงไม่สามารถเข้าถึงสถานีฐานได้ เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานของโพรโทรคอลทั้งสามกลุ่มแล้ว โพรโทคอลในกลุ่มของ Hierarchical จะมีความเหมาะสมสำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่มากที่สุด ด้วยลักษณะการทำงานแบบเป็นลำดับชั้นจะสามารถลดจำนวนข้อมูล ควบคุมเซนเซอร์โหนดและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้ วิทยานิพนธ์ฉบบับนี้จึงให้ความสนใจกับโพรโทคอลในกลุ่ม Hierarchical เป็นสำคัญ

1.2.2 โพรโทคอลในกลุ่มแบบลำดับชั้น

โพรโทคอลที่รู้จักกันมากในกลุ่มแบบลำดับชั้นตัวหนึ่งคือ Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) ซึ่งถูกนำเสนอใน[13] LEACH เป็นโพรโทคอลที่ได้รับความสนใจมากสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แนวความคิดหลักของ LEACH คือการแบ่งตัวโหนดออกเป็นกลุ่มๆ และให้โหนดหัวหน้าเป็นทางเชื่อมส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน ด้วยวิธีการนี้จะสามารถประหยัดพลังงานจากการส่งข้อมูลได้ เพราะจะมีเพียงแค่โหนดหัวหน้าเท่านั้นที่ทำการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน โดยผู้คิดค้นโพรโทคอล LEACH ได้นำเสนอไว้ว่าจำนวนโหนดหัวหน้าที่เหมาะสมจะมีประมาณ 5% ของตัวโหนดทั้งหมดในเครือข่าย

V-LEACH เป็นโพรโทคอลที่พัฒนามาจาก LEACH ถูกนำเสนอใน[14] แนวความคิดหลักของ V-LEACH คือมีตัวโหนดหัวหน้าสำรอง (Vice-CH) เป็นตัวคอยขึ้นทำหน้าที่แทนโหนดหัวหน้า ในกรณีที่โหนดหัวหน้าหมดพลังงานไป หากว่าโหนดหัวหน้าหมดพลังงานจนกระทั่งไม่สามารถทำงานต่อได้กลุ่มโหนดนั้นจะหมดประโยชน์ลงทันที เนื่องจาก โหนดหัวหน้าเป็นตัวคอยรับข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดภายในกลุ่ม และทำการส่งต่อไปยังสถานีฐาน หากโหนดหัวหน้าใช้พลังงานจนหมด ข้อมูลจากกลุ่มโหนดจะไม่สามารถส่งถึงสถานีฐานได้อีกเลย ดังนั้น V-LEACH จึงได้มีการกำหนดตัวโหนดหัวหน้าสำรองไว้ทำหน้าที่โหนดหัวหน้าแทนในกรณีที่

โหนดหัวหน้าพลังงานหมด ทำให้ข้อมูลยังคงสามารถส่งถึงสถานีฐานได้ และไม่ต้องทำการคัดเลือกโหนดหัวหน้าใหม่อีกด้วย ทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น

โพรโทคอล Energy-LEACH (E-LEACH) ถูกนำเสนอขึ้นใน[15] เป็นโพรโทคอลที่ปรับปรุง LEACH ในเรื่องของการคัดเลือกโหนดหัวหน้า โดยแนวความคิดหลักคือ ใช้ค่าพลังงานที่เหลือของโหนดเข้ามาร่วมเป็นตัวตัดสินใจว่าโหนดตัวใดจะขึ้นทำหน้าที่โหนดหัวหน้า โพรโทคอล E-LEACH จะทำงานพื้นฐานเหมือนกับ LEACH ทั้งหมดคือ แบ่งการทำงานออกเป็นรอบๆ ในรอบแรกความน่าจะเป็นในการเป็นโหนดหัวหน้าของโหนดทั้งหมดจะเท่ากันหมด ในรอบถัดจากนั้นค่าความน่าจะเป็นจะต่างกันออกไปตามค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของแต่ละโหนด โหนดที่มีค่าพลังงานเหลือมากจะมีค่าความน่าจะเป็นสูงกว่าตัวโหนดที่มีค่าพลังงานเหลือน้อยกว่า

ในส่วนของ V-LEACH และ E-LEACH จะเป็นการพัฒนาจาก LEACH ในส่วนที่เกี่ยวกับโหนดหัวหน้าทั้งสิ้น ด้านนึงได้มีการนำเสนอโพรโทคอลที่พัฒนาจาก LEACH แต่ปรับเปลี่ยนในด้านการจัดรูปแบบเครือข่ายคือ Two Levels-LEACH (TL-LEACH)[16] ใน LEACH โหนดหัวหน้าจะเป็นตัวคอยเก็บรวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดภายในกลุ่ม และส่งต่อไปยังสถานีฐานโดยตรง โหนดหัวหน้าบางตัวอาจอยู่ไกลจากสถานีฐาน ดังนั้นโหนดหัวหน้าจะใช้พลังงานสูงในการส่งข้อมูลยังสถานีฐาน ทำให้พลังงานของโหนดหัวหน้าจะหมดเร็วกว่าโหนดอื่นๆภายในกลุ่ม TL-LEACH ถูกนำเสนอในแนวคิดที่ว่าแทนที่โหนดหัวหน้าจะส่งข้อมูลโดยตรงไปยังสถานีฐาน ในโพรโทคอล TL-LEACH โหนดหัวหน้าจะใช้โหนดหัวหน้าตัวอื่นๆที่อยู่ระหว่างตัวมันกับสถานีฐานเป็นตัวส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐานแทน

ภายหลังได้มีการนำเสนอโพรโทคอลที่พัฒนาต่อจาก TL-LEACH โดยถูกนำเสนอในชื่อว่า M-LEACH[16] โดยการทำงานพื้นฐานจะเหมือน LEACH เช่นเดียวกันกับ TL-LEACH ยกเว้นการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานของโหนดหัวหน้าซึ่งใช้การส่งแบบ multi-hop ระหว่างกลุ่มโหนดหัวหน้าแทน

จากเอกสารทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่า LEACH ได้รับความสนใจอย่างยิ่งยวดในโพรโทคอลรูปแบบ Hierarchical โดยได้มีการพัฒนาขึ้นในหลายๆด้านแต่จะเห็นว่าโพรโทคอล LEACH ยังมีหลายๆด้านที่ทำงานได้ไม่ดีพอดังเช่น การทำงานของโพรโทคอล LEACH ยังจำกัดอยู่บนเครือข่ายที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก หรือแม้กระทั่งการคัดเลือกโหนดหัวหน้าก็ยังทำได้ไม่เกิดประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งไปยังการพัฒนาโพรโทคอล LEACH ให้มีประสิทธิภาพบนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดการทำงานของ LEACH จะกล่าวในบทที่ 2 ต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแบบลำดับชั้นมีลักษณะการทำงานในรูปแบบกลุ่ม (Cluster-based) ที่สามารถทำงานพื้นฐานได้เหมือนโพรโทคอลLEACH แต่มีความยืดหยุ่นกว่าโดยสามารถทำงานได้ทั้งในเครือข่ายที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้

1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาและออกแบบโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่มีลักษณะการทำงานแบบกลุ่ม

1.4.2 ทดสอบและจำลองผลการทำงานของโพรโทคอลบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจำลองในขนาดต่างๆและวิเคราะห์ผล

1.5 ขั้นตอนและระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

ขั้นที่ 1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและแนวทางขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

ขั้นที่ 2 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลค้นหาเส้นทางในเครือข่ายแบบต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับโพรโทคอลที่ออกแบบ

ขั้นที่ 3 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับโปรแกรมที่จะใช้ในการทดสอบจำลองการทำงานของโพรโทคอล

ขั้นที่ 4 ศึกษาและทำการทดสอบการทำงานของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่คัดเลือก และวิเคราะห์ผลที่ได้

ขั้นที่ 5 ทำการออกแบบโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายโดยประยุกต์จากโพรโทคอลที่ทดสอบ

ขั้นที่ 6 วิเคราะห์ผลการทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบ ปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้น และทำการจำลองการทำงานอีกครั้งเพื่อทดสอบผล

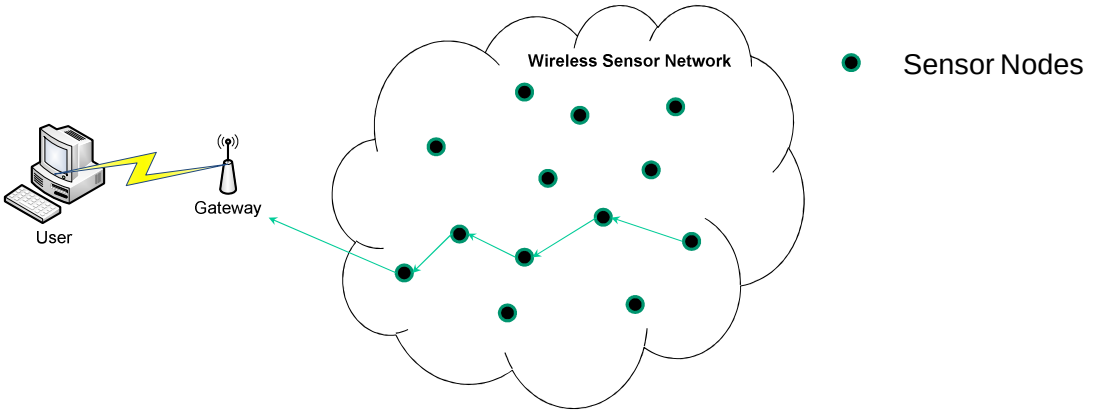
ขั้นที่ 7 สรุปผลและจัดทำรายงานผลการทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ โดยจะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย รวมไปถึงการทำงานของโพรโทคอล LEACH ซึ่งเป็นโพรโทคอลต้นแบบในการทำวิทยานิพนธ์

2.1 เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

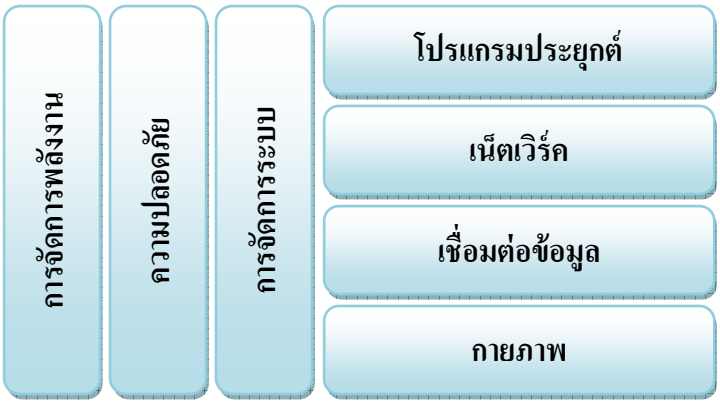
เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆด้านเช่น ด้านการตรวจสอบสภาพแวดล้อม ด้านการแพทย์ด้านทางการทหาร หรือด้านเกษตรกรรม เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สารประกอบไปด้วยตัวโหนดขนาดเล็กที่ใช้พลังงานต่ำมีอินเตอร์เฟสติดต่อกันแบบไร้สายสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการการดูแลบำรุงรักษา สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ด้วยขนาดที่เล็กทำให้ทรัพยากรมีจำนวนค่อนข้างจำกัดไม่ว่าจะเป็นหน่วยประมวลผล หรือหน่วยความจำ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะทำหน้าที่รับค่าข้อมูลทางกายภาพเช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน แสงสว่าง การสั่นสะเทือน ความแรงของสนามแม่เหล็ก เป็นต้นและทำการส่งข้อมูลผ่านทางเครือข่ายไร้สายแบบ Ac-hoc ไปยังสถานีฐาน (Base Station หรือ sink) แล้วเก็บไว้ในฐานข้อมูล และยังสามารถสร้าง Web Application เพื่อเข้าไปอ่านค่าข้อมูล แสดงผลผ่านทางอินเตอร์เน็ตให้ผู้ใช้ได้



รูปที่ 2-1เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

จากรูปที่ 2-1 จะเห็นว่าตัวโหนดในเครือข่ายจะทำการตรวจหาข้อมูลที่ต้องการ เมื่อได้ข้อมูลที่ต้องการจะทำการส่งข้อมูลดังกล่าวกลับไปยังสถานีฐานเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องระยะทางการสื่อสารของตัวโหนดไม่สามารถส่งข้อมูลโดยตรงไปยังสถานีฐานได้ เพราะตัวโหนดมีกำลังส่งที่ค่อนข้างต่ำ และสถานีฐานอยู่ห่างจากตัวโหนดมาก ทำให้การส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานนั้นจำเป็นต้องส่งผ่านตัวโหนดที่อยู่ข้างเคียงต่อๆไปยังสถานีฐานแทน ด้วยจำนวนโหนดที่มีมากในเครือข่าย การส่งข้อมูลผ่านไปยังโหนดที่อยู่ข้างเคียงไปยังสถานีฐานจำเป็นจะต้องมีการหาเส้นทางที่ดีที่สุด ดังนั้นการค้นหาเส้นทางที่มีประสิทธิภาพ และมีความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลจากตัวโหนดไปยังสถานีฐานจึงมีความสำคัญสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นอย่างยิ่ง

จากข้อจำกัดในหลายๆอย่างของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายทำให้ระบบของเครือข่ายมีความแตกต่างกันไปตามการใช้งานเช่น ระบบเครือข่ายต้องการความเร็วในการรับส่งสูง ต้องการความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูลสูง หรือระบบเครือข่ายต้องการการรับส่งข้อมูลจำนวนมากๆ เป็นต้น ดังนั้นการเลือกและออกแบบโพรโทคอลจะต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละเครือข่าย



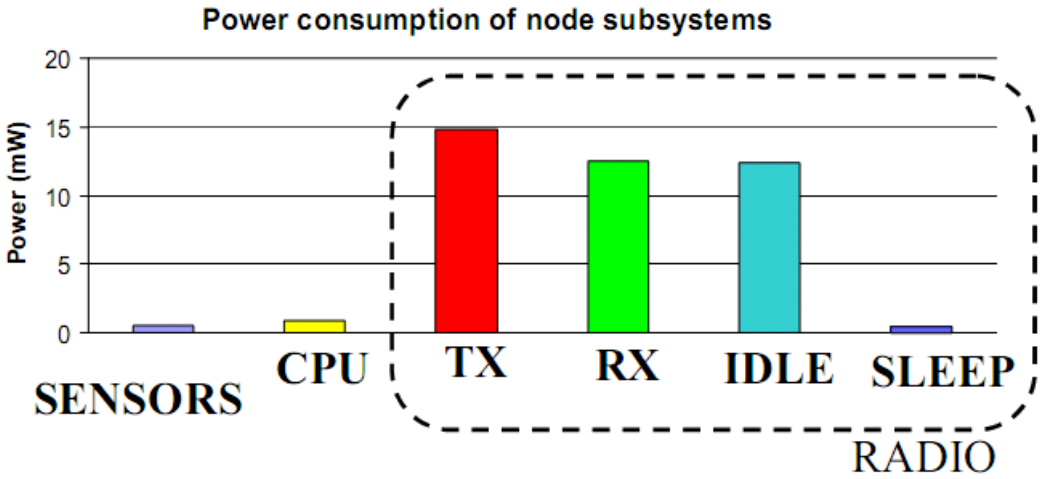
รูปที่ 2-2 สถาปัตยกรรมเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

จากรูปที่ 2-2 แสดงถึงสถาปัตยกรรมของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยแสดงในรูปแบบเป็นชั้นบล็อก ในแต่ละชั้นบล็อกจะทำหน้าที่แต่ละอย่างแตกต่างกันตามมาตรฐานของเครือข่ายและในแต่ละชั้นจะคอยให้บริการแก่ระดับชั้นที่อยู่เหนือมัน ในส่วนของบล็อกแนวตั้งจะแสดงถึงการทำงานในส่วนที่ข้ามชั้น(cross-layer functions) เช่นการจัดการพลังงาน การจัดการระบบ หรือ ในส่วนของความปลอดภัย โดยการทำงานเหล่านี้จะมีอินเตอร์เฟสทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระดับชั้นทั้งหมด อย่างเช่นการจัดการพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของพลังงาน ในชั้นเน็ตเวิร์คสามารถดึงค่าพลังงานที่เหลืออยู่มาเพื่อใช้ตัดสินใจว่าจะทำการส่งข้อความ

ค้นหาเส้นทางออกไปหรือไม่ หรือในชั้นเชื่อมต่อข้อมูลดึงค่าพลังงานที่เหลือเพื่อใช้ตัดสินใจในการส่งข้อมูลออกไปหรือไม่ ในส่วนของความปลอดภัยทำหน้าที่เข้ารหัสข้อมูลดังนั้นจึงอาจจะมีการเรียกใช้ได้ในหลายๆชั้นเช่น ชั้นโปรแกรมประยุกต์ ชั้นเน็ตเวิร์ค หรือชั้นเชื่อมต่อข้อมูลได้

ระดับชั้นของโพรโทคอลและฟังก์ชั่นการทำงานเป็นสิ่งจำเป็นในการกำหนดมาตรฐานและพัฒนาของกรอบการทำงานร่วมกันสำหรับการทำงานในอนาคตทั้งหมดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยชั้นที่มีความสำคัญอย่างมากชั้นหนึ่งคือ เน็ตเวิร์ค ซึ่งทำหน้าที่ในการติดต่อกันระหว่างเซนเซอร์โหนดมีการทำงานสองส่วนด้วยกันคือ

- Routing ทำการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งต่อข้อมูล
- Forwarding ทำการส่งต่อข้อมูลจากอินเตอร์เฟสหนึ่งไปยังอินเตอร์เฟสหนึ่ง

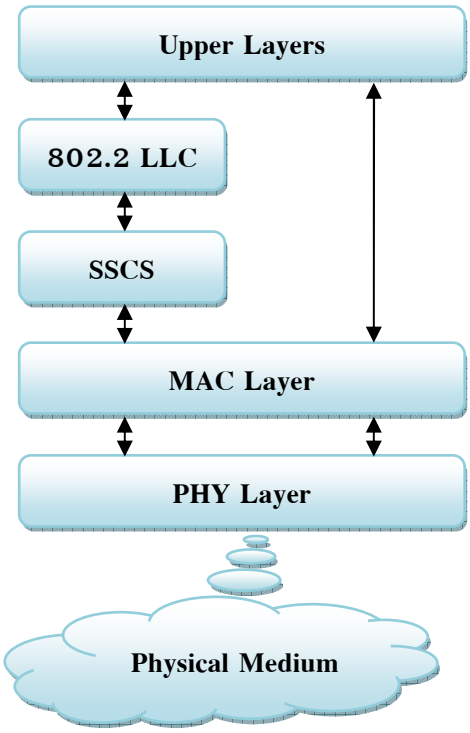


รูปที่ 2-3 ค่าพลังงานที่ใช้ในการทำงานของตัวโหนดแต่ละส่วน

จากรูปที่ 2-3 แสดงถึงการใช้พลังงานในการทำงานแต่ละส่วนของตัวโหนด ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ ฮาร์ดแวร์ และลักษณะการใช้สัญญาณวิทยุ โดยจะเห็นว่าทางด้านกายภาพจะมีสองส่วนคือ ส่วนสำหรับตรวจจับข้อมูลที่ต้องการ(Sensors) และส่วนของการประมวลผล(CPU) สองส่วนดังกล่าวจะใช้พลังงานไม่มากเมื่อเทียบกับส่วนของการใช้สัญญาณวิทยุ ลักษณะการใช้สัญญาณวิทยุมีด้วยกัน 4 ลักษณะคือ ใช้ส่งข้อมูล รับข้อมูล ใช้ในขณะตัวโหนดอยู่ในสถานะว่างงาน และสุดท้ายใช้ในขณะตัวโหนดอยู่ในสถานะหลับ จะเห็นว่าการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลจะสูงที่สุด ในการรับข้อมูลและขณะตัวโหนดอยู่ในสถานะว่างจะมีค่าสูงรองลงมา โดยที่หากว่าตัวโหนดอยู่ในสถานะหลับนั้นสัญญาณวิทยุจะปิดตัวลง ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้จะมีค่าต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่าพลังงานส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปกับการรับส่งข้อมูล ดังนั้นในการรับส่งข้อมูลให้มี

ประสิทธิภาพจะเกิดจากการทำงานบอนชั้นเน็ตเวิร์คเป็นหลัก วิทยานิพนธ์นี้จึงพัฒนาการทำงานบนชั้นดังกล่าวซึ่งก็คือทำการพัฒนาโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ทำหน้าที่อยู่บนชั้นเน็ตเวิร์ค

2.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4



รูปที่ 2-4แผนภาพโครงสร้าง IEEE 802.15.4

เมื่อปลายปี 2002 องค์กร IEEE ได้เริ่มจัดทำร่างมาตรฐานสำหรับการรับส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายส่วนบุคคลระยะใกล้ที่มีอัตราในการส่งข้อมูลต่ำและเน้นการสื่อสารที่ทนต่อสภาพสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งเรียกว่า LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network) โดยศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้นกายภาพ(Physical Layer: PHY) และชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (Medium Access Control: MAC) ของโครงข่ายแบบ WPAN ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ระหว่าง 1-5 Mbps แต่มีการใช้พลังงานต่ำเป็นพิเศษโดยใช้ประมาณ 100 μW ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานได้หลายเดือนหรือหลายปี

2.2.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer)

ชั้นกายภาพจะประกอบไปด้วยส่วนของอินเตอร์เฟซระหว่างชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางและส่วนของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุชั้นกายภาพ ในชั้นนี้จะทำหน้าที่ให้บริการ 2 ส่วนด้วยกันโดยผ่านจุดเข้าถึงการบริการ (Service Access Point: SAPs) คือ บริการข้อมูลชั้นกายภาพ (PHY data service) และ การจัดการบริการชั้นกายภาพ (PHY management service) เช่น การควบคุมการเปิดปิดสัญญาณวิทยุที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล การเลือกความถี่ช่องสัญญาณที่ใช้ Energy Detection (ED), Link Quality Indicator (LQI), Clear Channel Assessment (CCA) และรวมไปถึงการรับส่งข้อมูลผ่านสื่อกลางกายภาพด้วย

2.2.2 ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง(Medium Access Control Layer)

ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางประกอบไปด้วยส่วนของอินเตอร์เฟซระหว่างชั้นย่อย SSCS (Service Specific Convergence Sublayer) และชั้นกายภาพดังแสดงในรูปที่ 2-4 ในชั้นนี้จะให้บริการ 2 ส่วนลักษณะเดียวกันกับชั้นกายภาพคือ บริการข้อมูลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง และการจัดการบริการชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง ชั้นย่อยการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางจะนำเสนอการเข้าถึงสื่อกลางจากอุปกรณ์ร่วมภายในเครือข่ายส่วนบุคคล และชั้นย่อยการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางนี้ยังให้บริการในการเข้าถึงช่องสัญญาณชั้นกายภาพสำหรับการโอนถ่ายข้อมูลในทุกๆแบบอีกด้วย ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ชั้นย่อย Logical Link Control (LLC) สามารถเข้าถึงชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางได้โดยผ่านชั้นย่อย SSCS

2.2.3 ระดับชั้นบน (Upper Layer)

ในระดับชั้นบนจะประกอบไปด้วยชั้นเน็ตเวิร์ค และชั้นโปรแกรมประยุกต์ ในชั้นเน็ตเวิร์คทำหน้าที่กำหนดค่าเครือข่ายต่างๆ การจัดการเครือข่าย และการค้นหาเส้นทางสำหรับข้อความ ในส่วนของชั้นโปรแกรมประยุกต์นั้นทำหน้าที่ในส่วนของการทำงานของอุปกรณ์ในเครือข่าย

2.3 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

LEACH เป็นโพรโทคอลที่ได้รับความสนใจมากตัวหนึ่งในกลุ่มโพรโทคอลแบบลำดับชั้นสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แนวความคิดหลักของโพรโทคอลตัวนี้คือ แบ่งตัวโหนดในเครือข่ายออกเป็นกลุ่มๆโดยพิจารณาจากความเข้มของสัญญาณเป็นหลักในการแบ่งกลุ่ม และให้ตัวโหนดหัวหน้าเป็นทางเชื่อมต่อไปยังตัวสถานีฐาน ด้วยวิธีการนี้จะสามารถประหยัดพลังงานจากการส่งข้อมูลได้เพราะการส่งข้อมูลถึงสถานีฐานจะมีเพียงแค่ตัวโหนดที่เป็นหัวหน้ากลุ่มเท่านั้น โหนดอื่นๆไม่ต้องส่งข้อมูลมายังสถานีฐานโดยตรงแต่จะใช้โหนดหัวหน้าเป็นตัวส่งต่อข้อมูลไปยังสถานีฐานแทน ซึ่งจำนวนของตัวโหนดที่เป็นหัวหน้าจะมีประมาณ 5% ของตัวโหนดทั้งหมดภายในเครือข่ายตามที่ได้ถูกกล่าวเอาไว้ใน[13]

โหนดหัวหน้าแต่ละตัวจะมีภาระหน้าที่ในการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดภายในกลุ่มและประมวลผล บีบอัดก่อนส่งต่อไปยังสถานีฐาน เนื่องจากโหนดหัวหน้าจะมีภาระหน้าที่เยอะกว่าตัวโหนดอื่นๆทำให้มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงกว่า โหนดหัวหน้าในเครือข่ายจึงจะถูกสุ่มเปลี่ยนตามเวลาที่กำหนดเพื่อกระจายการใช้พลังงานของตัวโหนดให้สมดุลภายในเครือข่าย โดยการตัดสินใจดังกล่าวว่าโหนดตัวใดจะเป็นโหนดหัวหน้า เริ่มแรกโหนดแต่ละตัวจะกระทำการสุ่มเลือกหมายเลขระหว่าง 0 กับ 1 ขึ้นมาและโหนดตัวใดสุ่มเลือกตัวเลขได้ค่าที่มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์ จะเป็นโหนดหัวหน้า โดยค่าเกณฑ์จะคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*\left(rmod\frac{1}{P}\right)} & if n \in G, \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (1)$$

โดยที่ P เป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของตัวโหนดหัวหน้าที่ต้องการในเครือข่ายต่อจำนวนโหนดทั้งหมดในเครือข่าย r เป็นหมายเลขของรอบ n เป็นหมายเลขของโหนด G เป็นชุดของตัวโหนดที่ยังไม่เคยทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้าใน 1/P รอบ จากสมการที่ (1) จะเห็นว่าโหนดทุกตัวในเครือข่ายจะต้องทำหน้าโหนดหัวหน้า 1 รอบภายใน 1/P รอบ เมื่อโหนดตัวใดทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้าแล้ว ในรอบที่เหลือภายใน 1/P รอบจะมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0 หมายความว่าโหนดดังกล่าวจะไม่ได้รับเลือกเป็นโหนดหัวหน้าอีก เริ่มต้นโหนดแต่ละตัวจะทำการสุ่มค่าตัวเลขขึ้นมาหนึ่งค่า โดยค่าดังกล่าวจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และนำค่าดังกล่าวมาเทียบกับค่าเกณฑ์ที่ได้ในสมการที่ (1) หากว่าค่าที่สุ่มได้มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์ตัวโหนดที่สุ่มค่านั้นจะทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้า

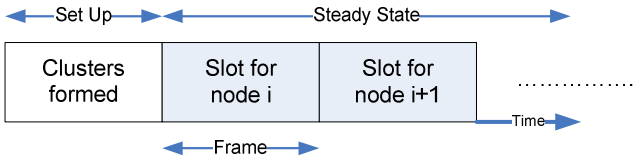
การพัฒนาโพรโทคอล LEACH ในลักษณะการแบ่งตัวโหนดออกเป็นกลุ่มเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานของเครือข่าย คุณลักษณะที่สำคัญของการทำงานของโพรโทคอล LEACH ที่เห็นเด่นชัดจะมีอยู่สามข้อด้วยกันดังนี้

- มีการจัดการระบบด้วยตัวมันเอง (self-organizing)
- สับเปลี่ยนหมุนเวียนการทำหน้าที่โหนดหัวหน้า เพื่อกระจายการใช้พลังงาน
- มีกระบวนการบีบอัดข้อมูลเพื่อลดทอนข้อมูลที่ไม่จำเป็นก่อนส่งต่อไปยังสถานีฐาน

LEACH มีปัจจัยในการลดการใช้ถึง 7 ประการด้วยกันโดยเทียบกับตัว Direct Diffusion ที่มีปัจจัยในการลดการใช้พลังงานเพียงแต่ 3-4 ปัจจัยเท่านั้น LEACH สามารถที่จะทำงานได้สมบูรณ์กว่าและไม่ต้องการข้อมูลกายภาพทางด้านเครือข่ายมากนัก โดยโพรโทคอล LEACH จะทำงานได้บนเครือข่ายที่มีคุณลักษณะดังนี้

- ตัวโหนดไม่มีการเคลื่อนที่
- ตัวโหนดรู้ถึงตำแหน่งที่ตั้งของตัวมัน และมีพลังงานเริ่มต้นเท่ากันทุกตัว
- ตัวโหนดสามารถกำหนดค่ากำลังการส่งข้อมูลของตัวมันได้
- สถานีฐานมีตำแหน่งที่แน่ชัด
- โหนดทุกตัวสามารถรับส่งข้อมูลกับสถานีฐานได้โดยตรง

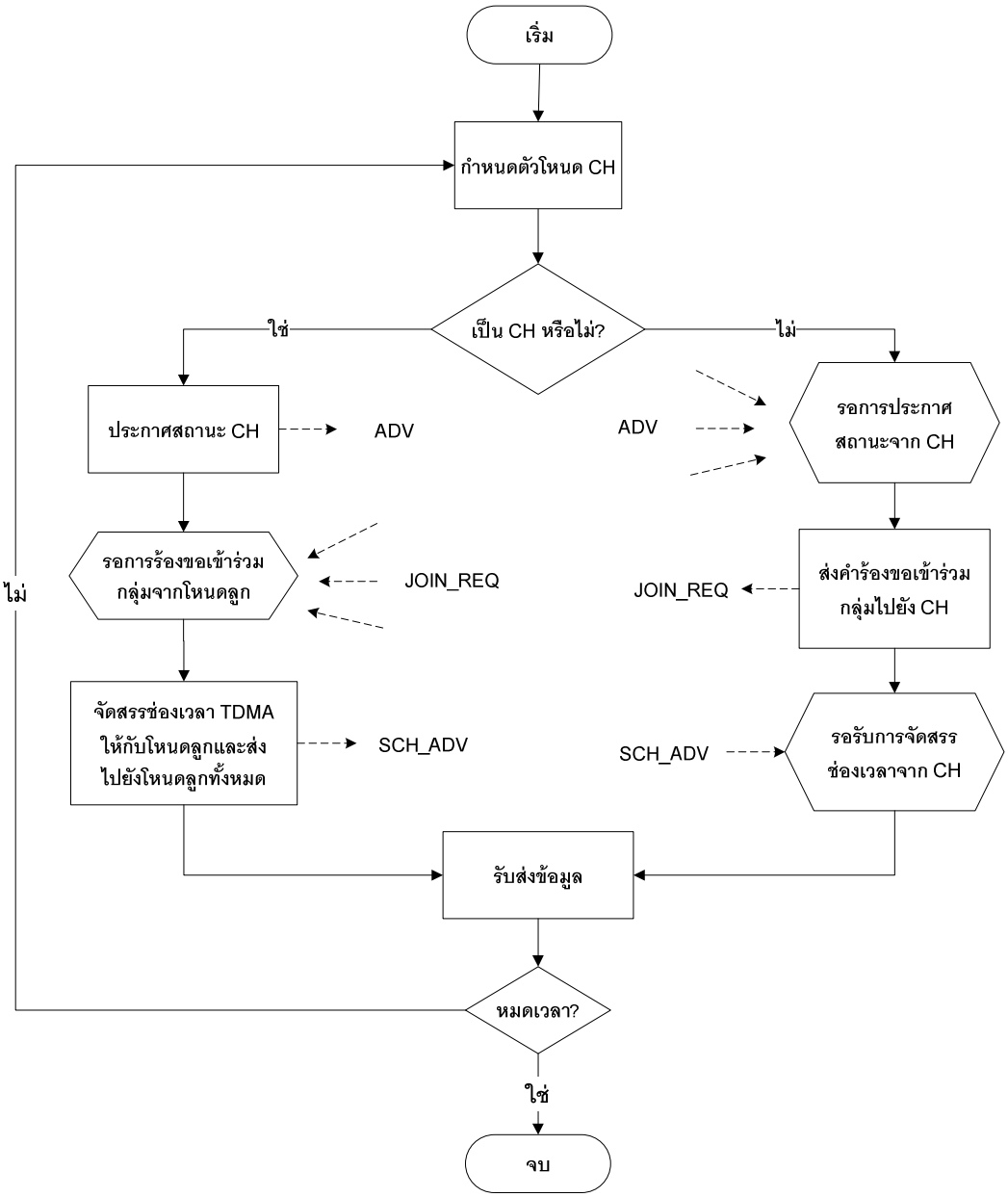
จากคุณลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดข้อจำกัดของเครือข่ายที่ LEACH สามารถทำงานได้ค่อนข้างมาก โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2-5 ช่วงการทำงานในแต่ละรอบของ LEACH

จากรูปที่ 2-5 โพรโทคอล LEACH จะแบ่งการทำงานออกเป็นรอบๆในแต่ละรอบจะมีส่วนการทำงานสองช่วงด้วยกันคือ ช่วงการสร้างเครือข่าย (Setup) และช่วงระยะคงตัว (Steady State) โดยในช่วงการสร้างเครือข่าย จะกระทำการแบ่งตัวโหนดในเครือข่ายออกเป็นกลุ่มๆ ส่วนในช่วงของระยะคงตัวจะเป็นช่วงของการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดทั้งหมดไปยังสถานีฐาน

2.3.1 กระบวนการทำงานของ LEACH

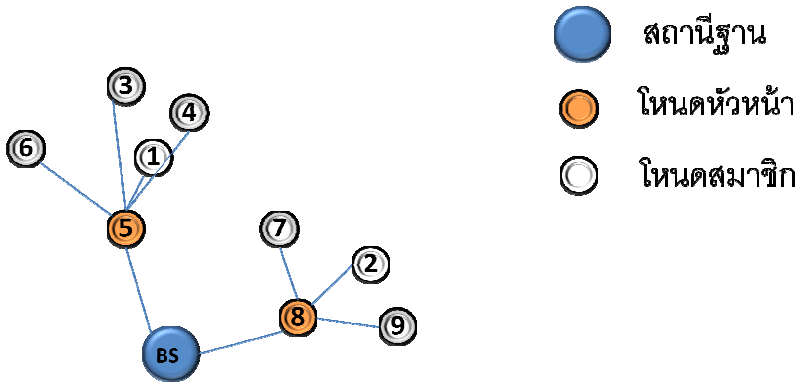


รูปที่ 2-6 แผนภาพการทำงานของ LEACH

จากรูปที่ 2-6 แสดงขั้นตอนการทำงานของโพรโทรคอล LEACH เริ่มต้นตัวโหนดทุกตัวภายในเครือข่ายจะทำการตัดสินตัวเองว่าตัวมันจะทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้าหรือไม่ จำนวนของโหนดหัวหน้าในเครือข่ายจะขึ้นกับค่าเปอร์เซ็นต์ที่กำหนดไว้ตั้งแต่ต้น โหนดแต่ละตัวจะทำการสุ่มค่าตัวเลขขึ้นมาหนึ่งค่าที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และนำค่าดังกล่าวมาเทียบกับค่าเกณฑ์ที่ได้ในสมการที่ (1) หากว่าค่าที่สุ่มได้มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์ ตัวโหนดที่สุ่มค่านั้นจะทำหน้าที่เป็นโหนด

หัวหน้าและทำการส่งข้อความประกาศตัว (ADV) ออกไปยังโหนดที่อยู่ข้างเคียงให้ทราบ แต่ถ้าค่าที่สุ่มได้มีค่าสูงกว่าค่าเกณฑ์ตัวโหนดที่สุ่มค่านั้นจะไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้า และจะทำการรอการประกาศตัวของตัวโหนดหัวหน้าต่อไป เมื่อตัวโหนดรอการประกาศตัวจากโหนดหัวหน้า

เมื่อตัวโหนดได้รับการประกาศตัวจากโหนดหัวหน้าแล้ว โหนดแต่ละตัวจะทำการเก็บค่าต่างๆของโหนดหัวหน้าจากข้อความที่ได้รับทั้งหมด เนื่องจากโหนดแต่ละตัวอาจได้รับการประกาศตัวจากโหนดหัวหน้ามากกว่า 1 ข้อความ กล่าวคืออาจได้รับข้อความจากโหนดหัวหน้ามากกว่า 1 ตัว หลังจากนั้นโหนดแต่ละตัวจะทำการตัดสินใจว่าจะเข้าร่วมกลุ่มกับโหนดหัวหน้าตัวใด โดยการตัดสินใจดังกล่าวจะคำนึงถึงค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับข้อความจากโหนดหัวหน้าเป็นหลัก ซึ่งความเข้มสัญญาณจะสะท้อนถึงคุณภาพหรือระยะห่างระหว่างตัวโหนดกับโหนดหัวหน้านั้นๆ โดยจะเลือกเอาค่าความเข้มสัญญาณที่มากที่สุดนั้นคือระยะทางระหว่างโหนดสั้นที่สุด เมื่อโหนดแต่ละตัวตัดสินใจได้แล้ว มันจะทำการร้องขอเข้าร่วมกลุ่มกับโหนดหัวหน้านั้นๆ โดยทำการส่งข้อความร้องขอ (REQ) ไปยังโหนดหัวหน้า โหนดหัวหน้าแต่ละตัวก็จะทำการเก็บข้อมูลโหนดภายในกลุ่มทั้งหมดไว้ เมื่อโหนดหัวหน้าได้รับข้อมูลทั้งหมดจากโหนดสมาชิกในกลุ่มแล้ว โหนดหัวหน้าจะทำการสร้างตาราง TDMA เพื่อบอกว่าโหนดแต่ละตัวจะทำการส่งข้อมูลเมื่อใดบ้าง ตารางดังกล่าวจะถูกกระจายไปยังโหนดสมาชิกภายในกลุ่มทุกตัว สุดท้ายตัวโหนดจะถูกจัดเป็นกลุ่มๆและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานดังแสดงในรูปที่ 2-7



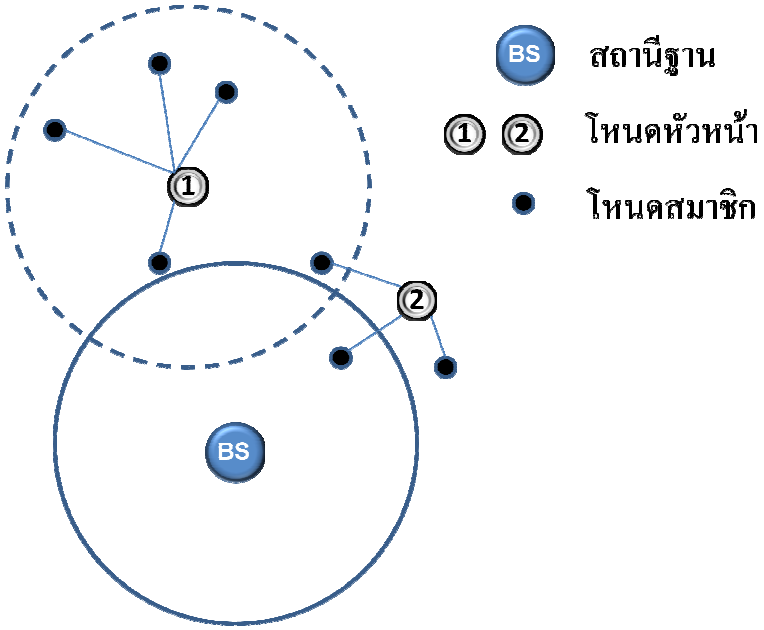
รูปที่ 2-7 ลักษณะเครือข่ายของโพรโทคอล LEACH

2.3.2 ปัญหาของโพรโทคอล LEACH

โพรโทคอล LEACH ถูกออกแบบให้มีการทำงานที่เน้นความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน เพื่อให้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด จากการทำงานของโพรโทคอล และข้อจำกัดของโพรโทคอลที่ได้กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า LEACH จะเกิดปัญหากับการทำงานบนเครือข่ายบางลักษณะนั้นคือ เครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของโพรโทคอล LEACH ปัญหาของ LEACH ที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานคือ การเลือกโหนดหัวหน้าโดยใช้ค่าความน่าจะเป็น และมีการสับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าโดยกำหนดเวลาโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.2.1 กระบวนการเลือกโหนดหัวหน้า

กระบวนการเลือกโหนดหัวหน้าของโพรโทคอล LEACH โดยใช้ความน่าจะเป็นนั้นมีข้อเสียคือ ไม่สามารถคาดเดาตัวโหนดหัวหน้าได้ ซึ่งทำให้การเชื่อมต่ออยู่นอกเหนือการควบคุมโดยสิ้นเชิง ซึ่งเห็นปัญหาอย่างชัดเจนเมื่อนำโพรโทคอล LEACH ไปทำงานบนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 2-8 การพลาดการเชื่อมต่อระหว่างโหนดหัวหน้ากับสถานีฐาน

จากรูปที่ 2-8 จะเห็นว่า หากการเลือกโหนดหัวหน้าด้วยค่าความน่าจะเป็นได้ตัวโหนดที่อยู่ไกลเกินรัศมีการสื่อสารของสถานีฐาน ตัวโหนดในกลุ่มนั้นๆจะไม่สามารถส่งข้อมูลมายังสถานีฐานได้เลย เนื่องจากโหนดสมาชิกจะใช้โหนดหัวหน้าเป็นตัวส่งต่อข้อมูลมายังสถานีฐานทั้งหมด ทำให้การเลือกโหนดหัวหน้าด้วยค่าความน่าจะเป็นจึงไม่เหมาะ

2.3.2.2 ช่วงเวลาการสับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า

โพรโทคอล LEACH มีลักษณะการทำงานเป็นรอบๆ เมื่อทำงานครบ 1 รอบจะมีการสับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า เพื่อกระจายการใช้พลังงานของเครือข่าย โดยเวลาในการทำงาน 1 รอบนั้นจะขึ้นกับเวลาที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดขึ้น ซึ่งการสับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าตามช่วงเวลาทำงานนี้จะให้ผลเสียในกรณีที่โหนดหัวหน้าเกิดมีพลังงานที่ต่ำและหมดพลังงานก่อนถึงช่วงเวลากำหนดที่ต้องทำการสับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า จะทำให้ข้อมูลของโหนดในกลุ่มนั้นๆไม่สามารถส่งถึงสถานีฐานได้ในทันที อีกทั้งในกระบวนการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าแต่ละครั้งยังทำให้เกิดการใช้พลังงานเมื่อโหนดหัวหน้าบ่อยครั้งพลังงานที่สูญเสียไปในกระบวนการดังกล่าวก็มากตามไปด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการแก้ไขปัญหาของ LEACH เพื่อให้โพรโทคอลมีการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยทำการออกแบบโพรโทคอลโดยมีโพรโทคอล LEACH เป็นพื้นฐาน และทำการแก้ไขปัญหาข้างต้น โพรโทคอลที่ออกแบบจะกล่าวไว้ในบทที่ 3

2.4 แนวความคิดของโพรโทคอลที่ออกแบบ

จากข้อด้อยของ LEACH ที่กล่าวในหัวข้อย่อยที่ผ่านมาได้นำมากำหนดเป็นประเด็นที่สำคัญของวิทยานิพนธ์ และนำเสนอในส่วนของแนวความคิดของโพรโทคอลที่จะออกแบบ เพื่อแก้ปัญหาของโพรโทคอล LEACH ดังต่อไปนี้

2.4.1 การเลือกโหนดหัวหน้า

จากปัญหาในการเลือกโหนดหัวหน้าโพรโทคอล LEACH ใช้การสุ่มค่าตัวเลขและความน่าจะเป็นในการเลือกโหนดหัวหน้า ดังนั้นการคาดเดาหรือควบคุมตำแหน่งของโหนดหัวหน้านั้นไม่สามารถกระทำได้ โพรโทคอลที่ออกแบบจึงมีแนวความคิดนำในส่วนของระยะการสื่อสารของตัวโหนดเข้ามาเกี่ยวข้องในการเลือกโหนดหัวหน้าในแต่ละครั้ง โดยการใช้ระยะการสื่อสารเข้ามาเกี่ยวข้องนี้เพื่อที่จะให้การเลือกโหนดหัวหน้าได้ตัวโหนดที่สามารถติดต่อสื่อสาร หรือส่งข้อมูลกลับมายังสถานีฐานได้เสมอ อีกทั้งในการเลือกโหนดหัวหน้าของโพรโทคอลที่ออกแบบนี้จะยังคงคำนึงถึงค่าพลังงานที่เหลือของตัวโหนดอีกด้วย โดยรายละเอียดในการเลือกโหนดหัวหน้าจะกล่าวไว้ในบทที่ 3

2.4.2 ช่วงเวลาในการปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า

โพรโทคอล LEACH จะทำการปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าทุกครั้งในแต่ละรอบการทำงาน โดยรอบการทำงานแต่ละรอบจะทำงานตามเวลาที่ได้ถูกกำหนดโดยผู้ใช้เท่านั้น ในส่วนของโพรโทคอลที่ออกแบบ การปรับเปลี่นโหนดหัวหน้าจะกระทำโดยการใช้ค่าพลังงานที่เหลือเป็นตัว

ตัดสินใจในการปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า โดยจะกำหนดค่าเกณฑ์เพื่อใช้เปรียบเทียบกับพลังงานที่เหลือของโหนดหัวหน้า เมื่อค่าพลังงานของโหนดหัวหน้ามีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์ โหนดหัวหน้าจะทำการร้องขอเพื่อทำการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่ ซึ่งแนวความคิดนี้จะทำให้การปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าจะเกิดขึ้นในกรณีที่จำเป็นเท่านั้น และยังป้องกันการหมดพลังงานระหว่างรอบการทำงานดังที่เกิดปัญหาในโพรโทคอล LEACH อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดการทำงานจะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3
การออกแบบโพรโทคอล

ในบทที่ 3 นี้จะเป็นการนำเสนอการออกแบบแพ็กเก็ตควบคุมของโพรโทคอล อธิบายถึงการทำงานของโพรโทคอลที่ได้ออกแบบ รวมทั้งสรุปผลการการทำงานของโพรโทคอล

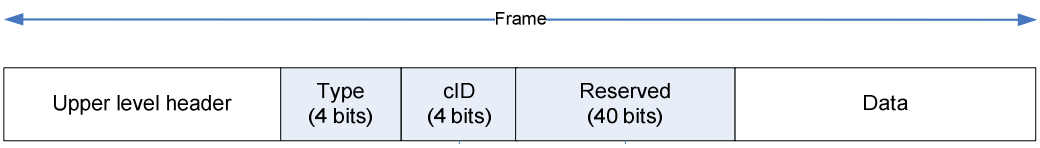
3.1 แพ็กเก็ตควบคุมที่ออกแบบ

แพ็กเก็ตควบคุมของโพรโทคอลใช้สำหรับร้องขอข้อมูล แลกเปลี่ยนข้อมูล ส่งข้อมูล หรือสั่งการไปยังโหนดต่างๆ เพื่อจัดการเครือข่ายให้ทำงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ในแต่ละแพ็กเก็ตของโพรโทคอลนั้นๆ โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ทำการออกแบบนี้มีส่วนของแพ็กเก็ตควบคุมทั้งหมด 7 ประเภทด้วยกัน โดยจะมีทั้งในส่วนของแพ็กเก็ตที่ดัดแปลงเพิ่มเติมจากแพ็กเก็ตในโพรโทคอล LEACH และส่วนของแพ็กเก็ตที่ออกแบบเพิ่มเติมขึ้นสำหรับโพรโทคอล

แพ็กเก็ตควบคุมที่นำของโพรโทคอล LEACH เดิมมาใช้และที่ดัดแปลงเพิ่มเติมจะมี แพ็กเก็ต ADV, แพ็กเก็ต JOIN และ แพ็กเก็ต SCH โดยจะมีการเพิ่มเติมในส่วนของข้อมูลส่วนหัวบางส่วนเช่น ค่าพลังงานที่เหลือ หรือหมายเลขของกลุ่มโหนด เพิ่มเติมเข้าไปจากรูปแบบแพ็กเก็ตเดิมเพื่อให้สามารถทำงานได้บนโพรโทคอลที่ออกแบบนี้

แพ็กเก็ตควบคุมที่ออกแบบขึ้นใหม่ เพื่อใช้งานในส่วนของการทำงานที่เพิ่มเติมจากโพรโทคอล LEACH จะมีในส่วนของ แพ็กเก็ต SCT, แพ็กเก็ต FIN, แพ็กเก็ต CHG และแพ็กเก็ต STP โดยในแต่ละแพ็กเก็ตจะดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 ข้อความประกาศ (Advertise message หรือ ADV)



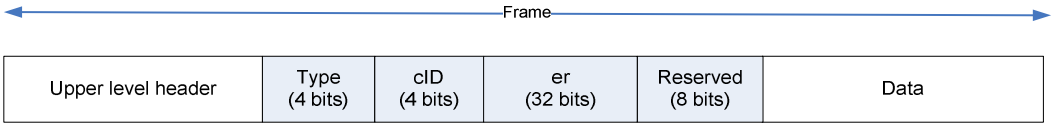
รูปที่ 3-1 รูปแบบแพ็กเก็ต ADV

แพ็กเก็ตควบคุม ADV เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบกระจาย (broadcast message) เป็นแพ็กเก็ตใช้สำหรับประกาศสิ่งที่ต้องการให้โหนดข้างเคียงทราบอย่างทั่วกัน มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-1 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต ADV

ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	1
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ทำการประกาศ
Reseved	ส่วนสำรองไว้สำหรับข้อมูลอื่นๆ
Data	ส่วนของข้อมูล

3.1.2 ข้อความร้องขอเข้าร่วม (Join message หรือ JOIN)



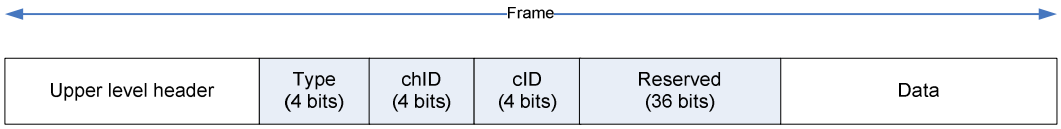
รูปที่ 3-2 รูปแบบแพ็กเก็ต JOIN

แพ็กเก็ตควบคุม JOIN เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one-to-one) ใช้ในการร้องขอการเข้าร่วมกลุ่มกับโหนดที่ทำการประกาศตัวผ่านทางแพ็กเก็ตควบคุม ADV มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-2 ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-2 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต JOIN

ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	2
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ร้องขอเข้าร่วม
er	ค่าพลังงานที่เหลือขณะที่ส่งแพ็กเก็ต
Reseved	ส่วนสำรองไว้สำหรับข้อมูลอื่นๆ
Data	ส่วนของข้อมูล

3.1.3 ข้อความกำหนดโหนดหัวหน้า (Select message หรือ SCT)



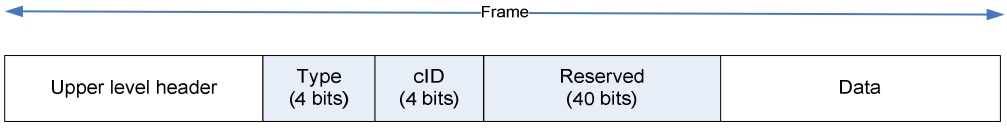
รูปที่ 3-3 รูปแบบแพ็กเก็ต SCT

แพ็กเก็ตควบคุม SCT เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one-to-one) ใช้ในการกำหนดตัวโหนดที่ทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้า (Cluster Head) ของโหนดลำดับชั้นล่าง มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-3 ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-3 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต SCT

ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	3
chID	หมายเลขโหนดที่เป็นโหนดหัวหน้า
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ร้องขอเข้าร่วม
Reseved	ส่วนสำรองไว้สำหรับข้อมูลอื่นๆ
Data	ส่วนของข้อมูล

3.1.4 ข้อความเสร็จสิ้นการจัดการเครือข่าย (Finale message หรือ FIN)



รูปที่ 3-4 รูปแบบแพ็กเก็ต FIN

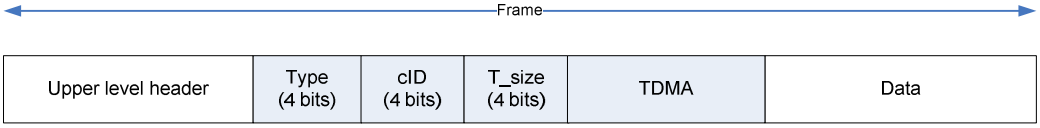
แพ็กเก็ตควบคุม FIN เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one-to-one) ใช้ในการแจ้งไปยังโหนดหัวหน้าของกลุ่มที่เข้าร่วมเมื่อการจัดรูปแบบเครือข่ายแบบลำดับชั้นเสร็จสิ้น

กล่าวคือเมื่อการกำหนดโหนดหัวหน้าของลำดับชั้นสุดท้ายเสร็จสิ้น มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-4ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-4 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต FIN

ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	4
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ร้องขอเข้าร่วม
Reseved	ส่วนสำรองไว้สำหรับข้อมูลอื่นๆ
Data	ส่วนของข้อมูล

3.1.5 ข้อความกำหนดตารางค่า TDMA (Time Division Multiple Access)หรือ SCH



รูปที่ 3-5 รูปแบบแพ็กเก็ต SCH

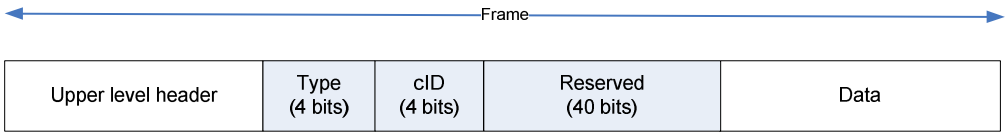
แพ็กเก็ตควบคุม SCH เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบกระจายใช้ในการแจ้งค่าตารางลำดับการส่งข้อมูลของโหนดในกลุ่มไปยังโหนดทั้งหมด กล่าวคือเมื่อเสร็จสิ้นการจัดรูปแบบเครือข่ายออกเป็นลำดับชั้น โหนดหัวหน้าของแต่ละลำดับชั้นจะทำการสร้างและส่งตาราง TDMA ไปยังโหนดในกลุ่มทั้งหมดSCH มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-5 ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-5 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต SCH

ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	5
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ร้องขอเข้าร่วม
T_size	ขนาดจำนวนของ TDMA

TDMA	ส่วนกำหนดลำดับการส่งของโหนดทั้งหมด
Data	ส่วนของข้อมูล

3.1.6 ข้อความร้องขอเปลี่ยนโหนดหัวหน้า (Change message หรือ CHG)



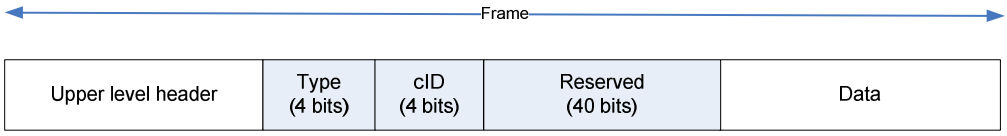
รูปที่ 3-6 รูปแบบแพ็กเก็ต CHG

แพ็กเก็ตควบคุม CHG เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบหนึ่งต่อหนึ่งใช้ในการร้องขอทำการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า กล่าวคือเมื่อค่าพลังงานของโหนดหัวหน้าเดิมมีค่าต่ำ และเสี่ยงต่อการใช้พลังงานหมดโหนดหัวหน้าจะทำการส่งแพ็กเก็ตควบคุม CHG ไปยังโหนดหัวหน้าของลำดับชั้นมัน เพื่อร้องขอทำการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่ CHG มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-6 ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-6 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต CHG

ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	6
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ร้องขอทำการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า
Reseved	ส่วนสำรองไว้สำหรับข้อมูลอื่นๆ
Data	ส่วนของข้อมูล

3.1.7 ข้อความหยุด (Stop message หรือ STP)



รูปที่ 3-7 รูปแบบแพ็กเก็ต STP

แพ็กเก็ตควบคุม STP เป็นแพ็กเก็ตที่ใช้การส่งแบบกระจายใช้ในการร้องขอให้หยุดส่งข้อมูล กล่าวคือเมื่อมีการร้องขอทำการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า โหนดภายในกลุ่มจำเป็นต้องหยุดส่งข้อมูลชั่วคราว เพื่อให้การปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าเสร็จสิ้นโดยเร็วและไม่เกิดการขัดข้องจากการชนกันของข้อมูล STP มีโครงสร้างรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3-7 ซึ่งส่วนของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแพ็กเก็ตมีดังนี้

ตารางที่ 3-7 ส่วนของฟิลด์ในแพ็กเก็ต STP

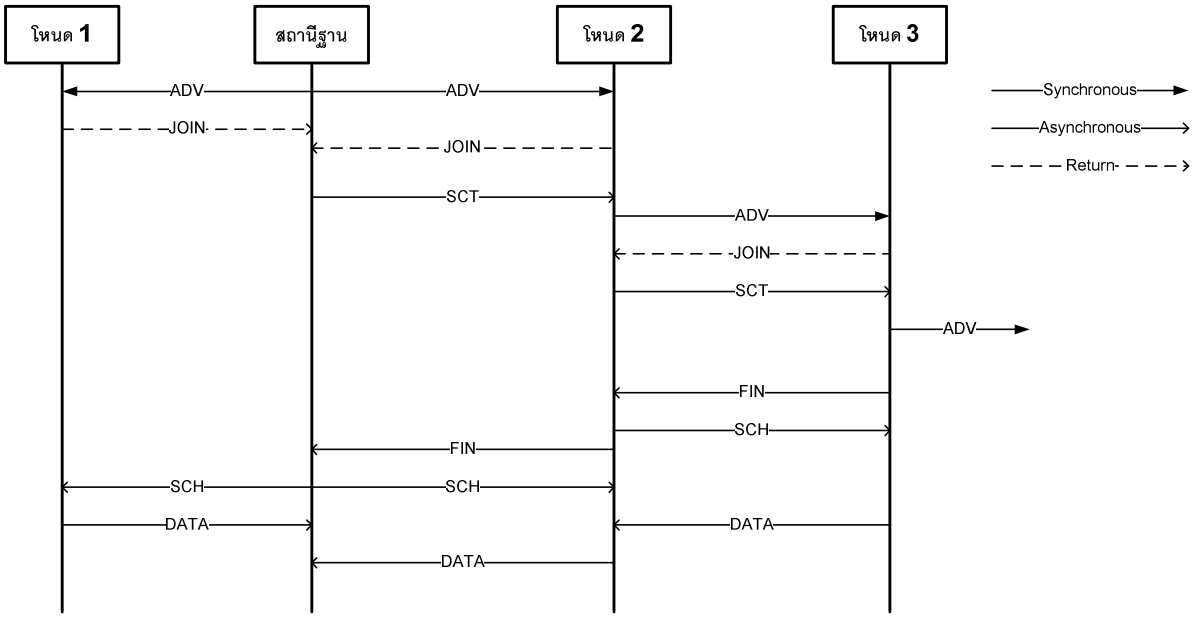
ชื่อฟิลด์	ค่า / ความหมาย
Type	7
cID	หมายเลขกลุ่มของโหนดที่ร้องขอให้หยุดส่งข้อมูล
Reseved	ส่วนสำรองไว้สำหรับข้อมูลอื่นๆ
Data	ส่วนของข้อมูล

3.2 การทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบ

จากปัญหาของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง LEACH ที่ใช้วิธีการเลือกโหนดหัวหน้าและทำการจัดกลุ่มเครือข่ายด้วยความน่าจะเป็นนั้น ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการเชื่อมต่อระหว่างโหนดหัวหน้าและสถานีฐานในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นโพรโทคอลที่ออกแบบนี้จะทำการแก้ไขปัญหานี้

โพรโทคอลที่ออกแบบเพื่อรองรับการทำงานบนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ ด้วยขนาดของเครือข่ายที่ใหญ่กว่าระยะการรับส่งข้อมูลของโหนดในเครือข่าย ทำให้การติดต่อสื่อสารโดยตรงจากต้นทางไปยังปลายทางนั้นเป็นไปได้ยาก แนวความคิดหลักของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ออกแบบนี้จึงคำนึงถึงระยะการติดต่อสื่อสารของโหนดเป็นสำคัญในการจัดเครือข่ายการ

ทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบนี้จะแบ่งช่วงการทำงานออกเป็น 3 ส่วนคือ ช่วงเริ่มต้นจัดการเครือข่าย (setup phase) ช่วงดำเนินการรับส่งข้อมูล (steady state phase) และช่วงปรับปรุงเครือข่าย (improved cluster head phase) โดยภาพรวมทั้งหมดของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการทำงานของโพรโทคอลจะแสดงได้ดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 ผังงานลำดับการทำงานของระบบ

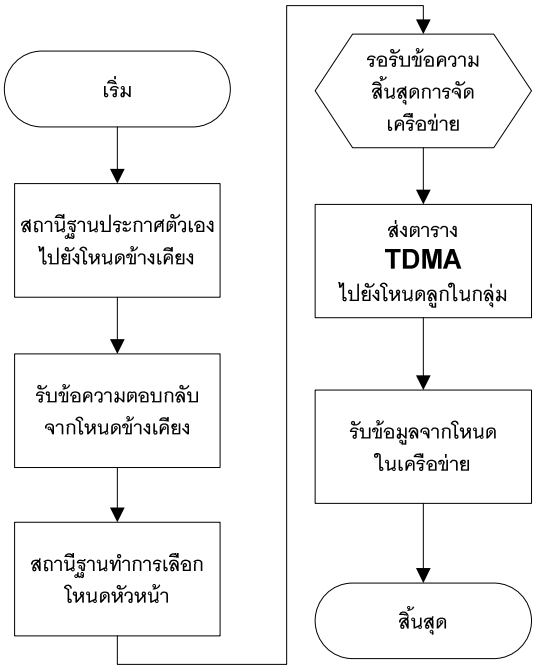
3.2.1 ส่วนเริ่มต้นจัดการเครือข่าย (Setup phase)

แนวความคิดหลักของโพรโทคอลนี้คือ จัดรูปแบบเครือข่ายให้มีลักษณะเป็นลำดับชั้นโดยมีศูนย์กลางคือ สถานีฐานหรือโหนดหัวหน้า ในแต่ละชั้นจะทำงานในลักษณะกลุ่ม (cluster base) แต่ละชั้นแต่ละกลุ่มจะมีโหนดซึ่งทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลและควบคุมโหนดทั้งหมดภายในกลุ่มนั้นๆ

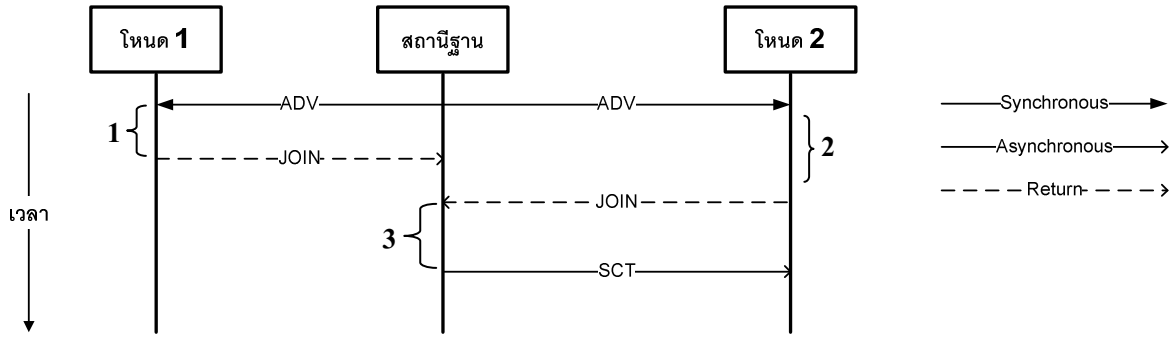
ในส่วนของระบบที่ทำการออกแบบจะมีสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนการทำงานของสถานีฐาน (BS) และส่วนของตัวโหนด โดยสถานีฐานเป็นตัวเริ่มต้นการทำงานเสมอ เนื่องจากระบบต้องการการทำงานที่เป็นขั้นตอน หากแต่ละส่วนของระบบทำงานแยกกันจะทำให้การจัดการข้อมูลซับซ้อนและยุ่งยากกับการจัดการเรื่องของการชนกันของข้อมูล เพราะการจัดการเครือข่ายทั้งเครือข่ายพร้อมๆกันในครั้งเดียว การส่งข้อความกลับมายังสถานีฐานจะไม่สามารถคาดเดาได้ทำให้การส่งข้อมูลในแต่ละกลุ่มอาจเกิดการชนกันขึ้นทั้งในระหว่างกลุ่มโหนดและภายในกลุ่มโหนดเอง

3.2.1.1 การทำงานในส่วนของสถานีฐาน

สถานีฐานในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นส่วนสำคัญในการทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์โหนดในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ควบคุมการทำงานและติดต่อกับผู้ใช้งาน (Users) หรืออาจติดต่อกับเครือข่ายอื่นๆ เช่น อินเทอร์เน็ต เป็นต้น ดังนั้นการโพรโทคอลที่ออกแบบจึงเริ่มต้นการทำงานจากสถานีฐานเป็นอันดับแรก

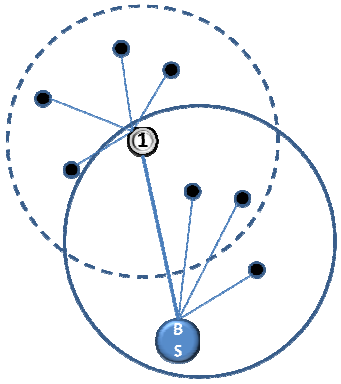


รูปที่ 3-9 ผังงานการทำงานในส่วนของสถานีฐาน



รูปที่ 3-10 แผนภาพการประกาศของสถานีฐานและตอบกลับของโหนด

จากรูปที่ 3-9 แสดงผังการทำงานในส่วนของสถานีฐานทั้งหมดโดยจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือส่วนการจัดการเครือข่ายและการรับส่งข้อมูล ซึ่งในส่วนของการจัดการเครือข่ายจะแสดงการทำงานในรูปที่ 3-10 เป็นการทำงานในส่วนเริ่มแรกซึ่งจะเริ่มจากสถานีฐานทำการประกาศตัวเองออกไปบริเวณข้างเคียงด้วยแพ็กเก็ตควบคุม ADV (แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3-1) เพื่อทำการหาโหนดข้างเคียงทั้งหมดที่อยู่ภายในรัศมีการรับส่งข้อมูลกับตัวสถานีฐานได้ (100 เมตรโดยประมาณ)โดยหลังจากโหนดข้างเคียงได้รับรู้การประกาศของสถานีฐานตัวโหนดจะตอบกลับสถานีฐานด้วยแพ็กเก็ตควบคุม JOIN (แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3-2) เพื่อแจ้งให้สถานีฐานทราบและขอร่วมกลุ่ม ในการตอบกลับของโหนดแต่ละตัวจะมีการกำหนดค่าหน่วงเวลา (delay time) เพื่อเลี่ยงการชนกันของแพ็กเก็ตที่ตอบกลับดังแสดงในรูปที่ 3-10 ในส่วนของหมายเลข 1 และ 2 เมื่อสถานีฐานได้ทราบถึงโหนดข้างเคียงทั้งหมด จากนั้นจะทำการเลือกโหนดขึ้นมาหนึ่งตัวในจำนวนโหนดข้างเคียงทั้งหมดเพื่อทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้า (CH) ให้กับระดับชั้นถัดไปแสดงในส่วนของหมายเลข 3



รูปที่ 3-11 ระยะรัศมีในการรับส่งข้อมูลของแต่ละระดับชั้น

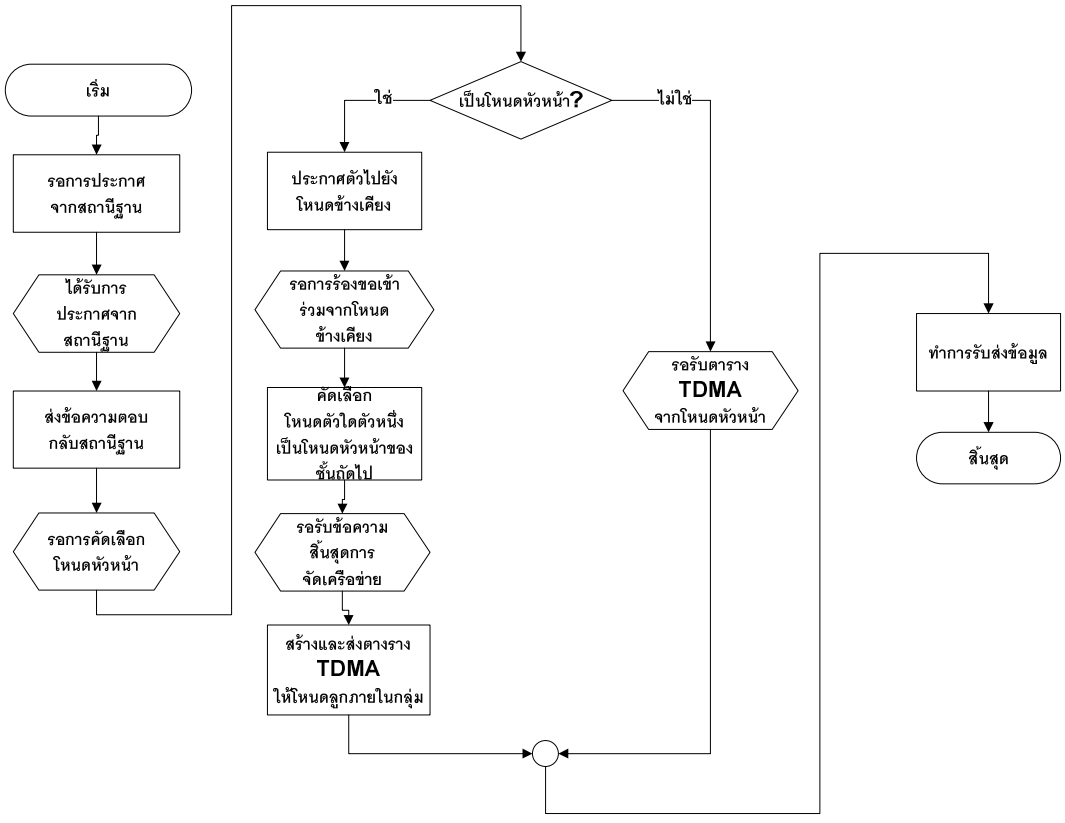
จากรูปที่ 3-10 ในการเลือกตัวโหนดหัวหน้า(หมายเลข 3) จะทำการคัดเลือกจากค่าของพลังงานและระยะทางร่วมด้วย โดยให้ตัวโหนดที่มีค่าพลังงานสูงที่สุดประกอบกับมีระยะห่างจากตัวสถานีฐานออกไปเพื่อให้การครอบคลุมของระยะในการรับส่งข้อมูลของระดับชั้นถัดไปออกไปได้ไกลที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3-11 โดยค่าน้ำหนักของพลังงานและระยะทางในการเลือกตัวโหนดหัวหน้านั้นจะให้ค่าไม่เท่ากัน โดยจะให้น้ำหนักกับค่าพลังงานเข้ามามีน้ำหนักในการตัดสินใจมากกว่าค่าระยะทางของตัวโหนด หรือให้ค่าน้ำหนักของระยะทางมากกว่า โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ (1)

$$MAX[(W1 \times Er) + (W2 \times d)] \rightarrow CH \qquad (1)$$

จากสมการ (1) W1 เป็นค่าน้ำหนักในการตัดสินใจของค่าพลังงาน, W2 เป็นค่าน้ำหนักในการตัดสินใจของค่าระยะทาง, Er เป็นค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวโหนด, d เป็นค่าระยะทางระหว่างโหนด

หลังจากได้โหนดหัวหน้าแล้วสถานีฐานจะทำการส่งไปแจ้งตัวโหนดดังกล่าวด้วยแพ็กเก็ตควบคุม SCT (แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3-3) เมื่อตัวโหนดได้รับการคัดเลือกแล้วจะทำการประกาศหาโหนดข้างเคียงของตัวมันเองต่อไปเพื่อสร้างระดับชั้นถัดไปขึ้นมาเหมือนกระบวนการข้างต้นต่อๆไป จนกระทั่งตัวโหนดหัวหน้าของระดับสุดท้ายที่ไม่สามารถหาหรือคัดเลือกตัวโหนดหัวหน้าขึ้นมาได้อีก ก็จะทำการส่งข้อความไปแจ้งยังตัวโหนดหัวหน้าระดับชั้นบนต่อๆไปจนถึงสถานีฐานเมื่อสถานีฐานได้รับข้อความก็จะทำการสร้าง TDMA schedule เพื่อกำหนดช่องเวลา (time slot) ในการส่งข้อมูลของตัวโหนดแต่ละตัว และทำการส่งออกไปบอกตัวโหนดทั้งหมด ตัวโหนดหัวหน้าของแต่ละระดับชั้นก็จะทำการสร้าง TDMA schedule ของระดับชั้นตัวเองขึ้นมาเช่นกันและทำการส่งไปให้ตัวโหนดในระดับชั้นทั้งหมด เมื่อตัวโหนดได้รับ TDMA schedule แล้วก็จะทำการส่งข้อมูลตามช่วงเวลาที่ได้รับต่อไป

3.2.1.2 การทำงานในส่วนของตัวโหนด



รูปที่ 3-12 ผังงานการทำงานในส่วนของตัวโหนด

จากรูปที่ 3-12 แสดงการทำงานในส่วนของตัวโหนด โดยตัวโหนดทั้งหมดจะทำการรอการประกาศ (Advertise message) ของสถานีฐานหรือตัวโหนดหัวหน้าเมื่อตัวโหนดได้รับ ADV จากสถานีฐานแล้วตัวโหนดจะทราบถึง หมายเลขระดับชั้น (cID) และตัวโหนดที่ตัวมันจะต้องทำการส่งข้อมูลให้ (Cluster Head ID) ตัวโหนดจะทำการตอบกลับด้วยแพ็กเก็ตควบคุม JOIN เพื่อให้สถานีฐานทราบถึงตัวมันได้อยู่ภายในลำดับชั้นนี้ด้วย โดยตัว JOIN แพ็กเก็ตจะประกอบไปด้วย ประเภทของแพ็กเก็ต (type) หมายเลขลำดับชั้น (cID) และค่าพลังงานที่เหลือ ณ ขณะนั้นของตัวมัน (Er) เพื่อไว้ใช้ในการตัดสินใจเลือกตัวโหนดหัวหน้าในรอบถัดไป โดยรูปแบบแพ็กเก็ตแสดงได้ดังรูปที่ 3-2

หลังจากสถานีฐานหรือโหนดหัวหน้าได้รับแพ็กเก็ต JOIN จากโหนดรอบข้างตามเวลาที่กำหนด จะทำการตัดสินใจเลือกตัวโหนดหนึ่งตัวจากในจำนวนโหนดข้างเคียงทั้งหมดขึ้นมาทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้าของลำดับชั้นถัดไปต่อไป โดยเกณฑ์ในการเลือกโหนดหัวหน้านั้นจะมีค่าที่เกี่ยวข้องอยู่สองค่าด้วยกันคือ ค่าพลังงานที่เหลือ และค่าระยะห่างระหว่างตัวโหนดกับสถานีฐาน มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) มีรายละเอียดดังนี้

W_1 คือค่าน้ำหนักของค่าพลังงานที่เหลือ

E_{ri} คือค่าพลังงานที่เหลือของโหนด I

W_2 คือค่าน้ำหนักของค่าระยะห่างระหว่างโหนด I กับสถานีฐาน

D_i คือค่าระยะห่างระหว่างโหนด I กับสถานีฐาน

โหนดตัวใดมีค่า T มากที่สุดจะได้รับเลือกให้เป็นโหนดหัวหน้าหลังจากนั้นสถานีฐานจะทำการส่งแพ็กเก็ตควบคุม SCT (select message) ไปยังตัวโหนดหัวหน้าที่ได้รับเลือก เพื่อให้ตัวโหนดทราบว่าได้รับเลือกให้เป็นตัวโหนดหัวหน้าของลำดับชั้นถัดไป โดยรูปแบบแพ็กเก็ตแสดงได้ดังรูปที่ 3-3

เมื่อตัวโหนดหัวหน้าได้รับการเลือกแล้ว (ได้รับแพ็กเก็ตควบคุม SCT) ตัวโหนดหัวหน้าจะทำการประกาศตัวออกไปเพื่อหาตัวโหนดข้างเคียงดังเช่นที่สถานีฐานหรือโหนดหัวหน้าลำดับชั้นบนทำข้างต้นต่อๆไป จนกระทั่งถึงลำดับชั้นที่ตัวโหนดหัวหน้าของลำดับชั้นไม่ได้รับการตอบรับจากโหนดข้างเคียงหรือไม่มีโหนดข้างเคียงอีกแล้ว ตัวโหนดหัวหน้าก็จะทำการส่งแพ็กเก็ตควบคุม FIN กลับไปยังโหนดหัวหน้าของลำดับชั้นก่อนหน้าลำดับชั้นของตัวมัน เพื่อบอกถึงการเสร็จสิ้นการเชื่อมต่อของลำดับชั้นเครือข่าย โดยรายละเอียด FIN แสดงดังรูปที่ 3-4

ในส่วนของโหนดที่ไม่ได้รับเลือกเป็นโหนดหัวหน้าจะทำการรอตารางเวลาสำหรับส่งข้อมูล (TDMA schedule) เพื่อทราบถึงช่วงเวลาในการรับส่งข้อมูลของตัวเอง และทำการส่งข้อมูลตามช่วงเวลาที่ได้รับ

3.2.2 ส่วนดำเนินการรับส่งข้อมูล (Steady state phase)

เมื่อขั้นตอนการจัดการเครือข่ายเป็นลำดับชั้นเสร็จสิ้น หลังจากที่ตัวโหนดได้รับ FIN แพ็กเก็ต ตัวโหนดจะทำการส่ง FIN แพ็กเก็ตต่อๆขึ้นไปยังลำดับชั้นบนต่อไป และทำการสร้างตารางช่องเวลา (TDMA schedule) เพื่อกำหนดช่องเวลาในการส่งข้อมูล (Slot time) ให้กับตัวโหนดทั้งหมด และทำการส่งตารางช่องเวลาดังกล่าวไปกับแพ็กเก็ตควบคุม SCH (มีรายละเอียดดังรูปที่ 3-5) เพื่อบอกให้ตัวโหนดทั้งหมดภายในลำดับชั้นรับทราบ

เมื่อตัวโหนดได้รับตารางช่องเวลาจากตัวโหนดหัวหน้าแล้ว ตัวโหนดจะทำการตรวจสอบว่าตัวเองสามารถส่งข้อมูลได้ในช่องเวลาที่เท่าไหร่ หลังจากทราบถึงช่วงเวลาที่สามารถส่งข้อมูลแล้วตัวโหนดจะทำการส่งข้อมูลไปยังตัวโหนดหัวหน้าตามช่วงเวลาที่ได้รับ จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

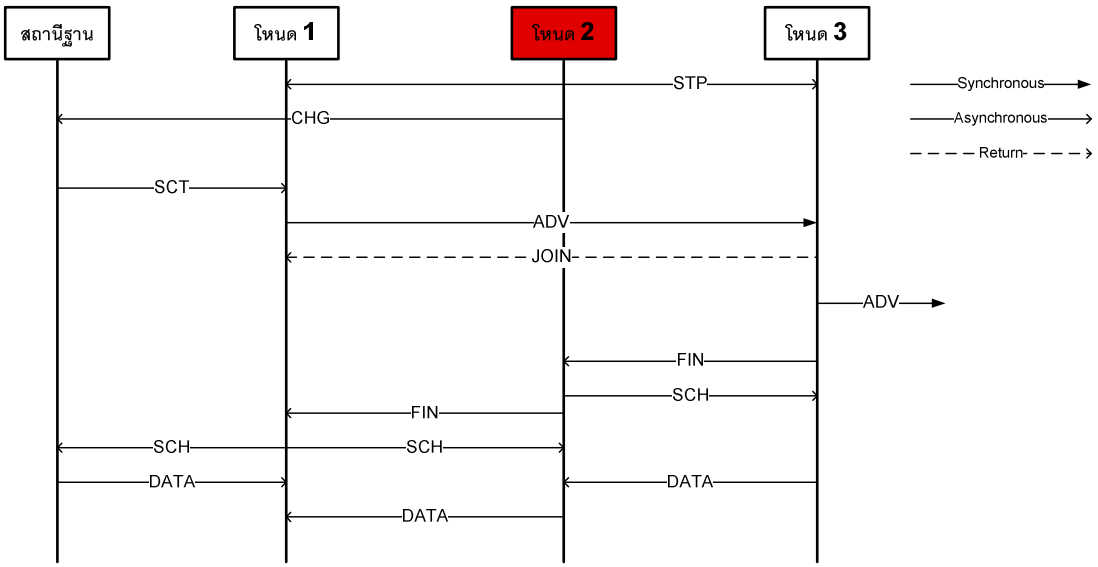
3.2.3 ส่วนการปรับปรุงเครือข่าย (Improved cluster head phase)

ในโพรโทคอล LEACH การปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าจะกระทำโดยกำหนดค่าเวลาในการทำงานของเครือข่ายในแต่ละรอบ เมื่อถึงเวลาครบรอบจะทำการปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้า 1 ครั้งทำให้เกิดปัญหาหากโหนดหัวหน้าหมดพลังงานระหว่างรอบการทำงาน จะทำให้ไม่สามารถทำการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดกลุ่มนั้นและสถานีฐาน โพรโทคอลที่ออกแบบนี้จึงทำการแก้ไขปัญหาในเรื่องของระยะเวลาในการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่

ในส่วนของโหนดหัวหน้าเมื่อมีการรับส่งข้อมูลระดับพลังงานจะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งโหนดหัวหน้าจะมีการรับส่งข้อมูลมากกว่าโหนดทั่วไปในเครือข่าย เนื่องจากโหนดหัวหน้าจะทำการรับข้อมูลจากโหนดลูกภายในกลุ่มทั้งหมด และทำการประมวลผล บีบอัด และลดข้อมูลซ้ำซ้อนก่อนส่งไปยังสถานีฐานดังนั้นจึงต้องมีการทำการปรับเปลี่ยนตัวโหนดหัวหน้าเพื่อกระจายภาระการใช้พลังงานไปยังโหนดตัวอื่นๆ เพื่อป้องกันการล้อเหลวในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานโดยการปรับเปลี่ยนจะขึ้นกับค่าพลังงานของโหนดหัวหน้าเป็นหลัก โดยเป็นไปตามสมการที่ (2)

$$E_{th} = P * E_{start} \qquad (2)$$

โดยที่ P เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของระดับพลังงานที่เหลือที่ต้องการให้ทำการปรับเปลี่ยนโหนดหัวหน้าและ E_{start} เป็นระดับพลังงานเริ่มต้นในการทำหน้าที่หัวหน้า



รูปที่ 3-13 แผนภาพการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า

จากรูปที่ 3-13 แผนภาพแสดงการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า หากว่าโหนดหัวหน้ามีระดับพลังงานต่ำกว่าค่า E_{th} โหนดจะทำการส่งแพ็กเก็ตควบคุม CHG (Change message) เพื่อร้องขอไปยังสถานีฐานเพื่อขอทำการปรับเปลี่ยนตัวโหนดหัวหน้าใหม่ แพ็กเก็ตควบคุม CHG ที่ส่งเพื่อร้องขอการปรับเปลี่ยนประกอบไปด้วย ประเภทของแพ็กเก็ต (type), หมายเลขโหนด (srcID) และหมายเลขลำดับชั้น (cID) โดยรูปแบบแพ็กเก็ตแสดงได้ดังรูปที่ 3-6

หลังจากสถานีฐานได้รับแพ็กเก็ตควบคุม CHG ตัวสถานีฐานจะทำการส่งแพ็กเก็ต STP (Stop message) ไปยังโหนดในกลุ่มเพื่อแจ้งให้หยุดการส่งข้อมูลชั่วคราวก่อนทำการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่ โดยแพ็กเก็ตควบคุม STP จะประกอบไปด้วย ประเภทของแพ็กเก็ต (type) และหมายเลขลำดับชั้น (cID) โดยรูปแบบแพ็กเก็ตแสดงได้ดังรูปที่ 3-7

หลังจากนั้นก็จะเข้ากระบวนการในการเลือกโหนดหัวหน้าเหมือนดังข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว จนกว่าเครือข่ายจะไม่สามารถเชื่อมต่อโหนดถึงสถานีฐานได้แล้วก็จะทำการหยุดการทำงานของเครือข่ายลง

3.3 สรุปเปรียบเทียบการทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบและ LEACH

โพรโทคอลที่ออกแบบจะยังคงแนวความคิดหลักเหมือนกับโพรโทคอล LEACH คือ การแบ่งตัวโหนดในเครือข่ายออกเป็นกลุ่มๆ และในแต่ละกลุ่มมีโหนดหัวหน้าเพื่อทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลของแต่ละกลุ่มและส่งต่อไปยังสถานีฐาน แต่ในส่วนของโพรโทคอลที่ออกแบบจะทำการพัฒนาในส่วนของการเลือกโหนดหัวหน้า และการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่ อีกทั้งในการส่งข้อมูลจากโหนดหัวหน้าไปยังสถานีฐานจะใช้วิธีการส่งแบบ multi-hop ในระหว่างกลุ่มโหนด

หัวหน้าเอง แทนที่จะใช้การส่งตรงไปยังสถานีฐานดังที่ใช้ในโพรโทคอล LEACH โดยจากการทำงานหลักของโพรโทคอลที่ออกแบบยังคงมีส่วนของการทำงาน 2 ส่วนเหมือนดังโพรโทคอล LEACH คือ Set-up phase และ Steady-state และการทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบจะเพิ่มส่วนการทำงานในส่วนของ Improved cluster phase ซึ่งเป็นส่วนการทำงานในช่วงการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่ ในการทำงานปลีกย่อยในแต่ละส่วนจะมีการพัฒนาเพิ่มเติมจากโพรโทคอล LEACH ดังนี้

- Setup phase : พัฒนาในส่วนของการเลือกโหนดหัวหน้าใหม่ โดยใช้ค่าระยะการสื่อสารเข้ามามีส่วนในการคัดเลือก และทำการแบ่งกลุ่มตัวโหนดเป็นชั้นๆ ทีละชั้นต่อไปเรื่อยๆ
- Steady-state : เพิ่มข้อมูลการส่งในส่วนของพลังงานที่เหลือของโหนด เพื่อนำไปใช้ในส่วนของการทำงาน Improved cluster phase
- Improved cluster phase : พัฒนาในส่วนการเปลี่ยนโหนดหัวหน้าใหม่ทั้งหมด

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองด้วยโปรแกรมจำลองการทำงาน NS-2 ของโพรโทคอลที่ได้ออกแบบและพัฒนาโดยจะนำเสนอประสิทธิภาพของโพรโทคอลด้วยการวัดค่าต่างๆ ดังนี้ค่าหน่วงเวลา ค่าพลังงานเฉลี่ย และอัตรารับส่งข้อมูลเฉลี่ย รวมถึงวิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆ

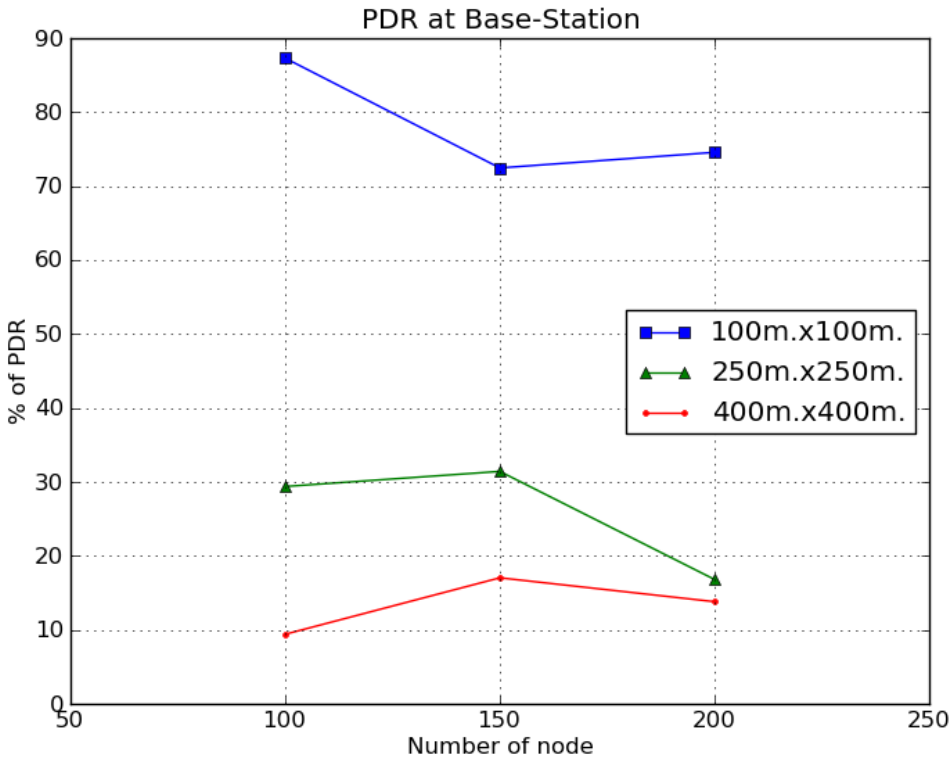
4.1 จำลองการทำงาน LEACH

หัวข้อนี้จะทำการจำลองการทำงานจากกระบวนการทำงานของ LEACH ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 ซึ่งการจำลองจะจำลองบนโปรแกรมจำลองเครือข่ายที่ชื่อว่า Network Simulator 2 (NS-2) โดยการจำลองนี้จะจำลองตัวโหนดในเครือข่ายเป็นจำนวน 100 150 และ 200 ตัว ในเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร 250x250 เมตร และ 400x400 เมตร รวมทั้งหมด 9 การจำลอง โดยค่าตัวแปรที่สำคัญในการจำลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าตัวแปรพื้นฐานในการจำลองการทำงาน LEACH

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
กำลังงานการส่งข้อมูล	74.4 mW
กำลังงานการรับข้อมูล	64.8 mW
กำลังงานขณะว่างงาน	5.52 μW
โพรโทคอลชั้น MAC และ PHY	IEEE 802.15.4
จำนวนโหนด	100, 150, 200 ตัว
พลังงานเริ่มต้น	0.5J
ขนาดข้อมูล	100 bytes
ขนาดเฮดเดอร์	25 bytes
ขนาดเครือข่ายที่สนใจ	100 x 100 m. 250 x 250 m. 400 x 400m.
การกระจายตัวโหนด	uniform
ระยะการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า	100 วินาที

ในแต่ละการจำลองจะทำการสุ่มโครงสร้างเครือข่ายขึ้นมาทั้งหมด 10 โครงสร้าง และทำการจำลองการทำงานในแต่ละโครงสร้างเครือข่ายเป็นจำนวน 10 รอบ รวมแล้วในแต่ละการจำลองจะทำการจำลองทั้งหมด 100 รอบ และหาค่าอัตราส่วนการรับส่งข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละการจำลอง ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ค่า PDR ของโพรโทคอล LEACH ในเครือข่ายจำลอง

จากรูปที่ 4-1 เส้นกราฟสีน้ำเงินแทนการจำลองเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร เส้นสีเขียวแทนการจำลองเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร และเส้นสีแดงแทนการจำลองเครือข่ายขนาด 400x400 เมตร ค่า Packet Delivery Ratio (PDR) คือค่าอัตราความสำเร็จในการรับส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยคำนวนได้ดังสมการ (4)

$$\text{PDR} = \frac{all\ received\ data\ packets\ at\ BS}{all\ packets\ sent\ to\ BS} \qquad (4)$$

จากกราฟในรูปที่ 4-1 จะเห็นว่าค่า PDR จะมีค่าสูงในเครือข่ายที่มีขนาดเล็กคือ 100x100 เมตร โดยให้ค่า PDR ที่ 70-90% ค่า PDR ลดลงเล็กน้อยเมื่อจำนวนโหนดในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นในเครือข่ายที่มีขนาดเท่าเดิม (ความหนาแน่นของโหนดสูงขึ้น) ทำให้โอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลสูงขึ้น ค่า PDR จึงลดลง และเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นคือ 250x250 เมตร และ 400x400 เมตร จะเห็นว่าค่า PDR ตกลงมาค่อนข้างมาก เนื่องจากระยะการส่งข้อมูลของโหนดส่งไม่ถึงสถานีฐานและการทำงานของ LEACH มีลักษณะการส่งแบบโหนดต่อโหนด ทำให้ข้อมูลหายไประหว่างทางเป็นจำนวนมาก

จากผลการทดลองนี้จะเห็นว่าโพรโทคอล LEACH มีการทำงานบนเครือข่ายขนาดใหญ่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งจะเห็นได้จากค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จมีค่าต่ำลงมากในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนโหนดมากขึ้นก็ตาม เป็นผลมาจากการคัดเลือกโหนดหัวหน้าด้วยความน่าจะเป็นตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

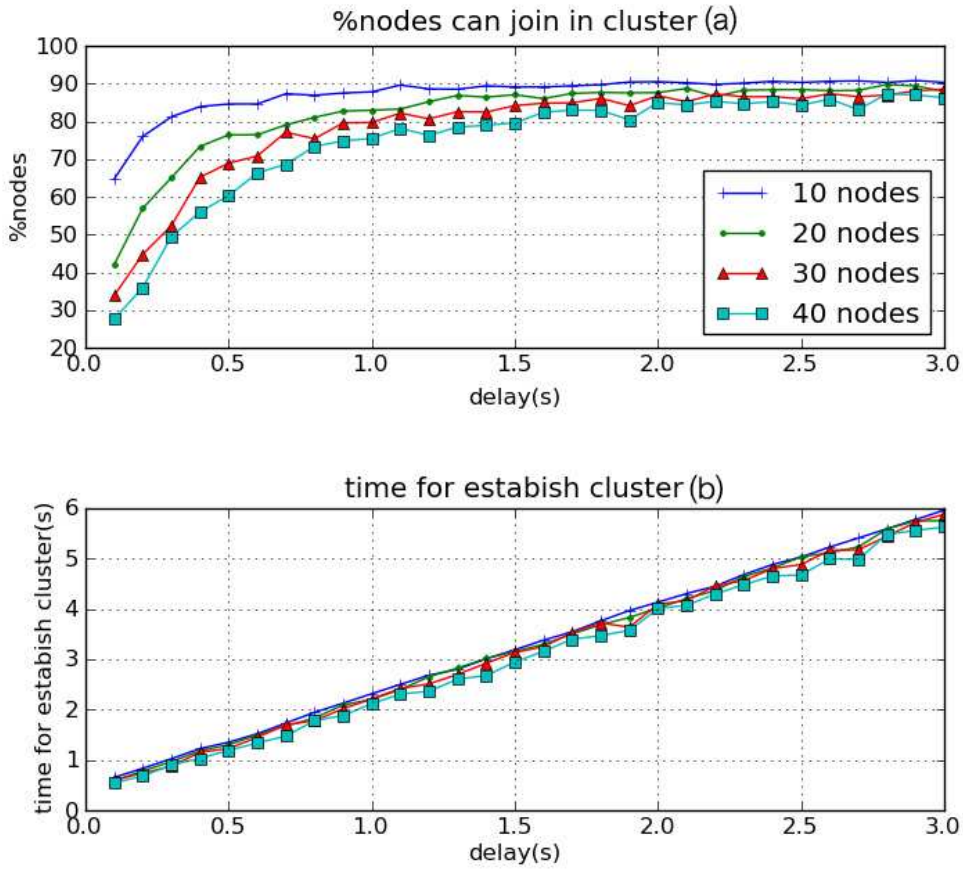
4.2 ทดลองหาช่วงค่าหน่วงเวลาที่เหมาะสม

ในกระบวนการหาโหนดข้างเคียง แพ็กเก็ตจะถูกกระจายเข้าสู่เครือข่ายเป็นจำนวนมาก การตอบกลับของตัวโหนดหลายๆตัวพร้อมกัน จะทำให้เกิดปัญหาการชนกันหรือช่องสัญญาณไม่ว่างไม่สามารถจองช่องสัญญาณได้สำหรับกระบวนการของ CSMA ตัวโหนดที่ต้องการส่งข้อความจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนการส่งทุกครั้งดังนั้นการตอบกลับของโหนดแต่ละตัวจะมีการหน่วงเวลาก่อนตอบกลับ โดยใช้วิธีการสุ่มค่าหน่วงเวลาขึ้นมาหนึ่งค่าเมื่อโหนดต้องการตอบกลับ จะทำการสุ่มค่าหน่วงเวลาจากช่วงของค่าที่กำหนดขึ้นเนื่องจากค่าหน่วงเวลาดังกล่าวจะมีผลต่อเวลารวมที่ใช้ในการสร้างการเชื่อมของเครือข่ายทั้งหมด ดังนั้นการกำหนดช่วงค่าของการสุ่มค่าหน่วงเวลานั้นจะต้องมีความเหมาะสมที่สุด จึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาช่วงของค่าที่เหมาะสม โดยจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของโหนดที่สามารถเข้าร่วมในคลัสเตอร์ได้กับช่วงค่าของการสุ่มค่าหน่วงเวลา ซึ่งจะทำการทดลองกับเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดแตกต่างกัน โดยการทดลองนี้จะจำลองการส่งแพ็กเก็ตควบคุมร้องขอเข้าร่วมกลุ่มของโหนดในเครือข่ายเท่านั้น และทำการวัดผล การจำลองนี้จะทำการกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าตัวแปรพื้นฐานในการจำลองการส่งแพ็กเก็ตควบคุมการร้องขอเข้าร่วมกลุ่มของโหนดในเครือข่าย

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนด	10, 20, 30 และ 40 ตัว
ขนาดเฮดเดอร์	25 bytes
ขนาดเครือข่าย	100 x 100 m.
ระยะการส่งข้อมูลสูงสุด	100m.

การจำลองจะกำหนดให้ช่วงค่าของการสุ่มค่าหน่วงเวลาให้อยู่ในช่วง 0.0 – 3.0 (โดยเพิ่มค่าครั้งละ 0.1) และมีจำนวนโหนดที่ทำการตอบกลับจำนวน10, 20, 30 และ 40 ตัว ได้ผลดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 ผลการจำลองการตอบกลับของตัวโหนดข้างเคียง

จากรูปที่ 4-2 แสดงถึงผลของการตอบกลับของตัวโหนดข้างเคียงโดยทำการกำหนดช่วงค่าในการสุ่มค่าหน่วงของการตอบกลับ กราฟ (a) ในรูปที่ 4-2 แสดงจำนวนเปอร์เซ็นต์โหนดที่ทำการตอบกลับสำเร็จเมื่อมีการใช้ช่วงของการสุ่มค่าหน่วงเวลาจาก 0 – 3.0พบว่าเมื่อเพิ่มค่าหน่วงเวลาไปจนถึง 1.5 วินาที เปอร์เซ็นต์โหนดที่ตอบกลับสำเร็จจะเข้าสู่สภาวะคงที่ที่มากกว่า 80% โดยแนวโน้มของผลที่ได้จะเหมือนกันไม่ว่าจำนวนโหนดจะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นหากต้องการจำนวนโหนดที่สามารถตอบกลับสำเร็จมากกว่า 80% ควรกำหนดช่วงค่าการสุ่มไว้ที่มากกว่า 1.0

จากกราฟ (b) ในรูปที่ 4-2 แสดงค่าเวลารวมที่ใช้ในการตอบกลับของตัวโหนดทั้งหมดมีหน่วยเป็นวินาที โดยจะเห็นว่าการกำหนดช่วงค่าการสุ่มของเวลาหน่วงนั้นมีผลกระทบโดยตรงต่อเวลารวม ยิ่งค่าช่วงในการสุ่มกว้างขึ้นเท่าไหร่ค่าเวลารวมที่ใช้จะมากขึ้นเรื่อยๆ หากระบบคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการจัดการระบบมากกว่าจำนวนโหนดแล้ว ควรที่จะกำหนดค่าช่วงในการสุ่มให้เหมาะสมต่อไป ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับรูปแบบของงานประยุกต์ที่ใช้ แล้วจึงทำการกำหนดค่าช่วงให้เหมาะสมต่อไป โดยในการจำลองนี้จะใช้ค่าช่วงเวลาหน่วงที่ 0-1.0 วินาที ซึ่งค่าเวลาหน่วงนี้ส่งผลให้เวลาในการจัดสร้างเครือข่ายอยู่ที่เวลาประมาณ 10 – 15 วินาที

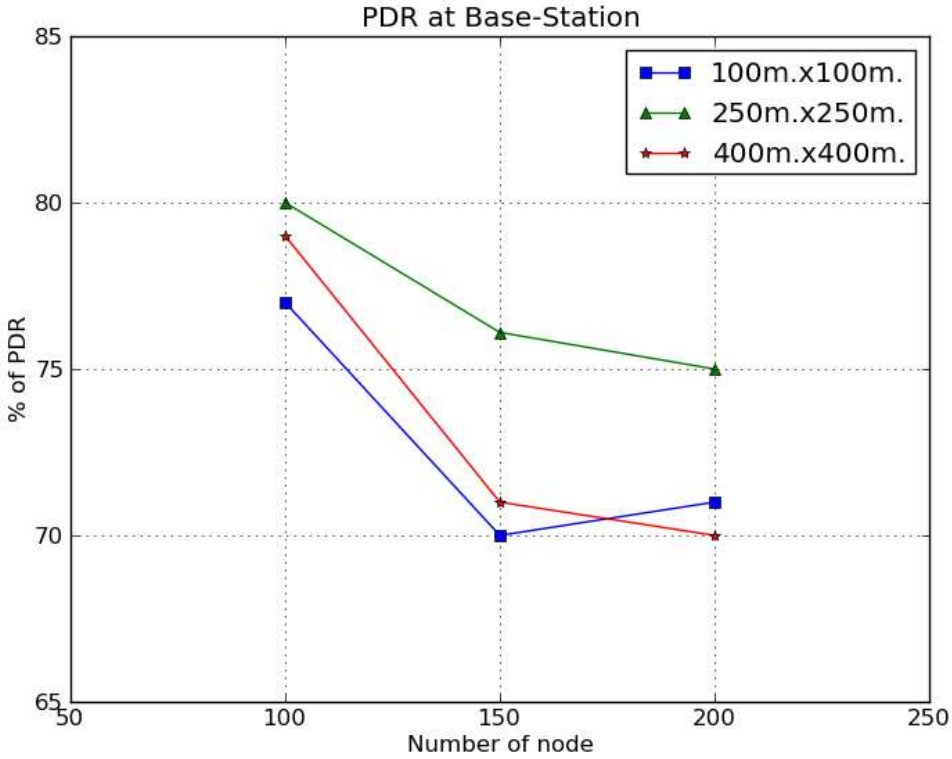
4.3 จำลองการทำงานรวมทั้งระบบของโพรโทคอล

การทดลองนี้จะทำการจำลองการทำงานบน NS-2 กำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นของโหนดทั้งหมดไว้ที่ 0.5 จูล โดยโหนดแต่ละตัวใช้กำลังงานในการรับข้อมูล 64.8mW ใช้กำลังงานในการส่งข้อมูล 74.4 mW และค่ากำลังงานในช่วงหยุดนิ่ง 5.52 μW กำหนดขนาดเครือข่ายสำหรับทดสอบไว้ทั้งหมด 3 ขนาดคือ 100x100, 250x250 และ 400 x 400 เมตร กำหนดจำนวนโหนดทั้งหมดในเครือข่าย 100, 150 และ 200 ตัว กระจายตัวแบบสุ่ม (uniform) ภายในพื้นที่เครือข่าย กำหนดให้ระยะในการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 100 เมตร ส่วนตัวแปรที่สำคัญอื่นกำหนดค่าดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าตัวแปรในการจำลองการทำงานบน NS-2

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
กำลังงานการส่งข้อมูล	74.4 mW
กำลังงานการรับข้อมูล	64.8 mW
กำลังงานขณะหยุดนิ่ง	5.52 μW
ชั้น MAC และ PHY	IEEE 802.15.4
จำนวนโหนด	100, 150, 200 ตัว

พลังงานเริ่มต้น	0.5J
ขนาดข้อมูล	100 bytes
ขนาดเฮดเดอร์	25 bytes
ขนาดเครือข่าย	100 x 100 m. 250 x 250 m. 400 x 400m.
การกระจายตัวโหนด	uniform
ระยะการส่งข้อมูลสูงสุด	100m.
พิกัดสถานีฐาน	กึ่งกลางเครือข่าย

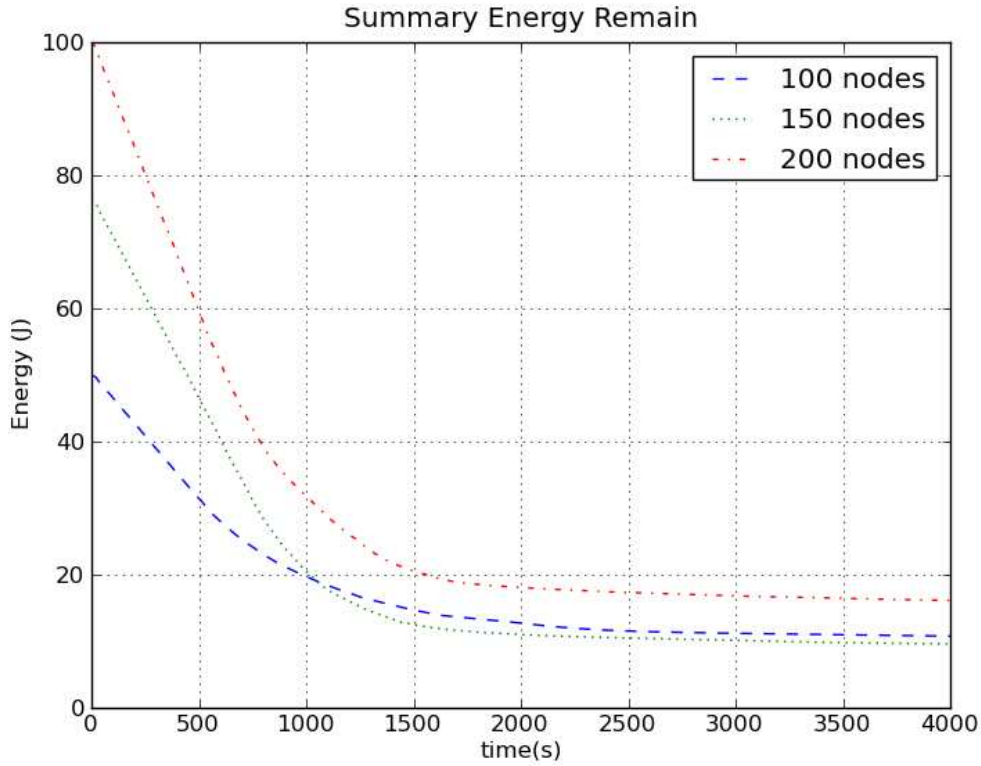


รูปที่ 4-3 ค่า PDR ของโพรโทคอลที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4-3 เส้นกราฟสีน้ำเงินแทนการจำลองเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร เส้นสีเขียวแทนการจำลองเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร และเส้นสีแดงแทนการจำลองเครือข่ายขนาด 400x400 เมตร จากกราฟในรูปที่ 4-3 จะเห็นว่าค่า PDR ในเครือข่ายขนาดต่างๆห่างกันไม่มาก โดยค่า PDR ที่ได้อยู่ในช่วง 70-80% ในเครือข่ายที่มีขนาดเล็กคือ 100x100 เมตรให้ค่า PDR ที่น้อยกว่า

ขนาดเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจาก ความหนาแน่นของโหนดสูง ทำให้โอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลสูงขึ้น ค่า PDR จึงน้อยกว่าขนาดเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นคือ 250x250 เมตร และ 400x400 เมตร จะเห็นว่าค่า PDR มากขึ้น

จากผลการทดลองนี้จะเห็นว่าโพรโทคอลที่ออกแบบ มีการทำงานบนเครือข่ายขนาดใหญ่ได้ดีไม่ต่างจากทำงานบนเครือข่ายขนาดเล็ก ซึ่งจะเห็นได้จากค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จมีค่าใกล้เคียงกันในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลมาจากการคัดเลือกโหนดหัวหน้าที่พัฒนาขึ้นใหม่จากโพรโทคอล LEACH



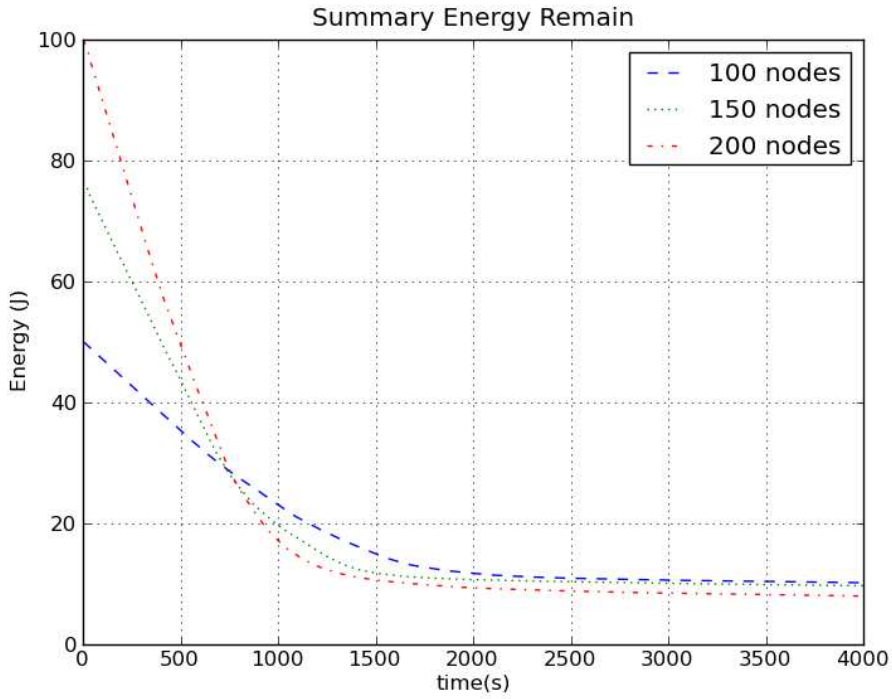
รูปที่ 4-4 ค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้บนเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร

จากรูปที่ 4-4 เป็นกราฟแสดงค่าพลังงานเฉลี่ยรวมของโหนดทั้งหมดที่เหลืออยู่ของเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร ณ เวลาต่างๆ โดยจะเห็นว่าเมื่อเครือข่ายเริ่มทำงานพลังงานที่เหลืออยู่จะเริ่มลดลงจนเหลืออยู่ที่ค่าประมาณ 10-20 จูล โหนดภายในเครือข่ายเริ่มมีการหยุดทำงานเนื่องจากพลังงานหมด หรืออาจหยุดทำงานด้วยเหตุผลอื่นๆเช่น โหนดบางตัวหมดพลังงานทำให้เครือข่ายโดยรวมไม่สามารถทำงานได้อีก เป็นต้น ทำให้ค่าพลังเริ่มลดช้าลงจนกระทั่งค่อนข้างคงที่

โดยจุดที่เส้นกราฟเริ่มลดระดับช้าลงนั้น สะท้อนถึงช่วงเวลาที่เครือข่ายกำลังจะหยุดทำงานลง หรือเวลาชีวิตของเครือข่าย (Network lifetime)

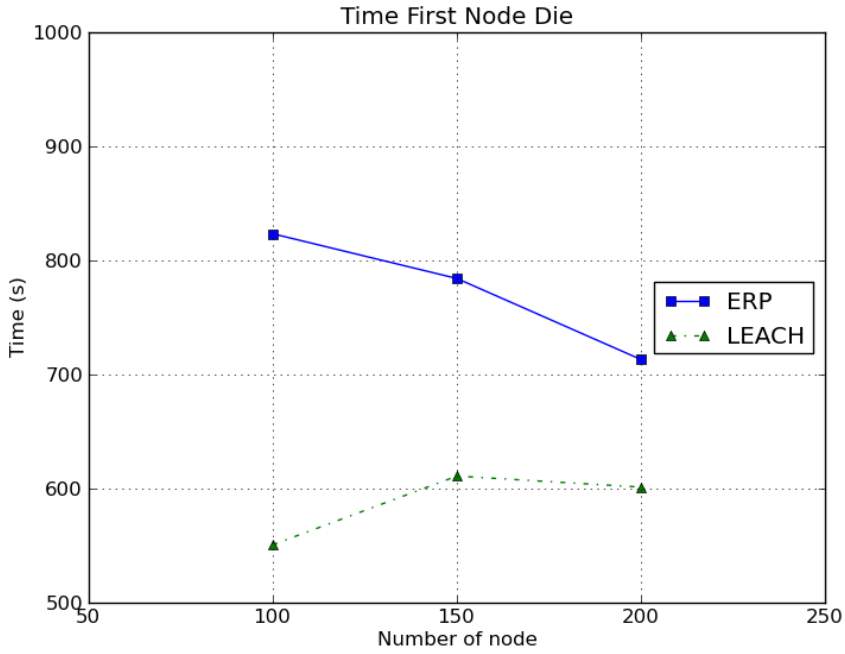
จากกราฟยังพบอีกว่าหากจำนวนโหนดภายในเครือข่ายมีจำนวนน้อย ค่าพลังงานจะลดช้ากว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดมากกว่า เนื่องจากในการรับส่งข้อมูลในแต่ละครั้งจะมีการใช้ค่าพลังงานจำนวนหนึ่ง ดังนั้นเมื่อจำนวนโหนดมีจำนวนมากในขณะที่ขนาดของเครือข่ายเท่ากัน หรือความหนาแน่นของตัวโหนดภายในเครือข่าย (Node density) มีค่าสูง เมื่อโหนดใดโหนดหนึ่งทำการส่งข้อมูลออกมาโหนดรอบข้างจะสูญเสียพลังงานไปด้วยส่วนหนึ่งในการรับข้อมูลดังกล่าว และหากมีการส่งข้อมูลพร้อมๆกันหลายโหนดจะเกิดการชนกันของข้อมูล (data collision) ทำให้ต้องส่งข้อมูลดังกล่าวใหม่อีกครั้ง

ปัจจัยเรื่องของความหนาแน่นโหนดจึงเป็นประเด็นที่ควรศึกษาต่อไป ความหนาแน่นของโหนดส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในเรื่องการรับส่งข้อมูล โดยความหนาแน่นที่มากเกินความจำเป็น จะทำให้เกิดการรับส่งข้อมูลที่ไร้ประโยชน์เนื่องจากการรับส่งข้อมูลของโหนดกระทำโดยผ่านคลื่นวิทยุ ทำให้ไม่ว่าจะรับหรือส่งข้อมูลแต่ละครั้งจะส่งผลต่อพลังงานของโหนดจำนวนหนึ่งที่อยู่รอบๆ แนวทางแก้ไขอาจจะทำการปิดโหนดที่ไม่จำเป็น หรือจัดการการใช้ช่องสัญญาณในการรับส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพ ลดการชนกันของข้อมูล และรับส่งข้อมูลที่ไม่จำเป็นลง



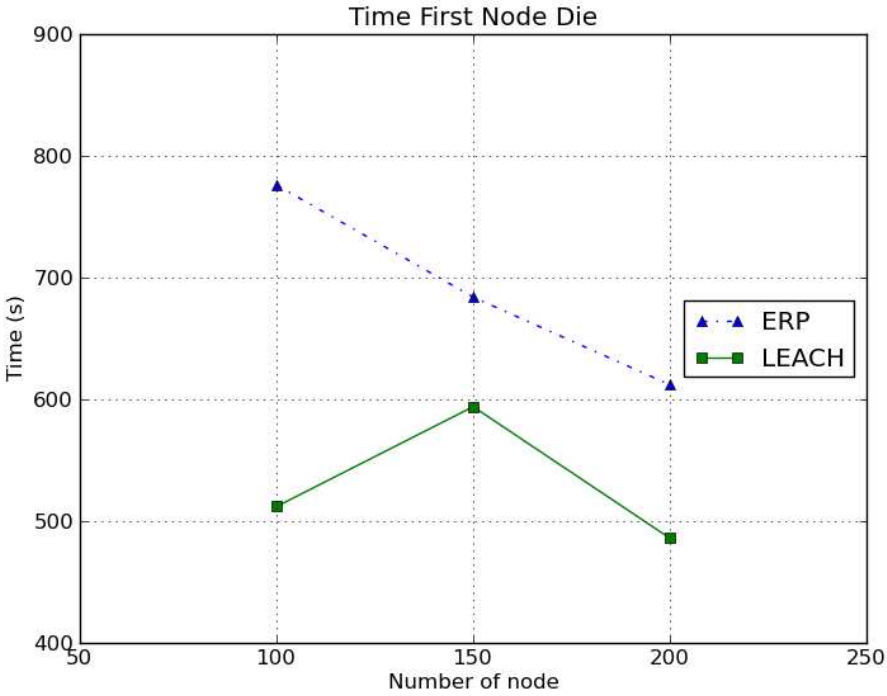
รูปที่ 4-5 ค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้บนเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร

ในรูปที่ 4-5 แสดงค่าพลังงานเฉลี่ยที่เหลือของเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร จะเห็นว่าพฤติกรรมยังคงไม่ต่างไปจากเครือข่ายขนาดเล็ก เมื่อทำการจำลองเครือข่ายทั้งสองขนาดแล้วสังเกตได้ว่าจำนวนโหนดกับค่าพลังงานเฉลี่ยสุดท้าย ไม่สัมพันธ์กันโดยตรงเนื่องจากจะพบว่าในรูปที่ 4-4 ค่าพลังงานเฉลี่ยสุดท้ายของจำนวนโหนด 150 ตัวมีค่าต่ำกว่าจำนวนโหนด 200 ตัว แต่ในกราฟนี้ค่าพลังงานเฉลี่ยสุดท้ายที่ต่ำสุดเป็นของการจำลองเครือข่ายที่จำนวนโหนด 200 ตัว เป็นเพราะการใช้พลังงานนั้นขึ้นกับลักษณะโครงสร้างเครือข่าย (Topology) อีกด้วย



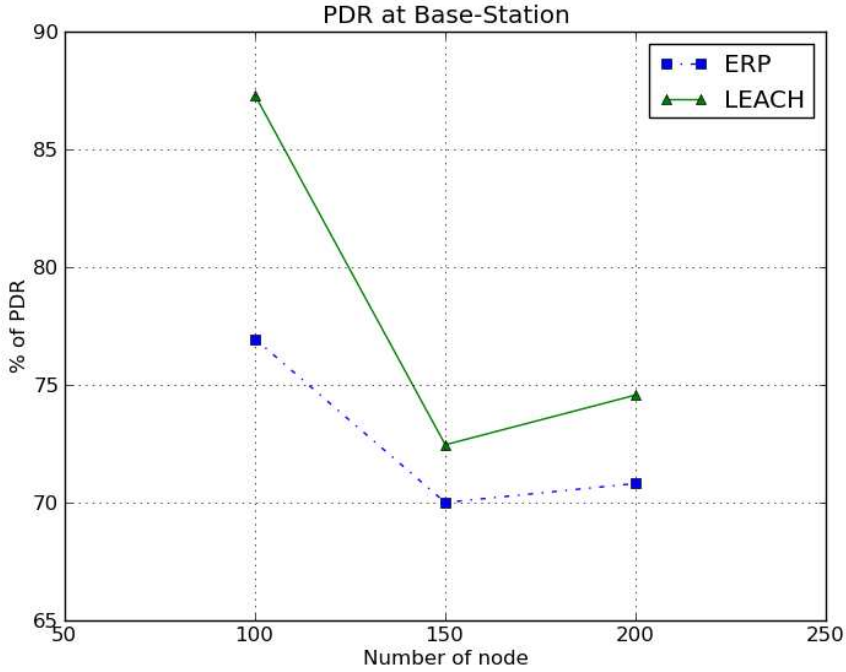
รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบเวลาที่โหนดตัวแรกหมดพลังงาน
ของโพรโทคอลที่ออกแบบและ LEACH ในเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร

จากกราฟในรูปที่ 4-6 เป็นค่าเวลาที่โหนดในเครือข่ายหมดเริ่มพลังงานเป็นตัวแรก โดยค่าเวลาดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายการใช้พลังงานในเครือข่าย หากว่าการกระจายการใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เวลาที่โหนดจะเริ่มหมดพลังงานจะต้องใช้เวลานาน เส้นกราฟสีน้ำเงินจะแสดงเวลาที่โหนดตัวแรกหมดพลังงานของโพรโทคอลที่ออกแบบ ซึ่งจะเห็นว่าจะมีค่าสูงกว่าเวลาในเส้นกราฟสีเขียวซึ่งเป็นของโพรโทคอล LEACH แสดงให้เห็นว่า การกระจายพลังงานของโพรโทคอลที่ออกแบบสามารถทำได้ดีกว่าโพรโทคอล LEACH



รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบเวลาที่โหนดตัวแรกหมดพลังงาน
ของโพรโทคอลที่ออกแบบและ LEACH ในเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร

จากรูปที่ 4-7 จะพบว่าขนาดที่เปลี่ยนไปของเครือข่ายไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาที่เครือข่ายสามารถทำงานได้มากนัก เป็นเพราะขนาดที่เปลี่ยนไปของเครือข่ายมีผลต่อการใช้พลังงานของโหนดในเครือข่ายสำหรับกำลังส่งที่มากขึ้นเท่านั้น ทำให้เวลาที่โหนดในเครือข่ายหมดเริ่มพลังงานเป็นตัวแรก ไม่แตกต่างจากขนาดของเครือข่ายที่เล็กกว่า หรืออาจแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้นทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างของเครือข่ายด้วย ดังที่เห็นจากผลของเครือข่ายที่มีจำนวนโหนด 200 ตัวและ 100 ตัวบนเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร ของโพรโทคอล LEACH ค่าเวลาต่างกันไม่มาก

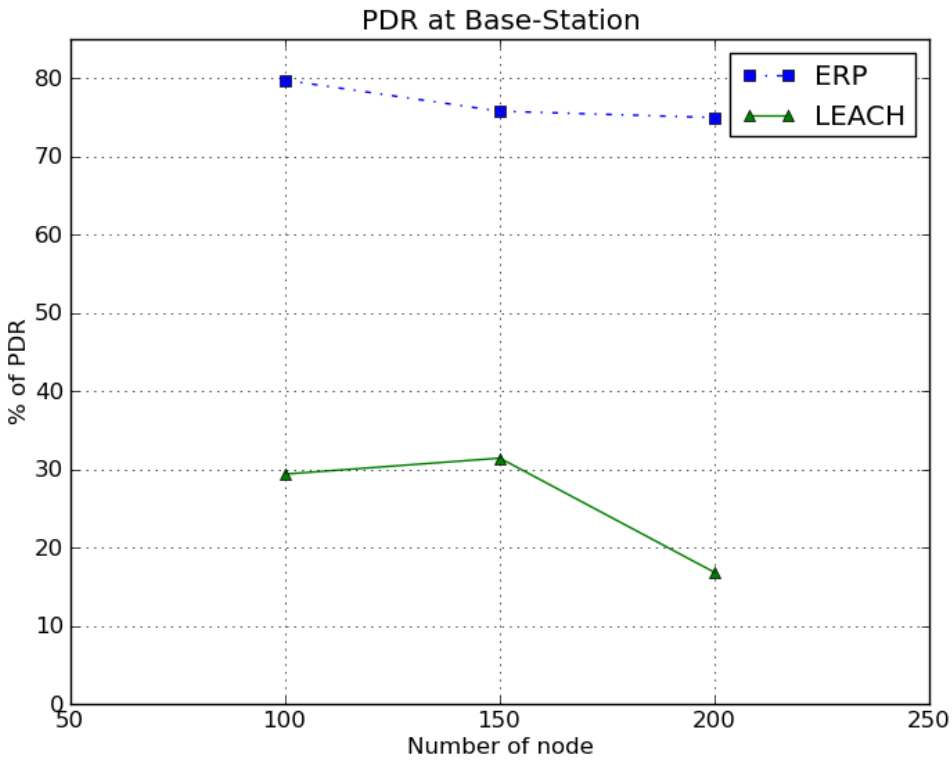


รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบค่า PDR ที่ได้จากโพรโทคอลที่ออกแบบ และ LEACH บนเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร

จากรูปที่ 4-8 เป็นกราฟแสดงค่า PDR ณ สถานีฐานโดยค่า PDR แสดงถึงอัตราส่วนในการรับส่งข้อมูลที่สำเร็จ ค่า PDR สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของจำนวนข้อความที่โหนดต้นทางทำการส่งและจำนวนข้อความที่โหนดปลายทางได้รับ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะให้ความสนใจในระดับชั้น transport layer ดังสมการที่ (4) โดยในที่นี้โหนดปลายทางคือสถานีฐานและโหนดต้นทางคือโหนดทั้งหมดภายในเครือข่าย จากกราฟจะเห็นว่าค่า PDR ของโพรโทคอลที่ออกแบบให้ค่าที่ประมาณ 70-78% และของโพรโทคอล LEACH สามารถให้ค่า PDR ที่ประมาณ 70-85 % ด้วยขนาดเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก โพรโทคอลที่ออกแบบมีการจัดการที่ซับซ้อนกว่าโพรโทคอล LEACH ทำให้ทำงานอยู่บนเครือข่ายที่มีขนาดเล็กได้แต่ให้ผลที่ต่ำกว่าโพรโทคอล LEACH อยู่เล็กน้อย จากกราฟจะสังเกตว่าเมื่อจำนวนโหนดมากขึ้น จำนวนข้อมูลจะเพิ่มขึ้น แต่ PDR จะลดลงเนื่องจากมีจำนวนข้อมูลที่ส่งผ่านในเครือข่ายจำนวนมากขึ้น เป็นเหตุให้โอกาสเกิดการชนของข้อมูลสูงขึ้นตามไปด้วย

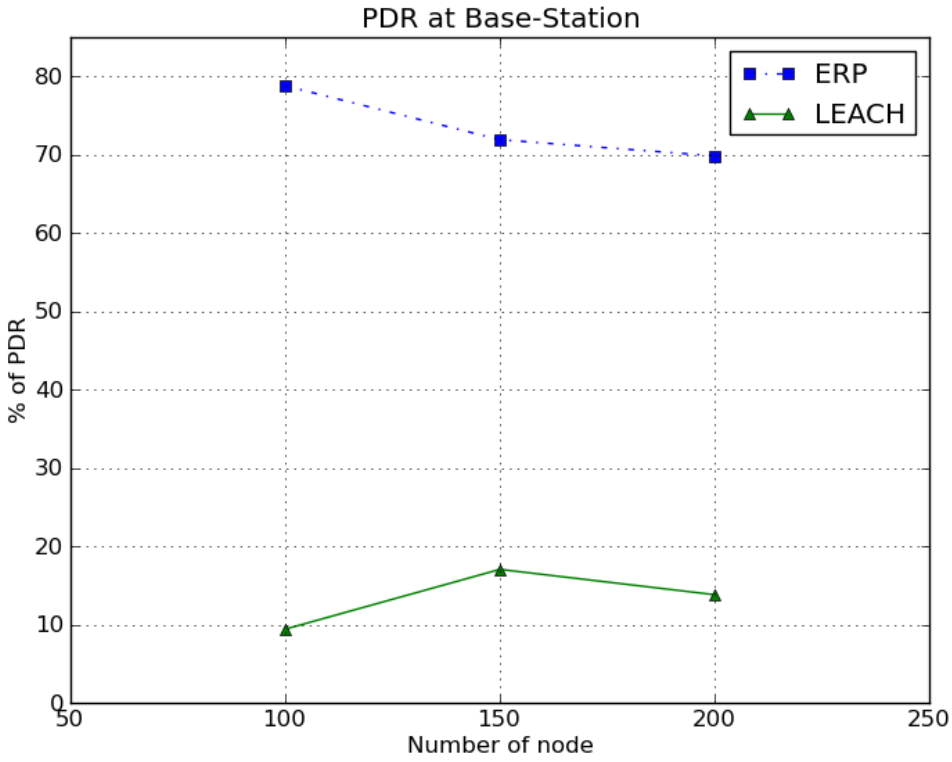
จากกราฟในรูปที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดสูงจะส่งผลกระทบต่อการรับส่งข้อมูลเป็นอย่างมาก โดยพบว่าเมื่อทำการจำลองเครือข่ายที่มีโหนด 200 ตัว บนเครือข่ายขนาด 100x100 เมตร จะให้ค่า PDR ที่ประมาณ 72% เท่านั้น สาเหตุมาจากเมื่อความ

หนาแน่นของโหนดมีสูง ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลสูงขึ้นและข้อมูลเกิดการสูญหายเป็นจำนวนมาก ค่า PDR ที่ได้จึงลดลง



รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่า PDR ของโพรโทคอลที่ออกแบบ
และ LEACH บนเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร

ในรูปที่ 4-9 แสดงค่า PDR ของเครือข่ายขนาด 250x250 เมตร จากกราฟนี้จะพบว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโหนด 200 ตัวเมื่อทำงานอยู่บนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ (มีค่าความหนาแน่นของเครือข่ายลดลง) ส่งผลให้ค่า PDR สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในทางกลับกันค่า PDR ของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง LEACH กลับต่ำลง สาเหตุมาจากหากค่าความหนาแน่นของตัวโหนดในเครือข่ายต่ำเกินไปจะส่งผลให้การส่งข้อมูลมายังสถานีฐานค่อนข้างมีทางเลือกน้อยลงด้วยจำนวนโหนดที่น้อยนั้นเอง อีกทั้งโพรโทคอล LEACH ใช้การเลือกโหนดหัวหน้าด้วยความน่าจะเป็นทำให้การกระจายโหนดหัวหน้าไม่อาจควบคุมได้ การส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานจึงเป็นไปได้ยากมาก



รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบค่า PDR ของของโพรโทคอลที่ออกแบบ
และ LEACH บนเครือข่าย 400x400 เมตร

จากรูปที่ 4-10แสดงค่า PDR ของเครือข่ายขนาด 400x400 เมตร จะพบว่าค่า PDR ของจำนวนโหนดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงการทำงานของโพรโทคอลบนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างไม่มีปัญหา ในส่วนของเครือข่ายที่มีจำนวนโหนด 200 ตัวสามารถให้ค่า PDR ที่ใกล้เคียงเครือข่ายขนาดอื่น กลับกันโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง LEACH กลับทำให้ค่า PDR ที่ได้ต่ำลงกว่าเครือข่ายขนาด 250x250 ลงไปอีก ด้วยขนาดเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้นทำให้ตำแหน่งของโหนดหัวหน้าในโพรโทคอล LEACH มีโอกาสอยู่ห่างไกลจากสถานีฐานมากขึ้นไปอีก

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปจากผลการทดลองและข้อเสนอแนะจากผลการทดลองที่เกิดขึ้น เพื่อจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาโพรโทคอลบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการวิจัย

โพรโทคอลที่ทำการออกแบบมีความยืดหยุ่นในการทำงานบนเครือข่ายขนาดต่างๆ ได้ เนื่องจากในการจัดกลุ่มหรือค้นหาเส้นทางไปยังสถานีฐานนั้น ได้ใช้ระยะทางความสามารถในการรับส่งข้อมูลของตัวโหนดเป็นประการสำคัญ ในการเลือกเส้นทางของข้อมูลในเครือข่ายดังจะเห็นได้จากผลการทดลองในบทที่ 4 รูปที่ 4-1และรูปที่ 4-3 ในทางกลับกันโพรโทคอล LEACH สามารถทำงานได้บนเครือข่ายขนาดเล็กได้ค่อนข้างดี แต่เมื่อเครือข่ายมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น โพรโทคอล LEACH ค่อนข้างมีปัญหาในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานโดยมีค่า PDR ลดลงถึง 50% จะเห็นว่าค่า PDR ที่ได้จากโพรโทคอลที่ออกแบบในเครือข่ายขนาดต่างๆ จะให้ค่าที่ไม่ต่างกันมาก ในขณะที่โพรโทคอล LEACH เมื่อขนาดเครือข่ายใหญ่ขึ้นค่า PDR ที่ได้จะลดต่ำลงค่อนข้างมาก ซึ่งขนาดเครือข่ายที่โพรโทคอลที่ออกแบบสามารถทำงานได้ดีกว่าโพรโทคอล LEACH อย่างชัดเจนนั้นจะต้องมีขนาดที่ใหญ่กว่าระยะการสื่อสารของโหนด ซึ่งให้ค่า

การทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบนี้ มีแนวความคิดหลักคือ ทำการจัดรูปแบบของเครือข่ายให้มีลักษณะเป็นกลุ่มในแบบต่อเนื่องกันเป็นชั้นๆหรือที่เรียกว่า Hierarchical Clustering ในแต่ละชั้นจะมีตัวโหนดจำนวนหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้า โดยโหนดหัวหน้าจะเป็นตัวโหนดที่รับข้อมูลจากโหนดชั้นถัดไปจากชั้นที่ตัวมันอยู่หนึ่งชั้น และทำการส่งข้อมูลทั้งหมดต่อไปยังโหนดหัวหน้าของชั้นหนือมันขึ้นไปอีกหนึ่งชั้น การรับส่งข้อมูลนั้นจะเกิดขึ้นหลังจากทำการจัดรูปแบบเครือข่ายออกเป็นชั้นๆแล้วนั้น แต่ละชั้นจะเริ่มทำการส่งข้อมูลขึ้นไปในแต่ละชั้นจนถึงสถานีฐาน ในการส่งข้อมูลจะใช้วิธีการแบ่งช่องเวลากันในแต่ละกลุ่ม ตัวโหนดหัวหน้าจะทำการจัดสรรช่องเวลาภายในกลุ่มชั้นและส่งออกไปยังโหนดภายในกลุ่มทั้งหมด

เนื่องจากตัวโหนดหัวหน้ามีภาระงานที่มากกว่าโหนดรับส่งข้อมูลปกติ เพราะฉะนั้นโหนดหัวหน้าจะมีการใช้พลังงานมากกว่า ระดับการใช้พลังงานของโหนดปกติ ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนตัวโหนดที่ทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้าในกรณีที่ระดับพลังงานต่ำกว่า

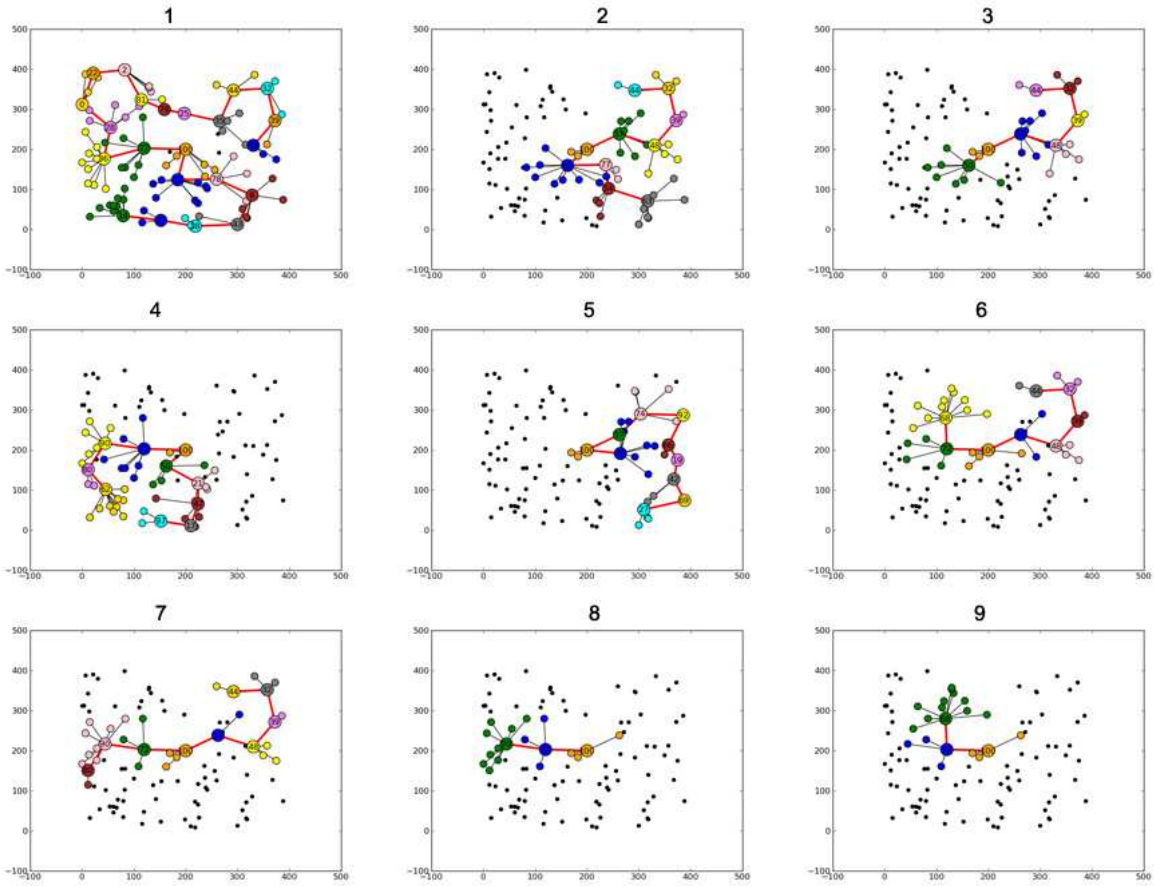
กำหนด ซึ่งสถานีฐานจะเป็นผู้ทำการตัดสินใจเลือกตัวโหนดของชั้นแรกเสมอ ในส่วนของชั้ดถัดๆ มาจะเป็นหน้าที่ของตัวโหนดหัวหน้าในการเลือกโหนดหัวหน้าของชั้นถัดๆมาต่อๆไป

โพรโทคอลที่ออกแบบขึ้นใหม่มีการจัดการเครือข่ายที่ซับซ้อนกว่าโพรโทคอล LEACH เดิมที่ออกแบบมาโดยเน้นความเรียบง่าย ทำให้การใช้พลังงานของโพรโทคอลที่ออกแบบมีค่าสูงกว่าโพรโทคอล LEACH แต่ระยะเวลาการทำงานของเครือข่ายก่อนที่โหนดตัวแรกจะหมดพลังงานของโพรโทคอลที่ออกแบบนั้นมีระยะเวลายาวนานกว่าโพรโทคอล LEACH 1.42 เท่า โดยระยะเวลาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการกระจายการใช้พลังงานในเครือข่ายของโพรโทคอลที่ออกแบบสามารถทำได้ดีกว่าโพรโทคอล LEACH ทำให้การใช้พลังงานจนหมดของโหนดตัวแรกในเครือข่ายเกิดขึ้นช้ากว่าโพรโทคอล LEACH

5.2 ปัญหาที่พบ

ในการทำงานของตัวโพรโทคอลสามารถทำงานได้บนเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในเรื่องของความครอบคลุมของตัวโหนดภายในเครือข่ายยังถือว่าค่อนข้างต่ำ เนื่องมาจากเหตุผลที่ว่าในการเลือกโหนด CH ไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ทิศทางในการเชื่อมต่อมีโอกาสมุ่งไปในทิศทางเดียวได้

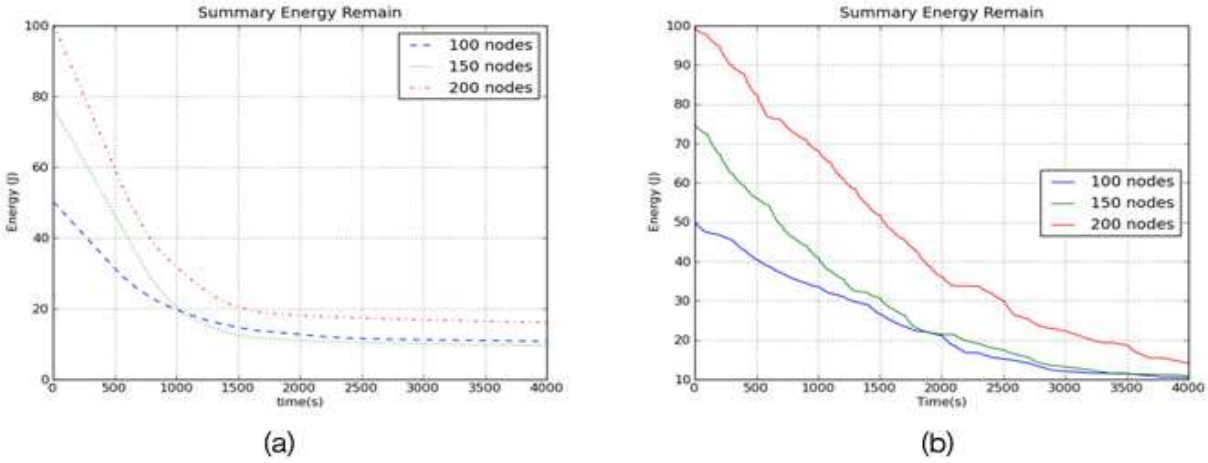
ในพื้นที่เครือข่ายการกระจายของตัวโหนดที่มีความสำคัญ เนื่องจากในการสร้างการเชื่อมต่อของกลุ่มที่มีสมาชิกโหนดมากจะใช้เวลาในการสร้างการเชื่อมต่อภายในกลุ่มนาน ด้วยเหตุว่าตัวโหนดทั้งหมดใช้ช่องสัญญาณเดียวกันจึงไม่สามารถทำการรับส่งข้อมูลพร้อมกันได้ในเวลาเดียวกัน มิฉะนั้นจะเกิดการชนกันของข้อมูล (collision) ทำให้หากโหนดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ กลุ่มโหนดแต่ละกลุ่มจำเป็นต้องรอการจัดการเป็นเวลาค่อนข้างนานไปด้วย



รูปที่ 5-1 ผลการจำลองการสร้างแครือข่ายของจำนวนโหนด 100 ตัว

จากรูปที่ 5-1 แสดงผลการจำลองการเชื่อมต่อเครือข่ายของจำนวนโหนด 100 ตัว ในรอบต่างๆ โดยจะเห็นว่าในรอบที่ 1 การกระจายตัวของกลุ่มยังค่อนข้างดี มีตัวโหนดที่ไม่ได้เข้าร่วมกล่มใดๆเลยเพียงไม่กี่โหนด ซึ่งโหนดดังกล่าวส่วนใหญ่จะอยู่ตามขอบของพื้นที่เครือข่ายถึงยากต่อการเชื่อมต่อกับโหนดใดๆ เมื่อเข้าสู่ในรอบที่ 2 จะเห็นว่าการกระจายตัวของกลุ่มเบนไปฝั่งขวาเพียงฝั่งเดียว เนื่องจากในการเลือกโหนดหัวหน้าจากสถานีฐานไม่สามารถกำหนดทิศทางได้ จึงมีโอกาสเป็นไปได้ที่จะเกิดกรณีดังกล่าว คือทิศทางการเชื่อมต่อของเครือข่ายมุ่งไปยังทิศทางเดียว ทำให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อไปทางฝั่งเดียวดังภาพ การเชื่อมต่อจึงไม่ทั่วถึง และอีกเหตุผลประการหนึ่งคือ ในรอบหลังๆโหนดต่างๆในเครือข่ายมีการใช้พลังงานจนหมด หรือโหนดเกิดขัดข้องไม่สามารถเชื่อมต่อกับโหนดอื่นได้อีก ทำให้การเชื่อมต่อไปยังสถานีฐานมีทางเลือกน้อยลง การเชื่อมต่อเครือข่ายจึงเป็นไปได้ยากขึ้นเรื่อยๆในรอบหลังๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ



รูปที่ 5-2 เปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างโพรโทคอลที่ออกแบบ และโพรโทคอล LEACH

โพรโทคอลที่ออกแบบได้พัฒนาการทำงานจากโพรโทคอล LEACH โดยเพิ่มการจัดการในส่วนของการเลือกโหนดหัวหน้า การรับส่งข้อมูลภายในเครือข่าย อีกทั้งพัฒนาในส่วนของการเปลี่ยนโหนดหัวหน้า ทำให้การทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบนั้นมีการจัดการที่ซับซ้อนกว่าโพรโทคอล LEACH ค่อนข้างมาก เพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นบนเครือข่ายที่มีขนาดหลากหลาย ทำให้การใช้พลังงานของโพรโทคอลที่ออกแบบค่อนข้างสูงกว่าโพรโทคอล LEACH ดังแสดงในรูปที่ 5-2 โดยจากกราฟ (a) จะแสดงการใช้พลังงานในเครือข่ายของโพรโทคอลที่ออกแบบ จะเห็นว่าเส้นกราฟลดลงเร็วกว่าเส้นกราฟในกราฟ (b) ซึ่งแสดงการใช้พลังงานของโพรโทคอล LEACH จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นว่าการทำงานของโพรโทคอลที่ออกแบบในส่วนอื่นให้ผลที่ดีกว่าการทำงานของโพรโทคอล LEACH เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างโพรโทคอลที่ออกแบบและโพรโทคอล LEACH ดังนั้นผู้ใช้จึงควรเลือกโพรโทคอลให้เหมาะสมกับงานประยุกต์ที่ต้องการใช้งาน

แนวทางที่อาจจะช่วยลดการใช้พลังงานของโพรโทคอลที่ออกแบบอาจจำเป็นต้องพิจารณาในส่วนของโอเวอร์เฮดที่เกิดขึ้น เนื่องจากโพรโทคอลที่ออกแบบนี้คำนึงถึงการจัดการเครือข่ายให้สามารถทำงานได้บนเครือข่ายที่มีขนาดหลากหลาย โดยในส่วนนี้เมื่อนำมาพิจารณาอย่างละเอียดอาจทำการลดจำนวนโอเวอร์เฮดที่เกิดขึ้นลงได้ ทำให้การใช้พลังงานลดลงด้วย

บรรณานุกรม

[1] K. Akkaya and M. Younis, "*A survey on routing protocols for wireless sensor networks*" Ad Hoc Networks Journal, vol.3, no.3, pp.325–349, May 2005.

[2] V. Jolly and S. Latifi,"*Comprehensive Study of Routing Management in Wireless Sensor Networks-Part-1*", in Proceedings of International Conference of Wireless Networks 2006 (ICWN 2006), pp.37-44, 2006.

[3] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "*Routing techniques in wireless sensor networks: a survey*," IEEE Wireless Comm., vol. 11, pp. 6-28, 2004.

[4] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, "*Next century challenges: scalable coordination in sensor networks*," in Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 263–270, August 1999.

[5] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "*Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*," in Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM '00), pp. 56–67, August 2000.

[6] M. Perillo and W. Heinzelman, "*Wireless Sensor Network Protocols*," *Appears in Fundamental Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Networks"*, CRC Hall, 2005.

[7] D. Braginsky and D. Estrin, "*Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks*," in the Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), pp.22-31, October 2002.

[8] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "*APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks*," in the Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing, pp.195-202, April 2002.

[9] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "*PEGASIS: Power Efficient GAthering in Sensor Information Systems,"* in the Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, pp. 3-1125-3-1130, March 2002.

[10] V. Jolly and S. Latifi,"*Comprehensive Study of Routing Management in Wireless Sensor Networks-Part-*2", in Proceedings of International Conference of Wireless Networks 2006 (ICWN 2006), pp.49-62, 2006.

[11] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "*Geography informed energy conservation for ad hoc routing*," in the Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), pp.70-84, Rome, Italy, July 2001.

[12] L. Xia, X. Chen and X. Guan, "*A New Gradient-Based Routing Protocol in Wireless Sensor Networks",* in Proceeding of International Conference on Embedded Software and Systems (ICESS), pp.318-325, 2004

[13] Endi B. Heizelman, Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "*An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks*," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol 1. No. 4, pp. 35-80, October 2002.

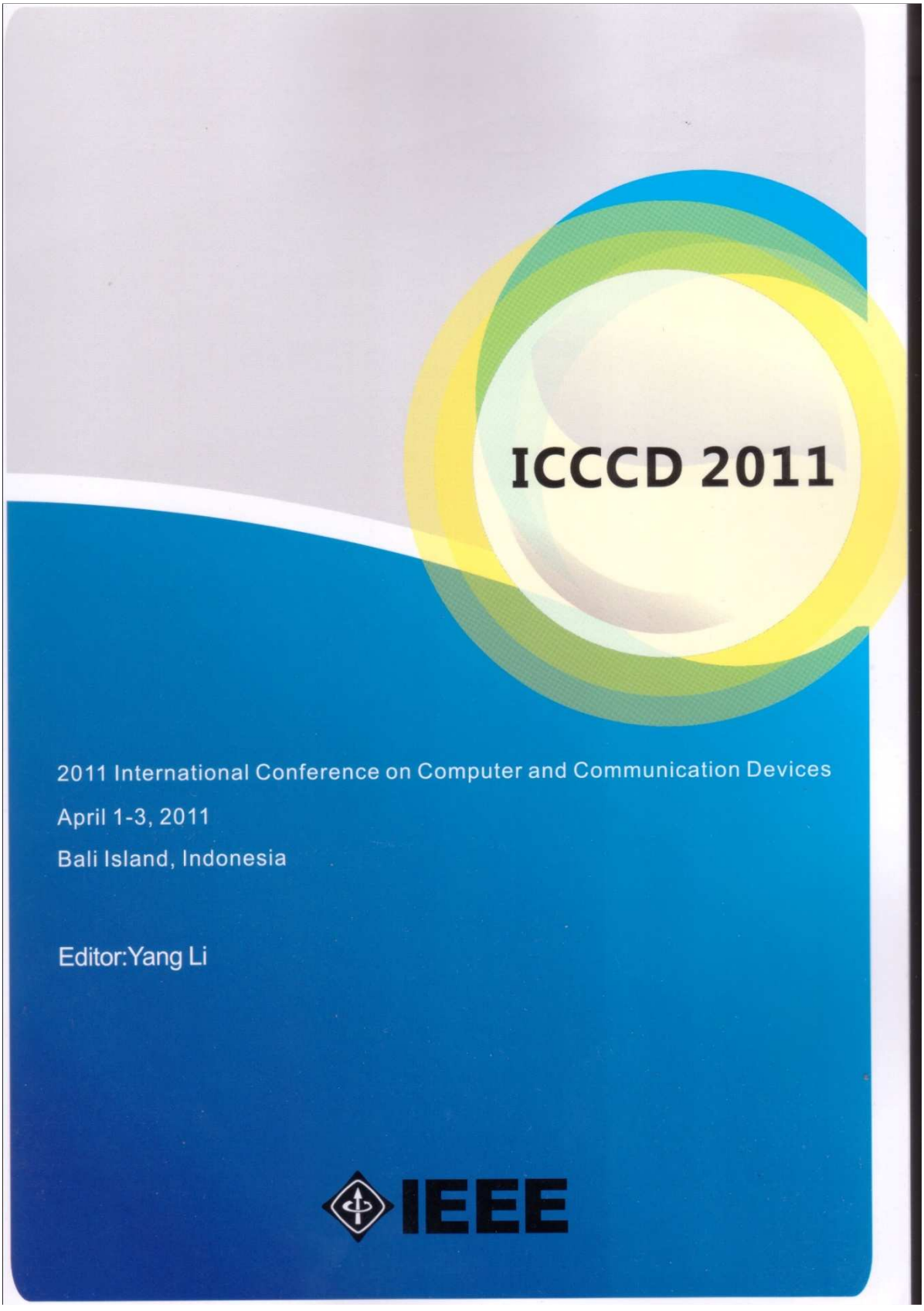
[14] M. Bani Yassein, A. Al-zou'bi, Y. Khamayseh and W. Mardini , "*Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network (VLEACH)* ", JDCTA: International Journal of Digital Content Technology and its Applications, Vol. 3, No. 2, pp. 132 - 136, 2009.

[15] F. Xiangning and S. Yulin, "*Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network*", in the Proceeding of International Conference on Sensor Technologies and Applications, pp. 260 - 264, Oct.2007.

[16] V. Loscri, G. Morabito, and S. Marano, "*A two-levels hierarchy for low-energy adaptive clustering hierarchy (TL-LEACH)*," in VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, pp. 1809-1813, 2005.

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์


ICCCD 2011
2011 International Conference on Computer and Communication Devices
April 1-3, 2011
Bali Island, Indonesia
Editor:Yang Li
IEEE

2011 International Conference on Computer and Communication Devices (ICCCD 2011)

Scalable Routing Protocol in Wireless Sensor Networks

Thanawat Horjaturapittaporn
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Hatyai, Songkhla, Thailand 90112
5010120027@email.psu.ac.th

W. Suntiamorntut
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Hatyai, Songkhla, Thailand 90112
wannarat@coe.psu.ac.th

***Abstract*— In recent years, several protocols have been proposed for Wireless Sensor Networks (WSNs) in many different purposes. Wireless Sensor Networks have the limitations such as energy source, memory size and processing power. Therefore, developing an energy-efficient routing protocol is an interested research work in this field. The routing protocols in sensor networks are able to classify into three categories [1] data-centric, hierarchical and location-based. In a hierarchical model, Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchical (LEACH) was the famous protocol. However LEACH was designed for small size networks because every cluster head of LEACH network can only connect to the base station. In this paper, we propose a hierarchical routing protocol which is suitable for a medium size of the network at two hundred nodes.**

Keywords-component; LEACH; routing protocols; Hierarchical; Wireless Sensor Networks

I. INTRODUCTION

Wireless sensor networks tend to be more popular. It has also been predicted to provide vast popularity in the future since it can be deployed in many environments without attendance of any men. It consists of a large number of small sensors with low-power transceivers and connected by radio wave frequency. Those sensor nodes are designed to collect data, monitor and control the physical environment efficiently. Thus, the energy efficient routing protocol on wireless sensor networks is one of the important challenges.

In wireless sensor networks, sensor nodes have been limited by energy sources, processing power and memory size. The simple but energy-efficient protocol must be adopted to prolong the lifetime of network. All of the above mentioned, lead to routing algorithms which consider the limitation of sensor nodes. In [1][2], various kinds of routing protocols have been proposed. One of well-known protocol in WSNs is LEACH[3][4]. It is a basically routing protocol on hierarchical model. Almost of protocols that occur in the form of hierarchical model later, developed from the LEACH protocol, such as Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol (TEEN) [5], Power-Energy Gathering in Sensor Information (PEGASIS) [6].

Improvements to LEACH are proposed in [5][6]. Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol (TEEN) is based on LEACH. TEEN support responding and detect data change immediately. It has two threshold values, Hard Threshold (HT) and Soft Threshold (ST), when the value of the sensed attribute is more than a HT value, the sensor node sensing this value must report it to sink node. After that, when value of the sensed attribute change larger than a ST value, it will report the sensed data again. A node will report data only when the sensed value exceeds HT or the value's change is larger than ST.

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) is a chain-based power efficient protocol based on LEACH [6]. PEGASIS used chain form instead of the cluster form like on LEACH protocol. It assumes that each node must know location information about all other nodes at first. It starts construct chain form from the base station by using a greedy algorithm. The chain leader aggregates data and forwards it to the base station. In order to balance the overhead involved in communication between the chain leader and the base station, each node in the chain takes turn to be the leader.

In this paper, we propose the cluster-based routing protocol which is modified on LEACH algorithm. The analysis of the original LEACH is also presented here. Meanwhile our protocol is discussed for large networks. Since the energy consumption is varied by the distance, the different distance between cluster head and sink node is considered in this work. The rest of this paper is organized as the following. Section II explains the original LEACH protocol. We discuss the limitation of the original LEACH in section III. Then later, our protocol is proposed in section IV. The simulation results of our protocol are shown in section V. Finally, our research work is concluded in section VI.

II. LEACH PROTOCOL

In LEACH, main idea of this protocol is form sensor nodes into cluster and some nodes serving as cluster heads which are over-loaded with the long range transmissions to the base station or sink node, process and compress data from neighbor nodes in their cluster before forward to the base station. Therefore the nodes that are cluster heads must to rotate the role of a cluster head randomly and periodically over all the nodes as proposed in LEACH. The operation of LEACH is divided into periods and each period consists of a set-up phase and a steady-state phase. In the setup phase, nodes communicate with short messages and are organized into clusters with some nodes selected as cluster heads. After the set-up phase, each cluster head sets up TDMA schedules for all member nodes in its cluster. Member nodes sense data and generate to the cluster heads according to the TDMA schedule. The cluster head aggregates and compresses this data before passing it to the sink or base station.

978-1-4244-9831-4/11/$26.00 ©2011 IEEE

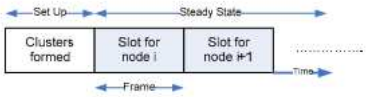


Figure 1. Timeline in LEACH protocol

In LEACH, cluster-heads are randomly selected. The decision of cluster-heads is simply based on the suggested percentage of them for the network and the number of times the node has been a cluster-head so far. This decision is made by each node n choosing a random number between 0 and 1. If the number is less than a threshold T(n), the node becomes a cluster-head for the current round. The threshold is set as follows:

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{P}{1 - P\,(r \bmod 1/p)} & \text{If } n \in G \end{cases} \quad (1)$$

where P is the desired cluster-head probability, r is the number of the current round and G is the set of nodes that have not been cluster-heads in the last 1/P rounds.

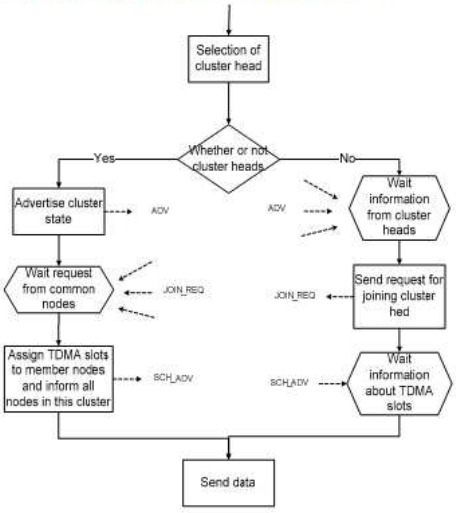


Figure 2. Flow chart of cluster formation of LEACH protocol

III. PROTOCOL DISADVANTAGE

There are several problems in the current LEACH which makes the LEACH energy inefficient and fail. In LEACH protocol, a basic assumption is nodes always have data to send to the base station and all nodes can communicate each other. While in practical applications, the nodes maybe not always have data to send, and is not necessary for the end user to get the data continuously. The closed nodes have correlated data, so every node sending its data is not necessary.

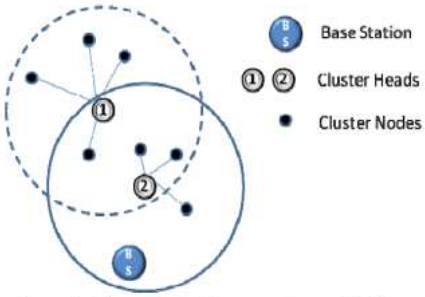


Figure 3. Cluster Head miss communicate with BS

All of sensors nodes on network can be communicate with each other. The sensor node sends its data directly to the base station. If the base station is far away from the nodes, direct communication will require a large amount of transmit power from each node. Therefore the battery of the nodes will quickly drain and reduce the system lifetime. However, in practical not at all nodes in network can send data directly to base station because sensor nodes have one constraint is range of transmission from itself to destination at about 100 meter. In **Error! Reference source not found.**, these picture shows some case which cluster head is out of communicate range of base station. The cluster node 1 cannot communicate with base station because cluster node 1 is far away from base station more than 100 meter.

IV. PROPOSED MODEL

We suppose that there are n nodes in the wireless sensor networks. Not at all nodes can be cluster head because it has constraint about range of transmission. So, the nodes which can become to cluster head must have 3 characteristics.

- Have enough energy for process compress and send data to base station.
- Have distant between itself and base station in range of transmission.
- Have neighbor nodes can communicate with it.

This algorithm is broken up into rounds where each round consists setup state, steady state, improve cluster head phase. In sub-sections we discuss each of these phases in details.

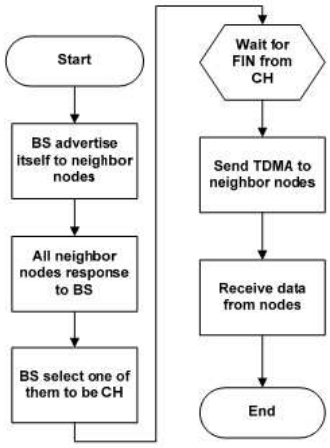


Figure 4. Flow chart of algorithm on BS side

A. *Setup Phase*

In Figure 4, shown the algorithm on BS side. In setup phase start with base station seek neighbor nodes by advertise itself to all nodes which can hear base station's advertisement. The transmission range of base station is about 100 meter. When all nodes receive advertisement from base station, the nodes will send their status information to base station. After that base station uses synchronize time protocol to manage time synchronization for all member nodes. In this paper don't focus on time synchronization for nodes. When all nodes synchronized, base station decides that which node will be cluster head and send data to select the node that is chosen to be cluster head. The threshold used in cluster head election is determined by equation 2,

$$T = [(W_1 * Er_i) + (W_2 * D_i)] \quad (2)$$

where W_1 is weight of residual energy value, Er_i is residual energy value of node i, W_2 is weight of distance between node i and BS and D_i is distance between node i and BS. Any node which has largest T becomes cluster head.

In the next step, each cluster head of subarea advertise itself to their cluster, while the subarea id is included. The nodes send their status information to their cluster head which they can hear advertise packet and nearest from them. In the same way in previous step, uses synchronize time protocol to synchronize time all of nodes on each clusters. Then the cluster head records the energy information of the nodes belongs to this cluster and it will decide that which node will be cluster head. After that the lower cluster head will continue like this until it reaches to final level.

B. *Steady phase*

In this phase, each cluster head sets up a TDMA (Time Division Multiple Access) schedule and transmits this schedule to the member nodes in each cluster. Once the TDMA schedule is known by all nodes in the cluster. Each node works out its residual energy.

Why all nodes need to time synchronization, on each clusters have one cluster head which get data from all member nodes and forward compress data to base station on their time slot which assigned from upper cluster head. If time slot of each cluster heads don't synchronize, the data collision may occur.

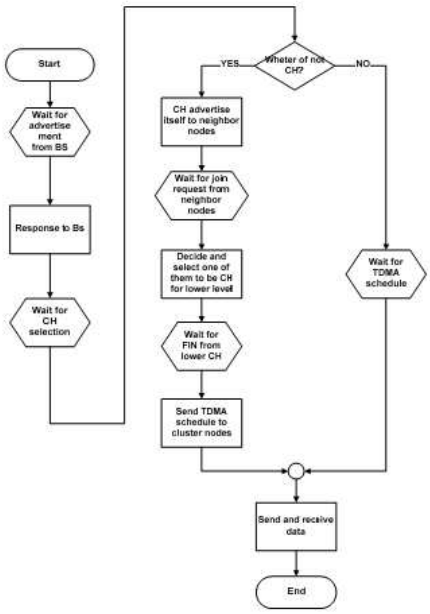


Figure 5. Flow chart of algorithm on cluster node side

C. *Improve cluster head phase*

At time to rotate the role of cluster head which have residual energy less than energy threshold, that cluster head will send request to upper cluster head and send control packet to lower cluster head for stop sending all data. The threshold used in change cluster head is determined by equation 3,

$$E_{th} = P * E_{start} \quad (3)$$

where P is desire percentage which want to change cluster head and E_{start} is energy initial for first round or energy residual of new cluster head for another round

When cluster head node on upper level received the request and forward it to BS. After that BS decides for a new cluster head by uses data which included residual energy of each member nodes. They compare the value to other nodes. The cluster head selects the largest node to join in, and then notices it to the new cluster head. The new cluster head announces to the cluster members.

V. SIMULATION RESULT

We simulate this algorithm and utilize a network with 100 nodes randomly deployed on network area 400x400 m. and base station at (200,200). The bandwidth of channel is set to 250 kb/s, each data message is 100 bytes long, and packet header for each type of packet is 25 bytes long. The initial power of all nodes is considered to be 0.5J.

TABLE I. SIMULATION PARAMETERS VALUE

Variables	Value
Transmission energy	74.4 mW
Receive energy	64.8 mW
Idle energy	5.52 μW
Nodes	100
Initial energy	0.5 J
Payload size	100 Bytes
Header size	25 Bytes
Network size	400 x 400 m.
Transmission range	100 m.
Base station position	(200,200)

In Figure 6, the simulation result of the environment setting in the simulation parameter on Table 1 is shown. In beginning BS decides to select two nodes will be cluster head and send data to select the node that is chosen to be cluster head. Finally, Network separated to 13 levels, each level have one node to be cluster head at least. Network has 19 nodes are cluster heads, the set up phase is complete and the steady state phase begin. After the cluster head are established and all node send data, residual energy of some node will empty so that node will send request to base station for change cluster head of that level.

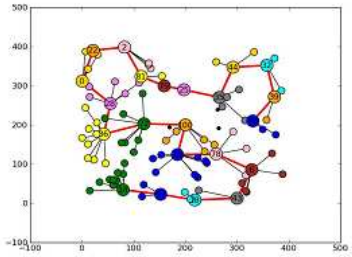


Figure 6. Simulation result

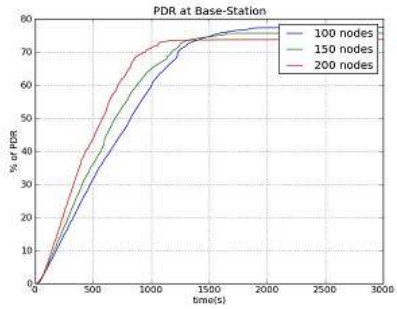


Figure 7. Packets Delivery Ratio at base-station

In Figure 7, shown Packets Delivery Ratio which is calculated from equation 4,

$$PDR = \frac{\text{all received data packets a}}{\text{all packets sent to BS}} \quad (4)$$

The packet delivery ratio (PDR) is the ratio between the amount of packets sent from source and received at the destination. In this case, source is nodes in network and destination is BS.

VI. CONCLUSION

Cluster-based routing protocol of wireless sensor network is taking the limited energy and transmission range of sensor node into account. The most popular protocol LEACH, have many assumption to conflict with practical environment so it can't use in real networks. This paper is proposing an algorithm to make new cluster base protocol which can be use in real network and conserve energy to increase network's lifetime.

LEACH was designed for small size network because every cluster head of LEACH network can only connect to the base station So, when uses LEACH algorithm in network area size 400 x 400 m. it will be fail if BS locate in outside of their transmission range.

This algorithm will separate network to multi-level so if the number of nodes in each level is small, it consumes the energy quickly. In setup phase base station and cluster head of each level must to process data from their cluster nodes so between base station and cluster head or between each cluster head have more signal overhead and long time in setup phase.

REFERENCES

[1] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," Ad Hoc Networks, vol.3, no.3, pp.325–349, May 2005.

[2] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," IEEE Wireless Comm., vol. 11, pp. 6-28, 2004.

[3] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks, Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS'00), January 2000.

[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.660-667, October 2002.

[5] A. Manjeshwar and D. Agrawal, "TEEN: a Routing Protocol for Enhanced Efficient in Wireless Sensor Networks," Proc. of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 2009-2015, 2001.

[6] S. Lindesy and C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information System," Proc. of 2002 IEEE Aerospace Conference, pp. 1-6, March 2002.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายธนวัฒน์ หอจตุรพิธพร

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010120027

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

- ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีการศึกษา2550

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- T. Horjaturapittaporn, W. Suntiamorntut, “Scalable Routing Protocol in Wireless Sensor Networks”, Proceedings of International Conference on Computer and Communication Devices (ICCCD 2011), Bali Island, Indonesia, 1st-3rd April 2011, pp.V1-234 – V1-238.