

อัลกอริธึมการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอกบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงาน



นายจิรศักดิ์ กาญจนโรจน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

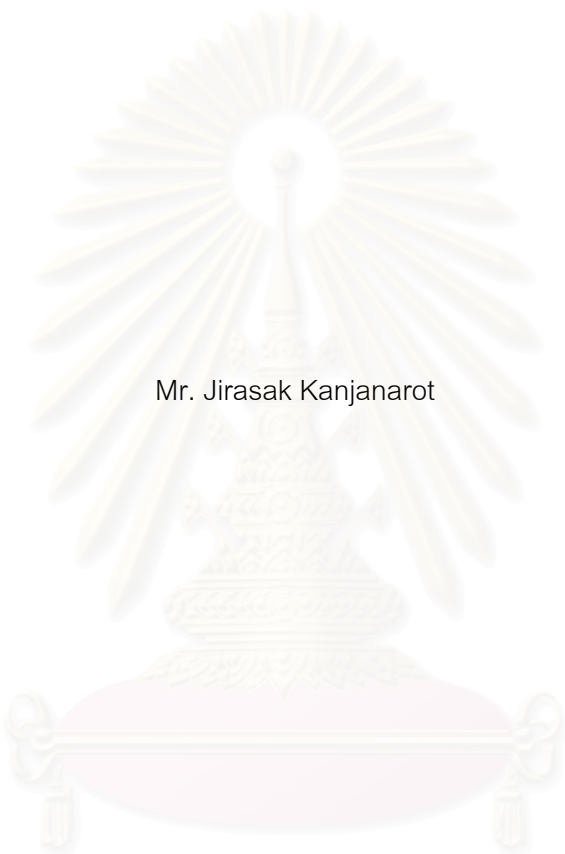
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3683-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROUTING ALGORITHMS OF MOBILE AD HOC NETWORK (MANET)
BASED ON ENERGY EFFICIENCY



Mr. Jirasak Kanjanarot

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3683-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายแอตฮอปบนพื้นฐาน
ประสิทธิภาพของพลังงาน

โดย

นายจิรศักดิ์ กาญจนโรจน์


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา

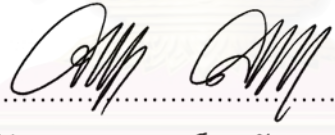
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

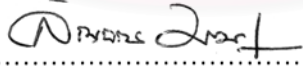
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อิศวกุล)

4670263921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: POWER EFFICIENCY, ROUTING ALGORITHM, MANETS, ENERGY EFFICIENCY

JIRASAK JANJANAROT : ROUTING ALGORITHMS OF MOBILE AD HOC NETWORK (MANET) BASED ON ENERGY EFFICIENCY. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYACHET SAIVICHIT, 147 pp. ISBN 974-17-3683-5.

This thesis proposed several routing protocols for ad hoc networks which enhance power consumption efficiency of the network and consequently increase the network lifetime. There are 3 categories of routing protocols that are proposed in this thesis. The first is the minimum energy consumption routing protocol which aims at minimizing energy consumption or achieve energy-efficient utilization of network to extend network lifetime. The new energy-based route discovery mechanism to find the optimum path with consideration of total reliable energy consumption (including the energy consumed by transmitting, receiving and overhearing) and the effect of channel quality are considered. The second routing protocol is the best proposed protocol for maximizing network lifetime. It considers the current battery remaining in various nodes, focused on balancing energy usage among nodes by avoiding nodes that have low level of remaining battery. This will as a result, maximize the network lifetime. In the proposed network lifetime calculation, the energy consumed by packet sending in the buffer and the energy requirement of source node are considered. The last proposed protocol is a hybrid-aware routing protocol, which combines the advantages both of energy-aware and battery-aware routing protocols to achieve in parallel. The hybrid-aware protocol gives better results among the energy efficiency and the quality of service consideration.

Department Electrical Engineering
Field of study Electrical Engineering
Academic year2005.....

Student's signature *Jirajak Janjanarot*
Advisor's signature *Chaiyachet Saivichit*

จิร์กคัต์ กาญจนโรจน์ : อัลกอริธึมการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายแอตฮอกบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงาน. (ROUTING ALGORITHMS OF MOBILE AD HOC NETWORK (MANET) BASED ON ENERGY EFFICIENCY) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร, จำนวนหน้า 147 หน้า. ISBN 974-17-3683-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอตฮอก เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 3 โพรโทคอล โพรโทคอลแรกที่น่าสนใจคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยมีเป้าหมายทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่ง การรับ และการได้ยินจากแบบจำลองการใช้พลังงานของโหนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางแบบที่สองเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อรักษาสมดุลในการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่าย โดยการพยายามเลือกเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานที่อยู่ในระดับสูง ซึ่งวิธีการที่น่าสนใจนี้ได้กำหนดวิธีการคำนวณอายุการใช้งานของโหนดขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความแม่นยำในการประมาณแทนที่จะใช้เฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่โหนดจะต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัฟเฟอร์ นอกจากนี้ยังรวมถึงพลังงานที่โหนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่โหนดต้นทางร้องขอมา ซึ่ง โพรโทคอลที่น่าสนใจสามารถที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้อย่างชัดเจน และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบสุดท้ายที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่น่าสนใจข้างต้นมาพิจารณาเข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด โดยโพรโทคอลนี้เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดในโครงข่ายที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการที่ดีที่สุด

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ สหายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนดิศ อัครกุล ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์ ตลอดจนความเมตตา และเอาใจใส่ต่อผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้กำเนิด ครอบครัวที่มีความรัก ความอบอุ่น และกำลังใจแก่ผู้วิจัยในทุก ๆ ด้านเสมอมา

นอกจากนี้ ต้องขอขอบคุณความคิดเห็นดีๆ รวมทั้งข้อเสนอแนะในมุมมองที่แตกต่าง กำลังใจ และแรงสนับสนุนจากพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน อาทิ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาและเพิ่มคุณค่าในวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสละเวลาช่วยขัดเกลาและตรวจแก้ผลงานวิจัยจาก อาจารย์ภัทรชาติ พีวศิมน พีปภรณ์ พี่ก้อย พี่ขวัญตา พิชัย พนิดา เต๊ะ จุมพฏ พลวัฒน์ คำขวัญ วรารัตน์ พรทิพย์ มิก โกวิทย์ คุณนันต์ น้องสุพรรณษา เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้รับโอกาสในการฝึกฝนวิธีการนำเสนอผลงาน และร่วมกันแสดงความคิดเห็นจากอาจารย์และเพื่อนๆ ร่วมกลุ่มสัมมนาในกลุ่มเนตเวิร์ก (Network group) โดย ผศ.ดร.เชาวนดิศ และ ผศ.ดร.ชัยเชษฐ ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเสริมสร้างความมั่นใจและความกล้าแสดงความคิดเห็นในเชิงวิชาการมากขึ้น

ขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิศวกรรมการไฟฟ้า และภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา (Cooperative Project between Department of Electrical Engineering and Private sector for Research and Development) ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสื่อสารซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย รวมถึงเพื่อนพี่น้องนิสิตทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และกำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	8
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	9
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	9
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....	10
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอค.....	12
2.2 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สาย.....	14
2.2.1 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss).....	14
2.3 แบบจำลองการใช้พลังงาน (Energy Consumption Model).....	16
2.3.1 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์.....	23
2.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Estimation of Link Error Rate).....	26
2.4.1 แบบจำลองความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง.....	26
2.4.2 การดัดแปลงโปรแกรม Network Simulator 2 (NS2) เพื่อรองรับผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาคุณภาพข่ายเชื่อมโยง.....	29
2.4.3 การแก้ไขความผิดพลาดแบบ Automatic Repeat Request (ARQ).....	31
2.5 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอค (Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks).....	33

2.5.1	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV).....	34
2.5.1.1	กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	35
2.5.1.2	กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance).....	40
2.5.2	ผลกระทบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเมื่อพิจารณาถึงข้อจำกัดทางด้านพลังงานจากแบตเตอรี่และคุณภาพของช่องสัญญาณ (หรือข่ายเชื่อมโยง).....	43
2.6	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลัง (Power-Aware Routing Protocols).....	46
2.6.1	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่ง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols).....	47
2.6.1.1	Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR).....	47
2.6.1.2	Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks.....	49
2.6.1.3	Reliable Energy-Aware Routing Protocol (RA).....	49
2.6.1.4	Energy Efficient AODV Routing in CDMA Ad Hoc Networks Using Beamforming.....	52
2.6.2	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware Routing Protocols).....	52
2.6.2.1	Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks.....	53
2.6.2.2	A Fully Distributed Routing Algorithm for Maximizing Lifetime of a Wireless Ad Hoc Network.....	55
2.6.2.3	DSR-based Energy-aware Routing Protocols in Ad Hoc Networks.....	56
2.6.2.4	Non-Blocking, Localized Routing Algorithm for Balanced Energy Consumption in Mobile Ad Hoc Networks.....	57
2.6.2.5	Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks Based on the Energy Drain Rate (MDR).....	58
2.6.3	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocol).....	59

2.6.3.1	Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR).....	60
2.6.3.2	Conditional Minimum Drain Rate (CMDR).....	61
2.6.3.3	Power Efficient Reliable Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks.....	62
2.7	ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต.....	63
3	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังที่นำเสนอ.....	69
3.1	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocol).....	69
3.1.1	การคำนวณค่าต้นทุนพลังงานชายเชื่อมโยง (Energy Link Cost Computation).....	69
3.1.2	กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	73
3.1.3	ข้อแตกต่างระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับกระบวนการ ค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV.....	77
3.2	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols).....	78
3.2.1	การคำนวณค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด (Battery Lifetime Computation).....	79
3.2.2	กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	80
3.2.3	ฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay Function).....	82
3.3	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งาน ของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocols).....	84
3.3.1	กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	85
3.4	สรุป.....	87
4	สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ.....	89
4.1	สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment).....	89
4.1.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของ โหนดต้นทาง.....	89

4.1.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ใช้ในการจำลอง.....	91
4.1.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล.....	91
4.2	ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทคอลทั้งสามประเภท.....	92
4.2.1	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานและกำลัง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols).....	92
4.2.1.1	ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง.....	93
4.2.2	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery-Aware Routing Protocols).....	100
4.2.2.1	ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง.....	100
4.2.3	โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols).....	108
4.2.3.1	ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง.....	109
4.3	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามประเภท.....	116
4.4	การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลา (Maximum Delay) และเวลาการรอคอย (Waiting Time) ที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ.....	121
4.4.1	การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay).....	122
4.4.2	การพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย (Waiting Time).....	126
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	131
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	131
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	134
	รายการอ้างอิง.....	135
	ภาคผนวก.....	139
	บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	141
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	147

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อกัน	13
รูปที่ 2.2 แบบจำลองการสูญเสียเชิงสถิติเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ	15
รูปที่ 2.2(ก) แบบจำลองการสูญเสียเชิงสถิติในอวกาศว่าง	15
รูปที่ 2.2(ข) แบบจำลองการสูญเสียเชิงสถิติเนื่องจากพื้นผิวเรียบ	15
รูปที่ 2.3 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs	18
รูปที่ 2.4 การส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast (UDP/IP) ขนาด 256 ไบต์ด้วยความเร็ว 2 Mbps (วัดที่ตัวส่ง)	20
รูปที่ 2.4(ก) รูปแบบการวัดพลังงานจากการส่งข้อมูล	20
รูปที่ 2.4(ข) พลังงานที่สูญเสียในโมดต่าง ๆ	20
รูปที่ 2.5 การสื่อสารของโหนดเมื่อมีระยะเวลาการส่งที่เท่ากัน (2.5-ก) และไม่เท่ากัน (2.5-ข)	22
รูปที่ 2.5(ก) การสื่อสารแบบสองทิศทาง	22
รูปที่ 2.5(ข) การสื่อสารแบบทิศทางเดียว	22
รูปที่ 2.6 การติดต่อสื่อสารโดยใช้ทราฟฟิกแบบต่าง ๆ	24
รูปที่ 2.6(ก) ทราฟฟิกแบบ Unicast	24
รูปที่ 2.6(ข) ทราฟฟิกแบบ Overhear	24
รูปที่ 2.7 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs ที่นำเสนอ	25
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ	28
รูปที่ 2.9 การสื่อสารจากโหนด S ไปยังโหนด D ด้วยความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยง	32
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request)	36
รูปที่ 2.11 กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV	38
รูปที่ 2.11(ก) ระยะเวลาการส่งข้อมูลและการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ของโหนด A	38
รูปที่ 2.11(ข) การสร้างเส้นทางย้อนกลับหลังจากได้รับสัญญาณแพ็กเก็ต RREQ	38
รูปที่ 2.11(ค) ภายหลังจากที่โหนด K F และ E ได้รับสัญญาณแพ็กเก็ต RREQ	38
รูปที่ 2.11(ง) ภายหลังจากแพ็กเก็ต RREQ แรกไปถึงยังโหนดปลายทาง B	38
รูปที่ 2.11(จ) สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 2.11 (ก) – (ง)	38
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP)	39
รูปที่ 2.13 กระบวนการดูแลเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV	42
รูปที่ 2.13(ก) ทอพอโลยีของโครงข่ายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการค้นหาเส้นทาง	42

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.13(ข) โหนด H เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางการสื่อสาร.....	42
รูปที่ 2.13(ค) โหนด H ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดระหว่างการสื่อสาร.....	42
รูปที่ 2.13(ง) โหนด F แจ้งความเสียหายที่เกิดขึ้นของข่ายเชื่อมโยง F-H ให้กับโหนดที่เกี่ยวข้อง....	42
รูปที่ 2.13(จ) สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 2.13 (ก) – (ง).....	42
รูปที่ 2.14 การจัดสรรเส้นทางในกรณีที่กำหนดให้กำลังส่งเป็นค่าคงที่.....	49
รูปที่ 2.15 การจัดสรรเส้นทางในกรณีที่กำลังส่งมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนได้.....	49
รูปที่ 2.16 เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโหนด S และ D.....	64
รูปที่ 2.17 การแพร่กระจายแพ็กเก็ตข้อมูลของกระบวนการค้นหาเส้นทาง.....	65
รูปที่ 2.18 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR [16] และ RDRP [17].....	67
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแพ็กเก็ตข้อมูลเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy.....	74
รูปที่ 3.2 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy).....	76
รูปที่ 3.3 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy).....	76
รูปที่ 3.4 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy).....	77
รูปที่ 3.5 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery).....	82
รูปที่ 3.6 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery).....	82
รูปที่ 3.7 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery).....	83
รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และในบทความอ้างอิง [17] ของ Yu และ Lee	84
รูปที่ 3.9 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid).....	86

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.10	ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid).....86
รูปที่ 3.11	ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid).....88
รูปที่ 4.1	อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....93
รูปที่ 4.2	จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....94
รูปที่ 4.3	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....95
รูปที่ 4.4	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....95
รูปที่ 4.5	พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....96
รูปที่ 4.6	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลือต่อโหนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....98
รูปที่ 4.7	อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....98
รูปที่ 4.8	อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....99
รูปที่ 4.9	อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเป็นแบบค่านิ่งถึงระดับความจุของแบตเตอรี่).....101

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.10 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	102
รูปที่ 4.11 จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	103
รูปที่ 4.12 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	103
รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	104
รูปที่ 4.14 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลือต่อโนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	105
รูปที่ 4.15 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	105
รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี).....	106
รูปที่ 4.17 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม).....	110
รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม).....	110
รูปที่ 4.19 จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม).....	111
รูปที่ 4.20 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม).....	112
รูปที่ 4.21 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลือต่อโนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม).....	113

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.22 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม).....	113
รูปที่ 4.23 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล).....	117
รูปที่ 4.24 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล).....	118
รูปที่ 4.25 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล).....	119
รูปที่ 4.26 พังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม.....	123
รูปที่ 4.27 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด).....	124
รูปที่ 4.28 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด).....	125
รูปที่ 4.29 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด).....	125
รูปที่ 4.30 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย).....	128
รูปที่ 4.31 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย).....	129
รูปที่ 4.32 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย).....	129

สารบัญตาราง

ตารางประกอบ	หน้า
ตารางที่ 2.1	กำลังที่ใช้ในแต่ละโมดการทำงานของอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย.....19
ตารางที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ.....30
ตารางที่ 2.3	ตารางเส้นทางเดินข้อมูลของโหนด F.....43
ตารางที่ 2.4	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....44
ตารางที่ 2.5	ผลการทดลองของโพรโทคอลแบบ AODV AODV-E และ AODV-EL.....45
ตารางที่ 2.6	ขั้นตอนของการทำงานของโพรโทคอล LEAR สำหรับแต่ละโหนด.....58
ตารางที่ 3.1	ความหมายของตัวแปรในสมการที่ 3.1 ถึงสมการที่ 3.9.....72
ตารางที่ 3.2	ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ 3.14 ถึงสมการที่ 3.16.....80
ตารางที่ 4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง.....90
ตารางที่ 5.1	สรุปเปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอลโดยใช้พารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน...133

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้รับความนิยมในการติดต่อสื่อสารของมนุษย์ เนื่องจากความสะดวกสบายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารและความยืดหยุ่นในการใช้งาน ที่เห็นได้ชัดเจนคือ การเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้บริการโทรศัพท์ไร้สายและผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ต ผ่านโครงข่าย Wireless Local Area Network (WLAN) ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้รองรับ การสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันยังคงจำกัดอยู่ในระดับที่เราเรียกว่า end-user คือ ลักษณะการ ส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายจะเกิดขึ้นเฉพาะจากผู้ใช้บริการปลายทางไปยังสถานีฐาน (Base station) หรือจากโหนดบุคคไปยังจุดเข้าถึง (Access Point) เท่านั้น ส่วนการให้บริการในภาคอื่น ๆ ยังคงเป็น แบบใช้สาย ซึ่งหากปริมาณข้อมูลข่าวสารเพิ่มมากขึ้นจนโครงข่ายที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถ รองรับได้อีก ผู้ให้บริการโครงข่ายจำเป็นต้องขยายโครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับกับความต้องการ ที่เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้คุณภาพการให้บริการ (Quality of service, Qos) ยังคงอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการขยายโครงข่ายจะพบว่าส่วนมากจะเกิดจากการวางโครงสร้าง พื้นฐานอีกทั้งยังใช้ระยะเวลาในการติดตั้งโครงข่าย โครงข่ายแอดฮอค (Ad hoc Network) จึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากข้อดีหลาย ๆ ประการทั้งในด้านค่าใช้จ่าย ในการติดตั้งโครงข่ายที่ต่ำ และมีความซับซ้อนต่ำในการติดตั้งโครงข่ายจึงทำให้ใช้เวลาการติดตั้ง น้อยลง

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายแอดฮอคเป็นโครงข่ายที่ก่อรูปขึ้นโดยไม่มีการอำนวยความสะดวกจากส่วนกลาง (Infrastructureless) และเป็นการทำงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed) โดยโครงข่ายจะ ประกอบด้วย โหนดเคลื่อนที่ (Mobile nodes) ที่มีการติดต่อกันแบบไร้สายเพื่อส่งข้อมูลในรูปของ แพ็กเก็ตข้อมูลระหว่างกัน อีกทั้งโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทั้งการเคลื่อนที่ของโหนดและ คุณภาพของช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้รูปแบบ การเชื่อมต่อของโหนดหรือทอพอโลยีของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถ ทำนายได้ล่วงหน้า สิ่งที่โครงข่ายแอดฮอคแตกต่างจากโครงข่ายเซลลูลาร์ที่เห็นได้ชัดนอกจากไม่ ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานแล้วคือ การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication) นั้นหมายถึง ถ้าโหนดต้นทางต้องการสื่อสารกับโหนดปลายทางที่ไม่อยู่ในระยะการ ส่งของโหนดต้นทาง โหนดต้นทางจำเป็นต้องส่งแพ็กเก็ตผ่านโหนดระหว่างทาง (Intermediate nodes)

แล้วให้โนดระหว่างทางทำหน้าที่ส่งแพ็กเก็ตนั้นต่อไปยังโนดปลายทาง ดังนั้นจึงทำให้ทุกโนดในโครงข่ายต้องมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกันในโครงข่าย (ซึ่งโนดต้องทำหน้าที่เสมือนรูเตอร์ (Router)) เมื่อในอดีตที่ผ่านมาโครงข่ายแอตฮอกได้ถูกใช้ในงานด้านการทหารเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการวางโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นแบบศูนย์กลางในสนามรบนั้นมีความยากลำบาก อีกทั้งความน่าเชื่อถือของโครงข่ายต่ำมากเนื่องจากเสี่ยงต่อการถูกทำลาย แต่เนื่องจากข้อดีหลาย ๆ ประการทำให้ในภาคธุรกิจได้หันมาให้ความสนใจและพัฒนามากขึ้น ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ของพื้นที่ที่ไม่มีโครงข่ายรองรับ (ไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายแบบคงที่หรือแบบเซลลูลาร์) คือ การปฏิบัติการช่วยเหลือกู้ภัยในพื้นที่ห่างไกล หรือเมื่อความต้องการใช้งานระบบสื่อสารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในสถานที่ก่อสร้างที่อยู่ห่างไกล หรือต้องการต่อขยายพื้นที่ให้บริการเดิมให้มากขึ้นและการวางระบบการสื่อสารในสนามบินเพื่อทำให้การสื่อสารมีความคล่องตัวมากขึ้น

การออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง (Routing Protocol) สำหรับโครงข่ายแบบแอตฮอกเพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ เป็นประเด็นสำคัญที่ควรจะต้องตระหนักถึงเป็นอันดับต้น ๆ และยังเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจในการพัฒนามากขึ้น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive) และแบบที่สองคือ การจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive หรือ On-demand) [1] โพรโทคอลทั้ง 2 ประเภทแตกต่างกันที่รูปแบบการจัดสรรเส้นทาง และกระบวนการในการปรับปรุงข้อมูลเส้นทาง (Routing Information) โดยที่โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าจะให้โนดเก็บรักษาเส้นทางที่เชื่อมต่อกับโนดอื่น ๆ ทั้งหมดของโครงข่ายในตารางการจัดเส้นทางตัวอย่างโพรโทคอลที่อยู่ในประเภทนี้คือ Destination Sequence Distance Vector (DSDV) และ Wireless Routing Protocol (WRP) ส่วนการจัดสรรเส้นทางแบบที่สอง (On-demand) เส้นทางเดินของข้อมูลจะถูกหาเมื่อโนดมีความต้องการในการส่งข้อมูล แต่ในแบบที่หนึ่งโนดมีเส้นทางเดินของข้อมูลพร้อมอยู่แล้ว ตัวอย่างของโพรโทคอลเช่น Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) [2] และ Dynamic Source Routing (DSR) [3] เป็นต้น

การออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้ง 2 นั้นคือ ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-Path) เป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจเลือกเส้นทางเพื่อลดจำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดและการประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลให้ต่ำที่สุด งานวิจัยส่วนมากทำการประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางด้วยการวัดค่าต่าง ๆ เช่น อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Data delivery ratio) การประวิงเวลา (Delay) เส้นทางที่เหมาะสม (Route optimality) และจำนวนช่วงการเชื่อมต่อ (Hop count) เท่านั้น ในบทความอ้างอิง [4, 5] ได้ทำการเปรียบเทียบผล

ของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งในแบบที่หนึ่งและสอง ผลที่ได้พบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ On-demand มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ Proactive เนื่องจากทอพอโลยีโครงข่ายแอตฮอกมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้โหนดจะต้องใช้แพ็กเก็ตจำนวนมากเพื่อรักษาหรือติดตามการเชื่อมต่อของโครงข่ายให้ทัน นอกจากนี้เส้นทางที่อยู่ในตารางการจัดสรรเส้นทางอาจจะไม่ใช่เส้นทางที่สามารถใช้งานได้

โหนดในโครงข่ายแอตฮอกจะต้องทำงานร่วมกันเพื่อให้โครงข่ายสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งสถานีฐาน จึงทำให้จำนวนโหนดในโครงข่ายมีผลต่อระบบ นอกจากนี้โหนดจะสามารถปฏิบัติงานได้โดยระดับพลังงานจากแบตเตอรี่มีเพียงพอและจะไม่สามารถปฏิบัติงานตามหน้าที่ได้ถ้าระดับพลังงานที่เหลืออยู่ต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ อีกทั้งการออกแบบอุปกรณ์การสื่อสารในปัจจุบันเช่นโทรศัพท์ พีดีเอ (PDA) และ Mobile IP ยังมีขนาดเล็กลงไปเรื่อย ๆ ฉะนั้นพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารก็กลายเป็นส่วนที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าโหนดจะสามารถเพิ่มพลังงานเข้าไปใหม่ได้แต่ในหลาย ๆ สถานการณ์ อย่างเช่น ในสนามรบ ในสถานการณ์การช่วยเหลือฉุกเฉิน ผู้ใช้ไม่สามารถทำการเพิ่มพลังงานใหม่ได้ซึ่งจะส่งผลให้โครงข่ายไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จากข้อจำกัดนี้ทำให้การออกแบบเพื่อให้โหนดหรือโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรืออนุรักษ์พลังงานให้มากที่สุดเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับโครงข่ายแอตฮอก [6] ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญ ณ จุดนี้โดยทำการออกแบบโพรโทคอลเพื่อให้โครงข่ายสามารถใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย (ยืดอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่าย) อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network Lifetime) ในที่นี้กำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่ทุกโหนดเริ่มทำงานจนกระทั่งมีโหนดแรกในโครงข่ายหมดอายุการใช้งานเพราะความจุแบตเตอรี่หมด

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ออกแบบฟังก์ชันการทำงานในชั้นการสื่อสารต่าง ๆ ตั้งแต่ชั้นกายภาพ (Physical layer) ไปจนถึงชั้นการประยุกต์ใช้งาน (Application layer) สำหรับโครงข่ายแอตฮอก เพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน แต่ส่วนใหญ่จะเน้นการออกแบบในชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (Data link layer) และชั้นเครือข่าย (Network layer) โดยแต่ละชั้นของการสื่อสารจะมีวิธีในการพัฒนาในส่วนของ การรักษาพลังงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละชั้นของการสื่อสาร แต่โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งวิธีการลดการใช้พลังงานของโครงข่ายแอตฮอกออกเป็น 3 แบบ [7] คือ แบบวิธีการควบคุมกำลัง (Power control) แบบที่สองเป็นวิธีการจัดการกำลัง (Power management) และส่วนสุดท้ายคือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power aware routing) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดว่าอยู่ในหมวดวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง ซึ่งรายละเอียดของแต่ละวิธีจะกล่าวในภายหลัง

งานวิจัยในหมวดการจัดเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง เป็นวิธีการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในชั้นเครือข่ายโดยใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอย่างเช่น กำลังส่ง พลังงานที่สูญเสียในการส่งข้อมูล อัตราการใช้พลังงานและระดับความจุแบตเตอรี่เป็นต้น มาใช้เป็นค่าต้นทุนเพื่อเป็นเงื่อนไขในการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย จากเดิมที่โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเส้นทางเดินของข้อมูล ข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือ โหนดที่อยู่ในเส้นทางที่สั้นที่สุดมีโอกาสที่จะหมดพลังงานอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะแตกต่างจากโพรโทคอลในหมวดนี้ที่พยายามเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำหรือพยายามที่จะกระจายทรานซมิชชันให้ผ่านโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งย่อยงานวิจัยในหมวดการจัดเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลังออกเป็น 3 ประเภทโดยแบ่งตามทรัพยากรที่นำมาใช้ในการพิจารณาเส้นทาง

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่ง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols)

กระบวนการจัดสรรเส้นทางในประเภทนี้นำเอาพลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งข้อมูลหรือกำลังส่งที่โหนดใช้ในการส่งข้อมูลมาเป็นค่าต้นทุนของโหนด (Node cost) หรือสายเชื่อมโยง (Link cost) โดยจะเลือกเส้นทางที่ใช้ค่าต้นทุนต่ำที่สุดนั่นคือ เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด งานวิจัยหลายงานวิจัยที่จัดว่าอยู่ในประเภทนี้ [8, 9, 10] ซึ่งแต่ละโพรโทคอลจะแตกต่างกันที่วิธีการในการกำหนดและคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุน และรูปแบบการค้นหาเส้นทางเป็นหลัก

ในบทความอ้างอิง [8] กำหนดให้กำลังส่งที่โหนดใช้ส่งข้อมูลเป็นค่าต้นทุนและเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุด ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้โครงข่ายลดการใช้พลังงานได้มากขึ้น อีกทั้งสามารถเพิ่มปริมาณงาน (Throughput) ของโครงข่าย แต่ในกรณีที่กำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่ (Constant Power) โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบนี้จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับการจัดสรรเส้นทางแบบสั้นที่สุด แต่ในบทความอ้างอิง [9] ได้กำหนดพลังงานที่ใช้ในการส่งต่อหนึ่งแพ็กเก็ตแทนการใช้กำลังส่ง แต่การกำหนดให้กำลังส่งของโหนดคงที่ทำให้พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งแพ็กเก็ตจะมีค่าคงที่ ทำให้โพรโทคอลทั้งสองแบบให้ผลที่เหมือนกัน (เส้นทางที่สั้นที่สุด)

ต่อมาในบทความอ้างอิง [10, 11] ได้กำหนดค่าต้นทุนเป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งหนึ่งแพ็กเก็ตรวมถึงพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตซ้ำเนื่องจากผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณ ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าโครงข่ายมีประสิทธิภาพทั้งด้านการใช้พลังงาน และปริมาณงาน

มากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอในบทความข้างต้น [8, 9] โดยทำการจำลองภายใต้โมเดลในโครงข่ายไม่เคลื่อนที่ (Static Network)

จากงานวิจัย [8, 9, 10, 11] ที่ได้กล่าวมาข้างต้นปัญหาหลักที่พบคือ เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดอาจจะไม่ได้ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดด้วย เนื่องจากโพรโทคอลดังที่กล่าวไว้ได้คำนวณค่าต้นทุนของเส้นทาง (Route cost) จากพลังงานที่โหนดใช้ในการส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วในการส่งข้อมูลจะต้องมีโนดสูญเสียพลังงานในการรับ และอาจจะสูญเสียพลังงานจากการได้ยิน (Overhear) แพ้ก็เกิดด้วย ซึ่งพลังงานที่เสียในส่วนหลังนี้เป็นส่วนที่มีนัยสำคัญ [12, 13, 14] ตรงจุดนี้จึงเห็นเหตุจูงใจให้งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอโพรโทคอลแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols) โดยจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย *Proposed-Energy* โดยนำเอาพลังงานที่ใช้ในการส่ง การรับและการได้ยิน รวมทั้งพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากผลกระทบของคุณภาพของช่องสัญญาณ ณ ปัจจุบันมาเป็นปัจจัยในการกำหนดค่าต้นทุน โดยพลังงานที่ได้จากการคำนวณในแต่ละเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอจะแสดงถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสีย ซึ่งแตกต่างจากเดิมที่พิจารณาจากพลังงานที่โหนดในเส้นทางเสียไปเพื่อส่งข้อมูลเท่านั้น

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในประเภทนี้จะเน้นการออกแบบโพรโทคอลโดยพยายามรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโหนดเพื่อทำให้โครงข่ายหรือโหนดมีอายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากพลังงานที่โหนดต้องใช้เพื่อส่งข้อมูลไม่ได้สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโหนดโดยตรง เพราะฉะนั้นโพรโทคอลประเภทนี้จึงนำเอาอายุการใช้งานของโหนดมากำหนดเป็นค่าต้นทุนของโหนดหรือข่ายเชื่อมโยง โดยที่อายุการใช้งานสามารถหาได้จากระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery Capacity) [9] หรือ ระดับความจุแบตเตอรี่ต่ออัตราการสูญเสียพลังงาน [15] และอื่น ๆ

ในบทความข้างต้น [9] เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสองแบบ ซึ่งทั้งสองแบบมีเป้าหมายเหมือนกันคือ พยายามหาเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงโดยหลีกเลี่ยงโหนดที่มีพลังงานที่ต่ำ โดยในแบบแรกได้ใช้เทคนิคแบบ max-sum และแบบที่สองใช้เทคนิคแบบ min-max ผลที่ได้พบว่าการใช้เทคนิคแบบ min-max สามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้มากกว่าเทคนิคแบบ max-sum

ต่อมาในบทความอ้างอิง [16] ได้เสนอว่าปัญหาในการจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของโพรโทคอลที่นำเสนอใน [9] นั้นสามารถแก้ไขได้โดยให้โหนดที่ต้องทำการตัดสินใจเลือกเส้นทางจะต้องมีข้อมูลมากพอหรือข้อมูลทั้งหมดจึงจะสามารถเลือกค่าที่ดีที่สุดได้ ซึ่งสามารถทำได้ถ้าโครงข่ายมีการทำงานแบบรวมศูนย์ (Centralize) นอกจากนี้เนื่องจากขั้นตอนที่โหนดสามารถรับและส่งต่อแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางได้เพียงแพ็กเก็ตแรกเท่านั้นและจะลบแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่เข้าตามมาทีหลังเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดวนซ้ำ (Loop) ของเส้นทาง อาจจะทำให้โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงถูกกีดขวางไม่ให้ร่วมอยู่ในเส้นทาง ในบทความอ้างอิง [16, 17] จึงนำเสนอฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay function) ที่ทุกโหนดจะต้องใช้งาน โดยฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อทำการหน่วงเวลาแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนจะทำการแพร่กระจายต่อให้โหนดข้างเคียง (Neighbor nodes) ซึ่งระยะเวลาที่หน่วงไว้จะแปรผกผันกับระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดนั้น ๆ เมื่อพิจารณาหลักการดังกล่าวก็จะพบว่าถ้าโหนดมีระดับความจุแบตเตอรี่สูงแพ็กเก็ตจะถูกหน่วงไว้เป็นเวลาที่ต่ำ และในทางตรงข้ามถ้าโหนดระดับความจุแบตเตอรี่ที่ต่ำแพ็กเก็ตจะถูกหน่วงไว้เป็นเวลานาน ซึ่งในกรณีนี้ทำให้โอกาสที่แพ็กเก็ตที่แพร่กระจายจากโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่ต่ำไปยังโหนดข้างเคียงจะถูกกลบทิ้ง เพราะฉะนั้นโพรโทคอลนี้ก็สามารถช่วยแก้ปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้นได้

ส่วนในบทความอ้างอิง [18] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ (Localized energy aware routing (LEAR) ซึ่งใช้หลักการคล้าย ๆ กับ [16, 17] คือให้โหนดระหว่างทางทำการตัดสินใจว่าจะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอที่ได้รับมานั้นต่อไปหรือไม่ โดยใช้ข้อมูลแบบท้องถิ่นนั้นคือระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด ถ้าโหนดมีระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ก็จะไม่ส่งต่อแพ็กเก็ตดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลนี้ได้เพิ่มแพ็กเก็ตควบคุมและขั้นตอนการทำงานมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโพรโทคอล ซึ่งแพ็กเก็ตและขั้นตอนเหล่านี้จะใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูงและยังทำให้เส้นทางที่ได้มีค่าประวิงเวลาของแพ็กเก็ตข้อมูลจากต้นทางไปยังโหนดปลายทางที่สูง

จากปัญหาของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดที่กล่าวมาข้างต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) โดยจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย *Proposed-Battery* เพื่อปรับปรุงให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น โพรโทคอลที่นำเสนอยังคงใช้หลักการคล้ายกับบทความอ้างอิงที่ [16, 17] คือ กำหนดให้โหนดระหว่างทางประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไว้เป็นช่วงเวลา T ซึ่งจะแปรผกผันกับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดแทนการใช้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด นอกจากนี้ได้นำเสนอ

วิธีการคำนวณค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่รุ่นใหม่เพื่อให้สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโนดจริง ๆ เพราะเห็นว่าการใช้เฉพาะข้อมูลจากระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด หรือ ระดับความจุแบตเตอรี่ต่ออัตราการเสียพลังงานเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสะท้อนให้เห็นถึงอายุการใช้งานได้อย่างแม่นยำ โดยค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่นำเสนอจะขึ้นอยู่กับระดับความจุแบตเตอรี่ ปริมาณโหลดในบัฟเฟอร์และพลังงานที่โนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่ร้องขอมาของโนดต้นทาง

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols)

เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในโครงข่ายและระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดต่างก็ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายเพียงแต่มีความมากน้อยต่างกัน สาเหตุนี้จึงเป็นแรงจูงใจให้โพรโทคอลแบบผสมได้พยายามออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้บรรลุเป้าหมาย ทั้ง การใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด (โดยพยายามรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโนด) พร้อมกัน ณ เวลาเดียวกัน โดยนำปัจจัยทั้งการใช้พลังงาน (Energy aware routing protocols) และอายุการใช้งานของโนด (Battery aware routing protocols) มาเป็นปัจจัยในการเลือกเส้นทางที่เหมาะสม

ในบทความอ้างอิง [15, 19] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) และเงื่อนไขขึ้นมาเพื่อให้โนดใช้ในการตัดสินใจว่า ณ ขณะเวลาดังกล่าวควรจะใช้วิธีการแบบใดระหว่าง การใช้พลังงานต่ำที่สุด (Energy Aware Routing Protocols) หรือยืดอายุการใช้งานมากที่สุด (Battery Aware Routing Protocols) เพื่อส่งผลให้ให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากที่สุด ณ ขณะนั้น แต่ข้อเสียหลักคือ สมรรถนะของโครงข่ายขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้เพราะโครงข่ายที่มีสภาพการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะยากในการกำหนดค่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนให้เหมาะสมและทันต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลทั้งสองไม่สามารถบรรลุเป้าหมายทั้ง การใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโนดให้นานที่สุดพร้อมกันดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

จากปัญหาข้างต้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดหรือแบบผสม (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) โดยจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย *Proposed-Hybrid* โดยการนำโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด (Proposed-Energy) และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery) ที่ได้นำเสนอข้างต้นมาทำการปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้

และสามารถบรรลุเป้าหมายทั้งการใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโนดให้นานที่สุดได้พร้อมกัน

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอตสอกตามแบบเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุด โดยแบบแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดซึ่งมีเป้าหมายในลดการใช้พลังงานของโครงข่ายเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น โดยนำพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากทั้งการส่ง การรับ และการได้ยินจากแบบจำลองการใช้พลังงานของโนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนของเส้นทาง

แบบที่สองเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดซึ่งจัดว่าอยู่ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดซึ่งมีเป้าหมายเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายโดยรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโนด ซึ่งวิธีการที่นำเสนอกำหนดวิธีการคำนวณอายุการใช้งานของโนดขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความแม่นยำในการประมาณแทนที่จะใช้เฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่โนดจะต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัฟเฟอร์ (Buffer) นอกจากนั้นยังรวมถึงพลังงานที่โนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่โนดต้นทางร้องขอมา และได้เพิ่มฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay function) เข้าไปในกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดเพื่อช่วยทำให้เส้นทางที่ได้ประกอบไปด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่อยู่ในระดับสูง

แบบที่สามเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมซึ่งมีเป้าหมายเพื่อให้บรรลุทั้ง การใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด และรักษาสมดุลการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโนด พร้อมกันเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้เพิ่มขึ้น โดยจะนำเอาโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่นำเสนอมาข้างต้นมารวมเข้าด้วยกัน

ในขั้นตอนการจำลองจะใช้โปรแกรม Network Simulator (NS) แต่ได้ดัดแปลงโปรแกรมบางส่วนเพื่อให้ทำงานในสถานะเสมือนจริงมากขึ้นและให้เหมาะกับเงื่อนไขที่จะต้องใช้ในการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบต่าง ๆ โดยส่วนที่ได้ทำการแก้ไขคือแบบจำลองการใช้พลังงาน (Energy consumption model) และแบบจำลองความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Link error rate model) โดยจะทำการทดสอบโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลที่

อยู่ในกลุ่มเดียวกันภายใต้เงื่อนไขของโครงข่ายแบบต่าง ๆ เช่น ความเร็วของโหนด จำนวนโหนดในโครงข่าย และอัตราการส่งข้อมูล

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

1. นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอคฮอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย
2. เปรียบเทียบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งสามแบบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่เคยถูกนำเสนอไว้ในประเภทเดียวกัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ ประเภทแรกคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่ง (Energy or Transmission Power-Aware routing protocols) ส่วนประเภทที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware routing protocols) และประเภทสุดท้ายคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware routing protocols)

1.4 ขอบเขต และเป้าหมายของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในชั้นเครือข่ายสำหรับโครงข่ายแอคฮอกเพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยพิจารณาทั้งค่าระดับความจุแบตเตอรี่ (Battery Capacity) ของแต่ละโหนดและพลังงานที่ใช้สำหรับการส่งแพ็กเก็ตอย่างน่าเชื่อถือ (Reliable Transmission Energy) รวมถึงพลังงานที่ใช้ในการรับและการได้ยิน ภายใต้แบบจำลองการใช้พลังงานที่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราการเกิดความผิดพลาดแพ็กเก็ต (Packet Error Rate) บนข่ายเชื่อมโยงมาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาเส้นทางเพื่อให้โหนดในโครงข่ายสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้นานขึ้น และโครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยไม่พิจารณาพลังงานในส่วนของโอเวอร์เฮด (Overhead) ในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวการ (Medium Access Control)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอจะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าโหนดต้นทางจะต้องทราบจำนวนแพ็กเก็ตที่ต้องการสื่อสารกับโหนดปลายทางเพื่อให้โหนดอื่น ๆ ในโครงข่ายได้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการสื่อสารในระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางและโหนดในโครงข่ายทุกโหนดใช้กำลังส่งที่คงที่และเท่ากันทั้งโครงข่าย โดยตัววัดที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในกลุ่มเดียวกันมีทั้งตัววัดที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอย่างเช่น อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network

lifetime) อายุการใช้งานเฉลี่ยของโหนดทั้งโครงข่าย (Average all node lifetime) พลังงานที่ใช้ต่อแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จ (Energy per good-put) และตัววัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานอย่างเช่น อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Packet delivery ratio) การประวิงเวลา (Delay) ความยาวของเส้นทาง (Path length)

1.5 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอกที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้
2. ศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่าง ๆ ของโครงข่ายที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานทั้งของโครงข่ายและโหนด (ในเชิงของการใช้แบตเตอรี่) อีกทั้งในส่วนของพลังงานที่ใช้สำหรับการสื่อสาร
3. ออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งสามแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายดังนี้ แบบแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดเพื่อทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนโพรโทคอลแบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายนานที่สุดซึ่งจัดอยู่ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นโดยการรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของโหนดในโครงข่าย และแบบสุดท้ายคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมเพื่อทำให้โครงข่ายสามารถบรรลุเป้าหมายทั้งการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย
4. ทำการจำลอง และทดสอบโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะโดยใช้โปรแกรม Network Simulator (NS)
5. วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานทั้งในเชิงของพลังงานและประสิทธิภาพทั่ว ๆ ไประหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่อยู่ในประเภทเดียวกัน
6. สรุป และรวบรวมข้อมูลทั้งหมดพร้อมทั้งจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของโครงข่ายแอตฮอก และความรู้ในการออกแบบ โพรโทคอลการจราจรเส้นทางของโครงข่ายแอตฮอกในรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะการออกแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย
2. ข้อดีข้อเสียของโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบ
3. นำผลการศึกษาที่ได้จากวิทยานิพนธ์ไปประยุกต์ใช้กับระบบการทำงานจริง และเป็นแนวทางในการวิจัยสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาการออกโพรโทคอลการจราจรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอตฮอกต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอค (Characteristic of Ad Hoc Networks)

โครงข่ายแอดฮอคมียืดหยุ่นแตกต่างจากโครงข่ายแบบมีสาย (Wire network) คือ โหนดในโครงข่ายมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ได้อย่างอิสระไม่ขึ้นกับโหนดอื่น ๆ อีกทั้งโหนดจะสื่อสารกันผ่านตัวกลางแบบไร้สาย โดยสัญญาณที่ผ่านตัวกลางไร้สายอาจจะถูกลดทอนเนื่องจากหลาย ๆ สาเหตุทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอคมักมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ โหนดในโครงข่ายยังมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางสำหรับการส่งข้อมูลได้ด้วยตัวเอง ทำให้โครงข่ายแอดฮอคมักไม่จำเป็นต้องอาศัยสถานีฐานเป็นตัวกลางเพื่อส่งสัญญาณควบคุมเหมือนกับระบบเซลลูลาร์ เพราะฉะนั้นโหนดทุกโหนดในโครงข่ายจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนกับอุปกรณ์หาเส้นทาง (Router) ซึ่งจะหาเส้นทางเคลื่อนที่ของแพ็กเก็ตข้อมูลและหน้าที่อย่างที่สองคือ การส่งต่อ (Forward) แพ็กเก็ตไปยังโหนดอื่น ๆ ในโครงข่าย จากคุณสมบัติและเงื่อนไขต่าง ๆ ทำให้สามารถสรุปคุณลักษณะที่สำคัญของโครงข่ายได้ดังนี้ [20]

- ทอพอโลยีแบบพลวัต (Dynamic Topology)

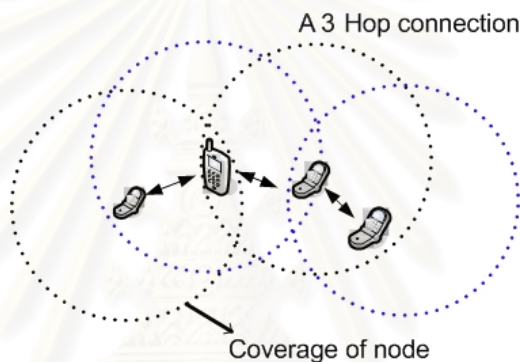
การที่โหนดในโครงข่ายแอดฮอคแต่ละโหนดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระ และจากเงื่อนไขการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุผ่านตัวกลางไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่ตลอดเวลาทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอคมักมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Random) หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรวดเร็วไม่สามารถที่จะทำนายล่วงหน้าได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่นับว่าท้าทายต่อการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

- เงื่อนไขบังคับทางแบนด์วิดท์ (Bandwidth-Constraints)

โหนดในโครงข่ายแอดฮอคมักจะสื่อสารกันผ่านข่ายเชื่อมโยงไร้สาย ซึ่งข่ายเชื่อมโยงไร้สายจะมีความจุที่ต่ำกว่าข่ายเชื่อมโยงแบบใช้สายเนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกันเช่น ผลกระทบของการเข้าถึงหลายทาง (Multiple access) มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath fading) สัญญาณรบกวน (Noise) และสัญญาณแทรกสอด (Signal interference) เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ อาจส่งผลทำให้ข่ายเชื่อมโยงไร้สายลดประสิทธิภาพอยู่ตลอดเวลาและยังส่งผลต่อปริมาณงาน (Throughput) ของระบบโดยรวมอีกด้วย

- การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-Hop Communication)

จากคุณลักษณะการแพร่กระจายสัญญาณของเครื่องรับส่งแบบไร้สายที่มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางในการส่งและความแรงของสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับระยะทาง ทำให้โหนดจะสามารถสื่อสารกันได้โดยตรงถ้าโหนดที่ต้องการสื่อสารอยู่ในช่วงระยะการส่งของกันและกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้าโหนดที่ต้องการสื่อสารอยู่ห่างกันออกไปไกล การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโหนดอื่นเป็นตัวกลางเพื่อจะส่งข้อมูลต่อไปถึงยังโหนดปลายทาง โดยกำหนดให้การสื่อสารระหว่างตัวส่งและตัวรับคู่หนึ่ง ๆ เรียกว่า การสื่อสารแบบหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ (Hop) และการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางที่มากกว่าหนึ่งช่วงเชื่อมต่อจะเรียกว่า การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-Hop Communication) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ

- เงื่อนไขบังคับด้านพลังงานของแบตเตอรี่ของโหนดเคลื่อนที่ (Energy-Constraints)

โหนดสามารถปฏิบัติงานได้โดยการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และเนื่องจากการทำงานของโหนดภายใต้โครงข่ายแอ็ดฮอกที่โหนดจะต้องช่วยกันปฏิบัติงาน ดังนั้นถ้าระดับพลังงานของโหนด (แบตเตอรี่) เหล่านี้ถูกใช้งานจนหมด มันไม่เพียงส่งผลกระทบต่อการทำงานของโหนดนั้นเพียงอย่างเดียวแต่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของโครงข่าย เพราะฉะนั้นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางภายใต้ข้อจำกัดพลังงานคือ การทำให้โหนดหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานประหยัดพลังงานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

อย่างไรก็ตามยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบแต่จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่นักวิจัยได้ให้ความสนใจและนำไปสู่การออกแบบการทำงานด้านต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการจัดสรรเส้นทาง ความสามารถในการหาตำแหน่งของโหนดปลายทาง และการใช้อุปกรณ์ที่สามารถให้พลังงานด้านแบตเตอรี่ได้นาน เป็นต้น แต่การออกแบบ

และเปรียบเทียบประสิทธิภาพส่วนต่าง ๆ ควรที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงตัวอย่างเช่น การส่งผ่านสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สาย คุณลักษณะของช่องสัญญาณ และรูปแบบการใช้พลังงานเป็นต้น ซึ่งควรใช้แบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมาพิจารณา ต่อไปในหัวข้อที่ 2.2 จะอธิบายแบบจำลองการส่งผ่านคลื่นสัญญาณและการลดทอนของสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สายที่ได้รับความนิยมเชื่อถือในการนำมาใช้ทั้งในทางปฏิบัติและการจำลองการทำงาน

2.2 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สาย

การส่งผ่านสัญญาณจากตัวส่งไปยังตัวรับสัญญาณผู้ส่งมีความคาดหวังว่าสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับมีกำลังของสัญญาณที่แรง เพราะนั่นหมายถึงว่าข้อมูลที่ส่งออกไปนั้นมีความถูกต้องหรือไม่ โดยถ้าตัวรับได้รับสัญญาณที่มีความแรงสูงโอกาสที่ตัวรับจะได้รับข้อมูลอย่างถูกต้องนั้นก็สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามความแรงของสัญญาณ ณ ตัวรับขึ้นอยู่กับตัวกลางที่ใช้เป็นหลัก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวกลางไร้สายซึ่งเป็นตัวกลางที่มีหลาย ๆ ปัจจัยส่งผลกระทบต่อสัญญาณมากกว่าตัวกลางแบบอื่น ๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท [21, 35] คือ การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss): เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ การลดทอนแบบที่สองคือ ซาโดว์อิง (Shadowing): เกิดจากสัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสิ่งแวดล้อมรอบข้างและแบบสุดท้ายคือ มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath fading): เป็นการลดทอนที่เกิดจากสายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้พื้นผิวมากเกินไป เพื่อลดความซับซ้อนในการพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาผลกระทบของซาโดว์อิงและมัลติพาทเฟดดิ้ง โดยจะจำลองเฉพาะการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียเชิงวิถีเท่านั้น ซึ่งก็มีหลายบทความที่พยายามสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสูญเสียเชิงวิถีเพื่อให้เป็นไปตามความเป็นจริงซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป

2.2.1 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)

ในระบบการสื่อสารไร้สายกำลังส่งที่ต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตจากตัวส่งไปยังตัวรับแทนด้วย P_t โดยความแรงของสัญญาณ ณ ตัวรับ (P_r) สามารถจำลองได้ด้วยสมการ $1/d^\alpha$ เมื่อ d เป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับสัญญาณ และ α เป็นค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss coefficient) จากแบบจำลองดังกล่าวหมายความว่า กำลังของสัญญาณที่รับได้ ณ ตัวรับจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางที่ทำการพิจารณาสัญญาณนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งมีหลายแบบจำลองถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

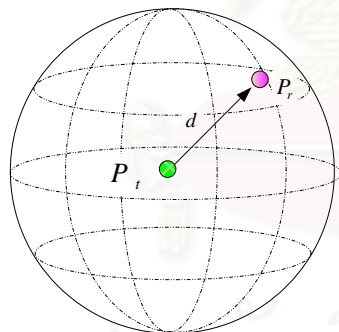
จะพิจารณาการส่งคลื่นสัญญาณผ่านอวกาศว่าง (Free space propagation) และการสะท้อนกับผิวเรียบ (Plane propagation)

- การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศ (Free Space path loss)

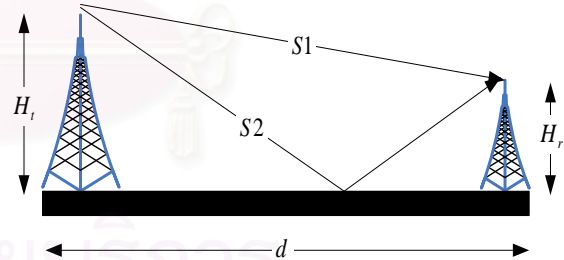
กำหนดให้ตัวส่งทำการส่งสัญญาณแบบทุกทิศทุกทางผ่านตัวกลางที่เป็นอวกาศว่าง เมื่อเราใช้เครื่องรับไปรับสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามที่แสดงดังรูปที่ 2.2(ก) ก็จะสามารถคำนวณหาขนาดหรือความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.1) ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า “Friis transmission equation”

$$P_r = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times d^2} \tag{2.1}$$

โดยที่ G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง, G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ, λ คือ ความยาวคลื่น, h_t คือ ความสูงของสายอากาศส่ง, h_r คือ ความสูงของสายอากาศรับและค่า α เป็นค่าการสูญเสียเชิงวิถีมีค่าแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณถูกส่งผ่าน โดยในกรณีที่ค่า $\alpha = 2$ จะเหมาะสำหรับระยะทางสั้น ๆ (น้อยกว่า 100 เมตร) และ d คือ ระยะระหว่างตัวรับและตัวส่ง (เมตร)



(ก) การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง



(ข) การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ

รูปที่ 2.2 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ

- การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plan path loss)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของการส่งสัญญาณเนื่องจากการกระทบกับพื้นผิวเรียบ ทั้งนี้สมมติให้การส่งสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวเรียบไม่มีสิ่งก่อสร้างใด ๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วนแสดงดังรูปที่

2.2(ข) คือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรงจากรูปแทนด้วย $S1$ และส่วนที่กระทบจากพื้นผิวแล้วมาถึงตัวรับแทนด้วย $S2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีความแตกต่างจากการณีของการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่างตรงที่สัญญาณที่ได้รับมีเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณซึ่งจะทำให้ขนาดของสัญญาณที่ได้อีกจะเปลี่ยนแปลงไป โดยกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับสามารถแสดงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2.2)

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left(\frac{H_t \times H_r}{d^2} \right)^2 \quad (2.2)$$

โดยที่ H_t คือ ความสูงของสายอากาศส่ง (เมตร) และค่า H_r คือ ความสูงของสายอากาศรับ สิ่งที่แตกต่างกันจากการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่างคือ อัตราการลดทอนของสัญญาณมากกว่าและขนาดความสูงของสายอากาศมีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียเชิงวิถี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้การส่งผ่านคลื่นสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สายที่พิจารณาถึงผลกระทบของทั้ง 2 แบบ โดยกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อนำมาใช้พิจารณาว่า ณ ระยะเวลาสมควรจะใช้แบบจำลองใดเนื่องจากถ้าระยะระหว่างโนดสองโนดอยู่ห่างกันมากนั้น การนำแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศ (สมการที่ (2.2)) มาใช้ในการพิจารณานั้นจะไม่เหมาะสมและค่าที่ได้ไม่แน่นอน โดยค่าขีดเริ่มเปลี่ยนนี้เราเรียกว่า cross-over distance แทนด้วย d_c ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.3)

$$d_c = \frac{4\pi \times H_t \times H_r}{\lambda} \quad (2.3)$$

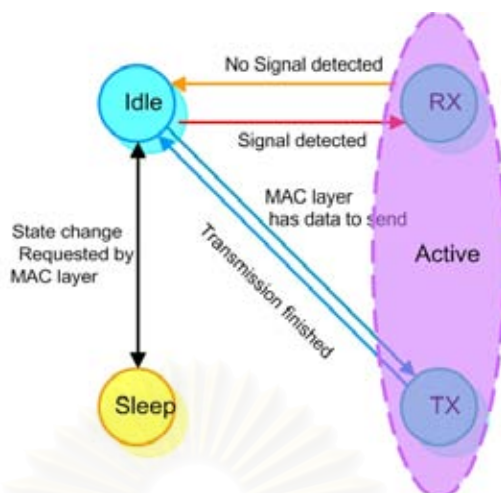
โดยกำหนดว่าถ้าระยะระหว่างตัวส่งและตัวรับ d มากกว่าค่า d_c จะใช้สมการที่ (2.2) (การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ) แต่ถ้าระยะห่าง d มีค่าน้อยกว่า d_c ก็จะใช้สมการที่ (2.1) (การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง) เพื่อใช้คำนวณหาลำกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ ตัวรับ อย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำ ณ สถานการณ์ต่าง ๆ อีกมากเช่นแบบจำลองการสูญเสียกำลังของ Okumura และแบบจำลองซาโดวริง [21] เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้ก็มีความซับซ้อนในการพิจารณามากยิ่งขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้แก้ไขหรือเพิ่มสมรรถนะในส่วนนี้จึงพิจารณาเฉพาะรูปแบบที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก

2.3 แบบจำลองการใช้พลังงาน (Energy Consumption Model)

จากเงื่อนไขบังคับด้านการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโนดดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.1 ทำให้ประเด็นการอนุรักษ์พลังงานหรือการลดการใช้พลังงานสำหรับโครงข่ายแฮดฮอกได้รับความ

สนใจเพิ่มมากขึ้น โดยนักวิจัยได้ตั้งคำถามของปัญหาด้านพลังงานขึ้นว่า “เราจะทำอย่างไรเพื่อทำให้โนตมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด” สาเหตุที่นักวิจัยได้ตั้งคำถามลักษณะนี้เนื่องจากพลังงานจากแบตเตอรี่สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโนตโดยตรง ซึ่งแนวทางแก้ไขปัญหานี้แบบกว้าง ๆ สามารถทำได้ 2 แนวทางคือ การเพิ่มความจุของแบตเตอรี่เพื่อทำให้แบตเตอรี่สามารถใช้ได้นานและแบบที่สองคือ การลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไร้สาย แต่แนวทางที่สองได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพราะว่าเป็นวิธีที่ไม่ต้องลงทุนมาก โดยการแก้ไขปัญหาดังกล่าวตามแนวทางที่สองนั้นส่วนมากเป็นการออกแบบโปรโตคอลการทำงาน ณ แต่ละชั้นการสื่อสารของโนตเพื่อให้โนตมีการใช้พลังงานลดลงหรือใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก่อนที่เราจะกล่าวถึงวิธีการต่าง ๆ นั้นเราควรจะต้องศึกษาและรู้ถึงรูปแบบการใช้พลังงานของโนตจากแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย (Network Interface Card, NICs) ของอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย

พลังงานที่แบตเตอรี่ต้องสูญเสียไปส่วนมากแล้วสามารถแบ่งได้เป็นสามส่วน พลังงานที่ใช้ในการประมวลผลของหน่วยประมวลผล (Processor) ส่วนที่สองเป็นพลังงานเพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงให้อุปกรณ์นั้นสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นได้และแบบสุดท้ายเป็นพลังงานที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารข้อมูล ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานและกลวิธีในการจัดการพลังงานของแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย โดยปัจจุบันได้มีผู้ผลิตแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายขึ้นมาใช้งานมากมาย ซึ่งแต่ละผู้ผลิตก็จะมีข้อกำหนดรูปแบบการใช้พลังงานและกลวิธีในการจัดการพลังงานรวมถึงปริมาณของพลังงานที่ใช้แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้วเราสามารถแบ่งรูปแบบการใช้พลังงานตามโหมด (mode) การทำงานออกเป็น 4 โหมด [13, 14] คือ โหมดการส่ง (Transmit mode) โหมดการรับ (Receive mode) โหมดสถานะว่าง (Idle mode) และสุดท้ายเป็นโหมดสถานะหลับ (Sleep mode) โดยแต่ละโหมดก็จะมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ส่วนในโหมดสถานะปิด (Power-off mode) นั้นจะไม่มีการใช้พลังงานเลยนั้นหมายถึงเครื่องปิด ซึ่งจากการทำงานในแต่ละโหมดของชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC) ของแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายจะมีการทำงานที่เชื่อมโยงกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการทำงานในแต่ละโหมด โดยโหมดสถานะว่างจะเป็นตัวกลางคอยเชื่อมโยงกับโหมดอื่น ๆ



รูปที่ 2.3 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs

จากรูปที่ 2.3 เราสามารถอธิบายการทำงานในแต่ละโมดได้ดังนี้ เริ่มต้นที่โมดสถานะว่าง ซึ่งเป็นโมดที่โหนดสามารถที่จะทำการรับหรือส่งข้อมูลก็ได้ เมื่อโหนดมีข้อมูลจะส่งโหนดก็จะเปลี่ยนตัวเองจากสถานะว่างเป็นโมดการส่ง และเมื่อส่งข้อมูลดังกล่าวเสร็จก็จะกลับมาอยู่ในสถานะว่างเช่นเดิม แต่ถ้าขณะนั้นโหนดไม่มีข้อมูลจะส่งไปยังโหนดอื่นแต่ได้ยินหรือตรวจพบสัญญาณที่โหนดอื่นส่งมา โหนดก็จะเปลี่ยนสถานะตัวเองไปอยู่ในโมดการรับและจะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมภายหลังจากรับข้อมูลดังกล่าวเสร็จสิ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าโหนดหนึ่ง ๆ ไม่สามารถที่จะอยู่ในสถานะการทำงาน 2 โมดพร้อมกันในเวลาเดียวกันนั่นคือ ขณะที่โหนดหนึ่ง ๆ ทำการส่งข้อมูลอยู่นั้นตัวมันเองก็ไม่สามารถที่จะทำการรับข้อมูลจากโหนดอื่นได้ ส่วนโมดสถานะหลับเป็นโมดที่โหนดไม่สามารถจะทำการรับหรือส่งข้อมูลใดๆ ได้จนกว่าจะมีสัญญาณจากชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมากระตุ้น เพราะฉะนั้นแล้วถ้าพิจารณาถึงกำลังที่จะต้องใช้ในแต่ละโมด แน่นอนว่าพลังงานที่จะต้องใช้นั้นย่อมจะแตกต่างกันออกไปแต่ก็พอที่จะคาดการณ์ได้ว่า พลังงานที่ใช้ในโมดการส่งจะต้องมากกว่าพลังงานที่ใช้ในโมดการรับ ส่วนพลังงานที่ใช้ในโมดสถานะการหลับน่าจะใช้น้อยที่สุด นอกจากนั้นแล้วยังมีพลังงานที่จะต้องเสียในการเปลี่ยนแปลงสถานะ แต่พลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียในโมดอื่นและเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์หาแนวทางการลดการใช้พลังงาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะยกเว้นการพิจารณาพลังงานในส่วนนี้โดยกำหนดให้พลังงานที่เสียในการเปลี่ยนแปลงสถานะมีค่าเป็นศูนย์ โดยค่าต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับกรอบการออกแบบอุปกรณ์ของผู้ผลิตแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายแต่ละราย ซึ่งในตารางที่ 2.1 แสดงค่ากำลังงานที่ใช้ในแต่ละโมดการทำงานของบางอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่ได้รับความนิยมของผู้ผลิตแต่ละราย โดยทุกตัวใช้มาตรฐานในการออกแบบการทำงานเดียวกันคือ ใช้มาตรฐาน IEEE802.11

ตารางที่ 2.1 กำลังที่ใช้ในแต่ละโหมดการทำงานของอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานเครือข่าย

NICs	Transmit(watt)	Receive(watt)	Idle(watt)	Sleep(watt)	Mbps
Aironet PC4800 [31]	1.4 – 1.9 w	1.3 – 1.4 w	1.34 w	0.075 w	11
Lucent Bronze [13]	1.3 w	0.97 w	0.84 w	0.066 w	2
Lucent Silver [13]	1.3 w	0.90 w	0.74 w	0.048 w	11
Cabletron Roamabout	1.4 w	1.00 w	0.83 w	0.130 w	2
Lucent WaveLAN [33]	1.82 w	1.80 w	0.18 w	-	2
ORINOCO 11b [26]	1.425 w	0.925 w	0.045 w	-	11

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เราสามารถคำนวณการใช้พลังงานในแต่ละโหมดการทำงานซึ่งได้ด้วยสมการที่ (2.4) ซึ่งพลังงานที่โนดใช้ในแต่ละครั้งนั้นขึ้นอยู่กับ กำลังที่ใช้ในแต่ละโหมดสถานะการทำงานและเวลาที่ใช้ในการทำงานในโหมดนั้น ๆ

$$E_s = P_s \times T_s \quad (2.4)$$

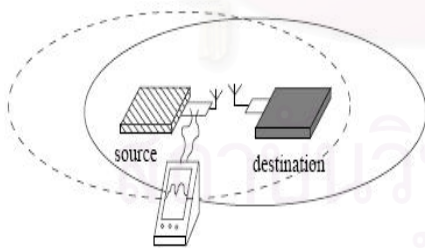
โดยที่ E_s พลังงานที่โนดจะต้องเสียเมื่อทำงานอยู่ในโหมดสถานะ s (จูล)

P_s เป็นค่ากำลังงานที่โนดจะต้องเสียเมื่อทำงานอยู่ในโหมดสถานะ s หน่วยเป็นวัตต์ (กำลังนี้สามารถคำนวณได้จากสูตร $P=V \times I$ หรือ กำลังที่สูญเสียเท่ากับ ความต่างศักย์ \times กระแส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าทั้งสองสามารถหาได้จากข้อมูลจำเพาะที่ผู้ผลิตให้มาพร้อมกับอุปกรณ์หรือบางครั้งอาจจะกำหนดค่ากำลังที่สูญเสียมาให้ อย่างเช่นที่แสดงในตารางที่ 2.1)

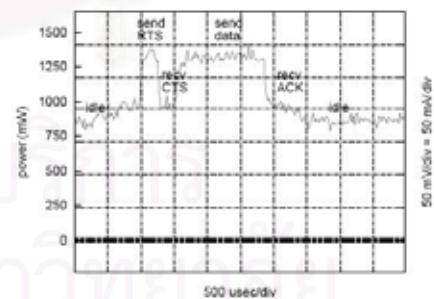
T_s เป็นเวลาที่ใช้ในการทำงาน ณ โหมดสถานะ s มีหน่วยเป็นวินาที (เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแพ็กเก็ตที่ประมวลผลและอัตราการส่งแพ็กเก็ตของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถหาได้จาก $T = \text{Packet Size} / \text{Transmission Rate}$)

s เป็นโหมดสถานะการทำงานทั้ง 4 โหมดเช่น โหมดการรับ โหมดการส่ง โหมดสถานะว่าง และโหมดสถานะหลับ

อย่างไรก็ตามในบทความ [13, 22, 23] ได้ทำการทดลองวัดค่าพลังงานที่สูญเสียโดยตรงจากแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายเมื่อทำงานอยู่ในโหมดแอดฮอค (Ad hoc mode) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานเช่น ขนาดของแพ็กเก็ต อัตราการส่งข้อมูล และกำลังส่งของโนดเป็นต้น ใน [12] Feeney และ Nilson ได้แสดงรายละเอียดของการใช้พลังงานของอุปกรณ์ “Lucent WaveLAN 802.11 PCMCIA (Silver and Broze)” ภายใต้การทำงานของอุปกรณ์ในโหมดต่าง ๆ (Tx, Rx, IDLE และ SLEEP) นอกจากนั้นการพิจารณาการสูญเสียพลังงานในโหมดต่าง ๆ ของแต่ละโนดแล้วในบทความนี้ได้มองถึงพลังงานที่สูญเสียเมื่อแต่ละโนดมีการทำงานเป็นระบบมากขึ้น โดยการที่จะพิจารณาว่าโนดอยู่ในโหมดสถานะใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของทราฟฟิกที่ใช้ในการสื่อสาร และได้พยายามสร้างรูปแบบการสูญเสียพลังงานขึ้นมาโดยได้เสนอเป็นรูปแบบสมการเชิงเส้น $E = m \times size + b$ เมื่อ E คือ ค่าต้นทุนสำหรับปฏิบัติงานในแต่ละโหมด $size$ คือขนาดของแพ็กเก็ตที่ใช้ในการสื่อสารและ m, b คือ ค่าต้นทุนส่วนเพิ่มและค่าต้นทุนคงที่สำหรับปฏิบัติงานในแต่ละโหมดตามลำดับ จากสมการข้างต้นเราสามารถที่จะพิจารณาแยกย่อยได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นค่าต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงได้ (Variable Cost) ซึ่งเป็นส่วนที่แปรผันตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารและส่วนที่สองเป็นส่วนต้นทุนคงที่ (b) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่แต่ละโนดจะต้องใช้แน่นอนเมื่อมีการส่งหรือรับข้อมูล ในบทความนี้ได้กำหนดให้พลังงานที่ใช้ในส่วนต้นทุนคงที่เป็นพลังงานที่ใช้การรับส่งแพ็กเก็ตในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Request To Send (RTS), Clear To Send (CTS) และ Acknowledgment (ACK)) จากรูปที่ 2.4 ที่แสดงด้านล่างเป็นส่วนหนึ่งของวิธีการวัดและผลที่ได้จากการวัดในบทความ [12]



(ก) รูปแบบการวัดพลังงานจากการส่งข้อมูล



(ข) พลังงานที่สูญเสียในโหมดต่าง ๆ

รูปที่ 2.4 การส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast (UDP/IP) ขนาด 256 ไบต์ ด้วยความเร็ว 2 Mbps (วัดที่ตัวส่ง)

แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายหลายอันที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่ง (สามารถปรับเปลี่ยนระยะการส่งข้อมูลได้ (Variable Transmission Range)) โดยการส่งข้อมูลไป

ยังโนดที่อยู่ในระยะไกล ๆ นั้นย่อมจะต้องใช้กำลังส่งที่สูงตามไปด้วยเพื่อให้โนดปลายทางที่ได้รับข้อมูลอย่างถูกต้อง ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่มีความสามารถนี้เช่น Aironet PC4800 PCMCIA ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนกำลังส่งได้ 4 ระดับ 1 mW 5 mW 20 mW และ 50 mW ซึ่งกำลังส่งแต่ละระดับนั้นก็จะสูญเสียพลังงานที่แตกต่างกันออกไป โดยการส่งด้วยกำลังสูง ๆ แน่นอนว่าจะต้องสูญเสียพลังงานมากกว่าการส่งกำลังน้อย ๆ เพราะต้องใช้พลังงานเพื่อใช้ในการขยายสัญญาณให้มีความแรงขึ้น ในบทความ [23] ได้ทำการทดสอบการสูญเสียพลังงานของการัดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงกำลังส่งจาก 1 mW ไปเป็น 50 mW และพบว่าการสูญเสียพลังงานในการส่งเพิ่มขึ้น 500 mW ต่อมาในบทความ [24] ได้กำหนดให้พลังงานที่สูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะการส่งของโนดตามสมการ $E_{send} = t_{send} \times \alpha r^2$ เมื่อ E_{send} คือการใช้พลังงานสำหรับการส่งข้อมูล t_{send} เป็นเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล α เป็นค่าคงที่ในการส่งมุล (จูล/วินาที.เมตร²) และ r เป็นระยะการส่งข้อมูล จากจุดนี้เราก็จะเห็นได้ว่าการใช้กำลังส่งต่ำนอกจากจะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้แล้วยังสามารถช่วยลดการรบกวนกันของสัญญาณ ซึ่งนี่ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในหลายวิธีที่สามารถช่วยแก้ปัญหาในการยืดอายุการใช้งานของโนด

อย่างไรก็ตามก็ยังมีแผนวงจรต่อประสานโครงข่าย (Network Interface Card, NIC) ของผู้ผลิตอีกหลาย ๆ รายที่ไม่ได้รองรับการเปลี่ยนแปลงกำลังส่ง (กำหนดให้มีกำลังส่งคงที่) หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าโนดมีระยะการส่งคง (Fixed Transmission Range) ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการการใช้พลังงานในบทความ [24] ก็จะทำให้ค่าในสมการ αr^2 มีค่าคงที่ซึ่งก็จะคล้ายกับรูปแบบการสูญเสียพลังงานที่แสดงในสมการที่ (2.4) อย่างไรก็ตามค่ากำลังที่สูญเสียของโนดในการทำงานในแต่ละโมดนั้นก็จะมีความที่แตกต่างกันออกตามทีแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

เมื่อไม่นานมานี้ มีนักวิจัยหลายท่าน ได้คิดค้นวิธีต่าง ๆ ออกมามากมาย เพื่อปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายแอคฮอกให้มีคุณภาพด้านต่าง ๆ มากขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาการลดพลังงานที่จะต้องใช้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในแต่ละโนดให้ใช้งานได้ยาวนานที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปการออกแบบเพื่อที่จะใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะมีการออกแบบตั้งแต่ชั้นการสื่อสารกายภาพ (Physical layer) ไปจนถึงชั้นสื่อสารประยุกต์ (Application layer) โดยแต่ละชั้นของการสื่อสารจะมีวิธีในการพัฒนาในส่วนของการรักษาพลังงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละชั้นของการสื่อสาร แต่โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งวิธีการลดการใช้พลังงานของโครงข่ายแอคฮอกออกเป็น 3 แบบคือ การควบคุมกำลัง (Power control) แบบที่สองคือ การจัดการกำลัง (Power management) และในแบบของการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power aware routing)

การควบคุมกำลัง (Power Control) เป็นวิธีที่พยายามควบคุมหรือปรับเปลี่ยนกำลังส่งเพื่อช่วยลดการใช้พลังงาน ซึ่งข้อดีของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งนั้นจะช่วยต่ออายุของแบตเตอรี่ในแต่ละโหนดให้นานยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มแบนด์วิดท์และลดขอบเขตของการทับซ้อนกัน แต่ในอีกมุมหนึ่งนั้น มองเห็นว่าการควบคุมพลังงานการส่งจะทำความน่าเชื่อถือที่ลดลง มีอัตราผิดพลาดของบิตเพิ่มขึ้น (Error Bit Rate, EBR) และยังรวมถึงปัญหาการเชื่อมต่อแบบสองทิศทาง (Bidirectional) เพราะว่าแต่ละโหนดจะมีระยะเวลาการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 จากรูปที่ 2.5 (ข) เป็นภาพที่แสดงปัญหาดังกล่าวโดยที่โหนด A สามารถที่ติดต่อสื่อสารกับโหนด B ได้ แต่ในทางตรงข้ามโหนด B ไม่สามารถติดต่อสื่อสาร ซึ่งในกรณีนี้จะทำโหนด A เข้าใจว่าโหนด B ไม่ได้รับข้อมูลเพราะว่าเมื่อโหนด B ได้รับข้อมูลจากโหนด A แล้วแต่ไม่สามารถที่จะส่งแพ็กเก็ตตอบรับไปบอกโหนด A ได้ว่าได้รับข้อมูลอย่างถูกต้อง



(ก) การสื่อสารแบบสองทิศทาง

(ข) การสื่อสารแบบทิศทางเดียว

รูปที่ 2.5 การสื่อสารของโหนดเมื่อมีระยะเวลาการส่งที่เท่ากัน (2.5-ก)และไม่เท่ากัน (2.5-ข)

ในวิธีการแบบ การจัดการกำลังส่ง (Power Management) เป็นแนวทางที่โหนดจะต้องกำหนดเวลาให้เหมาะสมสำหรับการทำงานในแต่ละโหมดเพื่อทำให้การทำงานในแต่ละโหมดมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น ใน [25] เสนอระเบียบวิธี Basic Energy-Conserving Algorithm (BECA) ได้ทำการกำหนดให้โหนดประกอบไปด้วย 3 โหมด คือ โหมดการหลับ (Sleep mode) โหมดการฟัง (Listen mode) และโหมดแอ็กทีฟ (Active mode) โดยกำหนดเวลาและเงื่อนไขที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจากโหมดหนึ่งไปยังอีกโหมดหนึ่ง ผลที่ได้แสดงว่าสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 35 ในกรณีมีทราฟฟิกสูง ๆ นอกจากนั้น [25] ยังเสนอระเบียบวิธี Adaptive Fidelity Energy-Conserving Algorithm (AFECA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานจากระเบียบวิธีแบบ BECA โดยกำหนดช่วงเวลาที่โหนดจะอยู่ในโหมดการหลับให้ขึ้นอยู่กับจำนวนของโหนดข้างเคียงซึ่งมีหลักการว่า เมื่อโหนดมีจำนวนโหนดข้างเคียงมากโหนดดังกล่าวนั้นควรจะอยู่ในโหมดการหลับที่นานขึ้น และผลที่ได้ทำให้สามารถช่วยประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 5-10 และยังมีอีกหลายบทความที่สนใจในการแก้ปัญหานี้แต่จะแตกต่างกันที่วิธีใน

การกำหนดโมดการทำงานและระยะเวลาในการทำงาน เนื่องจากการแก้ปัญหาของแนวทางนี้ยังขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานเพราะบางแผนวงจรต่อประสานโคจรข่ายไม่รองรับการทำงานในบางโมด ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ยึดเอาแนวทางนี้มาช่วยแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าการกำหนดให้โนดสามารถอยู่ในโมดการหลับได้นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานของโครงข่ายแบบแอคฮอก เพราะการกำหนดให้โนดอยู่ในโมดการทำงานดังกล่าวโนดไม่สามารถที่จะทำการอะไรได้เลยก็เหมือนกับโนดหมดอายุการใช้งานไป ชะงักและยังยากที่จะกำหนดว่าช่วงเวลาใดโนดควรจะตื่นจากการอยู่ในโมดการหลับและควรอยู่ในโมดนั้นนานเท่าไรจึงจะไม่ไปลดประสิทธิภาพด้านอื่น ๆ ของโครงข่าย

การจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power-aware routing) เป็นวิธีที่ผู้เขียนเห็นว่าเป็นแนวทางที่ไม่มีความซับซ้อนในการแก้ปัญหาและไม่ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของแผนวงจรต่อประสานโคจรข่าย ที่จะนำมาใช้พิจารณา นอกจากนั้นยังเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลังเป็นวิธีที่ออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในชั้นเครือข่าย โดยนำเอาการใช้พลังงานของโนดหรืออายุการใช้งานของโนดและปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกำลังงานมาเป็นเงื่อนไขในการเลือกเส้นทางที่จะใช้งาน เพื่อให้โนดสามารถใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ประกอบด้วยโนดที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่ที่ต่ำ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ก็จัดว่าอยู่ในหมวดการแก้ปัญหา โดยได้เสนอการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของโนดและโครงข่ายซึ่งรายละเอียดจะกล่าวอีกครั้งในบทที่ 3

จากรูปแบบการใช้พลังงานที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เห็นข้อดีและข้อเสียของวิธีต่าง ๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดแบบจำลองการใช้พลังงานขึ้นมาใหม่เพื่อให้ประสิทธิภาพและเหมาะสมกับความเป็นจริง รวมไปถึงข้อกำหนดและค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยทั้งหมดนี้จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.1

2.3.1 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้โนดทุกโนดในโครงข่ายมีกำลังส่งคงที่และเท่ากันทั้งหมดนั้นก็หมายความว่ารวมไปถึงระยะเวลาการส่งแต่ละโนดก็คงที่ด้วยเช่นกัน ดังนั้นพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียในการส่งก็จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลเท่านั้น (ตามสมการที่ 2.4) อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงแบ่งโมดการทำงานออกเป็น 4 โมดเหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.3 แต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของโมดการรับ (กล่าวในย่อหน้าถัดไป) นอกจากนั้นการจะพิจารณาว่าโนดทำงานอยู่ในโมดใดนั้นจะพิจารณาจากลักษณะกราฟฟิคที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกัน ณ

ขณะนั้น ลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายแบบแอดฮอคสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ทราฟฟิกแบบแพร่กระจาย (Broadcast Traffic) ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point to Point Traffic or Unicast) และสุดท้ายเป็นทราฟฟิกแบบได้ยิน (Overhearing Traffic) [12]

- ทราฟฟิกแบบแพร่กระจาย (Broadcast Traffic)

เมื่อโหนดตัวส่งทำการส่งแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายออกไป โหนดที่อยู่ในระยะการส่งทุกโหนดจะต้องทำการรับแพ็กเก็ตดังกล่าวเพื่อนำไปประมวล เนื่องจากแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายเป็นแพ็กเก็ตที่ไม่ได้ระบุถึงที่อยู่ของผู้รับเอาไว้ ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนโหมดการทำงานในกรณีก็จะเป็นอย่างที่ตรงไปตรงมาคือ โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ตก็จะต้องเปลี่ยนตัวเองจากที่อยู่ในโหมดสถานะว่างไปเป็นโหมดการส่งเมื่อมีแพ็กเก็ตที่จะต้องส่ง ส่วนโหนดทุกโหนดที่อยู่ในระยะการส่งก็จะต้องเปลี่ยนสถานะมาทำงานในโหมดการรับ โดยพลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสียทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)



(ก) ทราฟฟิกแบบ Unicast

(ข) ทราฟฟิกแบบ Overhear

รูปที่ 2.6 การติดต่อสื่อสารโดยใช้ทราฟฟิกแบบต่าง ๆ

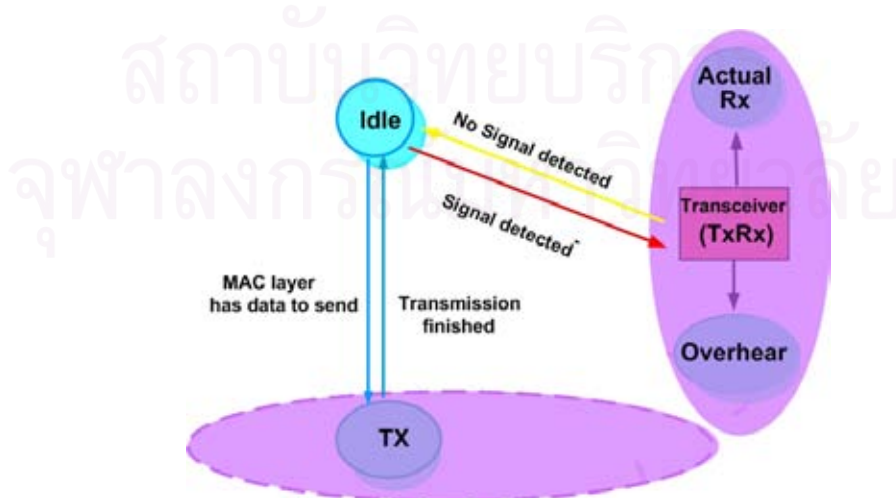
- ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point to Point Traffic or Unicast)

การติดต่อสื่อสารที่ใช้ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุดหรือ Unicast นั้นภายในส่วนหัวของแพ็กเก็ตได้กำหนดที่อยู่ของผู้ที่รับแพ็กเก็ตนี้ไว้อย่างชัดเจน ถ้าพิจารณาการสื่อสารในรูปที่ 2.6 (ก) เมื่อโหนด A ทำการส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast โดยระบุว่าส่งไปหาโหนด B โหนด A ก็จะเปลี่ยนมาทำงานในโหมดการส่งและภายหลังจากที่โหนด B ตรวจจับสัญญาณจากการส่งแพ็กเก็ตของโหนด A โหนด B ก็จะทำการตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตเป็นแบบแพร่กระจายหรือแบบ Unicast ถ้าเป็นแบบแพร่กระจายก็จะดำเนินการเหมือนที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ถ้าเป็นกรณีหลังโหนด B ก็จะต้องทำการตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตดังกล่าวนั้นส่งมาหาตัวเองหรือไม่ ซึ่งในกรณีนี้คือส่งมาหาโหนด B ดังนั้นโหนด B ก็จะอยู่ในโหมดการรับเพื่อรับแพ็กเก็ตนั้นไปประมวลผลอย่างอื่นต่อไป

- ทราฟฟิกแบบได้ยิน (Overhearing Traffic)

ในกรณีการสื่อสารด้วยทราฟฟิกแบบ Unicast ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะกำหนดให้ในการสื่อสารมีเฉพาะโหนดที่ส่งและโหนดที่รับข้อมูลอย่างทีแสดงในรูปที่ 2.6(ก) แต่มีหลายกรณีที่มีโหนดอื่น ๆ อยู่ในระยะเวลาการส่งของโหนดที่กำลังส่งหรือรับแพ็กเก็ตที่มีการสื่อสารแบบ Unicast ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.6 (ข) จากรูปเมื่อโหนด A ทำการส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast ไปยังโหนด B โดยในระยะเวลาการส่งของโหนด A ครอบคลุมโหนด C และ D อยู่ เพราะฉะนั้นเมื่อโหนด C และ D ตรวจพบสัญญาณที่โหนด A ส่งแพ็กเก็ตไปหาโหนด B โหนดทั้งสองจะต้องนำแพ็กเก็ตที่ตรวจจับได้ไปทำการทดสอบว่าเป็นแพ็กเก็ตที่ส่งมาหาตนเองหรือไม่ ซึ่งในกรณีไม่ใช่แพ็กเก็ตที่ส่งมายังโหนดทั้งสอง เพราะฉะนั้นโหนดทั้งสองจะต้องทำการลบแพ็กเก็ตที่ได้ยินนี้ทิ้ง ซึ่งเราจะเรียกโหนด C และ D ว่าเป็นโหนดที่ได้ยิน (Overhearing node) และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็นิยามแพ็กเก็ตนี้ว่าเป็นแพ็กเก็ตที่ได้ยิน (Overhear packet) โดยการทำงานในโหมดนี้ โหนดเพียงใช้กำลังในการตรวจสอบข้อมูลและลบแพ็กเก็ตดังกล่าวทิ้งโดยไม่ต้องประมวลผลอื่น ๆ กับแพ็กเก็ตต่อไป

จากที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถสรุปโหมดการทำงานทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.3 จะแตกต่างกันตรงโหมดการรับ โดยจากรูปแบบที่นำเสนอ นั้นเมื่อโหนดตรวจพบสัญญาณที่โหนดอื่นส่งมานั้นโหนดจะทำการพิจารณาที่ตัว Transceiver (TxRx) ว่าเป็นแพ็กเก็ตแบบ Unicast ใช่หรือไม่ ถ้าใช่ Transceiver ของโหนดก็จะทำการตรวจสอบต่อไปว่าเป็นแพ็กเก็ตสำหรับตนเองหรือไม่ ถ้าใช่โหนดก็เปลี่ยนโหมดไปเป็นโหมดการรับ (Actual Receive mode) แต่ถ้าไม่ใช่แพ็กเก็ตของตนเองก็จะเข้าสู่โหมดการได้ยิน (Overhear mode) แต่ถ้าเป็นแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายภายหลังจากที่โหนดตรวจพบสัญญาณ ตัว Transceiver ก็จะเปลี่ยนโหมดไปทำงานในโหมดการรับจริงทันที (Actual Receive mode)



รูปที่ 2.7 โหมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs ที่นำเสนอ

ส่วนค่ากำลังในการทำงานแต่ละโมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างอิงค่าจริงจากแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย ORINOCO 11b PC Card [26] ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง (P_t) เท่ากับ 1.425 วัตต์ ค่ากำลังงานที่ใช้ในการรับ (P_r) เท่ากับ 0.925 วัตต์และพลังงานที่ใช้เมื่ออยู่ในโมดสถานะว่าง (P_{idle}) เท่ากับ 0.045 วัตต์ ซึ่งกำลังที่ใช้ในโมดสถานะว่างมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานในโมดอื่น ๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่ากำลังในส่วนนี้เท่ากับศูนย์ ($P_{idle} = 0$) นอกจากนั้นตัวการ์ดเองไม่ได้รับการทำงานในโมดสถานะหลับ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็จะไม่คำนึงถึงการทำงานในโมดสถานะหลับอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 จะไม่มีการทำงานในโมดนี้ ส่วนกำลังที่ใช้ในโมดการได้ยิน (P_o) ที่ได้นำเสนอขึ้นมาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็จะเป็นอีกค่าหนึ่งที่ไม่ได้มีการกำหนดไว้ใน [26] แต่ ณ ที่นี้เราได้กำหนดให้ค่าดังกล่าวต่ำกว่ากำลังที่ใช้ในการรับประมาณ 2 เท่า ($P_o = 0.46$ วัตต์) สาเหตุที่กำหนดให้มีค่าต่ำกว่าเพราะว่าพลังงานที่ใช้ในส่วนนี้เพียงแค่เป็นพลังงานที่ใช้ในการอ่านแพ็กเก็ตและทำการลบแพ็กเก็ตทิ้งไม่จำเป็นต้องประมวลผลต่อไป แต่ขณะที่ในโมดการรับนั้นเมื่อได้รับแพ็กเก็ตแล้วจะต้องใช้พลังงานในการประมวลผลแพ็กเก็ตนั้นต่อไป

2.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Estimation of Link Error Rate)

สัญญาณที่ถูกส่งไปบนตัวกลางไร้สายอาจจะถูกลดทอนเนื่องจากหลายสาเหตุเช่น สัญญาณรบกวนบริเวณรอบข้างตัวรับสัญญาณ (Ambient noise) การลดทอนเนื่องจากสภาพแวดล้อมของตัวกลางและการเคลื่อนที่ของโนดเป็นต้น สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้สัญญาณหรือข้อมูลที่ส่งจากโนดแหล่งกำเนิดไปยังโนดปลายทางมีความผิดพลาดเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นขนาดความแรงของสัญญาณที่ตัวรับนอกจากจะถูกลดทอนตามระยะทางแล้วยังเกี่ยวข้องกับคุณภาพของช่องสัญญาณ (Channel Quality) ณ ขณะเวลานั้นด้วย ถ้าข้อมูลที่ส่งไปนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้นบนช่องสัญญาณ (ข่ายเชื่อมโยง) ผลกระทบที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่เสียเวลาในการส่งแต่ยังส่งผลกระทบต่อในเรื่องของพลังงานที่จะต้องสูญเสียอีกด้วย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าคุณภาพของข่ายเชื่อมโยงและวิธีการแก้ไขข้อผิดพลาดรวมไปถึงผลกระทบในเรื่องของการสูญเสียพลังงาน

2.4.1 แบบจำลองความผิดพลาดข่ายเชื่อมโยง (Link Error Rate Model)

คุณภาพของช่องสัญญาณ (Channel Quality) บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดสองโนดนั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate หรือ BER) [27] ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูลที่ส่งออกไปนั้นจะเกิดความผิดพลาดขึ้น ถ้าบนข่ายเชื่อมโยงใดมีค่า BER สูงแสดงว่าคุณภาพของช่องสัญญาณ (ข่ายเชื่อมโยง) ที่พิจารณาอยู่นั้นไม่ดีหรือเลวร้าย โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตบนข่ายเชื่อมโยงแบบไร้สายจะมีค่ามากกว่า

กรณีบนข่ายเชื่อมโยงแบบมีสายหลายเท่า เนื่องมาจากบนข่ายเชื่อมโยงไร้สายนั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่ส่งออกไปอย่างเช่น สัญญาณรบกวนรอบ สัญญาณแทรกสอด สิ่งกีดขวาง และอื่น ๆ อีกมากมาย

อัตราความผิดพลาดบิตแสดงถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณหรือข่ายเชื่อมโยง ณ ขณะเวลานั้น เพราะฉะนั้นต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยค่าอัตราความผิดพลาดบิตนั้นสามารถพิจารณาได้จาก อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) มอดูเลชัน (Modulation) และวิธีการเข้ารหัสสัญญาณ (Code Scheme) [27]

ค่า SNR เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยที่ค่าสัญญาณ (Signal) นั้นจะเป็นขนาดความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ ที่ตัวรับสัญญาณ ส่วนสัญญาณรบกวนนั้นจะรวมสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ตัวรับสัญญาณ สัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมและสัญญาณแทรกสอดจากที่โนดส่งสัญญาณมายังตัวรับสัญญาณพร้อมกัน โดยที่สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ตัวรับนั้นจะรวมถึงสัญญาณรบกวนแบบเทอเมอร์ (Thermal noise) และสัญญาณรบกวนแบบแพลตฟอร์ม (Platform noise) การเลือกแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่จะมาใช้งานก็สำคัญ เพราะว่าแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายต่างกันก็ทำให้ได้สัญญาณรบกวนแบบแพลตฟอร์มต่างกันและแน่นอนว่าการส่งด้วยอัตราการส่งต่างกันก็จะทำให้ได้สัญญาณรบกวนที่ได้ก็จะแตกต่างกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงจาก ORINOCO 11b PC Card [26] ตามมาตรฐาน IEEE802.11b โดย IEEE 802.11 [28] เป็นมาตรฐานที่สำคัญสำหรับโครงข่ายไร้สาย (WLANs) ซึ่งถูกนำมาใช้โดยผู้ผลิตผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เกี่ยวกับโครงข่ายไร้สาย ซึ่งรุ่นล่าสุดของมาตรฐานนี้คือ IEEE 802.11b ที่ถูกเรียกในทางการค้าว่า Wi-Fi (Wireless Fidelity) มาตรฐาน IEEE 802.11 นี้เป็นการจัดการระหว่างชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer) และชั้นสื่อสารย่อย MAC (MAC Layer) ซึ่งมีการเผยแพร่ในปี 1997 ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11 มีตัวกลางที่ใช้ในระดับกายภาพสนับสนุนอยู่สามรูปแบบ ซึ่งรูปแบบแรกนั้นของอินฟราเรด (Infared) และอีกสองรูปแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานของการส่งสัญญาณวิทยุ (Radio Transmission) ซึ่งหลักการของโปรโตคอลชั้นสื่อสารกายภาพนั้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ Physical Medium Dependent Sublayer (PMD) and Physical Layer Convergence Protocol (PLCP) โดยที่ PMD เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัส ถอดรหัส การมอดูเลตสัญญาณ และการจัดการกับความผิดปกติของสัญญาณ ตามรายการที่ระบุไว้ใน ORINOCO 11b นั้นมีอัตราการส่งข้อมูล 4 ระดับ 1 Mbps (Differential Binary Phase Shift Keying แทนด้วย DBPSK), 2 Mbps (Differential Quadrature Phase Shift

Keying แทนด้วย DQPSK), 5.5 และ 11 Mbps (Complementary Code Keying แทนด้วย CCK) ซึ่งอัตราการส่งข้อมูลแตกต่างกันก็จะใช้มอดูเลชันที่แตกต่างกันออกไปด้วย

เนื่องจาก IEEE802.11 ไม่ได้พิจารณาการเข้ารหัสเพื่อใช้ในการแก้ไขเมื่อข้อมูลเกิดความผิดพลาด เพราะฉะนั้นอัตราความผิดพลาดบิตก็จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและมอดูเลชันหรืออัตราการส่งข้อมูล (Data Rate or Transmission Rate) ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตสามารถหาได้จากทั้งทางทฤษฎี [27] และทางการวัดจากการทำงานจริงของแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่นำมาใช้งาน โดยการคำนวณค่าจากทฤษฎีจะมีสมการในการคำนวณภายใต้วิธีการมอดูเลชันที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีหลาย ๆ มอดูเลชันได้แสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.5)

$$P_b \propto \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\beta \times P_r}{N \times f}} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ P_b เป็นอัตราความผิดพลาดบิต (BER)

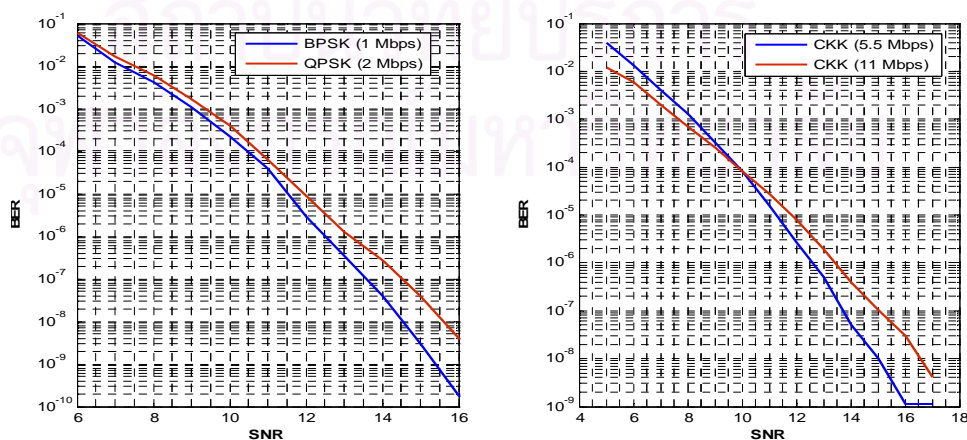
β เป็นค่าคงที่ใด ๆ

P_r เป็นความแรงของสัญญาณที่วัดได้ ณ ตัวรับสัญญาณ

N เป็น noise spectral density (noise power per Hz)

f เป็น อัตราเร็วการส่งข้อมูล (Data Rate) และ

$\operatorname{erfc}(x)$ เป็น ฟังก์ชัน complementary ที่คำนวณได้จาก $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ

แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้สนใจหรือเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องการมอดูเลชันเพียงแต่ศึกษาและสนใจความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและระดับของสัญญาณ (หรือ SNR) ณ ตัวรับ เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าที่ทางผู้ผลิตอุปกรณ์ได้ทำการวัดภายใต้สภาวะการทำงานจริง โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (BER vs SNR) ภายใต้วิธีการมอดูเลตแบบต่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 หรือแสดงในรูปที่ 2.8 [27]

การส่งข้อมูลจากโนดหนึ่งไปยังอีกหนึ่งนั้นจะส่งเป็นเฟรมหรือแพ็กเก็ต โดยในแต่ละแพ็กเก็ตประกอบไปด้วยข้อมูลขนาด s บิตเพราะฉะนั้นแทนที่เราจะพิจารณาคุณภาพของช่องสัญญาณหรือชายเชื่อมโยงด้วยค่าอัตราความผิดพลาดบิตแต่จะต้องใช้ค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ต (Packet Error Rate, PER หรือ Frame Error Rate, FER) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าค่า SNR มีค่าเท่ากันทุกบิตในแพ็กเก็ตหนึ่ง ดังนั้นเราสามารถคำนวณอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตซึ่งแสดงแทนด้วย p ได้จากสมการที่ (2.6)

$$p = 1 - (1 - p_b)^s \quad (2.6)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถสรุปขั้นตอนการหาค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตได้ดังนี้ เมื่อโนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตข้อมูลจากโนดที่ส่งข้อมูลมาให้โนดปลายทางก็จะต้องวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ (P_r) หลังจากนั้นโนดก็จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา SNR ต่อจากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.2 ก็จะได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต เมื่อได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณออกมาแล้วโนดจะต้องใช้สมการที่ (2.6) ในคำนวณหาอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตต่อไป

2.4.2 การดัดแปลงโปรแกรม Network Simulator 2 (NS2) เพื่อรองรับผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาคุณภาพชายเชื่อมโยง

โปรแกรมที่นำมาใช้ในการจำลองการทำงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ Network Simulator 2 (NS2) เวอร์ชัน 2.8 [29] ซึ่งตัวโปรแกรมที่ใช้ในเวอร์ชันนี้ไม่ได้รองรับผลกระทบของแพ็กเก็ตเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณ โดยจากเดิมกำหนดว่าเมื่อโนดได้รับสัญญาณการส่งแพ็กเก็ตจากโนดตัวส่ง และถ้าโนดดังกล่าวอยู่ในระยะการส่งของโนดที่ส่งข้อมูลมาก็ให้ถือว่าแพ็กเก็ตที่รับนั้นเป็นแพ็กเก็ตที่ไม่เกิดข้อผิดพลาด แต่สิ่งที่เราจะเพิ่มเข้าไปคือ หลังจากที่โนดได้รับสัญญาณเข้ามาโนดจะเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ได้รับกับขนาดของสัญญาณรับที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง ($RxThresh_r$) ถ้าขนาดของสัญญาณที่วัดได้น้อยกว่าค่า $RxThresh_r$

($P_r \leq RxThresh_$) โหนดจะทำการระบุว่าแพ็กเก็ตนี้เป็นแพ็กเก็ตที่เกิดผิดพลาดและส่งแพ็กเก็ตต่อให้ชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่อไป แต่ถ้าสัญญาณที่วัดได้มากกว่าค่า $RxThresh_$ ($P_r > RxThresh_$) โหนดก็จะส่งแพ็กเก็ตที่ได้ต่อไปยังชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางโดยไม่มีการระบุค่าใด ๆ ภายหลังจากที่ชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางได้รับแพ็กเก็ตดังกล่าวถ้าแพ็กเก็ตนั้นได้มีการระบุความผิดพลาดไว้ โหนดก็จะลบแพ็กเก็ตนั้นทิ้งทันที แต่ถ้าไม่มีการระบุค่าใดจากชั้นล่างโหนดจะทำการคำนวณอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในส่วนท้ายของหัวข้อที่ 2.4.1 และจะสุ่มตัวเลขขึ้นมาค่าหนึ่งโดยใช้การกระจายแบบ Uniform ถ้าตัวเลขที่สุ่มขึ้นมาได้น้อยกว่าค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตที่คำนวณมาได้ แพ็กเก็ตนั้นก็จะถูกระบุว่ามีความผิดพลาดและจะถูกลบทิ้งถัดไป แต่ในทางตรงข้ามแพ็กเก็ตนั้นก็จะถือว่าได้รับอย่างถูกต้องและนำไปประมวลผลในส่วนอื่น ๆ ไปต่อ

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ภายใต้การมอดูเลตแบบต่าง ๆ

SNR (dB)	BPSK (1Mbps)	QPSK (2 Mbps)	CCK (5.5 Mbps)	CCK (11 Mbps)
5	5.00e-2	6.00e-2	4.00e-2	1.20e-2
6	5.00e-2	6.00e-2	1.30e-2	6.00e-3
7	1.20e-2	1.70e-2	4.10e-3	2.00e-3
8	4.10e-3	6.00e-3	1.30e-3	7.00e-4
9	1.10e-3	1.70e-3	3.30e-4	2.50e-4
10	2.20e-4	4.00e-4	8.00e-5	8.00e-5
11	4.00e-5	6.30e-5	1.50e-5	2.70e-5
12	2.90e-6	8.90e-6	2.70e-6	8.00e-6
13	3.60e-7	1.30e-6	5.00e-7	1.90e-6
14	4.00e-8	2.70e-7	5.00e-8	3.90e-7
15	3.00e-9	4.00e-8	1.00e-8	1.02e-7
16	1.80e-10	4.00e-9	1.10e-9	3.00e-8
17	1.80e-10	4.00e-9	1.10e-9	4.00e-9

2.4.3 การแก้ไขความผิดพลาดแบบ Automatic Repeat Request (ARQ)

มาตรฐาน IEEE802.11 กำหนดให้ชั้นควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณมีหน้าที่ในการให้ความน่าเชื่อถือในการสร้างการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Connection) และได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 โมด คือ โมด DCF (Distributed Coordinate Function) เป็นวิธีการเข้าถึงตัวกลางแบบไม่ใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดย DCF จะใช้โพรโทคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ร่วมกับ binary exponential back-off เพื่อเป็นการลดการชนกันของข้อมูล ส่วนการเข้าถึงตัวกลางอีกแบบหนึ่งเรียกว่า PCF (Point Coordinate Function) เป็นการเข้าถึงตัวกลางแบบนี้เป็นกรเข้าถึงแบบใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึง ซึ่งเหมาะสำหรับการส่งข้อมูลแบบ real time โดยการทำงานแบบแอดฮอกจะต้องใช้โมด DCF เพราะเป็นโครงข่ายที่ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานในการทำงาน โดยโพรโทคอลที่นำมาเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลคือ CSMA/CA ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่กำหนดให้โหนดที่ได้รับข้อมูลจะต้องมีการตอบรับ (Acknowledgement, ACK) เมื่อได้รับข้อมูลนั้นอย่างถูกต้องกลับไปยังโหนดที่ส่งข้อมูลมาให้เพื่อให้ผู้ส่งได้ทราบว่าข้อมูลที่ส่งไปนั้นผู้รับได้รับอย่างถูกต้อง ถ้าผู้ส่งไม่ได้รับแพ็กเก็ต ACK ก็จะมีการส่งข้อมูลเดิมซ้ำ (Retransmission) อีกครั้ง ซึ่งโพรโทคอลได้จำกัดจำนวนของการส่งซ้ำและความเสียหายจะถูกรายงานถึงชั้นที่สูงกว่าหลังจากจำนวนของการส่งซ้ำเกินค่าที่จำกัดเอาไว้

เทคนิคการควบคุมความผิดพลาดกล่าวไว้เรียกว่า Automatic Repeat Request (ARQ) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาแบบจำลองการส่งซ้ำที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission or HHR) และการส่งซ้ำระหว่างปลายทาง (End-to-End Retransmission or EER) แต่ละแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้ [10, 28]

- การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission or HHR)

เมื่อแต่ละข่ายเชื่อมโยงรองรับการส่งต่ออย่างน่าเชื่อถือ (Reliable forwarding) ไปยังช่วงเชื่อมต่อถัดไปโดยใช้การส่งแพ็กเก็ตซ้ำภายใน (Localized packet retransmission) นั่นคือการส่งซ้ำจะต้องส่งโดยโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตออกไปแล้วเกิดความผิดพลาดของแพ็กเก็ตขึ้น ดังนั้นอัตราความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยงจะเป็นอิสระออกจากกันบนเส้นทางหนึ่ง ๆ เพราะฉะนั้นจำนวนแพ็กเก็ตที่ควรจะถูกส่งโดยแต่ละโหนดบนเส้นทางสามารถหาได้จากสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$N_i = \frac{N_{req}}{1 - P_{link}^{i,i+1}} \quad (2.7)$$

เมื่อ N_{req} เป็นจำนวนแพ็กเก็ตที่ต้องการส่ง $p_{link}^{i,i+1}$ เป็นอัตราความผิดพลาดของแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i กับโนด $i+1$ และ N_i เป็นจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ต้องส่งด้วยโนด i จากตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ถ้าโนด S ต้องการส่ง 1,000 แพ็กเก็ตไปยังโนด D จากสมการที่ (2.7) จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ส่งจากโนด S ไปยังโนด D จะเท่ากับ $N_{total} = 1,030.9(N_S) + 1,052.6(N_1) + 1,041.7(N_2) + 1,041.7(N_3) \approx 4,164$ แพ็กเก็ต หรือจำนวนแพ็กเก็ตที่ต้องส่งซ้ำจำนวน 164 แพ็กเก็ต



รูปที่ 2.9 การสื่อสารจากโนด S ไปยังโนด D ด้วยความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยง

- การส่งซ้ำระหว่างปลายทาง (End-to-End Retransmission or EER)

เมื่อการกู้คืนแพ็กเก็ตที่เกิดความผิดพลาดบนเส้นทาง (ไม่ว่าจะเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยงใดก็ตาม) โหนดแหล่งกำเนิดจะต้องทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลซ้ำอีกครั้งเท่านั้นและข่ายเชื่อมโยงไม่ได้รองรับการงานแบบ Link-layer retransmission เพราะฉะนั้นการส่งแพ็กเก็ตที่เกิดความผิดพลาดซ้ำบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ บนเส้นทางจะถูกส่งด้วยโนดแหล่งกำเนิด ดังนั้นจำนวนการส่งแพ็กเก็ตทั้งหมดจากโนดแหล่งกำเนิดไปยังโนดปลายทางสามารถหาได้ดังนี้

สมมุติว่าแต่ละ N ข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทางใด ๆ ที่มีอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตที่เป็นอิสระจากกันเป็น $p_{link}^{i,i+1}$ ดังนั้นความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเก็ตที่ผิดพลาดตลอดทั้งเส้นทางเป็น p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8)

$$p = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{link}^{i,i+1}) \quad (2.8)$$

จำนวนของการส่งรวมถึงการส่งซ้ำที่จำเป็นเพื่อให้การส่งแพ็กเก็ตจากโนดแหล่งกำเนิด (S) ไปยังโนดปลายทาง (D) อย่างน่าเชื่อถือสามารถแสดงได้ด้วย ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบ Geometric และมีค่าความคาดหวัง (Mean) ของจำนวนการส่งแต่ละแพ็กเก็ตมีค่าเป็น $1/(1-p)$ เพราะฉะนั้นจำนวนแพ็กเก็ตเฉลี่ยทั้งหมดที่ควรจะถูกส่งด้วยแต่ละโนดบนเส้นทางจะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.9) ดังนี้

$$N_i = \frac{N_{req}}{1-p} = \frac{N_{req}}{\prod_{i=1}^N (1 - p_{link}^{i,i+1})} \quad (2.9)$$

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ถ้าใช้วิธี EER จากสมการที่ (2.9) จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ส่งจากโนด S ไปยังโนด D จะเท่ากับ $N_{total} = 1,177.5 * 4 \approx 4,710$ แพ็กเก็ต ซึ่งเป็นแพ็กเก็ตที่จะต้องส่งซ้ำเป็นจำนวน 710 แพ็กเก็ต

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการแบบ HHR กับ EER แล้วจะพบว่าการใช้วิธีการแบบ HHR จะเหมาะสมกับการใช้งานในโครงข่ายแอตฮอกมากกว่าเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงไร้สายมีอัตราความผิดพลาดค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่แต่ละวิธีจะต้องใช้นั้น จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบ EER จะใช้จำนวนแพ็กเก็ตที่ต้องส่งซ้ำเป็นจำนวนมากกว่าแบบ HHR ดังนั้นวิธีการแบบ HHR จะสามารถช่วยประหยัดพลังงานมากกว่าแบบ EER และยังใช้เวลาในการส่งแพ็กเก็ตไปยังโนดปลายทางอย่างถูกต้องต่ำกว่า จากเหตุผลดังกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดโนดใช้วิธีการส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (HHR) ในการควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.5 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแบบแอตฮอก (Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network)

โครงข่ายแอตฮอกยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ อีกมากมายที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยหน้าที่การทำงานที่สำคัญที่ทุกโนดในโครงข่ายจะต้องมีความสามารถในการทำงานนี้คือ การจัดสรรเส้นทางซึ่งเป็นหน้าที่หลักของชั้นเครือข่ายตามสถาปัตยกรรม OSI เนื่องจากไม่มีสถานะฐานเหมือนกับระบบเซลล์ลูลาร์และโนดมีระยะของกำลังส่งที่จำกัด ถ้าโนดไม่มีความสามารถนี้ก็เลยไม่เกิดการดำเนินงานในลักษณะโครงข่ายแอตฮอกขึ้นมา

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบแอตฮอกถูกแบ่งตามคุณสมบัติกว้าง ๆ ออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive) และแบบการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) โดยในรูปแบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าทุกโนดจะปรับปรุงข้อมูลเส้นทางของโครงข่ายอย่างต่อเนื่องและเมื่อโนดหนึ่งโนดใดต้องการที่จะส่งแพ็กเก็ตเส้นทางจะมีไว้เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดการประวิงเวลาในการจัดเส้นทาง อย่างไรก็ตามสำหรับรูปแบบที่มีการเคลื่อนที่ของโนดที่สูง การเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าจะทำให้ขาดแคลนจำนวนทรัพยากรที่จะใช้ในการให้ได้ซึ่งเส้นทางที่พร้อมจะใช้งานได้อยู่ตลอดเวลา ซึ่งตัวอย่างของโพรโทคอลการทำงานแบบ Proactive เช่น โพรโทคอล link state routing (LSR) และโพรโทคอล Distance vector routing (Bellman-Ford) ที่ไม่เคยที่ถูกนำมาใช้ในโครงข่ายเคลื่อนที่ เพราะว่าโพรโทคอลเหล่านี้มีความเร็วไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีของโครงข่าย จากนั้นได้มีการพยายามนำโพรโทคอลพื้นฐานทั้งสอง (Link state routing, distance vector routing) มาพัฒนาเพื่อให้เข้ากับโครงข่ายแอตฮอกคือโพรโทคอลแบบ Destination-Sequenced Distanced

Vector Routing (DSDV) อีกประเภทหนึ่งคือ โพรโทคอลการจราจรเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or demand) มีวิธีการทำงานคือ เส้นทางจะถูกหาเมื่อมีความต้องการในการส่งข้อมูล ดังนั้นโอเวอร์เฮดของการสื่อสารจะลดลง แต่จะเสียการประวิงเวลาเนื่องจากการจราจรเส้นทาง โดยตัวอย่างของโพรโทคอลที่ทำงานแบบวิธีนี้คือ โพรโทคอล Dynamic Source Routing protocol (DSR) และอีกแบบคือ โพรโทคอลแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector routing protocol (AODV) เป็นต้น

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้สนใจเรื่องการอนุรักษ์พลังงาน โดยออกแบบโพรโทคอลการจราจรเส้นทางเพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์จึงเลือกรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลแบบ On-demand เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาให้บรรลุตามเป้าหมาย เหตุผลที่เลือกโพรโทคอลแบบ On-demand เพราะว่าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและสมรรถนะด้านอื่น (Throughput, Data Delivery Ratio, etc.) ในบทความ [4, 5] ได้ทดสอบการทำงานของโพรโทคอลแบบ On-demand กับ Proactive จากการพิจารณาได้ชี้ให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ On-demand ให้ประสิทธิภาพได้ดีไม่เพียงแต่ในเทอมของปริมาณงาน (Throughput) โอเวอร์เฮดของการจราจรเส้นทาง (Overhead Routing) และแพ็กเก็ตที่สูญเสีย (Packet loss) แต่ยังมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์พลังงานด้วย โดยโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ On-demand ที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ AODV และ DSR ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกโพรโทคอลแบบ AODV มาเป็นต้นแบบเพื่อใช้ในการพัฒนาให้สามารถรองรับในเรื่องการอนุรักษ์พลังงานเพราะว่าโพรโทคอลแบบ AODV มีฟังก์ชันการทำงานที่รองรับกับวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 3 และ AODV ยังใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอลแบบ DSR ในหลาย ๆ สถานะการณณ์ [14] เมื่อพิจารณาได้แล้วว่าจะใช้โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ AODV ในส่วนถัดไปจะกล่าวขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ AODV และประเมินผลกระทบของโพรโทคอลกรณณ์ที่พิจารณาพลังงานและคุณภาพของช่องสัญญาณ (ที่ได้ทำการดัดแปลงโปรแกรม NS2 ที่อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.4.2) เมื่อเทียบกับ AODV ที่ไม่พิจารณาพลังงานและคุณภาพของช่องสัญญาณในการทดลอง

2.5.1 โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV)

โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ Ad hoc on-demand distance vector (AODV) ใช้เทคนิคตามความต้องการสำหรับการจราจรเส้นทางหรือกล่าวได้ว่าเส้นทางระหว่างโหนดสื่อสารจะถูกสร้างขึ้นก็ต่อเมื่อโหนดต้นทางมีความต้องการจะติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทาง โดยโพรโทคอลที่

มีกระบวนการทำงานใกล้เคียงกับโพรโทคอล Bellman-Ford Distance Vector แต่ได้รับการปรับปรุงให้สามารถนำมาใช้งานในกรณีที่ผู้ใช้บริการมีการเคลื่อนที่ นอกจากนั้น AODV ยังใช้หมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง (Destination Sequence Number) สำหรับระบุว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่ใหม่ที่สุด โดยข้อแตกต่างหลัก ๆ ระหว่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV กับโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ Dynamic Source Route (DSR) คือ เส้นทางที่ได้จากการค้นหาเส้นทาง จะถูกใส่เข้าไปในส่วนหัวของแพ็กเก็ตข้อมูลทุกแพ็กเก็ตก่อนที่โหนดต้นทางจะทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกไปยังโหนดถัดไปของเส้นทาง ซึ่งในขณะที่โพรโทคอลแบบ AODV โหนดต้นทางและโหนดระหว่างทาง (Intermediate node) จะทำการเก็บข้อมูลเส้นทางเฉพาะโหนดถัดไปหรือกล่าวได้ว่าทุกโหนดไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเส้นทางทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง และโพรโทคอลได้ใช้ Destination Sequence Number ในการตัดสินใจว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่ใหม่ล่าสุดระหว่างคู่โหนด หนึ่ง ๆ

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ใช้แพ็กเก็ตข่าวสารทักทาย (Hello message) โดยจะทำการแพร่กระจายเป็นช่วงระยะเวลาที่เท่ากันอย่างต่อเนื่องไปยังโหนดรอบข้าง เพื่อใช้ตรวจสอบการเชื่อมต่อกับโหนดรอบข้างหรือพิจารณาว่าขณะนั้นมีโหนดใดบ้างที่สามารถเชื่อมต่อกับตนเองแบบหนึ่งช่วงเชื่อมต่อได้บ้าง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่ ณ ปัจจุบัน ถ้าในเวลาที่กำหนดโหนดไม่ได้รับแพ็กเก็ตข่าวสารทักทายจากโหนดรอบข้างเดิม โหนดดังกล่าวก็จะสมมุติว่าโหนดนั้นได้เคลื่อนที่ออกนอกช่วงระยะเวลาส่งของตัวเองหรือโหนดดังกล่าวไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่ไว้ใช้งานแล้ว และถ้าโหนดที่อยู่ระหว่างทางตรวจพบว่าเส้นทางไปยังโหนดถัดไปไม่สามารถใช้งานได้ โหนดดังกล่าวจะทำการบันทึกว่าชายเชื่อมโยงดังกล่าวเสียหายและจะทำการแจ้งข้อมูลความเสียหายไปยังกลุ่มโหนดที่ใช้ชายเชื่อมโยงดังกล่าวไปยังโหนดปลายทางโดยการส่งแพ็กเก็ตแจ้งความเสียหาย โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process) และกระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance Process) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละกระบวนการเป็นดังต่อไปนี้

2.5.1.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดหนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อใดก็ตามที่โหนดต้นทางต้องการจะติดต่อหรือส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางในโครงข่าย แต่ตรวจไม่พบเส้นทางที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ในตารางการจัดเส้นทาง ณ ชั้นเครือข่าย แต่กรณีที่โหนดตรวจพบเส้นทางที่สามารถใช้งานได้ก็สามารถที่จะส่งข้อมูลไปตามเส้นทางที่ทราบได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยตารางการ

จัดเส้นทางของแต่ละโหนดนั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโหนดปลายทาง โหนดถัดไปที่จะต้องส่งแพ็กเก็ตออกไปยังโหนดปลายทาง และยังคงถึงระยะเวลาที่สามารถใช้เส้นทางได้

กระบวนการค้นหาเส้นทางจะเริ่มที่โหนดต้นทางสร้างแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request, RREQ) ซึ่งภายในแพ็กเก็ตประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ๆ สำหรับค้นหาเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งข้อมูลในแต่ละส่วนจะมีความหมายและการกำหนดค่าที่แตกต่างกันดังนี้

- หมายเลขที่อยู่ของต้นทาง (Source address, SrcID) เป็นหมายเลขที่แสดงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละโหนดและมีค่าที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นหมายเลข IP เพื่อสำหรับบอกว่าแพ็กเก็ตดังกล่าวใครเป็นต้นทางในการส่งแพ็กเก็ต
- หมายเลขแสดงลำดับของต้นทาง (Source Sequence Number, SrcSeqNum) เป็นหมายเลขของโหนดต้นทางที่ใช้เพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่า โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือการตอบรับเส้นทาง
- หมายเลขระบุแพ็กเก็ตการแพร่กระจาย (Broadcast Identifier, BcastID) เป็นตัวเลขจำนวนนับของแต่ละโหนดที่จะเพิ่มค่าที่ละ “1” ทุกครั้งเมื่อทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ
- หมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง (Destination Sequence Number, DestSeqNum) เป็นหมายเลขของโหนดปลายทางเพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่าเช่นเดียวกับ SrcSeqNum โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือการตอบรับเส้นทาง แต่ในการกำหนดค่าลงในข้อมูลนี้ โหนดต้นทางจะใส่ค่า DestSeqNum ถ้าสุดของโหนดปลายทางที่ตนเองทราบ แต่ถ้าไม่ทราบเลยจะกำหนดให้มีค่าเป็น “0”
- จำนวนช่วงการเชื่อมต่อ (Hop Count) ใช้เพื่อบอกจำนวนครั้งที่แพ็กเก็ต RREQ ถูกส่งต่อผ่านโหนดต่าง ๆ โดยจะเพิ่มค่าที่ละ “1” เมื่อผ่านโหนดหนึ่งโหนด ซึ่งค่าเริ่มต้นที่โหนดต้นทางเป็นผู้กำหนดคือ “0”

Source address	Source Sequence number	Broadcast ID	Destination address	Destination Sequence number	Hop Count
----------------	------------------------	--------------	---------------------	-----------------------------	-----------

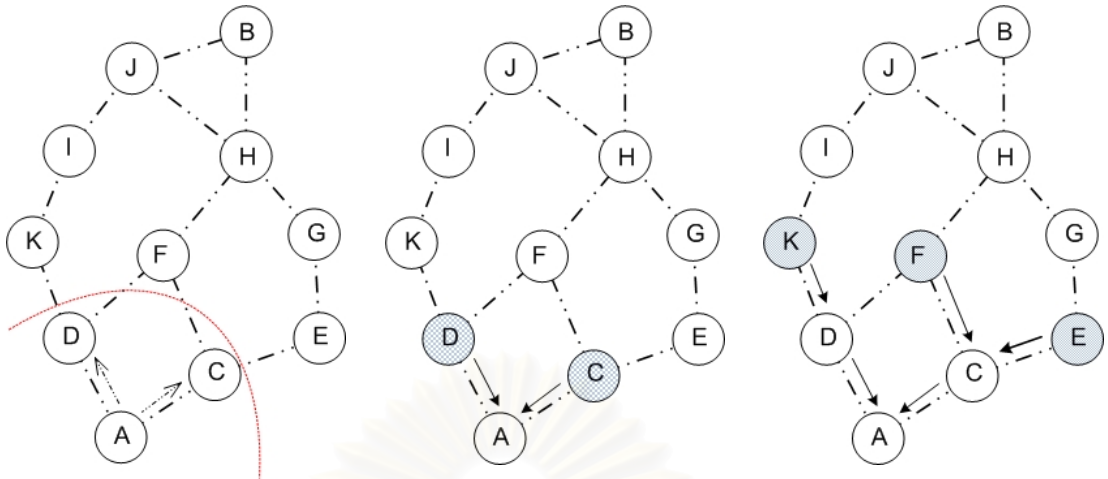
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request)

ภายหลังจากที่โหนดต้นทางสร้างแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางและบรรจุค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้เสร็จเรียบร้อยแล้ว โหนดต้นทางจะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่ง (Transmission Range) จากตัวอย่างในรูปที่ 2.11 โหนดต้นทาง A ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง B โดยโหนด A เริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดรอบข้าง ณ ที่นี้คือโหนด C และ D และเมื่อโหนด C และ D ได้รับแพ็กเก็ต RREQ จากโหนดต้นทางแล้วก็จะดำเนินตามกระบวนการดังต่อไปนี้

(1) โหนดจะทำการตรวจสอบข้อมูล $\langle \text{SrcID}, \text{BcastID} \rangle$ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งถูกนำไปใช้เพื่อลดจำนวนแพ็กเก็ตที่มีการแพร่กระจายมากเกินไปจนความจำเป็น โดยโหนดจะทำการเปรียบเทียบค่าทั้งสองกับค่าในตารางข้อมูลส่วนตัวของแต่ละโหนด เพื่อตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตที่ได้รับเคยถูกประมวลผลไปก่อนหน้านี้ (เคยได้รับแพ็กเก็ต RREQ นี้แล้ว) แล้วหรือไม่ ถ้าได้ประมวลผลไปก่อนหน้านี้ โหนดจะทำการลบแพ็กเก็ตนี้ทิ้งไปและจะไม่ดำเนินการใด ๆ ต่อไป แต่ถ้าเคยได้รับแพ็กเก็ต RREQ นี้เป็นครั้งแรกก็จะทำการบันทึกค่า $\langle \text{SrcID}, \text{BcastID} \rangle$ ที่อยู่ในส่วนหัวของแพ็กเก็ตไว้ในตารางข้อมูลส่วนตัวเพื่อใช้ในการตรวจสอบครั้งต่อไป เมื่อได้รับแพ็กเก็ต RREQ เข้ามา ต่อไปจะดำเนินกระบวนการตามข้อ (2)

(2) โหนดทำการตรวจสอบว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทาง (DestID) หรือไม่ โดยการเปรียบเทียบหมายเลขที่อยู่ของตัวเองกับค่า DestID ในแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้รับ ถ้าตรงกันแสดงว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการจะติดต่อสื่อสาร โหนดก็จะเข้าสู่กระบวนการตอบรับเส้นทางซึ่งจะกล่าวในภายหลัง แต่ถ้าตัวเองไม่ใช่โหนดปลายทาง โหนดจะดำเนินกระบวนการที่ (3) ต่อไป

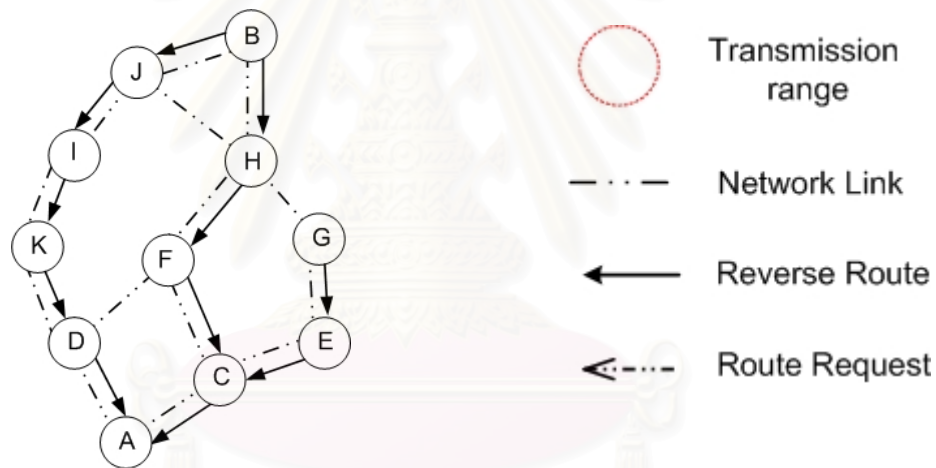
(3) เมื่อโหนดไม่ใช่โหนดปลายทาง โหนดจะต้องทำการตรวจสอบว่าตัวเองมีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ใหม่และสามารถใช้งานได้ ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูล (Route Table) หรือไม่ การจะดูว่าเป็นเส้นทางใหม่นั้น จะดูจากค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลกับค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในแพ็กเก็ต RREQ ถ้าค่าที่อยู่ในตารางมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่อยู่ในแพ็กเก็ตก็แสดงว่าเส้นทางนั้นเป็นเส้นทางที่ใหม่ แต่ในทางตรงกันข้าม เส้นทางที่แสดงอยู่ในตารางถือว่าเป็นเส้นทางที่เก่าไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะฉะนั้นถ้าโหนดมีเส้นทางใหม่และสามารถใช้งานได้ โหนดจะดำเนินกระบวนการตอบรับเส้นทางโดยไม่ต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ต่อไป แต่ถ้าไม่มีเส้นทางก็จะไปทำขั้นตอนต่อไป (ขั้นตอนที่ 4)



(ก) ระยะเวลาการส่งข้อมูลและการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ของโนด A

(ข) การสร้างเส้นทางย้อนกลับ หลังจากได้รับสัญญาณแพ็กเก็ต RREQ

(ค) ภายหลังจากที่โนด K F และ E ได้รับสัญญาณแพ็กเก็ต RREQ



(ง) ภายหลังจากแพ็กเก็ต RREQ แรกไปถึงยัง โหนดปลายทาง B

(จ) สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 2.11 (ก) - (ง)

รูปที่ 2.11 กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV

(4) ก่อนที่โนดจะแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโนดรอบข้างของตัวเอง โหนดจะต้องทำการเพิ่มข้อมูล Hop Count ไปจากเดิมอีก “1” รวมทั้งดึงข้อมูลจากแพ็กเก็ต RREQ เข้าไปเก็บไว้ในตารางเส้นทางเดินข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการสร้างเส้นทางย้อนกลับ (Reverse Route) โดยเส้นทางย้อนกลับนี้จะนำมาใช้เพื่อให้แพ็กเก็ตตอบรับเส้นทาง (Route Reply, RREP) สามารถเดินทางกลับไปยังโนดต้นทางของ RREQ ได้เพราะฉะนั้นโพรโทคอลแบบ AODV จะต้องทำการในลักษณะที่ข่ายเชื่อมโยงมีความเหมือนกันทั้งไปและกลับ (Symmetric Link) โดยที่เส้นทาง

ย้อนกลับนี้จะถูกกำหนดระยะเวลาในการใช้งานไว้ ถ้าในช่วงเวลาที่กำหนดไม่มีการส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางเดินทางมา โหนดก็จะทำการลบข้อมูลของเส้นทางย้อนกลับนี้ทิ้ง

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.11(ข) สมมติว่าโหนด C และ D ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนด B (ไม่มีข้อมูลเส้นทางหรือมีข้อมูลแต่เป็นเส้นทางที่เก่าไม่สามารถใช้งานได้) ฉะนั้นโหนดทั้งสองก็จะสร้างเส้นทางย้อนกลับที่ชี้กลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้ ณ ที่นี้คือชี้กลับไปยังโหนด A ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11(ข) และเพิ่มค่า Hop Count เป็น “1” พร้อมทั้งแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้รับการปรับค่าแล้วไปยังโหนดรอบข้างของตัวเอง แพ็กเก็ต RREQ จากโหนด C จะถูกส่งไปยังโหนด E และ F ขณะที่โหนด F และ K จะได้รับแพ็กเก็ตที่ส่งมาจากโหนด D ดังนั้นโหนด E, F, และ K จะสร้างเส้นทางย้อนกลับและเพิ่มค่า Hop Count แล้วทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดรอบข้างต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ค) จากรูปกำหนดให้โหนด F ได้รับแพ็กเก็ต RREQ จากโหนด C ก่อน (ระยะทางระหว่างโหนด C กับ F สั้นกว่าระยะทางระหว่างโหนด D กับ F) กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งโหนดปลายทาง B ได้รับแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 2.11(ง) โหนดปลายทาง B ก็จะตอบสนองโดยการส่งแพ็กเก็ตจอบรับ RREP เพื่อตอบรับเส้นทางที่ได้ร้องขอมา อีกกรณีหนึ่งจากรูปที่ 2.11(ง) ถ้าสมมติให้โหนด J ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง B และเป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นโหนด J ก็จะทำการตอบรับเส้นทางที่ได้ร้องขอมาโดยการส่งแพ็กเก็ต RREP กลับไปยังโหนดต้นทาง A เช่นกัน

Source address	Destination address	Destination Sequence number	Hop Count	Lifetime
----------------	---------------------	-----------------------------	-----------	----------

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP)

ขั้นตอนในการตอบรับเส้นทางจากที่ร้องขอมานั้น โหนดที่จะทำการตอบรับเส้นทางจะสร้างแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทาง (RREP) ณ รูปที่ 2.11(ง) คือโหนด B โดยโครงสร้างของแพ็กเก็ตแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่ค่า SrcID, DestID ได้จากการสำเนาจาก RREQ ในส่วน DestSeqNum จะเป็นค่าจำนวนนับล่าสุดของโหนด B เอง ส่วน Hop Count จะถูกกำหนดค่าให้เป็น “0” ใหม่และสุดท้ายคือค่าอายุการใช้งานของเส้นทาง (Life Time) ซึ่งเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของเส้นทางนี้ก่อนที่โหนดจะบันทึกว่าเส้นทางนี้ไม่สามารถใช้งานได้ เมื่อกำหนดค่าต่าง ๆ ลงในแพ็กเก็ต RREP แล้วโหนดจะทำการส่งแพ็กเก็ตนี้กลับไปยังโหนดต้นทางโดยผ่านทางเส้นทางย้อนกลับที่ได้สร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ ในกรณีตัวอย่างจะผ่านเส้นทางของโหนด B -> H -> F -> C -> A

ในระหว่างที่แพ็กเก็ต RREP ผ่านโหนดต่าง ๆ กลับไปยังโหนด A โหนดที่อยู่ระหว่างเส้นทางจะทำการตรวจสอบข้อมูลของแพ็กเก็ตและเก็บข้อมูลที่ได้ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลเพื่อใช้ในการเรียนรู้ข้อมูลใหม่ โดยโหนดจะทำการบันทึกข้อมูลใหม่หรือปรับปรุงข้อมูลเก่าที่มีอยู่ถ้าเป็นไปได้ตามเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้ (1) ไม่เคยมีข้อมูลของโหนดปลายทาง B ในตาราง ข้อที่ (2) คือค่า DestSeqNum สำหรับโหนดปลายทาง B ในแพ็กเก็ต RREP มีค่ามากกว่าค่าที่เก็บในตาราง (3) ค่า DestSeqNum มีค่าเท่ากันแต่เส้นทางใหม่มีระยะทางที่สั้นกว่า นอกจากนี้โหนดที่ได้รับแพ็กเก็ต RREP ก็จะช่วยสร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตมาเช่นกันซึ่งเราเรียกเส้นทางนี้ว่าเป็น เส้นทางไปข้างหน้า (Forward Route) เพื่อป้องกันความสับสนกับเส้นทาง reverse route ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จากนั้นเมื่อโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ต RREP ก็เป็นอันว่าจบขั้นตอนกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทาง โหนดก็สามารถส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโหนดถัดไปตามที่ระบุไว้ในเส้นทาง forward route เพื่อส่งข้อมูลไปโหนดปลายทาง B แต่กรณีที่โหนดได้รับแพ็กเก็ต RREP มากกว่าหนึ่งแพ็กเก็ต (สาเหตุมาจากมีบางโหนดทราบข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง B จากตัวอย่างในรูปที่ 2.11 สมมติให้โหนด J ทราบเส้นทางเพราะฉะนั้น โหนดต้นทาง A ก็จะได้รับ RREP ที่ผ่านมาจากเส้นทาง J -> I -> K -> D -> A) ในกรณีนี้โหนดจะทำการตรวจสอบว่าเส้นทางใดมีระยะทางไปยังปลายทาง B ที่สั้นกว่าก็จะสลับไปใช้เส้นทางนั้นในการส่งข้อมูลแทน

2.5.1.2 กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance)

การเคลื่อนที่อย่างอิสระของโหนดในโครงข่ายแอ็ดฮอกทำให้รูปแบบของทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า ทำให้โอกาสที่เส้นทางที่อยู่ระหว่างการสื่อสารระหว่างโหนดใด ๆ สามารถจะขาดหรือเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ตลอดเวลา ดังนั้นโพรโทคอลที่ดีควรมีวิธีการดูแลหรือแจ้งขอผิดพลาดนี้ให้แก่โหนดในโครงข่ายทราบเพื่อจะทำการซ่อมแซมหรือหาเส้นทางใหม่ นอกจากการเคลื่อนที่แล้วโหนดก็อาจจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ทำให้สายเชื่อมโยงที่กำลังใช้งานอยู่เกิดขาดหรือความเสียหาย (Link Failure)

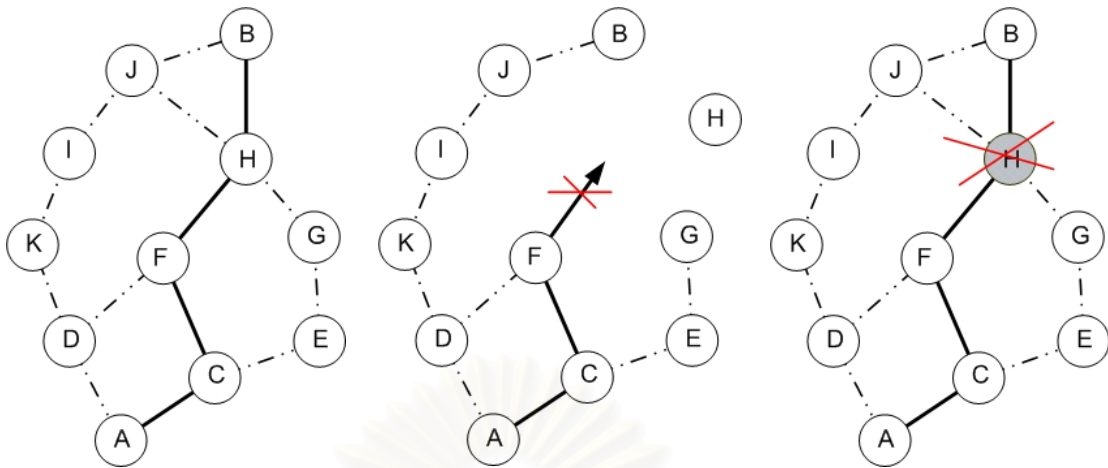
กระบวนการดูแลเส้นทางจะถูกดำเนินเมื่อใดก็ตามที่ โหนดต้นทางเคลื่อนที่ออกนอกระยะการส่งของโหนดถัดไปของเส้นทาง อีกกรณีหนึ่งคือ โหนดระวางที่อยู่ในเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่เคลื่อนที่ออกนอกระยะเส้นทางหรือแบตเตอรี่ของโหนดถูกใช้งานจนหมด (ไม่สามารถจะทำการใด ๆ ได้อีกต่อไป) โดยในกรณีแรกนั้น โหนดต้นทางจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.1.1 แต่กรณีที่ 2 โหนดที่ตรวจพบความผิดพลาด (โหนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไปได้สำเร็จ) จะแจ้งข้อมูลความเสียหายของสายเชื่อมโยงด้วยแพ็กเก็ตแสดงความเสียหาย

(Route Error, RERR) ดังกล่าวไปบอกทุกโหนดก่อนหน้าและโหนดรอบข้างที่ยังทำงานอยู่ (Active neighbor) โดยการใช้หมายเลขแสดงลำดับค่าใหม่คือ ค่าหมายเลขแสดงลำดับที่มากกว่าค่าเดิมอยู่ “1” และจำนวน Hop Count จะถูกตั้งค่าให้เป็นอนันต์ (Infinite) สำหรับโหนดที่ใช้งานอยู่ เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อมูลความเสียหาย จากโหนดที่ตรวจพบความเสียหายแล้ว โหนดต้นทางอาจจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งถ้ายังคงต้องการที่จะติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทางอีก หรือหยุดการทำงาน

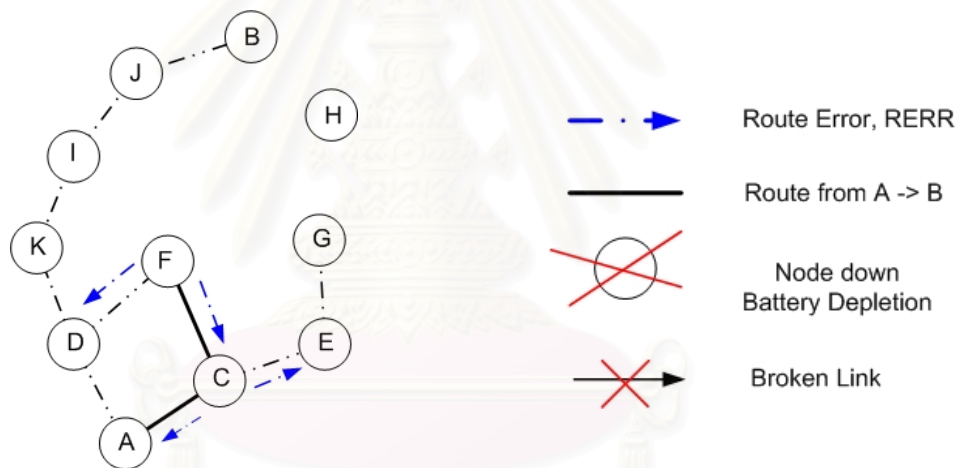
การป้องกันไม่ให้โหนดใช้เส้นทางผ่านไปยังชายเชื่อมต่อที่ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดดังกล่าวอีก โหนดที่ได้ข้อความจากแพ็กเก็ต RERR จะต้องทำการตรวจสอบในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลของตนเองว่ามีเส้นทางใดบางที่ต้องใช้โหนดดังกล่าวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ถ้าตรวจพบว่ามีเส้นทางดังกล่าวโหนดจะทำการลบเส้นทางนั้นทิ้งไป ในส่วนขั้นตอนในการตรวจสอบสถานะของชายเชื่อมต่อว่าเกิดความเสียหายหรือไม่นั้นมีด้วยกัน 2 วิธีคือ การใช้ความสามารถของกระบวนการในชั้นชายเชื่อมต่อและชั้นเครือข่าย

- วิธีแรกคือ ใช้การแพร่กระจายแพ็กเก็ตข่าวสารทักทาย (Hello message) โหนดจะทำการแพร่กระจาย hello message ไปยังโหนดข้างรอบข้างซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลเฉพาะตัวของโหนดนั้นและหมายเลขแสดงลำดับของโหนด โดยที่ค่าหมายเลขแสดงลำดับของโหนดจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงสำหรับการส่ง hello message โดย hello message ได้ถูกป้องกันไม่ให้มีการทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตต่อไปอีกครั้งหลังจากได้รับมาในครั้งแรกด้วยการตั้งค่า Time To Life (TTL) เท่ากับ 1 ภายหลังจากที่โหนดรอบข้างได้รับแพ็กเก็ตดังกล่าวแล้วโหนดก็จะต้องทำการปรับปรุงข้อมูลการเชื่อมต่อท้องถิ่น (Local Connectivity) แต่ถ้าโหนดไม่ได้รับ hello message เป็นจำนวน allowed_hello_loss ติดต่อกันหรือช่วงเวลาที่กำหนดจากโหนดรอบข้าง นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อท้องถิ่นจากเดิมออกไป (ชายเชื่อมต่อเกิดความเสียหายหรือไม่มีการเชื่อมต่อกัน) ซึ่งถ้าเป็นกรณีที่ไม่ได้รับจากโหนดรอบข้างที่ใช้งานในการส่งข้อมูลอยู่ โหนดก็จะตัดสินใจว่าชายเชื่อมต่อถัดไปเกิดความเสียหายไม่สามารถส่งข้อมูลต่อไปได้

- วิธีที่สองคือ การใช้ link-layer notification ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้จากมาตรฐาน IEEE 802.11 [28] โดยแต่ละครั้งที่มีการส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดถัดไปที่กำลังใช้งานอยู่ โหนดจะต้องมีการตรวจสอบการเชื่อมต่อเช่น ไม่ได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับจากการส่ง (Acknowledge) หรือไม่ได้รับแพ็กเก็ต Clear to send (CTS) หลังจากส่ง Ready To Send (RTS) ออกไป



(ก) ทอพอโลยีของโครงข่าย (ข) โหนด H เคลื่อนที่ออกนอก (ค) โหนด H ใช้พลังงานจาก
 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ เส้นทางการสื่อสาร ค้นหาเส้นทาง แบตเตอรี่หมดระหว่างกา
 รสื่อสาร



(ง) โหนด F แจ้งความเสียหายที่เกิดขึ้นของข่าย (จ) สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในรูปที่ 2.13
 เชื่อมโยง F - H ให้กับโหนดที่เกี่ยวข้อง (ก) - (ง)

รูปที่ 2.13 กระบวนการดูแลเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีแรกคือ การใช้แพ็กเก็ตข่าวสารตกทายในการตรวจจับความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยงและตรวจสอบสถานะของการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น เนื่องจากวิธีนี้ทำให้โหนดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วแตกต่างจากวิธีที่สองที่ต้องรอจนกว่าจะมีการรับส่งแพ็กเก็ตระหว่างโหนดขึ้นจริง ๆ จึงจะสามารถตรวจจับข้อผิดพลาดได้ ซึ่งผลดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีการแบบแพ็กเก็ตข่าวสารตกทายที่จะต้องใช้จำนวนโอเวอร์เฮด (Overhead) แพ็กเก็ตมากขึ้นเพื่อตรวจจับการ

ทำงานดังกล่าว นอกจากนั้นวิธีที่สองเป็นวิธีที่ไม่มีความสามารถในการพิจารณาว่าโหนดใดเป็นโหนดรอบข้าง (มีการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์มากขึ้นซึ่งจะกล่าวรายละเอียดอีกครั้ง

ตัวอย่างกระบวนการดูแลเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ขอให้พิจารณาตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.13(ก) แต่โหนด H เคลื่อนออกนอกเส้นทาง (รูปที่ 2.13(ข)) หรือโหนดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่จนหมดขณะกำลังส่งข้อมูลอยู่ (รูปที่ 2.13(ค)) ทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายเกิดความเปลี่ยนแปลงและทำให้โหนด F ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนด H เพื่อไปยังปลายทาง B เมื่อโหนด H ตรวจพบว่าชายเชื่อมโยงระหว่างโหนด H และ F เกิดความเสียหายโหนด H จะตรวจสอบข้อมูลในตารางเส้นทางเดินข้อมูลของตนเองซึ่งแสดงในตารางที่ 2.3 และพบว่าโหนด H ถูกใช้เป็นเส้นทางไปยังโหนด B และโหนดรอบข้างที่ยังทำงานอยู่ของทุกเส้นทางรวมกันคือ โหนด C, D, และ E ซึ่งหมายความว่าโหนดเหล่านี้จะต้องใช้เส้นทางโหนด H ไปยังโหนดอื่น ๆ ดังนั้นโหนดดังกล่าวภายหลังจากได้รับแพ็กเก็ต RERR จากโหนด F จะต้องทำการปรับปรุงหรือลบข้อมูลที่เกี่ยวข้องทิ้งและจะส่งแพ็กเก็ต RERR ต่อไปจนกระทั่งโหนดต้นทาง A ได้รับแพ็กเก็ต RERR ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.13(ง) ต่อจากนั้นโหนด A จะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งหรือจบการทำงาน

ตารางที่ 2.3 ตารางเส้นทางเดินข้อมูลของโหนด F

Dest.	Next Hop	Distance	Active neighbor	Other fields
A	C	2	H	...
B	H	2	D, C	...
C	C	1	H	...
D	D	1	C, H	...
E	C	2	D, H	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2.5.2 ผลกระทบของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเมื่อพิจารณาถึงข้อจำกัดทางด้านพลังงานจากแบตเตอรี่และคุณภาพของช่องสัญญาณ (หรือชายเชื่อมโยง)

ในส่วนนี้จะชี้ให้เห็นว่าการอนุรักษ์พลังงานมีความสำคัญมากสำหรับการทำงานในโครงข่ายแบบแอดฮอก นอกจากนั้นเพื่อให้การทดสอบใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุดนั้นการรับส่งแพ็กเก็ตจะต้องพิจารณาถึงคุณภาพของชายเชื่อมโยง โดยจะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV มาทำการทดสอบภายใต้ข้อจำกัดทั้งสองข้อดังนี้ แบบที่หนึ่งเป็นการใช้โพรโทคอลแบบ AODV ทดสอบโดยไม่มีการพิจารณาถึงพลังงาน (โหนดมีพลังงานเป็นอนันต์) และ

ไม่คำนึงถึงคุณภาพของข่ายเชื่อมโยงซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ (AODV) แบบที่สองเป็นการใช้โพรโทคอล AODV ทดสอบภายใต้การพิจารณาข้อจำกัดทางด้านพลังงานซึ่งแสดงด้วย (AODV-E) ซึ่งจะกำหนดให้แต่ละโหนดมีพลังงานจากแบตเตอรี่ที่จำกัดค่าหนึ่ง แต่ไม่พิจารณาคุณภาพของข่ายเชื่อมโยง และแบบสุดท้ายคือการใช้โพรโทคอล AODV ทดสอบภายใต้ข้อจำกัดทั้งสองอย่างพร้อมกันแสดงแทนด้วย (AODV-EL) โดยจะใช้ตัววัด 3 ตัวเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายสำหรับการทดลองทั้ง 3 แบบ

- สภาพแวดล้อมและแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองการทำงานจะใช้โปรแกรม Network Simulator 2 เวอร์ชัน 2.8 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำงานในลักษณะ Discrete Event โดยพารามิเตอร์หลักที่ทั้งสามรูปแบบจะต้องใช้เหมือนกันแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

Simulation Area	1000 m × 1000 m	Num. of connection	20
Traffic Type	Constant Bit Rate	Mobility model	Random Waypoint [34]
Number of nodes	50 node	Max. Mobile speed	10 m/s
Packet Size	512 Bytes	Pause Time	100 sec
Packet Rate	4 Packet/sec	Simulation Time	900 sec

ในการจำลองแบบที่สอง (AODV-E) และสาม (AODV-EL) โหนดจะต้องถูกจำกัดในเรื่องของพลังงานที่สามารถใช้ได้ ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ทุกโหนดมีพลังงานเริ่มต้นเท่ากันทั้งหมดและเริ่มต้นที่ 10 จูล (Joules) ส่วนในแบบที่สามที่จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพของข่ายเชื่อมโยงในการทดสอบนี้ ดังนั้นได้ทำการดัดแปลงโปรแกรม NS2 เพื่อให้สามารถรองรับการพิจารณาตรงจุดนี้ได้ โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พิจารณาคุณภาพของข่ายเชื่อมโยงได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.4.2

ตัววัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพทั้ง 3 มีดังนี้ อัตราส่วนของแพ็กเก็ตที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่โหนดส่งออกมา (Packet Delivery Ratio, PDR) โอเวอร์เฮดของการจัดสรรเส้นทาง (Overhead Routing Load, ORL) และสุดท้าย ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากต้นทางไปปลายทาง (Average End-to-End Delay, AE2E)

- ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในตารางที่ 2.5 แสดงผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง เมื่อพิจารณาค่า DDR จะเห็นได้ว่าจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ AODV-E เนื่องจาก AODV-E มีจำกัดด้านพลังงาน โดยทุกการทำงานงานทั้งการส่ง การรับ และการฟังช่องสัญญาณล้วนแล้วแต่จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ทั้งนี้ เพราะฉะนั้นเมื่อเน็ตทำงานไปได้ระยะหนึ่ง ก็จะมีเน็ตบางส่วนที่ไม่สามารถจะทำงานได้ เพราะหมดพลังงาน ซึ่งก็ยังคงส่งผลทำให้โครงข่ายเกิดการแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ (Network Partitions) สิ่งต่าง ๆ นี้ทำให้ค่า DDR ลดลง และแบบ AODV-EL จะให้ค่าที่ต่ำที่สุดเพราะเกิดจากผลกระทบของความผิดพลาดข่ายเชื่อมโยงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากการเคลื่อนของเน็ตและสัญญาณแทรกสอดและอื่น ๆ อีกมาก

ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองของโพรโทคอลแบบ AODV AODV-E และ AODV-EL

Model \ Metrics	AODV	AODV-E	AODV-EL
Packet Delivery Ratio	68.212	33.322	24.093
Overhead Routing Load (MB)	4.6264	2.3388	3.5754
Average End-to-End Delay (sec)	0.4054	0.5263	0.5591

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นทำให้ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยของ AODV-EL นั้นมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาคือ AODV-E ส่วน AODV ในค่าที่ต่ำที่สุดเพราะว่าโอกาสที่แพ็กเกตที่ส่งโดยใช้ AODV-EL นั้นเกิดความผิดพลาดที่สูงกว่าแบบ AODV และ AODV-E ส่วนค่า Overhead Routing Load ที่แสดงในตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า AODV จะมีค่าโอเวอร์เฮดมากที่สุด ทั้งนี้ก็ เพราะว่าตลอดทั้งการทดลอง 900 วินาทีที่ทำการทดลองนั้น ทุกเน็ตอยู่ครบทั้งหมดและยังมี ส่วนรวมในขั้นตอนการจัดสรรเส้นทางและดูแลเส้นทางที่จะต้องมีการแพร่กระจายแพ็กเกตการจัดการเส้นทางเป็นจำนวนมาก แต่ถ้าเมื่อจำนวนเน็ตที่สามารถจะปฏิบัติงานได้ลดลงแน่นอนว่า จำนวนของโอเวอร์เฮดแพ็กเกตก็จะลดลงตามไปด้วยและ AODV-EL จะให้ค่าอยู่ระหว่าง AODV และ AODV-E เพราะว่าการพิจารณาคุณภาพของข่ายเชื่อมโยงเข้าไปนั้น เหมือนกับเพิ่มโอกาส ความผิดพลาดของข้อมูลมากขึ้น ดังนั้นเมื่อโอกาสที่แพ็กเกตเกิดความผิดพลาดมากขึ้น ก็จะส่งผล ทำให้เพิ่มขึ้นขั้นตอนการจัดสรรเส้นทางและดูแลเส้นทางมากขึ้น

จากผลการทดลองโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในหัวข้อที่ 2.5.2 ได้ชี้ให้เห็นว่าข้อจำกัด ด้านพลังงานของเน็ตในโครงข่ายแบบแอดฮอกไม่เพียงแต่เกิดผลกระทบต่อเน็ตที่หมดพลังงาน

เท่านั้นแต่ยังส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบในทางลบอีกด้วย เพราะฉะนั้นแล้วในการออกแบบการทำงานของโพรโทคอลในชั้นต่าง ๆ ควรจะคำนึงถึงการอนุรักษ์พลังงานเพื่อให้โนดสามารถใช้งานได้นานที่สุด และสาเหตุที่ทำให้เราจะยืดอายุการใช้งานของโนดให้มากที่สุดนั้นจะต้องย้อนกลับไปดูคุณลักษณะการทำงานสำหรับโครงข่ายแอตฮอกซึ่งคำตอบก็คือ ในโครงข่ายแบบแอตฮอกกำหนดให้โนดทุกโนดจะต้องทำงานร่วมกัน เพื่อให้โครงข่ายเกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการยืดอายุการใช้งานของโนดก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสหรือเวลาที่โนดจะทำงานร่วมกันมากขึ้น และส่วนของคุณภาพของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามานั้น เพื่อให้การจำลองนั้นใกล้เคียงกับสภาพการทำงานในความเป็นจริงมากที่สุด และนี่เป็นประเด็นให้นักวิจัยได้หันมาให้ความสนใจการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นหรือมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในหัวข้อที่ 2.6 จะกล่าวรายละเอียดของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่พิจารณาถึงวิธีการอนุรักษ์พลังงานของโครงข่ายที่เคยถูกนำเสนอและได้รับความสนใจเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่จะนำเสนอ

2.6 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลัง (Power-Aware Routing Protocols)

มีบทความวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบเพื่อปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายแอตฮอกให้มีคุณภาพด้านการอนุรักษ์พลังงาน โดยการพยายามเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้สามารถใช้งานได้นานที่สุดหรือลดการใช้พลังงานของโนดก่อนที่จะแก้ไขปัญหาที่ทุก ๆ บทความได้ตั้งคำถามขึ้นมาเหมือนกันคือ “*ทำอย่างไรจึงจะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานและยืดอายุการใช้งานของโนดให้มากที่สุด*” ซึ่งเป็นคำถามที่ตามมาหลังจากคำถามที่ว่าทำไมพลังงานจึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับโครงข่ายแอตฮอก (ในหัวข้อที่ 2.5.2) โดยทั่วไปการออกแบบโพรโทคอลเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะมีตั้งแต่ชั้นกายภาพ (Physical layer) ไปจนถึงชั้นประยุกต์การใช้งาน (Application layer) โดยแต่ละชั้นของการสื่อสาร จะมีวิธีในการพัฒนาในส่วนการอนุรักษ์พลังงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละชั้นการสื่อสาร แต่ทั่วไปสามารถแบ่งวิธีการอนุรักษ์พลังงานในโครงข่ายแอตฮอกออกเป็น 3 แบบคือ แบบแรกคือ การควบคุมกำลัง (Power control) แบบที่สองเป็นการจัดการกำลัง (Power management) และในแบบของการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power-Aware Routing) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะยึดแนวทางของการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลังมาใช้แก้ปัญหา เพราะเป็นแนวทางที่ไม่มีความซับซ้อนในการแก้ปัญหานอกจากนั้น ยังเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพในด้านพลังงานอยู่ในระดับที่ค่อนข้างดี โดยรายละเอียดของวิธีการแบบการควบคุมกำลังและการจัดการกำลังจะไม่กล่าวถึง ณ ส่วนนี้เพราะได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่

2.3 แต่จะมาเจาะลึกในวิธีการแบบการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลังเพื่อนำมาเป็นแบบอย่างในการพัฒนาโพรโทคอลที่จะนำเสนอให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power-Aware Routing protocols) จะเน้นเรื่องการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในชั้นเครือข่ายเพื่อจุดประสงค์สองประการคือ “ทำอย่างไรให้เครือข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด” หรือ “ทำให้โหนดหรือเครือข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุด” ซึ่งยังสามารถแบ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลังออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ ประเภทแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols) ประเภทที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware Routing Protocols) สุดท้ายเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols) โดยจัดแบ่งตามทรัพยากรที่นำมาใช้เป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด (Optimal route) อย่างเช่น ระดับความจุของแบตเตอรี่ กำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ พลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เป็นต้น

2.6.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่ง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังมีเป้าหมายหลักในการออกแบบเพื่อ “ลดการใช้พลังงานรวมให้มากที่สุด (Minimizing the total energy consumption)” โดยนำปัจจัยและเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงการใช้งานของโหนดหรือเครือข่ายเชื่อมโยงมากำหนดเป็นค่าต้นทุน โดยจะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดจากเส้นทางที่ใช้ค่าต้นทุนต่ำที่สุด ตัวอย่างของปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนอย่างเช่น กำลังส่งของโหนด (Transmission Power) พลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (Transmission Energy) พลังงานที่ใช้ในการจองช่องสัญญาณ เป็นต้น ต่อไปจะกล่าวถึงโพรโทคอลที่ถูกรับรองและได้รับความสนใจมาก่อนหน้านี้

2.6.1.1 Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR) [8]

ในบทความอ้างอิงนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Transmission Power Routing (MTPR) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของโหนดในเครือข่าย ซึ่งโพรโทคอล MTPR ได้กำหนดค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i กับโหนด j เป็นกำลังที่โหนด i ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโหนด j ได้อย่างสำเร็จ ซึ่งแสดงแทนด้วย $P(n_i, n_j)$ เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนรวมสำหรับเส้นทาง l แสดงแทนด้วย (C_l) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

$$C_l = \sum_{i=1}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (2.10)$$

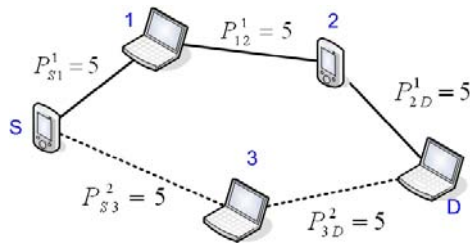
เมื่อ n_0 และ n_D เป็นโนดต้นทางและโนดปลายทางตามลำดับ ดังนั้นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR จะเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดเพื่อช่วยให้โนดในโครงข่ายใช้พลังงานลดต่ำลง ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังต่ำที่สุดนั้นจะทำการเลือกจากเซตของเส้นทางที่เป็นได้ทั้งหมด (A) ตามสมการที่ (2.11) ซึ่งโนดปลายทางจะเป็นผู้ทำการตัดสินใจ

$$P_r = \min_{l \in A} P_l \quad (2.11)$$

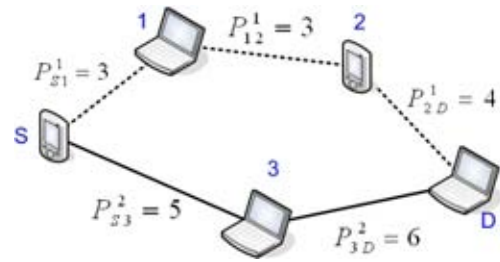
เมื่อ P_r แสดงเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมต่ำที่สุด แต่ด้วยความสามารถของอุปกรณ์ไร้สายที่แตกต่างกันคือใช้กำลังส่งคงที่และกำลังส่งปรับเปลี่ยนได้อย่างพลวัต ซึ่งทั้งสองแบบจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันดังนี้

- ในกรณีที่กำหนดให้กำลังส่งของทุก ๆ โหนดในโครงข่ายมีค่าคงที่ (Constant-Power) จากข้อกำหนดนี้ทำให้เส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อต่ำที่สุดหรือเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเส้นทางที่มีกำลังส่งรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งพิจารณาได้จากตัวอย่างในรูปที่ 2.14 จากรูปกำหนดให้ $P_k(n_i, n_j)$ เป็นค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และโนด j บนเส้นทาง k ซึ่งจะมีค่า $P(n_i, n_j) = C$ (ค่าคงที่), $\forall (i, j) \in E$ เมื่อ E เป็นเซตของเส้นเชื่อม (Edges) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในโครงข่าย เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ใช้กำลังรวมต่ำที่สุดคือ เส้นทางที่ 2 ประกอบด้วยโนด S - 3 - D ซึ่งใช้พลังงานไปเป็น 10 หน่วย เพราะฉะนั้นแล้ว ในกรณีนี้จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-Path) ของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั่ว ๆ ไปเช่น AODV, DSR, DSDV และอื่น ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

- อีกกรณีหนึ่งคือ โหนดมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่งได้อย่างพลวัต (Variable - Power) โดยกำลังที่ใช้ส่งจะถูกเลือกตามระยะห่างระหว่างโนดตัวส่งและโนดตัวรับ กล่าวคือ โหนดที่อยู่ห่างกันมาก ตัวส่งก็ต้องส่งด้วยกำลังที่สูงขึ้น (ตามลักษณะการส่งสัญญาณผ่านตัวกลางไร้สายสัญญาณจะถูกลดทอนมากขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น) ดังนั้นการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อมาก ๆ ซึ่งในแต่ละช่วงเชื่อมต้อมีระยะทางที่สั้น เนื่องจากจะใช้พลังงานสูงกว่าถ้าเลือกเส้นทางที่มีช่วงเชื่อมต่อน้อยแต่ระยะห่างของช่วงเชื่อมต่อนั้นยาว จากรูปที่ 2.15 แสดงการจัดสรรเส้นทางที่กำลังส่งรวมต่ำที่สุดในกรณีที่กำลังส่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งจะเลือกให้เส้นทางที่ 1 ประกอบด้วยโนด S - 1 - 2 - D ซึ่งใช้พลังงานไป 10 หน่วย



รูปที่ 2.14 การจัดสรรเส้นทางในกรณีที่กำหนดให้กำลังส่งเป็นค่าคงที่



รูปที่ 2.15 การจัดสรรเส้นทางในกรณีที่กำลังส่งมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนได้

2.6.1.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks [9]

ในบทความอ้างอิง [9] เสนอตัวชี้วัด 5 ตัวซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาตัววัด 2 ตัวคือ “Minimize energy consumed per packet และ Minimize cost per packet (โดยค่า Cost อาจจะเป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งหรือรับ)” เพื่อนำมาใช้แทนการจัดสรรเส้นทางแบบเดิม โดยมองว่าถ้าเลือกใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่อหนึ่งแพ็กเก็ตที่มีค่าต่ำที่สุดก็จะทำให้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายมีค่าที่ต่ำด้วย

อย่างไรก็ตามเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งแพ็กเก็ตในหนึ่งช่วงเชื่อมต้อมีค่าคง (ในกรณีกำลังส่งคงที่) ผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะเหมือนกับกรณีการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (กรณีที่โครงข่ายมีโหลดต่ำ ๆ) แต่ถ้าคำนึงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการแย่งชิงช่องสัญญาณของข้อมูลที่จะส่ง ผลที่ได้จะแตกต่างออกไปจากข้างต้นในกรณีที่มีปริมาณโหลดสูง ๆ โดยเส้นทางที่ได้จะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่ง (Congestion) สูง ๆ

การใช้ตัววัดนี้ถึงแม้ว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานโดยรวมได้แต่ไม่ได้ช่วยรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในแต่ละโหนดเนื่องจากบางโหนดที่อยู่ในเส้นทางจะต้องรับภาระในการส่งแพ็กเก็ตเป็นจำนวนมากและทำให้โหนดดังกล่าวหมดอายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็วหรือกล่าวได้ว่าถ้าต้องการออกแบบโปรโตคอลเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย การใช้ตัววัดนี้อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณา

2.6.1.3 Reliable Energy-Aware Routing Protocol (RA) [10]

ในบทความอ้างอิง [10] กล่าวว่า “การใช้พลังงานในการส่งแพ็กเก็ตเพียงอย่างเดียวเป็นตัวชี้วัดนั้นอาจจะไม่ได้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดสำหรับในกรณีที่จะต้องรับรองความถูกต้องของการส่งแพ็กเก็ตจากต้นทางไปยังปลายทาง” เพราะการส่งแพ็กเก็ตผ่านเชื่อมโยงไร้สายมีโอกาสที่แพ็กเก็ตจะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นระหว่างการส่งเนื่องด้วยผลกระทบจากหลาย ๆ สาเหตุตั้งที่ได้กล่าว

ไว้ข้างต้น ซึ่งก็ยอมส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงาน ในบทความนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการ จัดสรรเส้นทางแบบ Reliable Energy Aware Routing (RA) ซึ่งกำหนดให้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง ไม่เพียงแต่เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตผ่านข่ายเชื่อมโยง แต่รวมถึงพลังงานที่สะท้อนให้เห็น ถึงผลกระทบของความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Link error rate) ซึ่งพลังงานที่ใช้ในส่วนหลังนี้ ก็คือ พลังงานที่ต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตซ้ำ (Retransmission)

สมมุติว่าทุกโหนดมีกำลังส่งคงที่และอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยงระหว่าง โหนด i และ j เป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ ดังนั้นเราสามารถนิยามความน่าจะเป็นใน การส่งแพ็กเก็ตซ้ำบนข่ายเชื่อมโยงหรืออัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวได้ เป็น $p_{i,j}$ แต่เนื่องจากมาตรฐาน IEEE802.11 ได้กำหนดให้มีการแก้ไขความผิดพลาดแบบ ARQ ที่สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภทคือ Hop-by-Hop Retransmission และ End-to-End Retransmission ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.3 ในแต่ละวิธีจะให้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงที่ แตกต่างกันดังนี้

- การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อน (Hop-by-Hop Retransmission or HHR)

วิธีการนี้สามารถคำนวณค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ซึ่งแสดงด้วย $C_{i,j}$ ได้ดังนี้

$$C_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{1 - p_{i,j}} \quad (2.12)$$

เมื่อ $E_{i,j}$ เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตจากโหนด i ไปยังโหนด j (ในกรณีกำลัง ส่งคงที่ค่า $E_{i,j}$ มีค่าคงที่สำหรับทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงและ $p_{i,j}$ ขึ้นอยู่กับระยะทางแต่ในกรณีที่กำลัง ส่งสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างพลวัติ ค่า $E_{i,j}$ มีค่าขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโหนด i และ j ส่วน ค่า $p_{i,j}$ จะมีค่าคงที่) เพื่อให้สอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ทุกโหนด มีกำลังส่งคงที่และเท่ากันทั้งหมด เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนพลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทาง (Energy route cost) จากโหนดต้นทาง (1) ถึงโหนดปลายทาง (D) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$E_P = \sum_{i=1}^{D-1} \frac{E_{i,i+1}}{1 - p_{i,i+1}} \quad (2.13)$$

- การส่งซ้ำระหว่างปลายทาง (End-to-End Retransmission or EER)

กรณีนี้การส่งข้อมูลที่ผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ บนเส้นทางนำไปสู่การส่งซ้ำใหม่จากโหนดต้นทางบนเส้นทางนั้น เพราะฉะนั้นพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาจะไม่เป็นอิสระกับอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ บนเส้นทางเหมือนในกรณีข้างต้น กล่าวได้ว่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะส่งผลกระทบต่อการศึกษาความผิดพลาดแพ็กเก็ตของข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ บนเส้นทาง ดังนั้นเราไม่สามารถคำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายเชื่อมโยงแยกกันได้ แต่ค่าต้นทุนพลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางจากโหนดต้นทาง (1) ถึงโหนดปลายทาง (D) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.14)

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^{D-1} E_{i,i+1}}{\prod_{i=1}^{D-1} (1 - p_{i,i+1})} \quad (2.14)$$

อย่างไรก็ตามในบทความอ้างอิง [10] ได้พยายามที่จะประมาณค่าต้นทุนพลังงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยงเพื่อให้สามารถนำมาใช้กับกระบวนการค้นหาเส้นทางได้ โดยจะพิจารณาเป็นค่าประมาณต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ซึ่งแสดงด้วย $C_{i,j}^{approx}$ ดังนี้

$$C_{i,j}^{approx} = \frac{E_{i,j}}{(1 - p_{i,j})^L} \quad (2.15)$$

เมื่อ L เป็นค่าเฉลี่ยของความยาวของเส้นทางในโครงข่าย จากจุดนี้ทำให้การคำนวณค่าต้นทุนพลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางแตกต่างจากสมการที่ (2.14) โดยสามารถคำนวณแทนได้จากสมการที่ (2.16)

$$E_p \sim \sum_{i=1}^{D-1} \frac{E_{i,i+1}}{(1 - p_{i,i+1})^L} \quad (2.16)$$

ในบทความอ้างอิง [10] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RA กับโพรโทคอลแบบต่าง ๆ (Minimum Energy, Shortest Path) ภายใต้สถานการณ์ที่โหนดไม่มีการเคลื่อนที่และทำการสุ่มค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตให้กับแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยค่าที่สุดอยู่ระหว่าง $(0, p_{max})$ โดยจะทำการเปรียบเทียบอัตราการประหยัดพลังงานของแต่ละโพรโทคอลโดยทำการปรับเปลี่ยนค่า p_{max} ตั้งแต่ 0.1 – 0.6 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ทั้งกรณี HHR และ EER สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้มากเมื่อเทียบกับการเลือกเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำสุด (ซึ่งในการทดลองนี้จะให้ผลเหมือนกับกรณีของการเลือกเส้นทางสั้นที่สุด) และยัง

ทำให้ปริมาณงานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังกล่าวได้ว่าภายใต้การทำงานของโครงข่ายแบบ แอดฮอก การใช้วิธี HHR จะให้ผลที่ดีกว่าทั้งในด้านการประหยัดพลังงานและปริมาณงานเมื่อเทียบกับวิธีการแบบ EER เนื่องจากการทำงานในโครงข่ายแอดฮอกนี้แต่ละข่ายเชื่อมโยงมีความ น่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่สูง และเนื่องจากโหนดต้นทางไม่สามารถที่จะรอในปลายทาง ตอรับการส่งแพ็กเก็ตก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตถัดไปได้ เพราะวิธีการแบบ EER จะทำให้เสียเวลามาก และอาจจะทำให้เส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตอยู่อาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปแล้วก็ได้

2.6.1.4 Energy Efficient AODV Routing in CDMA Ad Hoc Networks Using Beamforming

ในบทความอ้างอิง [11] ได้มองการทำงานร่วมกันระหว่างสองชั้นการสื่อสารคือ ชั้น โครงข่ายและชั้นกายภาพ เพื่อจะเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน โดยในชั้นเครือข่าย กำหนดให้โหนดใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งต่ำที่สุด นอกจากนี้ยัง พิจารณาพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตซ้ำด้วย ซึ่งก็จะเหมือนกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง แบบ RA ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.1.3 ส่วนชั้นกายภาพได้ใช้เสาอากาศแบบกำหนดทิศทาง การส่งได้ ซึ่งการใช้เสาอากาศแบบกำหนดทิศทางได้เข้ามาช่วยในการทำงานร่วมกับ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางนั้นสามารถที่จะช่วยลดสัญญาณแทรกสอดและเพิ่มแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ซึ่งก็ส่งผลทำให้โครงข่ายช่วยประหยัดพลังงานได้มาก

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้เสาอากาศแบบกำหนดทิศทางได้เข้ามาช่วย เสริมการทำงานของโพรโทคอลที่พิจารณาพลังงานในการเลือกเส้นทางนั้น สามารถช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงานและสามารถลดจำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮด

2.6.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดโดยมีเป้าหมายหลักใน การออกแบบเพื่อ “ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด (Maximizing the network lifetime)” โดยพยายามรักษาสมดุลการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนดให้มากแทนที่จะลดการใช้ พลังงานเหมือนกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง เพราะการ ใช้เทคนิคแบบรู้พลังงาน ไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้มากนัก โดยวิธีนี้นำปัจจัย และเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโหนดหรือข่ายเชื่อมโยงมากำหนดค่าต้นทุนหลักใน การพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนอย่างเช่น ระดับ ความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) อัตราการลดลงของระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery

Drain Rate) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Battery Life) เป็นต้น โพรโทคอลที่ถูกนำเสนอและได้รับความสนใจมีดังนี้

2.6.2.1 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks [9]

Singh et al [9] นอกจากได้เสนอตัวชี้วัดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังได้เสนอตัวชี้วัดอีกหนึ่งตัวคือ “Minimize maximize node cost” ในกรณีของ Minimize cost per packet ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นต่อมา ได้รับการพัฒนามาเป็นโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ Minimize Battery Cost Routing (MBCR) ส่วนกรณีของ Minimize maximize node cost ได้รับการพัฒนาไปเป็นโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR) ซึ่งทั้งสองมีหลักการการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้

- **Minimize Battery Cost Routing (MBCR)**

โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ MBCR มีจุดประสงค์ในการออกแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโหนดในโครงข่าย โดยมีหลักการว่าไม่ควรให้โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดที่ต่ำอยู่ร่วมในเส้นทางหรือ กล่าวได้ว่าพยายามหลีกเลี่ยงการใช้งานโหนดที่มีความจุแบตเตอรี่ที่ต่ำนั่นเอง

โดยกำหนดให้ C'_i เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนด n_i ณ เวลา t ซึ่งมีค่าที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (0 หมายถึงความจุของแบตเตอรี่เป็นศูนย์และ 1 หมายถึง ระดับความจุของแบตเตอรี่มีอยู่เต็ม) ถ้ามองในแง่ของความพึงพอใจในการส่งต่อ (Forward) แพ็กเก็ตแล้ว โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำจะไม่ค่อยมีความสมัครใจมากนัก จากจุดนี้ทำให้ผู้เสนอได้กำหนดฟังก์ชันต้นทุนของแบตเตอรี่ ($f_i(c'_i)$) สำหรับแต่ละโหนด n_i ตามสมการที่ (2.17) ซึ่งขึ้นอยู่กักระดับความจุที่เหลืออยู่ของโหนด ณ ปัจจุบัน

$$f_i(c'_i) = 1/c'_i \quad (2.17)$$

จากสมการหมายความว่าถ้าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนดลดลงค่าฟังก์ชันต้นทุนของโหนด n_i จะเพิ่มขึ้น โดยในระหว่างขั้นตอนกระบวนการจราจรเส้นทางที่โหนดต้นทางทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง ทุก ๆ โหนดจะต้องทำการคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนตามสมการที่ (2.17) ยกเว้นโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง และเมื่อไม่ใช้โหนดปลายทางก็จะต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไปเรื่อย ๆ แต่ก่อนที่จะแพร่กระจายออกไป โหนดจะต้องรวมค่าฟังก์ชันต้นทุนที่คำนวณได้กับค่าฟังก์ชันต้นทุนของทุกโหนด

ก่อนหน้าทั้งหมดแล้ว จากนั้นก็เก็บค่าที่ได้ไว้ ณ ส่วนหัวของแพ็กเก็ต กระบวนการนี้จะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง ซึ่งโหนดปลายทางก็ได้ข้อมูลค่าต้นทุนแบตเตอรี่ (Battery Cost) ของแต่ละเส้นทางซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$R_p = \sum_{i=0}^{D-1} f_i(c_i^t) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) เป็นตัวอย่างการคำนวณค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง P ซึ่งประกอบไปด้วยโหนด 0 ซึ่งเป็นโหนดต้นทางไปยังโหนด D ซึ่งเป็นโหนดปลายทาง ดังนั้นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงก็จะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้คือ เส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางต่ำที่สุด สมมติว่าเส้นทาง P^* เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.19)

$$R_{p^*} = \min \{ R_p | P \in A \} \quad (2.19)$$

เมื่อ A เป็นเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง เพราะฉะนั้น MBCR สามารถป้องกันไม่ให้โหนดมีการใช้พลังงานมากเกินไป ซึ่งก็สามารถทำให้โครงข่ายยืดอายุการใช้งานไปได้ อย่างไรก็ตามผลเสียของการใช้ค่าที่เกิดจากการบวกของแต่ละ $f_i(c_i^t)$ มาเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางคือ ในเส้นทางที่ได้รับการพิจารณาว่าเป็นเส้นทางที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงสุดนั้น อาจจะประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับพลังงานที่ต่ำร่วมอยู่ก็ได้ ต่อมาทางผู้เสนอจึงได้พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นมาเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นซึ่งนั่นก็คือวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR) ที่กำลังจะกล่าวต่อไป

- Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR)

ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ได้ทำการดัดแปลงค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง P จากค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางตามสมการที่ (2.18) ข้างต้นที่ได้นำเสนอไว้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการที่ (2.20)

$$R_p = \max_{i \in \text{route } P} f_i(c_i^t) \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) สามารถตีความหมายได้ว่า ในเส้นทาง P โหนดใดที่มีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ต่ำที่เหลืออยู่ต่ำที่สุดหรือมีค่า $f_i(c_i^t)$ สูงที่สุดก็จะถูกกำหนดให้ค่าดังกล่าวของโหนดนั้นเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่

เหมาะสมที่สุดสำหรับโพรโทคอลแบบ MMBCR ยังคงใช้สมการเดิมคือ สมการที่ (2.19) ซึ่งทำให้เราสามารถมองภาพรวมของโพรโทคอลนี้ได้ว่า เส้นทางที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงจากโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ที่ต่ำที่สุดของแต่ละเส้นทาง จากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพราะฉะนั้น วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR จะรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ดีกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR

2.6.2.2 A Fully Distributed Routing Algorithm for Maximizing Lifetime of a Wireless Ad Hoc Network [16]

ในบทความอ้างอิง [16] ได้ออกแบบโพรโทคอลที่มีลักษณะการทำงานแบบ Fully Distributed โดยได้อ้างว่า ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากสมการที่ (2.19) สำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ MBCR และ MMBCR โหนดที่เป็นตัวตัดสินใจเลือกเส้นทางจะต้องมีข้อมูลทั้งหมดหรือมากที่สุดจึงจะทำให้ได้เส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งการที่จะได้ข้อมูลทั้งหมดนั้นจะต้องมีการทำงานแบบรวมศูนย์ ซึ่งก็ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการทำงานภายในโครงข่าย แอดฮอก นอกจากนี้ ในขั้นตอนของการป้องกันไม่เกิดลูบของเส้นทางที่กำหนดให้ในระหว่างทำการลบแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางที่ซ้ำที่ อาจจะทำให้โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงถูกบล็อกไม่ให้อยู่ในเส้นทางก็เป็นไปได้

ในบทความนี้จึงเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Time Delay On-demand Routing (TDOR) ซึ่งมีหลักการคือ แทนที่ในระหว่างทางจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง (RREQ) ทันทีหลังจากได้รับแพ็กเก็ต ในระหว่างทางจะต้องทำการหยุดแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางดังกล่าวไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาที่หยุดนั้นจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ณ ปัจจุบันของโหนด โดยกำหนดให้ td'_i เป็นฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay time) ของโหนด i ณ เวลา t ดังนั้นเราสามารถหาเวลาที่โหนดทำการหยุดแพ็กเก็ตร้องขอได้จากสมการที่ (2.21)

$$td'_i = 1/c'_i \quad (2.21)$$

โดยค่า c'_i เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนด n_i ณ เวลา t จะมีค่าที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) แล้วอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากจุดนี้จะเห็นได้ว่าถ้าโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำ ๆ จะมีการประวิงเวลาไว้สูงกว่ากรณีที่มีระดับความจุแบตเตอรี่สูง ๆ ฉะนั้นโอกาสที่แพ็กเก็ตที่ออกจากโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่ต่ำจะถูกบล็อกทั้งก็มีสูง ซึ่งทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงจริง ๆ โดยขั้นตอนของการตัดสินใจเลือกเส้นทาง

ของโหนดปลายทางนั้นก็จะทำการตอบรับเส้นทางทันทีเมื่อได้รับแพ็กเก็ตร้องขอแรก โดยการส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทาง (RREP) กลับไปยังโหนดต้นทางโดยใช้เส้นทางย้อนกลับเหมือนกรณีของกระบวนการทำงานของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบแบบ AODV

ในบทความนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางโดยทำการทดลองในกรณีที่โหนดไม่มีการเคลื่อนที่ (Static Network) ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR มีอายุการใช้งานของโครงข่าย (Network Lifetime) ดีกว่ากรณีของ Shortest-Path, MBCR, และ MMBCR นอกจากนี้ก็ยังให้ผลในการรักษาสมมูลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ดีกว่า

2.6.2.3 DSR-based Energy-aware Routing Protocols in Ad Hoc Networks [17]

ในบทความอ้างอิง [17] ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Request-Delay Routing Protocol (RDRP) ซึ่งมีการทำงานเหมือนกับโพรโทคอลแบบ TDOR คือ ในระหว่างทางจะต้องทำการหยุดแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางดังกล่าวไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไป แต่ข้อแตกต่างจาก TDOR คือ ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่นำมาใช้ในการหาเวลาที่จะหยุดแพ็กเก็ต ซึ่งในบทความนี้ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลา 3 ประเภทคือ linear แทนด้วย $d_1(e)$ convex แทนด้วย $(d_2(e))$ และ concave แทนด้วย $(d_3(e))$ ซึ่งทั้งสามแบบมีสมการดังนี้

$$d_1(e) = D - \frac{D \times e}{E} \quad (2.22)$$

$$d_2(e) = \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2 \times D}\right)^2 - e^2} - \frac{E^2 - D^2}{2 \times D} \quad (2.23)$$

$$d_3(e) = \frac{D^2 + E^2}{2 \times D} - \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2 \times D}\right)^2 - (e - E^2)} \quad (2.24)$$

เมื่อ D เป็นค่าประวิงเวลาสูงสุด (ในบทความนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1 วินาที)

E เป็นค่าพลังงานจากแบตเตอรี่ ณ ตอนเริ่มต้นของโหนด ($E=5$ จูล)

e เป็นค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ณ ปัจจุบัน (จูล)

โดยในบทความได้ทำการทดลองการทำงานของฟังก์ชันทั้งสามแบบและสรุปว่าฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ช่วยยืดอายุการใช้งานได้ดีที่สุดคือแบบ Concave เนื่องจากสมการถึงแม้ว่าโหนดมี

ค่า e อยู่ในระดับที่ต่ำแต่การเปลี่ยนแปลงของ e เพียงเล็กน้อยฟังก์ชันที่ใช้ก็ยังสามารถแยกแยะความแตกต่างได้อย่างดี (เวลาที่ใช้ในการประวิงแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด) เมื่อเทียบกับฟังก์ชันในแบบ linear และ convex แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอล RDRP นี้ได้ใช้ฟังก์ชันที่แตกต่างไปจากสมการที่ (2.25) แต่เป็นรูปแบบที่ไม่มีความซับซ้อนตามสมการที่ (2.25)

$$d_i = \frac{D \times E}{e + E} \quad (2.25)$$

ในบทความนี้ยังคงใช้สถานการณ์ในการจำลองเช่นเดียวกับกรณี TDOR คือ โหนดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าโพรโทคอลแบบ RDRP ให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงานและปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่ส่งได้ดีกว่ากรณีการเลือกเส้นทางแบบ Shortest-Path (ในบทความนี้ได้ใช้โพรโทคอลการทำงานแบบ DSR เป็นโพรโทคอลพื้นฐานและทำการดัดแปลงเพื่อให้ได้มาซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RDRP)

2.6.2.4 Non-Blocking, Localized Routing Algorithm for Balanced Energy Consumption in Mobile Ad Hoc Networks [18]

ในบทความอ้างอิง [18] ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Localized Energy Aware Routing (LEAR) ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อรักษาสมดุลในการใช้พลังงานของโหนดในโครงข่ายโดยใช้เฉพาะข้อมูลแบบท้องถิ่น (Local information) โพรโทคอลแบบ LEAR ได้ดัดแปลงมาจากโพรโทคอลแบบ DSR โดยข้อแตกต่างจากโพรโทคอลแบบ DSR คือ โหนดระหว่างทางมีสิทธิจะใช้ข้อมูลแบบท้องถิ่นในการตัดสินใจว่าจะเข้าไปมีส่วนร่วมร่วมกับเส้นทางที่โหนดกำลังหาอยู่ในกระบวนการค้นหาเส้นทางหรือไม่ ซึ่งข้อมูลแบบท้องถิ่นคือ ระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ (Remaining Battery Level) ซึ่งแสดงด้วย E_r และค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Th_r) โดยมีเงื่อนไขในการตัดสินใจดังนี้: ถ้า $E_r > Th_r$ โหนดจะเข้าไปมีส่วนร่วมในกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไปยังโหนดข้างเคียงตัวเองต่อไป ในทางตรงข้ามถ้า $E_r \leq Th_r$ โหนดจะทำการลบแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางทิ้งและไม่มีการส่งต่อ ซึ่งทำให้โหนดที่มีแบตเตอรี่เหลืออยู่ต่ำสามารถประหยัดพลังงานได้โดยการไม่มีส่วนในการส่งต่อข้อมูล

โหนดปลายทางจะได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเมื่อโหนดระหว่างทางมีระดับพลังงานที่สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้ก็จะเป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูง และสาเหตุที่เรียกว่า Non-blocking เนื่องจากโหนดปลายทางสามารถตอบรับได้ทันทีเมื่อมีแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกมาถึง

นอกจากนั้น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ LEAR ยังแก้ไขปัญหากรณีที่ในระหว่างทางทำการลบแพ็กเก็ตร้องขอทิ้งทั้งหมดทำให้ไม่มีเส้นทางที่สามารถใช้งานได้เนื่องจาก $E_r \leq Th_r$ เพื่อแก้ปัญหานี้โหนดต้นทางจะถูกกำหนดให้ส่งแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางซ้ำแต่เพิ่มหมายเลขแสดงลำดับของแพ็กเก็ต (Sequence Number) เมื่อโหนดระหว่างได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเดิมแต่มีหมายเลขแสดงลำดับที่มากกว่า โหนดจะทำการลดค่า Th_r ลงด้วยค่า d (ค่าของ $Th_r = Th_r - d$) และทำการส่งแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไป นอกจากนี้เพื่อลดจำนวนแพ็กเก็ตร้องขอที่ต้องส่งซ้ำและใช้ประโยชน์จากเส้นทางที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ (ใน DSR มีการใช้หน่วยความจำเพื่อเก็บเส้นทางที่กำลังใช้งานและถูกใช้งานไปแล้ว) โดยเพิ่มแพ็กเก็ตควบคุมขึ้นมาใหม่ 4 ตัวคือ DROP_ROUTE_REQ, ROUTE_CACHE, DROP_ROUTE_CACHE, และ CANCEL_ROUTE_CACHE และวิธีการทำงานของโพรโทคอล LEAR ทั้งหมดสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ขั้นตอนของการทำงานของโพรโทคอล LEAR สำหรับแต่ละโหนด [18]

Node	Steps
Source node	Broadcast a ROUTE_REQ; wait for the first arriving ROUTE_REPLY; select the source route contained in the message; ignore all later replies
Intermediate node	Upon receipt of a ROUTE_REQ message: If the message is not the first trial and $E_r < Th_r$, lower Th_r by d ; If it has the route to the destination in its cache, If $E_r > Th_r$, forward (unicast) ROUTE_CACHE & ignore all later requests; Else, forward DROP_ROUTE_CACHE & ignore all later requests; Else, If $E_r > Th_r$, forward (broadcast) route-request & ignore all later requests; Else, forward (broadcast) DROP_ROUTE_CACHE & ignore all later requests
	Upon receipt of a ROUTE_CACHE, If the message is not the first trial and $E_r < Th_r$, lower Th_r by d ; If $E_r > Th_r$, forward (unicast) ROUTE_CACHE & ignore all later requests; Else, forward (unicast) DROP_ROUTE_CACHE & ignore all later requests; and send backward (unicast) CANCEL_ROUTE_CACHE
Destination node	Upon receipt of the first arriving ROUTE_REQ or ROUTE_CACHE, send a ROUTE_REPLY to the source with the source route contained in the message

2.6.2.5 Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks Based on the Energy Drain Rate (MDR)

ในบทความอ้างอิง [15] กล่าวว่าทางเลือกเส้นทางจากการพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ของโหนดจะให้ผลในทางที่ไม่ดี เพราะถ้าโหนดเต็มใจที่จะรับทุก ๆ การร้องขอเพียง

เพราะว่ามีระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูง ก็จะทำให้ปริมาณไหลจํานวนมากจะไหลเข้ามาที่โหนดนี้ทำให้โหนดใช้พลังงานหมดเร็วกว่าที่กำหนดไว้ ในบทความนี้จึงนำเสนอโพรโทคอลการจํัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Drain Rate (MDR) โดยเสนอตัววัดใหม่ที่แสดงอัตราการใช้พลังงาน (Drain Rate) ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาถึงคุณลักษณะของกราฟฟิกไหล ณ ขณะเวลานั้นของโหนด ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราการใช้พลังงาน (DR_i) ของโหนด i ได้จากสมการที่ (2.26)

$$DR_i = \frac{RE_t - RE_{t+1}}{T} \quad (2.26)$$

เมื่อ RE_t เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนด i ณ เวลาสุ่ม t และ T เป็นระยะห่างของเวลาที่ใช้ในการสุ่มในครั้งที่ $t+1$ และ t โดยในบทความนี้กำหนดให้ทุก ๆ โหนดจะต้องทำการปรับปรุงค่าอัตราการใช้พลังงานทุก ๆ 6 วินาที ($T_{t+1} - T_t = 6$ วินาที) ซึ่งค่าที่ได้มาใหม่นี้ (DR_{sample}) จะต้องนำไปถ่วงน้ำหนักกับค่าเดิมที่คำนวณได้ก่อนหน้าโดยใช้สมการที่ (2.27)

$$DR_i = \alpha \times DR_{old} + (1 - \alpha) \times DR_{sample}, \alpha = 0.3 \quad (2.27)$$

ในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของโหนดซึ่งแสดงด้วยค่าอายุการใช้ของโหนดจะสามารถหาได้สมการที่ (2.28) จากสมการ (C_i) แสดงค่าต้นทุนพลังงานของโหนด i ณ เวลาใด ซึ่งสามารถอธิบายความหมายในทางกายภาพได้ว่าเป็นเวลานานเท่าไรที่โหนด i จะสามารถทำงานในเส้นทางนี้ได้ภายใต้คุณลักษณะของกราฟฟิกและระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลานั้นหรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าเป็นอายุการใช้งานที่เหลือของโหนด i

$$C_i = \frac{RE_i}{DR_i} \quad (2.28)$$

ขั้นตอนการตัดสินใจเส้นทางที่ดีที่สุดนั้นได้ใช้หลักการของ min-max เหมือนกับกรณีของ MMBCR นั่นคือจะเลือกเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางมากที่สุด โดยค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง p ใด ๆ สามารถกำหนดได้จาก $L_p = \min_{\forall i \in r_p} C_i$ ฉะนั้นแล้วเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดก็จะกำหนดได้จาก $r_M = \max_{\forall i \in r^*} L_i$ เมื่อ r^* เป็นเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง ซึ่งมีความหมายว่า เส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ให้ค่าอายุการใช้งานมากที่สุดจากอายุการใช้งานที่ต่ำที่สุดของแต่ละเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด

2.6.3 โพรโทคอลการจํัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจํัดสรรเส้นทางแบบผสมเป็นการนำเอาข้อดีของการจํัดสรรเส้นทางทั้งแบบ Energy-Aware routing protocols และ Battery-Aware Routing protocols มาพิจารณาพร้อม

กันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายทั้งในด้านการใช้พลังงานและอายุการใช้งานให้ดีขึ้น โดยมองว่าการยืดอายุของโครงข่ายให้ได้สูงสุดนั้นการพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง ระหว่างการใช้พลังงานต่ำที่สุด (ในกรณี Energy-Aware Routing protocols) หรือการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด (ในกรณี Battery-Aware Routing protocols) ไม่เพียงพอที่จะยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ปัจจัยทั้งสองตัวเข้ามาพิจารณาพร้อมกันจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานให้มากขึ้นได้ ซึ่งปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนก็จะพิจารณาจากทั้งสองแบบดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

2.6.3.1 Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR) [19]

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR ได้รับการเสนอในบทความอ้างอิง [19] โดยมีเป้าหมายเพื่อต้องการบรรลุเป้าหมายทั้ง การใช้พลังงานต่ำที่สุดและการรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ของโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุดพร้อมกัน ซึ่งเป็นความพยายามที่จะรวมวิธีการทั้งแบบ Energy-Aware และ Battery-Aware เข้าด้วยกัน การจะทำให้การทำงานทั้งสองแบบสามารถใช้งานพร้อมกันได้นั้นผู้เสนอได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจว่า ณ เวลาใดควรจะใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบใด ซึ่งผู้เสนอได้ให้ความเห็นว่า ในกรณีที่โหนดในโครงข่ายมีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูงนั้นโครงข่ายควรที่จะใช้พลังงานอย่างประหยัดมากกว่าการรักษาสมดุลของการใช้พลังงาน ในทางกลับกัน กรณีที่ค่าระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่ายส่วนมากมีระดับที่ต่ำโครงข่ายควรจะใช้พลังงานอย่างสมดุลมากกว่าการประหยัดพลังงาน โดยจากข้อสมมุติดังกล่าวสามารถอธิบายกระบวนการทำงานและการพิจารณาเส้นทางได้ดังนี้

ในโพรโทคอลได้กำหนดให้เส้นทางทุก ๆ เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางจะต้องคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ แต่จะใช้ค่าที่ได้จากโหนดที่ให้ค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่ต่ำที่สุดในเส้นทางซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.29)

$$R_j^t = \min_{i \in \text{route } j} c_i^t \quad (2.29)$$

จากนั้นเมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกแล้วโหนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเก็ตการร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่มีเส้นทางร่วมกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อหมดระยะเวลาที่กำหนดไว้โหนดจะทำการตรวจสอบจากเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Q) มีเซตของเส้นทางใดบ้างที่ตรงกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.30) ซึ่งแสดงด้วยเซต A

$$R'_j \geq \gamma, \forall j \in A \quad (2.30)$$

โดย γ เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 (หรืออาจจะกำหนดค่าให้เป็นร้อยละเท่าใดของระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นของโนดในโครงข่าย โดยค่าระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นเท่ากับ 100) จากขั้นตอนข้างต้นเปรียบเสมือนกับการพิจารณาว่าขณะนี้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดในโครงข่ายส่วนมากเป็นอย่างไร ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการตัดสินใจว่าจะใช้วิธีการแบบใดในการเลือกเส้นทาง โดยดูจากจากสภาพของโครงข่าย ณ ขณะนี้ โดยการเลือกจะใช้พิจารณาได้ดังนี้

- กรณีที่ $A \cap Q \neq \emptyset$ แสดงว่ามีบางเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโนดในโครงข่ายยังมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงอยู่ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MTPR ในการเลือกเส้นทางจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต A
- กรณีที่ $A \cap Q = \emptyset$ แสดงว่าไม่มีเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งได้สะท้อนให้เห็นว่าโนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลือน้อยในเกณฑ์ที่ต่ำ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่รักษาสมดุลของการใช้พลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานของโนด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MMBCR ในการเลือกเส้นทางที่ดีจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต Q

สังเกตได้ว่าถ้าเรากำหนดค่า $\gamma=0$ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR ก็จะเป็นกลายเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และถ้ากำหนดให้ $\gamma=100$ ก็จะทำให้ผลลัพธ์เหมือนกับกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ดังนั้นสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR จะขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นหลัก

2.6.3.2 Conditional Minimum Drain Rate (CMDR)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ถูกเสนอขึ้นในบทความ [15] เช่นเดียวกับโพรโทคอล MDR ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2.5 เนื่องจากโพรโทคอลแบบ MDR ไม่ได้ยืนยันว่าเส้นทางที่ใช้งานนั้นเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำสุดเหมือนกับกรณีของ MMBCR โดยผู้เสนอได้เลียนแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง CMMBCR แต่ข้อแตกต่างระหว่างทั้งสองคือ ในโพรโทคอล CMDR ได้ใช้ค่าอายุการใช้งานของโนด (C_i ในสมการที่ (2.28)) เป็นตัวกำหนด

ว่าควรจะใช้โพรโทคอลแบบใดในการทำงานแทนการใช้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (R'_i ในสมการที่ (2.29))

ถ้ามีค่าอายุการใช้งานของโหนดที่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (δ) จากเซตของเส้นทางเป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้จาก $C_i = \frac{RBP_i}{DR_i} > \delta$ โดยโพรโทคอลนี้จะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR แต่ถ้าไม่เส้นทางใดที่ตรงตามเงื่อนไขจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดก็จะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MDR อย่างไรก็ตามสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ก็ยังขึ้นอยู่กับค่าการเลือกค่า ขีดเริ่มเปลี่ยนที่นำมาพิจารณาเหมือนกับ CMMBCR

2.6.3.3 Power Efficient Reliable Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks [30]

ในบทความอ้างอิง [30] ศึกษานำเสนอการรับส่งข้อมูลกับการประมวลผลที่จะใช้พลังงานแล้วการเคลื่อนที่ของโหนดก็ยังส่งผลต่อการใช้พลังงานของโหนดด้วยเช่นกัน ดังนั้นเพื่อให้โครงข่ายสามารถใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและการส่งแพ็กเก็ตเกิดความน่าเชื่อถือโดยยังคงรักษาสสมรรถนะของโครงข่ายในด้านอื่น ๆ อยู่ ในบทความนี้ได้ออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Power Efficient Reliable Routing protocol for mobile Ad hoc networks หรือ PERRA ซึ่งได้นำค่าพลังงานรวมที่โหนดในเส้นทางใช้ในการส่งแพ็กเก็ตและประมวลผล ระดับความจุของแบตเตอรี่ที่ต่ำที่สุดของโหนดในเส้นทางและเสถียรภาพของเส้นทาง (อายุการใช้งานของเส้นทาง) ที่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของโหนดมาใช้กำหนดค่าต้นทุนรวมของเส้นทาง (route cost) โดยในแต่ละค่าจะให้น้ำหนัก (Weight) ไม่เท่ากัน และนำค่าต้นทุนรวมของเส้นทางที่ได้ไปใช้ในการตัดสินใจเส้นทางที่เหมาะสม (เส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนรวมของเส้นทางต่ำที่สุด)

โดยโพรโทคอลได้พยายามที่จะลดพลังงานในขั้นตอนของการค้นหาเส้นทางที่จะต้องมีการแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง โดยการกำหนดให้แต่ละโหนดตัดสินใจว่าจะทำการส่งต่อแพ็กเก็ตนี้ต่อไปอีกหรือไม่ โดยใช้ระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ณ ปัจจุบัน (RES) เปรียบเทียบกับพลังงานที่แต่ละโหนดจะต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางร้องขอมา (REQ) ถ้า $RES > REQ$ โหนดดังกล่าวก็จะทำการส่งแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางให้กับโหนดข้างเคียงต่อไป แต่ในทางตรงข้าม ถ้า $RES < REQ$ โหนดจะทำการลบแพ็กเก็ตดังกล่าวทิ้ง นอกจากนั้นแล้วเพื่อจะคำนวณค่าอายุการใช้งานของเส้นทางทุกโหนดจะต้องใช้อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง (Global Position System, GPS) เพื่อใช้ระบุตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่และแจ้งข้อมูลให้โหนดอื่น ๆ ที่อยู่ในโครงข่ายทราบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ PERRA ให้

ประสิทธิภาพดีกว่าโพรโทคอลแบบ AODV และ MMBCR ทั้งในแง่ของการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและอัตราการส่งข้อมูลได้สำเร็จ โดยให้เหตุผลว่าเนื่องจาก PERRA เลือกเฉพาะเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีพลังงานเพียงพอต่อการร้องขอ และเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานในระดับที่ต่ำอีกทั้งยังมีค่าความน่าเชื่อถือของเส้นทางที่สูง แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาพลังงานที่ใช้ในส่วนโอเวอร์เฮดและประมวผลของโพรโทคอลแบบ PERRA จะเห็นได้ว่ามีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ AODV และ MMBCR

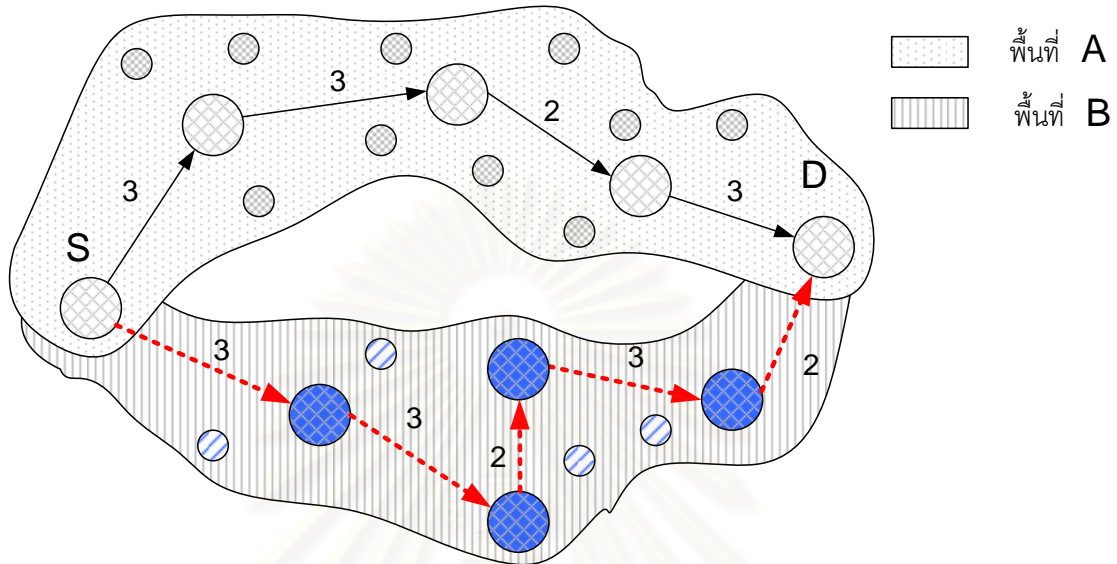
2.7 ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อให้โหนดสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้นานที่สุด และทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น จากข้างต้น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังสามารถแบ่งได้เป็นสามประเภท ในแต่ละประเภทมีจุดประสงค์หลักเหมือนกันคือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายหรือโหนดให้ได้นานที่สุด แต่ก็จะมีแนวคิดและปัจจัยที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งสามประเภท แต่ก่อนที่จะกล่าวรายละเอียดของโพรโทคอลที่จะนำเสนอในส่วนนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่พบรวมถึงข้อดีข้อเสียของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจากงานวิจัยที่ผ่านมา (กล่าวในหัวข้อที่ 2.6) เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยทำแยกพิจารณาสำหรับโพรโทคอลแต่ละประเภทดังนี้

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง มีเป้าหมายในการออกแบบเพื่อ “ลดการใช้พลังงานให้มากที่สุด (*Minimizing the total power consumption*)” ซึ่งในบทความอ้างอิง [8, 10, 11] เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด โดยที่พลังงานรวมของเส้นทางได้จากพลังงานที่แต่ละโหนดต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งข้อมูลหนึ่งแพ็กเก็ต ยกเว้นในกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RA [10] ที่ได้รวมพลังงานงานที่โหนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตซ้ำ แต่จากแบบจำลองการใช้พลังงานที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.3.1 แสดงให้เห็นว่าโหนดยังเสียพลังงานในการรับข้อมูลและการได้ยินข้อมูลด้วย เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดไม่ได้แสดงว่าโครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดตามไปด้วยดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.16 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (*Minimum Energy Consumption Routing Protocols*) โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย *Proposed-Energy* เพื่อให้โครงข่ายประหยัดพลังงานมากที่สุด โดยการ

เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดแทนที่จะเลือกจากเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งของโหนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น นอกจากนี้การคำนวณพลังงานที่แต่ละโหนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากทั้งการรับ การส่งและการได้ยินจะพิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณด้วย



รูปที่ 2.16 เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโหนด S และ D

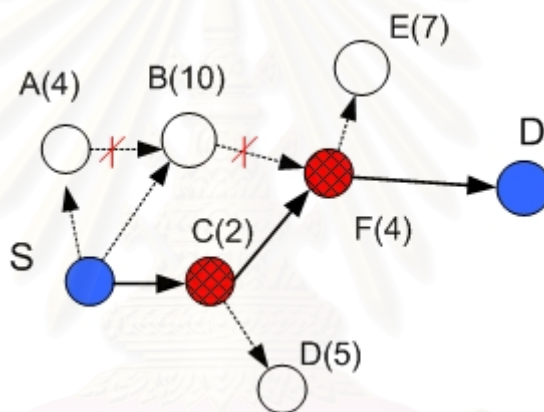
จากรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าถ้าใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR หรือ RA เส้นทางที่ดีที่สุดคือเส้นทางที่อยู่ในพื้นที่ A เพราะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งรวมต่ำที่สุดคือ 11 หน่วย แต่ถ้ามองถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจะเห็นได้ว่าเส้นทางในพื้นที่ A จะสูญเสียพลังงานมากกว่าเส้นทางที่ได้จากพื้นที่ B เพราะว่าเส้นทางในพื้นที่ A จะต้องเสียพลังงานในการรับและการได้ยินของโหนดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารที่มากกว่า นอกจากนี้เส้นทางในพื้นที่นี้ยังเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งสูงด้วย ดังนั้นการเลือกเส้นทางในพื้นที่ A อาจจะไม่ใช้แนวทางที่ทำให้โครงข่ายประหยัดการใช้พลังงานมากที่สุด

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดนั้นมีเป้าหมายในการออกแบบคือ “ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด” โดยการพยายามรักษาสมดุลการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนด เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตไม่ได้สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโหนดหรือโครงข่ายโดยตรงจึงทำให้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานไม่สามารถจะยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้มากเท่าที่ควร จึงทำให้บทความอ้างอิง [9] ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR และ MMBCR ซึ่งกำหนดให้ระดับความจุแบตเตอรี่แทนอายุการใช้งานโหนด โดยได้พยายามหลีกเลี่ยงโหนดที่มีอายุการใช้งานที่ต่ำเพื่อ

ไม่ให้โหนดดังกล่าวใช้พลังงานมากเกินไป อย่างไรก็ตามเส้นทางที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ที่อยู่ในระดับสูงอาจนำมาซึ่งโหนดในเส้นทางหมดพลังงานเร็วกว่ากำหนดเพราะว่าทราฟฟิกจำนวนมากจะผ่านเส้นทางนั้นทั้งหมด จึงทำให้ในบทความอ้างอิง [15] ได้กำหนดอายุการใช้งานให้ขึ้นอยู่กับระดับความจุแบตเตอรี่และอัตราการใช้พลังงานภายใต้ลักษณะของทราฟฟิก ณ ขณะนั้น

การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งสามแบบข้างต้นนั้น โหนดที่ตัดสินใจเลือกเส้นทางจะต้องมีข้อมูลทั้งหมดหรือมากเพียงพอจึงจะทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดซึ่งการที่จะได้ข้อมูลทั้งหมดนั้นจะต้องมีการทำงานแบบรวมศูนย์ และเนื่องจากขั้นตอนที่โหนดสามารถรับและส่งต่อแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางได้เพียงแพ็กเก็ตแรกและจะลบแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่เข้ามาทีหลังเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดลูปของเส้นทาง อาจจะทำให้โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงถูกบล็อกดังตัวอย่างในรูปที่ 2.17



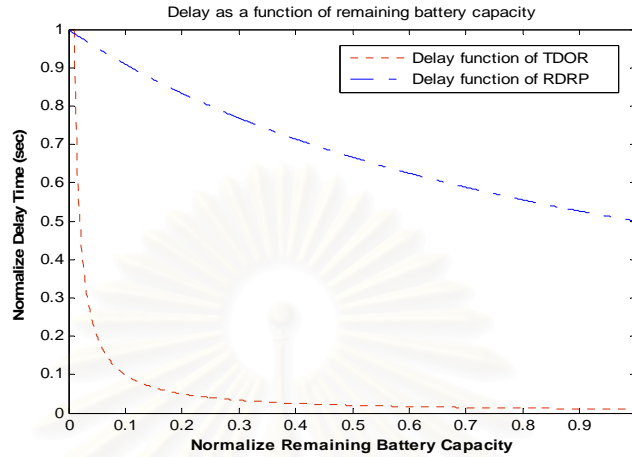
รูปที่ 2.17 การแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางของกระบวนการค้นหาเส้นทาง

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อโหนด S แพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางออกไป โหนด A, B และ C จะได้รับแพ็กเก็ตดังกล่าวแต่เนื่องจากโหนด C อยู่ใกล้กว่าจึงได้รับแพ็กเก็ตก่อนโหนด A และ B เพราะฉะนั้นโหนด C ก็จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตดังกล่าวไปยังโหนดข้างเคียงต่อไปคือโหนด F และ D ต่อไปโหนด B จึงจะแพร่กระจายแพ็กเก็ต (โหนด F และ A) แต่เนื่องจากโหนด F เคยได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางจากโหนด C แล้วจึงลบแพ็กเก็ตที่ได้จากโหนด B ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถึงแม้โหนด B จะมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงแต่จากขั้นตอนการจัดสรรเส้นทางแล้วโหนดอาจจะถูกบล็อกทำให้เส้นทางที่ได้ประกอบไปด้วยโหนดที่มีพลังงานที่ต่ำ ในบทความอ้างอิง [16, 17] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR และ RDRP ตามลำดับเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวโดยกำหนดให้โหนดเพิ่มฟังก์ชันการประวิงเวลาเข้าไปทุกโหนด ซึ่งฟังก์ชันที่เพิ่มเข้าไปจะทำการประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะแพร่กระจายไปยังโหนดข้างเคียง จากเดิมที่จะต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตต่อทันทีหลังจากได้รับมา โดยค่าระยะเวลาที่ใช้ในการประวิงนั้นจะขึ้นอยู่กับ

ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดนั้น ๆ เพราะฉะนั้นแพ็กเก็ตที่ไปถึงโหนดปลายทางเป็นแพ็กเก็ตแรกก็ จะผ่านมาจากโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูง จากตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.17 แพ็กเก็ตร้องขอ เส้นทางที่ไปถึงโหนดปลายทาง D เป็นแพ็กเก็ตแรกคือจากเส้นทาง S – B – E – D จากเดิมที่ได้ เส้นทาง S – C – F – D ซึ่งเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงกว่า เส้นทางเดิม ส่วนในบทความอ้างอิง [18] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ LEAR ซึ่ง ใช้หลักการที่คล้าย ๆ กันคือ ให้นโหนดระหว่างทางทำการตัดสินใจว่าจะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต ร้องขอที่ได้รับมาต่อไปหรือไม่ โดยใช้ข้อมูลแบบท้องถิ่นนั่นคือ ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด ถ้า โหนดมีระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ก็จะไม่ทำการส่งต่อแพ็กเก็ตดังกล่าว เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่มีพลังงานที่สูงจริง ๆ และสามารถลดพลังงานที่เกิดจากการ แพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางอีกด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเพิ่มแพ็กเก็ตควบคุมอีก สามตัวและวิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกรณีที่ถูกโหนดหรือบางโหนดที่อยู่ใกล้กับโหนดที่ส่งมีค่า พลังงานต่ำกว่าที่กำหนดเอาไว้ทำให้ไม่มีเส้นทางที่สามารถสื่อสารได้ถึงแม้ว่าจะมีเส้นทางที่ สามารถใช้งานได้ก็ตาม ซึ่งกระบวนการและแพ็กเก็ตควบคุมที่เพิ่มขึ้นมาของโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางแบบ LEAR จะใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูงนอกจากนั้นเส้นทางที่ได้มีค่าประจิมเวลาของ แพ็กเก็ตข้อมูลจากต้นทางไปยังโหนดปลายทางที่สูงกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR และ RDRP

จากปัญหาของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ใน วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้ของโครงข่ายให้มากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย *Proposed-Battery* เพื่อปรับปรุงให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยโพรโทคอลที่นำเสนอยังคงใช้ หลักการคล้ายกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR [16] และ RDRP [17] กล่าวคือ กำหนดให้โหนดระหว่างทางประจิมเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไว้เป็นช่วงเวลา T โดยระยะเวลา ดังกล่าวแปรผกผันกับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดแทนที่จะขึ้นกับระดับความจุแบตเตอรี่ ของโหนด นอกจากนั้นได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดขึ้นใหม่เพื่อ สะท้อนให้เห็นถึงอายุการใช้งานของโหนดจริง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าสามารถกำหนดอายุการใช้งาน จากแบตเตอรี่ของโหนดให้แม่นยำมากเท่าใด ก็จะทำให้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางมี ประสิทธิภาพมากเท่านั้น โดยค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดจะขึ้นอยู่กักระดับความจุ แบตเตอรี่ ปริมาณโหลดในบัพเฟออร์และพลังงานที่โหนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่ร้องขอมา ของโหนดต้นทาง นอกจากนั้นจากฟังก์ชันการประจิมเวลาที่นำเสนอในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง แบบ TDOR และ RDRP ที่ถึงแม้ว่าโหนดจะมีค่าระดับความจุแบตเตอรี่อยู่เต็มก็ตาม โหนดก็ยังคง

ต้องทำการประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไว้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งส่งผลเสียให้การประวิงเวลาของแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มขึ้นด้วย ในโพรโทคอลที่นำเสนอจะแก้ปัญหาในส่วนนี้โดยจะไม่มี การประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางถ้าในดมีค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่เต็ม



รูปที่ 2.18 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR [16] และ RDRP [17]

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม

โพรโทคอลแบบผสมนี้เป็นการผสมผสานโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด เพื่อให้โหนดมีอายุการใช้งานที่นานที่สุด เพราะการทำงานโดยพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างใช้พลังงานต่ำที่สุด หรือ ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด (โดยการรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโหนด) ไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของโหนดหรือโครงข่ายได้มากเท่ากับการพิจารณาทั้งสองแบบพร้อมกัน ในบทความอ้างอิง [19, 15] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR และ CMDR ตามลำดับ ซึ่งโพรโทคอลทั้งสองตัวได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเพื่อให้โหนดได้ใช้ตัดสินใจว่า ณ ขณะเวลาดังกล่าวควรจะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใดระหว่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด เพราะฉะนั้นข้อเสียคือ สมรรถนะของโครงข่ายขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้เพราะโครงข่ายที่มีสภาพการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะยากที่จะกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนให้เหมาะสมและทันต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลทั้งสองไม่ได้บรรลุจุดประสงค์ทั้งใช้พลังงานต่ำที่สุดและรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโหนดมากที่สุดพร้อมกันในเวลาเดียวกันดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ในบทความอ้างอิง [30] นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ PERRA ซึ่งมีหลายประเด็นที่แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ PERRA ยังไม่มีประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงานเท่าที่ควรอย่างเช่น กระบวนการที่โหนดตัดสินใจว่าจะทำการส่งต่อแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางหรือไม่นั้น ถ้าระดับความจุของแบตเตอรี่ของโหนด (*RES*) ณ ปัจจุบันต่ำกว่าระดับพลังงานที่โหนดต้นทางร้องขอมาจะทำให้โหนดต้นทางไม่มีเส้นทางในการติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทางทั้งที่ในความจริงแล้วยังมีเส้นทางที่สามารถสื่อสารกันได้ ประเด็นที่สองคือ โพรโทคอลได้กำหนดให้อายุการใช้งานของโหนดเท่ากับระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดเท่านั้น ซึ่งไม่ได้สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโหนดนั้นจริง ๆ เพราะโหนดยังต้องสูญเสียพลังงานในการส่งแพ็กเก็ตของเส้นทางอื่น ๆ ที่อยู่ในบัฟเฟอร์ (Buffer) และประเด็นที่สามคือ พลังงานที่ใช้เนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตจริง ๆ แล้ว ไม่เพียงแต่เป็นพลังงานในการส่งแต่ยังรวมถึงพลังงานในการรับ และพลังงานในการได้ยินและอีกหลาย ๆ ประเด็น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) โดยใช้สัญลักษณะแทนด้วย *Proposed-Hybrid* ซึ่งจะเป็นวิธีที่นำเอาโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocol) และ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) ที่ได้นำเสนอข้างต้นมาทำการปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้ โดยในระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางกำหนดให้โหนดทำงานเหมือนกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Battery-aware พร้อมทั้งคำนวณพลังงานที่โครงข่ายจะต้องใช้เหมือนในกรณีของ Energy-aware ซึ่งจากการทำงานแบบ Battery-aware ทำให้แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่ไปถึงยังโหนดปลายทางเป็นแพ็กเก็ตแรก ๆ นั้นมาจากเส้นทางที่โหนดมีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่สูง แต่แทนที่โหนดจะใช้เส้นทางที่ได้จากแพ็กเก็ตแรกในการตอบรับเส้นทาง โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Hybrid-aware ที่นำเสนอจะกำหนดให้โหนดปลายทางต้องหยุดรอไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง (การหาค่าระยะเวลาในการคอยที่เหมาะสมที่สุดไม่ได้อยู่ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) เพื่อรอแพ็กเก็ตร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ แล้วจึงตัดสินใจโดยใช้เงื่อนไขทางด้านพลังงานคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดใช้พลังงานรวมของเส้นทางต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถที่จะบรรลุจุดประสงค์ทั้งสองอย่าง ณ ระยะเวลาเดียวกัน

บทที่ 3

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังที่นำเสนอ

ในบทที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงผลกระทบเนื่องจากข้อจำกัดด้านพลังงานของโหนดต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอค ซึ่งนำไปสู่แนวทางในการแก้ไขปัญหาและในวิทยานิพนธ์นี้ได้ให้ความสนใจการแก้ปัญหาเฉพาะในชั้นเครือข่าย โดยจะเน้นด้านการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานหรือ โหนดใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลัง 3 โพรโทคอลโดยแบ่งตามทรัพยากรหลักที่นำมาใช้ในการพิจารณาเส้นทางได้แก่

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols) แสดงแทนด้วย *Proposed-Energy*
- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols) แสดงแทนด้วย *Proposed-Battery*
- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocols) แสดงแทนด้วย *Proposed-Hybrid*

3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้พลังงานหรือกำลังส่งที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอนี้คือ “ลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด” โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง หรือ Energy Link Cost ขึ้นมาใหม่เพื่อนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process) ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด

3.1.1 การคำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง (Energy Link Cost Computation)

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของวิธีการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานในการสื่อสาร โดยขั้นตอนหลัก ๆ คือ การคำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง (Energy Link Cost) โดยการคำนวณ

ค่าต้นทุนพลังงานขายเชื่อมโยงใด ๆ ($E_{i,j}$) จากโหนด i ไปยังโหนด j นิยามออกเป็น 2 ส่วนคือ พลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม ($E_{control}$) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางหรือ Route Request packet (RREQ) เท่านั้นและ พลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (E_{data}) โดยแบบจำลองการใช้พลังงานที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงลักษณะทราฟฟิกที่กำลังใช้งานอยู่ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.3.1 ซึ่งลักษณะทราฟฟิกของแพ็กเก็ต RREQ คือ แบบแพร่กระจาย (Broadcast) นั้นหมายถึง โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต RREQ จะต้องเสียพลังงานเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งแสดงแทนด้วย E_{send}^c และโหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตทุกโหนดจะต้องเสียพลังงานเนื่องจากการรับแพ็กเก็ต RREQ แทนด้วย E_{recv}^c เพราะฉะนั้นพลังงานทั้งหมดที่จะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.1)

$$E_{control} = E_{send}^c + N_{area(s)} \times E_{recv}^c \quad (3.1)$$

โดยที่พลังงานที่ต้องสูญเสียในการส่งและรับแพ็กเก็ตควบคุม RREQ สามารถคำนวณได้จากกำลังที่ใช้ในการส่งคูณด้วยเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต และกำลังที่ใช้ในการรับคูณกับเวลาที่ใช้ในการรับตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) โดยความหมายของตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1

$$E_{send}^c = P_{send}^c \times \frac{L_{rreq}}{f} = P_{send}^c \times T_{send}^c \quad (3.2)$$

$$E_{recv}^c = P_{recv}^c \times \frac{L_{rreq}}{f} = P_{recv}^c \times T_{recv}^c \quad (3.3)$$

เพราะฉะนั้นพลังงานทั้งหมดที่สูญเสียไปเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ สามารถแสดงได้อีกรูปแบบหนึ่งในสมการที่ (3.4)

$$E_{control} = E_{send}^c + N_{area(s)} \times E_{recv}^c = \frac{(P_{send}^c + N_{area(s)} \times P_{recv}^c) \times L_{rreq}}{f} \quad (3.4)$$

ในส่วนพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้น เนื่องจากแพ็กเก็ตข้อมูลมีลักษณะทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point หรือ Unicast) คือ โหนดที่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจะต้องสูญเสียพลังงานจากการส่ง และโหนดที่เป็นโหนดปลายทางของแพ็กเก็ตข้อมูลจะต้องสูญเสียพลังงานจากการรับ นอกจากนั้นโหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต และตัวรับจะต้องเสียพลังงานจากการได้ยินแพ็กเก็ตที่สื่อสารกันระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับ

จากข้างต้นทำให้พลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งข้อมูลจากโนดหนึ่งไปยังอีกโนดหนึ่งโดยผ่านสายเชื่อมโยงแบบไร้สายประกอบไปด้วย 3 ส่วน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.5) จากสมการพลังงานที่สูญเสียจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโนดที่ส่งแพ็กเก็ตแทนด้วย E_{send}^d พลังงานที่สูญเสียจากการรับข้อมูลของโนดปลายทางของแพ็กเก็ตแทนด้วย E_{recv}^d และพลังงานที่สูญเสียจากการลบแพ็กเก็ตทิ้งเนื่องจากการได้ยินแทนด้วย $E_{overhear}^d$ โดยรายละเอียดของการคำนวณพลังงานที่ต้องสูญเสียในแต่ละส่วนแสดงในสมการที่ (3.6) ถึงสมการที่ (3.9) ซึ่งสมการทั้งหมดคำนวณอยู่ภายใต้ข้อสมมติที่ว่าโนดต้นทางทราบจำนวนข้อมูลที่ต้องการจะสื่อสารกับโนดปลายทางทั้งหมด และแจ้งข้อมูลดังกล่าวให้โนดในโครงข่ายทราบโดยผ่านแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่แทนด้วย L_{data} (หน่วยเป็นบิต)

$$E_{data} = E_{send}^d + E_{recv}^d + E_{overhear}^d \quad (3.5)$$

$$E_{send}^d = P_{send}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{f} \quad (3.6)$$

$$E_{recv}^d = P_{recv}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{f} \quad (3.7)$$

$$E_{overhear}^d = P_{overhear}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data} \times (N_{area(s)} - 1)}{f} \quad (3.8)$$

$$E_{data} = (P_{send}^d + P_{recv}^d + (N_{area(s)} - 1) \times P_{overhear}^d) \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{f} \quad (3.9)$$

ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการแสดงในตารางที่ 3.1 จากการคำนวณทั้งพลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม และพลังงานที่ต้องสูญเสียไปเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่แสดงข้างต้นเป็นการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่ไม่มีค่านั่นในการส่งข้อมูล (โดยคุณภาพของช่องสัญญาณแสดงแทนด้วยค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตหรือ Packet Error Rate โดยการคำนวณค่านี้ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4) อย่างไรก็ตามจากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่สองว่าคุณภาพของช่องสัญญาณหรือสายเชื่อมโยงในความเป็นจริงย่อมที่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้เสมอและจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งก็จะมีผลกระทบต่อพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียในแต่ละโมดการทำงานด้วยเช่นกัน นอกจากนี้การทดลองในบทที่ 2 ยังชี้ให้เห็นว่าจะต้องนำพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากผลกระทบนี้มาใช้ในการคำนวณค่าพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจึงจะทำให้โพรโทคอลที่ออกแบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [10] เพราะฉะนั้นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตจริง ๆ แล้วไม่เพียงแต่เป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลโดยปราศจากความผิดพลาดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

(สมการที่ (3.9)) แต่จะรวมถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตที่เกิดความผิดพลาดซ้ำบนช่องสัญญาณ ณ เวลาใด ๆ ซึ่งเราเรียกพลังงานทั้งสองส่วนรวมกันว่า พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือ (Reliable Energy Consumption, REC) โดยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาแบบจำลองการส่งซ้ำแบบ การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission หรือ HHR) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณพลังงานที่จะต้องใช้ในแต่ละส่วน

ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรในสมการที่ (3.1) ถึงสมการที่ (3.9)

P_{send}^d	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
P_{recv}^d	กำลังที่ใช้ในการรับแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
$P_{overhear}^d$	กำลังที่ใช้ในการลบทิ้งแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
P_{send}^c	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ (Watts)
P_{recv}^c	กำลังที่ใช้ในการรับแพ็กเก็ตควบคุม RREQ (Watts)
L_{data}	ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต้องการส่ง (Bits)
L_{rreq}	ขนาดของแพ็กเก็ตควบคุม (Bits)
N_{total}	จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะส่ง (Packets)
f	อัตราในการส่งแพ็กเก็ต (Mbps)
$N_{area(s)}$	จำนวนโหนดที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดตัวส่ง (s)

กรณีของการส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ แพ็กเก็ตที่ผิดพลาดจากการส่งบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จำเป็นจะต้องส่งข้อมูลที่ผิดพลาดซ้ำบนข่ายเชื่อมโยงนั้นเท่านั้น วิธีการนี้เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่มีการทำงานโครงข่ายแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งทั่วไปจะใช้ใน Link-Layer Retransmission จากลักษณะการทำงานที่วุ่นทำให้พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตผ่านข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของข่ายเชื่อมโยงตัวอื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นทาง สำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะไม่จำกัดจำนวนครั้งสูงสุดที่อนุญาตให้มีการส่งซ้ำได้ (ในทางปฏิบัติ ระบบอาจจะกำหนดค่าสูงสุดในการส่งซ้ำไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อจำกัดการล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต)

เนื่องจากจำนวนของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต้องการส่งบนข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาอยู่จะเป็นอิสระกับข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ และมีการกระจายแบบ Geometric เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด i ไปยังโหนด j แทนด้วย $REC_{i,j}$ ได้จากการนำพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลในสมการที่ (3.9) มาพิจารณาถึงผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณบนข่าย

เชื่อมโยงระหว่างโหนด i ไปยังโหนด j ณ ขณะเวลาที่พิจารณา ซึ่งจะได้ผลออกมาดังสมการที่ (3.10)

$$REC_{i,j} = \frac{(P_{send}^d + P_{recv}^d + P_{overhear}^d \times (N_{area(S)} - 1)) \times N_{total} \times L_{data}}{(1 - p^{ij}) \times f} \quad (3.10)$$

เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด i ไปยังโหนด j แทนด้วย $E_{i,j}$ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.11) โดยนำสมการที่ (3.4) รวมกับสมการที่ (3.10) จะได้ดังนี้

$$E_{i,j} = E_{control} + REC_{i,j} \\ = \frac{(P_{send}^d + P_{recv}^d + P_{dis}^d \times (N_{area(s)} - 1)) \times N_{total} \times L_{data}}{(1 - p^{ij}) \times f} + \frac{(P_{send}^c + P_{recv}^c \times N_{area(S)}) \times L_{rreq}}{f} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) จะเห็นได้ว่าในกรณีของการส่งแพ็กเก็ตเกิดควบคุมไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณ เนื่องจากแพ็กเก็ตเกิดควบคุม RREQ เป็นแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายซึ่งโหนดไม่จำเป็นจะต้องส่งยืนยันการส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียงอย่างถูกต้อง (ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดให้การส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast เท่านั้นที่โหนดส่งจะต้องส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดปลายทางของแพ็กเก็ตอย่างถูกต้อง โดยโหนดปลายทางจะส่งแพ็กเก็ต Acknowledgment กลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตมาให้เพื่อบอกว่าได้รับแพ็กเก็ตนั้นอย่างถูกต้อง)

3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอส่วนใหญ่จะคล้ายกับกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.1.1 นั่นคือ เมื่อโหนดต้องการจะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โหนดจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet หรือ RREQ) ไปทั่วทั้งโครงข่าย แต่ก่อนที่โหนดต้นทางจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตออกไป โหนดจะต้องบันทึกค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นลงในแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางที่นำมาใช้กับโพรโทคอลที่นำเสนอได้เพิ่มพื้นที่จากเดิมขึ้น 3 ส่วนดังนี้

- จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางจะใช้สื่อสาร (Number of Data packet) แทนด้วย N_{total} ซึ่งค่าในส่วนนี้จะแสดงจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะใช้สื่อสารกับโหนดปลายทาง สาเหตุที่จะต้องกำหนดไว้เพื่อให้โหนดที่ได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางใช้ประมาณค่าพลังงานที่จะต้องสูญเสียเพื่อรองรับการสื่อสารนี้

- พลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสีย (Energy consumption of node) เป็นพลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสียโดยไม่พิจารณาพลังงานที่จะต้องเสียเนื่องจากผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม (Energy consumption for transmission control packet) คำนวณได้จากสมการที่ (3.4) และพลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Energy consumption for transmission data packets) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)
- ค่าต้นทุนพลังงานรวมที่จะต้องสูญเสีย (Total Energy cost) ซึ่งแสดงแทนด้วย E_p^{Total} หมายความว่า เป็นพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียสำหรับเส้นทาง p

Source address	Source Sequence number	• • •	Hop Count	Num. of Data packet	$\langle E_{control}^i, E_{data}^i \rangle$	Total Energy Cost $\langle E_p^{Total} \rangle$
----------------	------------------------	-------	-----------	---------------------	---	---

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy

โดยโหนดต้นทางจะต้องทำการคำนวณค่า $E_{control}$ และ E_{data} จากสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับแล้วบรรจุค่าที่ได้ลงในฟิลด์ $\langle E_{control}, E_{data} \rangle$ ของแพ็กเก็ต RREQ และกำหนดค่าเริ่มต้นของ E_p^{Total} ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียง ต่อมาเมื่อโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะต้องทำการคำนวณ 2 ค่าคือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือของข่ายเชื่อมโยงระหว่างตัวเอง (สมมติว่าเป็นโหนด j) กับโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้ (สมมติว่าเป็นโหนด i) และอีกค่าหนึ่งเป็น พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากตัวเองจะต้องส่งแพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียง (ตามสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับ) โดยการคำนวณค่าพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือจะเริ่มจากโหนดนำค่า E_{data} ซึ่งอยู่ในแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้รับมาทำการคำนวณค่า $REC_{i,j}$ โดยใช้สมการที่ (3.10) จากนั้นโหนด j จะต้องคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด i ไปยังโหนด j ($E_{i,j}$) ได้จากสมการที่ (3.11) ซึ่งเป็นค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่พิจารณาอยู่ปัจจุบันกับโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มายังโหนดที่พิจารณา ส่วนอีกหนึ่งค่าที่โหนดจะต้องทำการคำนวณคือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียงตามสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับ ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้บนข่ายเชื่อมโยงถัดไปโดยไม่คำนึงถึงความผิดพลาดในการส่งข้อมูลบนข่ายเชื่อมโยง เมื่อโหนดคำนวณค่าทั้งสองเรียบร้อยแล้วโหนดจะนำ $E_{i,j}$ ที่คำนวณได้ไปบวกกับค่าต้นทุนพลังงานรวมข่ายเชื่อมโยง

ที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ (อยู่ในฟิลด์ Total Energy Cost) แล้วบรรจุค่าใหม่ที่ได้ลงในฟิลด์ของค่า ต้นทุนพลังงานรวมของเส้นทางที่คำนวณได้ดังนี้

$$E_p^{Total} = E_p^{Total} + E_{i,j} = \sum_{k=1}^{i-1} E_{k,k+1} + E_{i,j} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) ถ้าสมมติให้โนดในเส้นทาง p ประกอบไปด้วย ($S=1,2,\dots,N=D$) สามารถคำนวณหาต้นทุนรวมพลังงานของเส้นทาง p ได้เป็น $E_p^{Total} = \sum_{i=1}^{N-1} E_{i,i+1}$ ภายหลังจากบรรจุค่าทั้งสองลงในฟิลด์ของแพ็กเก็ต RREQ เรียบร้อยแล้วโนดก็จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยัง โหนดข้างเคียงของตัวเองต่อไป ขั้นตอนที่กำลังกล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเก็ต RREQ ไป ถึงยังโนดปลายทาง

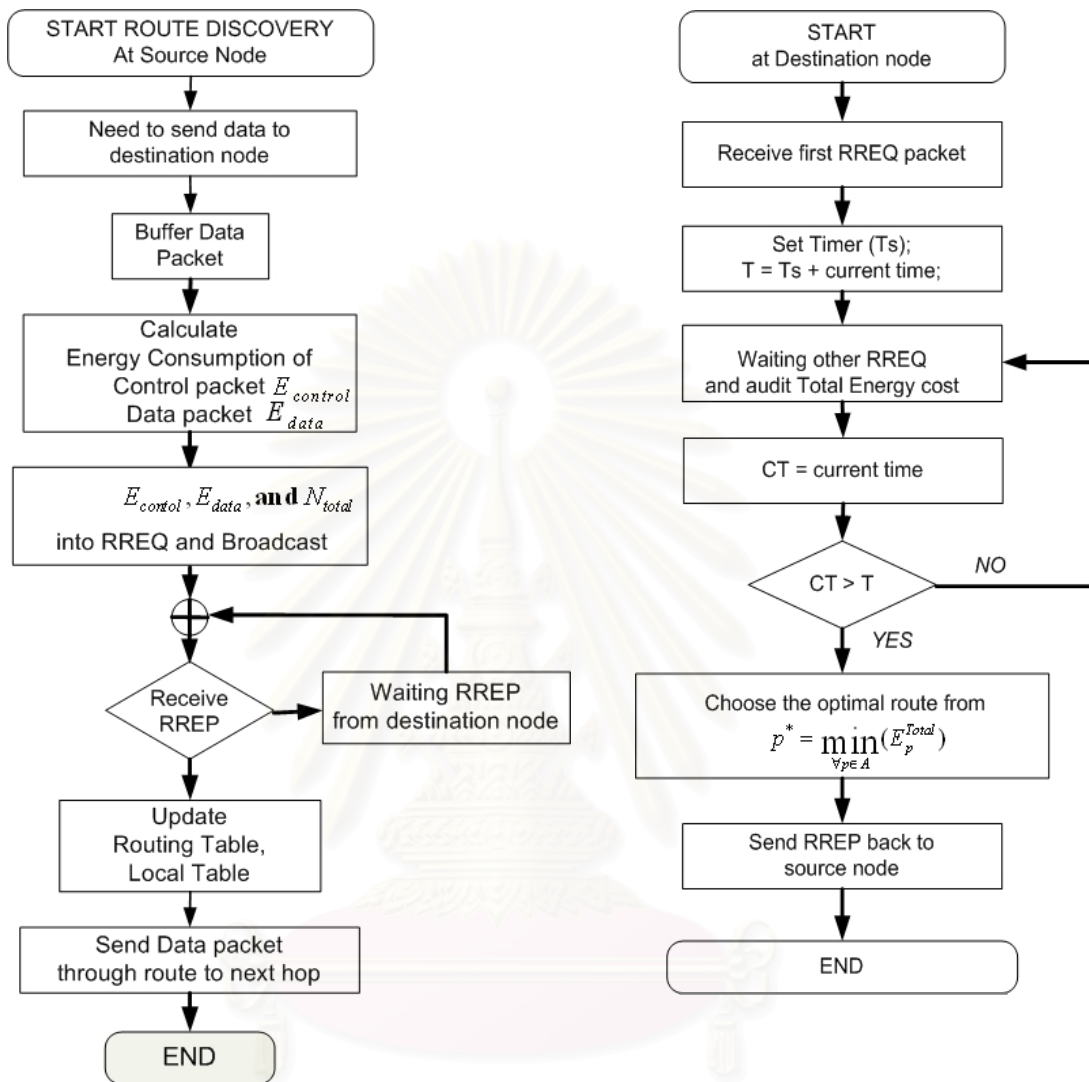
โดยขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่โนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นจำนวนหนึ่ง คือ พิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่าง โหนดต้นทางกับโนดปลายทาง โดยพิจารณาได้จากสมการที่ (3.13) นั่นคือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงาน รวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนหน้านี้ที่พิจารณาจากเส้นทางที่สูญเสียพลังงานเฉพาะ โหนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น [8, 10]

$$p^* = \min_{\forall p \in A} (E_p^{Total}) \quad (3.13)$$

เมื่อ A เป็นเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่โนดปลายทางได้รับ ภายหลังจากที่โนดเลือก เส้นทางที่ดีที่สุดจากสมการที่ (3.13) ได้แล้วโนดปลายทางจะสร้างแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply Packet, RREP) เพื่อตอบกลับไปยังโหนดต้นทางให้ทราบ โดยเส้นทางที่โนด ปลายทางใช้ส่งจะเป็นเส้นทางเดียวกันกับเส้นทางที่ดีที่สุด โดยที่ทุกโนดที่อยู่ในเส้นทางเมื่อ ได้รับแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางแล้วจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโหนดต้นทาง ภายหลังจากโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง แล้วโนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ได้มาก็เป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง

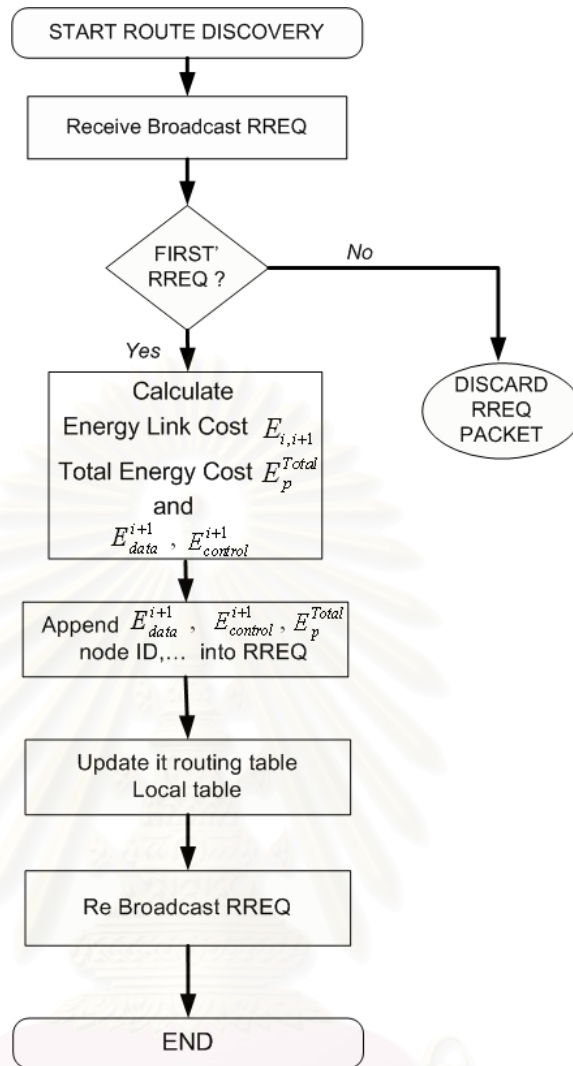
โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงาน ในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.4 โดยแยกตามกระบวนการที่โนดแต่ละโนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.3 เป็น

กระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทาง แสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)

รูปที่ 3.3 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)



รูปที่ 3.4 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทาง
สำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)

3.1.3 ข้อแตกต่างระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอกับกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV

กระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV จะมีข้อแตกต่างกันอยู่บางประการ ซึ่งข้อแตกต่างของโพรโทคอลที่นำเสนอจะช่วยทำให้การเลือกเส้นทางมีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากขึ้นและยังช่วยเสริมกระบวนการบางขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่เราต้องการจะพิจารณาอย่างเช่น อัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยสามารถสรุปข้อแตกต่างเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV สามารถให้โนดระหว่างทางสามารถตอบรับเส้นทางได้ถ้าโนดนั้นมีเส้นทางที่สามารถใช้งานได้และมีความใหม่อยู่ในตารางการ

จัดเส้นทาง แต่ในโพรโทคอลที่นำเสนอจะยอมให้โหนดปลายทางเท่านั้นที่สามารถตอบรับการร้องขอเส้นทางจากโหนดต้นทางได้เนื่องจากเส้นทางที่อยู่ในตารางการจัดเส้นทางนั้นอย่างจะเป็นข้อมูลที่เก่าและอาจจะใช้พลังงานมากขึ้นถ้าเราเลือกใช้เส้นทางดังกล่าว

2. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะใช้แพ็กเก็ตทักทาย (Hello packet) เพื่อใช้ในการตรวจสอบหรือติดตามการเชื่อมต่อกับโหนดข้างเคียง โดยการแพร่กระจายเป็นช่วงระยะเวลาที่สม่ำเสมอ แต่ในโพรโทคอลที่นำเสนอนอกจากจะใช้ตรวจสอบดังกล่าวแล้วยังใช้แพ็กเก็ตทักทายเพื่อทำนายค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของข่ายเชื่อมโยงระหว่างตัวเองกับโหนดข้างเคียงทุก ๆ โหนด นอกจากนี้แพ็กเก็ตทักทายแล้วโพรโทคอลที่นำเสนอยังคงกำหนดให้โหนดทุก ๆ โหนดเมื่อได้รับแพ็กเก็ตอะไรก็ตามก็จะต้องทำการปรับปรุงค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของข่ายเชื่อมโยงกับโหนดที่ส่งข้อมูลมาให้

3. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV กำหนดให้โหนดปลายทางเมื่อได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นแพ็กเก็ตแรกก็จะต้องทำการตอบรับเส้นทางทันที (เพราะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดในเชิงของเวลา) แต่สำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอโหนดปลายทางจะต้องรอเป็นระยะเวลาหนึ่งหลังจากได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกเข้ามาเพื่อรอแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางจากเส้นทางอื่น ๆ เพื่อให้โหนดสามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด เพราะถ้าตอบรับแพ็กเก็ตโดยทันทีเส้นทางที่ได้นั้นอาจจะใช้พลังงานมากกว่าเส้นทางอื่น ๆ ที่เข้ามาภายหลังก็เป็นไปได้

3.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยึดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2 โดยจุดประสงค์สำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอเพื่อ “เพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด” โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด (Battery lifetime) ขึ้นใหม่เพื่อนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่เพิ่มกลไกการประวิงเวลา (Delay mechanism) ของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางให้แก่แต่ละโหนด ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจะไม่ใช้เส้นทางที่พลังงานที่ต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนหน้านี้แต่จะเป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่สูงหรือพยายามหลีกเลี่ยงโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่ต่ำ เพราะฉะนั้นขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางจะแตกต่างจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

3.2.1 การคำนวณค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนด (Battery Lifetime Computation)

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในบทความอ้างอิง [9, 16, 17, 18] ได้กำหนดให้อายุการใช้งานจากแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ และในบทความอ้างอิง [15] ได้กำหนดจากความจุของแบตเตอรี่ที่เหลือและอัตราการใช้พลังงานงานของโนด แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดที่แตกต่างกันออกไป โดยจะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่โนดจะต้องใช้เพื่อที่จะส่งแพ็กเก็ตในบัพเฟอร์ไปยังโนดปลายทางของแพ็กเก็ตและพลังงานสูงสุดที่โนดจะต้องสูญเสียเพื่อส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโนดถัดไป (ซึ่งเป็นจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โนดต้นทางต้องการจะติดต่อกับโนดปลายทาง) สาเหตุที่กำหนดจากค่าสูงสุดเพราะว่า โหนดไม่ทราบว่ามีโนดถัดไปของเส้นทางที่ดีที่สุดคือโนดใดเพราะฉะนั้นจะต้องพิจารณาจากพลังงานที่จะต้องใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโนดที่อยู่ไกลที่สุดแต่อยู่ในระยะการส่งข้อมูลซึ่งก็จะเป็นพลังงานที่ใช้สูงสุดนั่นเอง จากข้างต้นเราสามารถกำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดได้จากสมการที่ (3.14)

$$\begin{aligned} BL(i, t) &= \text{Residual Energy}(i, t) - \text{Energy consume}_{queue}^i - \max_{\forall j \in \text{neighbor of node } i} \{E_{i,j}^{send}\} \\ &= RE(i, t) - E_{queue}^i - \max_{\forall j \in \text{neighbor of node } i} \{E_{i,j}^{send}\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อ $BL(i, t)$ คือ อายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนด i ณ เวลา t ส่วนค่า E_{queue}^i คือ พลังงานที่โนด i ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัพเฟอร์ ซึ่งอาจจะเป็นแพ็กเก็ตควบคุมหรือ แพ็กเก็ตข้อมูลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.15) และ $\max_{\forall j \in \text{neighbor of node } i} \{E_{i,j}^{send}\}$ เป็นค่าพลังงานที่โนด i จะต้องสูญเสียจากการส่งสูงสุดระหว่างโนด i ไปยังโนดข้างเคียง j ทุกตัวที่อยู่ในระยะการส่งของโนด i ยกเว้นโนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้โนด i ซึ่งพลังงานที่สูญเสียจากการส่งระหว่างโนด i และโนด j ใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.16)

$$\begin{aligned} E_{queue}^i &= N_{rreq} \times (P_{send}^c \times T_{send}) + \sum_{k=1}^{N_{data}} P_{send}^d \times T_{send}^k \\ &= N_{rreq} \times \left(\frac{P_{send}^c \times L_{rreq}}{f} \right) + \sum_{k=1}^{N_{data}} \left(P_{send}^d \times \frac{L_{data}^k}{(1 - p_k^{i,j}) \times f} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$E_{i,j}^{send} = P_{send}^c \times \frac{L_{rreq}}{f} + P_{send}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{(1 - p^{i,j}) \times f} \quad (3.16)$$

ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (3.14) ถึง (3.16) สามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งการกำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดในลักษณะนี้จะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนในบทความอ้างอิง [9, 15, 16, 17, 18, 19] และทำให้การตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.2 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (3.14) ถึงสมการที่ (3.16)

P_{send}^d	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
P_{send}^c	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ (Watts)
T_{send}	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (sec)
T_{send}^k	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต k (sec)
L_{data}	ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต้องการส่ง (Bits)
L_{data}^k	ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูล k ที่อยู่ในบัฟเฟอร์ (Bits)
L_{req}	ขนาดของแพ็กเก็ตควบคุม (Bits)
N_{req}	จำนวนแพ็กเก็ต RREQ ทั้งหมดอยู่ในบัฟเฟอร์ (Packets)
N_{data}	จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในบัฟเฟอร์ (Packets)
N_{total}	จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะส่ง (Packets)
f	อัตราในการส่งแพ็กเก็ต (Mbps)
$p^{i,j}$	อัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j
$p_k^{i,j}$	อัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของแพ็กเก็ต k บนสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j โดยโหนด j เป็นโหนดปลายทางของแพ็กเก็ต k

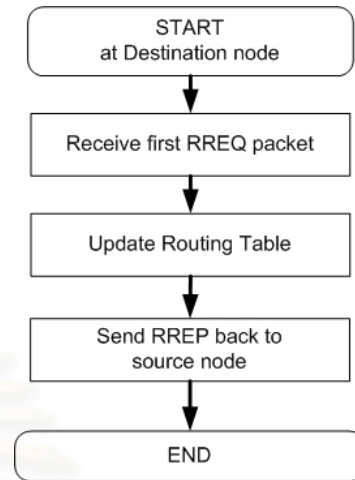
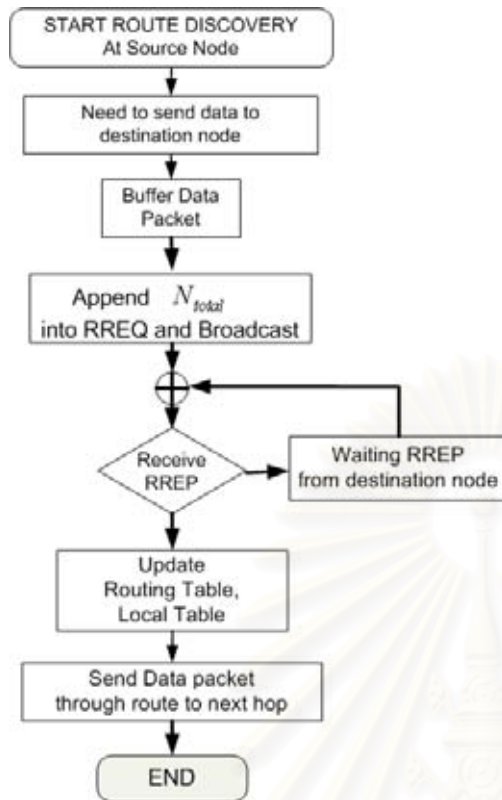
3.2.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโหนดให้มากที่สุดที่นำเสนออยู่บนพื้นฐานโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV โดยได้ทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV เพื่อให้กระบวนการเลือกเส้นทางสามารถยืดอายุการใช้งานของโหนดและโครงข่าย กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโหนดปลายทาง แต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้น โหนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเก็ต RREQ จะต้องบรรจุจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดต้นทางต้องการจะสื่อสารกับโหนดปลายทาง และภายหลังจากโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะต้องคำนวณว่า ณ ขณะเวลานั้นโหนดสามารถจะทำงานได้อีกนานเท่าไรภายหลังจากได้รองรับการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและปลายทางที่ร้อง

ขอมมา (เวลาที่โหนดสามารถทำงานต่อไปได้ภายหลังจากการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเสร็จสิ้นลง) ซึ่งคำนวณได้จากค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด (Battery Lifetime หรือ BL) จากสมการที่ (3.14) ต่อจากนั้นโหนดระหว่างทางก็จะทำการหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งตามฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay function) ก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงต่อไป ซึ่งช่วงเวลาในการหน่วงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลาปัจจุบัน โดยเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า กลไกการประวิงเวลา (Delay mechanism) ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ต RREQ แรกเข้ามา โหนดปลายทางก็จะตอบรับเส้นทางนี้ทันทีโดยการส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทางผ่านทางเส้นทางเดิมที่แพ็กเก็ต RREQ เดินทางมาถึง ซึ่งจะแตกต่างจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำสุด (*Proposed-Energy*) ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นที่กำหนดให้โหนดปลายทางจะต้องรอเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อรอแพ็กเก็ตจากเส้นทางอื่น ๆ แล้วจึงตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด สาเหตุที่ไม่กำหนดให้โหนดปลายทางจะต้องหยุดรอเนื่องจาก กลไกการประวิงเวลาที่กล่าวข้างต้น โดยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ต่ำจะหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นเวลานานก่อนที่จะแพร่กระจายไปยังโหนดข้างเคียงเมื่อเทียบกับโหนดที่มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สูง เพราะฉะนั้นส่วนมากแล้วแพ็กเก็ต RREQ ที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ต่ำจะถูกทิ้ง (Discard) ดังนั้นแพ็กเก็ตที่ไปถึงยังโหนดปลายทางจะเป็นแพ็กเก็ตแรกก็จะเป็นแพ็กเก็ตที่ผ่านเส้นทางซึ่งประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่อยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับโหนดอื่น ๆ ในโครงข่าย

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.7 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.6 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.7

จากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวข้างต้นสรุปได้ว่าเส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่อยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับโหนดอื่น ๆ ในโครงข่ายหรือพยายามหลีกเลี่ยงโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ต่ำ ซึ่งจะทำให้โหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ในระดับที่ต่ำไม่ถูกใช้งานมากเกินไป ซึ่งสามารถทำให้โครงข่ายและโหนดที่สามารถที่จะขยายเวลาที่จะทำงานในโครงข่ายแอกฮอปไปได้และก็จะส่งผลทำให้สมรรถนะในด้านอื่น ๆ ของระบบดีขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย มากที่สุด (Proposed-Battery)

รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย มากที่สุด (Proposed-Battery)

3.2.3 ฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay Function)

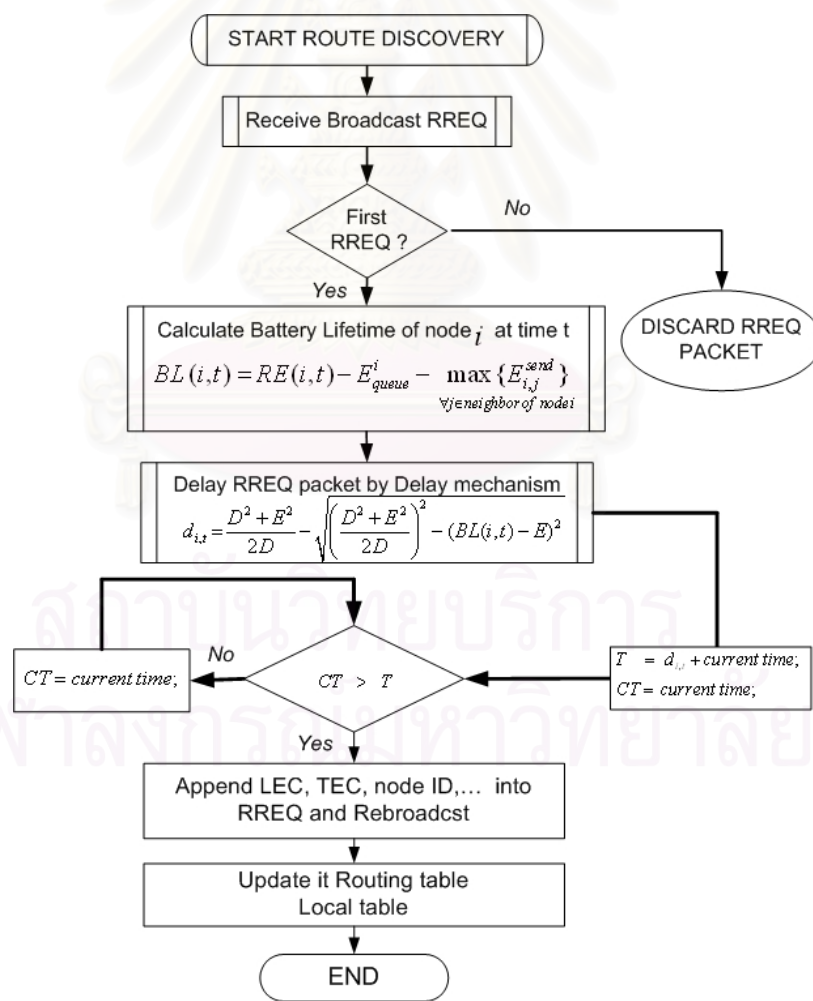
กลไกการประวิงเวลาจะเปรียบเสมือนกับฟังก์ชันที่แปลงจากอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดที่แสดงด้วยสมการที่ (3.14) ไปเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ก่อนที่จะดำเนินการอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งมีหลายฟังก์ชันที่ถูกนำมาเสนอในบทความอ้างอิง [17] เช่น Linear Convex และ Concave ซึ่งฟังก์ชันแบบ Concave ให้ผลลัพธ์ในการยืดอายุการใช้ของโครงข่ายได้ดีที่สุด โดยที่ Yu และ Lee [17] ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลาดังกล่าว เพื่อนำมาใช้งานซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.17)

$$d_{i,t} = \frac{E * D}{e_{i,t} + E} \tag{3.17}$$

เมื่อ $d_{i,t}$ คือ ช่วงเวลาที่โหนดใช้ในการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ของโหนด i ณ เวลา t มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที ส่วนค่า E คือ ค่าพลังงานสูงสุดของโหนด (Maximum energy) มีหน่วยเป็นจูล

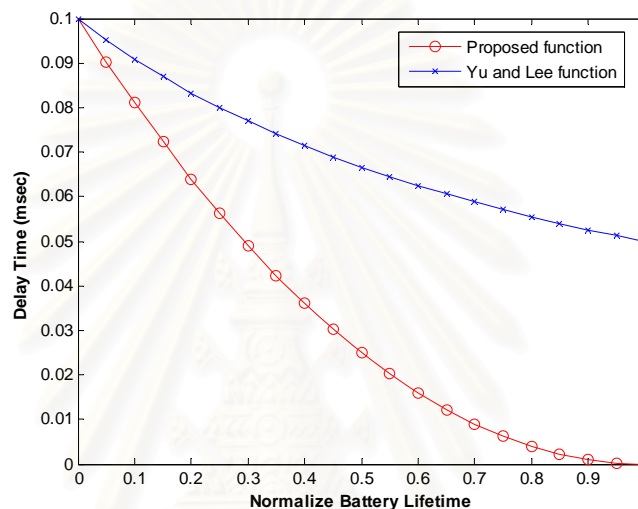
(Joules) D เป็นเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาแพ็กเก็ตสูงสุด (Maximum delay) และ $e_{i,t}$ คือพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนด i ณ เวลา t ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันในสมการที่ (3.17) ยังคงมีปัญหาคือ ค่าต่ำสุดของการหน่วงเวลาแพ็กเก็ตคือ $D/2$ ก็หมายความว่าถึงแม้ว่าโหนดจะมีพลังงานจากแบตเตอรี่อยู่เต็มแต่โหนดก็ยังคงถูกหน่วงเวลาแพ็กเก็ตไว้ถึง $D/2$ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอว่าฟังก์ชันที่นำมาใช้ไม่ควรที่จะมีการหน่วงเวลามากเกินความจำเป็นในกรณีที่โหนดมีพลังงานจากแบตเตอรี่เต็มหรือค่า $BL(i,t)$ เท่ากับค่าพลังงานสูงสุดของโหนดเพราะอาจจะทำให้สมรรถนะด้านอื่น ๆ ของระบบลดต่ำลงเช่น การประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลจากปลายถึงปลาย (Average End-to-End Delay) โดยโพรโทคอลที่นำเสนอจะยังคงใช้ฟังก์ชันแบบ Concave ซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.18)

$$d_{i,t} = \frac{D^2 + E^2}{2D} - \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2D}\right)^2 - (BL(i,t) - E)^2} \tag{3.18}$$



รูปที่ 3.7 พลังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery)

โดยฟังก์ชันที่นำเสนอจะลดค่าเฉลี่ยเวลาที่หน่วงแพ็กเก็ต และเพิ่มความแตกต่างของเวลาที่ใช้หน่วงแพ็กเก็ตระหว่างโหนดที่ใกล้หมดอายุการใช้งานกับโหนดที่มีอายุการใช้งานเหลืออยู่เต็ม เพราะฉะนั้นเส้นทางที่แพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทางเป็นอันดับต้น ๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูงเพราะแพ็กเก็ต RREQ ที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่ต่ำจะถูกหน่วงเวลาไว้นาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแพ็กเก็ตเหล่านี้ก็จะถูกโหนดอื่น ๆ ละทิ้งเนื่องจากแพ็กเก็ตที่เข้ามาไม่ใช่แพ็กเก็ตแรก โดยความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันที่นำเสนอกับฟังก์ชันที่นำเสนอโดย Yu และ Lee สามารถแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และในบทความอ้างอิง [17] ของ Yu และ Lee

3.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocols)

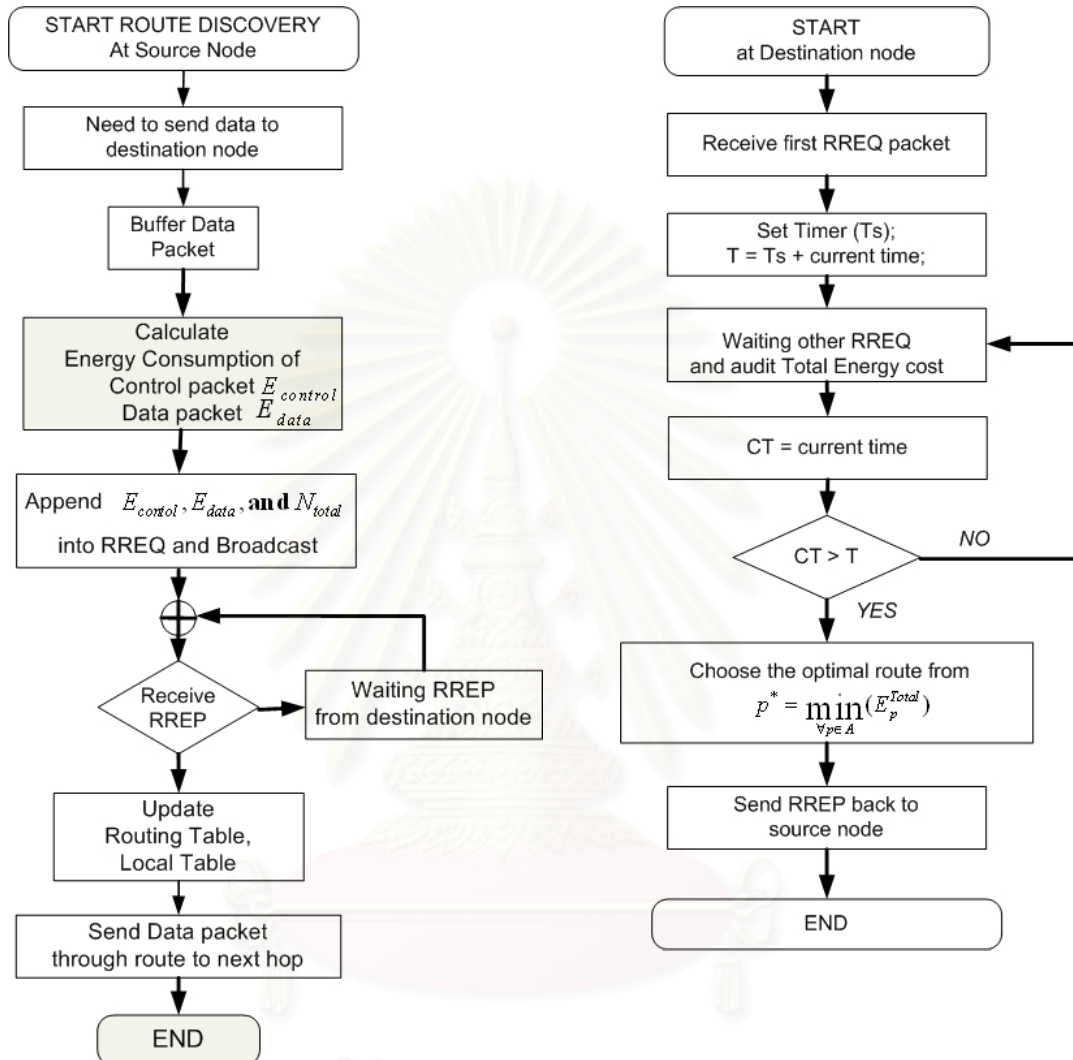
โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยเป้าหมายสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอนี้เพื่อ “เพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด” จะเห็นได้ว่าเป้าหมายจะเหมือนกับโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (*Proposed-Battery*) โดยโพรโทคอลแบบผสมเกิดจากแนวความคิดที่ว่า การจะช่วยให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานให้มากที่สุดนั้นเราจะต้องเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำและขณะเดียวกันก็ต้องเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งถ้าพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งก็สามารถจะช่วยยืดอายุได้เช่นกันแต่ไม่ประสิทธิภาพเท่ากับนำทั้งสองเงื่อนไขมาพิจารณาพร้อม ๆ กัน

เพราะฉะนั้นโพรโทคอลที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้จะนำเสนอโพรโทคอลใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (*Proposed-Hybrid*) ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นมาทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายทั้งสองอย่างพร้อมกัน

3.3.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโหนดปลายทางแต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้น โหนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเก็ต RREQ จะต้องบรรจุจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดต้นทางต้องการจะสื่อสารกับโหนดปลายทางรวมทั้งค่า $E_{control}$ และ E_{data} จากสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับ และสุดท้ายคือ กำหนดค่าเริ่มต้นของ E_p^{Total} ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียง หลังจากโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะทำการหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งด้วยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่เสนอในหัวข้อที่ 3.2.3 ซึ่งช่วงเวลาในการหน่วงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลาปัจจุบัน (สมการที่ (3.14)) ก่อนที่จะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง และในช่วงเวลาที่แพ็กเก็ตถูกหน่วงอยู่นั้น (หรือก่อนที่หมดเวลาการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้ตั้งไว้) โหนดต้องคำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง (Energy Link Cost) และค่าต้นทุนรวมพลังงาน (Total Energy Cost) เหมือนกับขั้นตอนของการคำนวณพลังงานที่สูญเสียในโพรโทคอลแบบใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ เสร็จก็จะบรรจุค่าดังกล่าวลงไปในแพ็กเก็ต RREQ และแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียงต่อไป กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทาง หลังจากโหนดปลายทางได้รับ RREQ แรกแล้วจะตั้งเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อรอ RREQ ที่ได้จากเส้นทางอื่น ๆ หรืออาจจะกำหนดจำนวน RREQ ที่จะรับ โดยแพ็กเก็ต RREQ ที่เข้ามาหลังจากเวลาที่กำหนดไว้จะถูกลบทิ้งทั้งหมด เมื่อหมดเวลาที่ตั้งไว้หรือได้รับแพ็กเก็ต RREQ ครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.13) คือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หลังจากโหนดเลือกเส้นทางเส้นทางได้แล้ว โหนดปลายทางจะสร้างแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (RREP) เพื่อตอบกลับไปยังโหนดต้นทางให้ทราบ โดยใช้เส้นทางที่เลือกไว้ข้างต้น ในการส่งแพ็กเก็ตไปให้โหนดต้นทาง โดยระหว่างที่ส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดทุกโหนดที่ได้รับแพ็กเก็ตจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไปเรื่อย ๆ

จนถึงโหนดต้นทาง ภายหลังจากโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตเกิดการตอบรับเส้นทางแล้วโหนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ได้มากที่สุดเป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง



รูปที่ 3.9 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid)

รูปที่ 3.10 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทาง ของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid)

จากกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่ได้กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในช่วงเวลาที่โหนดปลายทางทำการรอแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง และจากการใช้กลไกการประวิงเวลาทำให้เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้

งานจากแบตเตอรี่ (Battery Lifetime) อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งทำให้เส้นทางที่ดีที่สุดเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่ายดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นทางที่ดีที่สุดของโพรโทคอลทั้งแบบการใช้พลังงานต่ำที่สุด และยึดอายุการใช้งานมากที่สุดที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น

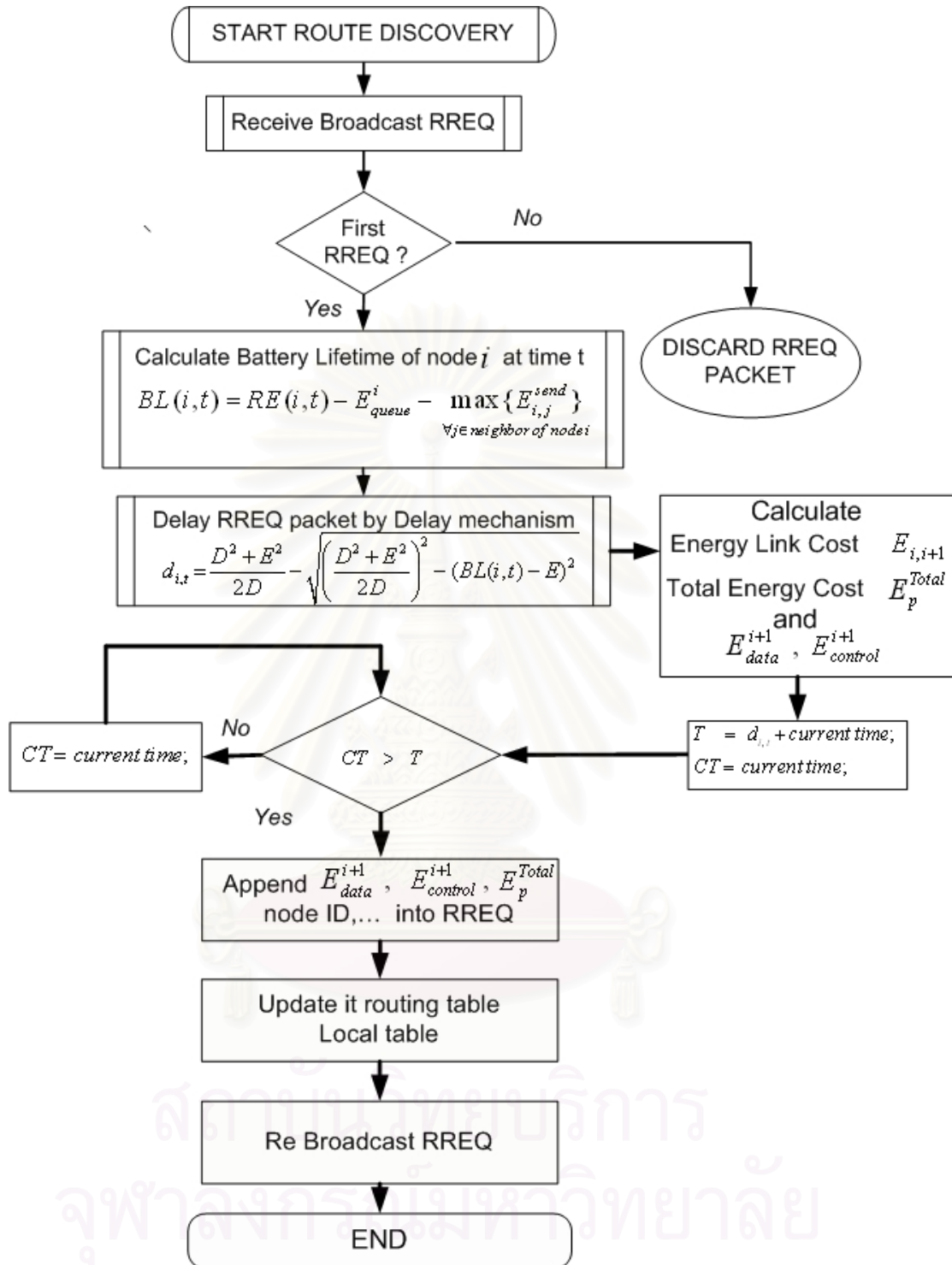
โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.11 โดยแยกตามกระบวนการที่โนดแต่ละโนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนที่เกิดกับโนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.10 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดระหว่างทาง แสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.11

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง 3 แบบดังนี้ แบบที่หนึ่งคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ ใช้พลังงานต่ำที่สุด (*Proposed-Energy*) โดยในแบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยึดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (*Proposed-Battery*) และแบบสุดท้ายคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยึดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (*Proposed-Hybrid*) และกล่าวถึงกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอแต่ละแบบ

โดยเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่หนึ่งคือ “ลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด” ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถยึดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ อย่างไรก็ตาม การพยายามลดการใช้พลังงานไม่ใช่เป็นแนวทางที่ดีที่สุดเพราะว่าพลังงานที่ใช้ไม่ได้สะท้อนถึงอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดโดยตรง

ตัววัดที่สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโนดโดยตรงได้ถูกนำเสนอในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่สองและสาม โดยนำตัววัดดังกล่าวมาใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งสองแบบจะเหมือนกันคือ “เพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด” แต่แบบที่สามพยายามทำให้โครงข่ายสามารถยึดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นจากแบบที่สองโดยเลือกใช้เส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่นำเสนอในแบบที่หนึ่ง นอกจากนั้นเส้นทางดังกล่าวจะต้องผ่านโนดที่มีค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูงเหมือนกับโพรโทคอลที่นำเสนอในแบบที่สอง ซึ่งเราเรียกโพรโทคอลแบบที่สามารถเป็น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม



รูปที่ 3.11 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทาง
สำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid)

บทที่ 4

สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

เนื้อหาของงานวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นสภาพแวดล้อมของการจำลอง ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่ใช้ในการจำลองอย่างเช่นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกถึงสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง ในส่วนที่สองจะเป็นผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอลดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยจะเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่อยู่ในประเภทเดียวกันและเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอลภายใต้รูปแบบการจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงช่วงที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดค่า “การประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay)” ดังสมการที่ (3.8) และ “เวลาการคอย (Waiting Time)” สำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอล โดยจะใช้สถานการณ์ในการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบข้างต้น

4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment)

ในการจำลองกระบวนการทำงานทั้งหมดในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม Network Simulator 2 (NS2) เวอร์ชัน 2.8 [29] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่จำลองแบบตามลำดับเหตุการณ์ (Discrete Event Simulation) โดยสมรรถนะของโพรโทคอลจะเปลี่ยนไปเมื่อจำลองภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันและเพื่อให้เข้าใจโพรโทคอลที่นำเสนอในแง่มุมต่าง ๆ ได้มากขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการจำลองโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งสามแบบภายใต้สถานการณ์ที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ใช้ในการจำลองมีดังนี้

4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง

ปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบ (Offered load) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายโดยรวม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบสามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก 3 พารามิเตอร์คือ ขนาดของแพ็กเก็ต (Packet size) จำนวนการเชื่อมต่อ (Number of connection) และอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ (Packet rate) ในการทดสอบนี้ต้องการจะประเมินว่าโพรโทคอลที่นำเสนอจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายอย่างไร

เมื่อปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเพิ่มได้จากขนาดของแพ็กเก็ตหรือจำนวนการเชื่อมต่อ แต่พารามิเตอร์ที่จะแสดงถึงปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายดีที่สุดคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ โดยการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลก็จะทำให้ปริมาณโหลดในแต่ละการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
จำนวนโหนด	50 โหนด
ขนาดของพื้นที่ในการจำลอง	1000 เมตร X 1000 เมตร
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	900 วินาที
จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ	50 ครั้ง
ลักษณะของทราฟฟิก	
จำนวนการเชื่อมต่อ	20 การเชื่อมต่อ
ทราฟฟิกที่ใช้ในการสื่อสาร	Constant Bit Rate (CBR)
อัตราการส่งแพ็กเก็ต	4, 10, 15, 20, 25 แพ็กเก็ต/วินาที
ขนาดของแพ็กเก็ต	512 ไบต์
รูปแบบการเคลื่อนที่	
แบบจำลองการเคลื่อนที่	Random Waypoint [34]
ความเร็วสูงสุดของโหนด	10.0 เมตร/วินาที
เวลาหยุด (Pause Time)	60 วินาที

- แบบจำลองการใช้พลังงานและคุณสมบัติทางด้านกายภาพของคลื่นวิทยุที่ใช้งาน
 - พลังงานเริ่มต้นของโหนดมีค่าเท่ากับ 10 จูล
 - ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง (P_t) การรับ (P_r) และการได้ยิน ($P_{overhear}$, P_o) มีค่าเท่ากับ 0.6635, 0.395 และ 0.200 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังงานที่ใช้ในโหมดสถานะหลับและสถานะว่างมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการพิจารณาพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้

- กำหนดให้ทุกโหนดมีกำลังในการส่งสัญญาณคงที่และเท่ากันทุกโหนด (Constant-Power)
- อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 11 Mbps ด้วยระยะทาง 180 เมตร
- อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ตควบคุมในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (RTS/CTS/ACK) เท่ากับ 2 Mbps ด้วยระยะทาง 270 เมตร

4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล

การประเมินผลว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ทำการออกแบบให้ผลในทางที่ดีหรือว่าแย่ นั้นจะต้องมีพารามิเตอร์หรือตัววัดเพื่อมาใช้ในการชี้วัด โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน และพารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ชี้วัดคุณภาพการให้บริการของโพรโทคอลทั่วไป ๆ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละส่วนแสดงได้ดังนี้

- พารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงาน
 - อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ (Packet delivery ratio) สามารถคำนวณได้จากจำนวนแพ็กเก็ตที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จต่อจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ส่งออกจากโหนดต้นทาง
 - ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย (Average end-to-end delay) เป็นค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ตจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งมีหน่วยเป็น วินาที
 - จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ต (Average hop count per packet) เป็นค่าที่แสดงจำนวนฮอปเฉลี่ยที่แต่ละแพ็กเก็ตใช้เดินทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง
 - จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮด (Overhead routing load) เป็นจำนวนแพ็กเก็ตการจัดสรรเส้นทางทั้งหมดที่ใช้เพื่อสร้างและดูแลเส้นทางอย่างเช่น (แพ็กเก็ต RREQ RREP RRER และ HELLO) ซึ่งจะวัดในหน่วยไบต์

- พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน
 - พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ (Energy per Good-put) เป็นจำนวนพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายสูญเสียต่อจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ในดปลายทางได้รับอย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนให้เห็นว่าโครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ถ้าค่าที่ได้มีค่าที่ต่ำนั้นแสดงว่าโครงข่ายมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูง หน่วยที่ใช้คือ จูล/แพ็กเก็ต
 - อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network lifetime) สามารถวัดได้จากเวลาเริ่มต้นในการจำลองจนกระทั่งมีโหนดแรกในโครงข่ายไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่เหลืออยู่หรือโหนดนั้นไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป
 - อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด (Average time terminated node lifetime) เป็นค่าที่แสดงถึงอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยของทุก ๆ โหนดในโครงข่ายจนหมดระยะเวลาการทดสอบ
 - ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด (Standard deviation of remaining energy per node) เป็นค่าที่แสดงว่าแต่ละโหนดมีการใช้พลังงานหรือสูญเสียพลังงานอย่างสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้าผลที่ได้มีค่าต่ำแสดงว่าโหนดในโครงข่ายถูกใช้งานอย่างสม่ำเสมอ (ในแง่การใช้พลังงานจากแบตเตอรี่)

4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทคอลทั้งสามประเภท

ในส่วนนี้จะแสดงผลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบของโพรโทคอลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่อยู่ในประเภทเดียวกัน ซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแต่ละประเภทจะทำการทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1

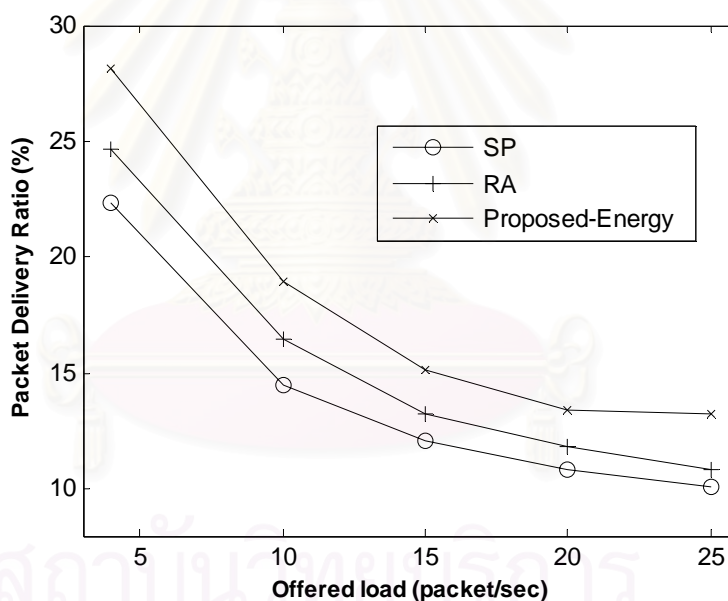
4.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลที่นำเสนอและจัดอยู่ในโพรโทคอลประเภทนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocol) โดยจะใช้สัญลักษณ์ *Proposed-Energy* แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งโพรโทคอลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอก็ควรจะอยู่ในประเภทด้วยกัน โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้โพรโทคอลการ

จัดสรรเส้นทาง 3 แบบมาใช้เปรียบเทียบซึ่งมีดังนี้ แบบแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจเส้นทาง (SP) [2] แบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTRP [8] แต่เนื่องจากในการจำลองได้กำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่ ผลที่ได้จากโพรโทคอลแบบ MTRP จะเหมือนกับกรณีของโพรโทคอลแบบ AODV และแบบสุดท้ายคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Retransmission-Aware (RA) [10]

4.2.1.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

ผลการทดสอบสำหรับโพรโทคอลในประเภทที่คำนึงถึงพลังงานและกำลัง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.8 ซึ่งในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 จะเป็นผลการทดสอบโดยใช้พารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงาน ส่วนในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 เป็นผลการทดสอบเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานมาใช้วัดประสิทธิภาพ

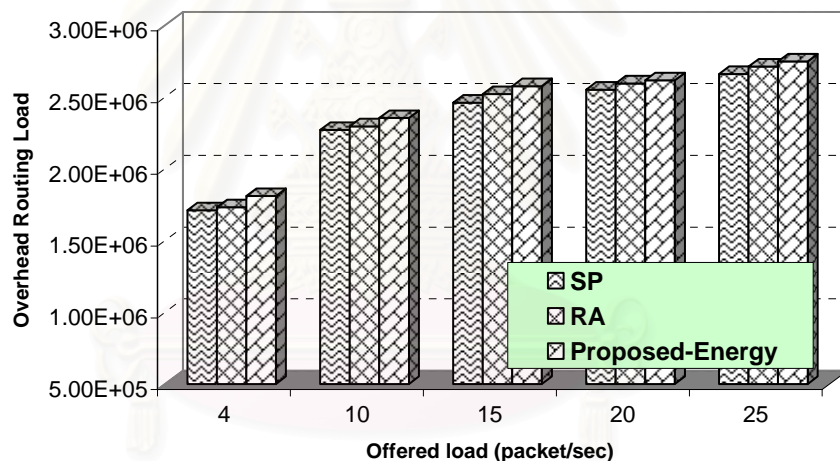


รูปที่ 4.1 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง)

จากรูปที่ 4.1 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จของโครงข่ายสำหรับทุก ๆ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อโหนดเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลก็จะทำให้โครงข่ายมีความคับคั่ง (Congestion) เพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะทำให้แพ็กเก็ตถูกละทิ้งมากขึ้นโดยเฉพาะการละทิ้งเพราะบัฟเฟอร์ของแต่ละโหนดไม่สามารถรองรับแพ็กเก็ตที่มากขึ้นได้ (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้บัฟเฟอร์ของแต่ละโหนดสามารถรองรับได้

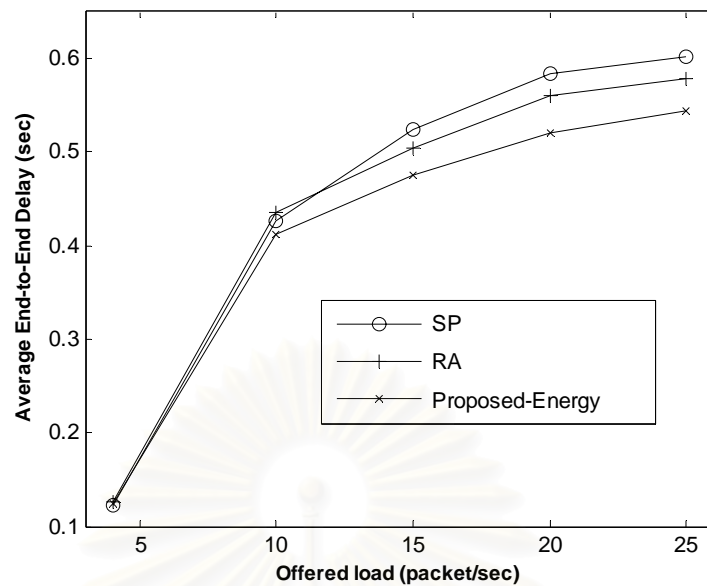
คือ 50 แพ็กเกต) นอกจากนั้นโอกาสของการเกิดการชนกันของข้อมูลก็เพิ่มมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ได้ให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จมากกว่า โพรโทคอลแบบ SP และ RA ในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล โดยในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเกตต่อวินาที ค่าที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP ร้อยละ 30.57 ซึ่งสาเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้โพรโทคอลการหาเส้นทางที่นำเสนอให้ค่าที่ดีที่สุดนั้นคือ

- เส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโหนดปลายทางเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งต่ำ เพราะเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.11) ซึ่งคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงจะพิจารณาพลังงานที่โหนดข้างเคียงจะต้องสูญเสีย ดังนั้นถ้าโหนดของข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีจำนวนโหนดข้างเคียงอยู่ไม่หนาแน่นหรือจำนวนน้อยก็จะส่งผลให้ค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงและค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางมีค่าต่ำตามไปด้วย แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ RA และ SP ไม่ได้พิจารณาตรงจุดนี้ เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้ อาจจะเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งที่สูงแน่นอนว่า ย่อมจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จมีค่าต่ำลง

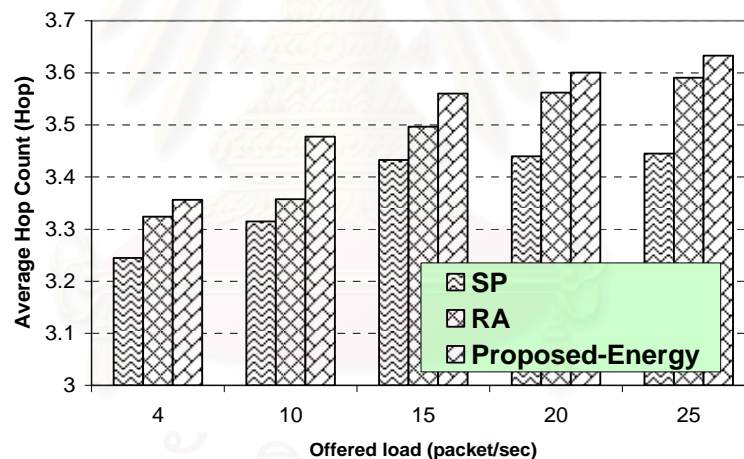


รูปที่ 4.2 จำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

- เส้นทางที่ได้ถือได้ว่าเป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือ โดยโพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อกันมาก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งในแต่ละช่วงเชื่อมต่อก็มีระยะทางที่สั้น เนื่องจากการส่งที่ใช้ระยะทางยาว ๆ ก็จะทำให้คุณภาพของข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวไม่มีคุณภาพ (ค่าอัตราการการส่งแพ็กเกตผิดพลาดมีค่าสูง) ซึ่งก็จะส่งผลให้โหนดจำเป็นต้องใช้พลังงานในการส่งแพ็กเกตที่ผิดพลาดซ้ำมากยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นจึงทำให้เส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลแบบ SP มีความน่าเชื่อถือต่ำทำให้ปริมาณการส่งแพ็กเกตสำเร็จมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 4.3 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

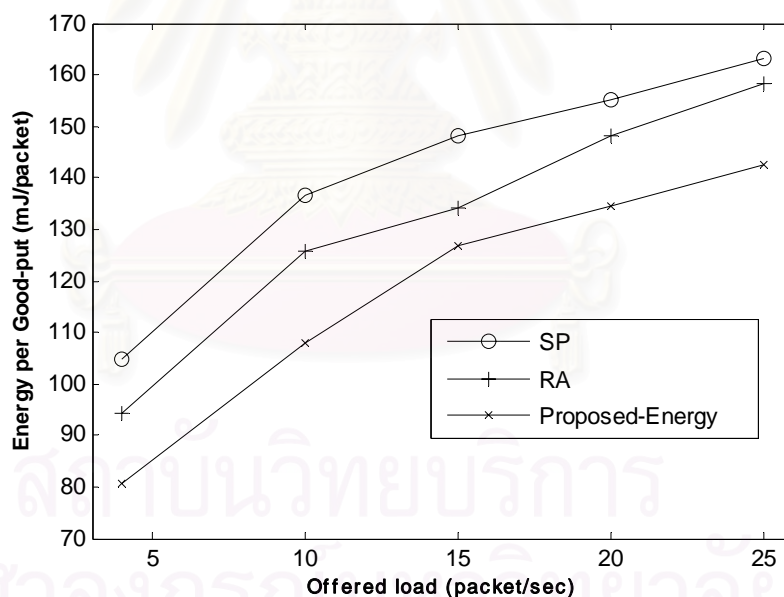


รูปที่ 4.4 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบอื่น ๆ ทั้งสองแบบ ซึ่งน่าจะทำให้จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดมีค่าที่ต่ำ แต่จากผลที่แสดงในรูปที่ 4.2 โพรโทคอลที่นำเสนอให้ค่าแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดที่สูงกว่าเนื่องจากค่าที่วัดแสดงเป็นจำนวนไบต์และโพรโทคอลที่นำเสนอได้ใช้แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรโทคอลแบบ SP และ RA เพราะจะต้องเพิ่มข้อมูลเกี่ยวกับการใช้พลังงานของโหนดเข้าไปเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกเส้นทาง แต่ถ้าพิจารณาในหน่วยแพ็กเก็ตโพรโทคอลที่

นำเสนอจะใช้แพ็กเกตที่ต่ำกว่าแบบ SP ร้อยละ 3.19 และต่ำกว่าร้อยละ 3.07 เมื่อเปรียบเทียบกับ โพรโทคอลแบบ RA ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 25 แพ็กเกตต่อวินาที

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการประวิงเวลาของแพ็กเกตและความยาวเฉลี่ยของเส้นทางตามลำดับ จากรูปโพรโทคอลแบบ SP จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด แต่การใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดไม่ได้หมายความว่า แพ็กเกตจะใช้เวลาในการส่งที่ต่ำเสมอไป เพราะเมื่อดูจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.3 ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าเท่ากับ 25 แพ็กเกตต่อวินาที โพรโทคอลที่ใช้เส้นทางต่ำที่สุดจะให้การประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางของแพ็กเกตมีค่าสูงสุด เพราะฉะนั้นการประวิงเวลาของแพ็กเกตนอกจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนฮอป (Hop count) แล้วยังขึ้นอยู่กับความคับคั่งที่เกิดขึ้นกับเส้นทางนั้นด้วย ซึ่งโพรโทคอลการที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy จะให้ค่าการประวิงเวลาที่ต่ำที่สุด เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอจะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งสูงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในกรณีที่ปริมาณไหลในโครงข่ายมีค่าต่ำ ๆ (อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าต่ำ) การประวิงเวลาของแพ็กเกตจะเกิดจากความยาวของเส้นทางที่แพ็กเกตใช้เดินทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายเป็นหลัก



รูปที่ 4.5 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

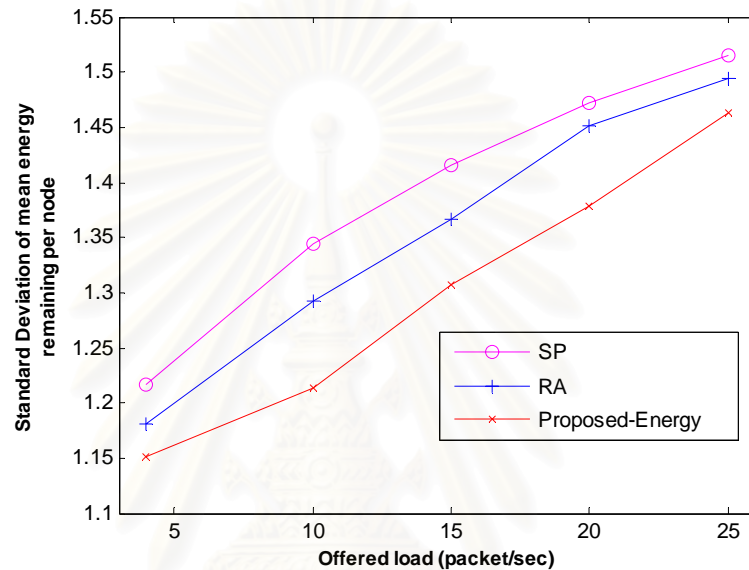
รูปที่ 4.5 ถึง 4.8 เป็นผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้ง 3 โพรโทคอลเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่าย จากรูปที่ 4.5 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านการใช้

พลังงานมีค่าลดลงคือ พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความคับคั่งของโครงข่ายทั้งการชนกันของข้อมูลที่มากขึ้นและข้อจำกัดของปริมาณแพ็กเก็ตที่แต่ละโหนดสามารถรองรับได้เพิ่มขึ้นตามอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล นอกจากนี้ประสิทธิภาพใช้พลังงานลดต่ำลงแล้วยังส่งผลทำให้พลังงานที่แต่ละโหนดสูญเสียไม่เสมอภาคกันซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 นอกจากนี้ยังทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้เฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายลดลงตามไปด้วยเมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

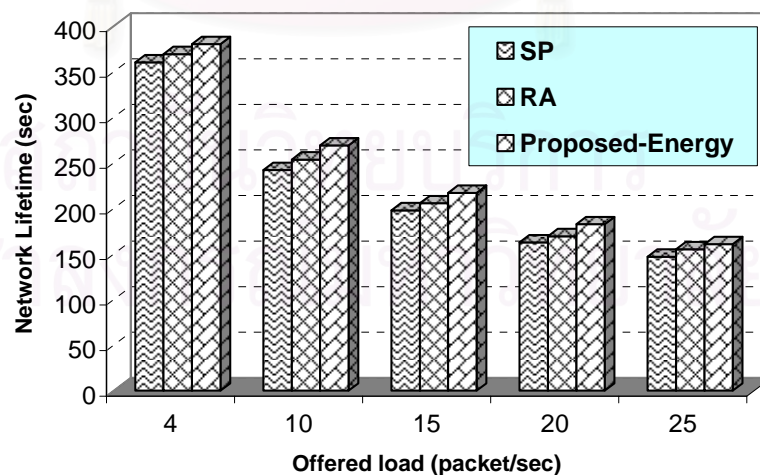
รูปที่ 4.5 แสดงพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ซึ่งเป็นค่าที่จะใช้สำหรับประเมินว่าโพรโทคอลที่นำมาทดสอบมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมากหรือน้อยเพียงใด ถ้าค่าที่ได้มีค่าต่ำแสดงว่าโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า โพรโทคอลแบบ RA และ Proposed-Energy จะให้ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานที่ดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP เพราะโพรโทคอลแบบ RA และ Proposed-Energy ได้คำนึงถึงการสูญเสียพลังงานของโหนดมาใช้พิจารณา อย่างไรก็ตามโพรโทคอลการที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานดีที่สุด เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด แต่ในขณะที่โพรโทคอลแบบ RA จะใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำที่สุดเช่นกัน แต่ไม่ได้พิจารณาผลของการสูญเสียพลังงานจากโหนดที่รับข้อมูล (Receive) และโหนดข้างเคียงที่ได้ยินข้อมูล (Overhear) แต่พิจารณาเฉพาะพลังงานที่โหนดในเส้นทางใช้ในการส่งเท่านั้น โดยโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 30.15 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP ขณะที่โพรโทคอลแบบ RA ช่วยลดพลังงานได้เพียงร้อยละ 25.72 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP เช่นกัน ณ ที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 แพ็กเก็ตต่อวินาที และขณะที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 14.49 แต่โพรโทคอลแบบ RA ได้เพียงร้อยละ 13.05 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP

ผลที่สะท้อนถึงความเสมอภาคของการใช้พลังงานในแต่ละโหนดแสดงดังรูปที่ 4.6 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด ถ้าผลการทดสอบโพรโทคอลให้ค่าออกมาต่ำแสดงว่า โพรโทคอลดังกล่าวมีความเสมอภาคในการใช้พลังงานที่ดี ซึ่งความเสมอภาคในการใช้พลังงานก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโครงข่าย จากรูปโพรโทคอลที่ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดต่ำที่สุดคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอมีการกระจายปริมาณไหลต่อไปยังเส้นทางอื่นแทนที่จะใช้เส้นทางเดิมอยู่ตลอดเวลาจนโหนดในเส้นทางหมดอายุเร็วกว่ากำหนด ซึ่งการกระจายไหลที่กล่าวนั้นเกิดขึ้นเพราะโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง

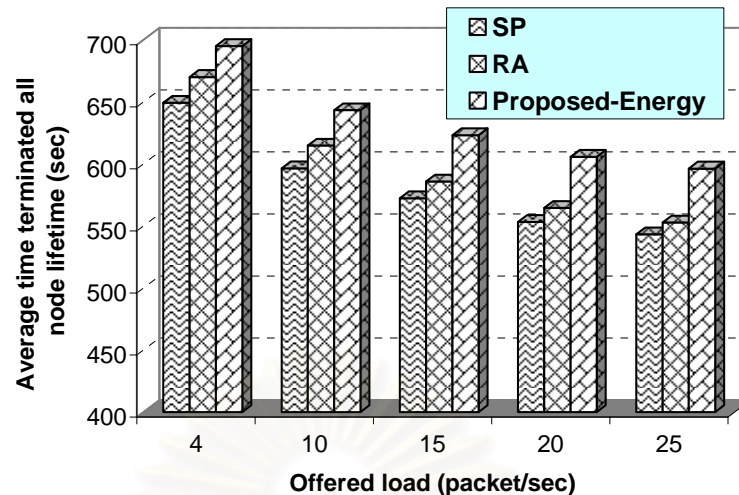
อยู่ตลอดเวลา (ในดมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา) ซึ่งทำให้เส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงไปใช้เส้นทางอื่นที่ใช้พลังงานที่ต่ำ ส่วนในกรณีของ SP และ RA ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเหมือนกัน แต่โอกาสที่จะได้เส้นทางเดิมมีค่าสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ เพราะปัจจัยที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าต้นทุนของเส้นทางมีน้อยกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งในกรณีของโพรโทคอลแบบ RA จะพิจารณาเพียงพลังงานที่โหนดใช้ในการส่งและคุณภาพของช่องสัญญาณ และกรณีของโพรโทคอลแบบ SP จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด



รูปที่ 4.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)



รูปที่ 4.7 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)



รูปที่ 4.8 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Energy) มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 4.5 และแต่ละโหนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 4.6 จึงทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ RA และ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าเมื่อจำนวนอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจะทำให้ปริมาณโหลดที่มีในโครงข่ายเพิ่มทำให้โครงข่ายมีการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น โดยจากรูปที่ 4.7 โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP ประมาณ 19.96 วินาที หรือร้อยละ 5.54 ณ ที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 แพ็กเก็ตต่อวินาที ส่วนขณะที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีจะเพิ่มอายุการใช้งานได้ร้อยละ 13.73 วินาทีแต่เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์จะได้ร้อยละ 9.34

อย่างไรก็ตาม เพราะว่าโพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หรือพยายามลดพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากโหนดข้างเคียงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารจึงทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดได้ 59.92 วินาที (ร้อยละ 9.74) ขณะที่โพรโทคอลแบบ RA จะยืดอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดได้ประมาณ 9.5 วินาที (ร้อยละ 1.75) ถึงแม้ว่าปริมาณโหลดในโครงข่ายจะมีปริมาณที่สูง (อัตราการส่งแพ็กเก็ตเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที) ซึ่ง

แน่นอนว่าการเพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดจะเป็นการเพิ่มเวลาเพื่อให้โหนดในโครงข่ายสามารถทำงานร่วมกันได้มากขึ้น ทำให้โครงข่ายสามารถส่งแพ็กเก็ตได้มากขึ้นและอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จก็จะเพิ่มขึ้นด้วยดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ข้างต้น

จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดที่น่าเสนอ (Proposed-Energy) สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็ยังส่งผลให้อายุการใช้งานของโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ไม่พิจารณาถึงพลังงานอย่างเช่น โพรโทคอลแบบ SP นอกเหนือจากประสิทธิภาพด้านพลังงานแล้ว โพรโทคอลที่น่าเสนอยังให้คุณภาพการให้บริการคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จในระดับที่ดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า โครงข่ายที่ใช้โพรโทคอลที่น่าเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานแบบอื่น ๆ (โพรโทคอลแบบ RA) เนื่องจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่น่าเสนอได้คำนวณค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางที่สะท้อนถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียได้ดีกว่าค่าต้นทุนพลังงานที่กำหนดขึ้นจากโพรโทคอลแบบ RA

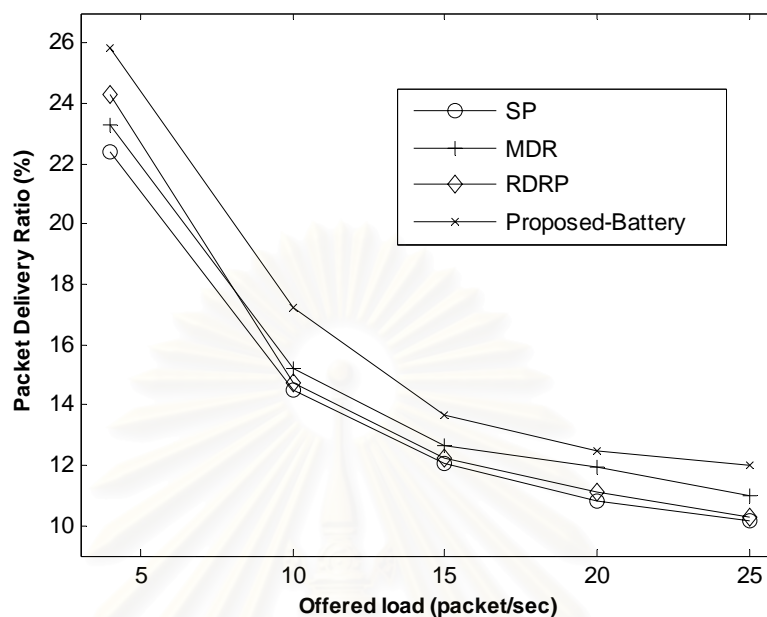
4.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลที่น่าเสนอและจัดอยู่ในโพรโทคอลประเภทนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) โดยจะใช้สัญลักษณ์ Proposed-Battery แทนโพรโทคอลที่น่าเสนอ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง 3 โพรโทคอลมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพซึ่งมีดังนี้แบบแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจเส้นทาง (SP) [2] แบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Request-Delay Routing Protocol (RDRP) [17] และสุดท้ายคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Drain Rate (MDR) [15]

4.2.2.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

ผลการทดสอบสำหรับโพรโทคอลในประเภทที่คำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางแสดงดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.16 ซึ่งในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.12 จะเป็นผลการทดสอบโดยใช้พารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงาน ส่วนในรูปที่

4.13 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานมาใช้วัดประสิทธิภาพ

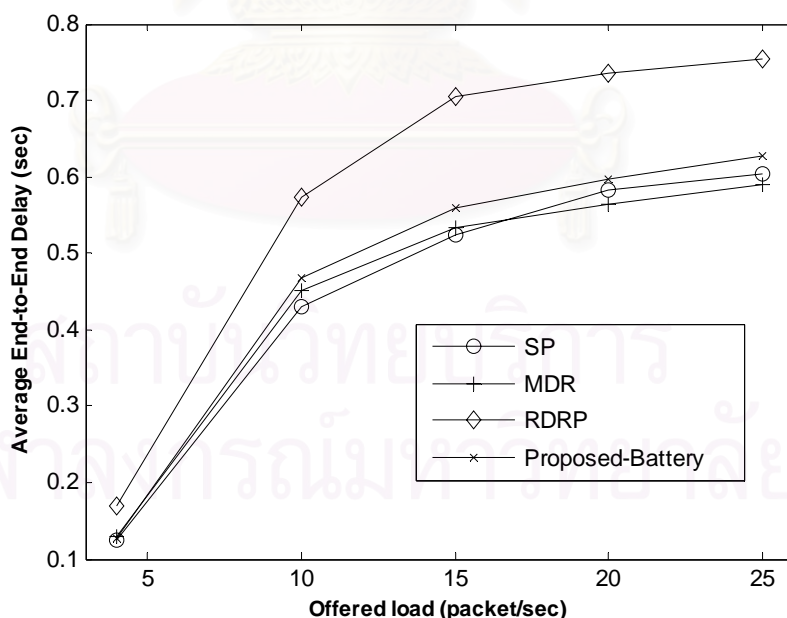


รูปที่ 4.9 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำน้ำหนักถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

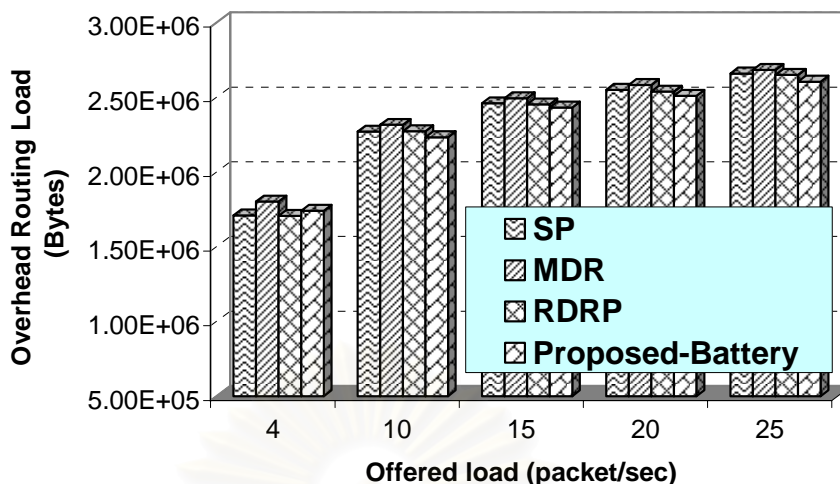
จากรูปที่ 4.9 ผลที่ได้จากการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.1 นั่นคือเมื่อเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจาก 4 ไปถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที ก็จะทำให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) จะให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำให้เส้นทางที่ได้นั้นเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับสูง (สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้นาน) อีกทั้งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอายุการใช้งานของโหนด (Battery Lifetime) ในสมการที่ (3.14) ได้คำนึงถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียให้กับปริมาณโหลดที่อยู่ในบัฟเฟอร์ เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีปริมาณโหลดอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งทั้งสองส่วนที่กล่าวมาทำให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพจึงสามารถส่งแพ็กเก็ตได้มากกว่าโพรโทคอลแบบอื่น ๆ นอกจากนั้นจากรูปยังแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ MDR ให้ผลดีกว่าโพรโทคอลแบบ RDRP และ SP เนื่องจากโพรโทคอลแบบ MDR ได้พิจารณาทั้งปริมาณโหลดและระดับความจุของแบตเตอรี่ของโหนดคล้ายกับโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) โดยข้อแตกต่างระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลแบบ MDR ซึ่งส่งผลทำให้โพรโทคอลแบบ MDR มีประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอคือ

- กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลแบบ MDR อาจจะขัดขวางโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงอยู่รวมในเส้นทางที่ดีที่สุด (ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.17)
- โพรโทคอลที่นำเสนอได้พิจารณาถึงปริมาณพลังงานสูงสุดที่โหนดอาจจะต้องสูญเสียเพื่อจะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่โหนดต้นทางร้องขอมา ซึ่งพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้สะท้อนถึงการใช้พลังงานของโหนดที่จะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโหนดด้วยเช่นกัน

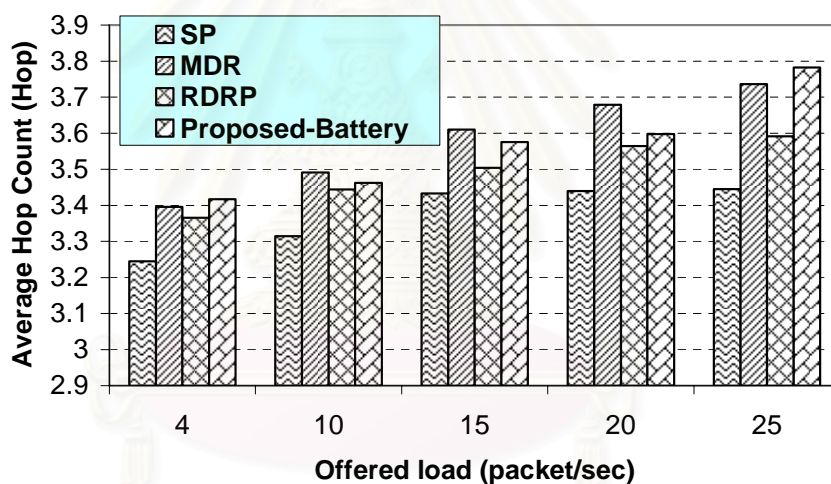
โดยจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP ร้อยละ 18.00 ส่วนโพรโทคอลแบบ MDR เพิ่มได้เพียงร้อยละ 8.45 ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสูงสุด แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ RDRP จะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ในการเลือกเส้นทาง ซึ่งจากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ว่าการที่โหนดตัดสินใจจะมีส่วนร่วมกับการหาเส้นทางเพียงเพราะมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงนั้นก็ทำให้ปริมาณโหลดจำนวนมากไหลเข้ามา ซึ่งก็จะส่งผลให้โหนดดังกล่าวหมดพลังงานอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้ก็จะดีกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ SP เพราะอย่างน้อยโพรโทคอลแบบ RDRP ก็ยังคงเลือกเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานนานกว่าวิธีการหาเส้นทางแบบ Shortest-Path



รูปที่ 4.10 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)



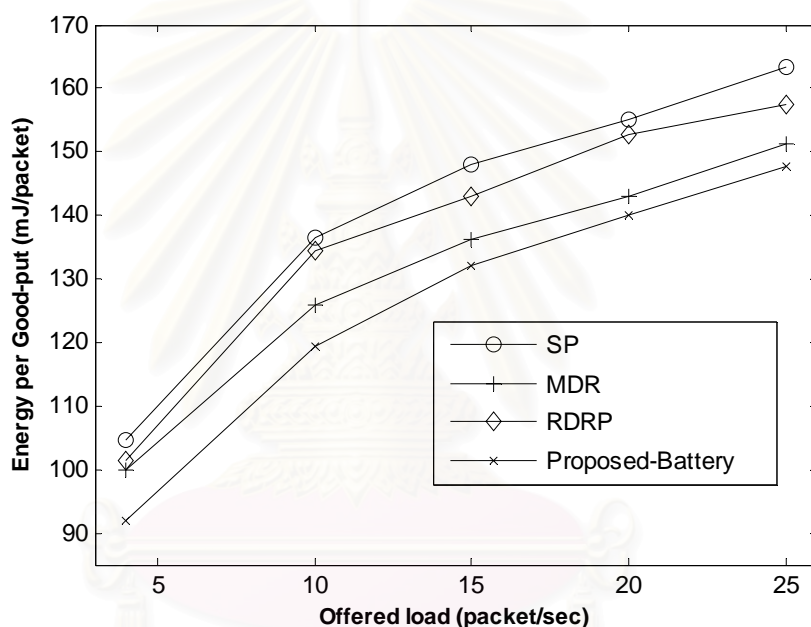
รูปที่ 4.11 จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)



รูปที่ 4.12 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ตเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

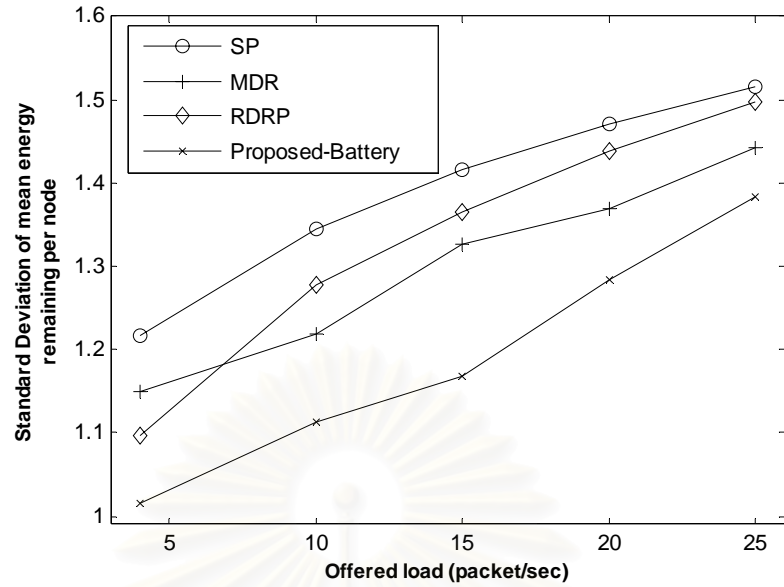
รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.10 แสดงว่าถึงแม้กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอจะเพิ่มการประวิงเวลาให้กับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางและเส้นทางที่ได้มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อที่สูง แต่การประวิงเวลาจากปลายถึงปลายของข้อมูลที่ได้ไม่แตกต่างจากกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ MDR และ SP มากนัก เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งของแพ็กเก็ตต่ำและเป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้นานกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ MDR แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ RDRP นั้นจะมีค่าการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายมากที่สุด โดยเวลาที่เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากการประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่ยังคงอยู่ในระดับที่สูงคือ 0.05 วินาที

ถึงแม้ว่าในอดีตจะมีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงสุด ซึ่งการประวิงเวลานี้ก็จะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของเส้นทางด้วยเช่นกัน เพราะในอดีตมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและการที่ในอดีตใช้เวลาการหาเส้นทางนานเกินความจำเป็นก็อาจจะทำให้เส้นทางมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้ ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) มีจำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดต่ำกว่าโพรโทคอลแบบอื่น ๆ ในกรณีที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดในระดับที่สูง (10 ถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที) ถึงแม้ว่าขนาดของแพ็กเก็ตที่ใช้งานจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าโพรโทคอลทั้งสามแบบซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11

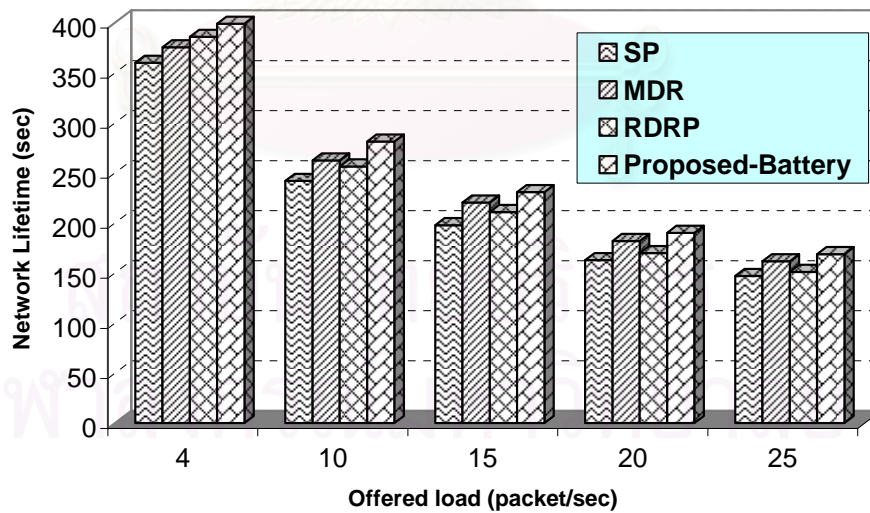


รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ต ข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำนั่งถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

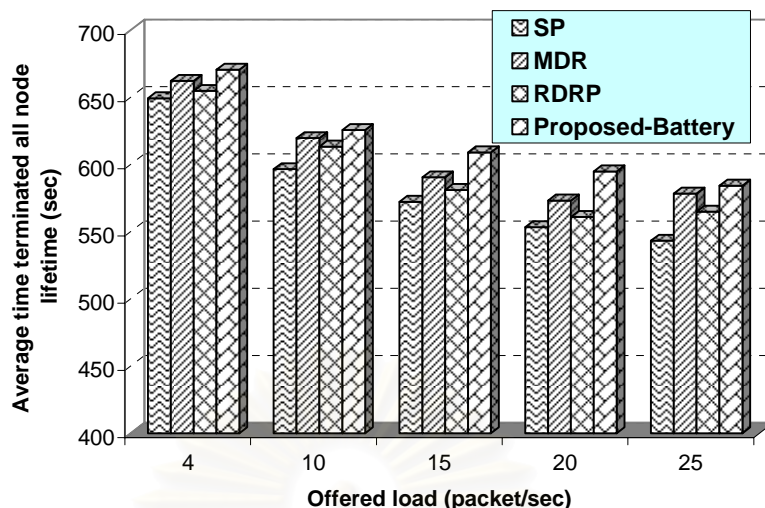
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด
เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล
(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำน้ำหนักถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)



รูปที่ 4.15 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล
(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำน้ำหนักถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)



รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงถึงประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง โดยแนวโน้มของค่าทั้ง 4 ค่าจากรูปก็ยังคงเป็นในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากกรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานหรือกำลังที่แสดงในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 คือ ทั้งประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานและอายุการใช้ของโครงข่ายมีค่าแย่งเมื่อปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น

โพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) มีประสิทธิภาพในแง่ของการใช้พลังงาน หรือกล่าวได้ว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่ามากกว่าโพรโทคอลแบบ MDR, RDRP และ SP ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13 นั่นก็เป็นไปตามที่ได้คาดหวังไว้ โดยสาเหตุที่โพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจากเส้นทางที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเป็นเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงและปริมาณโหลดอยู่ในระดับไม่สูง ซึ่งก็จะทำให้พลังงานที่จะสูญเสียเพื่อค้นหาเส้นทางใหม่มีค่าลดลง (เป็นพลังงานที่สูญเสียจากกระบวนการค้นหาเส้นทาง) และโครงข่ายมีอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) ไม่ได้เลือกเส้นทางจากเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำแต่เป็นการพยายามที่กระจายทราฟฟิกโหลดให้มีการใช้งานอย่างเสมอภาคกันในแต่ละโหนด (การรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของแต่ละโหนด) โดยจะพยายามกระจายให้ทราฟฟิกผ่านไปยังโหนดที่มีระดับอายุการใช้งานที่สูง เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานจะมีค่าต่ำกว่า

โพรโทคอลที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดที่นำเสนอ (Proposed-Energy) โดยรายละเอียดจะกล่าวอีกครั้งในการทดสอบถัดไป

จากรูปที่ 4.14 เป็นการยืนยันสิ่งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยการแสดงว่าโนดในโครงข่ายที่ใช้โพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคนั่นคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโนดมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลทั้งสามแบบในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โดยจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 9.61 ขณะที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุด (25 แพ็กเก็ตต่อวินาที) เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และต่ำกว่าร้อยละ 4.36 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ MDR แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเฉพาะโพรโทคอลแบบ MDR และ RDRP จากรูปจะเห็นว่าในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 แพ็กเก็ตต่อวินาที (ปริมาณโหลดในโครงข่ายอยู่ในระดับที่ต่ำ) โหนดในโครงข่ายที่ใช้โพรโทคอลแบบ RDRP จะมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคมากกว่า เนื่องจากในกรณีที่โหลดในโครงข่ายต่ำ ๆ จะทำให้ผลกระทบที่เกิดจากการขัดขวางโนดที่มีอายุการใช้งานในระดับจะส่งผลกระทบมากกว่าผลกระทบเนื่องจากปริมาณโหลดในโครงข่าย

เส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโพรโทคอลที่นำมาใช้จะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้ของโครงข่ายเป็นอย่างมาก ซึ่งจากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลการหาเส้นทางที่พิจารณาถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ของโนดในโครงข่ายสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้สูงขึ้น (โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่อยู่ในประเภทนี้คือ RDRP MDR และ Proposed-Battery) แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ของโนดเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ เพราะการเลือกเส้นทางจากโนดที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูงจะทำให้ทราฟฟิกจำนวนมากไหลเข้ามายังโนดนี้ และจะทำให้โนดและเส้นทางดังกล่าวมีอายุการใช้งานที่ต่ำลงหรืออาจจะทำให้โนดดังกล่าวหมดพลังงานลงอย่างรวดเร็ว เพราะฉะนั้นโพรโทคอลแบบ MDR และโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) นอกจากจะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่แต่ยังคงพิจารณาถึงปริมาณโหลดที่อยู่ในแต่ละโนด ซึ่งจากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงที่สุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโนดต้นทาง เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพจากรูปที่ 4.13 อีกทั้งโนดมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคดังแสดงในรูปที่ 4.14 ดีกว่าโพรโทคอลการแบบ MDR โดยจากรูปที่ 4.15 โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ 21.84 วินาทีคือ ร้อยละ 14.86 ขณะที่โพรโทคอลแบบ MDR สามารถยืดอายุได้เพียงร้อยละ 10.04 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่ไม่คำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ (SP) ขณะที่ปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าสูงสุด

เนื่องจากเหตุผลทั้งในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และความเสมอภาคในการใช้พลังงานของโหนดในโครงข่ายที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอมีอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดสูงสุด โดยเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการแบบ SP ที่มีอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดต่ำที่สุดแล้ว โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery สามารถยืดอายุการใช้งานได้ถึงร้อยละ 7.54 ขณะที่โพรโทคอลแบบ MDR และแบบ RDRP สามารถยืดอายุได้เพียงร้อยละ 6.44 และร้อยละ 3.96 ตามลำดับ (ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที)

จากการทดสอบนี้เราสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงสุดที่นำเสนอ (Proposed-Battery) ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโพรโทคอลทั้งสามแบบทั้งในเชิงของพลังงานเช่น อายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ทำงาน แต่ยังมีประสิทธิภาพในเชิงของคุณภาพในการให้บริการซึ่งแสดงได้จากการค่า อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จที่เพิ่มขึ้นและการประวิงเวลาของแพ็กเก็ตที่ไม่สูงมากนัก โดยจุดเด่นของโพรโทคอลแบบ Proposed-Battery คือ การรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของแต่ละโหนดในโครงข่ายเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่าย โดยพยายามเลือกใช้เส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานสูง ผลที่ได้ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดและอายุการใช้งานของโครงข่ายให้ค่าที่ดีกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ไม่ได้พิจารณาพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจึงทำให้ค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดมีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy (รายละเอียดจะกล่าวอีกครั้งในการทดสอบในหัวข้อที่ 4.3) เพราะฉะนั้นเพื่อทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพทั้งในแง่การใช้พลังงานและคุณภาพการให้บริการที่ดีกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยผลการทดสอบสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols)

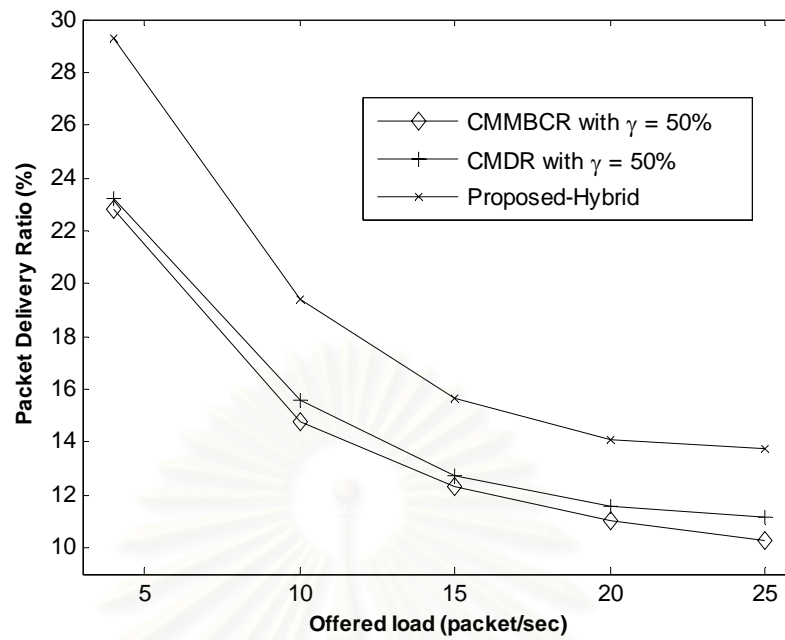
โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอและจัดอยู่ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางประเภทนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) หรือเรียกกว่าเป็นโพรโทคอลแบบผสมซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ Proposed-Hybrid แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ ในส่วนของโพรโทคอลจะนำไปเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอก็ควรจะอยู่ในประเภท

ด้วยกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง 2 แบบมาใช้เปรียบเทียบกับ โพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งมีดังนี้ แบบแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Conditional Max-Min Battery Capacity Routing with $\gamma=50\%$ [19] แบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง Condition Minimum Drain Rate with $\gamma=50\%$ [15]

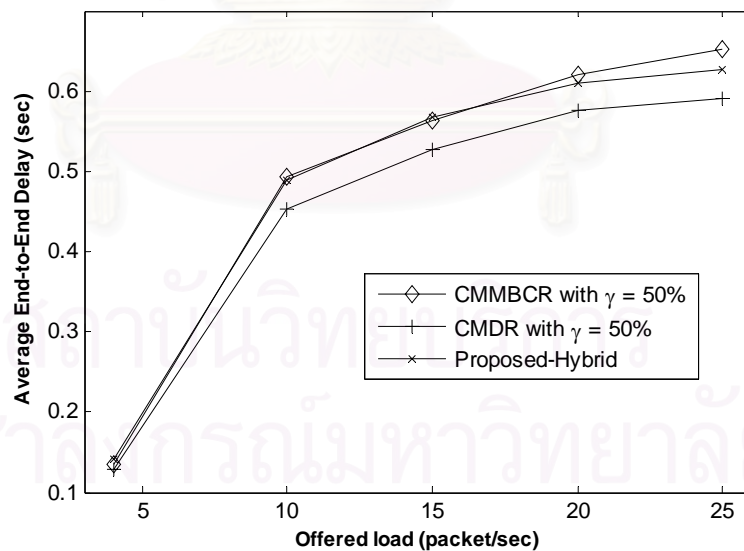
เนื่องจากประสิทธิภาพของโพรโทคอลทั้งแบบ CMMBCR และ CMDR ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (γ) และในบทความ [19, 15] ไม่ได้มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้งาน แต่โดยหลักการของโพรโทคอลทั้งสองที่ต้องการจะทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานต่ำที่สุดและโหนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคพร้อมกันเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยจะเลือกใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดแบบ MTPR เมื่อเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงกว่าร้อยละ 50 ของระดับความจุสูงสุด แต่ถ้าไม่มีเส้นทางใดจากเส้นทางทั้งหมดที่ตรงตามเงื่อนไขข้างต้น โพรโทคอลแบบ CMMBCR จะเลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR [9] และสำหรับโพรโทคอลแบบ CMDR จะเลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MDR [19] เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (γ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 50 ของความจุแบตเตอรี่สูงสุด เพื่อกำหนดให้โพรโทคอลแบบ CMMBCR ได้ใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และ MMBCR และโพรโทคอลแบบ CMDR ได้เลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และ MDR อย่างเท่าเทียมกัน โดยจะไม่ใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใดแบบหนึ่งมากเกินไป

4.2.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

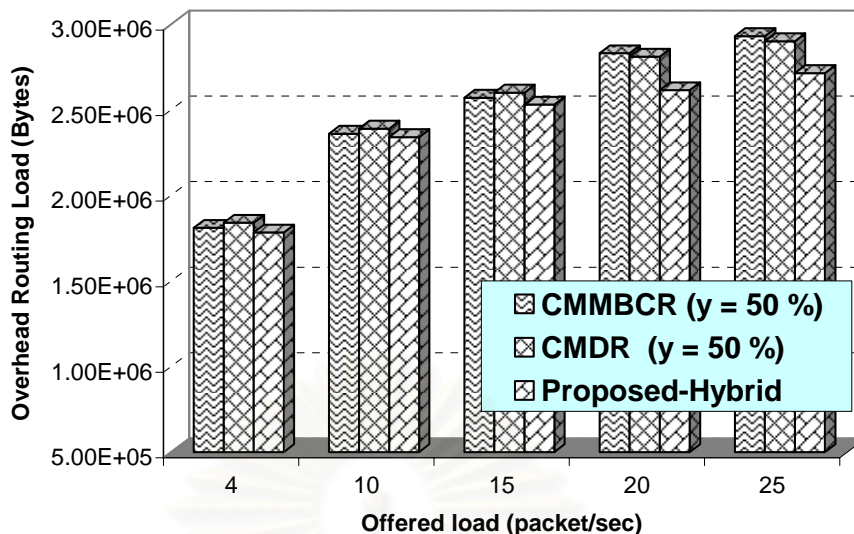
โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม เกิดจากการรวมเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง ซึ่งทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งทำให้โหนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่อย่างเสมอภาคเข้าด้วยกัน เพื่อให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่ามากยิ่งขึ้น โดยที่คุณภาพการให้บริการด้านอื่น ๆ ยังคงมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.17 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล
(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)



รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล
(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)

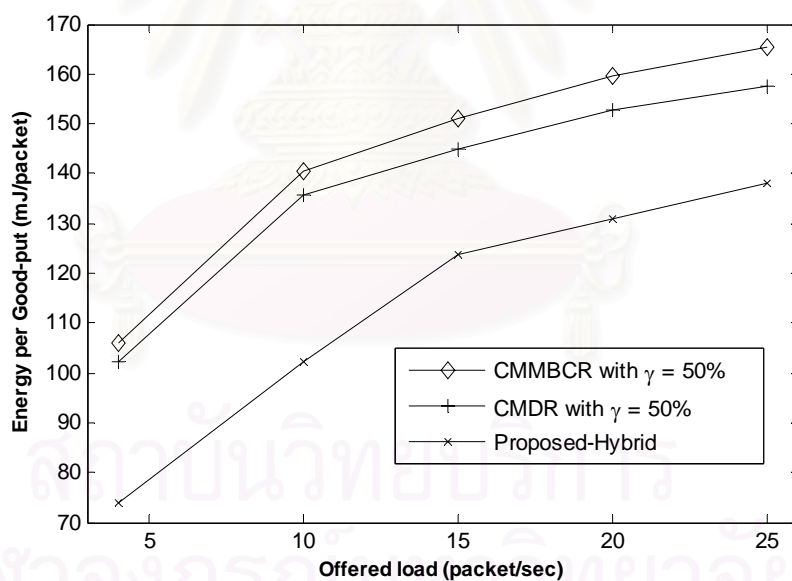


รูปที่ 4.19 จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล
(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)

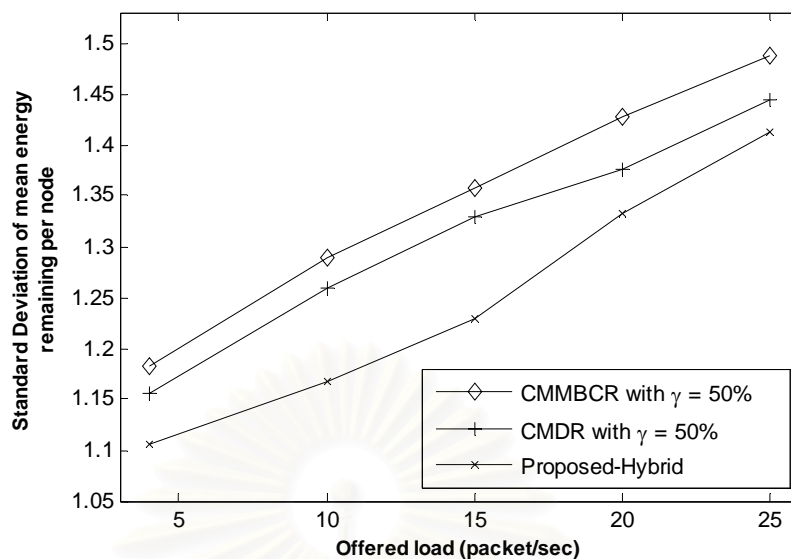
รูปที่ 4.17 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโพรโทคอลทั้งสามแบบ จากรูปโพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอ (Proposed-Hybrid) จะให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโหนด ปริมาณทราฟฟิกไหลของโหนด อีกทั้งความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโหนดข้างเคียง โดยเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางมีอายุการใช้งานอยู่ในระดับที่สูง เพราะผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงและความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณไหลและจำนวนโหนดข้างเคียงอยู่ในระดับที่ต่ำ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เส้นทางที่ได้สามารถส่งแพ็กเก็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากรูปที่แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จที่ได้จะมากกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR ร้อยละ 33.703 ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ CMDR ให้ค่ามากกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR เพียงร้อยละ 8.37 โดยสาเหตุที่โพรโทคอลแบบ CMDR มีค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จน้อยกว่าโพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอ เพราะว่า ในช่วงแรกที่โหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงโพรโทคอลแบบ CMDR จะใช้โพรโทคอลแบบ MTPR (ผลที่ได้เหมือนกับโพรโทคอลแบบ SP เพราะกำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่) อย่างไรก็ตามโพรโทคอลแบบ CMDR ยังคงให้ประสิทธิภาพดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR เนื่องจากในช่วงที่โหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำ ๆ โพรโทคอลแบบ CMDR จะเลือกใช้โพรโทคอลแบบ MDR ซึ่งได้พิจารณาถึงปริมาณทราฟฟิกหรืออัตราการใช้พลังงานของโหนด และระดับความจุแบตเตอรี่ในการพิจารณาเส้นทาง ขณะที่โพรโทคอลแบบ CMMBCR จะพิจารณา

เฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ซึ่งเส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลแบบ CMDR จะมีคุณภาพดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR

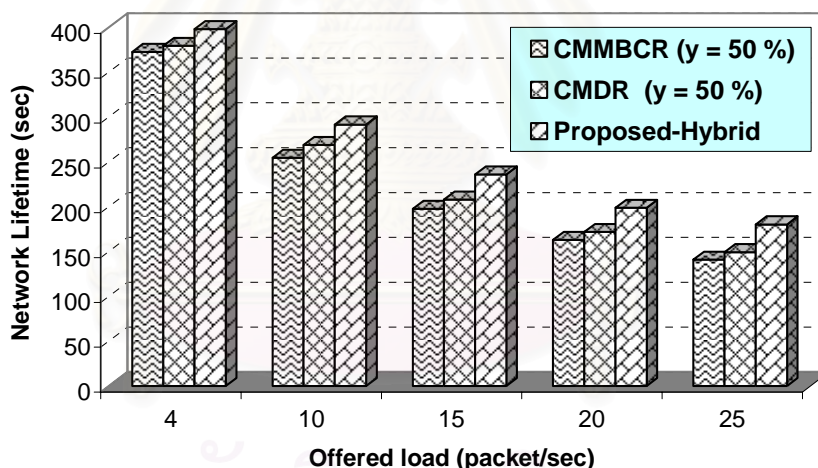
เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอได้กำหนดให้ทุกโหนดยกเว้นโหนดต้นทางและปลายทางจะต้องทำกระบวนการประวิงเวลา และโหนดปลายทางจะต้องรอเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ภายหลังจากได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรก ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกเส้นทาง ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าค่าการประวิงเวลาที่เพิ่มขึ้นมามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMDR ที่มีค่าประวิงเวลาดำต่ำที่สุด สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีค่าประวิงเวลาไม่สูงมากนัก เพราะว่า เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางมีความน่าเชื่อถือในแง่ของอายุการใช้งาน และเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งในระดับที่ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR นอกจากนี้ยังส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮดที่ได้มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR โดยเฉพาะเมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตมีค่าสูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.20 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)



รูปที่ 4.21 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)



รูปที่ 4.22 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)

เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด และค่าอายุการใช้งานของโครงข่าย ของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) กับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 ตามลำดับ พบว่าในทุกอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอจะให้ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR นั้นหมายความว่า

- โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) มีประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานมากกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR ซึ่งแสดงว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โนดปลายทางได้สำเร็จของโครงข่าย

- โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อีกทั้งโนดในโครงข่ายของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยจากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตสูงขึ้นก็จะยิ่งทำให้อัตราการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ที่มีอายุการใช้งานต่ำที่สุด โดยขณะที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสูงสุดสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ถึงร้อยละ 27.96 (ประมาณ 39.39 วินาที) เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR

โดยสาเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพด้านพลังงานดีกว่าโพรโทคอลอีกสองแบบคือ (1) เส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของกระบวนการค้นหาเส้นทางซึ่งเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด (จากหลักการของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy) อีกทั้งเป็นเส้นทางที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานในระดับสูง (จากหลักการของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery) จึงทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายประหยัดพลังงาน และเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพทั้งในด้านการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางและอายุการใช้งาน เหตุผลข้อที่สองคือ ถึงแม้ว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR มีเป้าหมายเช่นเดียวกับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอคือ ทำให้โครงข่ายใช้พลังงานต่ำที่สุดและโนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมในเวลาเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาจริง ๆ แล้วจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR ไม่ได้บรรลุเป้าหมายทั้งสองอย่างในเวลาเดียวกันดังที่ได้กล่าวไว้ เพราะเมื่อพิจารณาในขณะที่โนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่ต่ำนั้น โพรโทคอลทั้งสองไม่ได้ยืนยันว่าเส้นทางที่เลือกนั้นใช้พลังงานต่ำที่สุดเพียงแต่เลือกเส้นทางที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งาน หรือระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูงเท่านั้น ขณะที่โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอพยายามเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานของโครงข่ายต่ำที่สุดในขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงตลอดเวลาไม่ว่าขณะนั้นโนด

ในโครงข่ายจะมีระดับความจุแบตเตอรี่มากหรือน้อยก็ตาม นี่ก็เป็นเหตุผลที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการดีกว่า

เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้เฉพาะกรณีของโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR ซึ่งในช่วงแรกที่โหนดมีระดับความจุแบตเตอรี่สูง ๆ ($y > 50\%$) ทั้งสองจะใช้โพรโทคอลแบบ MTPR ที่เลือกเส้นทางจากการใช้พลังงานต่ำที่สุดเหมือนกัน แต่สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอลแบบ CMDR ให้ผลดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR นั้นเพราะว่าขณะไม่มีเส้นทางใดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดตรงตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โพรโทคอลแบบ CMMBCR จะเลือกใช้การหาเส้นทางแบบ MMBCR ซึ่งจะพิจารณาเส้นทางจากระดับความจุแบตเตอรี่ จากจุดนี้ทำให้กราฟฟิกจำนวนมากไหลเข้ามายังโหนดผลที่ตามมาคือ อายุการใช้งานของเส้นทางดังกล่าวหมดเร็วยิ่งขึ้น แต่ในขณะที่โพรโทคอลแบบ CMDR จะเลือกใช้โพรโทคอลแบบ MDR ที่ได้เพิ่มการพิจารณาอัตราการใช้พลังงานของโหนดเข้าไป เพื่อทำนายอายุการใช้งานของโหนดจึงเปรียบเสมือนกับได้พิจารณาปริมาณกราฟฟิกของโหนดดังกล่าว จึงทำให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าโพรโทคอลแบบ MMBCR

จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การนำข้อมูลทั้งในด้านของการใช้พลังงาน และอายุการใช้งานของโหนดมาใช้เป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดอย่างโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถช่วยทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเมื่อใดที่โครงข่ายควรจะใช้เงื่อนไขใดระหว่าง “การใช้พลังงานต่ำที่สุด (Energy aware routing protocol)” หรือ “ทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเหมาะสม (Battery aware routing protocol)” เป็นสิ่งที่สำคัญเพราะจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR ได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเพื่อใช้ตัดสินใจว่าเมื่อใดควรจะใช้โพรโทคอลที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดและเมื่อใดควรจะทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเหมาะสม ซึ่งในช่วงเวลาใด ๆ จะเลือกใช้เพียงโพรโทคอลใดโพรโทคอลหนึ่งเท่านั้น แต่สำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอจะไม่มีกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน แต่จะทำให้โพรโทคอลนั้นสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งสองประการ ณ ขณะเวลาเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22 ได้แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) จะให้ผลที่ดีกว่าทั้งในด้านของการใช้พลังงานซึ่งในรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 และในด้านคุณภาพการให้บริการทั่ว ๆ ไปดังแสดงในรูป 4.17 ถึงรูปที่ 4.19

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามประเภท

การทดสอบในส่วนนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉพาะโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งสามโพรโทคอลคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocol) แบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงสุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols) แบบสุดท้ายคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงสุดหรือเรียกว่าเป็นโพรโทคอลแบบผสม (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามที่ได้ ออกแบบไว้ มีจุดประสงค์หลักเหมือนกันนั่นคือ **“ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด”** แต่จะมีความแตกต่างกันด้วยวิธีการที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่นำมาใช้งาน

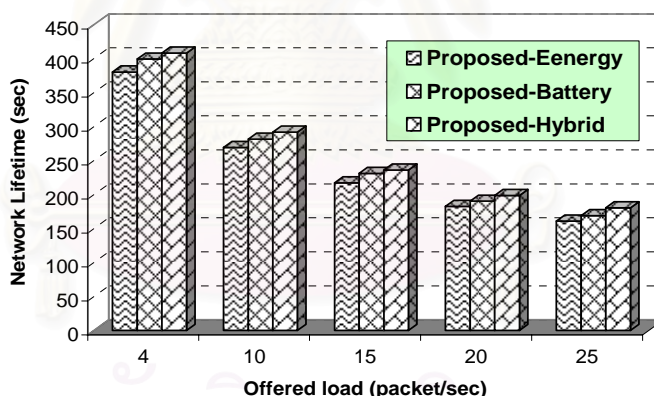
เนื่องจากข้างต้นได้ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอในแต่ละแบบไปแล้ว ในส่วนนี้จึงพิจารณาเฉพาะบางพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งในด้านคุณภาพการให้บริการคือ ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ส่วนในประสิทธิภาพด้านพลังงานจะพิจารณาจาก อายุการใช้งานของโครงข่าย และอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายเพื่อชี้ให้เห็นว่าแนวทางใดในสามแนวทางจะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้มากที่สุด โดยที่คุณภาพการให้บริการในด้านอื่น ๆ ยังคงมีประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ทั้งสามประเภท เมื่อทำการหาค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จดังกล่าว ในช่วงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 จนถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีจะพบว่า

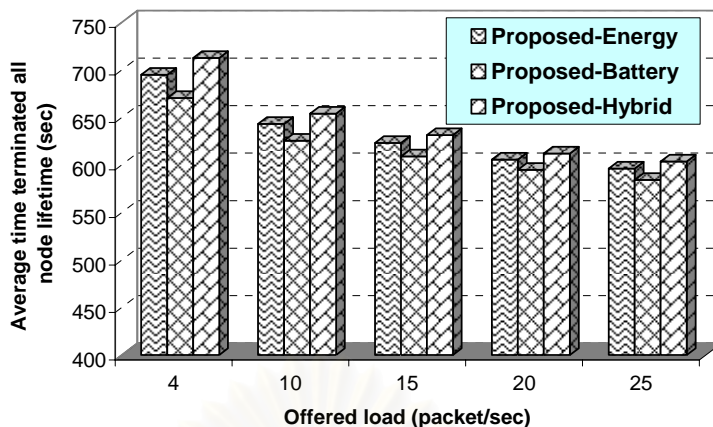
- โพรโทคอลที่มีอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดคือ โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) รองลงมาคือโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery และสุดท้ายคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอเกิดจากการรวมเอาข้อดีของทั้งโพรโทคอลแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด ที่เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด ซึ่งเลือกเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งการผสมปัจจัยทั้งสองประการเข้าด้วยกันทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและการส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดปลายทางมากกว่าการพิจารณาเฉพาะปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว โดยสามารถยืดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นได้ถึงร้อยละ 12.15 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy

ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสูงสุด และเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.76 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery

■ เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery พยายามกระจายกราฟฟิกให้ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูง แต่ขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดโดยไม่ได้พิจารณาว่าเส้นทางที่เลือกนั้นผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงหรือไม่ จึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery สามารถทำให้นโหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเสมอภาคมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ซึ่งแสดงได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดจากรูปที่ 4.14 และ 4.6 จากเหตุผลตรงนี้ทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy โดยเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่ไม่พิจารณาพลังงานอย่างเช่น โพรโทคอลแบบ SP จะพบว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery สามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ร้อยละ 14.86 (21.84 วินาที) ส่วนโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy สามารถยืดอายุได้เพียงร้อยละ 9.34 (13.73 วินาที) ขณะที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุด



รูปที่ 4.23 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)



รูปที่ 4.24 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

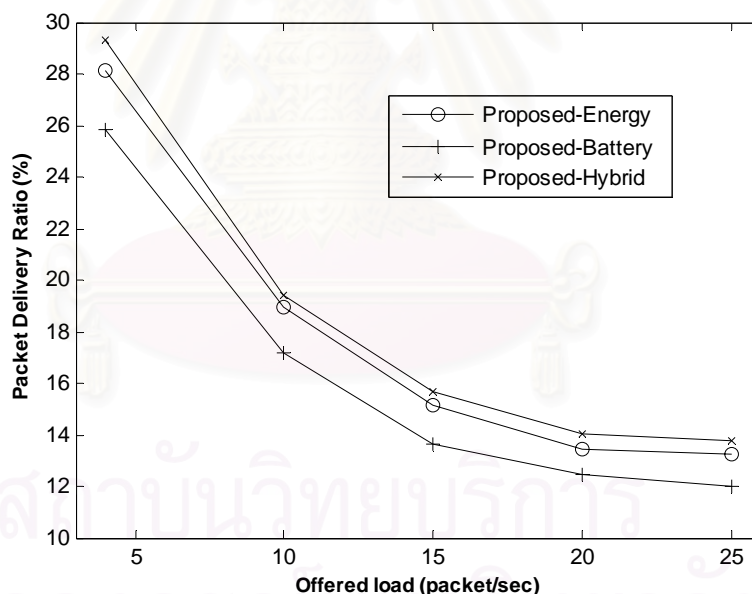
จากรูปที่ 4.24 แสดงการพิจารณาค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด ซึ่งผลของการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ทั้งสามประเภทด้วยค่านี้แสดงดังรูปที่ 4.24 โดยทำการทดสอบในช่วงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 ถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีพบว่า

- โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy และสุดท้ายคือ Proposed-Battery โดยจากรูปเมื่อเทียบเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้งสามโพรโทคอลกับโพรโทคอลแบบ SP ณ ที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีจะได้ว่า โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ Proposed-Hybrid มีค่ามากกว่าร้อยละ 11.11 (60.37 วินาที) ส่วนโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy มีค่ามากกว่าร้อยละ 9.74 (52.92 วินาที) และโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีค่ามากกว่าร้อยละ 7.54 (40.97 วินาที)

- สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) ให้ค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดดีที่สุดเหมือนกับที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในกรณีของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ที่ให้ค่าดังกล่าวสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ทั้ง ๆ ที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ให้ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายจากรูปที่ 4.23 ดีกว่านั้น เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ได้พยายามลดการใช้พลังงานของโนดอื่น ๆ ในโครงข่ายด้วย (จากที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.2.1.1) โดยการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนโนดข้างเคียงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารของโนดในเส้นทางอยู่ต่ำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า

พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จมีค่าที่ต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery (จากรูปที่ 4.5 และ 4.13) แต่ขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ไม่ได้พิจารณาในส่วนนี้

จากผลการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งสามแบบสามารถที่จะสรุปได้ว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery (โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.13) แต่ขณะที่โหนดในโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคมากกว่า (โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากรูปที่ 4.6 และ 4.14) จึงทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy และเนื่องจากทั้งพลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสียและอายุการใช้งานของโหนดต่างก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานมากขึ้น จึงทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) ซึ่งนำเอาข้อดีจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งสองแบบที่กล่าวไว้ข้างต้นมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานสูงที่สุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.25 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

ส่วนในรูปที่ 4.25 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จซึ่งจะสะท้อนถึงวิสัยสามารถ (Throughput) ของโครงข่าย โดยถ้าเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางมีคุณภาพดีนั่นคือ เป็นเส้นทางที่มีโหนดอยู่ในระดับที่ต่ำและมีความน่าเชื่อถือสูง (เป็น

เส้นทางที่สามารถใช้งานได้นาน) ก็จะทำให้คุณภาพการให้บริการของโครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากรูปแสดงว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโพรโทคอลการเส้นทางแบบผสมมีลักษณะดังนี้

- เป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งในระดับที่ต่ำ โดยความคับคั่งที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือ ความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณไหลที่อยู่ในบัฟเฟอร์ของโนดและความคับคั่งที่เกิดจากจำนวนโนดข้างเคียง (โอกาสที่แพ็กเก็ตเกิดการชนกันสูงเมื่อมีจำนวนโนดข้างเคียงสูง) เนื่องจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจะเลือกเส้นทางที่โนดมีอายุการใช้งานที่สูง ซึ่งในการคำนวณค่าอายุการใช้งานในสมการที่ (3.14) ได้พิจารณาถึงปริมาณกราฟฟิคโหลดที่อยู่ในบัฟเฟอร์เข้าไปด้วย เพราะฉะนั้นถ้าโนดมีปริมาณไหลคั่งอยู่มากก็จะทำให้อายุการใช้งานของโนด (ค่า BL ในสมการที่ (3.14)) มีค่าที่ต่ำ นอกจากนั้นยังเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางดังสมการที่ (3.12) ได้พิจารณาถึงจำนวนโนดข้างเคียงในการคำนวณด้วย โดยถ้าโนดที่อยู่ในเส้นทางมีจำนวนโนดข้างเคียงที่สูงก็จะส่งผลให้ค่าต้นทุนพลังงานมีค่าที่สูง ซึ่งก็แสดงว่าเส้นทางดังกล่าวทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานในระดับที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นแล้วเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะหมายถึงเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโนดข้างเคียงต่ำด้วยเช่นกัน

- เป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือในระดับที่สูง เพราะเนื่องจากการคำนวณค่าพลังงานของข่ายเชื่อมโยงระหว่างคุโนดใด ๆ ในเส้นทางสำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) และโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ได้พิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณระหว่างโนด ซึ่งแสดงในสมการที่ (3.11) จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าคุณภาพของช่องสัญญาณไม่ดีก็จะส่งผลให้พลังงานของโนดจะต้องสูญเสียทั้งโนดที่ส่ง รับและโนดที่ได้ยินต่างก็จะต้องสูญเสียพลังงานเพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นการเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำก็จะแสดงว่าเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณระหว่างโนดในเส้นทางที่ดี

- เป็นเส้นทางที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่สูง (สามารถทำงานร่วมกับโนดอื่น ๆ ได้นาน) เพราะฉะนั้นทำให้โอกาสที่เส้นทางจะเกิดความเสียหายเนื่องจากโนดในเส้นทางหมดอายุการใช้งานก็จะต่ำลง จึงทำให้เส้นทางที่ได้สามารถใช้งานได้นานยิ่งขึ้น

- สำหรับกรณีของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery นั้น เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy มีอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุก

โนดสูงกว่า ก็เปรียบเสมือนกับการเพิ่มโอกาสให้โนดสามารถทำงานร่วมกันได้มากขึ้น จึงส่งผลทำให้อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมีค่ามากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery

จากผลการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 แบบที่แสดงในรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.25 สามารถสรุปได้ว่า

- โพรโทคอลที่นำเสนอที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จึงส่งผลให้ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด (Average time terminated node lifetime) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากไม่ได้พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดจึงทำให้อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network lifetime) ที่ได้มีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery

- โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ช่วยทำให้โนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม อีกทั้งการเลือกเส้นทางยังพิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดจึงส่งผลให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่าสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy แต่เนื่องจาก โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ไม่พิจารณาถึงพลังงานที่โครงข่ายต้องสูญเสียในการเลือกเส้นทางทำให้เส้นทางที่ได้อาจจะทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานสูงจึงทำให้โนดอื่น ๆ ต้องสูญเสียพลังงานมากตามไปด้วย ตรงจุดนี้ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy

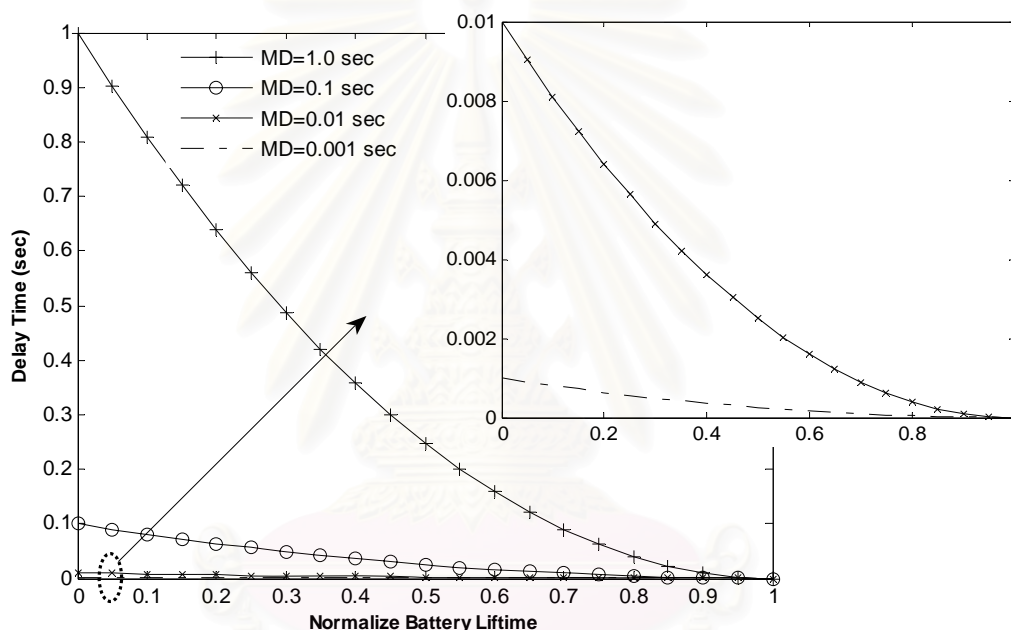
- โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสม (Proposed-Hybrid) ได้พิจารณาข้อดีของโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery ที่กล่าวข้างต้นมาพิจารณารวมกันในกระบวนการค้นหาเส้นทางจึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Hybrid มีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบ ไม่เพียงเฉพาะในด้านของพลังงาน แต่ยังมีประสิทธิภาพในด้านคุณภาพการให้บริการที่ดีกว่า

4.4 การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลา (Maximum Delay) และเวลาการรอคอย (Waiting Time) ที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ

ในส่วนนี้เราจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนคือ การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม (Maximum delay) จากสมการที่ (3.18) ที่ถูกนำไปใช้กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery) และ

กระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่เปลี่ยนแปลงสถานะไปแล้ว หรือในกรณีที่ร้ายแรงอาจจะทำให้เส้นทางนั้นไม่สามารถใช้งานได้

จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay แทนด้วยสัญลักษณ์ MD) 4 ค่าคือ MD = 1.0 วินาที MD = 0.1 วินาที MD = 0.01 วินาที และสุดท้ายคือ MD = 0.001 วินาที ซึ่งสามารถแสดงเป็นรูปฟังก์ชันการประวิงเวลาได้ ดังรูปที่ 4.27 โดยการทดสอบจะทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางจาก 4 ไปจนถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ก็ยังคงใช้เหมือนกับการทดสอบข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.26 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของ

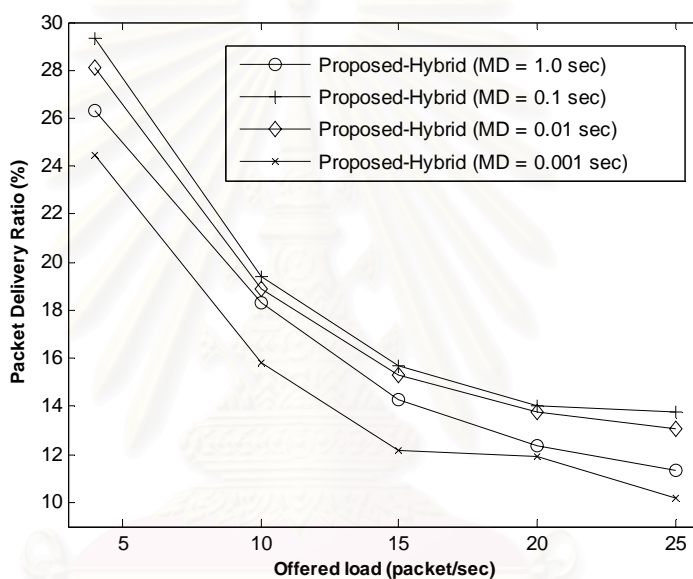
ค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.29 แสดงผลกระทบต่อสมรรถนะของโครงข่ายเมื่อปรับเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาสูงสุด ภายใต้การทดสอบที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง โดยในรูปที่ 4.27 แสดงค่าคุณภาพการให้บริการทั่ว ๆ ไปคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ส่วนในรูปที่ 4.28 และ 4.29 เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของโครงข่ายทั้ง ความคุ้มค่าในการใช้พลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่าย

จากรูปที่ 4.27 จะพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.1 วินาทีจะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 1.0, MD = 0.01 และ MD =

0.001 วินาที ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดการณ์เอาไว้ข้างต้นว่า การกำหนดค่า MD สูงเกินไป (MD = 1.0) และต่ำเกินไป (MD = 0.001) ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายลดลง โดยสาเหตุที่ทำให้ ณ ค่า MD = 0.1 วินาทีให้ประสิทธิภาพดีที่สุดสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อมองในแง่ของความสามารถในการควบคุมได้จะพบว่า การกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดให้มีค่าต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ลดลงตามไปด้วย เพราะการกำหนดให้มีค่าต่ำก็จะทำให้การประวิงเวลาเนื่องจากการส่งและการประมวลผลของโหนดเข้ามามีผลกระทบต่อค่าประวิงเวลาที่ได้จากการคำนวณ จุดนี้ก็จะส่งผลทำให้การเลือกเส้นทางอาจจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นนั่นคือ เส้นทางที่ได้อาจจะไม่ผ่านโหนดที่อายุการใช้งานที่สูง

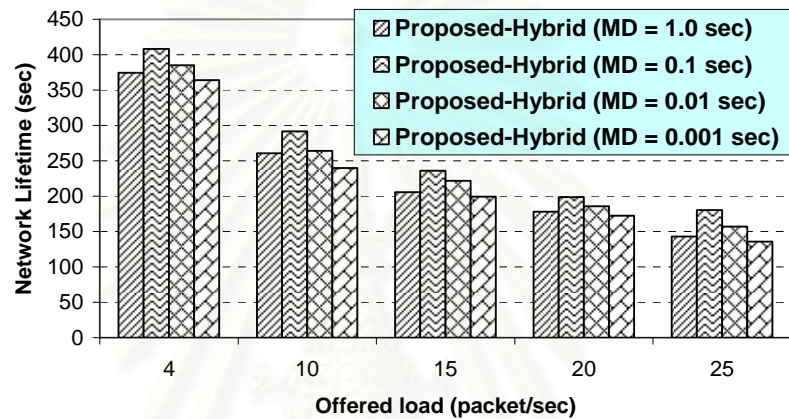


รูปที่ 4.27 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด)

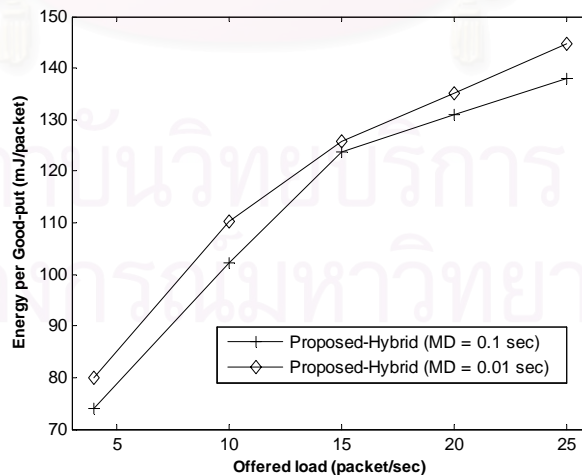
- ข้อเสียที่ทำให้การกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดมีค่าต่ำ ๆ คือ ในช่วงที่โหนดในโครงข่ายมีอายุการใช้งานต่ำ ๆ และมีค่าใกล้เคียงกันนั้น ค่าการประวิงเวลาที่ได้จากการคำนวณของแต่ละโหนดจะไม่มี ความแตกต่างกันมากนัก ตัวอย่างเช่นในกรณีที่กำหนดให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่า 0.001 วินาที ขณะที่แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางผ่านโหนด 2 โหนดที่มีอายุการใช้งานใกล้เคียงกันคือ 0.1 และ 0.2 ค่าการประวิงเวลาของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับ 0.980 และ 0.976 มิลิวินาทีตามลำดับ เพราะฉะนั้นเพื่อทำให้การเลือกเส้นทางมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางควรจะแยกแยะให้เห็นถึงความแตกต่างในจุดนี้ให้มากที่สุด

เมื่อพิจารณาในกรณีที่โพรโทคอลกำหนดค่า MD = 0.001 ซึ่งทำให้โครงข่ายมีอัตราการส่ง

แพ็กเก็ตสำเร็จมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจาย และถ้าช่วงเวลาในแต่ละโหนดจะทำการแพร่กระจายมีค่าใกล้เคียงกันมากก็จะทำให้แพ็กเก็ตเกิดการชนกันมากขึ้น และเมื่อย้อนกลับไปดูเวลาที่ใช้ในการหวนแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ที่นำมาใช้เป็นโพรโทคอลต้นแบบในการพัฒนาโพรโทคอลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด ซึ่งค่าวัดได้มีค่าอยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที (การประวิงเวลาการส่งบวกกับการประวิงเวลาจากการประมวลผล) นั้นส่วนหนึ่งเกิดจากที่แต่ละโหนดทำการสุ่มเวลาขึ้นมาใช้เพื่อป้องกันไม่ให้แพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายเกิดการชนกันมากขึ้น เมื่อส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียง



รูปที่ 4.28 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด)



รูปที่ 4.29 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด)

ในรูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพด้านพลังงานของโครงข่าย จากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นก็จะทำให้โพรโทคอลที่กำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.1 วินาทีจะให้ค่าทั้งสองค่าที่ดีที่สุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางนั้น โดยจากรูปที่ 4.28 ค่าที่ได้ในกรณีที่กำหนดค่า MD = 0.1 จะเพิ่มอายุการใช้งานได้ถึงร้อยละ 14.84 (23.3 วินาที) ขณะที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 0.01 ที่ให้ค่ารองลงมา นอกจากนี้เมื่อพิจารณาว่าโพรโทคอลได้มีการใช้พลังงานคุ่มค่ามากกว่ากันระหว่างค่า MD = 0.1 และ 0.01 ที่แสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งผลที่ได้พบว่าโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 0.1 สามารถประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 2.27 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 0.01 วินาที ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสูงสุด

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay) ก็มีผลต่อประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย และค่าการประวิงเวลาที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งยากที่จะกำหนดได้ว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุดและสามารถนำไปใช้ได้กับทุก ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถที่จะกำหนดค่าเป็นช่วงได้ เพราะถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งจากสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ก่อนการทดสอบว่าช่วงของการประวิงเวลาสูงสุดที่จะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพนั้นน่าจะอยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที เพราะว่าเป็นช่วงที่ทำให้โพรโทคอลสามารถควบคุมการประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางในกระบวนการค้นหาเส้นทางได้โดยที่ไม่มีการประวิงเวลาในส่วนอื่นเข้ามามีผลกระทบ ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.29 สามารถยืนยันได้ว่าค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.1 วินาที (อยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที) ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่าการกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 1.0 0.01 และ 0.001 วินาที เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay) ที่จะนำไปใช้งานนั้นควรจะอยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.1 วินาที ทั้งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-Hybrid และ Proposed-Battery)

4.4.2 การพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย (Waiting Time)

ค่าเวลาที่ใช้ในการรอคอยก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย นอกเหนือจากค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยค่าเวลาการรอคอยได้ถูกนำไปใช้กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Hybrid

ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โหนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเก็ตหรือขอลำดับเส้นทางที่มาจากเส้นทางอื่น ๆ ภายหลังจากที่แพ็กเก็ตหรือขอลำดับเส้นทางแพ็กเก็ตแรกมาถึงยังโหนดปลายทาง เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าเวลาที่โหนดปลายทางจะต้องรอคอยนั้นก็จะมีส่วนสำคัญ โดยผลกระทบที่น่าจะเกิดขึ้นเมื่อกำหนดค่าระยะเวลาการรอคอยสูงหรือต่ำเกินไปสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อกำหนดระยะเวลาการรอคอยสูงเกินไป การกำหนดค่าเวลาการรอคอยไว้สูงจะทำให้โหนดปลายทางได้ทราบข้อมูลของแต่ละเส้นทางเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจก็จะยิ่งมากขึ้น ซึ่งทำให้เส้นทางที่เลือกก็จะยิ่งมีประสิทธิภาพมาก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากคุณลักษณะของโครงข่ายที่โหนดมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เส้นทางที่โหนดปลายทางเลือกใช้นั้นอาจจะเปลี่ยนสถานะไปจากเดิมกล่าวคือ อาจจะทำให้เส้นทางดังกล่าวไม่ใช่เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด แต่ในกรณีที่เลวร้ายมาก ๆ อาจจะทำให้เส้นทางนั้นไม่สามารถใช้งานได้ (มีบางโหนดเคลื่อนที่ออกนอกระยะเวลาการส่งของโหนดที่อยู่ในเส้นทาง)

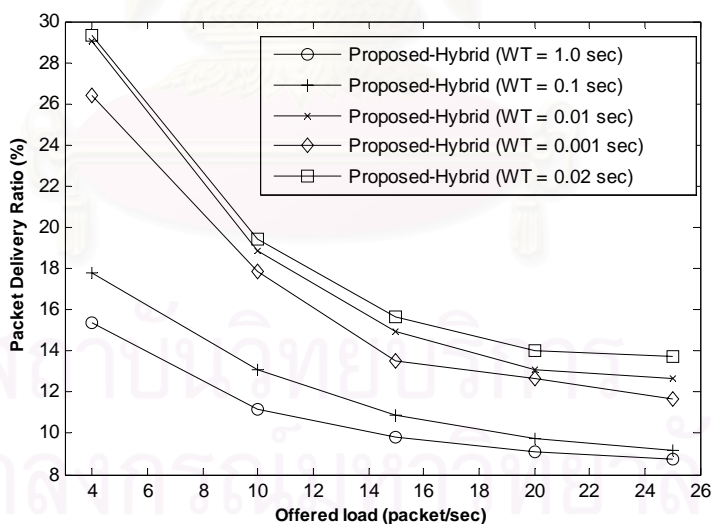
- เมื่อกำหนดระยะเวลาการรอคอยต่ำเกินไป การกำหนดเวลาของไว้ต่ำก็จะตรงกันข้ามกับกรณีที่กำหนดเวลาไว้สูงคือ ข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับ (แพ็กเก็ตหรือขอลำดับเส้นทาง) อาจมีจำนวนที่น้อย ซึ่งถ้ากำหนดค่าระยะเวลาการรอคอยไว้ต่ำ ๆ ในโพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอ (Proposed-Hybrid) ก็อาจจะทำให้ผลที่ได้จะใกล้เคียงกับโพรโทคอลที่น่าเสนอแบบ Proposed-Battery ส่วนกรณีของโพรโทคอลที่น่าเสนอแบบ Proposed-Energy ก็จะทำให้เส้นทางที่ได้อาจจะไม่มีประสิทธิภาพมากนัก แต่ก็ยังเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุดจากข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับมาทั้งหมด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบค่าระยะเวลาการรอคอยด้วยกัน 4 ค่าแต่ได้เพิ่มค่าเวลาการรอคอยที่ได้ใช้จริงในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่น่าเสนอเข้าไปอีกหนึ่งค่าเพื่อทำการเปรียบเทียบดูประสิทธิภาพกับค่าอื่น ๆ โดยค่าที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ $WT = 1.0$, $WT = 0.1$, $WT = 0.01$, $WT = 0.001$ และ $WT = 0.02$ วินาที (ค่าที่ใช้ในการทดสอบจากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.1 ถึง 4.2.3) โดยจะทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางจาก 4 ไปจนถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบก็ยังคงใช้เหมือนกับการทดสอบข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.32 แสดงผลกระทบที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าเวลาการรอคอยต่อสมรรถนะของโครงข่าย ภายใต้การทดสอบที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง โดยในรูปที่ 4.30 แสดงค่าคุณภาพการให้บริการทั่ว ๆ ไปคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ

ส่วนในรูปที่ 4.31 และ 4.32 เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของโครงข่ายทั้งพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ และอายุการใช้งานของโครงข่ายตามลำดับ

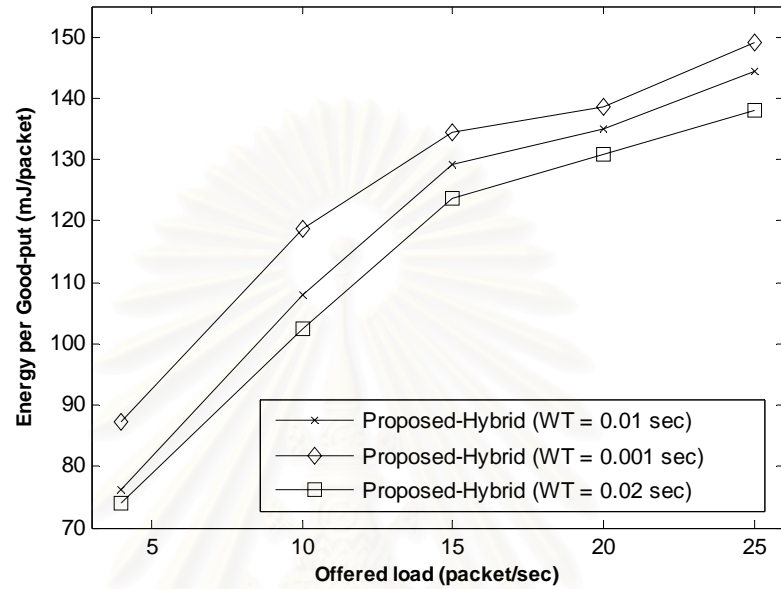
รูปที่ 4.32 แสดงอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จของค่าการรอคอยที่ใช้ในการทดสอบ จากรูปจะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า $WT = 1.0$ และ $WT = 0.1$ วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ถือได้ว่าค่อนข้างสูงจะทำให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่า $WT = 0.01$ วินาทีซึ่งก็เป็นไปตามที่ได้คาดเอาไว้ข้างต้น แต่เมื่อทำการลดค่าเวลาการรอคอยจาก 0.1 ไปเป็น 0.01 และ 0.001 วินาทีจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของโครงข่ายจะมีค่าสูงเมื่อเวลาการรอคอยเท่ากับ 0.01 วินาทีและจะลดต่ำลงอีกครั้งเมื่อเวลาการรอคอยเท่ากับ 0.001 วินาที จากจุดนี้ก็แสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการรอคอยที่เหมาะสมควรจะอยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที นอกจากนั้นเมื่อเทียบค่าเวลาการรอคอยที่ 0.01 และ 0.02 วินาทีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้เมื่อกำหนดค่า $WT = 0.02$ ให้ค่าดีกว่าก็เพราะว่าเมื่อกำหนดค่าเวลาให้มากขึ้นทำให้โหนดมีข้อมูลในการตัดสินใจมากขึ้น แต่ในความเป็นจริงค่าเวลาการรอคอยที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของโครงข่ายหลาย ๆ ตัว อีกทั้งสภาพและสถานะการทำงานของโครงข่าย ณ ขณะเวลานั้นก็มีส่วนสำคัญต่อการกำหนดค่าเวลาการรอคอย เพราะฉะนั้นไม่สามารถที่จะคาดเดาหรือคำนวณได้ล่วงหน้าว่า ณ สถานการณ์ของโครงข่ายแบบนี้ค่าใดจะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุด



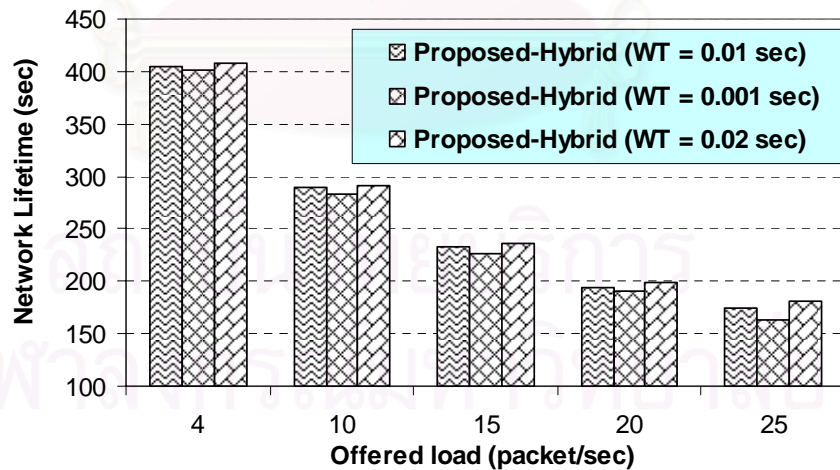
รูปที่ 4.30 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย)

ในรูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเฉพาะกรณีที่กำหนดค่า $WT = 0.01$, $WT = 0.001$ และ $WT = 0.02$

เนื่องจากในกรณีอื่น ๆ ได้ให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จต่ำเกินไป จากรูปทั้งสองแสดงให้เห็นว่า ค่าเวลาการรอคอยที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพที่สุดจากค่าที่นำมาใช้ในการทดสอบทั้งหมด ควรอยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที และจากรูปการกำหนดค่า $WT = 0.02$ วินาทีให้ประสิทธิภาพดีกว่า การกำหนดค่า $WT = 0.01$



รูปที่ 4.31 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย)



รูปที่ 4.32 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย)

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการรอคอย (Waiting Time) ก็มีผลต่อประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย และค่าการประวิงเวลาที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งยากที่จะกำหนดได้ว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุดและสามารถนำไปใช้ได้กับทุก ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถพิจารณาได้ว่าค่าที่นำไปใช้งานควรอยู่ในช่วงใด เพราะถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.32 สามารถยืนยันได้ว่าค่าการรอคอยในระดับ 10 มิลิวินาที) ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่าการกำหนดค่าการรอคอยเท่ากับ 1.0 0.1 และ 0.001 วินาที (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ค่าการรอคอยมีค่าเท่ากับ 0.02 วินาที ทั้งโครงข่ายการจราจรเส้นทางแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Hybrid)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอตฮอก โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานนานที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 3 โพรโทคอล โพรโทคอลแรกที่น่าสนใจคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy) โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่น่าเอาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่ง การรับ และการได้ยินจากแบบจำลองการใช้พลังงานของโหนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลที่เคยมีผู้นนำเสนอมาก่อนหน้านี้ตรงที่วิธีการกำหนดค่าต้นทุนพลังงาน จากทดการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

- โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่งแบบ MTPR และ RA นอกจากนั้นยังทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด เพราะการพิจารณาเส้นทางไม่ได้คำนึงถึงอายุการใช้งานของโหนดในโครงข่าย

แบบที่สองเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery) ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อรักษาสมดุลในการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่าย โดยการพยายามเลือกเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานที่อยู่ในระดับสูง ซึ่งวิธีการที่น่าสนใจนี้ได้กำหนดวิธีการคำนวณอายุการใช้งานของโหนดขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความแม่นยำในการประมาณแทนที่จะใช้เฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่เหมือนกับโพรโทคอลที่เคยถูกนำเสนอ แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่โหนดจะต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัฟเฟอร์ นอกจากนั้นยังรวมถึงพลังงานที่โหนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่โหนดต้นทางร้องขอมา จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

- โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานนั้นคือ อายุการใช้งานของโครงข่ายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคุณภาพการให้บริการที่พิจารณาจากค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค่านิ่งถึงระดับจุลภาคของโนดแบบ MMBCR, RDRP และ MDR ที่ได้ถูกนำเสนอมาก่อนหน้านี้เพราะว่า การคำนวณค่าอายุการใช้งานของโนด (Battery Lifetime) มีความแม่นยำมากกว่าทำให้เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า อีกทั้งกระบวนการค้นหาเส้นทางจะช่วยให้โนดโครงข่ายสามารถรักษาสมรรถนะของการใช้พลังงานได้ดีกว่าโพรโทคอลแบบอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Proposed-Energy ที่นำเสนอจะพบว่าประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ถึงแม้ว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จะสามารถรักษาสมรรถนะการใช้พลังงานของโนดในโครงข่ายได้มากกว่าเนื่องจากเป็นโพรโทคอลที่ไม่ได้พิจารณาถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสีย หรือเป็นเส้นทางที่ไม่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด (ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Proposed-Energy)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบสุดท้ายที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Proposed-Hybrid) โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่นำเสนอข้างต้นมาพิจารณารวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้ได้นานที่สุด โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง โดยข้อแตกต่างหลักเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR นั้นก็คือ โพรโทคอลแบบ Proposed-Hybrid ที่นำเสนอ ไม่มีการกำหนดว่า ณ ช่วงเวลาใดจะต้องใช้โพรโทคอลแบบใดระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy หรือ Proposed-Battery เหมือนกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR แต่จะใช้ทั้งสองโพรโทคอล ณ ขณะเวลาเดียวกันในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานนั้นคือ อายุการใช้งานของโครงข่ายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จสูงกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ CMMBCR และ CMDR

จากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปประสิทธิภาพทั้งในแง่ของพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโพรโทคอลทั้งสามประเภทโดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปเปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอล โดยใช้พารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน

	ผลที่ได้จากการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้ง 3 แบบ
Packet Delivery Ratio	Proposed-Battery < Proposed-Energy < Proposed-Hybrid
Energy per Good-put	Proposed-Battery < Proposed-Energy < Proposed-Hybrid
Standard deviation of mean energy remaining per node	Proposed-Energy < Proposed-Hybrid < Proposed-Battery
Network Lifetime	Proposed-Energy < Proposed-Battery < Proposed-Hybrid
Average all node lifetime	Proposed-Battery < Proposed-Energy < Proposed-Hybrid

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลการแบบ Proposed-Hybrid ที่นำเสนอจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานนั่นคือ อายุการใช้งานของโครงข่ายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery แต่เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery แล้วจะพบว่า โพรโทคอลแบบ Proposed-Energy จะมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมากกว่า แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ Proposed-Battery จะรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโหนดได้ดีกว่าโพรโทคอลแบบ Proposed-Energy เพราะฉะนั้นแล้วการเลือกโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางไปใช้งานเพื่อทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้นควรจะคำนึงถึงสถานการณ์หรือเงื่อนไขของโครงข่ายที่จะนำไปใช้งาน โดยโพรโทคอลแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery จะเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับโครงข่ายที่มีลักษณะดังนี้

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy จะเหมาะสมสำหรับโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดหรือความหนาแน่นของโหนดในโครงข่ายที่สูง อย่างเช่นโครงข่ายเซ็นเซอร์ (Sensor Network) เนื่องจากโพรโทคอลแบบนี้พิจารณาถึงจำนวนโหนดรอบข้างเพื่อลดปริมาณพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสีย แต่จะไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่ปริมาณโหนดที่ใช้สื่อสารมีปริมาณมาก ๆ

(ทั้งอัตราการส่งแพ็กเก็ตระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง หรือจำนวนการเชื่อมต่อของโหนดในโครงข่าย) เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณโหนดที่โหนดกำลังรับภาระอยู่ ณ ขณะเวลานั้น

■ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จะเหมาะสมสำหรับโครงข่ายที่มีปริมาณโหนดที่ใช้สื่อสารในโครงข่ายอยู่ในระดับสูง เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จะพิจารณาถึงปริมาณโหนดที่โหนดกำลังรับภาระอยู่ ณ ขณะเวลานั้น แต่จะไม่เหมาะสมกับกรณีที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีบ่อยครั้ง (เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโหนด) เพราะว่าการเลือกเส้นทางของโหนดไม่ได้พิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณกับโหนดถัดไปที่อยู่ในเส้นทางเพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้ อาจจะเป็นเส้นทางที่มีระยะห่างระหว่างโหนดสองโหนดที่ยาว ทำให้โอกาสที่เส้นทางจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโหนดก็สูง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

- (1) การตัดสินใจเลือกเส้นทางควรจะมีการสูญเสียพลังงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium access control layer) เพื่อให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการมากยิ่งขึ้น
- (2) แบบจำลองการใช้พลังงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแบบจำลองที่ไม่คำนึงพลังงานที่สูญเสียขณะที่โหนดอยู่ในสถานะหลับ (Sleep mode) สถานะว่าง (Idle mode) และพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังนั้นหากพิจารณาพลังงานในส่วนนี้ก็จะทำให้ระบบที่ใช้มีความเป็นจริงมากขึ้น
- (3) โหนดที่ใช้ในการทดสอบควรมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่ง เพื่อลดการใช้พลังงานที่สูญเสียโดยไม่จำเป็นและสามารถลดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งก็จะทำให้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลของโครงข่ายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้โหนดควรจะรู้ตำแหน่งของโหนดในโครงข่ายเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทาง เนื่องจากการส่งข้อมูลของโหนดได้ทราบทิศทางการส่งที่แน่นอน

รายการอ้างอิง

1. E. M. Royer and C. –K. Toh. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. IEEE Personal Communication Magazine (April 1999) : 44-50.
2. C. E. Perkins, E. M. Royer and S. R. Das. Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing. IETF internet Draft (work in progress) (November 2002).
3. D.B. Johnson, D.A. Maltz. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. Mobile Computing, (ed. T. Imielinski and H. Korth), Kluwer Academic Publishers (1996).
4. M. Laksinhmi, P.E. Sankaranarayanan. Performance analysis of Three Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. Asian Journal of Information Technology (AJIT) 4 (November 2005) : 1195-1200.
5. J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva. A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (October 1998) : 85-97.
6. C. E. Jones, K. M. Sivalingam, P. Agrawal, and J. Chen. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. Wireless Networks 7, 4 (July 2001) : 343-358.
7. Y. Shi and T.A. Gulliver. An Energy-Efficient MAC Protocol for Ad Hoc Networks. IEEE Communication Networks and Services Research Conference.(May 2006).
8. K. Scott and N. Bambos. Routing and channel assignment for low power transmission in PCS. IEEE 5th International Conference on Universal Personal Communications, 2 (October 1996) : 498-502.
9. S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra. Power-Aware Routing in Mobile ad hoc Networks. International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98) (October 1998) : 181-190.
10. S. Banerjee and A. Misra. Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks. International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (June 2002) : 146-156.

11. N. Nie and C. Comaniciu. Energy Efficient AODV Routing in CDMA Ad Hoc Networks Using Beamforming. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 4 (May 2005) : 2449-2453.
12. L. M. Freeney. An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc network. Mobile Networks and Applications Journal, 6, Number 3 (2001) : 239-249.
13. Juan-Carlos Cano, and D. Kim. Investigating Performance of Power-aware Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. International Mobility and Wireless Access Workshop (October 2002) : 80-86.
14. C. B. Margi and K. Obraczka. Instrument Network Simulators for Evaluating Energy Consumption in Power-Aware Ad-Hoc Network Protocols. The IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (October 2004) : 337-346.
15. D. Kim, J.J. Garcia-Luna-Aceves, K. Obraczka, J-C. Cano and P. Manzoni. Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks based on the Energy Drain Rate. IEEE Transactions on Mobile Computing 2, 2 (April-June 2003) : 161-173.
16. W. Cho and SL. Kim. A fully distributed routing algorithm for maximizing lifetime of a wireless ad hoc network. IEEE 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network (September 2003) : 670-674.
17. W. Yu and J. Lee. DSR-based energy-aware routing protocols in Ad-Hoc networks. International Conference on Wireless Network (June 2002).
18. K. Woo, C. Yu, HY. Youn, and B. Lee. Non-Blocking, Localized Routing Algorithm for Balanced Energy Consumption in Mobile Ad Hoc Networks. International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (2001) : 117-124.
19. C. -K. Toh. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Communications Magazine 39 (June 2001) : 138-147.

20. S. Corson and J. Macker. Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations Network Working Group RFC 2501, Naval Research Laboratory, (January 1999).
21. ลัญฉกร วุฒิสวัสดิ์กุลกิจ. หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
22. Stemm and R. Katz. Measuring and Reducing. Energy Consumption of Network Interfaces in Hand-held. Devices. IEICE Transactions on Communications, E80-B, 8 (August 1997) : 1125-1131.
23. J. Ebert, S. Aier, G. Kofahl, A. Becker, B. Burns, and A. Wolisz. Measurement and simulation of the energy consumption of a WLAN interface. Tech. Rep. TKN-02-010, Technical University Berlin, Telecommunication Networks Group, Germany, (June 2002).
24. P. Kulsirimongkol, and C. Saivichit. Power Efficient Topology Control in Static Ad-Hoc Network based on Distributed Spanning Tree Algorithm. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 จังหวัดภูเก็ต, 2 (2548) : 713-716.
25. Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin. Adaptive Energy-Conserving Routing for Multihop Ad Hoc Networks. Tech. Rep. 527, USC/Information Science Institute (October 2000).
26. Datasheet for ORiNOCO 11 Mbit/s Network Interface Cards, 2001.
27. W. Xiuchao and A.L. Ananda. Link Characteristics Estimation For IEEE 802.11 DCF based WLAN. In the 29th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Florida USA, (November 2004) : 302-309.
28. The Editors. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY): Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band. IEEE Standard 802.11b Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (September 1999).
29. "NS2 Network Simulator" Available form: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
30. K. S Kwak, K. J. Kim, and S. J Yoo. Power Efficient Reliable Routing for Mobile Ad-hoc Networks. IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems 2 (July 2004) : II481 - II484.

31. J.P. Ebert, B. Burns, and A. Wolisz. A trace-based approach for determining the energy consumption of a WLAN network interface. European Wireless (February 2002) : 230-236.
32. B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris. Span: An energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. ACM Wireless Networks Journal 8, 5 (September 2002) : 481-494.
33. R. Kravets, K. Calvert, and K. Schwan. Power-aware communication for mobile computers. 6th International Workshop on Mobile Multimedia Communications (1999).
34. T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A Survey of Mobility Model for Ad Hoc Network Research. Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, (2002) : 483-502.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. J. Kanjanarot, K. Sitthi, and C. Saivichit. Energy-based Route Discovery Mechanism in Mobile Ad Hoc Networks. The 8th International Conference on Advanced Communication Technology Vol. 3 (February 2005): 1967-1972.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Energy-based Route Discovery Mechanism in Mobile Ad Hoc Networks

J. Kanjanarot, K. Sitthi, and C. Saivichit.

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330

Tel. +66-2-2186908 Fax. +66-2-2186912.

E-mail: Jirasak.Ka@student.chula.ac.th, Chaiyachet.S@chula.ac.th

Abstract — A novel energy-efficient routing protocol (on-demand technique) is proposed here in order to utilize the energy consumption in mobile ad hoc network. Our protocol proposes a route discovery technique based on energy cost. The energy cost represents energy consumption of the network in order to sustain all connections between source and destination nodes. The proposed algorithm was evaluated through realistic energy consumption modeling, which used the channel quality to decide whether each packet is successfully received. Simulation results show that the proposed algorithm outperforms other reviewed algorithms, Shortest-Path (SP), Re-transmission-Aware routing protocol (RA) and Condition Min-Max Battery Capacity Routing (CMMBCR). By using the proposed algorithm, the energy consumption of network is reduced by 9.84 % compared to RA in high mobility scenario.

Keywords — Energy Efficient, Power-aware Routing, Ad hoc Networks, Route Discovery.

1. Introduction

The mobile ad hoc networks (MANETs), each mobile node runs by its energy source having limited energy lifetime, energy-efficient schemes [1] are keys in MANET in order to save this limited energy. However, saving too much energy may cause a network topology problem since a link between any pair of nodes is considered to exist, if each node has enough energy and signal to noise ratio (SNR) at receiving nodes are greater than a specified threshold. Therefore, managing limited energy resources to maintain network performance (throughput, delay, and overhead) poses a challenging research topic on designing and evaluating energy-efficient protocols for mobile ad hoc networks.

In generally, the routing protocols in MANETs may be classified into two types [2], proactive and on-demand based routing protocols, which are different on the timing of the routes update. Since on-demand routing protocols react quickly to topology changes, they perform better than proactive in term of routing overhead and data delivery ratio [4]. However, most of routing protocols consider only the shortest-path (SP). This may cause the nodes on any route to have short lifetime as it is frequently used high energy for data transmission. Therefore, routing protocols should be well designed to consider this limitation then it can help network on spending node's energy worthy and making nodes long live.

Power-aware routing protocols can be classified into 3 categories which aim at maximizing the network lifetime. Some efficient techniques but not very complicated are shown as follows:

Battery-Aware Routing Protocols: This scheme considers the current battery remaining at different nodes focuses on balancing energy usage among the nodes by avoid nodes that have low level of remaining battery in order to maximize the network lifetime [5, 6].

Energy-Aware Routing Protocols: These routing protocols [5, 7, 9] select the optimum route that minimizes total transmission power or transmission energy required to deliver data packet from source to destination.

Hybrid-Aware Routing Protocols: In [5], hybrid-aware routing protocols combined the advantage of the both Energy-Aware and Battery-Aware routing protocols to achieve two goals simultaneously such as Condition Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR) which used the Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR) [7] when all nodes in some possible routes between source and destination nodes with remaining battery more than battery protection margin (γ). Otherwise, the optimum route is selected by Min-Max Battery Cost Routing (MMBCR) algorithm [6]. The drawback of this approach is network performance depends on the value of threshold; it obstructs implementation in real systems.

In paper [10], the performance of power aware routing protocols in these three categories mentioned above is compared. Battery-Aware routing protocols give a good effective on extending network lifetime; however, they are weak on energy usage and management. In contrast to Battery-aware routing protocols, Energy-aware routing protocols well perform on energy usage and management but they do not well achieve on extending network lifetime. The last category, Hybrid-aware routing protocol, gives better results among the former two categories depending on the threshold value. Our protocol is the energy aware routing protocol which proposes the route discovery based on the energy cost. The energy costs represent the energy consumption of network in order to support all of connections between source and destination node. The channel qualities have taken into account our energy link cost. The optimum route is the route having the lowest energy consumed by the network - not the energy only consumed by the node in the

path. Some of these routing schemes, similar to the proposed protocol, will be explained as the following:

The MTPR protocol was proposed in [7]. This protocol can reduce the overall energy consumption by selecting a route having lowest overall transmission power. Therefore, in case of the node can adjust its transmitted power, the selected path may have many of intermediate nodes since the node close to its neighbor usually have low transmitting power. However, some node equipments transmit their signal with a constant power since they cannot adjust their transmitted power. In this case, also used in our simulation, the chosen route selected by MTPR will be the shortest path like which is chosen by AODV protocol.

In addition, MTPR does not concern about link quality. Therefore, the minimum energy paths for reliable communication have been proposed in [8, 9] in order to solve problems on link quality problem. In [8] proposed Retransmission-Aware (RA) schemes, which compute the total effective energy from each path which is spent for a single packet across the link and in retransmission packet to achieve reliable packet forwarding.

Comparing the technique presented in [8] and MTPR, [8] confirms that its proposed algorithm will save more utilized energy than MTPR. Moreover, the RA with hop-by-hop retransmission scheme can normally save the consumption energy than RA with end-to-end retransmission scheme because end-to-end scheme take more times and increase the number of packets used for keeping reliable transmission. The RA scheme is similar to the proposed algorithm but RA scheme consider only energy consumed by nodes in the chosen route while the proposed one considers usage energy of the network. Moreover, the algorithms mentioned above are not take the energy due to receiving packets and overhearing packets into account, which these energy consumptions are significant and should be aware.

To address the deficiency of the exiting approaches, in this paper, a new energy-efficient routing protocol is proposed in order to minimize the total reliable energy consumed by the network. We firstly modify energy consumption model in order to gain the accuracy and realistic implementation. After developing these more accurate energy consumption models, we proposed new link costs deployed in our route discovery process. The cost of energy consumption does not consider only the energy consumed by transmission but also consider the energy consumed due to effects of link quality in the network (including energy consumed by retransmission, overhearing and receiving). In order to simulate the real situation, we implemented the link quality of channel uses the packet error probability to decide whether each packet is received successfully or not for all mobile nodes. Our evaluation shows that the proposed protocol performs better in terms of the total energy consumed for every data packet successfully received, network lifetime as well as data delivery ratio comparing to the existing schemes.

The rest of this paper is organized as follows. In section 2, we describe the background of wireless link quality and energy consumption model that used in this paper. In Section 3, we describe the details of our proposed energy-efficient routing protocol. In Section 4 describes the simulation model, including the mobility, traffics, and performance metrics. Performance comparisons between our proposed and other

routing protocols are presented in Section 5. Finally, conclusion is given in Section 6.

2. Theoretical Background

A. Wireless Link Quality

In wireless communication, when the receiver have received transmission signal power, which lower than the power when transmitted caused loss. The loss in signal strength affected from several factor such as attenuation, noise interference, and fading etc. Many wireless channel models have been proposed to predict the received signal power. In this paper, we use Two-Ray ground model and do not consider effect from fading. In such model, uses the free space path loss model for the near sight and plane earth path loss for the far sight. The received signal power (P_r) is calculated as follows:

$$P_r = \begin{cases} \frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4 \times \pi)^2 \times d^2 \times L} & , d \leq \frac{4 \times \pi \times H_t \times H_r}{\lambda} \\ P_t \times G_t \times G_r \times \left(\frac{H_r \times H_t}{d^2} \right)^2 & , d > \frac{4 \times \pi \times H_t \times H_r}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

where P_t is the transmitted power, G_t and G_r is the antenna gains at the transmitter and receiver, respectively, d is the distance between transmitter and receiver, H_t and H_r are the heights of the transmitter and receiver, L is the system loss factor (In this paper, $L = 1$), and λ is the wavelength (m).

The bit error rate (BER) of wireless link is determined by link quality, modulation and code scheme. The link quality can be represented by signal to noise ratio (SNR) of packets at the receiver. Since IEEE802.11 has no error correcting code (it used Automatic Repeat Request or ARQ for retransmits the correct packet). Thus, BER of wireless channel is determined by SNR and modulation scheme or transmission rate. Several modulations to perform the general relationship between BER and SNR is:

$$BER \propto \text{erfc}(\sqrt{c \times SNR}), \quad SNR = 10 \times \log\left(\frac{P_r}{N}\right) \quad (2)$$

where BER is bit error rate, $\text{erfc}(x)$ is complementary function, c is constant, P_r is received signal power can be calculated by equation (1), and N is noise signal power.

In this paper, we use the characteristics in IEEE802.11b that the transmission bit rate is 11 Mbps for data packet transmission and 2 Mbps for control packet (CTS, RTS, etc.). The different transmission bit rate takes different modulation scheme (11 Mbps use CCK modulation and 2Mbps use QPSK modulation), so the calculation of bit error rate will be different. In generally, the BER can be derived from both theoretically or empirical with real product when modulation and SNR are known. To be close to the reality, we use ORiNOCO11b [11] empirical curves to simulate the relationship between BER and SNR, as show in figure 1.

As mentioned above, nodes use ARQ technique; therefore, when a transmitter send packets to receiver and does not receive acknowledgments, the transmitter must retransmission packet to receiver again. However, for limiting data and time spent in

the network, IEEE802.11 has limited the number of retransmission trials for a packet. Moreover, modes of retransmission also a factor for network performance. Retransmission can be classified into two modes [8] as follows: First, Hop-by-Hop Retransmission (HHR) - where each link guarantees transmission reliability packet to next hop by using localized packet transmission and second, End-to-End Retransmission (EER) - where intermediate nodes will not have ability in error recovery reliable packet. If source does not receive acknowledgement packet from destination, source will retransmit this packet again.

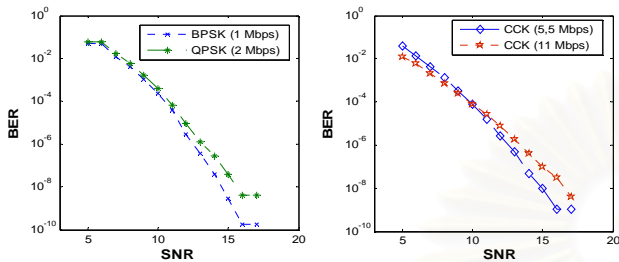


Figure 1. The relationship between BER and SNR & Modulation

In this paper, only the HHR scheme is considered since it is appropriate to the characteristic of ad hoc network such as having lower number of packet retransmission and implies a low energy consumption than those of EER scheme.

B. Energy Consumption Model

The current energy consumption model of general network interface card (NIC) defined by four states [12] as show in figure 2a: Transmit Receive, Idle, and Sleep state. In Transmit state is the energy consumption for transmitting packet, Receive state is the energy consumption for receiving packet, Idle state is the energy consumption while the NIC ready to transmit or receive, and Sleep state is the energy consumption while the network interface card is not able to transmit or receive (Sleep mode). The energy consumption of each state is calculated as:

$$E_s = P_s * T_s \quad (3)$$

where E_s is energy consume while in state s , P_s represents power consume in state s , which depends on the specification of wireless network interface card and typically available from the data sheet, and T_s is the necessary time spent in state s and it depends on the number of packet size and transmission rate. The state s can be transmitted, received, idle, and sleep.

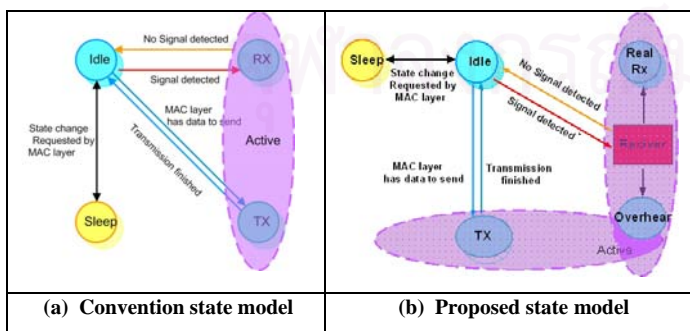


Figure 2. Energy consumptions model

In practice, when the transmitter send unicast packets to its receiver, packets will be overheard by all neighboring node; hence, all neighboring nodes will loss energy even though the packet transmission was not directed to them. Therefore, a node should be "Overhear state" (P_d) to reduce energy consumption. In our algorithm, we augmented energy consumed by taking an additional overhearing state as show in figure 2b.

The work in [5, 7, 8, 10] assumed that the power consumption of actual "receive" nodes are the same as the overhear nodes, but in this paper we assume that the power consume of an overhearing P_d is about two time lower than the power consumed by actual receiver [13]. Because the energy consumption of idle and sleep states are very low, in our simulation the energy consumptions of both states are assumed to be zero.

3. Proposed Algorithm

In this paper, the novel energy-based route discovery mechanism is proposed to achieve efficient utilization of network energy. In the proposed protocol, the route which spends lowest reliable energy consumption of network will be selected. To calculate the energy consumption of the network more precisely, a new link costs used by our route discovery process is proposed. We enhanced our scheme by modifying Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing protocol previously introduced in [3].

A. Proposed algorithm

A1. Reliable Energy Link Cost

In the proposed algorithm, the reliable energy of reliable transmission represents the energy spent by each node for total packet across the link and energy spent in retransmission packet to achieve reliable transmission, which both receiving and overhearing energy consumption are considered. The retransmission energy depends on packet error rate of each link. Here, HHR scheme for retransmission packet is used.

Firstly, in order to predict the cost of energy consumption in the network, the source node is assumed to know the number of packets to communicate with the destination node. Then, that information is added into the overhead of RREQ packet to make other nodes to be able to calculate the energy cost. The reliable energy link cost function can be calculated by the cost of transmission data and control packets (we consider only RREQ packet), it can calculate as following

$$E_{i,j}^{data} = \frac{(P_t + P_r + P_d \times N_{area(S-D)}) \times L_{data}}{(1 - p_{i,j}) \times f_{data}} \quad (4)$$

$$E_{i,j}^{ctr} = \frac{(P_t + P_r \times N_{area(S)}) \times L_{ctr}}{f_{ctr}} \quad (5)$$

where $E_{i,j}^{data}$ and $E_{i,j}^{ctr}$ are energy link cost of data and control packet between node i and node j , respectively. P_t, P_r and P_d are power consumption of transmitting, receiving and overhearing, $N_{area(S-D)}$ is the number of neighbor nodes except the receive node in coverage area of source node and

$N_{area(s)}$ is number of neighbor nodes in coverage area of source node, L_{data} and L_{ctr} are the length of data and control packets (bits), respectively. $p_{i,j}$ is packet error rate over link between node i and node j , f_{data} and f_{ctr} are transmission bit rate of data and control packets (bps), respectively. The packet error rate can be calculated from: $p_{i,j} = 1 - (1 - BER_{i,j})^s$, where s is packet size (bits).

Unlike data transmission, packet error rate is not considered in control packets transmission since it uses broadcast scheme, which is not necessary to consider the characteristic of links. Thus, the reliable energy link cost can be calculated as:

$$E_{i,j}^{REL} = E_{i,j}^{ctr} + E_{i,j}^{data} \quad (6)$$

where $E_{i,j}^{REL}$ is the reliable energy link cost between node i and node j .

A2. Route Discovery Mechanism

When the source node initiates the route discovery, it first broadcasts a RREQ packet to its neighbors. Its neighbor node will check this packet whether it is first received, if it is not, it will increase the hop count in the header of RREQ by one and calculates “reliable energy link cost” (using equation 6) of itself and the previous node which sent RREQ and appends this value into “energy route cost” in the RREQ header. After that, the intermediate rebroadcast the RREQ to its neighbor. The energy route cost can be calculated as follows:

$$E_r^{total} = \sum_{i=1}^{d-1} E_{i,i+1}^{REL} \quad (7)$$

where E_r^{total} is energy route cost of route r , which is summation of the reliable energy link cost of all link in route r . This process will continue until RREQ packets reach only the destination node. In our protocol, any intermediate nodes are not allowed to generate a RREP packet instead of the destination node because the route in routing table of intermediate node may be out of date. That is the main difference from the conventional AODV [3]. Which intermediate nodes can reply RREP, if it has an active route in route table.

In AODV, when the destination node has received the first RREQ packet, it immediately replies RREP back to the source node. But, in our protocol the selected path is based on energy cost. Thus, the destination node should receive multiple RREQ packets from different paths. The destination selects the optimum route (r^*) based on lowest energy route cost among these possible route defined as follow:

$$r^* = \min_{\forall r \in s} (E_r^{total}) \quad (8)$$

where s is the set of all possible routes between source and destination nodes. In the proposed algorithm, the optimum route has the least reliable energy consumption of network. Therefore, the proposed algorithm will make network have more effective energy consumption of network.

4. Simulation Model and Performance Evaluation

We consider a network topology with 50 mobile nodes random placed over a $1000 \times 1000 m^2$. All node moves according to a random waypoint mobility model, which each node moves toward a random destination, another random destination is targeted after some certain pause time. In our simulations, the maximum mobile node speed is varied to simulate different degrees of mobility and fixed pause time (100 sec). Each simulation run takes 900 seconds simulation time. Each point in the plotted results represents an average of twenty simulation runs.

In our simulation, twenty constant bit rate (CBR) sources and their corresponding destinations are randomly set. Each CBR source sends four packets every second for a specified duration. The packet sizes are fixed as 512 bytes.

In order to simulate the real situation, we implemented the link quality mechanism in NS2.28 [14] which used the packet error probability to decide whether or not each packet is received successfully based on the BER and packet length deduced by SNR and modulation scheme used at the transceiver (if the packet error rate is greater than a random number generated, then the packet is dropped). The physical radio characteristics of each mobile node's are chosen to approximate and set parameter based on one of real product – Orinoco 802.11b Card [11] such as Receiver Sensitivity, Receiver noise floor, etc. In [11] operate a nominal radio range of 180 m (for transmission bit rate 11 Mbps) and range 270 m in control packet (transmission bit rate 2 Mbps). For the energy model, we assumed that the power consumed in three states (in section 2-B) of radio interface, $P_t = 0.6635$ watts for transmit state, $P_r = 0.395$ watts and $P_d = 0.200$ watts for receive and overhearing state, respectively. All simulation, we let the initial energy of each node to be 10 joules and assumed that when the energy level goes down to zero, no more packets could be transmitted or received by the node.

A. Performance Metrics

To study the performance of our propose protocol, we implemented and observe four routing algorithms: Shortest-Path (SP - the original AODV routing protocol that selects the route with the minimum latency) [3], Retransmission-Energy Aware (RA) with EER scheme [8], Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (In this paper, γ equal 25 % is used to perform that the CMBCR gave results close to MTPR protocol), and our energy-efficient routing protocol. To evaluate the efficiency of proposed energy-efficient routing protocol, we investigated four metrics, which can be classified into 2 types: energy performance metric and non energy performance metric (traditional performance) as following:

- *Data Delivery Ratio, DDR*: The ratio of the data delivered to the destinations to the data sent out by the sources.
- *Average End-to-End Delay, AE2E*: The average time it takes for a packet to reach the destination. It includes all possible delays in the source and each intermediate node, caused by route discovery, queueing, etc. We only

consider successfully delivered packets.

- *Energy Consumed per Good-put, EPG*: the total energy consumed for every data packet successfully received.
- *Network Lifetime, NLT*: the time taken for a first node in simulation dies due to battery resource exhaustion.

5. Simulation Result and Analysis

To comprehensively measure the performance of a protocol, various network contexts are considered. We present the results for Mobile Random Topology, in which nodes are allowed to move using the random waypoint model and Static Random Topology, in which nodes are immobile and uniformly distributed over simulation area.

A. Mobile Random Topologies

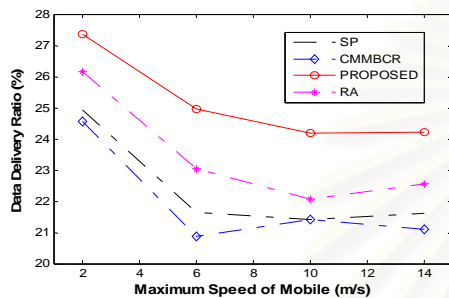


Figure 3. Data delivery ratio VS maximum speed of mobile

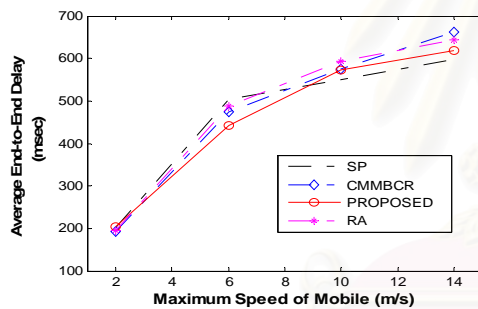


Figure 4. Average end-to-end delay VS maximum speed of mobile

In this experiment, the maximum mobile node speeds are varied (i.e. 2, 6, 10, 14 m/s) to simulate different degrees of mobility and a fixed pause time (100 sec). Figure 3 show the data delivery ratio, this metric reflects the throughput of the supported network. Our protocol outperforms other protocols because of the efficiently energy consumption of the network. Moreover, the selected path of our algorithm is the path with lower transmission packet error rate and lower node density. From figure 3, it shows that the proposed protocol has higher data delivery ratio than RA about 7.28 % and 12.03 % higher than that of SP (14 m/s). Although, the proposed protocol uses more number of hop, but figure 4 shows that the proposed protocol has a little higher average end-to-end delay when compare with SP due to our optimum path has low packet error rate and low congestion.

Figure 5 and 6 show the energy performance of network as a function of the maximum speed. The energy consumption per good-put represents energy efficiency of network. Our

protocol shows the best energy efficiency of network at all test speed because the link quality of network is being considered; thus, when topology changed rapidly (link quality change overtime), it does not effect our protocol. Moreover, the proposed algorithm does not consider only energy consumed by nodes on the chosen route, but also consider the lowest energy consumption of network (including energy consumed by retransmission, overhearing, and receiving). As shown in figure 5, our protocol has higher energy efficient than RA scheme about 9.84 %, and about 16.98 % higher than CMMBCR scheme at 14 m/s. In SP and CMMBCR schemes show lower energy efficiently than energy-aware scheme (RA, and Proposed), since there are not guarantee minimum energy consumption. The simulated results show that the energy consumption of overhearing and receiving dominate the total energy consumption of network, which can degrade the network performance and energy efficiently.

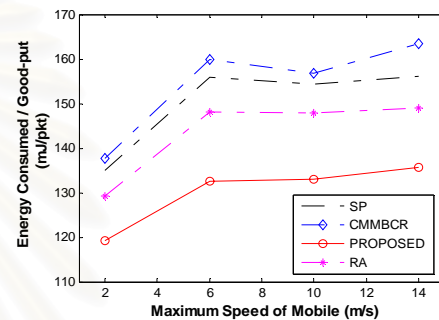


Figure 5. Energy per good-put VS maximum speed of mobile

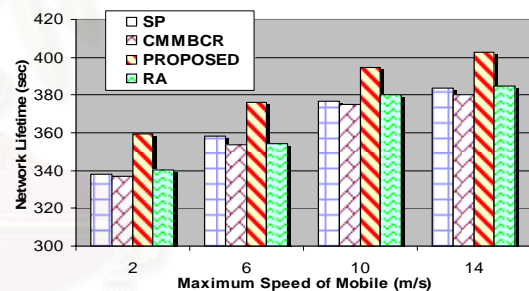


Figure 6. Network lifetime VS maximum speed of mobile

In figure 6, the results show that guarantee of the network lifetime is extended when the routing consider total reliable energy consumption. Although this metric does not reflect to lifetime of node directly, if the network has energy consumption efficiently, it can extend a little bit of network lifetime. In figure 6, the network lifetime of the proposed protocol outperforms other protocols for all mobility speed because all connections in the selected path is lowest network energy consumption which extend about 5.02%, 4.81% and 5.97% at 14 m/s compared with SP, RA and CMMBCR respectively. When threshold of CMMBCR is assumed to be 25%, the result becomes very close to that of SP because most of the selected path is the shortest path. As mentioned, the value of threshold affects the performance of the network. However, the network lifetime of RA is extended, but less than that of our protocol.

B. Static Random Topologies

In this simulation, performance of routing protocol was evaluated under static random topology scenario shown in sensor network.

Table 1. Simulation results in static random scenario

Protocol	SP	CMMBCR	RA	PROPOSED
DDR (%)	17.02	16.83	17.67	18.29
AE2E (msec)	159.50	178.20	132.40	166.10
EPG (mJ/packets)	132.10	134.67	126.98	111.86
NLT (sec)	421.82	419.84	423.24	449.41

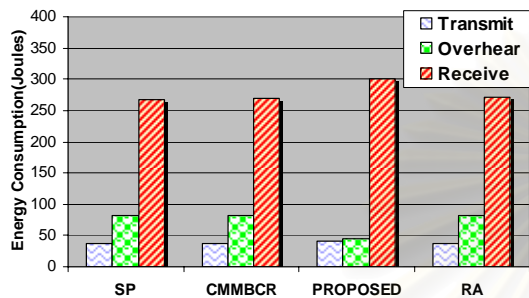


Figure 7. Energy consumption depending on network card activity

In table 1 confirms that our protocol outperforms both of energy and non-energy performance like in mobile random topology. Moreover, how the network interface card consumed the energy is also evaluated in each energy consumption state model. Figure 7 shows that most energy consumed in receiving state, and overhearing state consumes more energy than transmitting state. The result shows that overhearing state spends very significant energy consumption of the network. Our protocol can reduce the energy consumption of overhearing state by about 43.57 % compared with RA because our path is the path with low node density and low packet error rate, which can reduce more energy consumption as well as extend network lifetime. As mentioned, to reduce energy consumed by overhearing state can improve the performance of the network.

6. Conclusion

The performance of ad hoc network can be evaluated in many ways such as node mobility, channel quality, traffic load, and routing schemes, etc. In the aspect of effective energy consumption of network, using the minimum-hop is not always necessarily best for saving the energy of the network. In this paper, we presented new energy-based route discovery mechanism (on-demand technique) to find the optimum path between sources and destinations with consideration of the total reliable energy consumption of the network (including the energy consumed by transmitting, receiving, and overhearing).

In our simulation, we evaluated our protocol using ns-2 simulator. In order to simulate the realistic scenario, we integrated the channel quality mechanism in all mobile node of simulation. In addition, we modified the energy consumption

model in ns-2 to support the energy consumption due to overhearing in our energy consumption model.

Simulation results show that our protocol outperforms not only in the aspect of effective energy consumption of network and network lifetime, but also enhances the data delivery ratio (throughput) more than other reviewed protocols. In additional, the energy consumption of overhearing will dominates the total energy consumed of network. Therefore, well-designed routing protocols should be developed to consider this energy consumption issue. Then, it can help network in dissipating node's energy wisely and extends nodes' lifetime. Although, we implemented the algorithm on AODV, our technique can be used with any on-demand protocol.

Acknowledgment

This work was supported in part by the Cooperation Project between Department of Electrical Engineering and Private Sector for Research and Development, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

References

- [1] C. E. Jones, K. M. Sivalingam, P. Agrawal, and J. C. Chen, "A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks," *In Wireless*. Vol. 7, no. 4, pp. 343-358, 2001
- [2] E. M. Royer and C. -K. Toh, "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks," *IEEE Personal Communication Magazine*, pp. 44-50, April 1999.
- [3] C. E. Perkins, E. M. Royer and S. R. Das, "Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing," *IETF internet Draft (work in progress)*, Nov 2002.
- [4] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva, "A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols," in *Proc. MobiCom'98*, pp. 85-97, Oct. 1998.
- [5] C. -K. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol 39, pp. 138-147, June, 2001.
- [6] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-Aware Routing in Mobile ad hoc Networks," *International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)*, pages 181-190, Oct. 1998.
- [7] K. Scott and N. Bambos, "Routing and channel assignment for low power transmission in PCS," *IEEE ICUPC*, Vol. 2, pp. 498-502, Oct. 1996.
- [8] S. Banerjee and A. Misra, "Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks," *MOBIHOC'02*, pp. 146-156, June 2002.
- [9] N. Nie and C. Comaniciu, "Energy Efficient AODV Routing in CDMA Ad Hoc Networks Using Beamforming," in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, V 4, pp. 2449-2453, May 2005.
- [10] Juan-Carlos Cano and D. Kim, "Investigating Performance of Power-aware Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE/ACM MASCOTS 2002 Workshops*, Fort Worth, Texas, pp. 80-86, October 12, 2002.
- [11] Datasheet for ORiNOCO 11 Mbit/s Network Interface Cards, 2001.
- [12] C. B. Margi and K. Obraczka, "Instrument Network Simulators for Evaluating Energy Consumption in Power-Aware Ad-Hoc Network Protocols," in *IEEE/ACM MASCOTS 2004*, pp 337-346, Oct 5-7, 2004.
- [13] L. M. Freaney, "An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc network," *Mobile Networks and Applications Journal*, V6, N3, pp 239-249, 2001.
- [14] "NS2 Network Simulator," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย จิรศักดิ์ กาญจนโรจน์ เกิดวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดสงขลา เข้ารับการศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปีการศึกษา 2541 และได้สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ในปีการศึกษา 2544 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย