

การจัดสรรเส้นทางที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาถึงการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง
ในโครงข่ายแอคซอก



นายโกวิทช์ สิทธิ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENERGY EFFICIENT ROUTING MECHANISM WITH MAC PROTOCOL CONSIDERATION
IN AD HOC NETWORK



Mr. Kowit Sitthi

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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจัดการเส้นทางที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณา
ถึงการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในโครงข่ายแอตสอก

โดย

นายโกวิทย์ สิทธิ


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

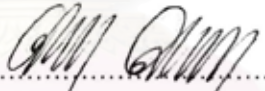
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิริกุลกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนิตศ อัครกุล)

โกวิทย์ สิทธิ : การจัดสรรเส้นทางที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาถึงการควบคุม การเข้าถึงตัวกลางในโครงข่ายแอตฮอก (ENERGY EFFICIENT ROUTING MECHANISM WITH MAC PROTOCOL CONSIDERATION IN AD HOC NETWORK) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร, 122 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงาน สำหรับโครงข่ายแอตฮอก เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งาน นานที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 2 โพรโทคอล โพรโทคอลแรก ที่นำเสนอคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยมีเป้าหมายทำให้โครงข่ายมีการ ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น เป็นวิธีที่นำเอาพลังงานใน ส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณา ซึ่งเป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่ง การรับ การส่ง แพ็กเก็ตในกรณีเกิดการชนของแพ็กเก็ตและการได้ยินแพ็กเก็ตจากโหนดรอบข้าง รวมทั้งผลกระทบของ กำลังงานที่โหนดข้างเคียงใช้ ซึ่งส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเก็ต เส้นทางที่ถูกใช้จะเป็นเส้นทางที่ มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด โพรโทคอลที่นำเสนอแบบที่สองเป็น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดย การนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโหนดมาพิจารณา เข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด โดยโพรโทคอลนี้เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่าย สูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมไว้ 2 แบบ โดยแบบแรกเป็นการนำค่า ระดับพลังงานที่เหลือของโหนดในแต่ละเส้นทางมาเป็นค่าประวิงเวลาก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ต โหนดปลายทาง จะทำการเลือกเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด ส่วนแบบที่สองจะเป็นการนำค่าพลังงานที่คำนวณได้ใน ส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณาพร้อมกับค่าระดับของพลังงานที่เหลือของโหนด โดย เส้นทางที่ถูกเลือกใช้ จะเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการ จัดสรรเส้นทางที่ได้นำเสนอแบบผสมทั้งสองวิธีให้ประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ดีกว่าแบบอื่นที่นำมา เปรียบเทียบ เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดพลังงานที่ใช้ในเส้นทางได้

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2549

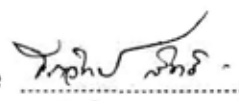
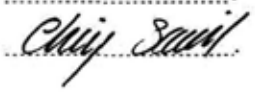
ลายมือชื่อนิสิต..... *โกวิทย์ สิทธิ*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4770225121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: MAC PROTOCOL, ROUTING ALGORITHM, ENERGY MODEL

KOWIT SITTHI: ENERGY EFFICIENT ROUTING MECHANISM WITH MAC PROTOCOL CONSIDERATION IN AD HOC NETWORK. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.DR. CHAIYACHET SAIVICHIT, D.Eng.,126 pp.

This thesis proposes energy efficient routing mechanism with MAC protocol consideration in ad hoc network that will prolong the lifetime of mobile nodes, and, consequently, prolong the network lifetime. There are 2 categories of routing protocols that are proposed in this thesis. The first category is energy-aware routing protocols which aim at minimizing energy consumption to extend network lifetime. These protocols propose a route discovery technique based on energy consumed in Medium Access Control (MAC) which includes data and control packet transmissions. The MAC modeling considered here includes all operation modes of networked devices such as transmissions, receptions and idle states. Moreover, the energy model considers the energy consumed in overhearing state, and in retransmissions due to errors, caused by interfering nodes, and collisions. The optimal path is the path with lowest energy consumed. The second category is hybrid aware routing protocols that combines the advantage of both energy aware and battery aware routing protocols to achieve not only minimizing the total energy consumed, but also extending the network lifetime simultaneously. Two hybrid routing protocols are proposed here. They consider the currently remaining battery level in various nodes, focusing on balancing energy usage among nodes by avoiding nodes that have low remaining battery level. The result shows the proposed algorithms outperform other reviewed algorithms.

Department	Electrical Engineering	Student's signature	
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature	
Academic year	2006		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ สหายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนิตศ อัครวกุล ซึ่งกรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย รวมไปถึงคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์ ตลอดจนความเมตตา และเอาใจใส่ต่อผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่มาก ๆ ที่ให้กำเนิด ให้ความรัก ให้ความอบอุ่น ขอขอบคุณพี่อ้น พี่เอกและพี่ไอ้ะที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆและกำลังใจแก่ผู้วิจัยในทุก ๆ ด้านเสมอมา

นอกจากนี้ ต้องขอขอบคุณความคิดเห็นดีๆ รวมทั้งข้อเสนอแนะในมุมมองที่แตกต่าง ใจ และแรงสนับสนุนจากพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน อาทิ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาและเพิ่มคุณค่าในวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสละเวลาช่วยขัดเกลาและตรวจแก้ผลงานวิจัยจาก อาจารย์ภัทรชาติ ชาย มิก ยู่ย พี่โอ พี่ยอด ก้อง ส้ม แก๊บ เป็นต้น ขอขอบคุณที่นักฟุตบอลโทรคมนาคมของแลปที่ทำให้ผู้วิจัยได้ออกกำลังกายเพื่อให้ร่างกายแข็งแรงอยู่เสมอ นอกจากนี้ยังได้รับโอกาสในการฝึกฝนวิธีการนำเสนอผลงาน และร่วมกันแสดงความคิดเห็นจาก อาจารย์และเพื่อนๆ ร่วมกลุ่มสัมมนาในกลุ่มเนตเวิร์ก (Network group) โดย ผศ.ดร.เชาวนิตศ และ ผศ.ดร.ชัยเชษฐ ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเสริมสร้างความมั่นใจและความกล้าแสดงความคิดเห็นในเชิงวิชาการมากขึ้น

ขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า 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.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	7
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	7
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอค.....	9
2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอค (Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks).....	11
2.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบพื้นฐาน (Basic Ad hoc routing protocols).....	12
2.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน(Power-Aware Routing Protocols).....	13
2.2.2.1 Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR).....	14
2.2.2.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks.....	15
2.2.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโน้ด (Battery-Aware Routing Protocols).....	16
2.2.3.1 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks.....	17

2.2.3.2 DSR-based Energy-aware Routing Protocols in Ad Hoc Networks.....	19
2.2.3.3 Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks Based on the Energy Drain Rate (MDR).....	20
2.2.4 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols).....	22
2.2.4.1 Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR).....	22
2.2.4.2 Conditional Minimum Drain Rate (CMDR).....	24
2.2.4.3 Cost-effective Maximum Lifetime Routing Protocol for Wireless Sensor Network.....	24
2.3 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC).....	25
2.3.1 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐาน.....	26
2.3.2 ปัญหาสถานีซ้อนเร้น	28
2.3.3 การแก้ไขปัญหาสถานีซ้อนเร้น	28
2.3.4 Inter-Frame Spacing (IFS)	30
2.4 แบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Energy Consumption Model of MAC).....	31
2.4.1 Modeling and Energy-Efficient MAC Layer Protocol.....	34
2.4.2 Model and Improvement in power control MAC Protocol for Ad-Hoc Network.....	35
2.4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้วยแบบจำลอง Markov' chain model.....	37
2.5 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์.....	41
2.5.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV).....	44
2.5.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	45
2.5.3 กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance).....	48
2.6 ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต.....	50
2.6.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง.....	50
2.6.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม.....	51

บทที่	หน้า
2.7 ผลการจำลองเบื้องต้น.....	52
3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ.....	56
3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Power Aware Routing Protocols).....	56
3.1.1 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอ.....	57
3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	61
3.1.3 ลักษณะพิเศษของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ.....	65
3.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Protocols).....	66
3.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่เหลือมาเป็นค่าประวิงเวลา.....	67
3.2.1.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	67
3.2.1.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่ใช้และพลังงานที่เหลือมาคำนวณพร้อมกัน.....	71
3.3 สรุป.....	74
4 สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ.....	76
4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment).....	76
4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง.....	76
4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล.....	78
4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ.....	79
4.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน (Power-Aware Routing Protocols).....	79
4.2.1.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง.....	81
4.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Routing Protocols).....	86
4.2.2.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง.....	87

บทที่	หน้า
4.2.2.2 การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลา (Maximum Delay) และ เวลาการรอคอย (Waiting Time) ที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางที่นำเสนอ.....	87
4.2.2.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่ง แพ็กเก็ต ข้อมูลของโหนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง.....	98
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ.....	103
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	107
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	108
รายการอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	114
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	122

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบมีสถานีฐานและไม่มีสถานีฐาน..... 9
รูปที่ 2.2	การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication)..... 10
รูปที่ 2.3	การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาถึงระดับความจุของแบตเตอรี่..... 16
รูปที่ 2.4	การเพิ่มแบบ Exponential ของ contention window (CW) 26
รูปที่ 2.5	กลไกของ IEEE 802.11..... 27
รูปที่ 2.6	ปัญหาสถานีซ่อนเร้น..... 28
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างการเข้าถึงช่องสัญญาณในมาตรฐาน IEEE802.11 DCF..... 29
รูปที่ 2.8	โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs..... 32
รูปที่ 2.9	ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการทำงานในช่องสื่อสาร..... 34
รูปที่ 2.10	กลุ่มโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด..... 35
รูปที่ 2.11	พื้นที่และขอบเขตการติดต่อสื่อสาร CCA และพื้นที่แทรกสอด..... 36
รูปที่ 2.12	แบบจำลองลูกโซ่ของ Markov การทำงานของการ random back-off..... 38
รูปที่ 2.13	การติดต่อสื่อสารโดยใช้ทราฟฟิกแบบต่าง ๆ..... 42
รูปที่ 2.13(ก)	ทราฟฟิกแบบ Unicast..... 42
รูปที่ 2.13(ข)	ทราฟฟิกแบบ Overhear..... 42
รูปที่ 2.14	โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs ที่นำเสนอ..... 43
รูปที่ 2.15	โครงสร้างของแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request)..... 46
รูปที่ 2.16	โครงสร้างของแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP)..... 47
รูปที่ 2.17	เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโหนด S และ D..... 51
รูปที่ 2.18	ผลการจำลองเบื้องต้น..... 54
รูปที่ 2.18(ก)	Dropped packet VS Pause time..... 53
รูปที่ 2.18(ข)	Energy consumption VS Pause time..... 53
รูปที่ 2.18(ค)	Average End-to-End Delay VS Maximum speed of node..... 53
รูปที่ 2.18(ง)	Energy per Good-put VS Maximum speed of node..... 53
รูปที่ 2.18(จ)	Network life-time VS Maximum speed of node..... 54
รูปที่ 2.18(ฉ)	Energy consumption VS Pause time..... 54
รูปที่ 3.1	ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการทำงานในช่องสื่อสาร..... 58
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงาน..... 62

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.3	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการ จัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด.....64
รูปที่ 3.4	ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรร เส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด.....64
รูปที่ 3.5	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการ จัดสรร เส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy).....65
รูปที่ 3.6	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง.....70
รูปที่ 3.7	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง.....70
รูปที่ 3.8	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทางแบบผสมที่นำเสนอ แบบที่หนึ่ง.....71
รูปที่ 3.9	โครงสร้างของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่ สอง.....71
รูปที่ 3.10	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางแบบผสมวิธีที่สอง.....73
รูปที่ 3.11	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางแบบผสมวิธีที่สอง.....73
รูปที่ 3.12	ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง.....74
รูปที่ 4.1	ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนเมื่อ เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....80
รูปที่ 4.2	ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อ เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....80
รูปที่ 4.3	อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....81
รูปที่ 4.4	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูล.....82
รูปที่ 4.5	จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกชนเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....83
รูปที่ 4.6	จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูล.....83
รูปที่ 4.7	พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูล.....84

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.8 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล	84
รูปที่ 4.9 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง).....	85
รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม.....	89
รูปที่ 4.11 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด).....	89
รูปที่ 4.12 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด).....	90
รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด).....	90
รูปที่ 4.14 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย).....	92
รูปที่ 4.15 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย).....	93
รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย).....	93
รูปที่ 4.17 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง).....	94
รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง).....	95
รูปที่ 4.19 จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง).....	95
รูปที่ 4.20 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง).....	96
รูปที่ 4.21 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง).....	97

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.22 อายุการใช้งานของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....	97
รูปที่ 4.23 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....	99
รูปที่ 4.24 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล	99
รูปที่ 4.25 จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....	99
รูปที่ 4.26 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....	101
รูปที่ 4.27 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....	101
รูปที่ 4.28 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล.....	101
รูปที่ 4.29 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ).....	103
รูปที่ 4.30 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ).....	104
รูปที่ 4.31 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ).....	105
รูปที่ 4.32 จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกละทิ้งในชั้น MACเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ).....	105

สารบัญตาราง

ตารางประกอบ	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน IEEE 802.11.....	30
ตารางที่ 2.2 กำลังที่ใช้ในแต่ละโหมดการทำงานของอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย.....	33
ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ของสมการในวิทยานิพนธ์.....	60
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโนดต้นทาง.....	77



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการให้บริการทางด้านสื่อสารมีการแข่งขันที่สูงขึ้น ผู้ให้บริการพยายามคิดค้นและพัฒนาการบริการในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งออกแบบอุปกรณ์การสื่อสารให้มีความสามารถหลายๆ อย่างทั้งด้านความคุ้มค่าในการใช้ ความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการใช้งาน ซึ่งถ้าให้ความสำคัญทางด้านความคล่องตัวในการใช้งานแล้วนั้น การสื่อสารแบบไร้สายเป็นการสื่อสารที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสะดวกสบายในการพกพาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารและความยืดหยุ่นในการใช้งาน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากจำนวนของผู้ใช้บริการโทรศัพท์มือถือและผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตผ่านโครงข่าย Wireless Local Area Network (WLAN) นั้นมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีสถานีฐาน (Base station) หรือจุดเข้าถึง (Access Point) ที่เพียงพอต่อการใช้งานของผู้ใช้ ซึ่งหากจำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนมากขึ้น ปริมาณของข้อมูลข่าวสารที่แลกเปลี่ยนกันระหว่างผู้ใช้ก็มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายที่มีอยู่ไม่สามารถรองรับการให้บริการได้อีกหรือคุณภาพของการใช้งานจะลดลง ซึ่งด้วยเหตุนี้ผู้ใช้บริการโครงข่ายจึงจำเป็นต้องขยายโครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นของผู้ใช้งาน เพื่อให้คุณภาพการให้บริการยังคงอยู่ในระดับที่ผู้ให้บริการกำหนดไว้ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการขยายโครงข่ายจะพบว่าส่วนมากจะเกิดจากการวางโครงสร้างพื้นฐานและยังใช้ระยะเวลานานในการติดตั้งโครงข่าย

เนื่องจากในปัจจุบันประชาชนได้ให้ความสนใจในด้านการลดใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นเทคโนโลยีต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องใช้พลังงาน จึงต้องคิดค้นวิธีการใหม่ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้ได้คุ้มค่าที่สุดที่สุด โครงข่ายแอดฮอค (Ad hoc Network) จึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมเนื่องจากข้อดีหลายๆ ประการทั้งในด้านค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโครงข่ายที่ต่ำ และง่ายในการติดตั้งโครงข่าย จึงทำให้ใช้เวลาการติดตั้งน้อยลง ดังนั้นการสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอค จึงเป็นการสื่อสารอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสะดวกสบายในการพกพาและสามารถพกติดตัวไปได้ทุกที่ อีกทั้งโครงข่ายแอดฮอคเป็นการติดต่อสื่อสารกันโดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางหรือจุดเข้าถึง (Access Point) เหมือนในโครงข่ายเซลลูลาร์ (Cellular network) หรือโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) โหนดทุกโหนดในโครงข่ายสามารถติดต่อกันได้โดยตรงภายในระยะการส่งข้อมูล (Transmission range) แต่ถ้าต้องการสื่อสารกับโหนดที่อยู่เกินระยะการส่งข้อมูล การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโหนดในระหว่างทาง (Intermediate node) ในการถ่ายทอดข้อมูลนั้นไปยังโหนด

ปลายทาง ดังนั้นโหนดในโครงข่ายแอ็ดฮอกจึงต้องมีความสามารถในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางได้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารในปัจจุบันมีการพัฒนาให้มีความสามารถที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อความสะดวกสบายในการใช้งาน โดยในสังคมยุคนี้ การสื่อสารแบบโครงข่ายแอ็ดฮอกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ตลอดจนความต้องการของผู้ใช้ก็มีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความสะดวกสบายในการพกพาและง่ายต่อการติดตั้งโครงข่าย ทำให้มีนักวิจัยคิดค้นและพัฒนาประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโครงข่ายแอ็ดฮอกออกมาเป็นจำนวนมากเพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งก็ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างผู้ใช้งานก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้การส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพที่ลดน้อยลง เนื่องจากการสื่อสารแบบโครงข่ายแอ็ดฮอกเป็นโครงข่ายที่ก่อรูปขึ้นโดยไม่มีการอำนวยความสะดวกจากส่วนกลาง (Infrastructure less) และเป็นการทำงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed) โดยโครงข่ายจะประกอบด้วย โหนดเคลื่อนที่ (Mobile nodes) ที่มีการติดต่อกันแบบไร้สายเพื่อส่งข้อมูลในรูปของแพ็กเก็ตข้อมูลระหว่างกัน เนื่องจากโหนดเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นคุณภาพของช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการส่งข้อมูลก็จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา รูปแบบการเชื่อมต่อของโหนดหรือทอพอโลยีของโครงข่ายก็จะไม่แน่นอนและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า อีกทั้งการสื่อสารแบบโครงข่ายแอ็ดฮอกเป็นการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication) ซึ่งถ้าโหนดต้นทางต้องการสื่อสารกับโหนดปลายทางที่ไม่อยู่ในระยะการส่งของโหนดต้นทาง โหนดต้นทางจำเป็นต้องส่งแพ็กเก็ตผ่านโหนดระหว่างทาง (Intermediate nodes) แล้วให้โหนดระหว่างทางทำหน้าที่ส่งแพ็กเก็ตนั้นต่อไปยังโหนดปลายทาง ดังนั้นจึงส่งผลให้ทุกโหนดในโครงข่ายจำเป็นต้องมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกันในโครงข่าย เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น การแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างผู้ใช้งานก็จะได้รับผลกระทบจากข้อจำกัดหลายๆอย่างดังได้กล่าวไว้ในข้างต้น การชนกันของแพ็กเก็ตก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองของการใช้พลังงานและสูญเสียเวลาในการใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานแต่ละคนมีความต้องการที่จะลดความสิ้นเปลืองต่างๆ เพื่อให้ได้ประโยชน์ในการใช้งานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของผู้ใช้ ได้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม คิดค้นและออกแบบวิธีการต่าง ๆ ออกมามากมาย เพื่อปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายแอ็ดฮอกให้มีคุณภาพในทุกๆด้าน โดยเฉพาะการออกแบบเพื่อพัฒนาในด้านการลดใช้พลังงานเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในแต่ละโหนดเคลื่อนที่ให้ใช้งานได้นานที่สุด [1][2][3][4] ซึ่งโดยทั่วไป การออกแบบเพื่อที่จะให้โหนดใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น สามารถที่จะออกแบบได้ในทุกๆชั้น

ของการสื่อสาร ตั้งแต่ชั้นการสื่อสารกายภาพ (Physical layer) ไปจนถึงชั้นสื่อสารการประยุกต์ (Application layer) โดยแต่ละชั้นของการสื่อสารจะมีวิธีในการพัฒนาในส่วนของ การรักษาพลังงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละชั้นของการสื่อสาร แต่โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งการใช้งานในโครงข่ายแอคซอสออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของ การควบคุม (Power control) การจัดเส้นทาง (Power aware routing) และในส่วนของ การจัดการพลังงาน (Power management) [5]

เนื่องด้วยในระบบสื่อสารแบบมีสาย ทอพอโลยีของโครงข่ายจะคงที่และง่ายต่อการจัดการกับระบบ แต่ในทางตรงกันข้าม ทอพอโลยีของระบบแอคซอส มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ถึงแม้จะไม่มี การเคลื่อนของโหนดตัวกลางก็ตาม การปรับเปลี่ยนทิศทางและพลังงานสามารถส่งผลให้ทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ พลังงานที่ใช้ในการควบคุมนั้น ส่วนมากจะนำมาใช้ในการควบคุมพลังงานในการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งข้อดีของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งนั้นจะช่วยต่ออายุของแบตเตอรี่ในแต่ละโหนดให้นานยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มแบนด์วิดท์และลดขอบเขตของการสื่อสารที่ทับซ้อนกันของแต่ละโหนดอีกด้วย แต่ในทางตรงกันข้าม การควบคุมพลังงานการส่งจะทำให้ความน่าเชื่อถือลดลง มีอัตราผิดพลาดของบิตเพิ่มขึ้น (Error Bit Rate, EBR) และพลังงานที่ใช้ในการควบคุมอีกแบบหนึ่งคือ การจัดการทอพอโลยี (Topology Management) หรืออีกชื่อหนึ่งคือ "Topology control" ซึ่งจะเป็นการปรับเปลี่ยนพลังงานในการรับส่งข้อมูลและรักษาภาวะการติดต่อไว้ในเวลาเดียวกัน

ส่วนพลังงานที่ใช้ในการจัดเส้นทางนั้น จะเป็นการใช้พลังงานเพื่อตรวจสอบว่าโหนดที่จะส่งต่อนั้นมีระดับพลังงานที่พอเพียงหรือไม่ ถ้าระดับพลังงานที่เหลืออยู่นั้นพอที่จะใช้ในการติดต่อสื่อสารกันได้ ก็จะทำให้การส่งแพ็กเก็ต ต่ไปยังโหนดนั้น และจะได้เส้นทางในการส่งข้อมูลออกมาในที่สุด

พลังงานที่ใช้ในการจัดการใน IEEE802.11 นั้นจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด [2] คือ โหมดทำงาน (Active Mode, AM) และโหมดอนุรักษ์พลังงาน (Power-Saving Mode, PSM) ซึ่งในแต่ละโหมดก็จะมี การใช้พลังงานที่แตกต่างกันไป โดยในโหมดทำงานจะมีการใช้พลังงานที่สูงกว่าในโหมดอนุรักษ์พลังงาน และในชั้นการเข้าถึงตัวกลางจะมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 2 ช่อง คือ ช่องสื่อสารข้อมูลและช่องสื่อสารควบคุม

ในส่วนของชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC) ก็ได้มีนักวิจัยคิดค้นวิธีการใหม่ ๆ ออกมา เช่น การจัดสรรการใช้ตัวกลางในโหนดแต่ละโหนด [5] เนื่องจาก โหนดทุกโหนดต้องการส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วที่สุด แต่เนื่องจากแบนด์วิดท์ที่มีอยู่ในโครงข่ายมีอยู่จำกัด ทำให้ต้องมีวิธีการในการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งก็เป็นหัวข้อที่น่าสนใจมากของงานวิจัยในปัจจุบัน โดยที่วิธีการแบบ DCF ในมาตรฐาน 802.11 นั้น

เป็นโพรโทคอลมาตรฐาน เพื่อใช้ในการตรวจสอบช่องสื่อสารทั้งช่องสื่อสารทางกายภาพและช่องสื่อสารเสมือนที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) โดยใช้วิธี MACAW (Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless) และการตรวจสอบช่องสื่อสารเสมือนร่วมกับ binary exponential back-off นอกจากนี้ยังมีการคิดค้นวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านอื่น ๆ ของชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง เช่น ด้านพลังงานที่มีอยู่จำกัด โดยมีวิธีแตกต่างกันมากมาย ทั้งการเลือกแพ็กเก็ตที่ไม่มีควมจำเป็นทั้งไปก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการชนกันของข้อมูล การปรับเปลี่ยนกำลังการส่งแพ็กเก็ต [3] การกำหนดช่วง back off time [2] การเพิ่มและลดช่องว่างระหว่างเฟรม [6] และวิธีอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งวิธีการต่าง ๆ นั้นต้องคำนึงถึงผลกระทบอื่นที่ตามมาด้วย ทั้งปริมาณงาน (Throughput) การประวิงเวลา (Delay) การชนกันของข้อมูล (Collision) อัตราการถูกบล็อกของข้อมูล (Blocking rate) และผลกระทบอื่น ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของการบริการ (Quality of Service ,QoS)

ในหลายปีที่ผ่านมาการออกแบบโพรโทคอลจัดเส้นทางได้มุ่งเน้นไปที่พลังงานที่ใช้ในการจัดเส้นทาง ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่คำนึงถึงพลังงาน (Power-aware routing protocol) โดยจะทำการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด คือเส้นทางที่มีการใช้พลังงานรวมของโหนดที่อยู่ในเส้นทางต่ำที่สุด ส่วนในกรณีที่กำลังส่งมีค่าคงที่ (Constant-power scenarios) แต่ละข่ายเชื่อมโยงจะมีค่าต้นทุนที่เท่ากันหมดทั้งโครงข่าย เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ดีที่สุด (กำลังส่งรวมต่ำที่สุด) นั่นคือ เส้นทางที่สั้นที่สุด อีกกรณีหนึ่งคือค่ากำลังส่งสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับระยะทางของข่ายเชื่อมโยงหรือระยะห่างระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับ (Variable-power scenarios) ซึ่งกรณีนี้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง (Link cost) จะมีค่าสูงเมื่อระยะห่างระหว่างโหนดสูง ซึ่งโพรโทคอลจัดหาเส้นทางจะเลือกเส้นทางที่มีช่วงเชื่อมต่อที่มากและแต่ละช่วงเชื่อมต้อมีระยะทางที่สั้น

ในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้นก็มีการใช้พลังงานในการจัดสรรการใช้ตัวกลางของโหนดแต่ละโหนด โดยพลังงานจะมีการถูกใช้ไปมากหรือน้อยนั้น ก็จะขึ้นอยู่กับกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูล ทั้งการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกมาในโหมดการทำงานแบบโหมดการส่ง (Transmit mode) การรับแพ็กเก็ตข้อมูลในโหมดการรับ (Receive mode) ซึ่งทั้งสองโหมดจะรวมอยู่ในโหมดทำงาน (Active mode) และอีกสามโหมด คือ โหมดสถานะว่าง (Idle mode) โหมดสถานะหลับ (Sleep mode) และโหมดสถานะปิด (Power-off mode) โดยที่โหมดสถานะว่างจะเป็นสถานะที่โหนดสามารถทำการส่งและรับข้อมูลได้ และโหมดสถานะหลับ จะเป็นสถานะประหยัดพลังงานและใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งสถานะนี้จะไม่มีการรับและส่งข้อมูลจนกว่าจะถูกกระตุ้นขึ้นมาก่อน สุดท้ายคือโหมดปิด จะเป็นสถานะที่ไม่มีตัวตน คือไม่มีการใช้พลังงานหรือพลังงานหมด ซึ่งก็จะปิดตัวไป

การคิดค้นวิธีในการลดใช้พลังงานในโหมดต่าง ๆ ก็เป็นหัวข้อที่มีนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่มให้ความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งถ้ามีการลดการใช้พลังงานในแต่ละโหมดแล้ว จะต้องไม่มีผลกระทบ

กับโครงข่ายหรือประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสาร ผู้เขียนมีความสนใจในการพิจารณาการใช้พลังงานในส่วนของการเข้าถึงตัวกลาง เพื่อนำมาเพิ่มเติมในส่วนของการจัดหาเส้นทางของโครงข่ายแอดฮอก โดยจากเดิมที่มีการคิดค้นวิธีในการเลือกใช้เส้นทางตามปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแต่ละโหนด [4] โดยโหนดที่มีความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) ต่ำจะไม่ถูกใช้งานมากเกินไป เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโหนดและอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด

ซึ่งเมื่อคิดคำนวณการใช้พลังงานในส่วนของการเข้าถึงตัวกลางเพิ่มเข้าไปอีกจากเดิมซึ่งพลังงานที่คำนวณนี้จะพิจารณาจากความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ความน่าจะเป็นที่ส่งแพ็กเก็ตแล้วจะเกิดการชนกันขึ้น ซึ่งก็จะรวมถึงพลังงานที่จะต้องส่งแพ็กเก็ตซ้ำเมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเก็ต ซึ่งเมื่อพิจารณาในส่วนนี้ก็ยิ่งจะทำให้ การเลือกใช้เส้นทางในโครงข่ายแอดฮอกมีการประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของโหนดก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะนอกจากเส้นทางที่เลือกจะใช้เส้นทางที่มีปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแต่ละโหนดแล้วยังพิจารณาถึงผลกระทบจากโหนดข้างเคียงอีกด้วย โดยโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอวิธีการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอก เพื่อที่จะทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานที่สุดหรือขยายระยะเวลาการทำงานก่อนที่โครงข่ายจะเกิดการแบ่งออกเป็นสองส่วน ซึ่งจะทำให้โหนดไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยจะคิดคำนวณการใช้พลังงานในการสื่อสารในแต่ละการเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่ต่ำที่สุด พลังงานในการคิดนั้นจะเป็นพลังงานที่ใช้ในชั้นของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเป็นหลัก ซึ่งจะเป็นพลังงานในส่วนของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล(Data packet) และแพ็กเก็ตควบคุม(Control packet) เช่น แพ็กเก็ต RTS (Request to Send) และแพ็กเก็ต CTS (Clear to Send) เป็นต้น นอกเหนือจากนั้นยังคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการส่ง การรับแพ็กเก็ตซ้ำเมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเก็ต รวมทั้งพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการได้ยินแพ็กเก็ต (Overhearing Packet) จากโหนดที่อยู่ข้างเคียงอีกด้วย ดังนั้นพลังงานที่คำนวณได้จะไม่ใช้เฉพาะคู่โหนดส่งและโหนดรับเท่านั้น แต่จะรวมถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียจากการได้ยินแพ็กเก็ตดังกล่าวอีกด้วย

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการออกแบบกระบวนการจัดหาเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอก ซึ่งจะเป็นการทำงานแบบข้ามชั้น (Cross Layer) โดยจะเป็นการทำงานข้ามชั้นของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางกับชั้นโครงข่าย ซึ่งจะพิจารณาพลังงานที่ใช้ (Energy consumption) ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเป็นหลัก และส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังชั้นโครงข่าย เพื่อทำการหาเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือก ส่วนเส้นทางอื่นจะถูกลบทิ้งไป เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะเป็นเส้นทางที่ไม่มีการชนกันของข้อมูลหรืออาจจะมีการชนกันของข้อมูลทีน้อยที่สุด จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้อายุการใช้งานของ

แต่ละโหนด และทั้งโครงข่ายนานยิ่งขึ้น เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่ต่ำลง แบตเตอรี่ก็จะมีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น ปริมาณงานที่จะได้รับ (Throughput) ก็จะเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพของระบบก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยึดอายุการใช้งานของโหนดให้มากที่สุดที่นำเสนอนี้จะอยู่บนพื้นฐานโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV โดยได้ทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV เพื่อให้กระบวนการเลือกเส้นทางสามารถยึดอายุการใช้งานของโหนดและโครงข่าย โดยนอกจากที่จะพิจารณาเฉพาะพลังงานที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแล้ว ยังจะพิจารณาถึงพลังงานของแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่ละโหนดอีกด้วย โดยเส้นทางที่มีพลังงานแบตเตอรี่ที่เหลือของโหนดในเส้นทางเพียงพอต่อการสื่อสารและอยู่ในระดับที่สูงพอก็จะถูกพิจารณา เพราะจะได้เพิ่มอายุการทำงานของแต่ละโหนดให้นานขึ้น โดยการที่จะนำค่าที่เหลือของแบตเตอรี่มาพิจารณาร่วมกับพลังงานที่ใช้ในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้นมี 2 วิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยวิธีแรกจะเป็นการนำปริมาณที่เหลือของแบตเตอรี่มาเป็นเวลาที่ใช้ในการหน่วงแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet ,RREQ) โดยกระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโหนดปลายทาง แต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้น โหนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเก็ต RREQ จะต้องบรรจุจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดต้นทางต้องการจะสื่อสารกับโหนดปลายทาง และภายหลังจากโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะต้องคำนวณว่า ณ ขณะเวลานั้นโหนดมีปริมาณที่เหลือของแบตเตอรี่มากพอที่จะใช้งานหรือไม่ ซึ่งคำนวณได้จากค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด (Battery Lifetime) ต่อจากนั้นโหนดระหว่างทางก็จะทำการหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งตามฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay function) ก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงต่อไป ซึ่งช่วงเวลาในการหน่วงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลาปัจจุบัน โดยเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า กลไกการประวิงเวลา (Delay mechanism) ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ต RREQ แรกเข้ามา โหนดปลายทางก็จะตอบรับเส้นทางนี้ทันทีโดยการส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทางผ่านทางเส้นทางเดิมที่แพ็กเก็ต RREQ เดินทางมาถึง ส่วนอีกวิธีจะเป็นการนำค่าทั้งสองมาพิจารณาพร้อมกันให้ได้ค่าหนึ่งออกมาเพื่อเป็นค่าในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีแบตเตอรี่เหลือมากและใช้พลังงานในส่วนของการเข้าถึงตัวกลางต่ำๆ ก็จะถูกเลือก แต่ในกรณีที่ค่าที่ใช้ในการตัดสินใจนั้นมีค่าเท่ากันมากกว่าหนึ่งเส้นทาง จะดูจากเวลาที่แพ็กเก็ตมาถึงปลายทางเป็นหลัก โดยเส้นทางที่มาถึงก่อนจะเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC) ในโครงข่ายแอตสอกที่มีผลต่อการใช้พลังงานของโนดเคลื่อนที่
2. เพื่อการออกแบบและพัฒนาระบบการจัดการเส้นทาง (Routing algorithm) ในโครงข่ายแอตสอก โดยนำการใช้พลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณา
3. เพื่อให้โนดเคลื่อนที่สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น (Network lifetime)

1.4 ขอบเขต และเป้าหมายของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหาเส้นทางในชั้นโครงข่าย (Network layer) ของโนดให้เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแอตสอก โดยนำพลังงานที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (MAC layer) มาพิจารณาเพื่อให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ของแต่ละโนดยาวนานยิ่งขึ้น ภายใต้แบบจำลองการใช้พลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้น จะพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในโหมดการทำงานต่าง ๆ โดยในที่นี้ได้คำนวณถึงพลังงานที่จะเสียไปเมื่อเกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น นอกจากนี้อาจจะมีการเพิ่มเติมในส่วนของการพิจารณาระดับพลังงานในแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่ละโนดด้วย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เช่น ปริมาณงานที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้น การประวิงเวลาก็จะลดลงด้วย เนื่องจากเส้นทางที่เลือกจะเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่ำที่สุด และจะไม่เกิดการชนกันของข้อมูลหรือมีโอกาสการชนกันที่ต่ำที่สุด จึงทำให้การติดต่อสื่อสารนั้นสำเร็จได้โดยไม่เกิดการชนกัน อีกทั้งยังเป็นการประหยัดพลังงานที่มีอยู่ให้ใช้งานได้ยาวนานที่สุด

โพโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอจะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าโนดแหล่งกำเนิดจะต้องทราบจำนวนโนดที่อยู่ในช่วงของการรับส่งข้อมูล เพื่อให้โนดในโครงข่ายนำไปใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเก็ตและนำไปคำนวณหาพลังงานที่ต้องใช้ในการสื่อสารระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทาง โนดในโครงข่ายทุกโนดใช้กำลังส่งที่คงที่เท่ากันทั้งโครงข่าย และไม่สามารถปรับเปลี่ยนกำลังส่งได้ นอกจากนั้นได้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของโครงข่ายถึงลักษณะต่าง ๆ เช่น อายุการใช้งานของทั้งโนดและโครงข่าย ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และ Effective Reliable Throughput (จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกส่งไปยังโนดปลายทางอย่างน่าเชื่อถือ) ระหว่างโพโทคอลที่นำเสนอกับโพโทคอลการจัดเส้นทางที่คำนึงถึงการใช้พลังงานที่มีผู้เสนอไว้ก่อนหน้านี้

1.5 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าโพรโทคอลการจัดเส้นทางในโครงข่ายแอตสอกที่มีอยู่
2. ศึกษาค้นคว้าปัจจัยอื่นๆ ในขั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีผลต่ออายุการใช้งานและหาสมการที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในส่วนนี้
3. พัฒนาและออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางโดยนำปัจจัยที่ได้จากการศึกษามาหาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย เพื่อให้โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ออกแบบเป็นไปตามวัตถุประสงค์
4. เขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ได้ออกแบบมาจากข้างต้นและปรับปรุงโพรโทคอลที่ได้ออกแบบ
5. ทดสอบแบบจำลองโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อระบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่เคยมีผู้ออกแบบมาแล้ว
6. สรุป วิเคราะห์ผลที่ได้ และรวบรวมข้อมูลทั้งหมดพร้อมทั้งจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

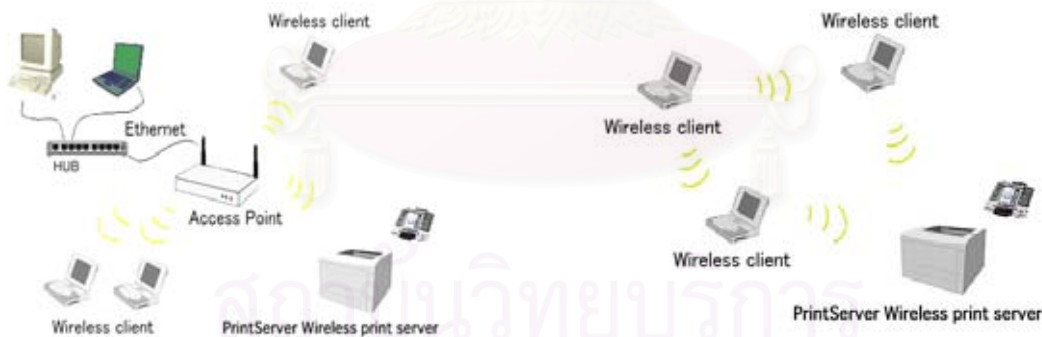
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับวิธีการต่าง ๆ ของโพรโทคอลการจัดเส้นทางของโครงข่ายแอตสอก เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น
2. ได้รู้ข้อดีและข้อเสียของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในออกแบบ
3. ได้ความรู้เกี่ยวกับการทำงานของขั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางและได้รู้ถึงผลกระทบของการใช้พลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงส่วนกลางต่ออายุการใช้งานของแต่ละชนิด
4. นำผลการศึกษาที่ได้จากวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบการทำงานจริง เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอตสอกต่อไป

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless network) เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะการสื่อสารแบบโครงข่ายเซลลูลาร์ (Cellular network) เนื่องจากสะดวกสบายในการพกพาและความยืดหยุ่นในการใช้งานในที่ต่าง ๆ เช่น ในที่ทำงานหรือสถานที่สาธารณะต่าง ๆ การสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอค (Ad Hoc Network) เป็นการสื่อสารอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากโครงข่ายแอดฮอคเป็นการติดต่อสื่อสารกันโดยไม่จำเป็นต้องมีสถานีฐานหรือจุดเข้าถึง (Access Point) เหมือนในโครงข่ายเซลลูลาร์ หรือโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โหนดทุกโหนดในโครงข่ายสามารถติดต่อกันได้โดยตรงภายในระยะการส่งข้อมูล (Transmission range) แต่ถ้าต้องการสื่อสารกับโหนดที่อยู่เกินระยะการส่งข้อมูล การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโหนดระหว่างทาง (Intermediate node) ในการถ่ายทอดข้อมูลนั้นไปยังโหนดปลายทาง ดังนั้นโหนดในโครงข่ายแอดฮอกจึงต้องมีความสามารถในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางได้



รูปที่ 2.1 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบมีสถานีฐานและไม่มีสถานีฐาน

2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอค (Characteristic of Ad Hoc Networks)

โครงข่ายแอดฮอคเป็นการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ทุก ๆ โหนดจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระต่อกัน โหนดแต่ละโหนดจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวจัดเส้นทาง (Router) ซึ่งจะจัดเส้นทางเคลื่อนที่ของแพ็กเก็ตไปยังสถานีอื่น ๆ ในโครงข่าย โดยปราศจากจุดเชื่อมต่อกลาง (Access point) ซึ่งเป็นเหตุทำ

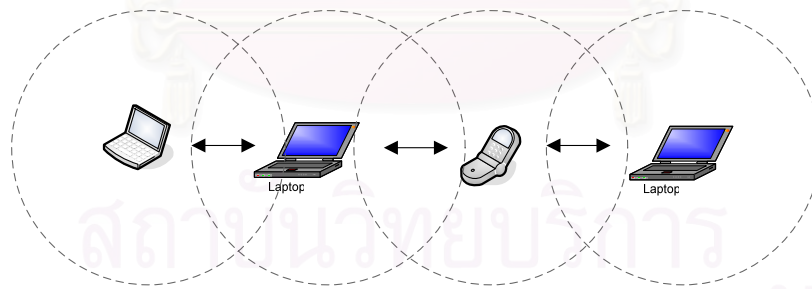
ให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอตฮอกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งในแต่ละโนดก็จะมีข้อจำกัดหรือเงื่อนไขในการติดต่อสื่อสารต่าง ๆ มากมาย โดยคุณลักษณะหลักของโครงข่ายแอตฮอกนั้นใน [7] สรุปได้ดังนี้

2.1.1 ทอพอโลยีแบบพลวัต (Dynamic topology)

เนื่องจากโนดในโครงข่ายแอตฮอก แต่ละโนดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระต่อกัน และจากเงื่อนไขการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอตฮอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Random) หรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากไม่สามารถที่จะทำนายล่วงหน้าได้

2.1.2 การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication)

เนื่องจากการสื่อสารในโครงข่ายแอตฮอกเป็นการสื่อสารกันโดยตรงโดยไม่ผ่านจุดของการเข้าถึง ดังนั้นโนดแต่ละโนดจะต้องมีความสามารถในการเป็นสถานีส่ง สถานีรับ และสถานีระหว่างทาง โดยถ้าระยะของการสื่อสารเกินค่าระยะของการส่งข้อมูล (Transmission range) การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโนดระหว่างทาง (Intermediate node) ในการส่งข้อมูลนั้นไปยังโนดปลายทาง ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งมีการใช้โนดระหว่างทางมากขึ้นเท่าใดความซับซ้อนของโครงข่ายก็จะมีค่ามากขึ้นเท่านั้น โดยรูปที่ 2.2 จะเป็นตัวอย่างของการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ



รูปที่ 2.2 การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication)

2.1.3 การปฏิบัติการแบบกระจายศูนย์ (Decentralized operation)

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายแอตฮอกมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน อีกทั้งยังไม่มีกระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบรวมศูนย์ ดังนั้นโนดทุกโนดในโครงข่ายต้องมีความสามารถในการจัดการการเข้าถึง

ตัวกลางรวมถึงการควบคุมการไหลของทราฟฟิกให้ได้ผลซึ่งประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุดโดยการใช้อนุกรมฐานที่ในดทุก ๆ โนได้รับรู้ร่วมกัน

2.1.4 ข้อจำกัดทางด้านแบนด์วิดท์ (Bandwidth constrained)

การสื่อสารแบบไร้สายจะมีประสิทธิภาพของการใช้แบนด์วิดท์ที่ต่ำกว่าการสื่อสารแบบใช้สายเนื่องจากผลกระทบของการเข้าถึงแบบหลายทาง (Multiple access) เฟดดิ้ง (Fading) สัญญาณรบกวน (Noise) ปัญหาของสถานีที่ซ่อนเร้น (Hidden station problem) และปัญหาสถานีที่รับฟังได้ (Exposed station problem) เป็นต้น ซึ่งผลกระทบของปัญหาเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพของการใช้แบนด์วิดท์ที่มีค่าต่ำกว่าค่าแบนด์วิดท์สูงสุดที่สามารถใช้ได้

2.1.5 ข้อจำกัดทางด้านพลังงาน (Energy constrained)

พลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายก็เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญอย่างมาก เนื่องจากการสื่อสารของโครงข่ายแอดฮอกเป็นแบบหลายช่วงเชื่อมต่อดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นเมื่อพลังงานของอุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดหมดไปหรือไม่เพียงพอในการส่งข้อมูล อาจส่งผลกระทบในการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายได้ ทำให้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม ทำการค้นคว้าและวิจัยในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานในโครงข่ายแอดฮอก เพราะจะสามารถช่วยให้อายุการใช้งานของแต่ละโหนดนานขึ้น

2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายแบบแอดฮอก (Ad hoc Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกสามารถที่จะแบ่งตามคุณสมบัติได้ออกเป็น 3 ประเภทคือ แบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive) แบบการจัดสรรเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) และแบบผสมผสาน (Hybrid) ซึ่งจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวิธีเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้ากับแบบจัดสรรเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล โดยในรูปแบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้านั้นทุกโหนดจะปรับปรุงข้อมูลเส้นทางของโครงข่ายอย่างต่อเนื่องและเมื่อโหนดหนึ่งโหนดใดต้องการที่จะส่งแพ็กเก็ต เส้นทางจะมีไว้เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้ทำให้ไม่มีการประวิงเวลาในการจัดสรรเส้นทาง อย่างไรก็ตามสำหรับรูปแบบที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดที่สูง การเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าจะทำให้ขาดแคลนจำนวนทรัพยากรที่จะใช้ในการให้ได้ว่าเส้นทางที่สมบูรณ์อยู่ตลอดเวลา ซึ่งตัวอย่างของโพรโทคอลการหาเส้นทางไว้ก่อน เช่น โพรโทคอล link state routing (LSR) และโพรโทคอล Distance vector routing (Bellman-Ford) [9] ไม่เคยที่จะถูกนำมาใช้ในโครงข่ายเคลื่อนที่ เพราะโพรโทคอลเหล่านี้มีความเร็วไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงข่าย หลังจากนั้นได้มีการนำโพรโทคอล

ลพื้นฐานทั้งสอง (Link state routing, distance vector routing) มาพัฒนาให้เข้ากับโครงข่ายแอตฮอก อีกประเภทหนึ่งของโพรโทคอลการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล มีวิธีการทำงานคือ เส้นทางจะถูกหาเมื่อมีความต้องการในการส่งข้อมูล ดังนั้นโอเวอร์เฮดของการสื่อสารจะลดลง แต่ยอมเสียการประวิงเวลาเนื่องจากการหาเส้นทาง โดยตัวอย่างโพรโทคอลที่ทำงานแบบวิธีนี้ คือ โพรโทคอล Dynamic source routing protocol (DSR) [8] โพรโทคอลแบบ ad hoc on-demand distance vector routing protocol (AODV) [9] และ Signal Stability Routing (SSR) เป็นต้น และสุดท้ายในวิธี Hybrid จะเป็นการทำงานที่ผสมผสานกันระหว่างวิธีที่หนึ่งและสอง โดยโพรโทคอลที่ทำงานแบบวิธีนี้ คือ โพรโทคอล Zone Routing Protocol (ZRP) ซึ่งวิธีสุดท้ายนี้ จะมีข้อดีคือ จะทำให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่ข้อเสียคือถ้าทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงที่สูง ความต้องการของหน่วยความจำก็จะสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีโพรโทคอลการหาเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Energy Aware routing Protocols) และที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ (Battery Aware Routing Protocols) ซึ่งต่อไปจะสรุปการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางของโครงข่ายแอตฮอกที่จะใช้ในการประเมินสมรรถนะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบพื้นฐาน (Basic Ad Hoc Routing Protocols)

โพรโทคอลในชั้นโครงข่ายจะมีหน้าที่หลักในการค้นหาเส้นทางการติดต่อสื่อสาร (Routing) และที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแบบแอตฮอกซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ วิธีการหาเส้นทางแบบมีการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive Routing) ตัวอย่างโพรโทคอลเช่น Destination-Sequenced Distanced Vector Routing (DSDV) [10] เป็นต้น และวิธีการหาเส้นทางแบบทำการหาเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand Routing) ส่วนตัวอย่างของโพรโทคอลเช่น Dynamic Source Routing (DSR) [8] และ Ad Hoc On-demand Vector Routing Protocol (AODV) [9] เป็นต้น ในบทความ [1] ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในเรื่องการใช้พลังงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง 3 แบบคือ DSR, AODV และ DSDV ภายใต้แบบจำลองการใช้พลังงานแบบเชิงเส้น โดยจำลองภายใต้รูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันสองลักษณะคือ การเคลื่อนที่แบบ Random Waypoint และ การเคลื่อนที่แบบ Reference Point Group Mobility Model (RPGM) และแสดงให้เห็นว่า เมื่อโครงข่ายถูกนำมาใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ระดับความเร็วของโนดต่ำ ๆ โพรโทคอล DSR จะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการอนุรักษ์พลังงาน ขณะที่โครงข่ายทำงานภายใต้สภาวะที่ความเร็วของโนดสูง ๆ ทั้งรูปแบบการเคลื่อนที่และโพร

โทคอลที่จะนำมาใช้งานก็มีความสำคัญคือ ภายใต้โครงข่ายที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลุ่มจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลแบบ On-demand เป็นทางเลือกที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลทั้งสองประเภทมีหลักการในการตัดสินใจเส้นทางในการสื่อสารคือ เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียในการสื่อสารและอายุการใช้งานของโหนดในขณะที่พิจารณาเส้นทาง เพราะฉะนั้นโดยส่วนมากแล้วโพรโทคอลเหล่านี้จะทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่ต่ำและอาจทำให้ต้องสูญเสียพลังงานสำหรับการสื่อสารแต่ละครั้งค่อนข้างสูง

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้สนใจเรื่องการอนุรักษ์พลังงาน โดยออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์จึงเลือกรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลแบบ On-demand เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาให้บรรลุตามเป้าหมาย เหตุผลที่เลือกโพรโทคอลแบบ On-demand เพราะว่าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและสมรรถนะด้านอื่น ๆ เช่น ด้านปริมาณงาน ด้านอัตราการส่งผ่านของข้อมูล เป็นต้น ในบทความ [4, 5] ได้ทดสอบการทำงานของโพรโทคอลแบบ On-demand กับ Proactive จากการพิจารณาได้ชี้ให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ On-demand ให้ประสิทธิภาพได้ดีไม่เพียงแต่ในด้านของปริมาณงาน (Throughput) โอเวอร์เฮดของการจัดสรรเส้นทาง (Overhead Routing) และแพ็กเก็ตที่สูญเสีย (Packet loss) แต่ยังมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์พลังงานด้วย โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ On-demand ที่ได้รับความสนใจและมีประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV และ DSR ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกโพรโทคอลแบบ AODV มาเป็นต้นแบบเพื่อใช้ในการพัฒนาให้สามารถรองรับในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานเพราะว่าโพรโทคอลแบบ AODV มีฟังก์ชันการทำงานที่รองรับกับวิธีการที่นำเสนอซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.5.1 และ AODV ยังใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอลแบบ DSR ในหลาย ๆ สถานะการณ์

2.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Power Aware routing Protocols)

การเลือกเส้นทางในแบบที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น จะเป็นโพรโทคอลที่ยังไม่มีการคำนึงถึงค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต ซึ่งต่อมาได้มีผู้คิดค้นการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานขึ้นมา โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังมีเป้าหมายหลักในการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานรวมให้มากที่สุด โดยนำปัจจัยและเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงการใช้พลังงานของโหนดหรือข่ายเชื่อมโยงมากำหนดเป็นค่าต้นทุน โดยจะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดจากเส้นทางที่ใช้ค่าต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งตัวอย่างของปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุน อย่างเช่น กำลังส่งของโหนด

(Transmission Power) พลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (Transmission Energy) พลังงานที่ใช้ในการ
 ของช่องสัญญาณเป็นต้น ซึ่งหนึ่งในนั้นคือวิธีแบบ Minimum Total Transmission Routing (MTPR)
 [11] ซึ่งการเลือกเส้นทางในแบบวิธีนี้คือ จะเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังในการส่งแพ็กเก็ตต่อแพ็กเก็ตต่ำ
 ที่สุด โดยไม่พิจารณาพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ โดยเส้นทางที่ดีที่สุดที่จะถูกเลือก จะเป็น
 เส้นทางที่ใช้กำลังส่งต่ำที่สุด จึงทำให้ได้เส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อมากซึ่งจะทำให้ระยะห่าง
 ระหว่างช่วงเชื่อมต่อต่ำ จะทำให้เส้นทางนี้มีโนดในเส้นทางมากกว่ากรณีแบบอื่น ทำให้มีการหน่วง
 เวลาจากต้นทางไปยังปลายทางเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเส้นทางที่ได้ อาจจะไม่มีความเสถียรน้อย เพราะ
 โอกาสที่โนดจะเคลื่อนที่ออกนอกทางเส้นทางจะมีมากกว่า ซึ่งจากที่บอกว่าโพรโทคอลนี้ไม่ได้พิจารณา
 ถึงพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ของโนด ทำให้อายุการใช้งานของโนดไม่ได้เพิ่มขึ้น ในกรณีที่โนด
 สามารถปรับเปลี่ยนกำลังในการส่งได้นั้น โหนดต้องการระยะทางระหว่างโนดเพื่อให้การส่งใช้พลังงาน
 ต่ำที่สุด โดยใช้ GPS เพื่อหาระยะทางสัมพัทธ์ แต่ข้อเสียของ GPS คือจะไม่ได้รับข้อมูลที่เกี่ยวกับ
 คุณลักษณะของสภาพแวดล้อม และโนดจะต้องเสียพลังงานในส่วนของ overhead ของ GPS อีกด้วย
 แต่ถึงอย่างไรก็ตาม โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานก็ช่วยทำให้การใช้พลังงานในระบบมี
 ประสิทธิภาพมากขึ้น ต่อไปจะกล่าวถึงโพรโทคอลที่ถูกนำเสนอและได้รับความไว้วางใจมาก่อนหน้านี้

2.2.2.1 Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR)

ในบทความอ้างอิง [11] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum
 Transmission Power Routing (MTPR) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของโนดในโครงข่าย ซึ่ง
 โพรโทคอล MTPR ได้กำหนดค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i กับโนด j เป็นกำลังที่โนด i ใช้ใน
 การส่งข้อมูลไปยังโนด j ได้อย่างสำเร็จ ซึ่งแสดงแทนด้วย $P(n_i, n_j)$ เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนรวม
 สำหรับเส้นทาง l แสดงแทนด้วย (C_l) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$C_l = \sum_{i=1}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (2.1)$$

เมื่อ n_i และ n_D เป็นโนดต้นทางและโนดปลายทางตามลำดับ ดังนั้นโพรโทคอลการหา
 เส้นทางแบบ MTPR จะเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดเพื่อช่วยทำให้โนดใน
 โครงข่ายใช้พลังงานลดต่ำลง ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังต่ำที่สุดนั้นจะทำการเลือกจากเซต
 ของเส้นทางที่เป็นได้ทั้งหมด (A) ตามสมการที่ (2.2) ซึ่งโนดปลายทางจะเป็นผู้ทำการตัดสินใจ

$$P_r = \min_{l \in A} C_l \quad (2.2)$$

เมื่อ P_r แสดงเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมต่ำที่สุด แต่ด้วยความสามารถของอุปกรณ์ไร้สายที่แตกต่างกันคือใช้กำลังส่งคงที่และกำลังส่งปรับเปลี่ยนได้อย่างพลวัต ซึ่งทั้งสองแบบจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้กำลังส่งของแต่ละโหนดเท่ากันและคงที่ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเหมือนกับการเลือกเส้นทางแบบสั้นที่สุด (Shortest-Path, SP)

2.2.2.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks

ในบทความอ้างอิงนี้ [9] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจราจรเส้นทางที่ช่วยยืดอายุการใช้งานโดยนำเสนอตัวชี้วัดขึ้นมา ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาตัววัด 2 ตัวคือ “Minimize energy consumed per packet และ Minimize cost per packet (โดยค่า Cost อาจจะเป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งหรือรับ)” เพื่อนำมาใช้แทนการจราจรเส้นทางแบบเดิม โดยมองว่าถ้าเลือกใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่อหนึ่งแพ็กเก็ตที่มีค่าต่ำที่สุดก็จะทำให้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายมีค่าที่ต่ำด้วย

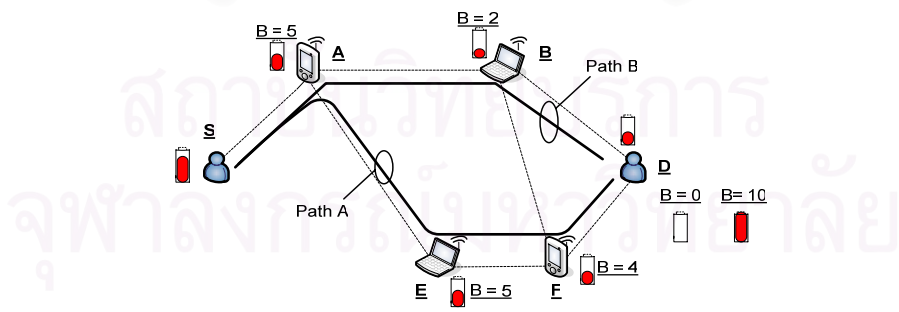
อย่างไรก็ตามเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งแพ็กเก็ตในหนึ่งช่วงเชื่อมต้อมีค่าคงที่ (ในกรณีกำลังส่งคงที่) ผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะเหมือนกับกรณีการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด แต่ถ้าคำนึงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการแย่งชิงช่องสัญญาณของข้อมูล ผลที่ได้จะแตกต่างออกไปจากข้างต้นในกรณีที่มีปริมาณโหลดสูง ๆ โดยเส้นทางที่ได้จะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่ง (Congestion) ของโหนดสูง ๆ

การใช้ตัววัดนี้ถึงแม้ว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานโดยรวมได้แต่ไม่ได้ช่วยรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในแต่ละโหนดเนื่องจากบางโหนดที่อยู่ในเส้นทางจะต้องรับภาระในการส่งแพ็กเก็ตเป็นจำนวนมากและทำให้โหนดดังกล่าวหมดอายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็วหรือกล่าวได้ว่าถ้าต้องการออกแบบโพรโทคอลเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย การใช้ตัววัดนี้อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณา

นอกจากโพรโทคอลการจราจรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานแล้ว ยังมีโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ด้วย เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโหนดและโครงข่ายให้นานยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดมีดังนี้

2.2.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ (Battery Aware Routing Protocols)

การประยุกต์ใช้โพรโทคอลที่คำนึงถึงพลังงานกับโครงข่ายแอ็ดฮอกสามารถช่วยทำให้การใช้พลังงานในโครงข่ายมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของโนดและโครงข่ายได้เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบเก่า ๆ ที่ไม่พิจารณาถึงพลังงานในการหาเส้นทาง แต่โพรโทคอลดังกล่าวไม่ได้บ่งชี้ถึงอายุการใช้งานของโครงข่ายโดยตรง ดังนั้นเส้นทางที่ได้อาจจะประกอบไปด้วยโนดที่มีความจุแบตเตอรี่ที่ต่ำซึ่งอาจทำให้โครงข่ายหรือโนดเสียพลังงานมากกว่าเดิมเพราะจะต้องเสียพลังงานที่ใช้ในการหาเส้นทางใหม่อีกครั้ง ทำให้การพิจารณาอายุการใช้งานของโนดและโครงข่ายได้หันมาให้ความสนใจความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ณ เวลานั้น ๆ (Remaining Battery Capacity) เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาตัดสินใจเส้นทาง โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด มีเป้าหมายหลักในการออกแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด โดยพยายามรักษาสมดุลการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโนดให้มากแทนที่จะลดการใช้พลังงานเหมือนกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง เพราะการใช้เทคนิคแบบรู้พลังงาน ไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้มากนัก โดยวิธีนี้นำปัจจัยและเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโนดหรือข่ายเชื่อมโยงมากำหนดค่าต้นทุนหลักในการพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนอย่างเช่น ระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) อัตราการลดลงของระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery Drain Rate) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Battery Life) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาถึงระดับความจุของแบตเตอรี่

ซึ่งมีหลายบทความได้เสนอวิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโนด เช่น Minimum Battery Cost Routing (MBCR), Max-Min Battery Cost Routing (MMBCR), Request Delay

Routing Protocol (RDRP) และแบบอื่นๆ โดยทุกวิธีมีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือ เส้นทางที่เลือกประกอบไปด้วยโนดที่มีระดับพลังงานที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น ๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.3 โดยตัวอย่างโพรโทคอลที่ถูกนำเสนอและได้รับความสนใจมีดังนี้

2.2.3.1 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks

ในบทความของ Singh et al [12] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Battery Cost Routing (MBCR) และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR) ซึ่งทั้งสองโพรโทคอลมีหลักการการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้

โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR มีจุดประสงค์ในการออกแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโนดในโครงข่าย โดยมีหลักการว่าไม่ควรให้โนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดที่ต่ำอยู่รวมในเส้นทางหรือ กล่าวได้ว่าพยายามหลีกเลี่ยงการใช้งานโนดที่มีความจุแบตเตอรี่ต่ำนั่นเอง

โดยกำหนดให้ C'_i เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโนด n_i ณ เวลา t ซึ่งมีค่าที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (0 หมายถึงความจุของแบตเตอรี่เป็นศูนย์ และ 1 หมายถึง ระดับความจุของแบตเตอรี่มีอยู่เต็ม) ถ้ามองในแง่ของความพึงพอใจในการส่งต่อ (Forward) แพ็กเก็ตแล้ว โนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำจะไม่ค่อยมีความสนใจมากนัก จากจุดนี้จึงได้กำหนดฟังก์ชันต้นทุนของแบตเตอรี่ ($f_i(c'_i)$) สำหรับแต่ละโนด n_i ตามสมการที่ (2.3) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความจุที่เหลืออยู่ของโนด ณ ปัจจุบัน

$$f_i(c'_i) = 1/c'_i \quad (2.3)$$

จากสมการหมายความว่าถ้าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโนดลดลงค่าฟังก์ชันต้นทุนของโนด n_i จะเพิ่มขึ้น โดยในระหว่างขั้นตอนกระบวนการจัดสรรเส้นทางที่โนดต้นทางทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไปยังโนดปลายทาง ทุก ๆ โนดจะต้องทำการคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนตามสมการที่ (2.3) ยกเว้นโนดต้นทางและโนดปลายทาง และเมื่อไม่ใช้โนดปลายทางก็จะต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไปเรื่อย ๆ แต่ก่อนที่จะแพร่กระจายออกไป โนดจะต้องรวมค่าฟังก์ชันต้นทุนที่คำนวณได้กับค่าฟังก์ชันต้นทุนของทุกโนดก่อนหน้านี้ทั้งหมดแล้วจากนั้นก็เก็บค่าที่ได้ไว้ ณ ส่วนหัวของแพ็กเก็ต กระบวนการนี้จะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนโนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง ซึ่งโนดปลายทางก็ได้ข้อมูลค่าต้นทุนแบตเตอรี่ (Battery Cost) ของแต่ละเส้นทางซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$R_p = \sum_{i=0}^{D-1} f_i(c'_i) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) เป็นตัวอย่างการคำนวณค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง P ซึ่งประกอบไปด้วยโหนด 0 ซึ่งเป็นโหนดต้นทางไปยังโหนด D ซึ่งเป็นโหนดปลายทาง ดังนั้นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงก็จะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้คือ เส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางต่ำที่สุด สมมติว่าเส้นทาง P^* เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$R_{p^*} = \min \{ R_p | P \in A \} \quad (2.5)$$

เมื่อ A เป็นเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง เพราะฉะนั้น MBCR สามารถป้องกันไม่ให้โหนดมีการใช้พลังงานมากเกินไป ซึ่งก็สามารถทำให้โครงข่ายยืดอายุการใช้งานไปได้ อย่างไรก็ตามผลเสียของการใช้ค่าที่เกิดจากการบวกของแต่ละ $f_i(c'_i)$ มาเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางคือ ในเส้นทางที่ได้รับการพิจารณาว่าเป็นเส้นทางที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงสุดนั้น อาจจะประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับพลังงานที่ต่ำร่วมอยู่ก็ได้ ต่อมาทางผู้เสนอจึงได้พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นมาเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นซึ่งนั่นก็คือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ได้ทำการดัดแปลงค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง P จากค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางตามสมการที่ (2.5) ข้างต้นที่ได้นำเสนอไว้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการที่ (2.6)

$$R_p = \max_{i \in \text{route } P} f_i(c'_i) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) ในเส้นทาง P โหนดใดที่มีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ต่ำที่สุดหรือมีค่า $f_i(c'_i)$ สูงที่สุดก็จะถูกกำหนดให้ค่าดังกล่าวของโหนดนั้นเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางนั้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโพรโทคอลแบบ MMBCR ยังคงใช้สมการเดิมคือ สมการที่ (2.5) ซึ่งทำให้เราสามารถมองภาพรวมของโพรโทคอลนี้ได้ว่า เส้นทางที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ต่ำที่สุดจากโหนดในแต่ละเส้นทางจะแสดงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงสุดของแต่ละเส้นทาง จากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพราะฉะนั้น

วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR จะรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ดีกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR

2.2.3.2 DSR-based Energy-aware Routing Protocols in Ad Hoc Networks

ในบทความอ้างอิง [13] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Request-Delay Routing Protocol (RDRP) มีการทำงานคือ โหนดระหว่างทางจะต้องทำการหยุดแพ็กเก็ตหรือขอเส้นทางดังกล่าวไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไป โดยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่นำมาใช้ในการหาเวลาที่จะหยุดแพ็กเก็ต ซึ่งในบทความนี้ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลา 3 ประเภทคือ linear แทนด้วย $d_1(e)$ convex แทนด้วย $(d_2(e))$ และ concave แทนด้วย $(d_3(e))$ ซึ่งทั้งสามแบบมีสมการดังนี้

$$d_1(e) = D - \frac{D \times e}{E} \quad (2.7)$$

$$d_2(e) = \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2 \times D}\right)^2 - e^2} - \frac{E^2 - D^2}{2 \times D} \quad (2.8)$$

$$d_3(e) = \frac{D^2 + E^2}{2 \times D} - \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2 \times D}\right)^2 - (e - E)^2} \quad (2.9)$$

เมื่อ D เป็นค่าประวิงเวลาสูงสุด (ในบทความนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1 วินาที)

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

e เป็นค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ณ ปัจจุบัน (จูล)

โดยในบทความได้ทำการทดลองการทำงานของฟังก์ชันทั้งสามแบบและสรุปว่าฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ช่วยยืดอายุการใช้งานได้ดีที่สุดคือแบบ Concave เนื่องจากสมการถึงแม้ว่าโหนดมีค่า e อยู่ในระดับที่ต่ำแต่การเปลี่ยนแปลงของ e เพียงเล็กน้อยฟังก์ชันที่ใช้ก็ยังสามารถแยกแยะความแตกต่างได้อย่างดี (เวลาที่ใช้ในการประวิงแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด) เมื่อเทียบกับฟังก์ชันในแบบ linear และ convex แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอล RDRP นี้ได้ใช้ฟังก์ชันที่แตกต่างจากเดิม แต่เป็นรูปแบบตามสมการที่ (2.10)

$$d_i = \frac{D \times E}{e + E} \quad (2.10)$$

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

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

ในบทความอ้างอิง [14] กล่าวว่า การเลือกเส้นทางจากการพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ของโหนดจะให้ผลในทางที่ไม่ดี เพราะถ้าโหนดเต็มใจที่จะรับทุก ๆ การร้องขอเพียงเพราะว่ามีระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูง ก็จะทำให้ปริมาณไหลลดจำนวนมากจะไหลเข้ามาที่โหนดนี้ทำให้โหนดใช้พลังงานหมดเร็วกว่าที่กำหนดไว้ ในบทความนี้จึงนำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Drain Rate (MDR) โดยเสนอตัววัดใหม่ที่แสดงอัตราการใช้พลังงาน (Drain Rate) ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาถึงคุณลักษณะของกราฟฟิคไหลลด ณ ขณะเวลานั้นของโหนด ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราการใช้พลังงาน (DR_i) ของโหนด i ได้จากสมการที่ (2.11)

$$DR_i = \frac{RE_t - RE_{t+1}}{T} \quad (2.11)$$

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 (2.12)

$$DR_i = \alpha \times DR_{old} + (1 - \alpha) \times DR_{sample}, \alpha = 0.3 \quad (2.12)$$

ในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของโหนดซึ่งแสดงด้วยค่าอายุการใช้ของโหนดจะสามารถหาได้สมการที่ (2.13) จากสมการ (C_i) แสดงค่าต้นทุนพลังงานของโหนด i ณ เวลาใด ซึ่งสามารถอธิบายความหมายในทางกายภาพได้ว่าเป็นเวลานานเท่าไรที่โหนด i จะสามารถทำงานในเส้นทางนี้ได้

ภายใต้คุณลักษณะของกราฟฟิกและระดับความจุแบริเตอร์ของโนด ณ ขณะเวลานั้น หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าเป็นอายุการใช้งานที่เหลือของโนด i

$$C_i = \frac{RE_i}{DR_i} \quad (2.13)$$

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

ถึงแม้ว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงความจุแบริเตอร์จะสามารถทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นและสมรรถนะก็สูงขึ้น แต่ในบางครั้งเส้นทางที่ถูกเลือกใช้สำหรับการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้น อาจจะมีการใช้พลังงานในการส่งแพ็กเก็ตที่สูง ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบริเตอร์ไม่ได้ยืนยันว่าเส้นทางที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในข้างต้น เพราะฉะนั้นการออกแบบโพรโทคอลการจับเส้นทางควรจะต้องถ่วงดุล (Tradeoff) ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารตลอดทั้งเส้นทางกับระดับความจุแบริเตอร์ของโนดในเส้นทาง เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเสนอกระบวนการจัดหาเส้นทางของโนดที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแบริเตอร์เพื่อให้ได้เส้นทางประกอบไปด้วยโนดที่มีความจุของแบริเตอร์อยู่ในระดับที่สูงเพียงพอต่อการสื่อสารและเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานในระดับต่ำและมีประสิทธิภาพ หรือกล่าวได้ว่าเป็นการนำเงื่อนไขทั้งสองประการมาทำการพิจารณาพร้อมกันซึ่งเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ทำให้โนดสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้นเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมมีหลักการทำงานพร้อมทั้งผลงานวิจัยที่เคยมีผู้คิดค้นมาดังหัวข้อต่อไป

2.2.4 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมเป็นการนำเอาข้อดีของการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ Energy-Aware routing protocols และ Battery-Aware Routing protocols มาพิจารณาพร้อมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายทั้งในด้านการใช้พลังงานและอายุการใช้งานให้ดีขึ้น โดยมองว่าการยืดอายุของโครงข่ายให้ได้สูงสุดนั้นการพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งไม่เพียงพอที่จะยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ปัจจัยทั้งสองเข้ามาพิจารณาพร้อมกันจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานให้มากขึ้นได้ ซึ่งปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนก็จะพิจารณาจากทั้งสองแบบดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งตัวอย่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมมีดังนี้

2.2.4.1 Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR)

ในบทความอ้างอิง [15] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR โดยมีเป้าหมายเพื่อต้องการบรรลุเป้าหมายทั้ง การใช้พลังงานต่ำที่สุดและการรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ของโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุดพร้อมกัน ซึ่งเป็นความพยายามที่จะรวมวิธีการทั้งแบบ Energy-Aware และ Battery-Aware เข้าด้วยกัน การจะทำให้การทำงานทั้งสองแบบสามารถใช้งานพร้อมกันได้นั้นผู้เสนอได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจว่า ณ เวลาใดควรจะใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบใด ซึ่ง C. K. Toh ได้ให้ความเห็นว่า ในกรณีที่โหนดในโครงข่ายมีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูงนั้นโครงข่ายควรที่จะใช้พลังงานอย่างประหยัดมากกว่าการรักษาสมดุลของการใช้พลังงาน ในทางกลับกัน กรณีที่ค่าระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่ายส่วนมากมีระดับที่ต่ำโครงข่ายควรจะใช้พลังงานอย่างสมดุมากกว่าการประหยัดพลังงาน โดยจากข้อสมมุติดังกล่าวสามารถอธิบายกระบวนการทำงานและการพิจารณาเส้นทางได้ดังนี้

ในโพรโทคอลได้กำหนดให้เส้นทางทุก ๆ เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางจะต้องคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ แต่จะใช้ค่าที่ได้จากโหนดที่ให้ค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่ต่ำที่สุดในเส้นทางซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14)

$$R_j^t = \min_{i \in \text{route } j} c_i^t \quad (2.14)$$

จากนั้นเมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกแล้วโหนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเก็ตการร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่มีเส้นทางร่วมกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อหมดระยะเวลาที่กำหนดไว้โหนดจะทำการตรวจสอบจากเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Q) มีเซตของเส้นทางใดบ้างที่ตรงกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.15) ซึ่งแสดงด้วยเซต A

$$R_j \geq \gamma, \forall j \in A \quad (2.15)$$

โดย γ เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 (หรืออาจจะกำหนดค่าให้เป็นร้อยละของระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นของโหนดในโครงข่าย โดยค่าระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นเท่ากับ 100) จากขั้นตอนข้างต้นเปรียบเสมือนกับการพิจารณาว่าขณะนี้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่ายส่วนมากเป็นอย่างไร ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการตัดสินใจว่าจะใช้วิธีการแบบใดในการเลือกเส้นทาง โดยดูจากจากสภาพของโครงข่าย ณ ขณะนี้ โดยการเลือกจะใช้พิจารณาได้ดังนี้

- กรณีที่ $A \cap Q \neq \emptyset$ แสดงว่ามีบางเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโหนดในโครงข่ายยังมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงอยู่ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MTPR ในการเลือกเส้นทางจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต A
- กรณีที่ $A \cap Q = \emptyset$ แสดงว่ามีไม่มีเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งได้สะท้อนให้เห็นว่าโหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลือน้อยอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่รักษาสมดุลของการใช้พลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานของโหนด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MMBCR ในการเลือกเส้นทางที่ดีจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต Q

ในกรณีที่เรากำหนดค่า $\gamma=0$ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR ก็จะกลายเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และถ้ากำหนดให้ $\gamma=100$ ก็จะทำให้ผลลัพธ์เหมือนกับกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ดังนั้นสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นหลัก

2.2.4.2 Conditional Minimum Drain Rate (CMDR)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ถูกเสนอขึ้นในบทความ [14] เช่นเดียวกับ โพรโทคอล MDR ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3.3 เนื่องจากโพรโทคอลแบบ MDR ไม่ได้ยืนยันว่าเส้นทางที่ใช้งานนั้นเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำสุดเหมือนกับกรณีของ MMBCR โดย D. Kim ได้เขียนแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง CMMBCR แต่ข้อแตกต่างระหว่างทั้งสองคือ ในโพรโทคอล CMDR ได้ใช้ค่าอายุการใช้งานของโนด (C_i ในสมการที่ (2.13)) เป็นตัวกำหนดว่าควรที่จะเลือกให้โพรโทคอลแบบใดในการทำงานแทนการใช้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด (R'_i ในสมการที่ (2.14)) ถ้ามีค่าอายุการใช้งานของโนดที่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (δ) จากเซตของเส้นทางเป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงได้จาก $C_i = \frac{RBP_i}{DR_i} > \delta$ โพรโทคอลนี้จะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR แต่ถ้าไม่เส้นทางใดที่ตรงตามเงื่อนไขจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดก็จะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MDR อย่างไรก็ตามสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ก็ยังขึ้นอยู่กับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่นำมาพิจารณาเหมือนกับ CMMBCR

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบพิจารณาถึงพลังงานและแบบผสม โดยพลังงานที่นำมาพิจารณาจะเป็นพลังงานที่สูญเสียในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งต่อไปจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง

2.2.4.3 Cost-effective Maximum Lifetime Routing Protocol for Wireless Sensor Network

ในบทความ [16] ได้นำเสนอการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยมีชื่อว่า Cost-effective Maximum Lifetime Routing (CMLR) เพื่อยืดอายุการใช้งานของโนดให้นานยิ่งขึ้น โดยพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ของแต่ละโนดในแต่ละเส้นทางและอายุการใช้งานที่เหลือของแต่ละเส้นทางหรือพิจารณาถึงแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในแต่ละเส้นทาง โดยเส้นทางที่ถูกเลือกใช้จะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานตลอดทั้งเส้นทางที่ต่ำและค่าแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในเส้นทางมีค่ามากพอที่จะใช้งาน ซึ่งจากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงอายุการใช้งานของโนดและทั้งโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งสามารถลดค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต และเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตก็ลดลงเมื่อเทียบกับโพรโทคอล Power aware routing (PAR)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบพิจารณาถึงพลังงานและแบบผสม โดยในแบบผสมนั้น ได้ทำการประยุกต์และปรับเปลี่ยนใช้โพรโทคอล CMLP ซึ่งพลังงานที่นำมาพิจารณาจะเป็นพลังงานที่สูญเสียในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งต่อไปจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง

2.3 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC)

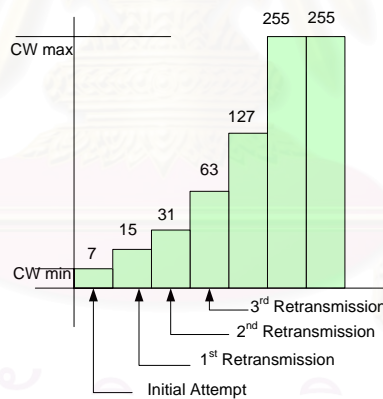
การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางตามมาตรฐาน IEEE 802.11 [17] ได้แบ่งโมดการทำงานเป็น 2 โมด คือ โมดDCF (Distributed Coordinate Function) เป็นวิธีการเข้าถึงตัวกลางแบบไม่ใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดย DCF จะใช้โพรโทคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access) ร่วมกับ binary exponential back-off เพื่อเป็นการลดการชนกันของข้อมูล และอีกโมดคือ โมด PCF (Point Coordinate Function) เป็นการเข้าถึงตัวกลางแบบนี้เป็นการใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึง ซึ่งเหมาะสำหรับการส่งข้อมูลแบบ real time โดยต่อไปจะอธิบายหลักการทำงานของทั้งสองโมด

การเข้าถึงตัวกลางแบบ PCF เป็นโมดที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายในโครงข่ายสามารถต่อกับโครงข่ายอื่นได้ โดยการเข้าถึงตัวกลางแบบนี้จะใช้ศูนย์กลางหรือจุดเข้าถึงในการรับส่งข้อมูล ในโมด PCF นี้โครงข่ายประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ สถานีผู้ใช้ (Client Station) ซึ่งก็คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (Desktop) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (Notebook) หรือเครื่องช่วยงานส่วนบุคคลแบบดิจิทัล (PDA) และสถานีแม่ข่ายหรือจุดเข้าถึง ซึ่งทำหน้าที่ต่อสถานีผู้ใช้เข้ากับโครงข่ายอื่น โดยสถานีผู้ใช้จะสามารถรับส่งข้อมูลโดยตรงกับสถานีแม่ข่ายที่ให้บริการแก่สถานีใช้นั้นอยู่นั้น ส่วนสถานีแม่ข่ายจะทำหน้าที่ส่งต่อ (Forward) ข้อมูลที่ได้รับจากสถานีผู้ใช้ไปยังจุดหมายปลายทางหรือส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากโครงข่ายอื่นมายังสถานีผู้ใช้ โดย BSS (Basic Service Set) หมายถึงบริเวณของโครงข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่มีสถานีแม่ข่าย 1 สถานี ซึ่งสถานีผู้ใช้ภายในขอบเขตของ BSS นี้ทุกสถานีจะต้องสื่อสารข้อมูลผ่านสถานีแม่ข่ายดังกล่าวเท่านั้น และ ESS (Extended Service Set) หมายถึงบริเวณของโครงข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่ประกอบด้วย BSS มากกว่า 1 BSS ซึ่งได้รับการต่อเข้าด้วยกัน สถานีผู้ใช้สามารถเคลื่อนย้ายจากพื้นที่บริการของ BSS หนึ่งไปอยู่ในอีก BSS หนึ่งได้ โดย BSS เหล่านี้จะทำการใช้งานข้ามเขต (Roaming) หรือติดต่อสื่อสารกันเพื่อโอนย้ายการให้บริการสำหรับสถานีผู้ใช้อย่างกล่าว

ในกรณีของโหมด DCF จะใช้กับโครงข่ายที่ไม่ใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง เป็นโครงข่ายที่ไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มีการต่อกับโครงข่ายอื่น บริเวณของโครงข่าย IEEE 802.11 WLAN ในโหมดนี้จะถูกเรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) ซึ่งสถานีผู้ใช้หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีผู้ใช้อื่น ๆ ในเขต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่าย แต่สถานีผู้ใช้จะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับโครงข่ายอื่น ๆ ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า แต่ละสถานีผู้ใช้จะรับส่งข้อมูลได้ภายในระยะเวลาการส่งข้อมูลเท่านั้น ซึ่งกลไกการเข้าถึงตัวกลางในโหมด DCF จะกล่าวอีกครั้งในหัวข้อถัดไป

2.3.1 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐาน

การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้แบ่งโหมดการทำงานเป็น 2 โหมด ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งโครงข่ายที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นโครงข่ายแอดฮอค ดังนั้นจะพิจารณาการทำงานในโหมด DCF เท่านั้น โหมด DCF ใช้โพรโทคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ร่วมกับ Binary exponential backoff เพื่อลดโอกาสในการเกิดการชนกันของข้อมูล



รูปที่ 2.4 การเพิ่มแบบ Exponential ของ contention window (CW)

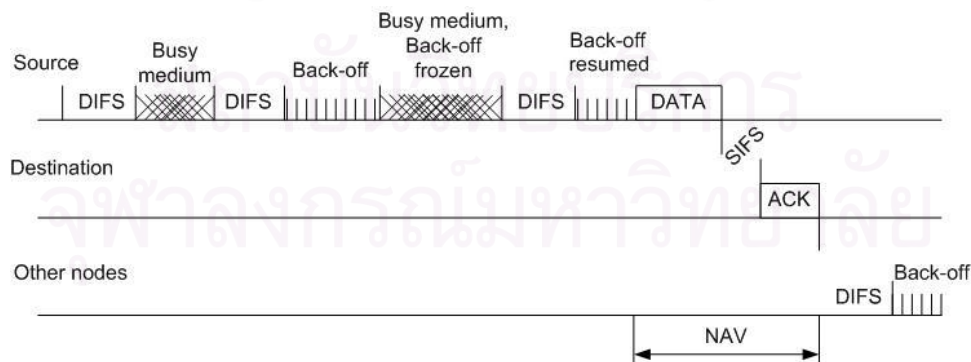
วิธีการทำงานของ binary exponential back-off นั้น จะทำงานเมื่อสถานีที่มีเฟรมข้อมูลที่จะส่ง จะทำการตรวจดูช่องสัญญาณจนกระทั่งช่องสัญญาณว่างซึ่งช่วงเวลานี้มีค่าเท่ากับ DIFS (Distributed InterFrame Space) ซึ่งเรื่องช่วงเวลาในการรอนี้จะกล่าวถึงอีกครั้งในหัวข้อต่อไป หลังจากนั้นสถานีต้นทางจะรอเป็นระยะเวลาเท่ากับ random back-off interval หรือ binary exponential back-off จึงจะส่งข้อมูลได้ โดยค่า random back-off interval นี้จะมีค่าอยู่ในช่วง $[0, CW - 1]$ โดยที่ CW คือ back-off window size ณ เวลาปัจจุบัน ในการพยายามส่งข้อมูลครั้งแรกนี้

CW จะมีค่าเท่ากับ CW_{min} (Initial back-off window size) ถ้าการส่งข้อมูลล้มเหลวหรือเกิดการชนกันของแพ็กของข้อมูลขึ้น ค่า CW จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าเดิมจนมีค่าเท่ากับ CW_{max} (Maximum window size) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 หลังจากนั้นเมื่อสถานีปลายทางได้รับข้อมูลแล้วจะส่ง ACK (Acknowledgement frame) ในช่วงเวลา SIFS (Short InterFrame Space) ในขณะที่สถานีต้นทางจะคอย ACK จากสถานีปลายทาง ถ้าไม่ได้รับ ACK ภายในช่วงเวลา ACK timeout หรือตรวจพบว่ามีการเพิ่มข้อมูลอื่นส่งข้อมูลอยู่ด้วยก็จะกลับไปทำขั้นตอนการกำหนดค่า random back-off interval ใหม่ซึ่งค่า backoff นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16)

$$back - off \ time = rand(0, CW) \times slottime \quad (2.16)$$

โดยที่ CW คือ ขนาดความกว้างของหน้าต่างการช่วงชิง (Contention window size)
 $slottime$ คือ ผลรวมของเวลาที่ต้องใช้ในการตรวจวัดเฟรม เวลาการประวิงในการเดินทาง เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากเครื่องรับไปเป็นเครื่องส่ง และเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (MAC layer) เพื่อบอกสถานะของตัวกลาง ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ค่า slot time มีค่าเท่ากับ $20 \mu S$

ถ้ามีสถานีอื่นส่งข้อมูลในช่วงเวลา backoff นี้ การนับค่า backoff นี้จะหยุดและจะเริ่มนับอีกครั้งหนึ่งหลังจากช่องสัญญาณว่างเป็นช่วงเวลาเท่ากับ DIFS ดังรูปที่ 2.5 จากการใช้ Binary exponential back-off เพื่อลดโอกาสการเกิดการชนกันของข้อมูลแล้ว ก็ยังมีโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลอยู่ ปัญหานี้เกิดขึ้นได้อย่างไร และจะแก้ไขปัญหานี้อย่างไรจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

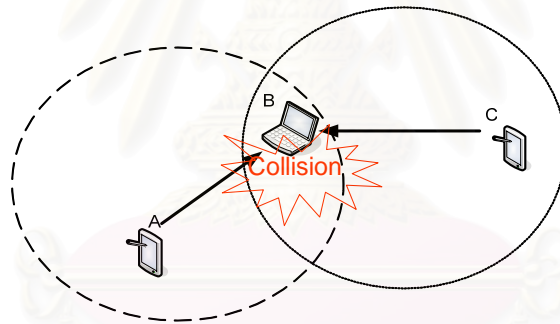


รูปที่ 2.5 กลไกของ IEEE 802.11

เนื่องจากการสื่อสารแบบแอดฮอก แต่ละโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ฉะนั้นปัญหาการชนกันของข้อมูล (Collision) จึงเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ถึงแม้มีการใช้โพรโทคอล CSMA/CA เพื่อช่วยในการจับจองช่องสัญญาณแล้วก็ตาม โดยปัญหาที่สำคัญที่ทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเก็ต คือปัญหาสถานะที่ซ่อนเร้นโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.2 ปัญหาสถานะที่ซ่อนเร้น

ปัญหาสถานะที่ซ่อนเร้น (Hidden terminal problem) เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดในโครงข่ายไร้สาย ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากที่โหนดในโครงข่ายมากกว่าหนึ่งโหนดส่งแพ็กเก็ตพร้อมกัน อันเนื่องมาจากมีโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลบางโหนดไม่ได้อยู่ในขอบเขตการส่งคลื่นสัญญาณของโหนดที่กำลังส่งสัญญาณออกมา แต่อยู่ในขอบเขตการส่งคลื่นสัญญาณของโหนดรับเดียวกัน และเมื่อส่งข้อมูลออกมาส่งผลกระทบหรือทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากรูปโหนด A กำลังส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนด B ในขณะเดียวกันโหนด C ตรวจสอบช่องสัญญาณพบว่าช่องสัญญาณว่างจึงส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนด B เช่นกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตที่โหนด B ขึ้น



รูปที่ 2.6 ปัญหาสถานะที่ซ่อนเร้น

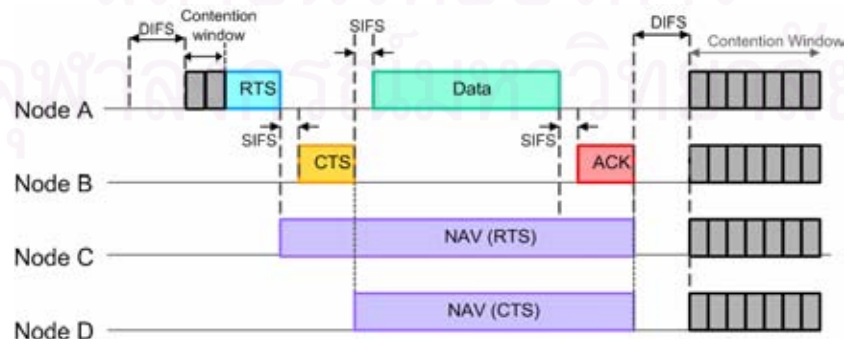
2.3.3 การแก้ไขปัญหาสถานะที่ซ่อนเร้น

การตรวจสอบการชนกันของข้อมูลสามารถทำได้โดยการใช้โพรโทคอล CSMA/CD ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบช่องสัญญาณอย่างมาก แต่เนื่องจากเทคนิค CSMA/CD ไม่สามารถนำมาใช้กับ WLAN ซึ่งใช้การสื่อสารแบบไร้สายได้ สาเหตุหลักๆ ก็คือการตรวจสอบการชนกันของสัญญาณในระหว่างที่ทำการส่งสัญญาณจะต้องใช้อุปกรณ์รับส่งคลื่นวิทยุที่เป็น Full Duplex (สามารถรับและส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันได้) ซึ่งจะมีราคาแพงกว่าอุปกรณ์รับส่งคลื่นวิทยุที่ไม่

สามารถรับและส่งสัญญาณในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้แต่ละสถานีใน BSS หรือ IBSS อาจไม่ได้ยินสัญญาณจากสถานีอื่นทุกสถานีได้

การหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการชนกันของสัญญาณนั้น [18] ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ใช้กลไกที่เรียกว่า Virtual Carrier Sense เพื่อแก้ไขปัญหาที่แต่ละโหนดใน BSS หรือ IBSS อาจไม่ได้ยินสัญญาณจากโหนดอื่นบางโหนด กลไกดังกล่าวมีการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.7

เมื่อโหนดที่ต้องการจะส่งข้อมูลได้รับสิทธิในการเข้าถึงตัวกลางแล้วจะส่งแพ็กเก็ตสั้นๆ ที่เรียกว่า RTS (Request To Send) เพื่อเป็นการจองช่องสัญญาณ ก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจริง ซึ่งแพ็กเก็ต RTS ประกอบไปด้วยระยะเวลาที่คาดว่าจะใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ (Duration ID) รวมถึงที่อยู่ของโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง เมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ต RTS ก็จะตอบรับกลับมาด้วยการส่งแพ็กเก็ต CTS (Clear To Send) ซึ่งจะบ่งบอกข้อมูลระยะเวลาที่คาดว่าโหนดต้นทางจะส่งข้อมูลนั้น จะใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ หลักการก็คือทุกๆโหนดใน BSS หรือ IBSS ควรจะได้รับแพ็กเก็ต RTS หรือไม่ก็ CTS อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง เมื่อได้รับ RTS หรือ CTS โหนดทุก ๆ โหนดจะทราบถึงว่าช่วงเวลาที่จะระบุไว้ใน Duration ID ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้ช่องสัญญาณจะถูกใช้และทุกโหนดที่ยังไม่ได้รับสิทธิในการเข้าถึงตัวกลางจะตั้งค่า NAV (Network Allocation Vector) ให้เท่ากับ Duration ID ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาที่ยังไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ หรือเพื่อเป็นการเตือนให้ทราบว่าช่องสื่อสารไม่ว่าง ซึ่งสัญญาณ NAV เป็นเพียงสัญญาณภายในแต่ละโหนดที่สมมติขึ้นมาเพื่อบอกให้โหนดนั้น ๆ หยุดการส่งสัญญาณในช่วงเวลานั้น ๆ ซึ่งไม่มีการส่งสัญญาณนั้นจริงในโครงข่าย โดยโหนดทุก ๆ โหนดจะใช้กลไก Virtual Carrier Sense ดังกล่าวผนวกกับการฟังสัญญาณในช่องสัญญาณจริงๆ ในการตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่ โหนดที่ส่งข้อมูลจะต้องรอรับ ACK (Acknowledgement) จากโหนดที่ส่งข้อมูลไปให้ หากไม่ได้รับ ACK กลับมาภายในเวลาที่กำหนดจะถือว่าเกิดการชนของแพ็กเก็ตขึ้นและต้องทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำต่อไป



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเข้าถึงช่องสัญญาณในมาตรฐาน IEEE802.11 DCF

2.3.4 Inter-Frame Spacing (IFS)

Inter-Frame Spacing คือ ช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลสองเฟรมใด ๆ โดยมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ คือ SIFS, PIFS, DIFS และ EIFS ซึ่งช่วงเวลาเหล่านี้ยังเป็นตัวระบุถึงระดับความสำคัญของการเข้าใช้ตัวกลาง โดยค่า IFS ที่น้อยกว่าจะมีระดับความสำคัญของการเข้าใช้ตัวกลางที่สูงกว่าเนื่องจากระยะเวลาที่รอคอยเพื่อที่จะเข้าใช้ตัวกลางมีค่าน้อยกว่านั่นเอง โดยรายละเอียดของช่วงเวลาดังกล่าวมีดังนี้

- Short inter-frame spacing (SIFS) เป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดใน IFS และมีระดับความสำคัญของการเข้าใช้ส่วนกลางสูงสุด ซึ่งถูกใช้กับข่าวสารควบคุมที่สั้นๆ เช่น การตอบรับสำหรับข้อมูล และการตอบสนองการสอบถามข้อมูล
- PCF Inter-Frame Spacing (PIFS) เป็นเวลาการคอยที่มีค่าอยู่ระหว่าง SIFS และ DIFS ซึ่งใช้กับบริการที่เป็นเวลาจริง ดังนั้นจึงเหมาะกับโพรโตคอลแบบ PCF
- DCF Inter-Frame Spacing (DIFS) ใช้กับสถานะซึ่งทำงานภายใต้โหมด DCF สำหรับการส่งแพ็กเก็ต
- Extended Inter-Frame Spacing (EIFS) เป็นช่วงเวลาที่ยาวที่สุดของ IFS และเป็น การเข้าใช้ส่วนกลางที่มีระดับความสำคัญต่ำสุด EIFS ใช้สำหรับการเข้าจังหวะใหม่ ในกรณีที่ชั้นสื่อสารกายภาพตรวจเจอการรับเฟรมของชั้น MAC เกิดความผิดพลาด

โดยตารางที่ 2.1 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ในมาตรฐานของ IEEE802.11 [18]

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน IEEE 802.11

Parameter	802.11 (FHSS)	802.11 (DSSS)	802.11 (IR)	802.11b	802.11a
t_{slot}	50 μ sec	20 μ sec	8 μ sec	20 μ sec	9 μ sec
SIFS	28 μ sec	10 μ sec	10 μ sec	10 μ sec	16 μ sec
PIFS	SIFS + t_{slot}				
DIFS	SIFS + (2 * t_{slot})				
Operating Frequency	2.4 GHz	2.4 GHz	850–950 nm	2.4 GHz	5 GHz

Maximum Data Rate	2 Mbps	2 Mbps	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
CW_{min}	15	31	63	31	15
CW_{max}	1023	1023	1023	1023	1023

จากการทำงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนี้ จะมีระดับของการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไป โดยมีงานวิจัยได้ทำนำเสนอและคิดค้นวิธีต่าง ๆ เพื่อจะลดการใช้พลังงานและพัฒนาสมรรถการการใช้พลังงานให้ครอบคลุมมากที่สุด โดยใน [6] จะเป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของ ATIM window (Ad-hoc Traffic Indication Message window) ใน PSM (Power Saving Mechanism) ของ IEEE802.11 DCF ซึ่งจากที่โนดจะอยู่ในสถานะทำงานหรือ active mode ในช่วง ATIM แต่จะเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะหลับ (Sleep mode) แทน เมื่อไม่มีข้อมูลที่จะส่งหรือรับ ซึ่งจะทำให้ลดการใช้พลังงานได้มากขึ้น

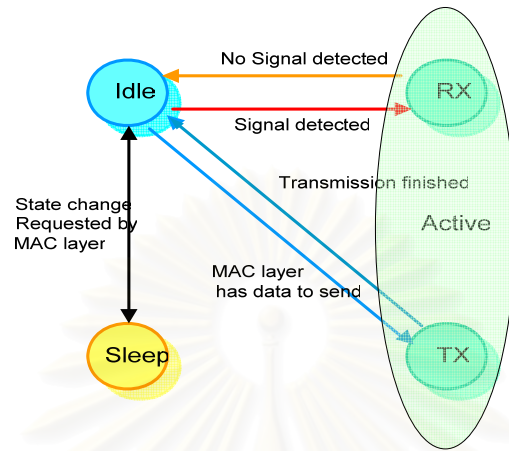
โดยต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงรูปแบบการใช้ของพลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งจะมีแบบจำลองการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไปดังนี้

2.4 แบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Energy Consumption Model of MAC)

โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางได้แบ่งการทำงานออกเป็น 4 โมด [1] ที่ใช้ในการจัดการสรรการใช้ตัวกลางของโนดแต่ละโนด คือ โมดทำงาน (Active mode) โมดสถานะว่าง (Idle mode) โมดสถานะหลับ (Sleep mode) และโมดสถานะปิด (Power-off mode) โดยพลังงานจะมีการถูกใช้ไปมากหรือน้อยนั้น ก็จะขึ้นอยู่กับกระบวนการป้องกันกันของข้อมูล ทั้งการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลออกมาในโมดการทำงานแบบโมดการส่ง (Transmit mode) การรับแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลในโมดการรับ (Receive mode) ซึ่งทั้งสองโมดจะรวมอยู่ในโมดทำงาน ส่วนโมดสถานะว่างจะเป็นสถานะที่โนดสามารถทำการส่งและรับข้อมูลได้ และโมดสถานะหลับ จะเป็นสถานะประหยัดพลังงานและใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งสถานะนี้จะไม่มีการรับและส่งข้อมูลจนกว่าจะถูกกระตุ้นขึ้นมา ก่อน สูดท้ายคือ โมดปิด จะเป็นสถานะที่ไม่มีตัวตน คือไม่มีการใช้พลังงานหรือพลังงานหมด ซึ่งก็จะปิดตัวไป

โดยแต่ละโมดก็จะมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในโมดสถานะปิดนั้น (Power-off mode) จะไม่มีการใช้พลังงานเลย จึงจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ แต่ในโมดอื่น ๆ นั้นจะมีการทำงานที่เชื่อมโยงกันดัง

แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการทำงานในแต่ละโมด โดยโมดว่างจะเป็นตัวกลางคอยเชื่อมโยงกับโมดอื่น ๆ



รูปที่ 2.8 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs

จากรูปที่ 2.8 อธิบายการทำงานในแต่ละโมดได้ดังนี้ เริ่มต้นที่โมดสถานะว่างซึ่งเป็นโมดที่เน็ตสามารถที่จะทำการรับหรือส่งข้อมูลก็ได้ เมื่อเน็ตมีข้อมูลจะส่ง เน็ตก็จะเปลี่ยนตัวเองจากสถานะว่างเป็นโมดการส่ง และเมื่อส่งข้อมูลดังกล่าวเสร็จก็จะกลับมาอยู่ในสถานะว่างเช่นเดิม แต่ถ้าขณะนั้นเน็ตไม่มีข้อมูลจะส่งไปยังเน็ตอื่นแต่ได้ยินหรือตรวจพบสัญญาณที่เน็ตอื่นส่งมา เน็ตก็จะเปลี่ยนสถานะตัวเองไปอยู่ในโมดการรับและจะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมภายหลังจากรับข้อมูลดังกล่าวเสร็จสิ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเน็ตหนึ่ง ๆ ไม่สามารถที่จะอยู่ในสถานะการทำงาน 2 โมดพร้อมกันในเวลาเดียวกันนั้นคือขณะที่เน็ตหนึ่ง ๆ ทำการส่งข้อมูลอยู่นั้นตัวมันเองก็ไม่สามารถที่จะทำการรับข้อมูลจากเน็ตอื่นได้ ส่วนโมดสภาวะหลับเป็นโมดที่เน็ตไม่สามารถจะทำการรับหรือส่งข้อมูลใด ๆ ได้จนกว่าจะมีสัญญาณจากชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมากระตุ้น เพราะฉะนั้นแล้วถ้าเราพิจารณาถึงกำลังที่จะต้องใช้ในแต่ละโมด แน่นอนว่าพลังงานที่จะต้องใช้นั้นย่อมจะแตกต่างกันออกไปแต่ก็พอที่จะคาดการณ์ได้ว่าพลังงานที่ใช้ในโมดการส่งจะต้องมากกว่าพลังงานที่ใช้ในโมดการรับ ส่วนพลังงานที่ใช้ในโมดสถานะการหลับน่าจะใช้น้อยที่สุด

นอกจากนั้นแล้วยังมีพลังงานที่จะต้องเสียในการเปลี่ยนแปลงสถานะ แต่พลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียในโมดอื่นและเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์หาแนวต่างในการลดการใช้พลังงาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะยกเว้นการพิจารณาพลังงานในส่วนนี้โดยกำหนดให้พลังงานที่เสียในการเปลี่ยนแปลงสถานะมีค่าเป็นศูนย์ โดยค่าต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับ

ออกแบบอุปกรณ์ของผู้ผลิตแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายแต่ละราย ซึ่งในตาราง 2.2 แสดงค่ากำลังงานที่ใช้ในแต่ละโหมดการทำงานของบางอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่ได้รับความนิยมของผู้ผลิตแต่ละราย โดยทุกตัวใช้มาตรฐานในการออกแบบการทำงานเดียวกันคือ ใช้มาตรฐาน IEEE802.11

ตารางที่ 2.2 กำลังที่ใช้ในแต่ละโหมดการทำงานของอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย

NICs	Transmit	Receive	Idle	Sleep	Mbps
Aironet PC4800 [19]	1.4 – 1.9 w	1.3 – 1.4 w	1.34 w	0.075 w	11
Lucent Bronze [11]	1.3 w	0.97 w	0.84 w	0.066 w	2
Lucent Silver [11]	1.3 w	0.90 w	0.74 w	0.048 w	11
Cabletron Roamabout [20]	1.4 w	1.00 w	0.83 w	0.130 w	2
Lucent WaveLAN [19]	1.82 w	1.80 w	0.18 w	-	2
ORINOCO 11b [21]	1.425 w	0.925 w	0.045 w	-	11

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เราสามารถคำนวณการใช้พลังงานในแต่ละโหมดการทำงานซึ่งได้ด้วยสมการที่ (2.17) ซึ่งพลังงานที่โนดใช้ในแต่ละครั้งนั้นขึ้นอยู่กับ กำลังที่ใช้ในแต่ละโหมดสถานะการทำงานและเวลาที่ใช้ในการทำงานในโหมดนั้น ๆ

$$E_s = P_s \times T_s \quad (2.17)$$

โดยที่ E_s พลังงานที่โนดจะต้องเสียเมื่อทำงานอยู่ในโหมดสถานะ s (จูล)

P_s เป็นค่ากำลังงานที่โนดจะต้องเสียเมื่อทำงานอยู่ในโหมดสถานะ s หน่วยเป็นวัตต์ (กำลังนี้สามารถคำนวณได้จากสูตร $P=V \times I$ หรือ กำลังที่สูญเสียเท่ากับผลคูณของความต่างศักย์ และ กระแส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าทั้งสองสามารถหาได้จากข้อมูลจำเพาะที่ผู้ผลิตให้มาพร้อมกับอุปกรณ์หรือบางครั้งอาจจะกำหนดค่ากำลังที่สูญเสียมาให้ อย่างเช่นที่แสดงในตารางที่ 2.2)

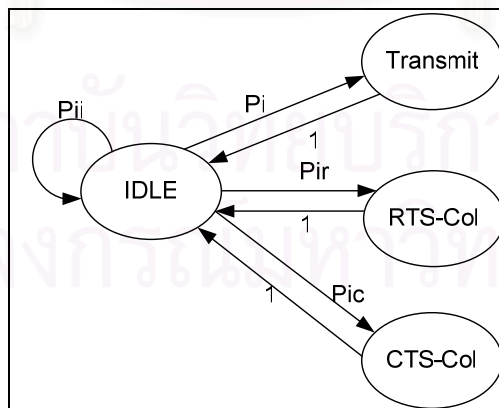
T_s เป็นเวลาที่ใช้ในการทำงาน ณ โมดสถานะ s มีหน่วยเป็นวินาที (เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแพ็กเก็ตที่ประมวลผลและอัตราการส่งแพ็กเก็ตของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถหาได้จาก $T = \text{Packet Size} / \text{Transmission Rate}$)

s เป็นโมดสถานะการทำงานทั้ง 4 โมดเช่น โมดการรับ โมดการส่ง โมดสถานะว่าง และโมดสถานะหลับ

มีนักวิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเพื่อให้ครอบคลุมถึงพลังงานที่ใช้จริง ทั้งแบบ [22] ที่จะพิจารณาพลังงานในรูปแบบของฮอปเดียว (Single Hop) แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาพลังงานที่ใช้การติดต่อสื่อสารแบบหลายฮอป (Multi-hop communication) ซึ่งตัวอย่างแบบจำลองการใช้พลังงานในรูปแบบหลายฮอปนั้น ก็ได้มีนักวิจัยได้คิดค้นแบบจำลองการใช้พลังงานออกมามากมาย ดังต่อไปนี้

2.4.1 Modeling and Energy-Efficient MAC Layer Protocol

บทความของ Gabriel [23] ได้นำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นการเข้าถึงตัวกลาง โดยพิจารณาถึงผลกระทบของปัญหาในดชนร่น จากในดข่างเคียงซึ่งทำให้การส่งแพ็กเก็ตเกิดการชนขึ้นได้ ซึ่งจะมีการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเก็ตไม่สำเร็จ เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณงานที่จะได้ รวมถึงค่าพลังงานที่ใช้ โดยแพ็กเก็ตที่จะมีโอกาสในการชนคือแพ็กเก็ต RTS และ CTS เท่านั้น จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของโนดในแบบของ [23]

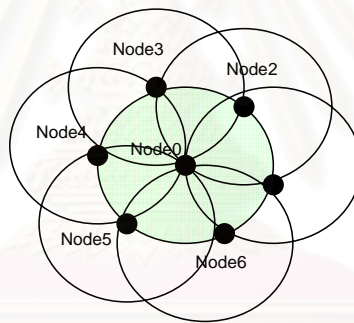


รูปที่ 2.9 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ การทำงานในช่องสื่อสาร

เนื่องจากแบบจำลองการใช้พลังงานในบทความดังกล่าวนั้นยังไม่คำนึงถึงผลกระทบจากพลังงานในการส่งของโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด (Interference range) ดังนั้นในบทความ [24] จึงได้นำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานที่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ของโหนดแทรกสอดที่มีผลกระทบต่อ ارسال แพ็กเก็ตของตัวส่งและตัวรับ

2.4.2 Model and Improvement in power control MAC Protocol for Ad-Hoc Network

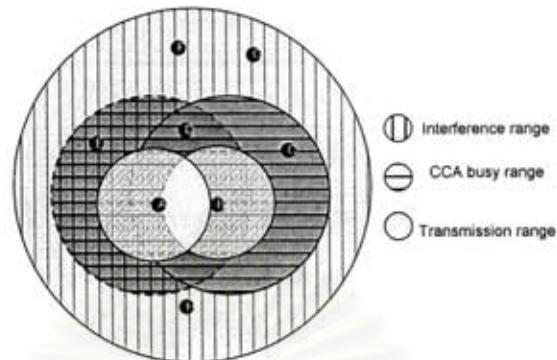
บทความ [24] นำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานที่ครอบคลุมการใช้พลังงานเนื่องจากผลกระทบของการใช้พลังงานของโหนดแทรกสอด โดยโอกาสการชนจะมีในทุกๆ แพ็กเก็ต รวมถึงแพ็กเก็ตข้อมูล ซึ่งจากรูปที่ 2.10 แสดงกลุ่มโหนดที่อยู่นอกขอบเขตการติดต่อสื่อสารหรือที่อยู่ในช่วงแทรกสอดที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในช่วงของการติดต่อสื่อสารของตัวส่งได้ เนื่องจากปัญหาดังกล่าว จึงต้องคิดปัญหาที่จะเกิดการชนกันของแพ็กเก็ตเนื่องจากโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอดด้วย ซึ่งทุกช่วงเวลาของการส่งจะมีโอกาสที่การชนกันของแพ็กเก็ตสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา



รูปที่ 2.10 กลุ่มโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด

รูปที่ 2.11 อธิบายให้เห็นถึงพื้นที่และขอบเขตของโหนดที่อยู่ในตำแหน่งที่จะมีผลกระทบกับการส่งแพ็กเก็ตของตัวส่ง โดยพื้นที่ของการติดต่อสื่อสาร (Transmission Range) โหนดที่อยู่ในช่วงดังกล่าว จะสามารถได้รับแพ็กเก็ตหรือสัญญาณต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน ส่วนในช่วงของพื้นที่ CCA (Clear Channel Assessment) โหนดจะได้รับสัญญาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อโหนดตัวส่งกำลังส่งแพ็กเก็ต แต่โหนดที่อยู่ในพื้นที่ CCA ก็จะมีการเปลี่ยนสถานะของตัวเองให้อยู่ในสถานะไม่ว่างหรือช่วง NAV เป็นระยะเวลาเท่ากับช่วงหยุด EIFS ซึ่งก็อาจจะเพียงพอต่อการไม่ไปรบกวนโหนดที่กำลังทำการส่งข้อมูลอยู่ และสุดท้ายโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด (Interference range) จะเป็นโหนดที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามารบกวนการส่งข้อมูลได้ เนื่องจากโหนดที่อยู่ในช่วงนี้จะไม่ได้รับสัญญาณหรือแพ็กเก็ตใดๆ

เนื่องจากสัญญาณที่ส่งไปไม่ถึง ทำให้โหนดอาจจะมีการส่งแพ็กเก็ตออกมาบริเวณโหนดที่กำลังส่งอยู่ก็เป็นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตได้



รูปที่ 2.11 พื้นที่และขอบเขตการติดต่อสื่อสาร CCA และพื้นที่แทรกสอด

ซึ่งจาก [24] ได้ทำการจำลองดูผลกระทบของโหนดแทรกสอดต่อปริมาณงาน พลังงานที่ใช้ และการประวิงเวลา ซึ่งผลที่ได้ ชี้ให้เห็นว่า ที่ปริมาณของโหนดแทรกสอดมาก ๆ ค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งขนาดความกว้างของ Contention Window และความหนาแน่นของโหนด จะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยที่ปริมาณงานจะมากที่สุดเมื่อมีการใช้พลังงานต่อเฟรมที่ต่ำที่สุดแต่การประวิงเวลาจะไม่ใช่ที่ต่ำที่สุด พลังงานที่ใช้ในการส่งมาก ๆ ไม่สามารถรับรองการประวิงเวลาที่ต่ำที่สุดได้ ซึ่งเมื่อให้ค่าระยะทางของการส่งเพิ่มขึ้นจนเกินระยะที่เหมาะสมที่สุดในการส่ง จะทำให้ปริมาณของโหนดแทรกสอดเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลทำให้ปริมาณงานลดลง เพราะโหนดจะมีการแข่งขันกันมากขึ้นและความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเก็ตแล้วสำเร็จก็จะน้อยลงด้วย เนื่องจากมีโหนดเพิ่มมากขึ้นทั้งในช่วงของการติดต่อสื่อสารของตัวส่งและโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด

แต่เนื่องจากในบทความที่น่าเสนอของทั้งแบบ [24] และ [23] กำหนดค่า CW หลังเกิดการชนกันของแพ็กเก็ตให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะคำนวณหาความน่าจะเป็นที่โหนดจะสามารถส่งแพ็กเก็ตได้ดังสมการที่ (2.18)

$$p = \frac{2}{(W+1)} \quad (2.18)$$

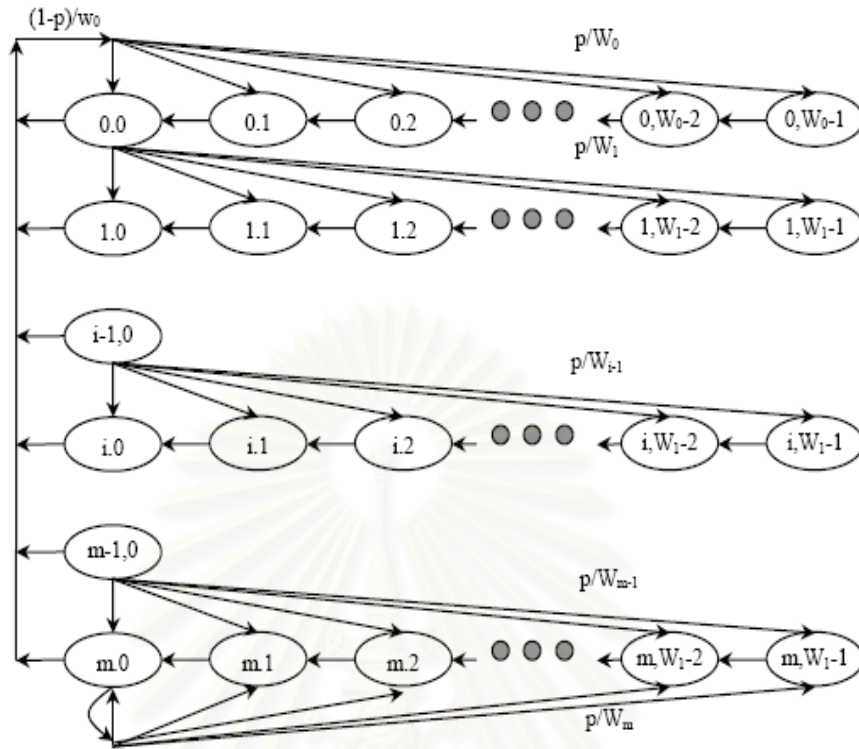
ซึ่งในความเป็นจริง เมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเก็ต ค่า CW จะขยายเป็นสองเท่าจนกว่าจะถึงค่าสูงสุด ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนความน่าจะเป็นในการส่ง โดยให้สอดคล้องกับหลักการทํางานในมาตรฐาน IEEE802.11 อีกทั้งในบทความของ [24] แบบจำลองการใช้พลังงาน พิจารณาเฉพาะคูปอนที่ส่งและรับแพ็กเก็ตเท่านั้น แต่ไม่คำนึงถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียจากการได้ยินแพ็กเก็ตของโนดข้างเคียง (Overhearing packet) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดยพิจารณาถึงผลกระทบของระดับพลังงานที่โนดแทรกสอดใช้ ที่จะส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเก็ต ผลกระทบของค่า CW เมื่อเกิดการชนของแพ็กเก็ต และพลังงานที่โนดในเส้นทางต้องเสียเนื่องจากการได้ยินแพ็กเก็ตซึ่งจะรวมถึงพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการละทิ้งแพ็กเก็ต (Discard packet) โดยรายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อต่อไป

ในการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเก็ตของแต่ละโนดรวมทั้งความน่าจะเป็นของการเกิดการชนกัน วิธีการส่วนใหญ่ได้นำผลงานวิจัยของ [25] มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในบทความได้วิเคราะห์การทํางานของเครือข่ายแอดฮอกตามมาตรฐานของ IEEE802.11 ด้วยแบบจำลองลูกโซ่ของ Markov ซึ่งสามารถนำมาเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าปริมาณงาน พลังงานและหาขนาดของ CW ที่เหมาะสมได้ งานวิจัยดังกล่าวใช้แบบจำลองลูกโซ่ของ Markov ในการอธิบายการทํางาน

ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นที่ใช้ทำการวิจัยซึ่งจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการใช้สื่อแบบกระจายและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์มาจาก Markov' chain model

2.4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้วยแบบจำลอง Markov' chain model [25]

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของสถานีหนึ่งด้วยแบบจำลอง Markov' chain จะได้ความน่าจะเป็นที่โนดจะมีการส่งแพ็กเก็ต ซึ่งไม่ขึ้นต่อวิธีในการเข้าใช้สื่อ เช่น วิธี RTS/CTS หรือแบบพื้นฐาน (Basic) ดังนั้นการศึกษาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นกับช่วงเวลาใดๆ จะสามารถหาค่าปริมาณงานของการเข้าถึงได้ เมื่อพิจารณาจำนวนสถานีที่เข้าแย่งใช้สื่อเท่ากับ n โหนด ในสภาวะที่โนดมีข้อมูลพร้อมในการส่งเมื่อช่องสัญญาณว่าง เมื่อค่าตัวนับของการ back-off ของแต่ละโนดขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการชนกันของข้อมูล โดยในการทํางานของกระบวนการ random back-off แสดงได้ด้วยแบบจำลองลูกโซ่ของ Markov ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองลูกโซ่ของ Markov การทำงานของการ random back-off

ให้ $b(t)$ คือกระบวนการสุ่มเป็นตัวแทนของตัวนับ back-off ของแต่ละสถานีที่เวลา t ซึ่งเป็นเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (time slot ในมาตรฐาน 802.11) $b(t)$ และ $b(t+1)$ คือช่วงเวลาแบบไม่ต่อเนื่องที่อยู่ติดกัน เนื่องจากการทำงานแบบ DCF เป็นการควบคุมการใช้สื่อแบบกระจาย ดังนั้นเวลา t ของแต่ละสถานีจึงไม่ใช่เวลาของระบบ ให้ $s(t)$ คือกระบวนการสุ่มซึ่งแทนถึงเสตจ (stage) ของการชนกัน $(0, \dots, m)$ ที่เวลา t สมมติว่าแต่ละสถานีพร้อมจะส่งข้อมูลตลอดเวลาและจะเริ่มทำงานตัวนับทันทีที่ตรวจพบว่าช่องสัญญาณว่างเป็นเวลาเท่ากับช่องว่างระหว่างเฟรมที่กำหนด และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลคือ p โดยสมมติว่าเป็นค่าคงที่และไม่ขึ้นกับเสตจของการ back-off ซึ่งสมมติฐานนี้จะมีผลถูกต้องสูงเมื่อ CW และ n มีค่ามาก เนื่องจากการตั้งสมมติฐานค่า p เป็นค่าอิสระจึงสามารถแสดงแบบจำลองลูกโซ่ของ Markov นี้จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในสองมิติคือ $s(t)$ และ $b(t)$ $\{s(t), b(t)\}$ จากแบบจำลองลูกโซ่ Markov นี้จะแสดงถึงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} P\{i, k | i, k+1\} &= 1 & k \in (0, W_i - 2) & \quad i \in (0, m) \\ P\{0, k | i, 0\} &= (1-p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) & \quad i \in (0, m) \\ P\{i, k | i-1, 0\} &= p/W_i & k \in (0, W_i - 1) & \quad i \in (1, m) \\ P\{m, k | m, 0\} &= p/W_m & k \in (0, W_m - 1) & \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

$$P\{i_1, k_1 | i_0, k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\} \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.19) สมการแรกแสดงถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงเสมอเมื่ออยู่ใน time slot ที่ $k+1$ ในเสตจที่ i เมื่อเวลาผ่านไปมาเป็น time slot ที่ k มีความน่าจะเป็นเท่ากับ 1 สมการที่สองคือความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จในเสตจที่ i และกลับมาเริ่มส่งช่วงเวลาใหม่ในเสตจที่ศูนย์อยู่ในช่วง $(0, \dots, W_0 - 1)$ สมการที่สามคือความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลในเสตจที่ $i-1$ และเกิดการชนกันจึงส่ง time slot ในเสตจที่ i สมการที่สี่ แสดงถึงความน่าจะเป็นที่เกิดการชนกันของข้อมูลในเสตจที่ m และส่ง time slot ในเสตจที่ m ให้ $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1)$ คือการกระจายตัวของสายโซ่ Markov ซึ่งจะนำมาหาคำตอบของสมการในภายหลัง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า $s(t)$ โดยให้ค่า $b(t) = 0$ เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ดังนี้

$$b_{i-1,0} \cdot p = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0 < i < m \quad (2.21)$$

$$b_{m-1,0} \cdot p = (1-p)b_{m,0} \rightarrow b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0} \quad (2.22)$$

สมการที่ (2.21) หมายถึงเหตุการณ์ที่เกิดการชนกันของข้อมูลที่เสตจ $i-1$ จึงเกิดเสตจที่ i สมการที่ (2.22) คือความน่าจะเป็นที่เกิดการชนกันที่เสตจ $m-1$ จึงเกิดเสตจที่ m ลบด้วยความน่าจะเป็นของการชนกันของข้อมูลในเสตจที่ m เนื่องจากการชนกันในเสตจที่ m ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเสตจ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ $b(t)$ ซึ่งจะแทนด้วยค่า k จะได้สมการดังนี้

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1-p) \sum_{j=0}^m b_{j,0} & i = 0 \\ p \cdot b_{i-1,0} & 0 < i < m \\ p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0}) & i = m \end{cases} \quad (2.23)$$

ถ้าส่งข้อมูลโดยไม่เกิดการชนกันในเสตจใดก็ตามจะกลับมาแย่งใช้สื่อในเสตจศูนย์ใหม่ทุกครั้ง ดังนั้น

$$(1-p) \cdot \sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0} \quad (2.24)$$

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad i \in (0, m), \quad k \in (0, W_i - 1) \quad (2.25)$$

ต่อไปนี้เป็นกรหาค่า $b_{0,0}$ โดยการแทน

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} = \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1-p} \right) + \frac{1}{1-p} \right] \quad (2.26)$$

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (2.27)$$

แต่ละสถานีจะได้ส่งข้อมูลเมื่อตัวนับเวลานับลงถึงศูนย์โดยไม่คำนึงถึงเสตจดังนั้นความน่าจะเป็นที่แต่ละสถานีจะได้ส่งข้อมูลคือ τ

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (2.28)$$

ความน่าจะเป็น τ ยังติดตัวแปรความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของข้อมูล p ซึ่งความน่าจะเป็น p ไม่สามารถหาได้โดยตรง แต่สามารถเขียนสมการของความน่าจะเป็น p ได้จากอยู่ในรูปช่วงเวลา ระหว่างเฟรมและช่วงเวลาการแข่งขันแย่งใช้สื่อของการส่งข้อมูลในเวลาจริงจะต้องไม่เกิน DIFS ดังนั้น การแย่งใช้สื่อของข้อมูลในเวลาจริงจะต้องใช้เวลาไม่เกิน DIFS-PIFS ความน่าจะเป็น p สามารถเขียนในฟังก์ชันของ τ ได้ดังนี้

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (2.29)$$

ให้ P_r คือความน่าจะเป็นที่ใน time slot ถัดไปมีอย่างน้อยหนึ่งสถานีได้ส่งข้อมูลคือ

$$P_r = 1 - (1-\tau)^n \quad (2.30)$$

ให้ P_s คือความน่าจะเป็นที่การส่งข้อมูลสำเร็จ ดังนั้นความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลได้สำเร็จคือมีอย่างน้อยหนึ่งสถานีที่ได้ส่งข้อมูลและส่งข้อมูลได้สำเร็จ

$$P_s P_r = n\tau(1-\tau)^{n-1} \quad (2.31)$$

หาค่าปริมาณงานของระบบคือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยต่อเวลาที่ใช้ทั้งหมดคือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลและเฮดเดอร์รวมกับเวลาที่เสียไปโดยเฉลี่ยเนื่องจากการชนกันของข้อมูลกับเวลาของ time slot ที่ว่างโดยเฉลี่ยได้สมการดังนี้

$$T = \frac{P_s P_r [\text{payload}]}{P_s P_r T_s + P_r (1 - P_s) T_c + (1 - P_r) \sigma} \quad (2.32)$$

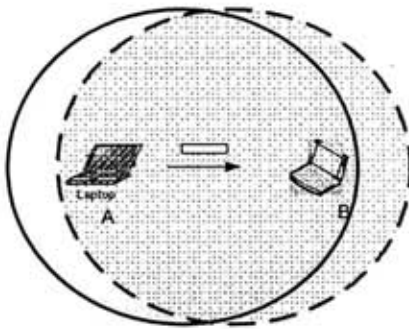
ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการหาความน่าจะเป็นที่จะมีการส่งแพ็กเก็ตในสมการที่ (2.28) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนในสมการที่ (2.29) มาคำนวณเพื่อหาแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดยต่อไปจะอธิบายถึงหลักการทำงานของวิทยานิพนธ์ที่จะนำเสนอ

2.5 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

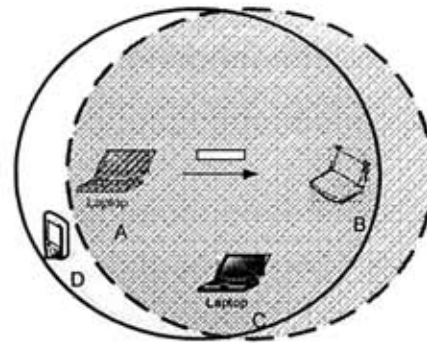
แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ในดทุกโนดในโครงข่ายมีกำลังส่งคงที่และเท่ากันทั้งหมด ซึ่งทำให้ระยะเวลาการส่งของแต่ละโนดก็คงที่และเท่ากันด้วยเช่นกัน ดังนั้นพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียในการส่งก็จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตเท่านั้น อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงแบ่งโมดการทำงานออกเป็น 4 โมดเหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.8 แต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของโมดการรับซึ่งจะอธิบายอีกทีในย่อหน้าถัดไป นอกจากนี้การจะพิจารณาว่าโนดทำงานอยู่ในโมดใดนั้นจะพิจารณาจากลักษณะทราฟฟิกที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกัน ณ ขณะนั้น ลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายแบบแอดฮอคสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ทราฟฟิกแบบแพร่กระจาย (Broadcast Traffic) ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point to Point Traffic or Unicast) และสุดท้ายเป็นทราฟฟิกแบบได้ยิน (Overhearing Traffic) [26]

- ทราฟฟิกแบบแพร่กระจาย (Broadcast Traffic)

เมื่อโนดตัวส่งทำการส่งแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายออกไป โหนดที่อยู่ในระยะการส่งทุกโนดจะต้องทำการรับแพ็กเก็ตดังกล่าวเพื่อนำไปประมวล เนื่องจากแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายเป็นแพ็กเก็ตที่ไม่ได้ระบุถึงที่อยู่ของผู้รับเอาไว้ ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนโมดการทำงาน ก็จะเป็นอะไรที่ตรงไปตรงมาคือ โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ตก็ต้องเปลี่ยนตัวเองจากที่อยู่ในโมดสถานะว่างไปเป็นโมดการส่งเมื่อมีแพ็กเก็ตที่จะต้องส่ง ส่วนโนดทุกโนดที่อยู่ในระยะการส่งก็ต้องเปลี่ยนสถานะมาทำงานในโมดการรับ



(ก) ทราฟฟิกแบบ Unicast



(ข) ทราฟฟิกแบบ Overhear

รูปที่ 2.13 การติดต่อสื่อสารโดยใช้ทราฟฟิกแบบต่าง ๆ

- ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point to Point Traffic or Unicast)

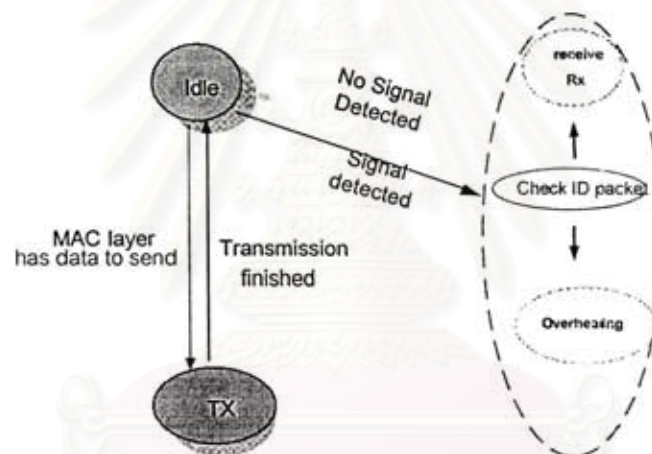
การติดต่อสื่อสารที่ใช้ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุดหรือ Unicast นั้นภายในส่วนหัวของแพ็กเก็ตได้กำหนดที่อยู่ของผู้ที่รับแพ็กเก็ตนี้ไว้อย่างชัดเจน ถ้าพิจารณาการสื่อสารในรูปที่ 2.13 (ก) เมื่อโนด A ทำการส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast โดยระบุว่าส่งไปหาโนด B โนด A ก็จะเปลี่ยนมาทำงานในโหมดการส่งและภายหลังจากที่โนด B ตรวจจับสัญญาณจากการส่งแพ็กเก็ตของโนด A โนด B ก็จะทำการตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตเป็นแบบแพร่กระจายหรือแบบ Unicast ถ้าเป็นแบบแพร่กระจายก็จะดำเนินการเหมือนที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ถ้าเป็นกรณีหลังโนด B ก็จะต้องทำการตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตดังกล่าวนั้นส่งมาหาตัวเองหรือไม่ ซึ่งในกรณีนี้คือส่งมาหาโนด B ดังนั้นโนด B ก็จะอยู่ในโหมดการรับเพื่อรับแพ็กเก็ตนั้นไปประมวลผลอย่างอื่นต่อไป

- ทราฟฟิกแบบได้ยิน (Overhearing Traffic)

ในกรณีการสื่อสารด้วยทราฟฟิกแบบ Unicast ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะกำหนดให้การสื่อสารมีเฉพาะโนดที่ส่งและโนดที่รับข้อมูลอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.13 (ก) แต่มีหลายกรณีที่มีโนดอื่น ๆ อยู่ในระยะเวลาการส่งของโนดที่กำลังส่งหรือรับแพ็กเก็ตที่มีการสื่อสารแบบ Unicast ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.13 (ข) จากรูปเมื่อโนด A ทำการส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast ไปยังโนด B โดยในระยะเวลาการส่งของโนด A ครอบคลุมโนด C และ D อยู่ เพราะฉะนั้นเมื่อโนด C และ D ตรวจพบสัญญาณที่โนด A ส่งแพ็กเก็ตไปหาโนด B โนดทั้งสองจะต้องนำแพ็กเก็ตที่ตรวจจับได้ไปทำการทดสอบว่าเป็นแพ็กเก็ตที่ส่งมาหาตัวเองหรือไม่ ซึ่งในกรณีไม่ใช่แพ็กเก็ตที่ส่งมายังโนดทั้งสอง เพราะฉะนั้นโนดทั้งสองจะต้องทำการลบ

แพ็กเก็ตที่ไต่ยีนนี้ทั้ง ซึ่งเราจะเรียกโหนด C และ D ว่าเป็นโหนดที่ไต่ยีน (Overhearing node) และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็นิยามแพ็กเก็ตนี้ว่าเป็นแพ็กเก็ตที่ไต่ยีน (Overhear packet) โดยการทำงานในโหมดนี้ โหนดจะใช้กำลังในการตรวจสอบข้อมูลและลบแพ็กเก็ตดังกล่าวทิ้ง

จากที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถสรุปโหมดการทำงานทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.8 จะแตกต่างกันตรงโหมดการรับ โดยจากรูปแบบที่นำเสนอ นั้นเมื่อโหนดตรวจพบสัญญาณที่โหนดอื่นส่งมานั้นโหนดจะทำการพิจารณาที่ตัว Transceiver (TxRx) ว่าเป็นแพ็กเก็ตแบบ Unicast ใช่หรือไม่ ถ้าใช่ Transceiver ของโหนดก็จะทำการตรวจสอบต่อไปว่าเป็นแพ็กเก็ตสำหรับตนเองหรือไม่ ถ้าใช่โหนดก็เปลี่ยนโหมดไปเป็นโหมดการรับ (Actual Receive mode) แต่ถ้าไม่ใช่แพ็กเก็ตของตนเองก็จะเข้าสู่โหมดการไต่ยีน (Overhearing mode) แต่ถ้าเป็นแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายภายหลังจากที่โหนดตรวจพบสัญญาณ ตัว Transceiver ก็เปลี่ยนโหมดไปทำงานในโหมดการรับจริงทันที (Actual Receive mode)



รูปที่ 2.14 โหมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs ที่นำเสนอ

ส่วนค่ากำลังในการทำงานแต่ละโหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างอิงค่าจริงจากแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย ORINOCO 11b PC Card [21] ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง (P_t) เท่ากับ 1.425 วัตต์ ค่ากำลังงานที่ใช้ในการรับ (P_r) เท่ากับ 0.925 วัตต์และพลังงานที่ใช้เมื่ออยู่ในโหมดสถานะว่าง (P_{idle}) เท่ากับ 0.045 วัตต์ ในโหมดสถานะหลับนั้นกำหนดให้ไม่มีการใช้พลังงานใดๆ ซึ่งจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็จะไม่คำนึงถึงการทำงานในโหมดสถานะหลับอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.14 จะไม่มีการทำงานในโหมดนี้ ส่วนกำลังที่ใช้ในโหมดการไต่ยีน (P_o) ที่ได้นำเสนอขึ้นมาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็จะเป็นอีกค่าหนึ่งที่ไม่ได้มีการกำหนดไว้ใน [21] แต่ ณ ที่นี้เราได้กำหนดให้ค่า

ดังกล่าวต่ำกว่ากำลังที่ใช้ในการรับประมาณ 2 เท่า ($P_o=0.46$ วัตต์) สาเหตุที่กำหนดให้มีความต่ำกว่า เพราะว่าพลังงานที่ใช้ในส่วนนี้เพียงแค่นั้นเป็นพลังงานที่ใช้ในการอ่านแพ็กเก็ตและทำการลบแพ็กเก็ตทิ้ง ไม่จำเป็นต้องประมวลผลต่อไป แต่ขณะที่ในโมดการรับนั้นเมื่อได้รับแพ็กเก็ตแล้วจะต้องใช้พลังงานในการประมวลผลแพ็กเก็ตนั้นต่อไป

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

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc on-demand distance vector (AODV) เป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่เส้นทางระหว่างโหนดสื่อสารจะถูกสร้างขึ้นก็ต่อเมื่อโหนดต้นทางมีความต้องการจะติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทาง โดยเป็นโพรโทคอลที่มีกระบวนการทำงานใกล้เคียงกับโพรโทคอล Bellman-Ford Distance Vector แต่ได้รับการปรับปรุงให้สามารถนำมาใช้งานในกรณีที่ผู้ใช้บริการมีการเคลื่อนที่ นอกจากนั้น AODV ยังใช้ หมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง (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) โดยจะทำการแพร่กระจายในช่วงระยะเวลาที่เท่ากันอย่างต่อเนื่องไปยังโหนดรอบข้าง เพื่อใช้ตรวจสอบการเชื่อมต่อกับโหนดรอบข้างหรือพิจารณาว่าขณะนั้นมีโหนดใดบ้างที่สามารถเชื่อมต่อกับตนเองแบบหนึ่งช่วงเชื่อมต่อบ้าง นอกจากนั้นยังสามารถใช้ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่ ณ ปัจจุบัน ถ้าในช่วงเวลาที่กำหนดโหนดไม่ได้รับแพ็กเก็ตข่าวสารทักทายจากโหนดรอบข้างเดิม โหนดดังกล่าวก็จะสมมุติว่าโหนดนั้นได้เคลื่อนที่ออกนอกช่วงระยะเวลาการส่งของตัวเองหรือโหนดดังกล่าวไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่ไว้ใช้งานแล้ว และถ้าโหนดที่อยู่ระหว่างทางตรวจพบว่าเส้นทางไปยังโหนดถัดไปไม่สามารถใช้งานได้ โหนดดังกล่าวจะทำการบันทึกว่าชายเชื่อมโยงดังกล่าวเสียหายและจะทำการแจ้งข้อมูลความเสียหายไปยังกลุ่มโหนดที่ใช้ชายเชื่อมโยงดังกล่าวไปยังโหนดปลายทางโดยการส่งแพ็กเก

แต่แจ้งความเสียหาย โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process) และกระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance Process) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละกระบวนการเป็นดังต่อไปนี้

2.5.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดหนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อใดก็ตามที่โหนดต้นทางต้องการจะติดต่อหรือส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางในโครงข่าย แต่ตรวจไม่พบเส้นทางที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางในตารางการจัดเส้นทาง ณ ชั้นเครือข่าย แต่กรณีนี้ที่โหนดตรวจพบเส้นทางที่สามารถใช้งานได้ก็สามารถที่จะส่งข้อมูลไปตามเส้นทางที่ทราบได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยตารางการจัดเส้นทางของแต่ละโหนดนั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโหนดปลายทาง โหนดถัดไปที่จะต้องส่งแพ็กเก็ตออกไปยังโหนดปลายทาง และยังบอกถึงระยะเวลาที่สามารถใช้เส้นทางได้

กระบวนการค้นหาเส้นทางจะเริ่มที่โหนดต้นทางสร้างแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request, RREQ) ซึ่งภายในแพ็กเก็ตประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ๆ สำหรับค้นหาเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งข้อมูลในแต่ละส่วนจะมีความหมายและการกำหนดค่าที่แตกต่างกันดังนี้

- ❖ Source address, SrcID หรือหมายเลขที่อยู่ของต้นทาง เป็นหมายเลขที่แสดงความ เป็นเอกลักษณ์ของแต่ละโหนดและมีค่าที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นหมายเลข IP เพื่อสำหรับบอกว่าแพ็กเก็ตดังกล่าวใครเป็นต้นทางในการส่งแพ็กเก็ต
- ❖ Source Sequence Number, SrcSeqNum หรือหมายเลขแสดงลำดับของต้นทาง เป็นหมายเลขของโหนดต้นทางที่ใช้เพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่า โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือการตอบรับเส้นทาง
- ❖ Broadcast Identifier, BcastID หรือหมายเลขระบุแพ็กเก็ตการแพร่กระจาย เป็นตัวเลขจำนวนนับของแต่ละโหนดที่จะเพิ่มค่าที่ละ "1" ทุกครั้งเมื่อทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ
- ❖ Destination Sequence Number, DestSeqNum หรือหมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง เป็นหมายเลขของโหนดปลายทางเพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่าเช่นเดียวกับ SrcSeqNum โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือ

การตอบรับเส้นทาง แต่ในการกำหนดค่าลงในข้อมูลนี้ โหนดต้นทางจะใส่ค่า DestSeqNum ล่าสุดของโหนดปลายทางที่ตนเองทราบ แต่ถ้าไม่ทราบเลยจะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

- ❖ Hop Count หรือจำนวนช่วงการเชื่อมต่อ ใช้เพื่อบอกจำนวนครั้งที่แพ็กเก็ต RREQ ถูกส่งต่อผ่านโหนดต่าง ๆ โดยจะเพิ่มค่าที่ละ "1" เมื่อผ่านโหนดหนึ่งโหนด ซึ่งค่าเริ่มต้นที่โหนดต้นทางเป็นผู้กำหนดคือศูนย์

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

รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (Route Request)

ภายหลังจากที่โหนดต้นทางสร้างแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางและบรรจุค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้เสร็จเรียบร้อยแล้ว โหนดต้นทางจะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่ง (Transmission Range) โหนดต้นทาง ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง โดยโหนดต้นทางเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดรอบข้าง และเมื่อโหนดรอบข้างได้รับแพ็กเก็ต RREQ จากโหนดต้นทางแล้วก็จะดำเนินตามกระบวนการดังต่อไปนี้

2.5.2.1 โหนดจะทำการตรวจสอบข้อมูล <SrcID, BcastID> ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งถูกนำไปใช้เพื่อลดจำนวนแพ็กเก็ตที่มีการแพร่กระจายมากเกินไป ความจำเป็น โดยโหนดจะทำการเปรียบเทียบค่าทั้งสองกับค่าในตารางข้อมูลส่วนตัวของแต่ละโหนด เพื่อตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตที่ได้รับเคยถูกประมวลผลไปก่อนหน้านี้ (เคยได้รับแพ็กเก็ต RREQ นี้แล้ว) แล้วหรือไม่ ถ้าได้ประมวลผลไปก่อนหน้านี้ โหนดจะทำการลบแพ็กเก็ตนี้ทิ้งไปและจะไม่ดำเนินการใด ๆ ต่อไป แต่ถ้าเคยได้รับแพ็กเก็ต RREQ นี้เป็นครั้งแรกก็จะทำการบันทึกค่า <SrcID, BcastID> ที่อยู่ในส่วนหัวของแพ็กเก็ตไว้ในตารางข้อมูลส่วนตัวเพื่อใช้ในการตรวจสอบครั้งต่อไปเมื่อได้รับแพ็กเก็ต RREQ เข้ามา ต่อไปจะดำเนินกระบวนการตามข้อต่อไป

2.5.2.2 โหนดทำการตรวจสอบว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทาง (DestID) หรือไม่ โดยการเปรียบเทียบหมายเลขที่อยู่ของตัวเองกับค่า DestID ในแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้รับ ถ้าตรงกันแสดงว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการจะติดต่อสื่อสาร โหนดก็จะเข้าสู่กระบวนการตอบรับเส้นทางซึ่งจะกล่าวในภายหลัง แต่ถ้าตัวเองไม่ใช่โหนดปลายทาง โหนดจะดำเนินกระบวนการ ต่อไป

2.5.2.3 เมื่อโนดไม่ใช้โนดปลายทาง โนดจะต้องทำการตรวจสอบว่าตัวเองมีเส้นทางไปยังโนดปลายทางที่ใหม่และสามารถใช้งานได้ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูล (Route Table) หรือไม่ การจะดูว่าเป็นเส้นทางใหม่นั้น จะดูจากค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลกับค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในแพ็กเกต RREQ ถ้าค่าที่อยู่ในตารางมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่อยู่ในแพ็กเกตก็แสดงว่าเส้นทางนั้นเป็นเส้นทางที่ใหม่ แต่ในทางตรงกันข้าม เส้นทางที่แสดงอยู่ในตารางถือว่าเป็นเส้นทางที่เก่าไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะฉะนั้นถ้าโนดมีเส้นทางใหม่และสามารถใช้งานได้ โนดจะดำเนินการกระบวนการตอบรับเส้นทางโดยไม่ต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ต่อไป แต่ถ้าไม่มีเส้นทางก็จะไปทำขั้นตอนต่อไป

2.5.2.4 ก่อนที่โนดจะแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโนดรอบข้างของตัวเอง โนดจะต้องทำการเพิ่มข้อมูล Hop Count ไปจากเดิมอีก "1" รวมทั้งดึงข้อมูลจากแพ็กเกต RREQ เข้าไปเก็บไว้ในตารางเส้นทางเดินข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการสร้างเส้นทางย้อนกลับ (Reverse Route) โดยเส้นทางย้อนกลับนี้จะนำมาใช้เพื่อให้แพ็กเกตตอบรับเส้นทาง (Route Reply, RREP) สามารถเดินทางกลับไปยังโนดต้นทางของ RREQ ได้ เพราะฉะนั้นโพรโทคอลแบบ AODV จะต้องทำการในลักษณะที่ขยายเชื่อมโยงมีความเหมือนกันทั้งไปและกลับ (Symmetric Link) โดยที่เส้นทางย้อนกลับนี้จะถูกกำหนดระยะเวลาในการใช้งานไว้ ถ้าในช่วงเวลาที่กำหนดไม่มีการส่งแพ็กเกตตอบรับเส้นทางเดินทางมา โนดก็จะทำการลบข้อมูลของเส้นทางย้อนกลับนี้ทิ้ง

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

รูปที่ 2.16 โครงสร้างของแพ็กเกตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP)

ในระหว่างที่แพ็กเกต RREP ผ่านโนดต่าง ๆ กลับไปยังโนดต้นทางโนดที่อยู่ระหว่างเส้นทางจะทำการตรวจสอบข้อมูลของแพ็กเกตและเก็บข้อมูลที่ได้ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูล ซึ่งแสดงได้ไว้ในรูปที่ 2.16 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ข้อมูลใหม่ โดยโนดจะทำการบันทึกข้อมูลใหม่หรือปรับปรุงข้อมูลเก่าที่มีอยู่ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้ (1) ไม่เคยมีข้อมูลของโนดปลายทางในตาราง (2) ค่า DestSeqNum สำหรับโนดปลายทาง ในแพ็กเกต RREP มีค่ามากกว่าค่าที่เก็บในตาราง (3) ค่า DestSeqNum มีค่าเท่ากันแต่เส้นทางใหม่มีระยะทางที่สั้นกว่า นอกจากนั้นโนดที่ได้รับแพ็กเกต RREP ก็สร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโนดที่ส่งแพ็กเกตมาเช่นกันซึ่งเราเรียกเส้นทางนี้ว่าเป็น เส้นทางไปข้างหน้า (Forward Route) เพื่อป้องกันความสับสนกับเส้นทาง reverse route ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

จากนั้นเมื่อโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ต RREP ก็เป็นอันว่าจบขั้นตอนกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทาง โหนดก็สามารถส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโหนดถัดไปตามที่ระบุไว้ในเส้นทาง forward route เพื่อส่งข้อมูลไปโหนดปลายทาง

2.5.3 กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance)

การเคลื่อนที่อย่างอิสระของโหนดในโครงข่ายแอ็ดฮอกทำให้รูปแบบของทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า ทำให้โอกาสที่เส้นทางที่อยู่ระหว่างการสื่อสารระหว่างโหนดใด ๆ สามารถจะขาดหรือเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ตลอดเวลา ดังนั้น โพรโทคอลที่ดีควรมีวิธีการดูแลหรือแจ้งขอผิดพลาดนี้ให้แก่โหนดในโครงข่ายทราบเพื่อจะทำการซ่อมแซมหรือหาเส้นทางใหม่ นอกจากการเคลื่อนที่แล้วโหนดก็อาจจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ทำให้สายเชื่อมโยงที่กำลังใช้งานอยู่เกิดขาดหรือความเสียหาย (Link Failure)

กระบวนการดูแลเส้นทางจะถูกดำเนินเมื่อใดก็ตามที่ โหนดต้นทางเคลื่อนที่ออกนอกกระยะการส่งของโหนดถัดไปของเส้นทาง อีกกรณีหนึ่งคือ โหนดระหว่างที่อยู่ในเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางหรือแบตเตอรี่ของโหนดถูกใช้งานจนหมด (ไม่สามารถจะทำการใด ๆ ได้อีกต่อไป) โดยในกรณีแรกนั้น โหนดต้นทางจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 แต่กรณีที่ 2 โหนดที่ตรวจพบความผิดพลาด (โหนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไปได้สำเร็จ) จะแจ้งข้อมูลความเสียหายของสายเชื่อมโยงด้วยแพ็กเก็ตแสดงความเสียหาย (Route Error, RERR) ดังกล่าวไปบอกทุกโหนดก่อนหน้าและโหนดรอบข้างที่ยังทำงานอยู่ (Active neighbor) โดยการให้หมายเลขแสดงลำดับค่าใหม่คือ ค่าหมายเลขแสดงลำดับที่มากกว่าค่าเดิมอยู่ "1" และจำนวน Hop Count จะถูกตั้งค่าให้เป็นอนันต์ (Infinite) สำหรับโหนดที่ใช้งานอยู่ เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อมูลความเสียหาย จากโหนดที่ตรวจพบความเสียหายแล้ว โหนดต้นทางอาจจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งถ้ายังคงต้องการที่จะติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทางอีกหรือหยุดการทำงาน

การป้องกันไม่ให้นัดใช้เส้นทางผ่านไปยังสายเชื่อมโยงที่เกิดข้อผิดพลาดดังกล่าวอีก ทุกโหนดที่ได้ข้อความจากแพ็กเก็ต RERR จะต้องทำการตรวจสอบในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลของตนเองว่ามีเส้นทางใดบ้างที่ต้องใช้โหนดดังกล่าวเพื่อไปยังโหนดปลายทาง ถ้าตรวจพบว่ามีเส้นทางดังกล่าวโหนดจะทำการลบเส้นทางนั้นทิ้งไป ในส่วนขั้นตอนในการตรวจสอบสถานะของสายเชื่อมโยงว่าเกิดความเสียหายหรือไม่นั้นมีด้วยกัน 2 วิธีคือ การใช้ความสามารถของกระบวนการในชั้นสายเชื่อมโยงและชั้นเครือข่าย

- วิธีแรกคือ ใช้การแพร่กระจายแพ็กเก็ตข่าวสารทักทาย (Hello message) โหนดจะทำการแพร่กระจาย hello message ไปยังโหนดข้างรอบข้างซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลเฉพาะตัวของโหนดนั้น และหมายเลขแสดงลำดับของโหนด โดยที่ค่าหมายเลขแสดงลำดับของโหนดจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงสำหรับการส่ง hello message โดย hello message ได้ถูกป้องกันไม่ให้มีการทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตต่อไปอีกครั้งหลังจากได้รับมาในครั้งแรกด้วยการตั้งค่า Time To Live (TTL) เท่ากับ 1 วินาที ภายหลังจากที่โหนดรอบข้างได้รับแพ็กเก็ตดังกล่าวแล้วโหนดก็จะต้องทำการปรับปรุงข้อมูลการเชื่อมต่อท้องถิ่น (Local Connectivity) แต่ถ้าโหนดไม่ได้รับ hello message เป็นจำนวน allowed_hello_loss ติดต่อกัน หรือช่วงเวลาที่กำหนดจากโหนดรอบข้าง แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อท้องถิ่นจากเดิมออกไป (ชายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายหรือไม่มีการเชื่อมต่อกัน) ซึ่งถ้าเป็นกรณีที่ไม่ได้รับจากโหนดรอบข้างที่ใช้งานในการส่งข้อมูลอยู่ โหนดก็จะตัดสินใจว่าชายเชื่อมโยงถัดไปเกิดความเสียหายไม่สามารถส่งข้อมูลต่อไปได้

- วิธีที่สองคือ การใช้ link-layer notification ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้จากมาตรฐาน IEEE 802.11 [26] โดยแต่ละครั้งที่มีการส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดถัดไปที่กำลังใช้งานอยู่ โหนดจะต้องมีการตรวจสอบการเชื่อมต่อเช่น ไม่ได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับจากการส่ง (Acknowledge) หรือไม่ได้รับแพ็กเก็ต Clear to send (CTS) หลังจากทีส่ง Ready To Send (RTS) ออกไป

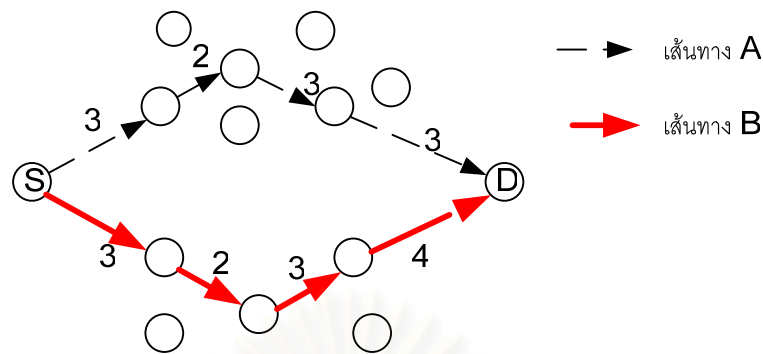
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีแรกคือ การใช้แพ็กเก็ตข่าวสารทักทายในการตรวจจับความผิดพลาดของชายเชื่อมโยงและตรวจสอบสถานะของการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น เนื่องจากวิธีนี้ทำให้โหนดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วแตกต่างจากวิธีที่สองที่จะต้องรอจนกว่าจะมีการรับส่งแพ็กเก็ตระหว่างโหนดขึ้นจริง ๆ จึงจะสามารถตรวจจับข้อผิดพลาดได้ ซึ่งผลดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีการแบบแพ็กเก็ตข่าวสารทักทายที่จะต้องใช้จำนวนโอเวอร์เฮด (Overhead) แพ็กเก็ตมากขึ้นเพื่อตรวจจับการทำงานดังกล่าว นอกจากนี้วิธีที่สองเป็นวิธีที่ไม่มีความสามารถในการพิจารณาว่าโหนดใดเป็นโหนดรอบข้าง (มีการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางมีประสิทธิภาพ ในด้านการอนุรักษ์มากขึ้นซึ่งจะกล่าวรายละเอียดอีกครั้งตัวอย่างกระบวนการดูแลเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV

2.6 ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังสำหรับโครงข่ายแอตสอกเพื่อให้โหนดสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้นานที่สุดและทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น จากข้างต้น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังสามารถแบ่งได้เป็นสามประเภท ในแต่ละประเภทมีจุดประสงค์หลักเหมือนกันคือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายหรือโหนดให้ได้นานที่สุด แต่ก็จะมีแนวคิดและปัจจัยที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสองประเภทแต่ก่อนที่จะกล่าวรายละเอียดของโพรโทคอลที่จะนำเสนอในส่วนนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่พบรวมถึงข้อดีข้อเสียของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยทำแยกพิจารณาสำหรับโพรโทคอลแต่ละประเภทดังนี้

2.6.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง มีเป้าหมายในการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานให้มากที่สุด ซึ่งในบทความอ้างอิง [27, 28, 29] เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด โดยที่พลังงานรวมของเส้นทางได้จากพลังงานที่แต่ละโหนดต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งข้อมูลหนึ่งแพ็กเก็ต ยกเว้นในกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RA [28] ที่ได้รวมพลังงานงานที่โหนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตซ้ำ แต่จากแบบจำลองการใช้พลังงานที่ได้นำเสนอไว้ในข้างต้น แสดงให้เห็นว่าโหนดยังเสียพลังงานในการรับข้อมูลและการได้ยินข้อมูลด้วย เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดไม่ได้แสดงว่าโครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดตามไปด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols) เพื่อให้โครงข่ายประหยัดพลังงานมากที่สุด โดยการเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดแทนที่จะเลือกจากเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งของโหนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น นอกจากนั้นการคำนวณพลังงานที่แต่ละโหนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการรับ การส่งและการได้ยินจะพิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณด้วย



รูปที่ 2.17 เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโนด S และ D

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าถ้าใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR หรือ RA เส้นทางที่ดีที่สุดคือเส้นทาง A เพราะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งรวมต่ำที่สุดคือ 11 หน่วย แต่ถ้าคำนึงถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจะเห็นว่าเส้นทาง A จะสูญเสียพลังงานมากกว่าเส้นทาง B เพราะว่าเส้นทาง A จะต้องเสียพลังงานในการรับและการได้ยินของโนดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารที่มากกว่า เนื่องจากเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งสูง ดังนั้นการเลือกเส้นทาง A อาจจะไม่ใช่วิธีที่ช่วยให้โครงข่ายประหยัดการใช้พลังงานมากที่สุด

2.6.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม

โพรโทคอลแบบผสมนี้เป็นการผสมผสานโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด เพื่อให้โนดมีอายุการใช้งานที่นานที่สุด เพราะการทำงานโดยพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างใช้พลังงานต่ำที่สุด หรือ ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด (โดยการรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโนด) ไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของโนดหรือโครงข่ายได้มากเท่ากับการพิจารณาทั้งสองแบบพร้อมกัน ในบทความอ้างอิง [15, 14] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR และ CMDR ตามลำดับ ซึ่งโพรโทคอลสองตัวแรกได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเพื่อให้โนดได้ใช้ตัดสินใจว่า ณ ขณะเวลาดังกล่าวควรจะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใดระหว่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด เพราะฉะนั้นข้อเสียคือ สมรรถนะของโครงข่ายขึ้นอยู่กับค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้เพราะโครงข่ายที่มีสภาพการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะยากที่จะกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนให้เหมาะสมและทันต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ

นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลทั้งสองไม่ได้บรรลุจุดประสงค์ทั้งในเรื่องของการใช้พลังงานต่ำที่สุด และรักษาสมดุของการใช้พลังงานของโนดมากที่สุดพร้อมกันในเวลาเดียวกันดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

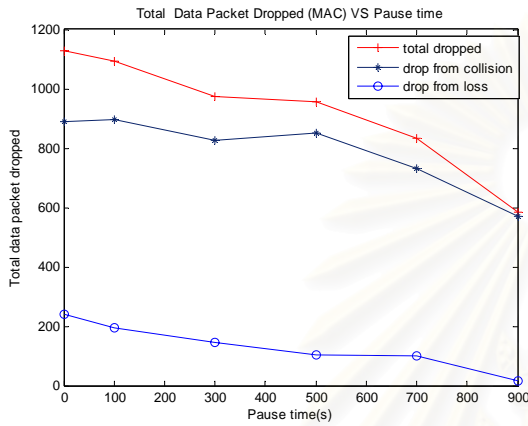
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมไว้สองแบบ ซึ่งแบบแรกจะเป็นวิธีที่นำเอาค่าพลังงานที่ใช้ในส่วนของการควบคุมกลางกับค่าแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดมาทำการปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้ โดยในระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางกำหนดให้โนดทำงานเหมือนกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำน้ำหนักถึงระดับพลังงานที่เหลือ พร้อมทั้งคำนวณพลังงานที่โนดจะต้องใช้ ซึ่งจากการทำงานแบบค้ำน้ำหนักถึงเฉพาะระดับพลังงานที่เหลือของโนดจะเป็นตัวบ่งบอกถึงช่วงประวิงเวลา [13] ทำให้แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่ไปถึงยังโนดปลายทางเป็นแพ็กเก็ตแรก ๆ นั้นมาจากเส้นทางที่โนดมีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่สูง แต่แทนที่โนดจะใช้เส้นทางที่ได้จากแพ็กเก็ตแรกในการตอบรับเส้นทาง โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอจะกำหนดให้โนดปลายทางต้องหยุดรอไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อรอแพ็กเก็ตร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ แล้วจึงตัดสินใจโดยใช้เงื่อนไขทางด้านพลังงานคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดใช้พลังงานรวมของเส้นทางต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถที่จะบรรลุจุดประสงค์ทั้งสองอย่าง ณ ขณะเวลาเดียวกัน

ส่วนโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่สอง จะอ้างอิงบทความ [16] ที่เสนอโพรโทคอล CMLR ซึ่งจะเป็นการนำเสนอเพื่อยืดอายุการใช้งานของโนดให้นานยิ่งขึ้น โดยพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ของแต่ละโนดในแต่ละเส้นทางและอายุการใช้งานที่เหลือของแต่ละเส้นทางหรือพิจารณาถึงแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในแต่ละเส้นทาง โดยเส้นทางที่ถูกเลือกใช้จะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานตลอดทั้งเส้นทางที่ต่ำและค่าแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในเส้นทางมีค่ามากพอที่จะใช้งาน ซึ่งจากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงอายุการใช้งานของโนดและทั้งโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งสามารถลดค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต และเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตก็ลดลง

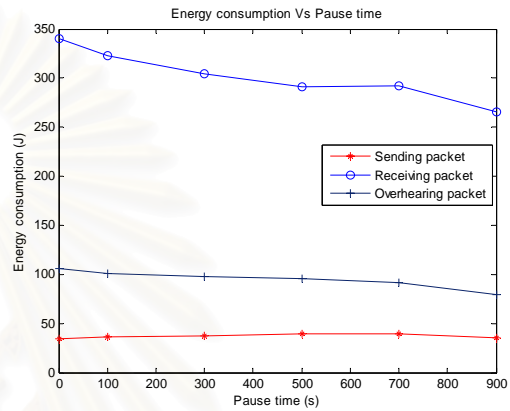
2.7 ผลการจำลองเบื้องต้น

เพื่อให้การศึกษามีประสิทธิภาพมากขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม NS2.28 โดยใช้หลักการค้นหาเส้นทางแบบ AODV มาเป็นวิธีในการจำลองเพื่อศึกษาหาค่าต่างๆ ซึ่งการจำลองได้กำหนดให้มีโนดทั้งหมด 50 โนด มี 20 การเชื่อมต่อ ภายในพื้นที่ $1000 \times 1000 m^2$ ทุก ๆ โนดเคลื่อนที่แบบ random waypoint โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ เช่น ความเร็วสูงสุดของแต่ละโนดจาก 0 ถึง 18 (Maximum speed of mobile) ปรับเปลี่ยนค่าขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลจาก

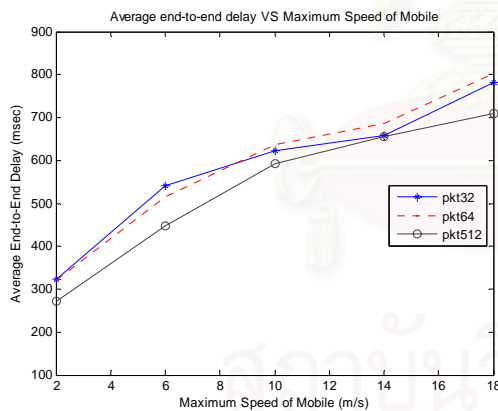
32 ,64 และ 512 ไบต์ (Packet size) อีกทั้งยังมีการปรับเปลี่ยนเวลาในการหยุดจาก 0 ถึง 900 วินาที (Pause time) จากเวลาในจำลองทั้งหมด 900 วินาที ส่วนกำลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตนั้นเท่ากับ 0.6635 วัตต์ กำลังงานที่ใช้ในการรับแพ็กเก็ตเป็น 0.395 วัตต์ และกำลังงานที่ใช้ในการละทิ้งแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.200 วัตต์ โดยกำหนดให้แต่ละโหนดมีพลังงานเริ่มต้นที่ 10 จูล ซึ่งจากการจำลองเบื้องต้นได้ผลดังรูปที่ 2.18



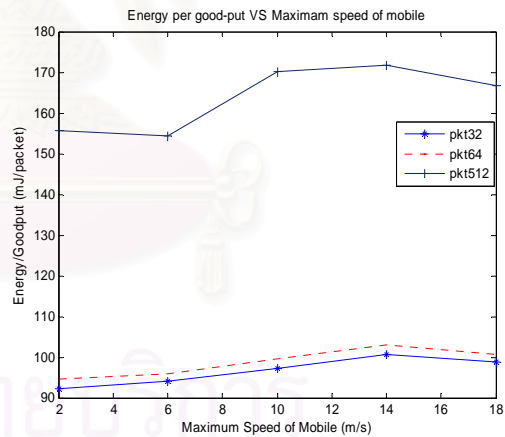
(ก) จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกละทิ้งเมื่อปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุด



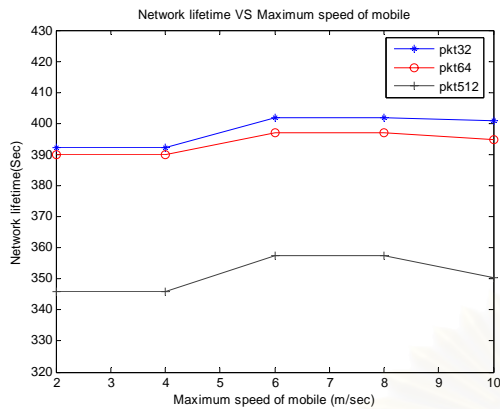
(ข) พลังงานที่ถูกใช้ในแต่ละชั้นเมื่อปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุด



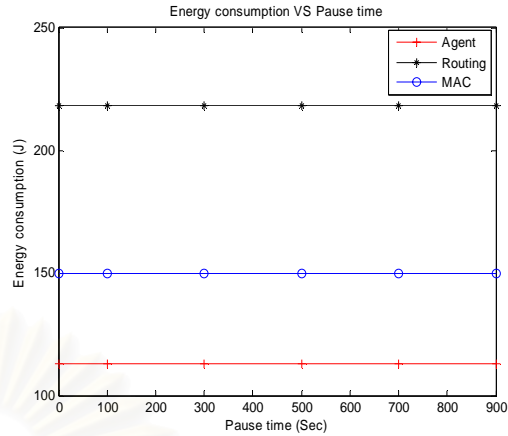
(ค) ค่าประวิงเวลาของแพ็กเก็ตเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของโหนด



(ง) พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของโหนด



(จ) อายุการใช้งานของโหนดเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของโหนด



(ข) พลังงานที่ถูกใช้เมื่อปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุดของโหนด

รูปที่ 2.18 ผลการจำลองเบื้องต้น

จากรูป 2.18(ก) แสดงจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกละทิ้ง (Dropped data packet) โดยจำแนกออกเป็นสองสาเหตุใหญ่ๆ คือ จากการชนกันของแพ็กเก็ตและจากการสูญหายระหว่างทาง โดยปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุดของโหนด ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณแพ็กเก็ตข้อมูลที่ชนกันมีจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกละทิ้งทั้งหมด

รูปที่ 2.18(ข) แสดงพลังงานที่ใช้ทั้งหมดเทียบกับเวลาที่หยุด โดยแบ่งการใช้พลังงานออกเป็น 3 โมด คือ โมด การส่ง การรับและการได้ยินของแพ็กเก็ต ซึ่งพลังงานส่วนมากจะเสียจากการรับแพ็กเก็ตมากที่สุด ส่วนการส่งจะใช้พลังงานต่ำสุด

รูปที่ 2.18 (ค) แสดงการประวิงเวลาเฉลี่ยแต่ละเส้นทางเทียบกับความเร็วสูงสุดในแต่ละโหนด โดยมีขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูล 3 ขนาด ซึ่งผลที่ได้การประวิงเวลาเฉลี่ยจะอยู่ระหว่าง 0.3 วินาที ถึง 0.8 วินาที

รูปที่ 2.18 (ง) แสดงพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดแต่ละแพ็กเก็ต โดยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของโหนด ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดแพ็กเก็ตใหญ่ขึ้น จะทำให้ใช้พลังงานมากขึ้นตามไปด้วย หรือจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งสำเร็จลดลงเมื่อขนาดของแพ็กเก็ตใหญ่ขึ้น

รูปที่ 2.18 (จ) แสดงอายุการใช้งานของโครงข่ายจนกว่าจะมีโหนดใดโหนดหนึ่งไม่สามารถทำงานได้ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วของโหนด ซึ่งจะได้เห็นได้ว่าขนาดของแพ็กเก็ตใหญ่ขึ้น มีผลทำให้อายุการใช้งานของโหนดต่ำลง

และรูปที่ 2.18(ข) เป็นกราฟที่แสดงพลังงานที่ใช้แยกในแต่ละชั้น โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น คือ ชั้น Agent, Routing และชั้น MAC ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานที่ใช้จากชั้น Routing มีปริมาณมากกว่าชั้นอื่น และพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั้นจะไม่เปลี่ยนตามความเร็วของโนด ซึ่งพลังงานจากการส่งเฉพาะเฟรม ข้อมูลจะหาได้จากชั้น Agent

จากผลการจำลองข้างต้น ทำให้ทราบว่าปริมาณแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งมีจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดผลต่างๆตามมา ทั้งในด้านของการใช้พลังงาน ซึ่งจะทำให้โนดสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของโนดลดต่ำลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ ทำให้ผู้เขียนมีความคิดที่จะพัฒนาระบบการค้นหาเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านพลังงาน ซึ่งแนวทางการทำงานจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ

ในบทที่ผ่านมาเราได้มีการกล่าวถึงผลกระทบเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอกและทฤษฎีในการเข้าถึงตัวกลางตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ใช้ในโครงข่ายแอดฮอกไปแล้ว รวมถึงแบบจำลองการใช้พลังงานในโมดต่างๆ ซึ่งปัญหาด้านข้อจำกัดทางด้านพลังงานนำไปสู่แนวทางในการแก้ไขปัญหาและในวิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการออกแบบกระบวนการจัดหาเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอก ซึ่งจะเป็นการทำงานแบบข้ามชั้น (Cross Layer) โดยจะเป็นการทำงานข้ามชั้นของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางกับชั้นโครงข่าย ซึ่งจะพิจารณาพลังงานที่ใช้ (Energy consumption) ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเป็นหลัก และส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังชั้นโครงข่าย เพื่อทำการหาเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือก ส่วนเส้นทางอื่นจะถูกทิ้งไป เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะเป็นเส้นทางที่ไม่มีการชนกันของข้อมูลหรืออาจจะมีการชนกันของข้อมูลที่น้อยที่สุด จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้อายุการใช้งานของแต่ละโนด และทั้งโครงข่ายนานยิ่งขึ้น เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่ต่ำลง แบตเตอรี่ก็จะมีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น ปริมาณงานที่จะได้รับ (Throughput) ก็เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพของการให้บริการก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยนอกจากที่พิจารณาเฉพาะพลังงานที่ใช้ในส่วนของการเข้าถึงตัวกลางแล้ว ยังจะพิจารณาถึงพลังงานของแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่ละโนดอีกด้วย โดยเส้นทางที่มีพลังงานแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดในเส้นทางเพียงพอต่อการสื่อสารและอยู่ในระดับที่สูงพอที่จะถูกพิจารณา เพราะจะได้เพิ่มอายุการทำงานของโครงข่ายให้นานขึ้น

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลัง 2 โพรโทคอล คือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Power Aware routing Protocols) และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocol) ซึ่งในแบบที่สองได้เสนอแนวทางการทำงานไว้สองวิธี

3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Power Aware routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้มีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานที่ใช้ในส่วนของการเข้าถึงตัวกลางขึ้นใหม่ เพื่อนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

3.1.1 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาผลกระทบจากโหนดแทรกสอด (Interference node) ผลกระทบหลังเกิดการชนของแพ็กเก็ตที่มีต่อค่าการปรับเปลี่ยนของ CW และผลกระทบจากพลังงานที่จะต้องสูญเสียจากโหนดข้างเคียงเนื่องจากการได้ยินของแพ็กเก็ตด้วย ซึ่งจะทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยแต่ละโมดของการทำงานนั้นจะต้องทำงานเชื่อมโยงกันอยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นพลังงานที่ใช้จึงเป็นพลังงานรวมทั้งหมดที่คาดว่าจะถูกใช้ในเส้นทาง ซึ่งความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ จะอธิบายอยู่ในตารางที่ 3.1 โดยเวลาที่ใช้ในการที่โหนดจะอยู่ในช่วงว่างเป็น

$$T_{ii} = \sigma \quad (3.1)$$

ส่วนเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต RTS, CTS, DATA และ ACK เมื่อเกิดการชนของแพ็กเก็ตดังกล่าวขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (3.2) ถึงสมการที่ (3.5)

$$T_{ir} = T_{RTS} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} \quad (3.2)$$

$$T_{ic} = T_{CTS} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} + L_{CTS} + L_{SIFS} \quad (3.3)$$

$$T_{id} = T_{DATA} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} + L_{CTS} + L_{SIFS} + L_H + L_{DATA} + L_{SIFS} \quad (3.4)$$

$$T_{ia} = T_{ack} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} + L_{CTS} + L_{SIFS} + L_H + L_{DATA} + L_{SIFS} + L_{ACK} + L_{SIFS} \quad (3.5)$$

ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจนสำเร็จเป็นดังสมการ

$$T_{it} = T_{suc} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} + L_{CTS} + L_{SIFS} + L_H + L_{DATA} + L_{SIFS} + L_{ACK} + L_{SIFS} \quad (3.6)$$

เมื่อ $L_{RTS}, L_{CTS}, L_H, L_{DATA}, L_{ACK}$ แทนความยาวของเฟรม RTS, CTS, DATA และ ACK ตามลำดับ จาก [25] ได้ทำการหาความน่าจะเป็นที่โหนดจะมีแพ็กเก็ตในการส่ง ณ ช่วงเวลาที่กำหนดสุ่มขึ้นมา ซึ่งจะได้ความน่าจะเป็นดังกล่าวได้ดังสมการ

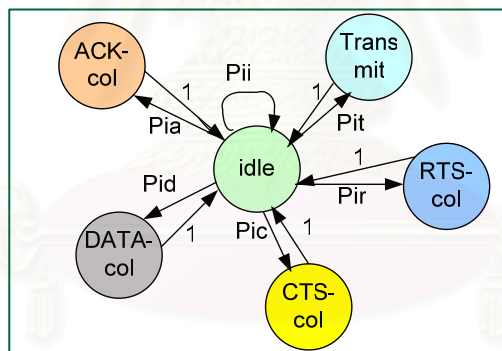
$$p = \frac{2(1-2\beta)}{(1-2\beta)(W+1) + \beta W(1-(2\beta)^m)} \quad (3.7)$$

เมื่อ β , m และ W คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของแพ็กเก็ต back-off stage และขนาดของ back-off widow ที่สั้นที่สุด ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาช่องสัญญาณที่จะมีการส่งแพ็กเก็ต ($m = 0$) จะได้ความน่าจะเป็นที่โนดจะมีแพ็กเก็ตในการส่งได้เท่ากับ $p = \frac{2}{(W + 1)}$

ความน่าจะเป็น p จาก (3.7) ยังติดตัวแปรความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของข้อมูล ซึ่งความน่าจะเป็น p ไม่สามารถหาได้โดยตรง โดยความน่าจะเป็นในการชน β สามารถเขียนในฟังก์ชันของ p ได้ดังนี้

$$\beta = 1 - (1 - p)^{n-1} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) เราจะสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นในการชนของแพ็กเก็ตและความน่าจะเป็นที่โนดจะส่งแพ็กเก็ต เมื่อทราบจำนวนของโนดข้างเคียง n ค่า CW_{min} และจำนวนเสตจมากที่สุดของการ back-off (m) โดยเราจะนำค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวมาใช้ในการหาความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของแต่ละโนด โดยสถานะของแต่ละโนดจะถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 สถานะ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการทำงานในช่องสื่อสาร

ความน่าจะเป็นที่โนดจะไม่มีการส่งแพ็กเก็ตใด ๆ หรืออยู่ในช่วงสถานะว่างเป็นดังสมการ

$$P_{ii} = (1 - p)^N \quad (3.9)$$

ส่วนความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่ส่งแล้วสำเร็จจะเท่ากับ

$$P_{it} = p(1 - p)^{N-1} P_{hidden_suc} \quad (3.10)$$

โดยที่ค่า

$$P_{hidden_suc} = \left(\sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{T_{suc}} \quad (3.11)$$

ซึ่งค่าดังกล่าวจะเป็นค่าความน่าจะเป็นที่โนดในระยะเวลาช่วงแทรกสอด (Interference range) นอกเหนือขอบเขตการติดต่อสื่อสารของตัวส่งที่มีจำนวนโนดที่จะส่งแพ็กเก็ตในช่วงดังกล่าวน้อยกว่าจำนวนโนดที่จะสามารถส่งผลกระทบกับการส่งและรับแพ็กเก็ตของตัวส่งและตัวรับในช่วงเวลาที่มีการส่งแพ็กเก็ต ส่วนความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะของการส่งเฟรม RTS แล้วเกิดการชนกันขึ้น จะเป็นผลรวมของความน่าจะเป็นที่โนดในช่วงของการติดต่อสื่อสารส่งเฟรม RTS มากกว่าหนึ่งโนดรวมกับความน่าจะเป็นที่มีการส่งเฟรม RTS เพียงโนดเดียวแต่จำนวนโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอดมีการส่งแพ็กเก็ตมากพอที่จะส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเก็ต ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$P_{ir} = p(1-(1-p)^{N-1}) + p(1-p)^{N-1} P_{hidden_rts} \quad (3.12)$$

$$P_{hidden_rts} = \left(1 - \sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{T_{RTS}} \quad (3.13)$$

ความน่าจะเป็นที่โนดจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่มีการชนกันของเฟรม CTS จะมีค่าเท่ากับ

$$P_{ic} = p(1-p)^{N-1} P_{hidden_cts} \quad (3.14)$$

$$P_{hidden_cts} = \left(1 - \sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{(T_{CTS}-T_{RTS})} \quad (3.15)$$

นอกจากมีการชนกันของแพ็กเก็ตควบคุมแล้ว ยังมีการชนกันของข้อมูลอีกด้วย ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่มีการส่งข้อมูลแล้วเกิดการชนกันขึ้น เป็นดังสมการ

$$P_{id} = p(1-p)^{N-1} P_{hidden_data} \quad (3.16)$$

$$P_{hidden_data} = \left(1 - \sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{(T_{DATA}-T_{CTS})} \quad (3.17)$$

สุดท้าย ความน่าจะเป็นที่โหนดจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่มีการชนกันของแพ็กเก็ต ACK จะหาได้จากผลรวมของความน่าจะเป็นทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง ซึ่งจะได้

$$P_{ia} = 1 - P_{ii} - P_{it} - P_{ir} - P_{ic} - P_{id} \quad (3.18)$$

กำหนด $S_i, S_t, S_r, S_c, S_d, S_a$ แทนค่าความน่าจะเป็นของสถานะโหนดแบบ steady-state ซึ่งจาก $P_{ii} + P_{it} + P_{ir} + P_{ic} + P_{id} + P_{ia} = 1$ และ $S_i + S_t + S_r + S_c + S_d + S_a = 1$ จากทฤษฎีรูปแบบเปิดของ Markov Chain จะได้ว่า

$$S_i P_{ii} + S_t + S_r + S_c + S_d + S_a = S_i \quad (3.19)$$

$$S_i P_{ii} + 1 - S_i = S_i \quad (3.20)$$

$$S_i = \frac{1}{2 - P_{ii}} \quad (3.21)$$

ซึ่งจะเป็นความน่าจะเป็นที่โหนดจะอยู่ในสถานะว่างก่อนที่จะมีการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะสามารถนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำเร็จ จะได้ตั้งสมการที่ (3.22) โดยความหมายของตัวแปรที่ใช้ในสมการต่าง ๆ แสดงได้ตามตาราง

ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ของสมการในวิทยานิพนธ์

σ	ความยาวของหนึ่งสล็อต
p	ความน่าจะเป็นที่โหนดจะมีแพ็กเก็ตไว้ออกส่ง ณ ช่วงเวลาที่กำหนด
W	ขนาดของ back-off widow ที่สั้นที่สุด
$S_i, S_t, S_r, S_c, S_d, S_a$	ความน่าจะเป็นของสถานะโหนดแบบสถานะคงตัว
N	จำนวนโหนดที่อยู่ในช่วงติดต่อสื่อสาร
N_{out}	จำนวนโหนดที่อยู่นอกเขตการติดต่อสื่อสาร
N_{lim}	จำนวนโหนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด
$T_{RTS}, T_{CTS}, T_{DATA}, T_{ack}$	เวลาที่ใช้ในการส่งเฟรม RTS, CTS, DATA และ ACK
$e_{rts}, e_{cts}, e_{data}, e_{ack}$	กำลังงานที่ใช้ในการส่งเฟรม RTS, CTS, DATA และ ACK
$e_{r-rts}, e_{r-cts}, e_{r-data}, e_{r-ack}$	กำลังงานที่ใช้ในการรับเฟรม RTS, CTS, DATA และ ACK
λ	อัตราการเข้ามาของแพ็กเก็ต

ซึ่งพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำเร็จ จะรวมถึงพลังงานที่โหนดใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะต่างๆ คือ สถานะว่าง สถานะการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ สถานะการรับแพ็กเก็ต และสถานะการส่งซ้ำของแพ็กเก็ต ควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลเมื่อเกิดการชนของแพ็กเก็ตขึ้น โดยพลังงานที่สูญเสียจากการส่งและรับแพ็กเก็ตข้อมูลนั้น จะคิดพลังงานที่ใช้จากโหนดข้างเคียงของตัวส่งและตัวรับเนื่องจากการได้ยินของแพ็กเก็ต ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$E_{mac} = S_i P_{ii} P_{idle} \sigma + S_i (P_s + P_r + P_o \cdot (N-1)) \cdot T_{data} + S_i (P_s + P_r \cdot N) \cdot T_{ctr} + S_{col-ctr} (P_s + P_r \cdot N) \cdot T_{ctr} + S_{col-data} (P_s + P_r + P_o \cdot (N-1)) \cdot T_{data} \quad (3.22)$$

สมการรวมในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางจะเป็นดังสมการที่ (3.22) เมื่อกำหนดให้ E_{mac} คือค่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมด ส่วน P_s , P_r , P_o and P_{idle} เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่ง การรับ การละทิ้งของแพ็กเก็ตและพลังงานที่โหนดใช้ในสถานะว่าง S_i และ S_i คือความน่าจะเป็นที่โหนดจะอยู่ในเสตจว่างและเสตจการส่ง ตามลำดับ ค่า $S_{col-ctr}$ และ $S_{col-data}$ แสดงความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลจะเกิดการชนเมื่อมีการส่ง ซึ่งหาได้จาก $S_i P_{ir}$, $S_i P_{ic}$, $S_i P_{id}$, $S_i P_{ia}$ สำหรับแพ็กเก็ต RTS, CTS, DATA และ ACK ตามลำดับ เมื่อ T_{ctr} และ T_{data} คือเวลาของการส่งแพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูล และ N คือจำนวนโหนดข้างเคียงที่อยู่ในช่วงของตัวส่งหรือตัวรับ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำแบบจำลองการใช้พลังงานดังกล่าวมาใช้เพื่อค้นหาเส้นทางที่มีการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเส้นทางที่ใช้พลังงานในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่ำสุด จะเป็นเส้นทางที่มีการชนกันของข้อมูลต่ำสุด จึงมีการส่งซ้ำของแพ็กเก็ตน้อยที่สุด อีกทั้งพลังงานที่ได้ไม่ใช่เฉพาะคู่โหนดรับและส่งเท่านั้น แต่จะรวมถึงพลังงานที่โหนดในเส้นทางใช้ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ปริมาณงานเพิ่มขึ้น อีกทั้งอายุการใช้งานของโหนดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยต่อไปจะอธิบายหลักการทำงานของโพรโทคอลที่น่าเสนอ ซึ่งโพรโทคอลที่น่าเสนอจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route discovery process) และกระบวนการดูแลเส้นทาง (Route maintenance process) ซึ่งแต่ละกระบวนการมีการทำงานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่น่าเสนอได้ประยุกต์ใช้กับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบโพรโทคอล AODV โดยจะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางเมื่อโหนดต้องการจะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โหนดจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet หรือ RREQ) ไปทั่วทั้งโครงข่าย แต่ก่อนที่โหนดต้นทางจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตออกไป โหนดจะต้องบันทึกค่าต่าง ๆ ที่

จำเป็นลงในแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางที่นำมาใช้กับโพรโทคอลที่นำเสนอได้เพิ่มพื้นที่จากเดิมขึ้น 2 ส่วนคือพลังงานที่คาดว่าจะต้องสูญเสียจากชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางตามสมการที่ (3.22) (Energy of MAC, EMAC) ซึ่งเป็นพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลและแพ็กเก็ตควบคุม โดยพิจารณาผลกระทบจากโนดซ่อนเร้น (Hidden node) และโนดแทรกสอด (Interference node) ซึ่งจะส่งผลให้ทุกๆ แพ็กเก็ตมีโอกาสที่จะเกิดการชน ดังนั้นพลังงานที่ได้จะรวมถึงพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตไปแล้ว แพ็กเก็ตดังกล่าวเกิดการชนขึ้น

ในส่วนที่สองจะแสดงถึงค่าต้นทุนพลังงานรวมที่จะต้องสูญเสีย (Total Energy cost): ซึ่งแสดงแทนด้วย $EMAC_p^{Total}$ หมายความว่า เป็นพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียสำหรับเส้นทาง p

Source address	Source Sequence number	• • •	Hop Count	EMAC of node	Total Energy Cost <EMAC>
----------------	------------------------	-------	-----------	--------------	--------------------------

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงาน

โดยโนดต้นทางจะต้องทำการคำนวณค่า $EMAC$ จากสมการ (3.22) แล้วบรรจุค่าที่ได้ลงในฟิลด์ $EMAC$ of node ของแพ็กเก็ต RREQ และกำหนดค่าเริ่มต้นของ $EMAC_p^{Total}$ ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโนดข้างเคียง ต่อมาเมื่อโนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะต้องทำการคำนวณค่าพลังงานที่สูญเสีย $EMAC$ อีกครั้ง เมื่อโนดคำนวณค่าดังกล่าวเรียบร้อยแล้ว โหนดจะนำ $EMAC$ ที่คำนวณได้ไปบวกกับค่าพลังงานที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ (อยู่ในฟิลด์ Total Energy Cost) แล้วบรรจุค่าใหม่ที่ได้ลงในฟิลด์ของค่าต้นทุนพลังงานรวมของเส้นทางที่คำนวณได้ดังนี้

$$EMAC_p^{Total} = \sum_{i=1}^{D-1} EMAC_i \quad (3.23)$$

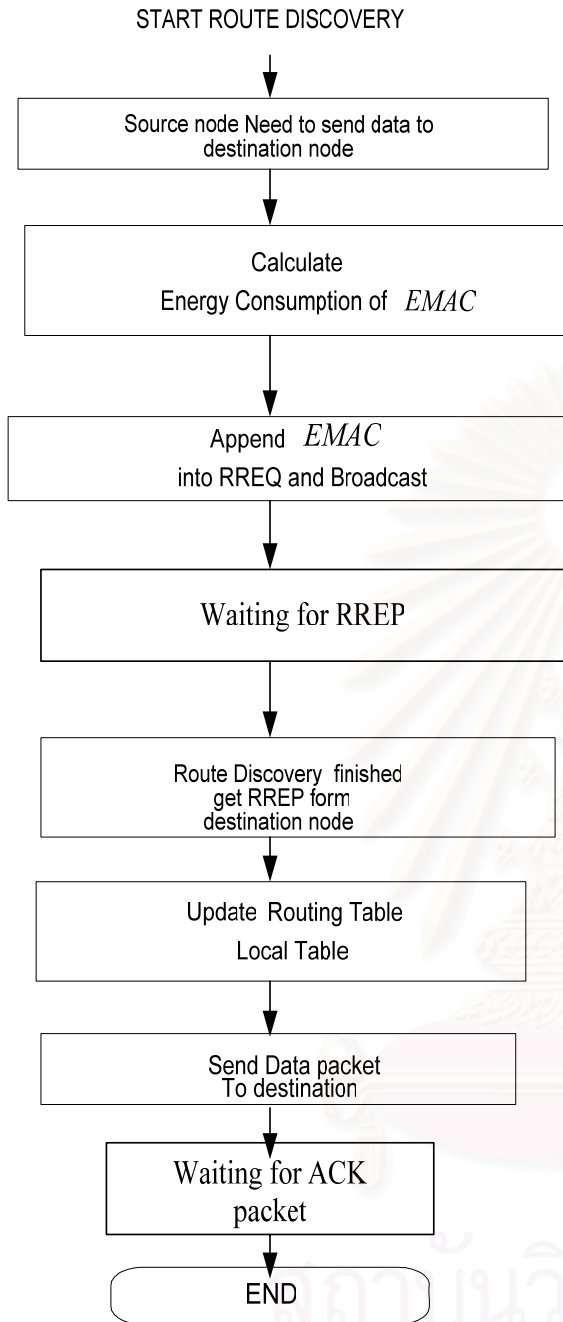
จากสมการที่ (3.12) ถ้าสมมติให้โนดในเส้นทาง p ประกอบไปด้วย ($S = 1, 2, \dots, N = D$) สามารถคำนวณหาต้นทุนรวมพลังงานของเส้นทาง p ได้เป็น $EMAC_p^{Total} = \sum_{i=1}^{N-1} EMAC_i$ ภายหลังจากบรรจุค่าทั้งสองลงในฟิลด์ของแพ็กเก็ต RREQ เรียบร้อยแล้วโนดก็จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโนดข้างเคียงของตัวเองต่อไป ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโนดปลายทาง

โดยขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่โหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นจำนวนหนึ่งคือพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง โดยพิจารณาได้จากสมการที่ (3.24) นั่นคือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนหน้านี้ที่พิจารณาจากเส้นทางที่สูญเสียพลังงานเฉพาะโหนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น [27, 28]

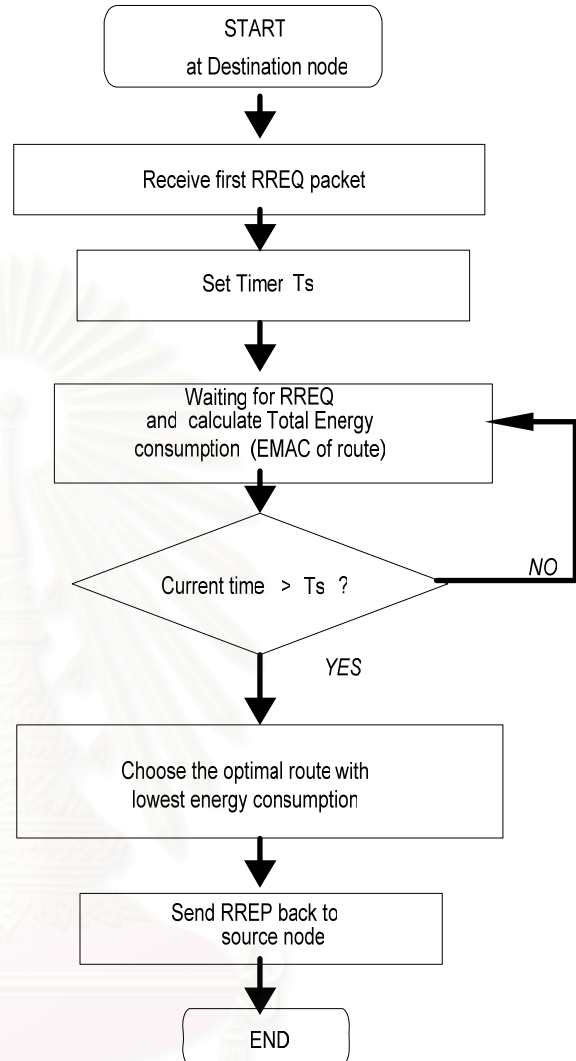
$$p^* = \min_{p \in A} (EMAC_p^{Total}) \quad (3.24)$$

เมื่อ A เป็นเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่โหนดปลายทางได้รับ หลังจากโหนดเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากสมการที่ (3.24) ได้แล้ว โหนดปลายทางทำการตอบกลับไปยังโหนดต้นทางด้วยแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทาง (Route Reply Packet, RREP) โดยเส้นทางที่โหนดปลายทางใช้ส่งจะเป็นเส้นทางที่คาดว่าจะมีการใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยทุกโหนดที่อยู่ในเส้นทางเมื่อได้รับแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางแล้วจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโหนดต้นทาง หลังจากโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทางแล้วโหนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ถูกเลือกแล้วรอแพ็กเก็ตตอบรับ ACK ก็เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบที่นำเสนอ

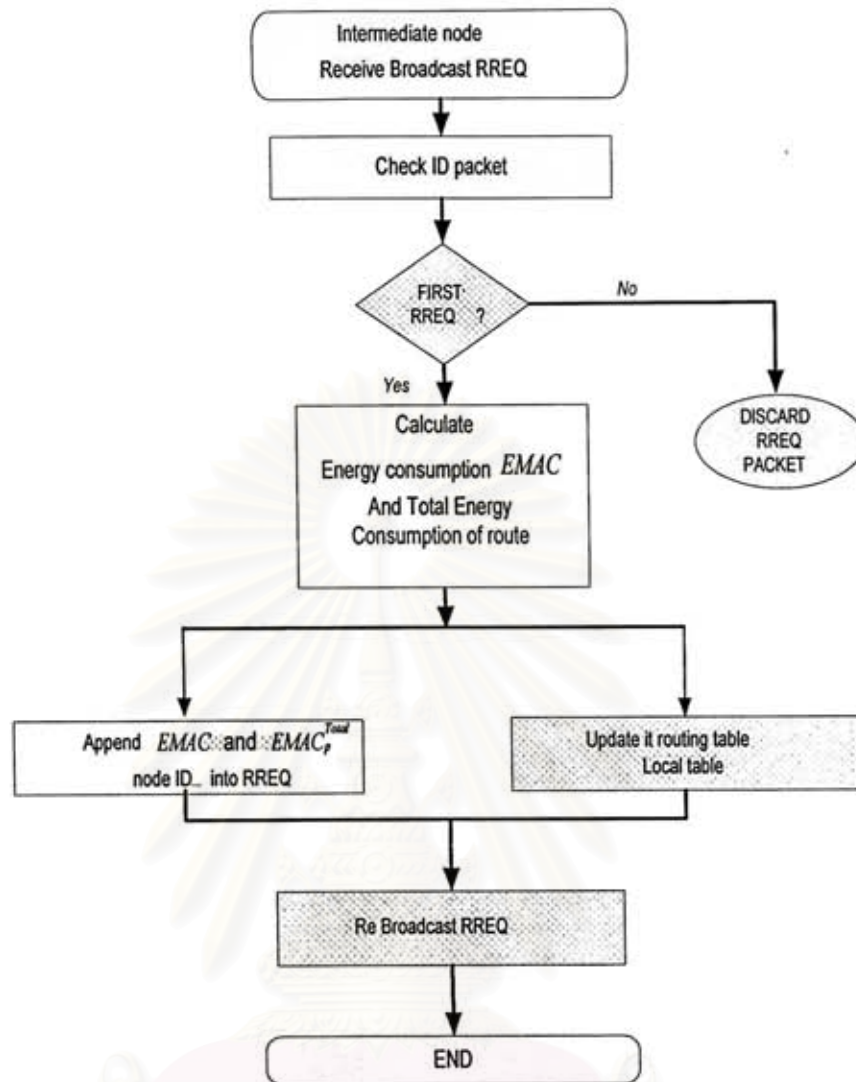
โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.5 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.4 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด



รูปที่ 3.4 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด



รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)

3.1.3 ลักษณะพิเศษของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ

ลักษณะพิเศษของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่ได้นำเสนอ ซึ่งเพิ่มเติมมาจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV นั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ซึ่งความพิเศษดังกล่าวจะทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเลือกใช้การเลือกเส้นทางอย่างมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานมากยิ่งขึ้นและยังช่วยเสริมกระบวนการบางขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่เราต้องการจะพิจารณา โดยสามารถสรุปข้อแตกต่างเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV สามารถให้โนดระหว่างทางสามารถตอบรับเส้นทางได้ถ้าโนดนั้นมีเส้นทางที่สามารถใช้งานได้และมีความใหม่อยู่ในตารางจัดเส้นทาง แต่ในโพรโทคอลที่นำเสนอจะยอมให้โนดปลายทางเท่านั้นที่สามารถตอบรับการร้องขอเส้นทางจากโนดต้นทางได้เนื่องจากเส้นทางที่อยู่ในตารางจัดเส้นทางนั้น จะเป็นข้อมูลที่เก่าและอาจจะใช้พลังงานมากขึ้นถ้าเราเลือกใช้เส้นทางดังกล่าว

2. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะใช้แพ็กเก็ตทักทาย (Hello packet) เพื่อใช้ในการตรวจสอบหรือติดตามการเชื่อมต่อกับโนดข้างเคียง โดยการแพร่กระจายเป็นช่วงระยะเวลาที่สม่ำเสมอ แต่ในโพรโทคอลที่นำเสนอนอกจากจะใช้ตรวจสอบค่าดังกล่าวเพื่อเป็นกระบวนการดูแลเส้นทางแล้วยังใช้แพ็กเก็ตทักทายเพื่อนับจำนวนโนดข้างเคียงซึ่งจะใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับโนดข้างเคียงเพื่อบันทึกจำนวนโนดแทรกสอดในการนำไปคำนวณหาค่าพลังงานที่คาดว่าจะสูญเสียตามสมการ

3. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV กำหนดให้โนดปลายทางเมื่อได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นแพ็กเก็ตแรกก็จะต้องทำการตอบรับเส้นทางทันที (เพราะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดในเชิงของเวลา) แต่สำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอโนดปลายทางจะต้องรอเป็นระยะเวลาหนึ่งหลังจากได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกเข้ามาเพื่อรอแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางจากเส้นทางอื่น ๆ เพื่อให้โนดสามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด เพราะถ้าตอบรับแพ็กเก็ตโดยทันทีเส้นทางที่ได้นั้นอาจจะใช้พลังงานมากกว่าเส้นทางอื่น ๆ ที่เข้ามาภายหลังก็เป็นไปได้

นอกจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานแล้ว วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโพรโทคอลอีกประเภทหนึ่งคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมซึ่งมีรายละเอียดและหลักการทำงานดังนี้

3.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Protocol)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป้าหมายจะเหมือนกับโพรโทคอลแบบคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด โดยโพรโทคอลแบบผสมเกิดจากแนวความคิดที่ว่า การจะช่วยให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานให้มากที่สุดนั้นเราจะต้องเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำและขณะเดียวกันก็ต้องเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่

สูง ซึ่งถ้าพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งก็สามารถจะช่วยยืดอายุได้เช่นกันแต่ประสิทธิภาพที่ได้จะไม่เท่ากับนำทั้งสองเงื่อนไขมาพิจารณาพร้อม ๆ กัน

เพราะฉะนั้นโพรโทคอลที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้จะนำเสนอโพรโทคอลใช้พลังงานต่ำที่สุดและโพรโทคอลแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโหนด (*Battery-Aware Routing Protocol*) ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.3 มาทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายทั้งสองอย่างพร้อมกัน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมไว้ 2 แบบ คือแบบที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโหนดมาเป็นค่าประวิงเวลาก่อนการส่งแพ็กเก็ต โดยโหนดปลายทางจะทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าพลังงานที่สูญเสียจากสมการที่ (3.22) ต่ำที่สุด ส่วนวิธีที่สองจะเป็นการนำค่าทั้งสองคือค่าพลังงานที่คาดว่าจะสูญเสียและค่าพลังงานที่เหลือของโหนดมาคำนวณพร้อมกัน โดยเส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับพลังงานที่เหลือมาก และเส้นทางจะมีการใช้พลังงานน้อย โดยต่อไปจะเป็นหลักการทำงานของโพรโทคอลที่นำเสนอ

3.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่เหลือมาเป็นค่าประวิงเวลา

โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่หนึ่งนี้ จะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโหนดมาคำนวณหาค่าประวิงเวลาก่อนที่จะทำการส่งแพ็กเก็ต โดยโหนดที่มีค่าพลังงานที่เหลือของโหนดสูงจะมีค่าของการประวิงเวลาที่ต่ำ ตรงกันข้ามกับโหนดที่มีระดับพลังงานที่เหลือต่ำๆ จะมีค่าประวิงเวลาที่นานขึ้น โดยเส้นทางใดที่แพ็กเก็ตไปถึงปลายทางเป็นลำดับต้น ๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับพลังงานสูงและทั้งเส้นทางมีการใช้พลังงานที่ต่ำ ซึ่งต่อไปจะเป็นกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลดังกล่าว

3.2.1.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโหนดปลายทางแต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้น โหนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเก็ต RREQ จะต้องมีบรรจุค่า $EMAC$ จากสมการที่ (3.22) และสุดท้ายคือ กำหนดค่าเริ่มต้นของ $EMAC_p^{Total}$ ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียง หลังจากโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะทำการหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งด้วยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่เสนอดังนี้

- ฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay Function)

กลไกการประวิงเวลาจะเปรียบเสมือนกับฟังก์ชันที่แปลงจากอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของ โหนด ไปเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาในการส่งแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งมีหลายฟังก์ชันที่ถูกนำมา เสนอ โดยในบทความอ้างอิง [13] ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลาไว้ด้วยกัน 3 แบบ คือ Linear Convex และ Concave ซึ่งฟังก์ชันแบบ Concave ให้ผลลัพธ์ในการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดี ที่สุด โดยที่ Yu และ Lee [13] ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลาอย่างง่าย ๆ เพื่อนำมาใช้ซึ่งมีลักษณะของ ฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.25)

$$d_{i,t} = \frac{E * D}{e_{i,t} + E} \quad (3.25)$$

เมื่อ $d_{i,t}$ คือ ระยะเวลาที่โหนดใช้ในการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ของโหนด i ณ เวลา t มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที ส่วนค่า E คือ ค่าพลังงานสูงสุดของโหนด (Maximum energy) มีหน่วยเป็นจูล (Joules) D เป็นเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาแพ็กเก็ตสูงสุด (Maximum delay) และ $e_{i,t}$ คือ พลังงานที่เหลืออยู่ของ โหนด i ณ เวลา t ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันในสมการที่ (3.25) ยังคงมีปัญหาคือ ค่าต่ำสุดของการหน่วง เวลาแพ็กเก็ตคือ $D/2$ ก็หมายความว่าถึงแม้ว่าโหนดจะมีพลังงานจากแบตเตอรี่อยู่เต็มแต่โหนดก็ยังคง ถูกหน่วงเวลาแพ็กเก็ตไว้ถึง $D/2$ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอว่าฟังก์ชันที่นำมาใช้ไม่ควรที่จะมีการหน่วง เวลาเกินความจำเป็นในกรณีที่โหนดมีพลังงานจากแบตเตอรี่เต็มหรือค่า $BAT(i,t)$ เท่ากับค่า พลังงานสูงสุดของโหนดเพราะอาจจะทำให้สมรรถนะด้านอื่น ๆ ของระบบลดต่ำลงเช่น การประวิงเวลา เฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลจากปลายถึงปลาย (Average End-to-End Delay) โดยโพทโทคอลที่น่าเสนอ จะยังคงใช้ฟังก์ชันแบบ Concave ซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.26)

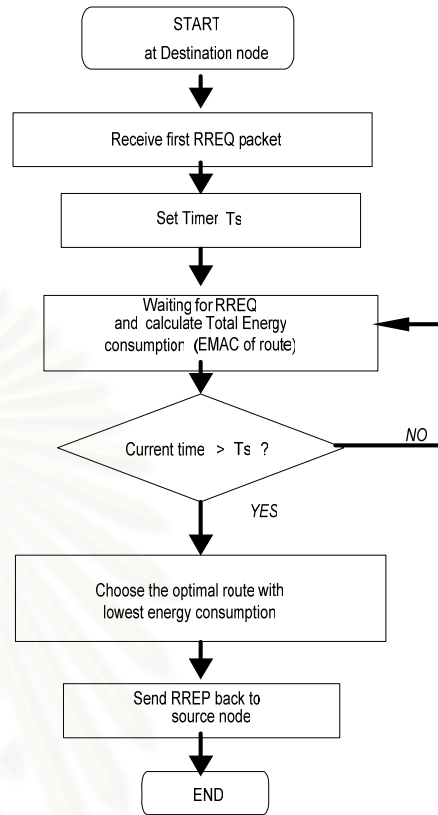
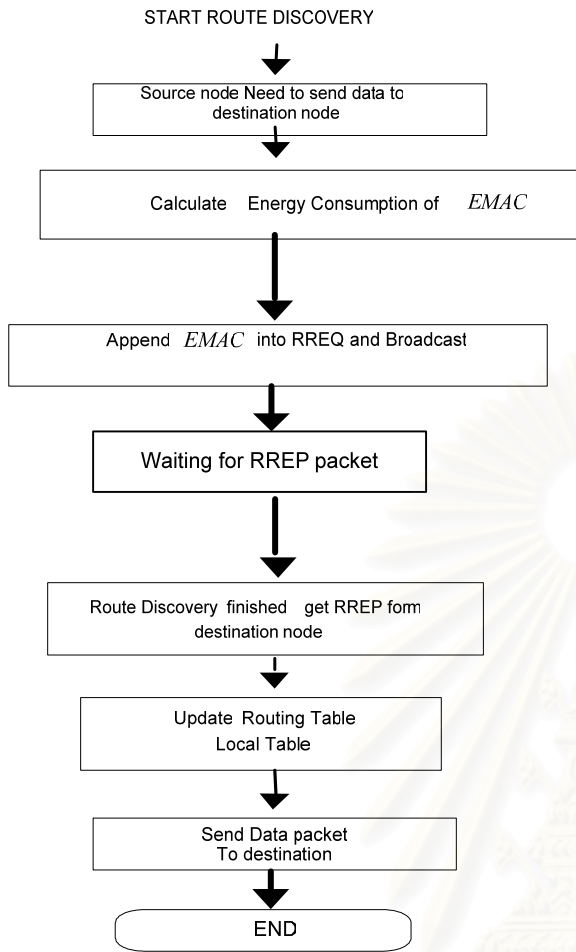
$$d_{i,t} = \frac{D^2 + E^2}{2D} - \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2D}\right)^2 - (BAT(i,t) - E)^2} \quad (3.26)$$

โดยฟังก์ชันที่น่าเสนอจะลดค่าเฉลี่ยเวลาที่หน่วงแพ็กเก็ต และเพิ่มความแตกต่างของเวลาที่ใช้ หน่วงแพ็กเก็ตระหว่างโหนดที่ใกล้หมดอายุการใช้งานกับโหนดที่มีอายุการใช้งานเหลืออยู่เต็ม เพราะฉะนั้นเส้นทางที่แพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทางเป็นอันดับต้น ๆ จะเป็นเส้นทางที่ ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูงเพราะแพ็กเก็ต RREQ ที่ผ่านโหนด ที่มีอายุการใช้งานที่ต่ำจะถูกหน่วงเวลาไว้นาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแพ็กเก็ตเหล่านี้ก็จะถูกโหนดอื่น ๆ ละทิ้งเนื่องจากแพ็กเก็ตที่เข้ามาไม่ใช่แพ็กเก็ตแรก

หลังจากคำนวณค่าประวิงเวลาก่อนส่งแพ็กเก็ตแล้วนั้น ก่อนที่จะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง ในช่วงเวลาที่แพ็กเก็ตถูกหน่วงอยู่นั้น (หรือก่อนที่หมดเวลาการหน่วง

แพ็กเก็ต RREQ ที่ได้ตั้งไว้ โหนดต้องคำนวณค่าพลังงานที่ได้จากสมการที่ (3.22) เหมือนกับขั้นตอนของการคำนวณพลังงานที่สูญเสียในโพรโทคอลแบบใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ เสร็จก็จะบรรจุค่าดังกล่าวลงไปในแพ็กเก็ต RREQ และแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียงต่อไป กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทาง หลังจากโหนดปลายทางได้รับ RREQ แรกแล้วจะตั้งเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อรอ RREQ ที่ได้จากเส้นทางอื่น ๆ หรืออาจจะกำหนดจำนวน RREQ ที่จะรับ โดยแพ็กเก็ต RREQ ที่เข้ามาหลังจากเวลาที่กำหนดไว้จะถูกทิ้งทั้งหมด เมื่อหมดเวลาที่ตั้งไว้หรือได้รับแพ็กเก็ต RREQ ครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.24) คือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หลังจากโหนดเลือกเส้นทางได้แล้ว โหนดปลายทางจะสร้างแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (RREP) เพื่อตอบกลับไปยังโหนดต้นทางให้ทราบ โดยใช้เส้นทางที่เลือกไว้ข้างต้นในการส่งแพ็กเก็ตไปให้โหนดต้นทาง โดยระหว่างที่ส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางกลับไปในนั้นโหนดทุกโหนดที่ได้รับแพ็กเก็ตจะต้องทำการปรับรูปร่างตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเก็ตดังกล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโหนดต้นทาง ภายหลังจากโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทางแล้วโหนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ได้มาก็เป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.8 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนที่เกิดกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.7 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โหนดต้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง

รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทาง ของโหนดปลายทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง

จากกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่ได้กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในช่วงเวลาที่โหนดปลายทางทำการรอฟังเกิดร้องขอเส้นทาง และจากการใช้กลไกการประวิงเวลาทำให้เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ (Battery Lifetime) อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งทำให้เส้นทางที่ดีที่สุดเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่ายดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นทางที่ดีที่สุดของโพรโทคอลทั้งแบบการใช้พลังงานต่ำที่สุด และยืดอายุการใช้งานมากที่สุดที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น

โดยสมการที่ (3.27) แสดงถึงค่าอัตราส่วนระหว่างระดับพลังงานที่สูญเสียมากที่สุดกับระดับพลังงานที่
 เหลือมากที่สุด

$$\xi = \frac{EMAC_{MAX}}{BAT_{MAX}} \quad (3.27)$$

โหนดจะทำการตรวจสอบค่าระดับพลังงานที่เหลือของตัวเองแล้วเปรียบเทียบกับโหนดก่อนหน้า ซึ่งจะ
 ปรับปรุงค่าดังกล่าวมาเรื่อย ๆ เพื่อบันทึกค่าระดับพลังงานต่ำสุดของแต่ละเส้นทาง จากสมการ

$$BAT_i = \min(BAT_j(t)) \quad (3.28)$$

โดยที่ $j \in i$ ซึ่งเป็นโหนดหนึ่งในเส้นทาง i

ในขณะเดียวกันโหนดก็ทำการคำนวณค่าพลังงานตามแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ
 คำนึงถึงพลังงานตามสมการที่(3.23) จากนั้นโหนดปลายทางจะทำการเลือกเส้นทางจากสมการที่(3.29)

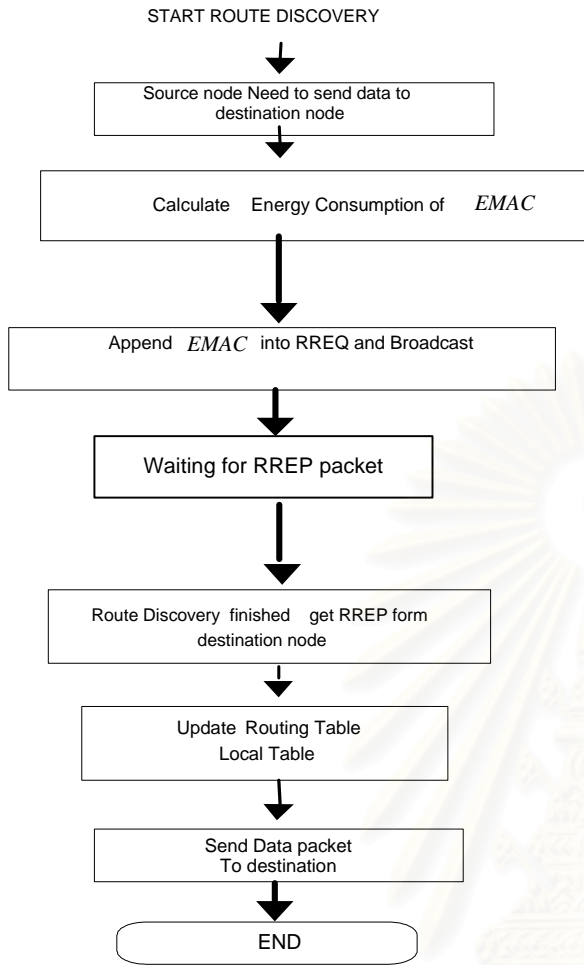
$$BEMAC_i = \frac{EMAC_i^{Total}}{\xi \cdot BAT_i} \quad (3.29)$$

จากนั้นปลายทางจะเลือกเส้นทางที่มีค่า $BEMAC_i$ ต่ำที่สุด ซึ่งเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไป
 ด้วยโหนดที่มีพลังงานที่ใช้ตลอดทั้งเส้นทางต่ำและหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีโหนดเหลือแบตเตอรี่ต่ำๆ ดัง
 สมการที่ (3.30)

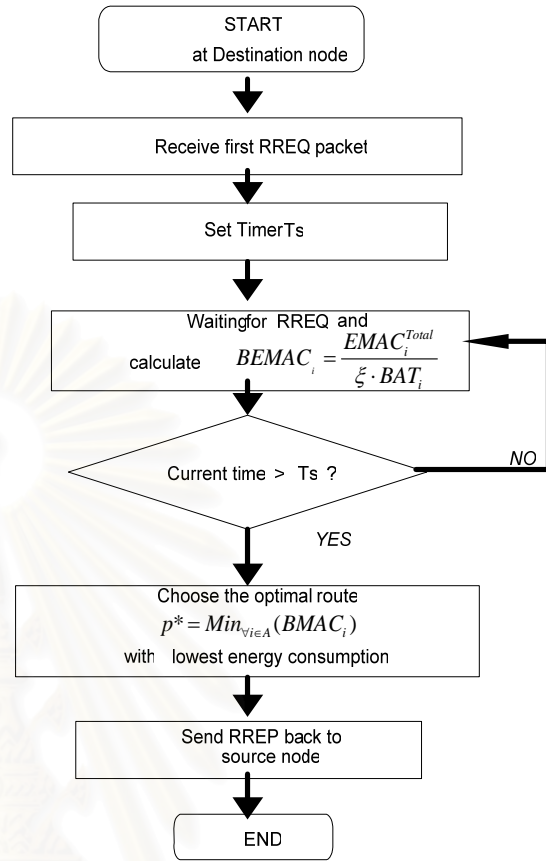
$$p^* = \text{Min}_{i \in A} (BMAC_i) \quad (3.30)$$

เมื่อ i เป็นเส้นทางหนึ่งในทั้งหมด A เส้นทาง ซึ่งเมื่อโหนดปลายทางทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าตาม
 สมการที่ (3.30) ที่มากที่สุดแล้ว โหนดปลายทางจะทำการตอบกลับด้วย ACK ไปยังต้นทางด้วยเส้นทาง
 ที่เลือกไว้เป็นการสิ้นสุดกระบวนการค้นหาเส้นทางในแบบการจัดสรรเส้นทางแบบผสมในวิธีที่สอง

เพื่อให้ง่ายในการเข้าใจกระบวนการทำงานของโหนดจึงได้เขียนแผนผังกระบวนการ
 ค้นหาเส้นทางในแบบวิธีที่นำเสนอตั้งรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.12 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนด
 จะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนที่เกิดกับโหนดต้นทาง
 ส่วนผังงานในรูปที่ 3.11 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิด
 ขึ้นกับโหนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.10 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ
โหนดต้นทางแบบผสมวิธีที่สอง



รูปที่ 3.11 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทาง
ของโหนดปลายทางแบบผสมวิธีที่สอง

โดยเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่หนึ่งคือลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ อย่างไรก็ตาม การพยายามลดการใช้พลังงานไม่ใช่เป็นแนวทางที่ดีที่สุดเพราะว่าพลังงานที่ใช้ไม่ได้สะท้อนถึงอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดโดยตรง

จึงมีการนำเสนอในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่ค้ำึงถึงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของโนด โดยนำตัววัดดังกล่าวมาใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางคือเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด โดยพยายามทำให้โครงข่ายสามารถยืดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยเลือกใช้เส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่นำเสนอในแบบการจัดสรรเส้นทางที่ค้ำึงถึงพลังงาน นอกจากนี้เส้นทางดังกล่าวจะต้องผ่านโนดที่มีค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งเราเรียกโพรโทคอลนี้ว่าเป็น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

หลักการงานและรายละเอียดของโพรโทคอลที่นำเสนอได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา ส่วนเนื้อหาของงานวิทยานิพนธ์ในบทนี้ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงสภาพแวดล้อมของการจำลอง โดยจะกล่าวถึงรูปแบบที่ใช้ในการจำลองอย่างเช่น พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกถึงสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง เป็นต้น ส่วนที่สองจะกล่าวถึงผลการจำลองรวมทั้งการวิเคราะห์ผลสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยจะเปรียบเทียบกับโพรโทคอลมาตรฐาน IEEE 802.11 และเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอภายใต้รูปแบบการจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงจำนวนโหนดที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดค่า “จำนวนโหนดแทรกสอด (Interfering node)” ที่มีผลทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับโพรโทคอลแบบมาตรฐานว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือด้อยกว่าอย่างไรเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment)

สภาพแวดล้อมและโปรแกรมในการจำลองกระบวนการทำงานทั้งหมดในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม Network Simulator 2 (NS2) [30] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่จำลองแบบตามลำดับเหตุการณ์ โดยสมรรถนะของโพรโทคอลจะเปลี่ยนไปเมื่อจำลองภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน และเพื่อให้เข้าใจโพรโทคอลที่นำเสนอในแง่มุมต่าง ๆ ได้มากขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการจำลองโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอภายใต้สถานการณ์ที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ใช้ในการจำลองมีดังนี้

4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองนั้นสามารถกำหนดได้หลากหลายพารามิเตอร์ แต่ปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบ (Offered load) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายโดยรวม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบสามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก ขนาดของแพ็กเก็ต (Packet size) จำนวนการเชื่อมต่อ (Number of connection) และอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ (Packet rate) ในการทดสอบนี้ต้องการจะประเมินว่าเมื่อปริมาณ

โหลดที่ป้อนให้โครงข่ายเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อโพรโทคอลที่นำเสนออย่างไร ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะแสดงถึงปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายดีที่สุดคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ โดยการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลก็จะทำให้ปริมาณโหลดในแต่ละการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทางสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
จำนวนโหนด	50 โหนด
ขนาดของพื้นที่ในการจำลอง	1000 X 1000 เมตร ²
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	900 วินาที
จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ	40 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 [31]
ความเร็วสูงสุดของโหนด	10.0 เมตร/วินาที
เวลาหยุด (Pause Time)	60 วินาที

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในส่วนของ การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้นจะใช้ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยต่อไปจะกล่าวถึงแบบจำลองการใช้พลังงาน

➤ **แบบจำลองการใช้พลังงาน**

- กำหนดให้ทุกโหนดมีกำลังในการส่งสัญญาณคงที่และเท่ากันทุกโหนด (Constant-Power) ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง (P_t), การรับ (P_r) และการได้ยิน ($P_{overhear}, P_o$) มีค่าเท่ากับ 0.6635, 0.395, 0.200 วัตต์ และพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะว่าง

(P_{idle}) เท่ากับ 0.045 วัดตามลำดับ ส่วนค่ากำลังงานที่ใช้ในโหมดสถานะหลับมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการพิจารณาพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้

- พลังงานเริ่มต้นของโหนดมีค่าเท่ากับ 10 จูล
- อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 11 Mbps ด้วยระยะทาง 180 เมตร
- อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ตควบคุมในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (RTS/CTS/ACK) เท่ากับ 2 Mbps

4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ชี้วัดคุณภาพการให้บริการของโพรโทคอลทั่วไป ๆ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ (Energy per Good-put) เป็นจำนวนพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายสูญเสียต่อจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดปลายทางได้รับอย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนให้เห็นว่าโครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ถ้าค่าที่ได้มีค่าที่ต่ำนั้นแสดงว่าโครงข่ายมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูง หน่วยที่ใช้คือ จูล/แพ็กเก็ต
- อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network lifetime) สามารถวัดได้จากเวลาเริ่มต้นในการจำลองจนกระทั่งมีโหนดแรกในโครงข่ายไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่เหลืออยู่หรือโหนดนั้นไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป
- อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด (Average all nodes lifetime) เป็นค่าที่แสดงถึงอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยของทุก ๆ โหนดในโครงข่ายจนหมดระยะเวลาการทดสอบ
- อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ (Packet delivery ratio) สามารถคำนวณได้จากจำนวนแพ็กเก็ตที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จต่อจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ส่งออกจากโหนดต้นทาง

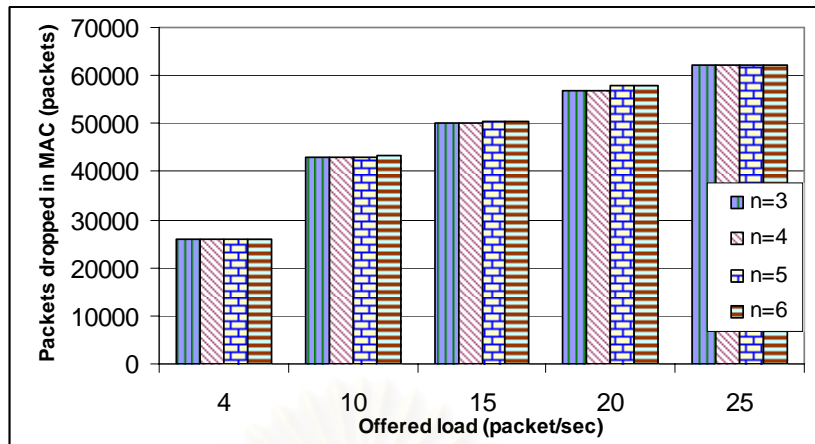
- ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย (Average end-to-end delay) เป็นค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ตจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งมีหน่วยเป็น วินาที
- จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้ง (Dropped Packets) ทั้งหมดในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งคือแพ็กเก็ต RTS/CTS/DATA และ ACK ที่ถูกละทิ้งจากสาเหตุต่างๆ เช่น เกิดการชนของแพ็กเก็ต แพ็กเก็ตหาเส้นทางไม่เจอ เป็นต้น

4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ

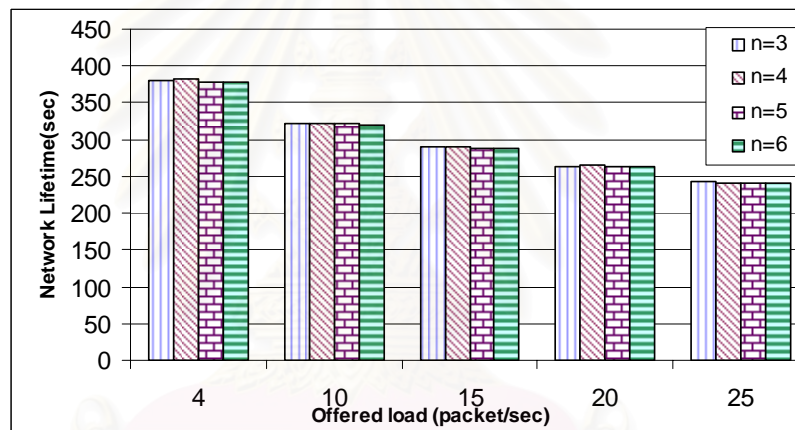
ในส่วนนี้จะแสดงผลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบของโพรโทคอลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโพรโทคอลมาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแต่ละประเภทจะทำการทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

4.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน (Power-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่นำเสนอเป็นการนำพลังงานที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณาในการเลือกเส้นทาง โดยให้ "Energy of MAC (EMAC)" แทนชื่อของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยแบบจำลองการใช้พลังงานดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องหาค่าจำนวนโหนดแทรกสอด (Interfering node) ที่พลังในการส่งสามารถส่งผลกระทบต่อโหนดที่กำลังส่งหรือรับแพ็กเก็ตอยู่ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการชนของแพ็กเก็ตได้ การจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมดังกล่าวจะทดสอบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่จะนำเสนอ โดยจำนวนโหนดที่กำหนดแล้วสามารถลดการชนกันของแพ็กเก็ตมากที่สุดและอายุการใช้งานของโหนดยาวนานที่สุด จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพต่อไป จากการจำลองเบื้องต้นเพื่อดูค่าจำนวนโหนดแทรกสอดที่อยู่ในระยะแทรกสอด (Interference range) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ระยะดังกล่าวเท่ากับ 300 เมตร ดังนั้นระยะแทรกสอดจะอยู่ในช่วงมากกว่าระยะของการส่งแพ็กเก็ตควบคุมแต่ไม่เกินระยะ 300 เมตร จากการจำลองเบื้องต้นเพื่อดูจำนวนโหนดแทรกสอด พบว่าจำนวนโหนดแทรกสอดที่เป็นไปได้จะไม่เกิน 6 โหนด ดังนั้นเพื่อหาค่าจำนวนโหนดแทรกสอดที่เมื่อส่งพร้อมกันแล้วสามารถมารบกวนกับโหนดที่กำลังส่งและรับแพ็กเก็ต จะทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยปรับเปลี่ยนค่าโหนดแทรกสอดจาก 3 โหนด ถึง 6 โหนด สาเหตุที่ไม่พิจารณาโหนดแทรกสอด 1 โหนดและ 2 โหนด เนื่องจากพลังงานจากโหนดทั้งสองรวมกันยังไม่พอที่จะมารบกวนโหนดที่ส่งหรือรับได้ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งจะแสดงถึงจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนและอายุการใช้งานของโหนด



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

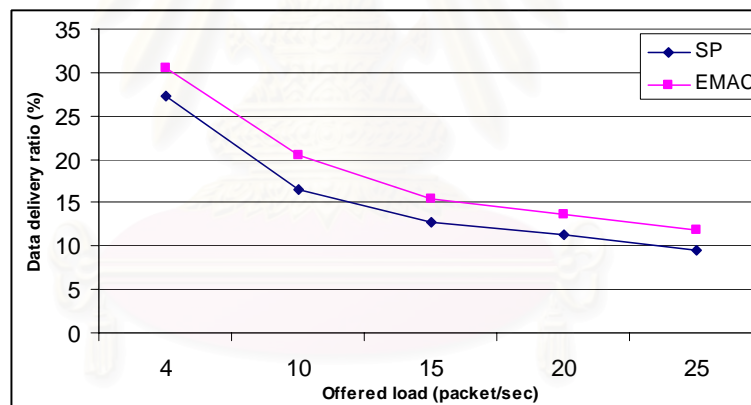
จากรูปที่ 4.1 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโนดเพิ่มมากขึ้น จำนวนโนดแทรกสอดที่กำหนดแล้วทำให้จำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดการชนน้อยที่สุดมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ที่โนดแทรกสอดมีค่าเท่ากับ 3 และ 4 โหนด จะช่วยลดจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนดีกว่ากรณีกำหนดให้โนดแทรกสอดเท่ากับ 5 และ 6 โหนด เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะมีความคับคั่งหรือจำนวนโนดแทรกสอดน้อย ซึ่งส่งผลให้เกิดการชนกันของโนดน้อยตามไปด้วย ส่วนในรูปที่ 4.2 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโนดเพิ่มมากขึ้น จำนวนโนดที่กำหนดแล้วให้อายุการใช้งานของโครงข่ายนานที่สุดคือ 3 และ 4 โหนด เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะมีการสูญเสียพลังงานจากการส่งแพ็กเก็ตช้ากว่ากรณีที่กำหนดให้โนดแทรกสอดเท่ากับ 5 และ 6 โหนด แต่ถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวเท่ากับ 3 โหนด ค่าประวิงเวลาในการส่งแพ็กเก็ตก็จะนานขึ้นเนื่องจากการหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งของโนด

แทรกสอดมากเกินไป ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพโพรโทคอลการจราจรเส้นทางที่นำเสนอจะกำหนดให้จำนวนโหนดแทรกสอดที่มีผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเก็ตเท่ากับ 4 โหนด

เมื่อได้ค่าของจำนวนโหนดแทรกสอดที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอโดยจะใช้สัญลักษณ์ *EMAC* แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งโพรโทคอลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอคือ โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ AODV ซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจเส้นทาง (SP) และโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบ MTPR [8] แต่เนื่องจากในการจำลองได้กำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่ ผลที่ได้จากโพรโทคอลแบบ MTPR จะเหมือนกับกรณีของโพรโทคอลแบบ AODV

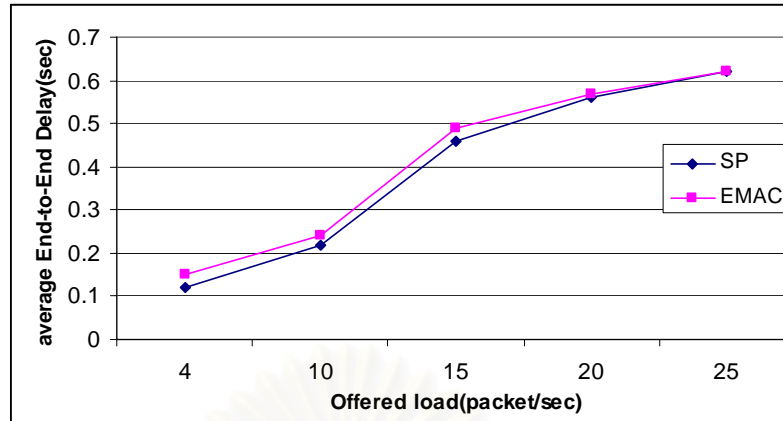
4.2.1.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

ผลการทดสอบสำหรับโพรโทคอลในประเภทที่คำนึงถึงพลังงาน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.8



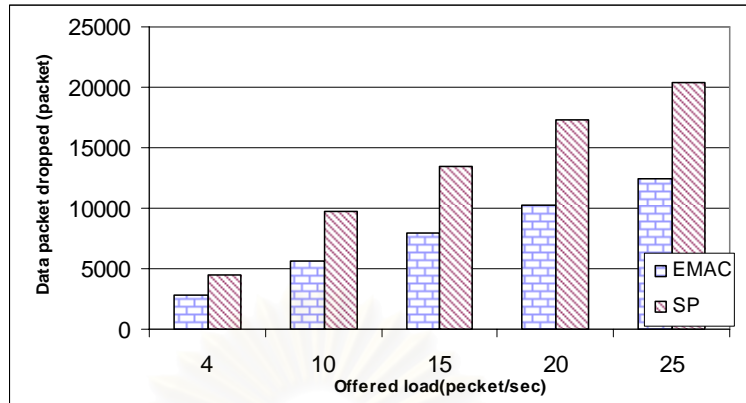
รูปที่ 4.3 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

เส้นทางที่ได้ถือได้ว่าเป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือ โดยโพรโทคอลที่นำเสนอนอกจากจะเลือกเส้นทางที่มีความคับคั่งของโหนดต่ำแล้วยังคำนึงถึงผลกระทบของกำลังงานที่โหนดแทรกสอดใช้ในการส่งแพ็กเก็ต ซึ่งถ้ามีจำนวนโหนดแทรกสอดมากที่มีการส่งแพ็กเก็ตพร้อมๆกัน ก็จะมีผลทำให้เกิดการชนของแพ็กเก็ตได้ ถ้าโหนดเกิดการชนของแพ็กเก็ตบ่อยๆ จะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานและจะส่งผลกระทบต่อทั้งโครงข่ายได้

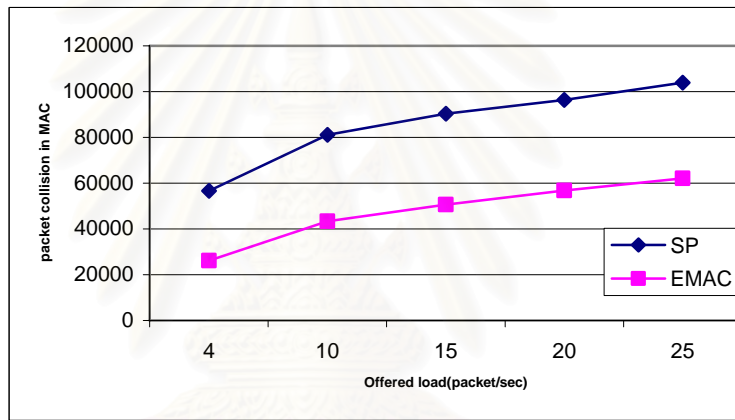


รูปที่ 4.4 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายทางเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

รูปที่ 4.4 แสดงการประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายทางเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล จากรูปโพรโทคอลแบบ SP จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดอีกทั้งไม่สนใจถึงจำนวนโนดข้างเคียง ดังนั้นเส้นทางที่ได้จะให้ค่าประวิงเวลาที่ต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอเนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอนั้น เส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่หลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งของโนดสูง ๆ ดังนั้นเส้นทางที่ได้ก็จะอ้อมขึ้นกว่าแบบ SP ซึ่งส่งผลต่อค่าประวิงเวลาของการส่งแพ็กเก็ต แต่ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลมีค่ามากขึ้นประมาณ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที โพรโทคอลแบบ SP จะให้การประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางของแพ็กเก็ตที่มีแนวโน้มสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ เพราะฉะนั้นการประวิงเวลาของแพ็กเก็ตนอกจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนฮอป (Hop count) แล้วยังขึ้นอยู่กับความคับคั่งที่เกิดขึ้นกับเส้นทางนั้นด้วย ซึ่งโพรโทคอลการที่นำเสนอ จะให้ค่าการประวิงเวลาที่ต่ำกว่าเมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสูง ๆ เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอจะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งสูงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในกรณีที่ปริมาณไหลในโครงข่ายมีค่าต่ำ ๆ (อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลมีค่าต่ำ) การประวิงเวลาของแพ็กเก็ตจะเกิดจากความยาวของเส้นทางที่แพ็กเก็ตใช้เดินทางจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางเป็นหลัก

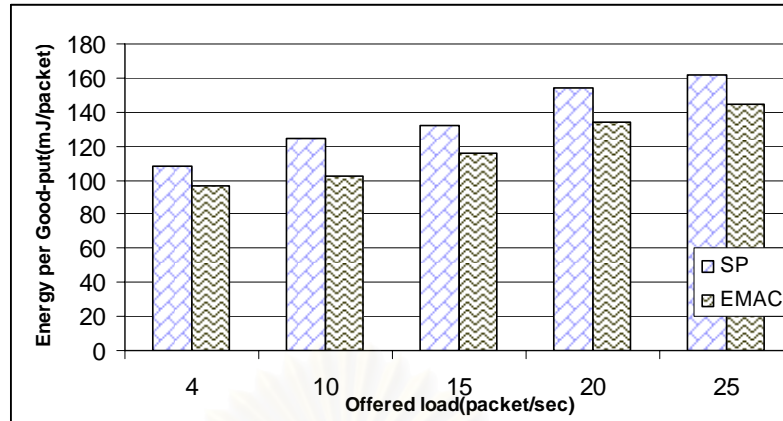


รูปที่ 4.5 จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกละทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



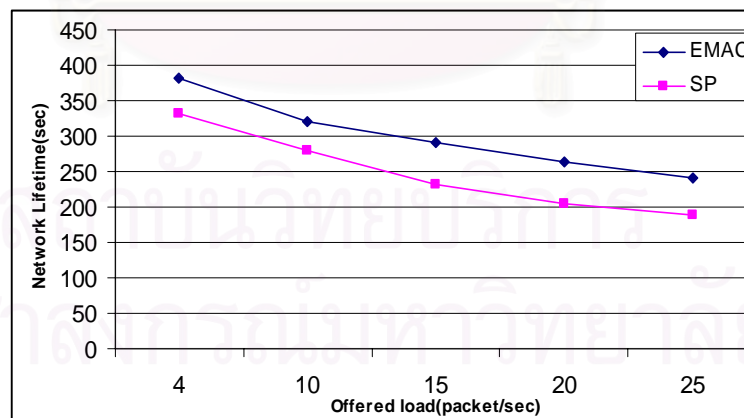
รูปที่ 4.6 จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงถึงจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกละทิ้งในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง และรวมทุกแพ็กเก็ตในเกิดการชนซึ่งในที่นี่จะรวมถึงแพ็กเก็ตข้อมูลกับแพ็กเก็ตควบคุม RTS/CTS และ ACK จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดการชนของแพ็กเก็ตข้อมูลและแพ็กเก็ตควบคุมได้มากขึ้นถึงสองเท่าของโพรโทคอลแบบ SP เนื่องจากแบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอ นั้น คำนึงถึงผลกระทบของพลังงานที่เน็ตใช้ด้วย อีกทั้งพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความหนาแน่นของโหนดสูงๆ ทำให้สามารถลดการชนกันของแพ็กเก็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

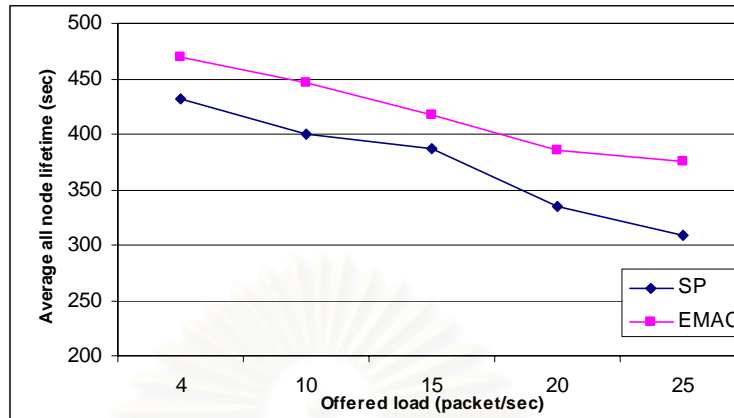


รูปที่ 4.7 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ต

รูปที่ 4.7 เป็นผลจากการทดสอบประสิทธิภาพด้านพลังงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ จากรูปที่ 4.7 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมีค่าลดลงคือ พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความคับคั่งของโครงข่ายซึ่งส่งผลให้การชนกันของข้อมูลมากขึ้น อีกทั้งข้อจำกัดของปริมาณแพ็กเก็ตที่แต่ละโหนดสามารถรองรับได้เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มมากขึ้น แต่โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดการละทิ้งของแพ็กเก็ตข้อมูลได้ ดังนั้นประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานจึงดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP ที่ไม่คำนึงถึงความคับคั่งของโหนดซึ่งทำให้แพ็กเก็ตเกิดการชนกันมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ



รูปที่ 4.8 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.9 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อจำนวนอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจะทำให้ปริมาณไหลดที่มีในโครงข่ายเพิ่มขึ้น ทำให้โครงข่ายมีการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น โดยจากรูปที่ 4.8 โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP เฉลี่ยประมาณร้อยละ 16.25 ณ ทุกๆอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

โพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หรือพยายามลดพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากโนดข้างเคียงที่ไม่เกี่ยวข้องกับ การสื่อสารและพยายามลดจำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดการชนเนื่องจากปัญหาของโนดซ่อนเร้นและโนดแทรกสอด จึงทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึงแม้ว่าปริมาณไหลดในโครงข่ายจะมีปริมาณที่สูงโพรโทคอลที่นำเสนอจะให้ค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดสูงกว่าโพรโทคอลแบบ SP ซึ่งแน่นอนว่าการเพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดจะเป็นการเพิ่มเวลาเพื่อให้โหนดในโครงข่ายสามารถทำงานร่วมกันได้มากขึ้น ทำให้โครงข่ายสามารถส่งแพ็กเก็ตได้มากขึ้นและอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค้ำึงถึงใช้พลังงานที่น่าเสนอ สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็ยังส่งผลทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ไม่พิจารณาถึงพลังงานอย่างเช่น โพรโทคอลแบบ SP นอกเหนือจากประสิทธิภาพด้านพลังงานแล้ว โพรโทคอลที่น่าเสนอยังให้คุณภาพการให้บริการคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จในระดับที่ดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP ซึ่งจำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดการชนกันลดลงอย่างมาก จึงทำให้ลดการสูญเสียพลังงานจากการส่งแพ็กเก็ตซ้ำได้ในระดับหนึ่ง อีกทั้งค่าการประวิงเวลาก็มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

ต่อไปจะเป็นผลการทดสอบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่น่าเสนอทั้งสองแบบ โดยในแบบที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโหนดมาใช้เป็นค่าประวิงเวลาก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ต ส่วนในแบบที่สองจะเป็นการนำค่าทั้งพลังงานที่คาดว่าจะใช้ในแบบจำลองการใช้พลังงานที่ได้คิดค้นและค่าพลังงานที่เหลือของโหนดมาพิจารณาพร้อมกัน

4.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่น่าเสนอนอกจากจะค้ำึงถึงการใช้พลังงานของเส้นทางแล้วยังค้ำึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโหนดด้วย เพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอไว้สองแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโหนดมาคำนวณเพื่อหาค่าประวิงเวลาก่อนที่จะทำการส่งแพ็กเก็ตต่อไป ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์ “BDEMAC (Battery Delay and Energy of MAC)” แทนโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง ส่วนแบบที่สองนั้นจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโหนดและพลังงานที่เส้นทางเข้ามาคิดคำนวณด้วยกัน ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยให้สัญลักษณ์ “BEMAC (Battery and Energy of MAC)” แทนโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่สอง ในส่วนของโพรโทคอลจะนำมาเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่น่าเสนอนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR) กรณีที่ค่า γ เท่ากับร้อยละ 50 [15] และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Shortest Path (SP) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโพรโทคอลที่น่าเสนอ

เนื่องจากประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบ CMMBCR ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (γ) และในบทความ [15] ไม่ได้มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้งาน แต่โดย

หลักการของโพรโทคอลที่ต้องการจะทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานต่ำที่สุดและโหนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคพร้อมกันเพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยจะเลือกใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดแบบ MTPR เมื่อเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงกว่าร้อยละ 50 ของระดับความจุสูงสุด แต่ถ้าไม่มีเส้นทางใดจากเส้นทางทั้งหมดมีระดับความจุแบตเตอรี่สูงกว่าค่าที่กำหนด โพรโทคอลแบบ CMMBCR จะเลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR [12] ที่คำนึงถึงระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือน้อยที่สุดเป็นหลัก เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (γ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 50 ของความจุแบตเตอรี่สูงสุด เพื่อกำหนดให้โพรโทคอลแบบ CMMBCR ได้ใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และ MMBCR อย่างเท่าเทียมกัน โดยจะไม่ใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใดแบบหนึ่งมากเกินไป

4.2.2.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมแบบที่หนึ่ง หรือ “BDEMAC” ที่นำเอาระดับพลังงานที่เหลือของโหนดมาคำนวณเพื่อหาค่าประวิงเวลาก่อนที่จะมีการส่งแพ็กเก็ต เป็นการรวมเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่ทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งทำให้โหนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่อย่างเสมอภาคเข้าด้วยกันเพื่อให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่ามากยิ่งขึ้น โดยก่อนที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบที่หนึ่งนั้น จำเป็นต้องทำการหาช่วงค่าของการประวิงเวลาและเวลาที่ใช้ในการรอคอยแพ็กเก็ตที่เหมาะสมก่อน เนื่องจากค่าทั้งสองเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยต่อไปจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลเมื่อปรับเปลี่ยนช่วงของการประวิงเวลา

4.2.2.2 การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลา (Maximum Delay) และเวลาการรอคอย (Time Delay) ที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ

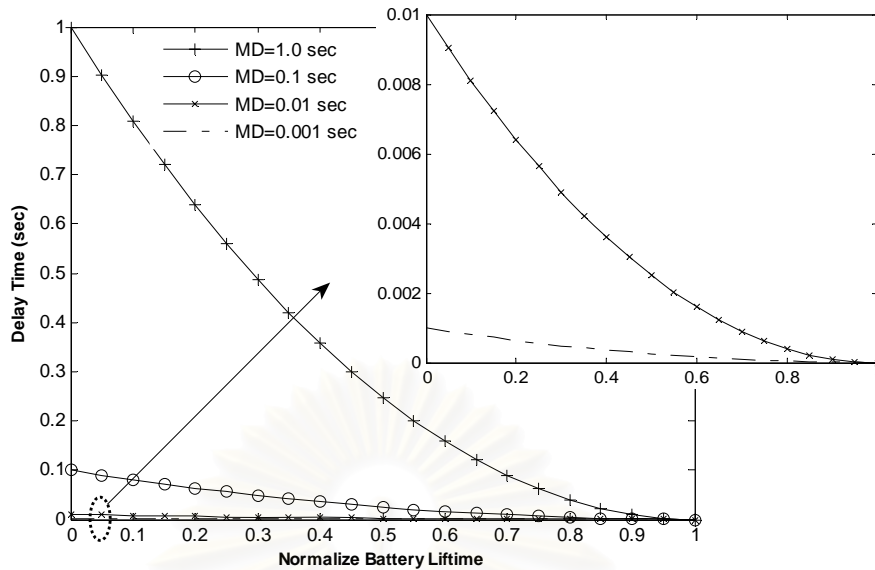
ในส่วนนี้เราจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนคือ การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม (Maximum Delay, MD) จากสมการที่ (3.26) ที่นำมาใช้กับการจัดสรรเส้นทางแบบผสม การทดสอบในส่วนที่สองคือ การพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย (Time Delay, TD) ก่อนที่โหนดปลายทางจะทำการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสม

ค่าการประวิงเวลาสูงสุดและเวลาการรอคอยเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่โพรโทคอลการ จัดสรรเส้นทางที่นำเสนอควรจะกำหนดค่าการใช้งานให้เหมาะสม เพื่อจะทำให้โครงข่ายมี ประสิทธิภาพมากที่สุด

➤ การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay)

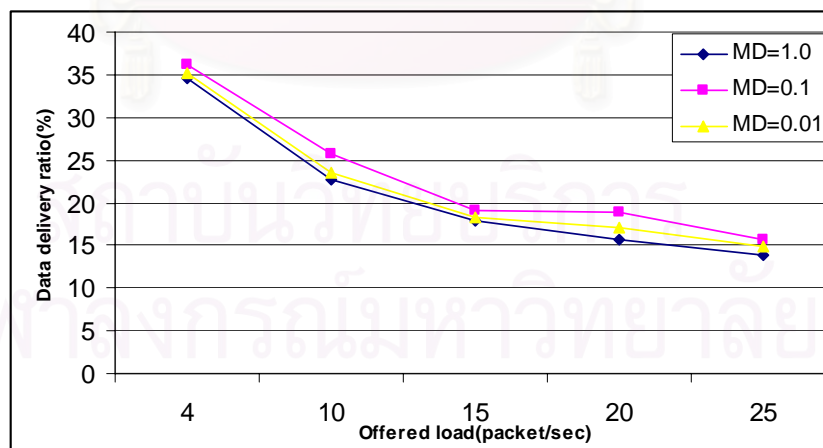
จุดประสงค์ของการใช้ค่าการประวิงเวลาที่ใช้ในโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยการประวิงเวลา ที่เพิ่มเข้าไปในแต่ละโหนดนั้น จะเป็นเวลาที่ใช้ในการควบคุมให้กระบวนการค้นหาเส้นทางเป็น ตามที่ต้องการ ดังนั้นโพรโทคอลจะมีความสามารถในการควบคุมการประวิงเวลาของแพ็กเก็ตที่ร้อง ขอบได้ นั้น ค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่จะใช้นั้นจะต้องไม่ถูกรบกวนด้วยค่าการประวิงเวลาที่เกิดจาก การทำงานในส่วนอื่น ๆ ของโครงข่าย ซึ่งค่าประวิงเวลาในส่วนอื่นจะเกิดจาก ค่าประวิงเวลาการ แพร่กระจาย (Propagation Delay) ค่าประวิงเวลาการส่ง (Transmission Delay) และค่าประวิง เวลาที่เกิดจากการประมวลผลของโหนด (Processing Delay) ดังนั้นค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่ นำจะให้ผลที่ดีควรจะมีค่าที่สูงกว่าค่าประวิงเวลาทั้งสามสาเหตุรวมกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ วัดค่าประวิงเวลาที่เกิดจากการส่งและการประมวลผล เมื่อส่งแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) โดยใช้โปรแกรม NS2 และพบว่าค่าที่ได้อยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที ส่วนค่าประวิงเวลาการ แพร่กระจายมีค่าต่ำมากจนสามารถละเลยไปได้ แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าการประวิงเวลา สูงสุดให้มีค่าสูง ๆ ก็ส่งผลที่ไม่ดีต่อโครงข่ายด้วยเช่นกัน เพราะจะเป็นการไปเพิ่มระยะเวลาการ ประวิงเวลาของแพ็กเก็ตข้อมูลให้แก่โครงข่าย อีกทั้งอาจจะทำให้เส้นทางที่ได้จากกระบวนการ ค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่หมดอายุแล้ว

จากรูปที่ 4.10 แสดงฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของ ค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม เมื่อให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay แทนด้วย สัญลักษณ์ MD) 4 ค่า คือ 1.0 , 0.1, 0.01 และ 0.001 วินาที ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการ ทดสอบค่า 3 ค่าคือ MD = 1.0 วินาที MD = 0.1 วินาที MD = 0.01 วินาที โดยที่ MD = 0.001 นั้นเป็นเวลาที่ยาวเกินไป จึงไม่นำมาทดสอบ โดยการทดสอบจะทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่ เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางจาก 4 ไปจนถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที ซึ่ง พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบก็ยังคงใช้เหมือนกับการทดสอบข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่



รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม

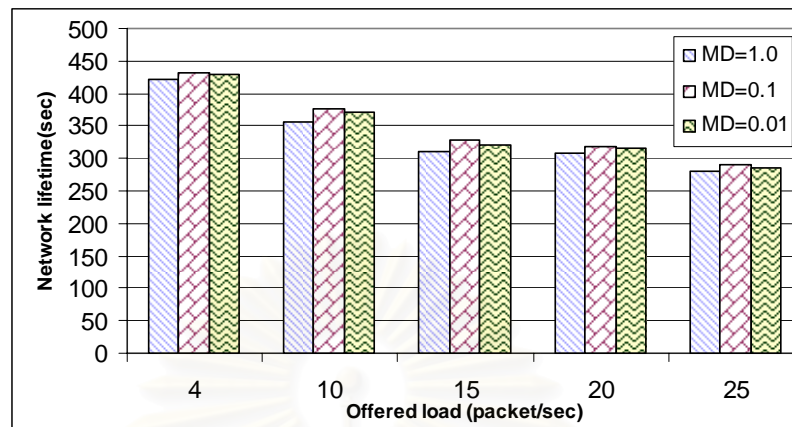
รูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงผลกระทบต่อสมรรถนะของโครงข่ายเมื่อปรับเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาสูงสุด ภายใต้การทดสอบที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง โดยในรูปที่ 4.11 แสดง อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ส่วนในรูปที่ 4.12 แสดงพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลและรูปที่ 4.13 เป็นค่าอายุการใช้งานของโครงข่าย



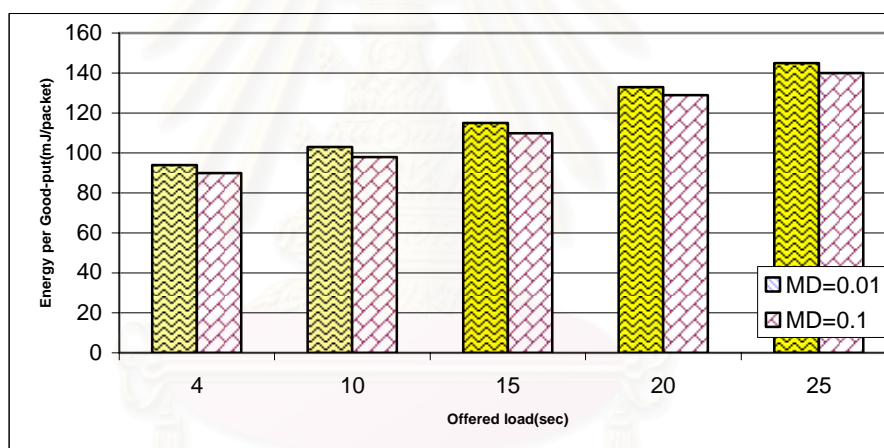
รูปที่ 4.11 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.1 วินาทีจะทำให้โครงข่ายมีอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 1.0 และ MD =

0.01 วินาที ซึ่งการกำหนดค่า MD สูงเกินไป (MD = 1.0) จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายลดลง



รูปที่ 4.12 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพด้านพลังงานของโครงข่าย จากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นก็จะทำให้โปรโตคอลที่กำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.1 วินาทีจะให้ค่าทั้งสองค่าที่ดีที่สุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโนดต้นทางนั้น โดยจากรูปที่ 4.12 ค่าที่ได้ในกรณีที่กำหนดค่า MD = 0.1 จะเพิ่มอายุการใช้งานได้สูงที่สุดที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุดเมื่อเทียบกับโปรโตคอลที่กำหนดค่า MD = 0.01 ที่ให้ค่ารองลงมา นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาว่าโปรโตคอลใดมีการใช้พลังงานคุ่มค่ามากกว่ากันระหว่างค่า MD = 0.1 และ 0.01 ที่แสดงในรูปที่

4.13 ซึ่งผลที่ได้พบว่าโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 0.1 สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 0.01 วินาที

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay) ก็มีผลต่อประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย และค่าการประวิงเวลาที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งยากที่จะกำหนดได้ว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุดและสามารถนำไปใช้ได้กับทุก ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถที่จะกำหนดค่าเป็นช่วงได้ เพราะถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งจากสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ก่อนการทดสอบว่าช่วงของการประวิงเวลาสูงสุดที่จะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพนั้นน่าจะอยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที เพราะว่าเป็นช่วงที่ทำให้โพรโทคอลสามารถควบคุมการประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางในกระบวนการค้นหาเส้นทางได้โดยที่ไม่มีการประวิงเวลาในส่วนอื่นเข้ามามีผลกระทบ ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 สามารถยืนยันได้ว่าค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.1 วินาที (อยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที) ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่าการกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 1.0 และ 0.01 วินาที เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุด ที่จะนำไปใช้งานนั้นควรจะอยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที ซึ่งโพรโทคอลที่นำเสนอจะใช้ค่าประวิงเวลาดังกล่าว

➤ การพิจารณาช่วงของค่าเวลาการประวิงเวลา (Time Delay)

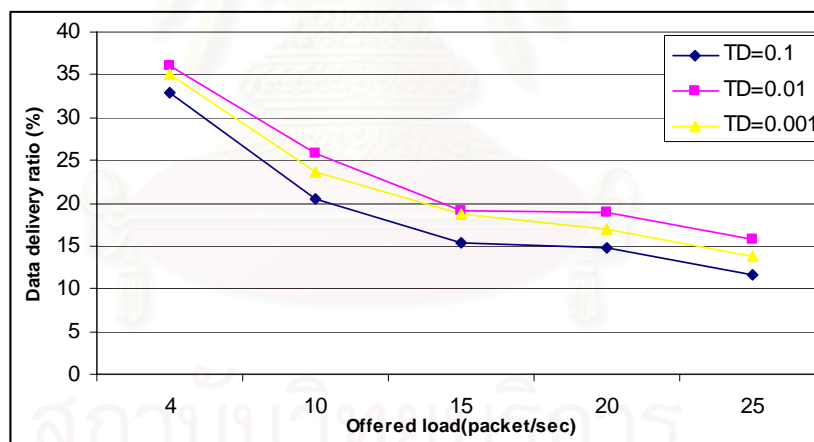
ค่าเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย นอกเหนือจากค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยค่าเวลาการรอคอยได้ถูกนำไปใช้กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งแบบที่คำนึงถึงเฉพาะพลังงานและแบบผสมทั้งสองแบบ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โหนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่มาจากเส้นทางอื่น ๆ ภายหลังจากที่แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกมาถึงยังโหนดปลายทาง เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าเวลาที่โหนดปลายทางจะต้องรอคอยนั้นก็จะมีส่วนสำคัญ เนื่องจากเมื่อกำหนดระยะเวลาการรอคอยสูง ๆ จะทำให้โหนดปลายทางได้ทราบข้อมูลของแต่ละเส้นทางเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจมากขึ้น ซึ่งทำให้เส้นทางที่เลือกก็จะมีประสิทธิภาพมาก แต่เนื่องด้วยคุณลักษณะของโครงข่ายที่โหนดมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เส้นทางที่โหนดปลายทางเลือกใช้นั้นอาจจะเปลี่ยนสถานะไปจากเดิมหรือหมดอายุไปแล้ว ทำให้เส้นทางนั้นไม่สามารถใช้งานได้ (มีบางโหนดเคลื่อนที่ออกนอกระยะเวลาการส่งของโหนดที่อยู่ในเส้นทาง)

เมื่อกำหนดระยะเวลาการรอคอยต่ำ ๆ ข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับ (แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง) อาจมีจำนวนที่น้อย ซึ่งถ้ากำหนดค่าระยะเวลาการรอคอยไว้ต่ำ ๆ ในโพรโทคอลแบบ

ผสมที่นำเสนอ ก็อาจจะทำให้ผลที่ได้จะใกล้เคียงกับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือเท่านั้น เพราะเส้นทางที่มาถึงปลายทางก่อนเวลารอคอยจะหมดนั้นมีโอกาสน้อยมาก เพราะเวลารอคอยต่ำเกินไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบค่าระยะเวลาการประวิงเวลาด้วยกัน 3 ค่าเพื่อทำการเปรียบเทียบดูประสิทธิภาพกับค่าอื่น ๆ โดยค่าที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ $TD = 0.1$, $TD = 0.01$ และ $TD = 0.001$ วินาที โดยจะทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางจาก 4 ไปจนถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบก็ยังคงใช้เหมือนกับการทดสอบข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาต่อสมรรถนะของโครงข่าย ภายใต้การทดสอบที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง โดยในรูปที่ 4.14 แสดงอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ส่วนในรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ และอายุการใช้งานของโครงข่ายตามลำดับ

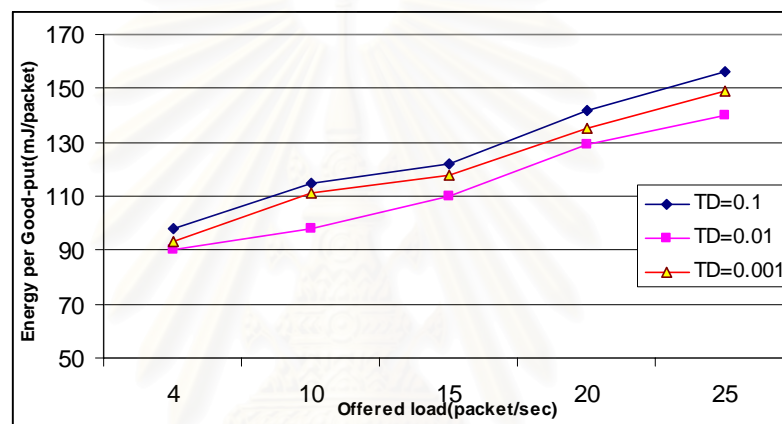


รูปที่ 4.14 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

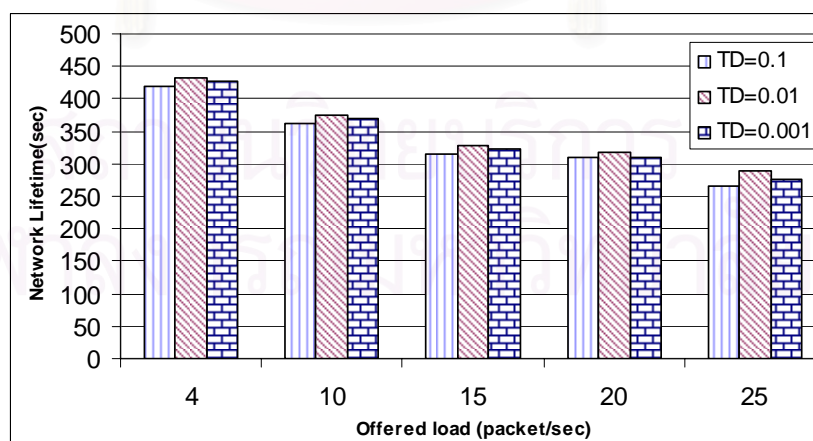
รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จของค่าการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบ จากรูปจะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า $TD = 0.1$ วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ถือได้ว่าค่อนข้างสูงจะทำให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่า $TD = 0.01$ วินาที แต่เมื่อทำการลดค่าเวลาการประวิงจาก 0.1 ไปเป็น 0.01 และ 0.001 วินาทีจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของโครงข่ายจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเวลาการประวิงเวลาเท่ากับ 0.01 วินาทีและจะลดต่ำลงอีกครั้งเมื่อเวลาการประวิงเท่ากับ 0.001 วินาที จากจุดนี้ก็แสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการประวิงที่เหมาะสมควรจะอยู่ในระดับ 10

มิลลิวินาที แต่ในความเป็นจริงค่าเวลาการประวิงที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของโครงข่ายหลาย ๆ ตัว อีกทั้งสภาพและสถานะการทำงานของโครงข่าย ณ ขณะเวลานั้นก็มีส่วนสำคัญต่อการกำหนดค่าเวลาการประวิง เพราะฉะนั้นไม่สามารถที่จะคาดเดาหรือคำนวณได้ล่วงหน้าว่า ณ สถานการณ์ของโครงข่ายแบบนี้ค่าใดจะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุด

ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จกรณีที่กำหนดค่า TD = 0.1, TD = 0.01 และ TD = 0.001 วินาที จากรูปทั้งสองแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการประวิงที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพที่สุดจากค่าที่นำมาใช้ในการทดสอบทั้งหมดควรอยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที



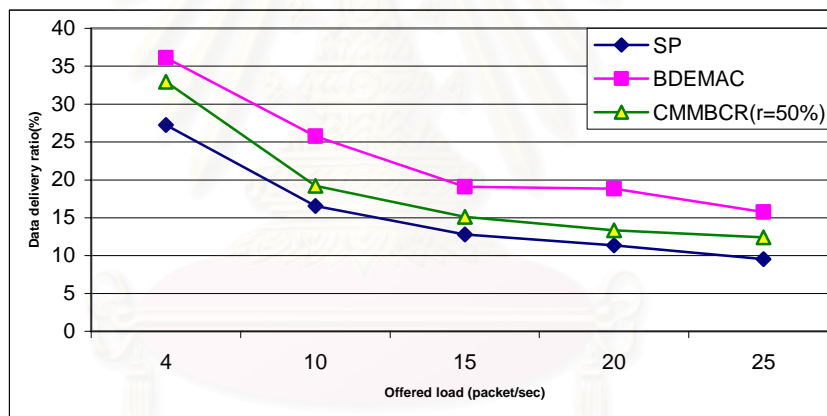
รูปที่ 4.15 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



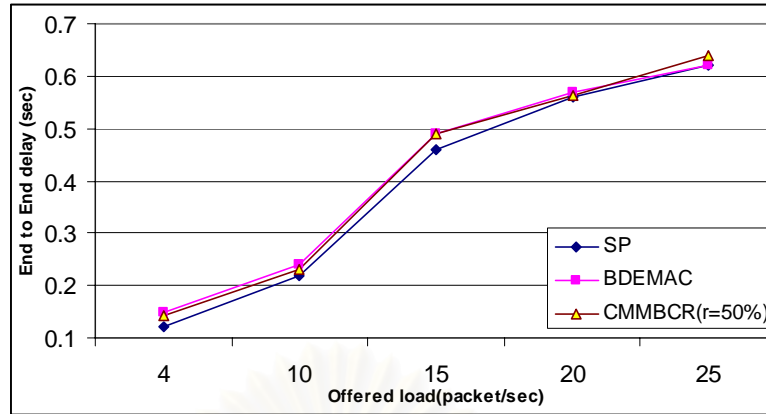
รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการประวิง ก็มีผลต่อประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย ซึ่งค่าการประวิงเวลาที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งยากที่จะกำหนดได้ว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำไปใช้ได้กับทุก ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถพิจารณาได้ว่าค่าที่นำไปใช้งานควรอยู่ในช่วงใด เพราะถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 สามารถยืนยันได้ว่าค่าการประวิงเวลาในระดับ 10 มิลิวินาที) ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่าการกำหนดค่าการประวิงเวลาเท่ากับ 0.1 และ 0.001 วินาที (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ค่าการประวิงเวลามีค่าเท่ากับ 0.01 วินาที)

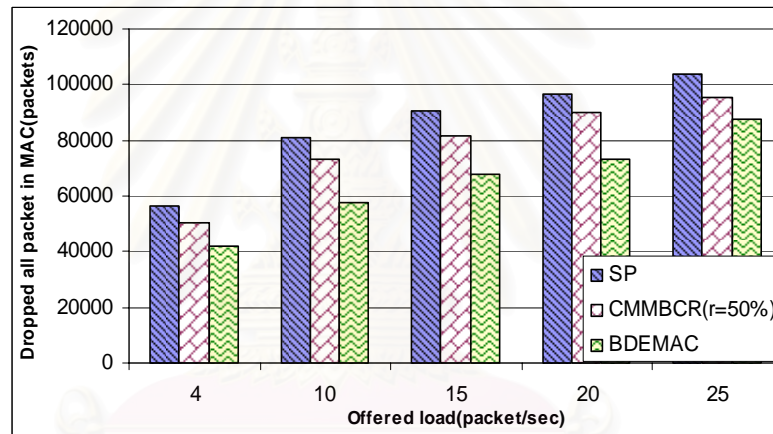
ซึ่งเมื่อได้ค่าประวิงเวลาและเวลาในการรอแพ็กเก็ตที่เหมาะสมกับโพรโทคอลแล้ว ต่อไปจะเป็นผลการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่หนึ่งเมื่อเทียบกับโพรโทคอลอื่น ซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.17 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

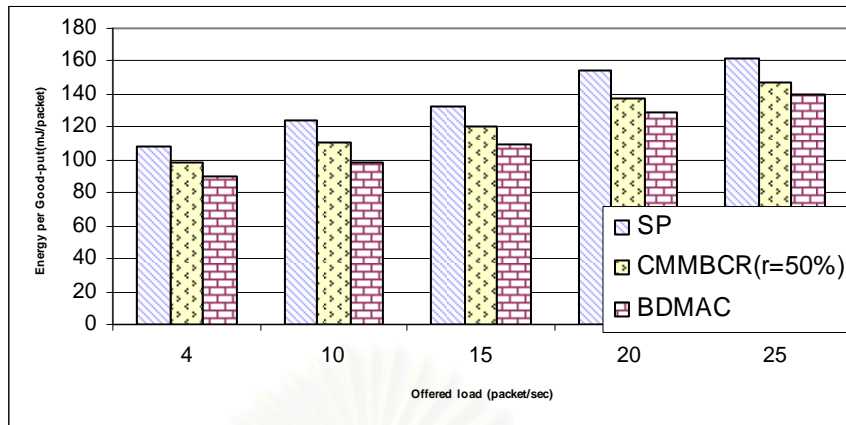


รูปที่ 4.19 จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

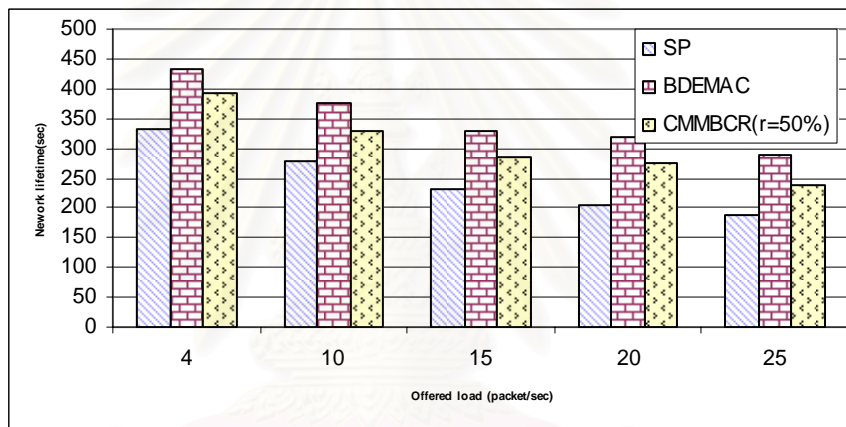
รูปที่ 4.17 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโพรโทคอลทั้งสามแบบ จากรูปโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอบน(BDEMAC) จะให้ค่าการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโหนด พลังงานที่โหนดในเส้นทางใช้ อีกทั้งความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโหนดข้างเคียง โดยเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีอายุการใช้งานอยู่ในระดับที่สูงเพราะ ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงและความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณโหลดและจำนวนโหนดข้างเคียงอยู่ในระดับที่ต่ำ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เส้นทางที่ได้สามารถส่งแพ็กเก็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากรูปค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จที่ได้จะมากกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR และแบบ SP ร้อยละ 10.81 และร้อยละ 24.32 ตามลำดับ ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 แพ็กเก็ตต่อวินาที โดยสาเหตุที่โพรโทคอลแบบ CMMBCR มีค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ต

สำเร็จน้อยกว่าโพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอเพราะว่า ในช่วงแรกที่โหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบบเตอริที่สูงโพรโทคอลแบบ CMMBCR จะใช้โพรโทคอลแบบ MTPR (ผลที่ได้เหมือนกับโพรโทคอลแบบ SP เพราะกำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่) และในช่วงที่โหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบบเตอริต่ำ ๆ โพรโทคอลแบบ CMMBCR จะเลือกใช้โพรโทคอลแบบ MMBCR ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบบเตอริเพียงอย่างเดียว ซึ่งเส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลแบบ MMBCR จะเป็นเส้นทางที่มีพลังงานที่เหลือของโหนดสูงๆ โดยไม่พิจารณาพลังงานที่ใช้ ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่น่าเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าทั้งแบบ SP และ CMMBCR

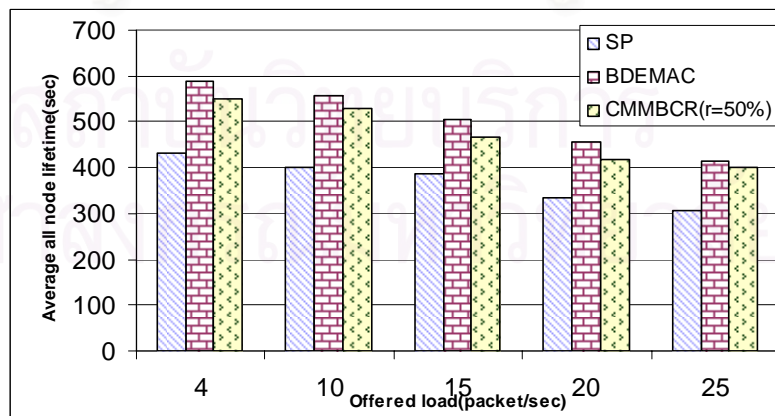
เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอได้กำหนดให้ทุกโหนดยกเว้นโหนดต้นทางและปลายทางจะต้องทำการระบวงการประวิงเวลาตามระดับของแบบเตอริที่เหลือในแต่ละโหนด และโหนดปลายทางจะต้องรอเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งภายหลังจากได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรก ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกเส้นทาง อีกทั้งเส้นทางที่ได้จะต้องเป็นเส้นทางที่โหนดมีระดับของพลังงานที่เหลือสูงและมีความคับคั่งของโหนดรอบข้างต่ำ ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอนี้มีการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะอ้อมขึ้นเพื่อให้ได้ซึ่งเส้นทางที่เป็นไปตามความต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แต่จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าค่าการประวิงเวลาที่เพิ่มขึ้นมามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ในขณะที่โพรโทคอลแบบ SP ให้ค่าประวิงเวลาต่ำที่สุด สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่น่าเสนอมีค่าประวิงเวลาไม่สูงมากนักเพราะว่า เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางมีความน่าเชื่อถือในแง่ของอายุการใช้งาน นอกจากนั้นโพรโทคอลที่น่าเสนอยังเป็นเส้นทางที่คำนึงถึงผลกระทบของโหนดชอนเร้นและโหนดแทรกสอด ดังนั้นเส้นทางที่ได้จึงมีความคับคั่งของโหนดต่ำ ซึ่งส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกลบในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ที่ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากโหนดรอบข้าง อีกทั้งอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นของโพรโทคอลที่น่าเสนอ ทำให้โอกาสที่แพ็กเก็ตจะหาเส้นทางไม่เจอเนื่องจากระดับของแบบเตอริของโหนดไม่เพียงพอต่อการใช้งานต่ำลงไปด้วย จึงส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตที่ชนกันของโพรโทคอลที่น่าเสนอมีค่ามากกว่าโพรโทคอลอื่น โดยเฉพาะเมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตมีค่าสูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.20 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ต



รูปที่ 4.21 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.22 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

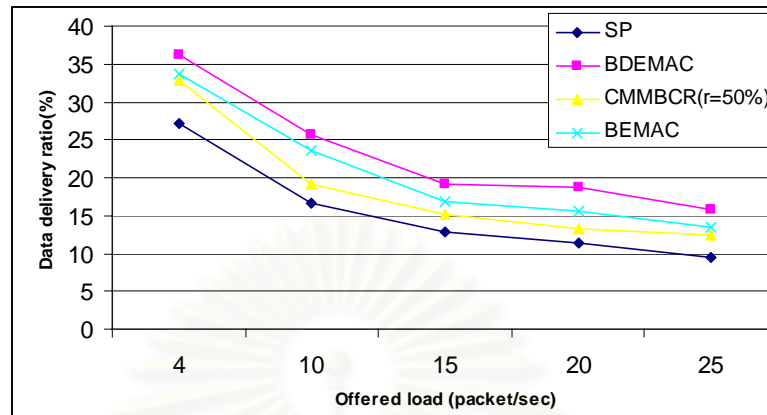
เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 ตามลำดับ พบว่าในทุกอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอจะให้ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR นั้นเนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ มีประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ในขณะที่ทั้งสองโพรโทคอลไม่มีการคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ซึ่งโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ซึ่งแสดงว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จของโครงข่าย

โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดีกว่า โพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อีกทั้งโหนดในโครงข่ายของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยจากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าอัตราการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายเฉลี่ยสำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ที่มีอายุการใช้งานรองลงมา โดยขณะที่โพรโทคอลแบบ SP ให้ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีการคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่

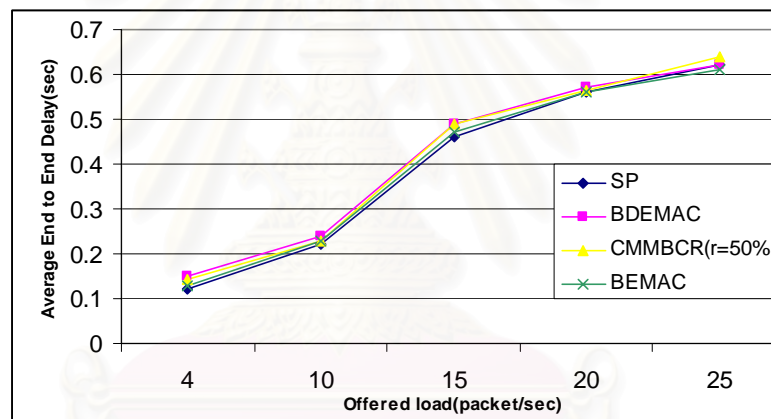
4.2.2.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมแบบที่สอง ที่นำเอาระดับพลังงานที่เหลือของโหนดต่ำสุดในแต่ละเส้นทางและค่าพลังงานที่คาดว่าจะใช้มาคำนวณพร้อมกันเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางของโหนดปลายทาง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ “BEMAC (Battery and Energy of MAC)” แทนโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอวิธีที่สอง ซึ่งเป็นการทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพอีกทั้งทำให้โหนดที่เหลือปริมาณพลังงานจากแบตเตอรี่ต่ำๆจะไม่ถูกใช้งานในกรณีที่มีเส้นทางอื่นเหลือพลังงานจากแบตเตอรี่มากกว่า เพื่อให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่ามากยิ่งขึ้น โดยรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สองเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ BEMAC CMMBCR และแบบ SP ในรูปที่ 4.23 แสดงอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล รูปที่ 4.24 แสดงค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย ในรูปที่ 4.25 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกชน

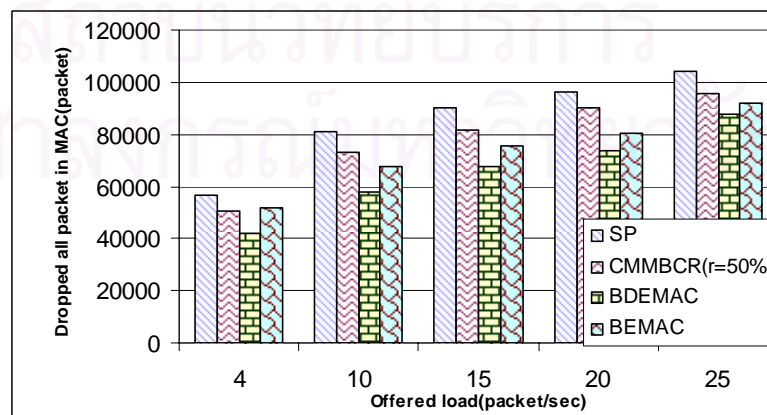
ในชั้น MAC ส่วนในรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 แสดงพลังงานที่ใช้ต่อการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ อายุการใช้งานของโนด และอายุการใช้งานเฉลี่ย ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



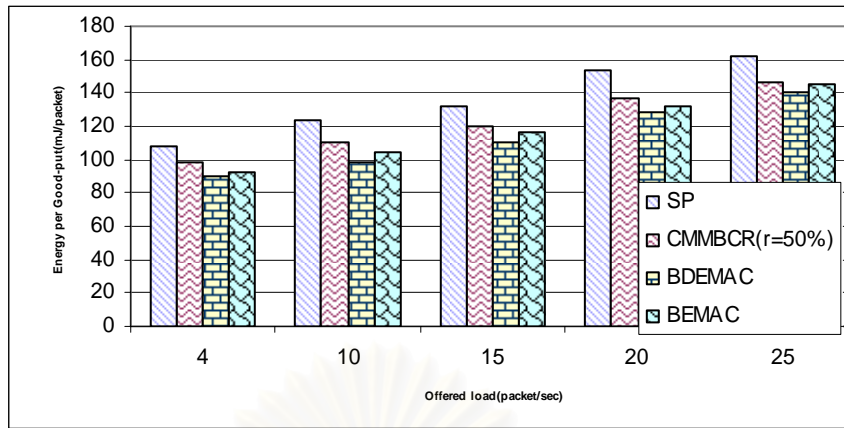
รูปที่ 4.24 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



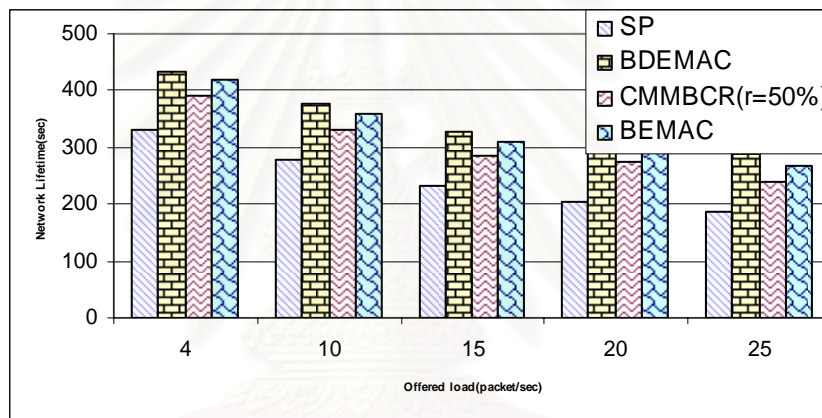
รูปที่ 4.25 จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC

รูปที่ 4.23 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโพรโทคอล จากรูปโพรโทคอลแบบ BEMAC จะให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จใกล้เคียงกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ซึ่งมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP แต่ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอล BEMAC มีอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต่ำกว่าแบบ BDEMAC เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดต่ำสุดในแต่ละเส้นทางและพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตพร้อมกัน เส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่โนดในเส้นทางมีระดับแบตเตอรี่ที่เหลือสูงและเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำๆ แต่เนื่องจากในช่วงแรกๆ ความแตกต่างระหว่างระดับแบตเตอรี่ของโนดจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก เส้นทางที่ได้จึงเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำๆ แต่เมื่อความแตกต่างของแบตเตอรี่ในแต่ละโนดมีมากขึ้น ก็จะทำให้ระดับของแบตเตอรี่มีความสำคัญมากขึ้น เส้นทางที่ได้ในช่วงนี้จึงเป็นเส้นทางที่ทำให้ระดับแบตเตอรี่ที่เหลือมีความสำคัญมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากระดับแบตเตอรี่ที่คิดนั้นจะเป็นเฉพาะแบตเตอรี่ต่ำสุดเพียงโนดเดียวในแต่ละเส้นทาง ในขณะที่โพรโทคอลแบบ BDEMAC นำระดับแบตเตอรี่ที่เหลือมาคำนวณในทุกๆ โนดทำให้ประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบ BEMAC ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC

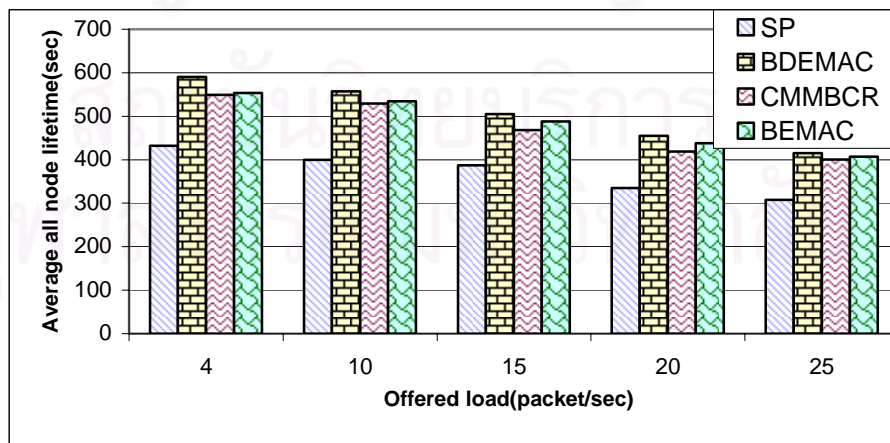
เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BEMAC ไม่มีการประวิงเวลาในการส่งแพ็กเก็ตดังนั้นค่าประวิงเวลาที่ได้ในรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ BEMAC จะมีการประวิงเวลาที่ต่ำกว่าแบบ BDEMAC เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BDEMAC จะเสียเวลาในการส่งแพ็กเก็ตตามระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือ ซึ่งค่าประวิงเวลาที่โพรโทคอลแบบ CMMBCR และแบบ BEMAC จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเส้นทางที่ได้ในช่วงที่ระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือแตกต่างกันมากๆ เส้นทางที่ได้จะเน้นเรื่องอายุการใช้งานเป็นหลัก ดังนั้นเส้นทางที่ได้อาจจะอ้อมและเสียเวลามากกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP ที่มีค่าประวิงเวลาที่ต่ำที่สุด นอกจากนั้นยังส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกชนในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ BDEMAC แต่ให้จำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดการชนน้อยกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR และแบบ SP เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BEMAC คำนึงถึงปัญหาโนดซ่อนเร้นและโนดแทรกสอดที่จะส่งผลกระทบต่อ การส่งแพ็กเก็ตด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 4.26 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.27 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.28 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโพรโทคอล BEMAC กับโพรโทคอลแบบ CMMBCR BDEMAC และ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 ตามลำดับ พบว่าในทุกอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โพรโทคอลแบบ BEMAC ที่นำเสนอจะให้ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP และโพรโทคอลแบบ CMMBCR แต่ให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานต่ำกว่าแบบ BDEMAC สาเหตุที่มีประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR เพราะโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ซึ่งแสดงว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จของโครงข่าย แต่ที่ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบ BDEMAC นั้นเป็นเพราะว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC ได้ทำการคำนวณผลกระทบของระดับแบตเตอรี่ในทุกโหนดและเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ในขณะที่โพรโทคอลแบบ BEMAC จะใช้ค่าอัตราส่วนของทั้งสองมาตัดสินพร้อมกันและค่าแบตเตอรี่ที่นำมาคำนวณก็เป็นค่าแบตเตอรี่ต่ำสุดเท่านั้นซึ่งแน่นอนว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานก็จะต่ำกว่าแบบ BDEMAC

โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดีกว่า โพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เพราะโพรโทคอล BEMAC ที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อีกทั้งโหนดในโครงข่ายของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.27 โดยจากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าอัตราการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายเฉลี่ยสำหรับโพรโทคอลแบบ BEMAC มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ที่มีอายุการใช้งานรองลงมา โดยขณะที่โพรโทคอลแบบ SP ให้ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีการคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่ แต่สาเหตุที่ทำให้อายุการใช้งานของโพรโทคอล BEMAC ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC นั้น เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BDEMAC รักษาสมดุลระหว่างพลังงานที่ใช้และพลังงานที่เหลือได้ดีกว่า ในขณะที่โพรโทคอลแบบ BEMAC นั้นยังมีข้อเสียในกรณีที่เส้นทางมีอัตราส่วนของแบตเตอรี่กับพลังงานที่ใช้เท่ากัน ซึ่งเส้นทางอาจจะมีระดับแบตเตอรี่ที่เหลือสูงแต่พลังงานที่ใช้ในเส้นทางก็สูงด้วยเช่นกัน หรือในทางกลับกัน แบตเตอรี่ที่เหลือในเส้นทางอาจเหลือน้อยแต่พลังงานที่ใช้ในเส้นทางก็น้อยด้วยเช่นกัน จึงทำให้อัตราส่วนของทั้งสองกรณีเท่ากัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกเส้นทางที่มาถึงก่อนเป็นหลัก ดังนั้นเส้นทางที่ได้ อาจจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานสูงกว่าเส้นทางอื่น หรืออาจจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำแต่แบตเตอรี่ที่เหลือในเส้นทางก็มีระดับที่ต่ำ ซึ่งถ้าเลือกเส้นทาง

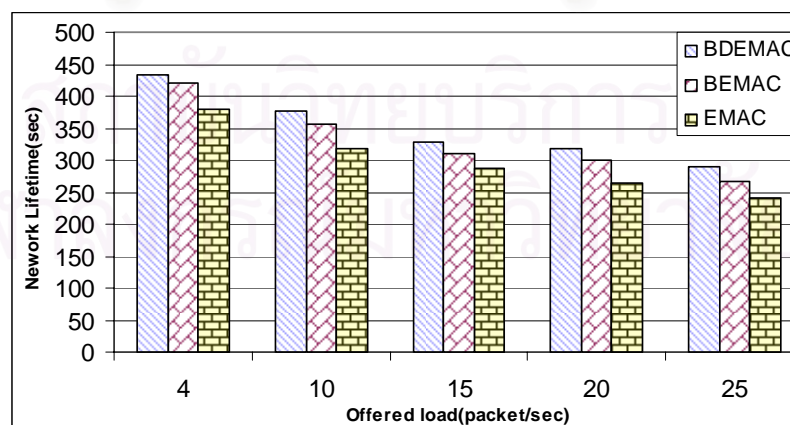
ดังกล่าว ก็จะทำให้อายุการใช้งานของโหนดสั้นลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งโครงข่ายให้มีอายุการใช้งานเฉลี่ยที่ต่ำกว่าแบบ BDEMAC ดังรูปที่ 4.28

หัวข้อต่อไปจะเป็นการนำโพรโทคอลที่ได้เสนอไว้ในข้างต้น ทั้งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน(EMAC) โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางแบบผสมทั้งวิธี BDEMAC และวิธี BEMAC มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงานและด้านการให้บริการ

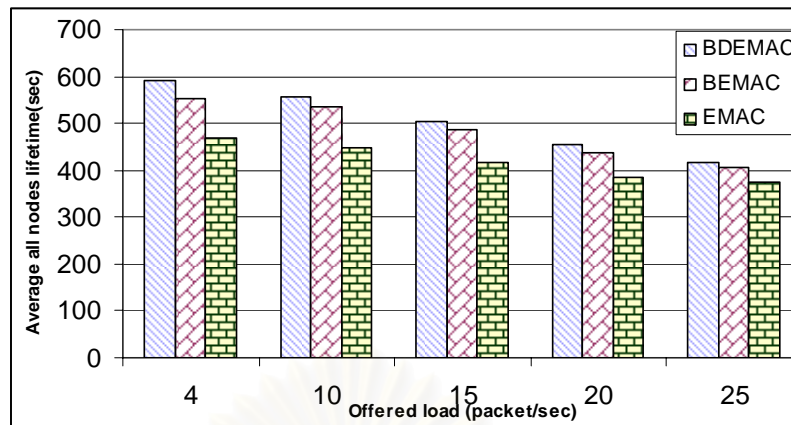
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ

การทดสอบในส่วนนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉพาะโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งสามโพรโทคอลคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงการใช้พลังงาน แบบที่สองและสามคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่ใช้และระดับแบตเตอรี่ที่เหลือของโหนดหรือเรียกว่าเป็นโพรโทคอลแบบผสมทั้งสองวิธีที่นำเสนอในข้างต้น เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามที่ได้ออกแบบไว้ มีจุดประสงค์หลักเหมือนกันนั่นคือยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด แต่จะมีความแตกต่างกันด้วยวิธีการที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่นำมาใช้งาน

เนื่องจากข้างต้นได้ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอในแต่ละแบบไปแล้ว ในส่วนนี้จึงพิจารณาเฉพาะบางพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งในด้านคุณภาพการให้บริการ เช่น ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ส่วนในประสิทธิภาพด้านพลังงานจะพิจารณาจาก อายุการใช้งานของโครงข่าย และอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายเพื่อชี้ให้เห็นว่าโพรโทคอลใดในทั้งสามแบบที่มีประสิทธิภาพในด้านต่างๆ มากที่สุด

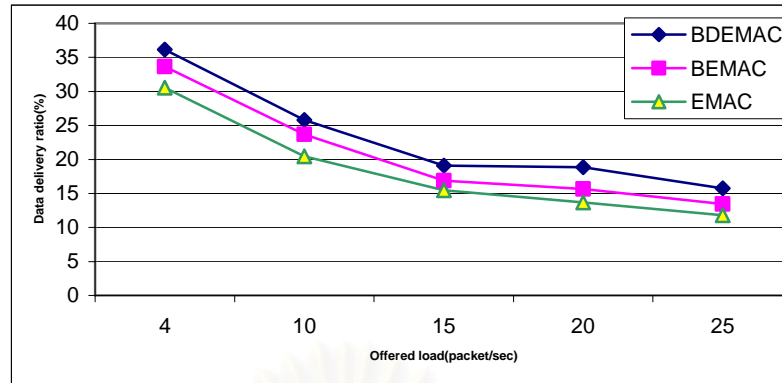


รูปที่ 4.29 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

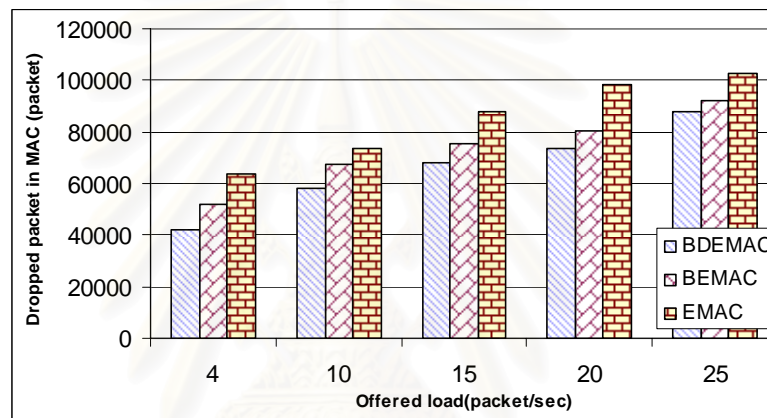


รูปที่ 4.30 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

จากรูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลการ จัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ทั้งสามประเภท โดยโพรโทคอลที่มีอายุการใช้งานของ โครงข่ายมากที่สุดคือ โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอในวิธีที่หนึ่ง คือการนำค่าที่เหลือของพลังงาน มาใช้เป็นค่าประจวบเวลา รองลงมาคือโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่สองที่นำค่าพลังงานที่ เหลือของโหนดต่ำสุดในเส้นทางกับพลังงานที่โหนดใช้มาตัดสินใจพร้อมกัน และสุดท้ายคือ โพรโท คอลที่นำเสนอแบบค่านึงถึงพลังงานที่ใช้เพียงอย่างเดียว เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ ทั้งสองวิธีเกิดจากการรวมเอาข้อดีของทั้งโพรโทคอลแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด ที่เลือกเส้นทางที่ทำให้ โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลแบบยึดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด โดยเลือกเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งการผสมปัจจัยทั้งสองประการเข้า ด้วยกันทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและการส่งแพ็กเก็ตไปยัง โหนดปลายทางมากกว่าการพิจารณาเฉพาะปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว อีกทั้งโพรโทคอลที่ นำเสนอแบบผสมนั้นจะพยายามกระจายกราฟิกให้ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูง แต่ขณะที่ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบค่านึงถึงพลังงาน เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด โดยไม่ได้พิจารณาว่าเส้นทางที่เลือกนั้นผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงหรือไม่ จึงทำให้โพรโทคอล ที่นำเสนอแบบผสมสามารถทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเหมาะสมมากกว่าโพรโทคอลที่ นำเสนอแบบค่านึงถึงพลังงานเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.30 ซึ่งแสดงอายุการใช้งาน เฉลี่ยของโครงข่าย จากเหตุผลตรงนี้ทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบค่านึงถึงพลังงานที่เหลือมีอายุ การใช้งานของโครงข่ายสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบค่านึงถึงพลังงานที่ใช้



รูปที่ 4.31 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.32 จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกละทิ้งในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

รูปที่ 4.31 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จซึ่งจะสะท้อนถึงวิสัยสามารถ(Throughput) ของโครงข่าย โดยถ้าเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางมีคุณภาพดี นั่นคือ เป็นเส้นทางที่มีโหลดอยู่ในระดับที่ต่ำและมีความน่าเชื่อถือสูง (เป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้นาน) ก็จะทำให้คุณภาพการให้บริการของโครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากรูปแสดงว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบผสมเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งในระดับที่ต่ำ โดยความคับคั่งที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือ ความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณโหลดที่อยู่ในบัฟเฟอร์ของโหนดและความคับคั่งที่เกิดจากจำนวนโหนดข้างเคียง (โอกาสที่แพ็กเก็ตเกิดการชนกันสูงเมื่อมีจำนวนโหนดข้างเคียงสูง) เนื่องจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจะเลือกเส้นทางที่โหนดมีอายุการใช้งานที่สูง เพราะฉะนั้นถ้าโหนดมีปริมาณโหลดอยู่มากก็จะทำให้อายุการใช้งานของโหนดมีค่าที่ต่ำ นอกจากนั้นยังเป็นเส้นทางที่ทำให้

โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง ได้พิจารณาถึงจำนวนโนดข้างเคียงในการคำนวณด้วย โดยถ้าโนดที่อยู่ในเส้นทางมีจำนวนโนดข้างเคียงที่สูงก็จะส่งผลให้ค่าต้นทุนพลังงานมีค่าที่สูง ซึ่งก็แสดงว่าเส้นทางดังกล่าวทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานในระดับที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นแล้วเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะหมายถึงเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโนดข้างเคียงต่ำด้วยเช่นกัน

รูปที่ 4.32 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ถูกละทิ้งในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทั้งสามโพรโทคอล พบว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงเฉพาะพลังงานจะมีจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งมากกว่าอีกสองวิธี เนื่องจากอายุการใช้งานของโนดในโพรโทคอลแบบ EMAC นั้นสั้นกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC และ BEMAC ทำให้แพ็กเก็ตหาเส้นทางไม่พบมากขึ้นเนื่องจากมีโนดทั้งหมดแบตเตอรี่เร็วกว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงระดับของแบตเตอรี่ ซึ่งเวลาที่สั้นลงมาทำให้แพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากโนดในโครงข่ายเหลือน้อยลงทำให้แพ็กเก็ตหาเส้นทางไม่เจอ

จากผลการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 แบบที่แสดงในรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.32 สามารถสรุปได้ว่า

โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสม (Hybrid Routing Protocol) ได้พิจารณาข้อดีของโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งแบบคำนึงถึงพลังงานและแบบคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดมาพิจารณารวมกันในกระบวนการค้นหาเส้นทางจึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงเฉพาะพลังงาน

เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลแบบผสมทั้งสองวิธี จะพบว่าการนำแบตเตอรี่มาเป็นเวลาในการประวิงก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตนั้นให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าโพรโทคอลที่นำค่าพลังงานที่ใช้และระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือมาตัดสินในเวลาเดียวกัน เนื่องจากในกรณีหลังนั้น ค่าที่ได้จะมีความเสถียรภาพต่ำกว่าแบบที่หนึ่ง อีกทั้งวิธีที่นำระดับแบตเตอรี่ที่เหลือมาเป็นค่าเวลาประวิงนั้นจะเป็นการคิดในทุกๆ โนดของแต่ละเส้นทาง แต่ในกรณีของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สองจะพิจารณาเฉพาะโนดที่มีพลังงานต่ำสุดของแต่ละเส้นทางเพื่อพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่โนดเหลือพลังงานต่ำสุด (Weakest Path) ทำให้ประสิทธิภาพของโพรโทคอลในแบบผสมวิธีที่หนึ่งดีกว่าในวิธีที่สอง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจราจรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอดฮอค โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจราจรเส้นทางขึ้นมา 2 แบบ โพรโทคอลแรกที่น่าสนใจคือ โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Power Aware Routing Protocol) ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สัญลักษณ์ “EMAC (Energy of MAC)” แทนโพรโทคอลดังกล่าว โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานในส่วนของ การควบคุมเข้าถึงตัวกลางต่ำที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากโหนดอยู่ในสถานะว่างก่อนที่จะมีการเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะอื่นๆ พลังงานที่สูญเสียจากการส่ง การรับ และการได้ยินจากแบบจำลองการใช้พลังงานของโหนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานในโหนดข้างเคียงด้วย โดยพลังงานที่คำนวณได้จะไม่ใช้พลังงานที่ใช้เฉพาะโหนดส่งและรับเท่านั้น แต่จะรวมถึงโหนดที่อยู่รอบข้างหรือโหนดที่อยู่ในเส้นทางทั้งหมดที่สามารถรับแพ็กเก็ตได้ อีกทั้งแบบจำลองการใช้พลังงานที่น่าสนใจ ได้พิจารณาผลกระทบของโหนดแทรกสอด (Interference node) ด้วย เพื่อรับรองว่าโหนดที่อยู่ในช่วงดังกล่าวจะไม่มารบกวนการส่งแพ็กเก็ต ทำให้แพ็กเก็ตเกิดการชน จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

- โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) นอกจากนี้ยังทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่ไม่สูงมากนักเพราะไม่ได้พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโหนดในโครงข่าย

โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบที่สองที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ โพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Routing Protocol) โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจราจรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโหนดมาพิจารณารวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้ได้นานที่สุด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลแบบผสมไว้สอง

วิธี โดยในวิธีที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าระดับแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ในแต่ละโนตมาคำนวณเพื่อหาค่าประวิงเวลาในการส่งต่อแพ็กเก็ต RREQ โนตปลายทางจะตัดสินใจเลือกเส้นทางจากปริมาณพลังงานที่ใช้ตามแบบโพรโทคอล EMAC โดยเส้นทางที่มาถึงในระดับต้นๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนตที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ “BDEMAC” แทนโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางดังกล่าวจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงาน และคุณภาพการให้บริการที่พิจารณาจากค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จที่มากกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบอื่นๆ

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่สอง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ “BEMAC” แทนโพรโทคอลที่นำเสนอในวิธีนี้ จะเป็นการเลือกเส้นทางที่คล้ายกับโพรโทคอลแบบ EMAC แต่จะเพิ่มการพิจารณาถึงระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในแต่ละเส้นทางไปด้วย เพื่อเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่โนตเหลือพลังงานในระดับที่สูง และใช้พลังงานในระดับที่ต่ำ ๆ โดยจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ BEMAC ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบ EMAC แต่จะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

- (1) การตัดสินใจเลือกเส้นทางควรจะมีการสูญเสียพลังงานจากการส่งแพ็กเก็ตในขั้นอื่นด้วย เช่น แพ็กเก็ต RREQ และ RREP จากชั้น Routing เพื่อให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการมากยิ่งขึ้น
- (2) แบบจำลองการใช้พลังงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแบบจำลองที่ไม่คำนึงพลังงานที่สูญเสียขณะที่โนตอยู่ในสถานะหลับ (Sleep mode) พลังงานที่ใช้ในการประมวลผลและพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังนั้นหากพิจารณาพลังงานในส่วนนี้ก็จะทำให้ระบบที่ใช้มีความเป็นจริงมากขึ้น
- (3) โนตที่ใช้ในการทดสอบควรจะสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่ง เพื่อลดการใช้พลังงานที่สูญเสียโดยไม่จำเป็นและสามารถลดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งก็จะทำให้แบนด์วิธในการส่งข้อมูลของโครงข่ายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้โนตควรจะรู้ตำแหน่งของโนตในโครงข่ายเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทาง เนื่องจากการส่งข้อมูลของโนตได้ทราบทิศทางในการส่งที่แน่นอน

- (4) แบบจำลองการใช้พลังงานที่ได้ควรพิจารณาผลกระทบของการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการส่งได้ ดังนั้นถ้าได้พิจารณาในส่วนนี้ จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Sameh Gobriel, Rami Melhem and Daniel Mosse., "A Unified Interference / Collision Analysis for Power-aware Adhoc Networks,"University of Pittsburgh, Proc *IEEE*, 2004, pp. 598-608.
- [2] Shih-Lin Wu and Pao-Cho Tseng., "An Energy efficient MAC Protocol for IEEE802.11 WLANs" Chang Bung University , *Proc IEEE CNSR'04*,2004.
- [3] Eun-Sun Jung and Nitin H. Waidya , "A power Control Mac Protocol for Ad hoc Networks," *Proc. Of MOBICOM'02*, September 23-28, 2002, Atlanta, Beorgia, USA.
- [4] Toh, C.K., "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Network," *IEEE Communication Magazine*, Issue 6, Vol 39, June 2001, pp.138-147.
- [5] Sam yongsheng Shi, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Ad hoc Networks," B.Eng , Nanjing university of Posts and Telecommunications, Thesis, 1999, pp. 20-40.
- [6] Eun-Sun Jung and Nitin H. Vaidya ., "A Power Saving MAC Protocol for Wireless Networks," Technical Report ,University of Illinois at Urbana-Champaign, July 2002.
- [7] Corson. S. and Macker. J., "Routing *Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*," Network Working Group RFC 2501, Naval Research Laboratory, January 1999.
- [8] Johnson, D.B., Maltz, D.A., "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks," *Mobile Computing* , (ed. T. Imielinski and H. Korth), Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [9] Perkins, C.E., Belding-Royer, E.M., Das, S.R.,"*Ad hoc On-Demand Distance*

Vector (AODV) Routing," Internet Draft, IETF Mobile Ad hoc Networks(MANET) Working Group, 2003.

- [10] Perkins, C.E., Bhagwat, P., "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," *Proc. ACM SIGCOMM'94*, London, UK, pp. 234-244, 1994.
- [11] Juan-Carlos Cano and D. Kim, "Investigating Performance of Power-aware Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE-ACM MASCOTS 2002 Workshop*, Fort Worth, Texas, pp.80-86, October 12,2002
- [12] 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.
- [13] W. Yu and J. Lee. DSR-based energy-aware routing protocols in Ad-Hoc networks. International Conference on Wireless Network (June 2002)
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Hossain, M.J.; Chae, O.; Mamun-Or-Rashid, M.; Choong Seon Hong; Cost-effective maximum lifetime routing protocol for wireless sensor networks *Telecommunications, 2005. Advanced Industrial Conference on Telecommunications / Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference/ E-Learning on Telecommunications Workshop. AICT/SAPIR/ELETE 2005. Proceedings*17-20 July 2005 Page(s):314 – 319
- [17] A. Chandra, V. Gummalla, and John O. Limb, "Wireless medium access control protocols," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, pp. 2-15, 2000.

- [18] Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access protocols for wireless LAN's," in Proc. ACM SIGCOMM, (1994): 212-225.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Datasheet for ORiNOCO 11 Mbit/s Network Interface Cards, 2001.
- [22] Carvalho, M.M.; Margi, C.B.; Obraczka, K.; Garcia-Luna-Aceves, J.J.; Modeling energy consumption in single-hop IEEE 802.11 ad hoc networks Computer Communications and Networks, 2004. ICCCN 2004. Proceedings. 13th International Conference on 2004 Page(s):367 – 372
- [23] Sameh Gobriel, Rami Melhem and Daniel Mosse, "Modeling an Energy-Efficient MAC Layer Protocol" *In IEEE WCNC 05*, New Orleans, March 2005.
- [24] Ping Ding, JoAnne Holliday, Aslihan Celik, "Modeling the Performance of A Wireless Node in Multihop Ad-Hoc Networks" *Proc. of the IEEE International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, (WirelessCom2005)* Kaanapali Beach, Hawaii, June 2005.
- [25] Giuseppe Bianchi "Performance Analysis of the IEEE802.11 Distributed Coordination Function" *IEEE Journal commun, Vol.18, No.3, March 2000*
- [26] L. M. Freaney. 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] "NS2 Network Simulator," Available form: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [31] 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.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. K. Sitthi and C. Saivichit. Energy Efficient Routing Mechanism with MAC Protocol consideration in Ad Hoc Network. The 9th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT'07, Phoenix, Korea), 12 – 14 February 2007, 1090-1095.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Energy Efficient Routing Mechanism with MAC Protocol consideration in Ad Hoc Network

K. Sitthi and C. Saivichit.

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Phayathai, Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand
Phone 0-2218-6907 Fax 0-2218-6912, Email: Chaichet.S@chula.ac.th

Abstract— we propose a routing protocol that will prolong the lifetime of mobile nodes, and consequently, prolong the network lifetime. Our protocol proposes a route discovery technique based on energy consumed in Medium Access Control (MAC) which include data and control packet transmission. The MAC modeling considered here includes all operation modes of networked devices such as transmission, reception and idle states. Moreover, we considered the energy consumed in overhearing state and energy consumed in retransmission due to collision in our protocol. The total energy consumption shall be lowered as less energy is depleted due to less-frequent packet collision. The performance of our algorithm is evaluated through the realistic energy consumption model and environment. The result show that this proposed research work shall develop a routing protocol that shall be applicable in practice. It would also enable efficient energy consumption in ad hoc network which prolongs the lifetime of the network connectivity and maintains high performance of such ad hoc networking environment.

Keywords — Energy model of MAC, probability of collision, network lifetime.

I. INTRODUCTION

The mobile ad hoc network is an autonomous system of mobile routers connected by wireless links. The routers are free to move randomly and organize themselves arbitrarily; thus, the network's wireless topology may change rapidly and unpredictably. The characteristics and constrain of mobile ad hoc were discussed in [1] which one of constrain is energy constrained. Recently, designing energy-aware routing protocols has been proposed which considered how to prolong network lifetime. Ad hoc is multi-hop communication so if some node in the network have less of battery remaining, it can affect other data transmission.

Many works has been proposed about minimize transmission power which considers the power in network layer but without considered MAC layer and energy consumed due to retransmission. Our work proposes a routing protocol that will prolong the lifetime of mobile nodes, and consequently, prolong the network lifetime by considering the energy consumed in MAC layer which include the energy consumption of packet retransmission due to collision and energy consumed of overhearing state.

The optimal route of all possible routes in our study and used is the route with lowest energy consumed by MAC process which has the lowest probability of collision. This

considers the energy consume in overhearing packet of neighbor node, so the optimum route is not considered only from the energy consumed by source and destination but also energy consume by the node within the transmission range of source and destination pair.

The rest of this paper is organized as follows: Section II reviews the background and energy consumption model of MAC protocol that used in this paper. Section III describes the details of our energy model and route discovery mechanism. Simulation Model and Evaluation is given in section IV. Performance comparison between our proposed and other routing protocols is presented in Section V. Finally, conclusion is given in Section VI.

II. BACKGROUND

This section describes the MAC layer as specified by the IEEE 802.11 standard. Because of the mobile ad hoc network is decentralized operation and shared channel so the node in the network should have the medium access method to control the access in order to avoid collisions, or at least to reduce the number of collisions. The MAC layer also supports much auxiliary functionality such as offering support for roaming, authentication, and taking care of power conservation.

The primary access method of IEEE802.11 [5][6] have 2 coordination functions, first is distributed coordination function (DCF). This mandatory basic function is based on a version of carrier sense with multiple accesses and collision avoidance (CSMA/CA).Which used binary exponential back off and an optional RTS-CTS mechanism to avoid collisions due to hidden terminal problem which shown in Figure 1. The second method called the point coordination function (PCF) that is the central operation and implemented to provide real time services.

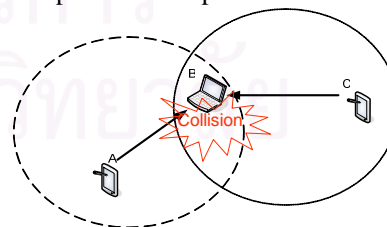


Figure 1. Hidden terminal problem

A. The Medium access Mechanism

In the IEEE802.11 DCF [7] medium access protocol, when a node has packet in the buffer and want to send to another

node, first it sends RTS (Request to Send) packet to the destination after sensing the medium to be idle. The receiver sends back to the source node by CTS (Clear to Send) packet after sensing an idle channel. The source transmits its data frame when receives CTS frame correctly and waits for Acknowledgment (ACK) packet reply to confirm that the data packet already receives by destination node, as shown in Figure 2.

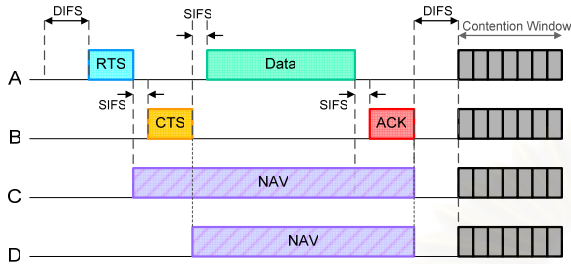


Figure2. IEE802.11 DCF with RTS/CTS mechanism.

Nodes in the transmission range overhearing RTS , CTS , data or ACK packets and check that it is the destination or not. If not, it will maintain a Network Allocation Vector (NAV) that records the duration of time during which it must defer its transmission to avoid collision.

Because of Ad hoc network is dynamic topology, every node can move freely and unpredictable. So all packets can face collision problem due to the problems of moving and hidden terminal although use CSMA/CA to avoid collision.

Figure 3, show the preliminary result. We are implementing in NS2.29 which considers a network topology of 50 mobile nodes randomly placed over a 1000 x 1000 m² and using the strategy of Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV). Simulation time is 900 seconds and packet sizes are fixed as 512 bytes and pause time is varied from 100 to 900 seconds. The result shows that at any pause time, the network always have dropped packets even node is in static case. There are many reasons of dropped packets such as collision and loss are the main of dropped packets.

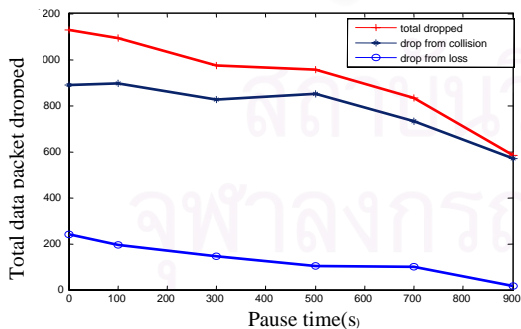


Figure3. Dropped packet VS Pause time

B. Energy Consumption Model

Many previous works have proposed the energy consumption model of MAC protocol. In [2], it defines a model of energy consumption in transmit, receive, idle and sleep state, as shown in Figure4. The transmit state is the energy consumption for transmitting packet which is highest of power consumed, 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 the power consumed in sleep state is not significant and it can be ignored.

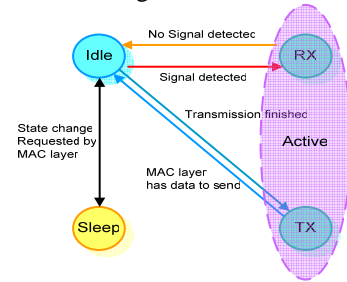


Figure4. Mac layer state

Figure 5 shows the energy consumption of each state. The scenario of this result is the same as in dropped packet scenario. But for the energy model, we assumed that the power consumed in three states of radio interface, $P_t = 0.6635$ watts for transmit state, $P_r = 0.395$ watts and $P_o = 0.200$ watts for receive and overhearing state, respectively. The result shows that the energy consumes by receiving packet are highest and for overhearing packet, the energy consumption is about double of receiving packet.

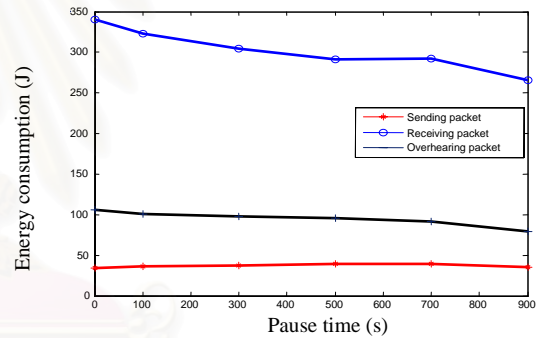


Figure5. Energy consumption VS Pause time

As the result of energy consumption, the energy consumes by overhearing packet can dominate the energy consumes of the network, so our energy consumption model we considered the energy consumed by transmit, receive overhearing. In addition our model including the energy consumes in idle state and energy consumed in retransmission due to collision in our protocol. We will use this information to find the optimum route in the network layer to maximize network life of nodes and the network.

III. PROPOSED ALGORITHM

Our proposed algorithm considers the network lifetime, which consider energy consumed by transmission of each node to select the optimum route. The decision for optimum route made by destination node which considers the energy consumption of each candidate routes, the route with lowest energy consumption of MAC will be selected. However, [8] calculates the energy consumption and throughput without considering the effect of transmit power on the number of interfering nodes. We enhanced our scheme in the AODV routing protocol and modified energy consumption model in [3]

which considered the affect of interference from the entire system and collisions caused by interference during a node state transition by using Markov Chain models to find the probability of successful transmission based on a node's state transitions. Moreover, considered the effect of transmitting power on the number of interfering nodes. The interference is calculated by SIR (Signal to interference ratio) which depends on the signal power detection. It defines a term of wireless ratio in three ranges: Transmission range, Clear Channel Assessment (CCA) and Interference range. However, the energy model does not consider the energy consumption due to overhearing packet by neighboring nodes in the transmission range of transmitter and receiver. The propose model will consider the affect of the neighbor nodes as follows.

A. Energy Model of MAC Protocol

The energy consumption model of general network interface card (NIC) defined by 4 states: transmit, receive, idle and sleep state which we can ignore the energy consumed in sleep state. The MAC modeling considered here includes all operation modes of networked devices such as transmission, reception and idle states. Moreover, we proposed energy consumed in all the different possible states in each hop and also considered the energy consumed in each retransmission packet due to collisions. The probability of collision can be calculated approximately as following:

In our model, we assume that the network is saturated, where each node always has data to transmit. The probability of the node which has data to transmit at a randomly given slot time is calculated (p) as [4], the meaning of each parameter given in Table1.

$$p = \frac{2(1-2\beta)}{(1-2\beta)(W+1) + \beta W(1-(2\beta)^m)} \quad (1)$$

Using p to find the probability for node state transitions as shown in Figure6, the transition probability for idle state to idle state is.

$$P_{ii} = (1-p)^N \quad (2)$$

The transition probability from idle to successful transmission (P_{it}), idle to RTS packet transmission with a collision (P_{ir}), idle to CTS transmission with a collision (P_{ic}) can calculate as follow,

$$P_{it} = p(1-p)^{N-1} P_{hidden_suc} \quad (3)$$

$$P_{hidden_suc} = \left(\sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{T_{suc}} \quad (4)$$

$$P_{ir} = p(1-(1-p)^{N-1}) + p(1-p)^{N-1} P_{hidden_rts} \quad (5)$$

$$P_{hidden_rts} = \left(1 - \sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{T_{RTS}} \quad (6)$$

$$P_{ic} = p(1-p)^{N-1} P_{hidden_cts} \quad (7)$$

$$P_{hidden_cts} = \left(1 - \sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{(T_{CTS}-T_{RTS})} \quad (8)$$

Figure 6 describes a wireless node state transition diagram at a randomly given slot time. A node state transition could be from idle to idle, idle to transmit with successful transmission and state from idle to RTS/CTS/DATA/ACK transmission with collision

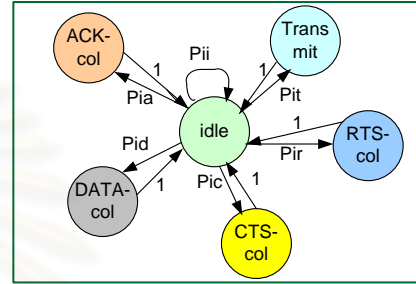


Figure 6. Node state transition diagram

Table1. The meaning of parameters

N	Number of neighbor node
N_{out}	Number of nodes outside transmission range
N_{lim}	Maximum number of interfering nodes
W	Minimum back-off contention window size
$T_{RTS}, T_{CTS}, T_{DATA}, T_{ack}$	Duration time of transmission RTS, CTS, DATA and ACK frame
β	Collision probability
σ	Slot time
m	Back-off state

The transition probability from idle to DATA transmission with a collision, since the RTS and CTS already success derived as

$$P_{id} = p(1-p)^{N-1} P_{hidden_data} \quad (9)$$

$$P_{hidden_data} = \left(1 - \sum_{j=0}^{N_{lim}} p^j (1-p)^{N_{out}-N_{lim}} \right)^{(T_{DATA}-T_{CTS})} \quad (10)$$

and then to find the transition probability from idle to ACK transmission with a collision is the sum of all transitions probability which given by

$$P_{ia} = 1 - P_{ii} - P_{it} - P_{ir} - P_{ic} - P_{id} \quad (11)$$

The steady-state probabilities of the idle transmit, RTS/CTS/DATA and ACK with collision state denote by $S_i, S_t, S_r, S_c, S_d, S_a$ respectively. To calculate the probability of idle state by using the sum of all transition state $P_{ii} + P_{it} + P_{ir} + P_{ic} + P_{id} + P_{ia} = 1$ and the sum of steady-state

probabilities $S_i + S_t + S_r + S_c + S_d + S_a = 1$ then by using closed-form for the Markov Chain, we have

$$S_i P_{ii} + S_t + S_r + S_c + S_d + S_a = S_i \quad (12)$$

$$S_i P_{ii} + 1 - S_i = S_i \quad (13)$$

$$S_i = \frac{1}{2 - P_{ii}} \quad (14)$$

In such the probabilities models, we will use these models to predict the energy consumption of MAC which we will consider the energy consumed by receive packet when collision occurred and in practice, when the transmitter send unicast packets to its receiver, it will be overheard by all neighboring node. Hence, all neighboring node will loss energy even though the packet transmission was not directed to them. Therefore, a node should be Overhear state (P_o) to reduce the energy consumption, Therefore, the energy consumption model can be calculated as following

$$E_{mac} = S_i P_{ii} P_{idle} \sigma + S_t (P_s + P_r + P_o \cdot (N-1)) \cdot T_{data} + S_t (P_s + P_r \cdot N) \cdot T_{cr} + S_{col-ctr} (P_s + P_r \cdot N) \cdot T_{cr} + S_{col-data} (P_s + P_r + P_o \cdot (N-1)) \cdot T_{data} \quad (15)$$

Where E_{mac} is the energy cost of MAC, P_s , P_r , P_o and P_{idle} is power consumed in transmit, receive overhear and idle state. S_i and S_t is the probability of idle and transmission state, $S_{col-ctr}$ and $S_{col-data}$ defined the probability of transmission control and data packet with a collision state, that given by $S_i P_{ir}$, $S_i P_{ic}$, $S_i P_{id}$, $S_i P_{ia}$ for RTS, CTS, DATA and ACK packet collision state, respectively. Where σ slot is time, T_{ctr} and T_{data} is the duration time of transmission control packet (RTS/CTS/ACK) and data packet, N is the number of nodes within coverage area of source node.

B. Route Discovery Mechanism

Our protocol proposes a route discovery technique based on energy consumed in Medium Access Control (MAC). The optimum route is the least energy consumed. First, when the source node wants to send a packet, it first broadcasts a RREQ packet to its neighbors. Its neighbor node will check this packet whether it was received, if it is not, it will re-broadcast the RREQ packet to its neighbors for the first time.

Before the node re-broadcast the RREQ packet, it calculates the energy consumption of MAC with the previous node, which sends the RREQ. In addition, it appends this value into Energy Route Cost in the RREQ header and re-broadcast the RREQ packet to its neighbor node until the destination has received. Then the destination node calculates the energy route cost of each path which can calculate as following:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^{d-1} E_{i,i+1}^{MAC} \quad (16)$$

Where E_{total} is energy route cost, which is summation of the energy cost of all links in the path. This process will continue until RREQ reach to destination node. The destination node will choose the optimum route based on lowest energy route cost among possible routes. Then destination node replies Route Request Packet (RREP) back to the source node by selected route.

Figure 7, shows the route discovery mechanism of our propose technique, which the upper route is the optimum route and will be selected because of lower energy consumed.

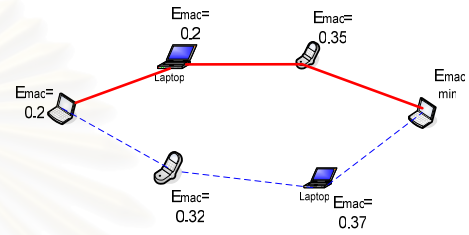


Figure7. Route discovery mechanism

IV. SIMULATION MODEL AND EVALUATION

We are implementing in NS2.29 which consider a network topology of 50 mobile nodes random placed over a $1000 \times 1000 m^2$. With a random waypoint mobility mode, another random destination is targeted after some certain pause time (60 sec). Each simulation takes 900 seconds simulation time. Twenty constant bit rate (CBR) sources and their corresponding destinations are randomly set. 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 of radio interface, $P_t = 0.6635$ watts for transmit state, $P_r = 0.395$ watts and $P_o = 0.200$ watts $P_i = 0.086$ for receive overhearing and idle state, respectively. All simulation, we let the initial energy of each node to be 10 joules. We vary offered load from 4, 10, 15, 20 and 25 packet per second to find the network lifetime.

4.1. Performance Metrics

To study the performance of our propose protocol, we implemented and observe three routing algorithms: The Shortest-Path (SP-the original AODV routing protocol with selects the route with the minimum latency) [9] and our routing protocol, in case of consider the overhearing packet (E_{mac}). To evaluate the efficiency of proposed routing protocol, we investigated four metrics compared as following:

- *Dropped packet in MAC*: the total of packet dropped in MAC by collision and loss.
- *Collision packet in MAC*: the total data packet collision in MAC.
- *Network Lifetime*: the time taken for a first node in simulation dies due to battery resource exhaustion.
- *Mean Network Lifetime*: the time taken for a last node in simulation dies due to battery resource exhaustion.

V. SIMULATION RESULTS AND ANALYSIS

Figure 8 shows the total dropped packet in MAC as a function of offered load. The results show that our protocol is about two time lower packet dropped than shortest path. This is because minimum reliable energy is considered for the route selection.

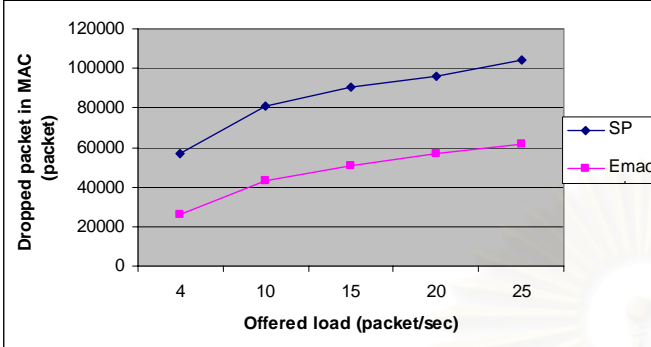


Figure 8. Dropped packet in MAC Vs Offered load

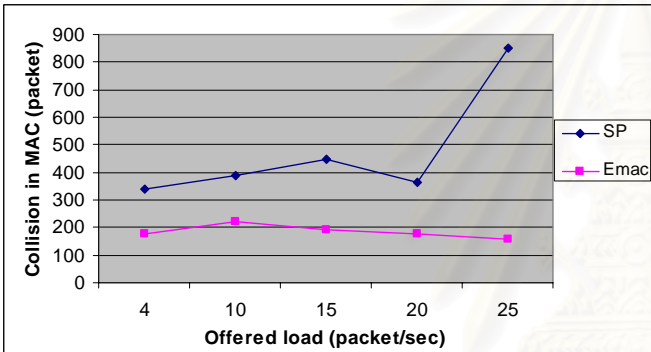


Figure 9. Collision packet in MAC Vs Offered load

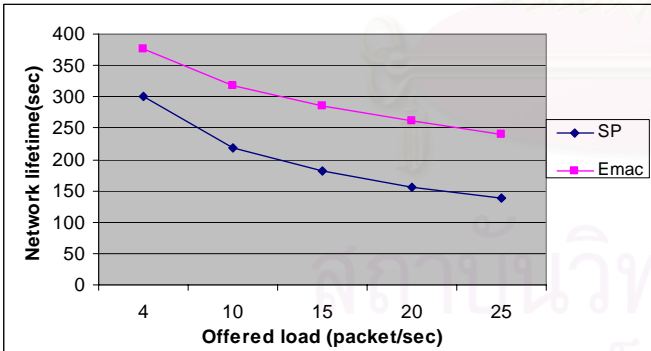


Figure 10. Network lifetime Vs Offered load

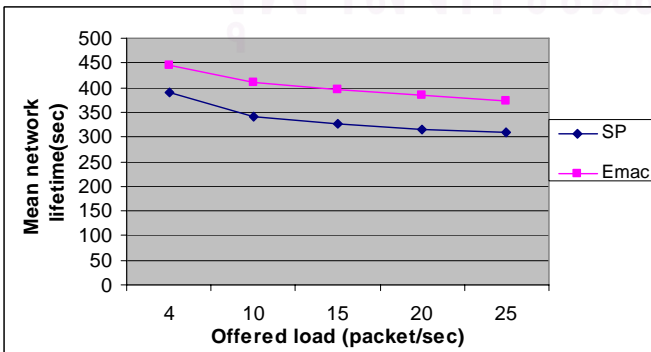


Figure 11. Mean network lifetime Vs Offered load

Figure 9 shows the total packet dropped due to collision as a function of offered load. The result shows our protocol can reduce collision packet as about 47% of the shortest path. Figure 10 shows result of Network lifetime as a function of offered load which considered only Energy consumption of MAC. The result show that our protocol (EMAC) outperform the Shortest Path about 18.75% extended of network lifetime. In Figure 11 the results shows that guarantee the network lifetime is a function of offered load. Our protocol can be more extend the network lifetime. This is because it avoids the node with higher energy consumption.

VI. CONCLUSION

In this paper, we proposed a new routing protocol based on on-demand to find the optimum path using cross-layer design which can avoid interference and congestion. Consideration of total energy consumed in MAC layer which calculate in MAC layer, and select the optimum path in network layer.

In our simulation, we evaluate our protocol using ns-2 simulator. We modified the energy consumption model in ns-2 to support the energy consumption due to overhearing and idle state in our energy consumption model.

The result shows that the network lifetime of our protocol which considered energy consumed in MAC outperform the Shortest Path schemes about 18.75 %.

Now we are implementing our protocol with consider the energy consume by broadcast RREQ packet and include consideration over the level of battery remaining in each node.

ACKNOWLEDGEMENT

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

REFERENCE

- [1] Corson. S. and Macker. J., "Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," Network Working Group RFC 2501, Naval Research Laboratory, January 1999
- [2] 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, Ict 5-7, 2004
- [3] Ping Ding, JoAnne Holliday, Aslihan Celik, "Modeling the Performance of A Wireless Node in Multihop Ad-Hoc Networks" Proc. of the IEEE International Conference on Wireless Networks Communications and Mobile Computing (WirelessCom2005) Kaanapali Beach, Hawaii, June 2005.
- [4] Giuseppe Bianchi "Performance Analysis of the IEEE802.11 Distributed Coordination Function" IEEE Journal commun, Vol.18, No.3, March 2000
- [5] A. Chandra, V. Gummalla, and John O. Limb, "Wireless medium access control protocols," IEEE Commun.Surv. Tutorials, pp. 2-15, 2000.
- [6] C. Siva Ram Murthy, B. S. Manoj "Ad hoc wireless networks architectures and protocols" Prentice hall, Professional technical reference, 2004

- [7] "IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications." IEEE standards Board, 1997.
- [8] Sameh Gobriel, Rami Melhem and Daniel Mosse., "A Unified Interference/Collision Analysis for Power-aware Adhoc Networks, "University of Pittsburgh ,*Proc IEEE*,2004,pp. 598- 608.
- [9] C.E.Perkins, E.M. Royer and S.R. Das.,"Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing, "IEFT internet Draft (work in progress), Nov 2002.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย โกวิทย์ สิทธิ เกิดวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดนครพนม เข้ารับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่นในปีการศึกษา 2542 และได้สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยขอนแก่นในปีการศึกษา 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย