รายงานฉบับสมบูรณ์

ชื่อเรื่อง การจัดสรรเส้นทางที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาถึงการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในโครงข่ายแอดฮอก

ชื่อเรื่อง ENERGY EFFICIENT ROUTING MECHANISM WITH MAC PROTOCOLCONSIDERATION IN AD HOC NETWORK

รหัสโครงการ

F-31-203-09-03

รายนามคณะผู้วิจัย

ผศ. ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นาย โกวิทย์ สิทธิ
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันเริ่มต้นโครงการ ...15 กันยายน 2549.....
วันสิ้นสุดโครงการ ....30 เมษายน 2553.....

ตรวจสอบการพิมพ์แล้ว : ชื่อผู้ตรวจสอบ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก

ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ปีงบประมาณที่ได้รับทุน ปีงบประมาณ 2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอดฮอก เพื่อทำให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 2 โพรโทคอล โพรโทคอลแรกที่นำเสนอคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยมีเป้าหมายทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น เป็นวิธีที่นำเอาพลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณา ซึ่งเป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่ง การรับการส่งแพ็กเกตในกรณีเกิดการชนของแพ็กเกตและการได้ยินแพ็กเกตจากโนดรอบข้าง รวมทั้งผลกระทบของกำลังงานที่โนดข้างเคียงใช้ ซึ่งส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเกต เส้นทางที่ถูกใช้จะเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด โพรโทคอลที่นำเสนอแบบที่สองเป็น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโนดมาพิจารณาเข้าด้วยกัน เพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด โดยโพรโทคอลนี้เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมไว้ 2 แบบ โดยแบบแรกเป็นการนำค่าระดับพลังงานที่เหลือของโนดในแต่ละเส้นทางมาเป็นค่าประวิงเวลาก่อนที่จะส่งแพ็กเกต โนดปลายทางจะทำการเลือกเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด ส่วนแบบที่สองจะเป็นการนำค่าพลังงานที่คำนวณได้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณาพร้อมๆกับค่าระดับของพลังงานที่เหลือของโนด โดยเส้นทางที่ถูกเลือกใช้ จะเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ได้นำเสนอแบบผสมทั้งสองวิธีให้ประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ดีกว่าแบบอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดพลังงานที่ใช้ในเส้นทางได้

ABSTRACT

This research 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 research. 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.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ 3
บทคัดย่อภาษาไทย 4
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ 5
สารบัญ 6
สารบัญภาพ 10
สารบัญตาราง 14
บทที่
1 บทนำ 15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 16
1.2 แนวทางของงานวิจัย 19
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 21
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 21
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ 22
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 22
2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 23
2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอก 23
2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอก (Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks) 25
2.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบพื้นฐาน (Basic Ad hoc routing protocols) 26
2.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน(Power-Aware Routing Protocols) 27
2.2.2.1 Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR) 28
2.2.2.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks 29
2.2.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด (Battery-Aware Routing Protocols) 30

2.2.3.1 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks 31
2.2.3.2 DSR-based Energy-aware Routing Protocols in Ad Hoc Networks 33
2.2.3.3 Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks Based on the Energy Drain Rate (MDR) 34
2.2.4 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols) 36
2.2.4.1 Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR) 36
2.2.4.2 Conditional Minimum Drain Rate (CMDR) 38
2.2.4.3 Cost-effective Maximum Lifetime Routing Protocol for Wireless Sensor Network 38
2.3 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC) 39
2.3.1 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐาน 40
2.3.2 ปัญหาสถานีซ่อนเร้น 42
2.3.3 การแก้ไขปัญหาสถานีซ่อนเร้น 42
2.3.4 Inter-Frame Spacing (IFS) 44
2.4 แบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Energy Consumption Model of MAC) 45
2.4.1 Modeling and Energy-Efficient MAC Layer Protocol 48
2.4.2 Model and Improvement in power control MAC Protocol for Ad-Hoc Network 49
2.4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้วยแบบจำลอง Markov' chain model 51
2.5 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในงานวิจัย 55
2.5.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) 58
2.5.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism) 59
2.5.3 กระบวนการดูแลเส้นทาง (Route Maintenance) 62
2.6 ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต 64
2.6.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง 64
2.6.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม 65

2.7 ผลการจำลองเบื้องต้น 66
3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ 70
3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Power Aware Routing Protocols) 70
3.1.1 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอ 71
3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism) 75
3.1.3 ลักษณะพิเศษของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ 79
3.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Protocols) 80
3.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่เหลือมาเป็นค่าประวิงเวลา 81
3.2.1.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism) 81
3.2.1.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่ใช้และพลังงานที่เหลือมาคำนวณพร้อมกัน 85
3.3 สรุป 89
4 สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ 90
4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment) 90
4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลของโนดต้นทาง 90
4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล 92
4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทอคอลที่นำเสนอ 93
4.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน (Power-Aware Routing Protocols) 93
4.2.1.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโนดต้นทาง 95
4.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Routing Protocols) 100
4.2.2.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง 101

4.2.2.2 การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลา (Maximum Delay) และเวลาการรอคอย (Waiting Time) ที่ใช้ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ 101
4.2.2.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง 102
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ 117
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 121
5.1 สรุปผลการวิจัย 121
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต 122
รายการอ้างอิง 124
ภาคผนวก 129

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบมีสถานีฐานและไม่มีสถานีฐาน 23
รูปที่ 2.2 การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication) 24
รูปที่ 2.3 การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ 30
รูปที่ 2.4 การเพิ่มแบบ Exponential ของ contention window (CW) 30
รูปที่ 2.5 กลไกของ IEEE 802.11 31
รูปที่ 2.6 ปัญหาสถานีซ่อนเร้น 32
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเข้าถึงช่องสัญญาณในมาตรฐาน IEEE802.11 DCF 33
รูปที่ 2.8 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs 46
รูปที่ 2.9 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ การทำงานในช่องสื่อสาร 48
รูปที่ 2.10 กลุ่มโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด 49
รูปที่ 2.11 พื้นที่และขอบเขตการติดต่อสื่อสาร CCA และพื้นที่แทรกสอด 50
รูปที่ 2.12 แบบจำลองลูกโซ่ของ Markov การทำงานของการ random back-off 52
รูปที่ 2.13 การติดต่อสื่อสารโดยใช้ทราฟฟิกแบบต่าง ๆ 56
รูปที่ 2.13(ก) ทราฟฟิกแบบ Unicast 56
รูปที่ 2.13(ข) ทราฟฟิกแบบ Overhear 56
รูปที่ 2.14 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs ที่นำเสนอ 57
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (Route Request) 60
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของแพ็กเกตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply หรือ RREP) 61
รูปที่ 2.17 เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโนด S และ D 65
รูปที่ 2.18 ผลการจำลองเบื้องต้น 66
รูปที่ 2.18(ก) Dropped packet VS Pause time 67
รูปที่ 2.18(ข) Energy consumption VS Pause time 67
รูปที่ 2.18(ค) Average End-to-End Delay VS Maximum speed of node 67
รูปที่ 2.18(ง) Energy per Good-put VS Maximum speed of node 67
รูปที่ 2.18(จ) Network life-time VS Maximum speed of node 68
รูปที่ 2.18(ฉ) Energy consumption VS Pause time 68
รูปที่ 3.1 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานการณ์ทำงานในช่องสื่อสาร 72
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงาน 76

รูปที่ 3.3 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด 78
รูปที่ 3.4 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด 78
รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy) 79
รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง 84
รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง 84
รูปที่ 3.8 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทางแบบผสมที่นำเสนอแบบที่หนึ่ง 85
รูปที่ 3.9 โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่สอง 85
รูปที่ 3.10 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางแบบผสมวิธีที่สอง 87
รูปที่ 3.11 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางแบบผสมวิธีที่สอง 87
รูปที่ 3.12 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง 88
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่อจำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 94
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 94
รูปที่ 4.3 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง) 95
รูปที่ 4.4 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่ง แพ็กเกตข้อมูล 96
รูปที่ 4.5 จำนวนพ็กเกตข้อมูลที่ถูกชนเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 97
รูปที่ 4.6 จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 97
รูปที่ 4.7 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 98
รูปที่ 4.8 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 98

รูปที่ 4.9 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง) 99
รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม 103
รูปที่ 4.11 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด) 103
รูปที่ 4.12 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด) 103
รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าประวิงเวลาสูงสุด) 103
รูปที่ 4.14 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย) 103
รูปที่ 4.15 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย) 107
รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีการพิจารณาช่วงของค่าเวลาการรอคอย) 107
รูปที่ 4.17 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง) 108
รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง) 109
รูปที่ 4.19 จำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง) 109
รูปที่ 4.20 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง) 110
รูปที่ 4.21 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง) 111
รูปที่ 4.22 อายุการใช้งานของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 111

รูปที่ 4.23 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 113
รูปที่ 4.24 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 113
รูปที่ 4.25 จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 113
รูปที่ 4.26 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 115
รูปที่ 4.27 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 115
รูปที่ 4.28 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล 115
รูปที่ 4.29 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ) 117
รูปที่ 4.30 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ) 118
รูปที่ 4.31 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ) 119
รูปที่ 4.32 จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกละทิ้งในชั้น MACเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอ) 119

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน IEEE 802.11 44
ตารางที่ 2.2 กำลังที่ใช้ในแต่ละโมดการทำงานของอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย 47
ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ของสมการในงานวิจัย 74
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลของโนดต้นทาง 90

บทที่ 1

บทนำ

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

เนื่องจากในปัจจุบันประชาชนได้ให้ความสนใจในด้านการลดใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นเทคโนโลยีต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องใช้พลังงาน จึงต้องคิดค้นวิธีการใหม่ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้ได้คุ้มค่ามากที่สุด โครงข่ายแอดฮอก (Ad hoc Network) จึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากข้อดีหลาย ๆ ประการทั้งในด้านค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโครงข่ายที่ต่ำ และง่ายในการติดตั้งโครงข่าย จึงทำให้ใช้เวลาการติดตั้งน้อยลง ดังนั้นการสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอก จึงเป็นการสื่อสารอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสะดวกสบายในการพกพาและสามารถพกติดตัวไปได้ทุกที่ อีกทั้งโครงข่ายแอดฮอกเป็นการติดต่อสื่อสารกันโดยไม่จำเป็นจะต้องมีตัวกลางหรือจุดเข้าถึง (Access Point) เหมือนในโครงข่ายเซลลูลาร์ (Cellular network) หรือโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) โนดทุกโนดในโครงข่ายสามารถ

ติดต่อกันได้โดยตรงภายในระยะการส่งข้อมูล (Transmission range) แต่ถ้าต้องการสื่อสารกับโนดที่อยู่เกินระยะการส่งข้อมูล การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโนดระหว่างทาง (Intermediate node) ในการถ่ายทอดข้อมูลนั้นไปยังโนดปลายทาง ดังนั้นโนดในโครงข่ายแอดฮอกจึงต้องมีความสามารถในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางได้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารในปัจจุบันมีการพัฒนาให้มีความสามารถที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อความสะดวกสบายในการใช้งาน โดยในสังคมยุคนี้ การสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ตลอดจนความต้องการของผู้ใช้ก็มีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความสะดวกสบายในการพกพาและง่ายต่อการติดตั้งโครงข่าย ทำให้มีนักวิจัยคิดค้นและพัฒนาประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอกออกมาเป็นจำนวนมากเพื่อรองรับกับความต้องการของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งก็ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างผู้ใช้งานก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้การส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพที่ลดน้อยลง เนื่องจากการสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอกเป็นโครงข่ายที่ก่อรูปขึ้นโดยไม่มีการอำนวยความสะดวกจากส่วนกลาง (Infrastructure less) และเป็นการทำงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed) โดยโครงข่ายจะประกอบด้วย โนดเคลื่อนที่ (Mobile nodes) ที่มีการติดต่อกันแบบไร้สายเพื่อส่งข้อมูลในรูปของแพ็กเกตข้อมูลระหว่างกัน เนื่องจากโนดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นคุณภาพของช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการส่งข้อมูลก็จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา รูปแบบการเชื่อมต่อของโนดหรือทอพอโลยีของโครงข่ายก็จะไม่แน่นอนและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า อีกทั้งการสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอกเป็นการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop communication) ซึ่งถ้าโนดต้นทางต้องการสื่อสารกับโนดปลายทางที่ไม่อยู่ในระยะการส่งของโนดต้นทาง โนดต้นทางจำเป็นต้องส่งแพ็กเกตผ่านโนดระหว่างทาง (Intermediate nodes) แล้วให้โนดระหว่างทางทำหน้าที่ส่งแพ็กเกตนั้นต่อไปยังโนดปลายทาง ดังนั้นจึงส่งผลให้ทุกโนดในโครงข่ายจำต้องมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกันในโครงข่าย เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น การแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างผู้ใช้งานก็จะได้รับผลกระทบจากข้อจำกัดหลายๆอย่างดังได้กล่าวไว้ในข้างต้น การชนกันของแพ็กเกตก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองของการใช้พลังงานและสูญเสียเวลาในการใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานแต่ละคนมีความต้องการที่จะลดความสิ้นเปลืองต่างๆ เพื่อให้ได้ประโยชน์ในการใช้งานให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของผู้ใช้ ได้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม คิดค้นและออกแบบวิธีการต่าง ๆ ออกมามากมาย เพื่อปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายแอดฮอกให้มีคุณภาพใน

ทุกๆด้าน โดยเฉพาะการออกแบบเพื่อพัฒนาในด้านการลดใช้พลังงานเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในแต่ละโนดเคลื่อนที่ให้ใช้งานได้นานที่สุด [1][2][3][4] ซึ่งโดยทั่วไป การออกแบบเพื่อที่จะให้โนดใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น สามารถที่จะออกแบบได้ในทุกๆชั้นของการสื่อสาร ตั้งแต่ชั้นการสื่อสารกายภาพ (Physical layer) ไปจนถึงชั้นสื่อสารการประยุกต์ (Application layer) โดยแต่ละชั้นของการสื่อสารจะมีวิธีในการพัฒนาในส่วนของการรักษาพลังงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละชั้นของการสื่อสาร แต่โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งการใช้พลังงานในโครงข่ายแอดฮอกออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของ การควบคุม (Power control) การจัดเส้นทาง (Power aware routing) และในส่วนของการจัดการพลังงาน (Power management) [5]

เนื่องด้วยในระบบสื่อสารแบบมีสาย ทอพอโลยีของโครงข่ายจะคงที่และง่ายต่อการจัดการกับระบบ แต่ในทางตรงกันข้าม ทอพอโลยีของระบบแอดฮอก มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาถึงแม้จะไม่มีการเคลื่อนของโนดตัวกลางก็ตาม การปรับเปลี่ยนทิศทางและพลังงานสามารถส่งผลให้ทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ พลังงานที่ใช้ในการควบคุมนั้น ส่วนมากจะนำมาใช้ในการควบคุมพลังงานในการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งข้อดีของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งนั้นจะช่วยต่ออายุของแบตเตอรี่ในแต่ละโนดให้นานยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มแบนด์วิดท์และลดขอบเขตของการสื่อสารที่ทับซ้อนกันของแต่ละโนดอีกด้วย แต่ในทางตรงกันข้าม การควบคุมพลังงานการส่งจะทำให้ความน่าเชื่อถือลดลง มีอัตราผิดพลาดของบิตเพิ่มขึ้น (Error Bit Rate, EBR) และพลังงานที่ใช้ในการควบคุมอีกแบบหนึ่งคือ การจัดการทอพอโลยี (Topology Management) หรืออีกชื่อหนึ่งคือ “Topology control” ซึ่งจะเป็นการปรับเปลี่ยนพลังงานในการรับส่งข้อมูลและรักษาสภาวะการติดต่อไว้ในเวลาเดียวกัน

ส่วนพลังงานที่ใช้ในการจัดเส้นทางนั้น จะเป็นการใช้พลังงานเพื่อตรวจสอบว่าโนดที่จะส่งต่อนั้นมีระดับพลังงานที่พอเพียงหรือไม่ ถ้าระดับพลังงานที่เหลืออยู่นั้นพอที่จะใช้ในการติดต่อสื่อสารกันได้ก็จะทำการส่งแพ็กเกต ต่อไปยังโนดนั้น และจะได้เส้นทางในการส่งข้อมูลออกมาในที่สุด

พลังงานที่ใช้ในการจัดการใน IEEE802.11 นั้นจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โมด [2] คือ โมดทำงาน (Active Mode, AM) และโมดอนุรักษ์พลังงาน (Power-Saving Mode, PSM) ซึ่งในแต่ละโมดก็จะมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไป โดยในโมดทำงานจะมีการใช้พลังงานที่สูงกว่าในโมดอนุรักษ์พลังงาน และในชั้นการเข้าถึงตัวกลางจะมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 2 ช่อง คือ ช่องสื่อสารข้อมูลและช่องสื่อสารควบคุม

ในส่วนของชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC) ก็ได้มีนักวิจัยคิดค้นวิธีการใหม่ ๆ ออกมา เช่น การจัดสรรการใช้ตัวกลางในโนดแต่ละโนด [5] เนื่องจากโนดทุกโนดต้องการส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วที่สุด แต่เนื่องจากแบนด์วิดท์ที่มีอยู่ในโครงข่ายมีอยู่จำกัด

ทำให้ต้องมีวิธีการในการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งก็เป็นหัวข้อที่น่าสนใจมากของงานวิจัยในปัจจุบัน โดยที่วิธีการแบบ DCF ในมาตรฐาน 802.11 นั้นเป็นโพรโทคอลมาตรฐานเพื่อใช้ในการตรวจสอบช่องสื่อสารทั้งช่องสื่อสารทางกายภาพและช่องสื่อสารเสมือนที่เรียกว่า 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 ทั้งการเลือกแพ็กเกตที่ไม่มีความจำเป็นทิ้งไปก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการชนกันของข้อมูล การปรับเปลี่ยนกำลังการส่งแพ็กเกต [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 คือเส้นทางที่มีการใช้พลังงานรวมของโนดที่อยู่ในเส้นทางต่ำที่สุด ส่วนในกรณีที่กำลังส่งมีค่าคงที่ (Constant-power scenarios) แต่ละข่ายเชื่อมโยงจะมีค่าต้นทุนที่เท่ากันหมดทั้งโครงข่าย เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ดีที่สุด (กำลังส่งรวมต่ำที่สุด) นั้นคือ เส้นทางที่สั้นที่สุด อีกกรณีหนึ่งคือค่ากำลังส่งสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับระยะทางของข่ายเชื่อมโยงหรือระยะห่างระหว่างโนดตัวส่งและโนดตัวรับ (Variable-power scenarios) ซึ่งกรณีนี้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยง (Link cost) จะมีค่าสูงเมื่อระยะห่างระหว่างโนดสูง ซึ่งโพรโทคอลจัดหาเส้นทางจะเลือกเส้นทางที่มีช่วงเชื่อมต่อที่มาก และแต่ละช่วงเชื่อมต่อมีระยะทางที่สั้น

ในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้นก็มีการใช้พลังงานในการจัดสรรการเข้าใช้ตัวกลางของโนดแต่ละโนด โดยพลังงานจะมีการถูกใช้ไปมากหรือน้อยนั้น ก็จะขึ้นอยู่กับกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูล ทั้งการส่งแพ็กเกตข้อมูลออกมาในโมดการทำงานแบบโมดการส่ง (Transmit mode) การรับแพ็กเกตข้อมูลในโมดการรับ (Receive mode) ซึ่งทั้งสองโมดจะรวมอยู่ในโมดทำงาน (Active mode) และอีกสามโมด คือ โมดสถานะว่าง (Idle mode) โมดสถานะหลับ (Sleep mode) และโมดสถานะปิด (Power-off mode) โดยที่โมดสถานะว่างจะเป็นสถานะที่โนดสามารถทำการส่งและรับข้อมูลได้ และโมดสถานะหลับ จะเป็นสถานะประหยัดพลังงานและใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งสถานะนี้จะ

ไม่มีการรับและส่งข้อมูลจนกว่าจะถูกกระตุ้นขึ้นมาก่อน สุดท้ายคือโมดปิด จะเป็นสถานะที่ไม่มีตัวตน คือไม่มีการใช้พลังงานหรือพลังงานหมด ซึ่งก็จะปิดตัวไป

การคิดค้นวิธีในการลดใช้พลังงานในโมดต่าง ๆ ก็เป็นหัวข้อที่มีนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่มให้ความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งถ้ามีการลดการใช้พลังงานในแต่ละโมดแล้ว จะต้องไม่มีผลกระทบกับโครงข่ายหรือประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสาร ผู้เขียนมีความสนใจในการพิจารณาการใช้พลังงานในส่วนของชั้นการเข้าถึงตัวกลาง เพื่อนำมาเพิ่มเติมในส่วนของการจัดหาเส้นทางของโครงข่ายแอดฮอก โดยจากเดิมที่มีการคิดค้นวิธีในการเลือกใช้เส้นทางตามปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแต่ละโนด [4] โดยโนดที่มีความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) ต่ำจะไม่ถูกใช้งานมากเกินไป เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโนดและอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด

ซึ่งเมื่อคิดคำนวณการใช้พลังงานในส่วนของชั้นการเข้าถึงตัวกลางเพิ่มเข้าไปอีกจากเดิม ซึ่งพลังงานที่คำนวณนี้จะพิจารณาจากความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเกตสำเร็จ ความน่าจะเป็นที่ส่งแพ็กเกตแล้วจะเกิดการชนกันขึ้น ซึ่งก็จะรวมถึงพลังงานที่จะต้องส่งแพ็กเกตซ้ำเมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเกต ซึ่งเมื่อพิจารณาในส่วนนี้ก็ยิ่งจะทำให้ การเลือกใช้เส้นทางในโครงข่ายแอดฮอกมีการประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของโนดก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะนอกจากเส้นทางที่เลือกจะใช้เส้นทางที่มีปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแต่ละโนดแล้วยังพิจารณาถึงผลกระทบจากโนดข้างเคียงอีกด้วย โดยโครงร่างงานวิจัยฉบับนี้จะเสนอวิธีการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อที่จะทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุดหรือขยายระยะเวลาการทำงานก่อนที่โครงข่ายจะเกิดการแบ่งออกเป็นสองส่วน ซึ่งจะทำให้โนดไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยจะคิดคำนวณการใช้พลังงานในการสื่อสารในแต่ละการเชื่อมต่อระหว่างโนดที่ต่ำที่สุด พลังงานในการคิดนั้นจะเป็นพลังงานที่ใช้ในชั้นของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเป็นหลัก ซึ่งจะเป็นพลังงานในส่วนของการส่งแพ็กเกตข้อมูล(Data packet) และแพ็กเกตควบคุม (Control packet) เช่น แพ็กเกต RTS (Request to Send) และแพ็กเกต CTS (Clear to Send) เป็นต้น นอกเหนือจากนั้นยังคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการส่ง การรับแพ็กเกตซ้ำเมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเกต รวมทั้งพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการได้ยินแพ็กเกต (Overhearing Packet) จากโนดที่อยู่ข้างเคียงอีกด้วย ดังนั้นพลังงานที่คำนวณได้จะไม่ใช่เฉพาะคู่โนดส่งและโนดรับเท่านั้น แต่จะรวมถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียจากการได้ยินแพ็กเกตดังกล่าวอีกด้วย

1.2 แนวทางของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เสอวิธีการออกแบบกระบวนการจัดหาเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอก ซึ่งจะเป็นการทำงานแบบข้ามชั้น (Cross Layer) โดยจะเป็นการทำงานข้ามชั้นของชั้นการควบคุมการเข้าถึง

ตัวกลางกับชั้นโครงข่าย ซึ่งจะพิจารณาพลังงานที่ใช้ (Energy consumption)ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเป็นหลัก และส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังชั้นโครงข่าย เพื่อทำการหาเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือก ส่วนเส้นทางอื่นจะถูกลบทิ้งไป เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะเป็นเส้นทางที่ไม่มีการชนกันของข้อมูลหรืออาจจะมีการชนกันของข้อมูลที่น้อยที่สุด จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้อายุการใช้งานของแต่ละโนด และทั้งโครงข่ายนานยิ่งขึ้น เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่ต่ำลง แบตเตอรี่ก็จะมีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น ปริมาณงานที่จะได้รับ (Throughput) ก็จะเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพของระบบก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโนดให้มากที่สุดที่นำเสนอนี้จะอยู่บนพื้นฐานโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV โดยได้ทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV เพื่อทำให้กระบวนการเลือกเส้นทางสามารถยืดอายุการใช้งานของโนดและโครงข่าย โดยนอกจากที่จะพิจารณาเฉพาะพลังงานที่ใช้ในส่วนของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแล้ว ยังจะพิจารณาถึงพลังงานของแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่ละโนดอีกด้วย โดยเส้นทางที่มีพลังงานแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดในเส้นทางเพียงพอต่อการสื่อสารและอยู่ในระดับที่สูงพอก็จะถูกพิจารณาเพราะจะได้เพิ่มอายุการทำงานของแต่ละโนดให้นานขึ้น โดยการที่จะนำค่าที่เหลือของแบตเตอรี่มาพิจารณาร่วมกับพลังงานที่ใช้ในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้นมี 2 วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ โดยวิธีแรกจะเป็นการนำปริมาณที่เหลือของแบตเตอรี่มาเป็นเวลาที่ใช้ในการหน่วงแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet ,RREQ) โดยกระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโนดปลายทาง แต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโนดปลายทางนั้น โนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเกต RREQ จะต้องบรรจุจำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่โนดต้นทางต้องการจะสื่อสารกับโนดปลายทาง และภายหลังจากโนดข้างเคียงได้รับแพ็กเกต RREQ โนดจะต้องคำนวณว่า ณ ขณะเวลานั้นโนดมีปริมาณที่เหลือของแบตเตอรี่มากพอที่จะใช้งานหรือไม่ ซึ่งคำนวณได้จากค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนด (Battery Lifetime) ต่อจากนั้นโนดระหว่างทางก็จะทำการหน่วงเวลาแพ็กเกต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งตามฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay function) ก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโนดข้างเคียงต่อไป ซึ่งช่วงเวลาในการหน่วงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนด ณ ขณะเวลาปัจจุบัน โดยเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า กลไกการประวิงเวลา (Delay mechanism) ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งโนดปลายทางได้รับแพ็กเกต RREQ แรกเข้ามา โนดปลายทางก็จะตอบรับเส้นทางนี้ทันทีโดยการส่งแพ็กเกตตอบรับเส้นทางกลับไปยังโนดต้นทางผ่านทางเส้นทางเดิมที่แพ็กเกต RREQ เดินทางมาถึง ส่วน

อีกวิธีจะเป็นการนำค่าทั้งสองมาพิจารณาพร้อมกันให้ได้ค่าๆหนึ่งออกมาเพื่อเป็นค่าในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีแบตเตอรี่เหลือมากและใช้พลังงานในส่วนของการเข้าถึงตัวกลางต่ำๆ ก็จะถูกเลือก แต่ในกรณีที่ค่าที่ใช้ในการตัดสินใจนั้นมีค่าเท่ากันมากกว่าหนึ่งเส้นทาง จะดูจากเวลาที่แพ็กเกตมาถึงปลายทางเป็นหลัก โดยเส้นทางที่มาถึงก่อนจะเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC) ในโครงข่ายแอดฮอกที่มีผลต่อการใช้พลังงานของโนดเคลื่อนที่
2. เพื่อการออกแบบและพัฒนากระบวนการจัดหาเส้นทาง (Routing algorithm) ในโครงข่ายแอดฮอก โดยนำการใช้พลังงานในส่วนของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณา
3. เพื่อให้โนดเคลื่อนที่สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น (Network lifetime)

1.4 ขอบเขต และเป้าหมายของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหาเส้นทางในชั้นโครงข่าย (Network layer) ของโนดให้เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแอดฮอก โดยนำพลังงานที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (MAC layer) มาพิจารณาเพื่อให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ของแต่ละโนดยาวนานยิ่งขึ้น ภายใต้แบบจำลองการใช้พลังงานในส่วนการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้น จะพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในโมดการทำงานต่าง ๆ โดยในที่นี้ได้คำนวณถึงพลังงานที่จะเสียไปเมื่อเกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น นอกจากนี้อาจจะมีการเพิ่มเติมในส่วนของการพิจารณาระดับพลังงานในแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่โนดด้วย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น ปริมาณงานที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้น การประวิงเวลาก็จะลดลงด้วย เนื่องจากเส้นทางที่เลือกจะเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่ำที่สุด และจะไม่เกิดการชนกันของข้อมูลหรือมีโอกาสการชนกันที่ต่ำที่สุด จึงทำให้การติดต่อสื่อสารนั้นสำเร็จได้โดยไม่เกิดการชนกัน อีกทั้งยังเป็นการประหยัดพลังงานที่มีอยู่ให้ใช้งานได้นานที่สุด

โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอจะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าโนดแหล่งกำเนิดจะต้องทราบจำนวนโนดที่อยู่ในช่วงของการรับส่งข้อมูล เพื่อให้โนดในโครงข่ายนำไปใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตและนำไปคำนวณหาพลังงานที่ต้องใช้ในการสื่อสารระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทาง โนดในโครงข่ายทุกโนดใช้กำลังส่งที่คงที่เท่ากันทั้งโครงข่าย และไม่สามารถปรับเปลี่ยนกำลัง

ส่งได้ นอกจากนั้นได้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของโครงข่ายถึงลักษณะต่าง ๆ เช่น อายุการใช้งานของทั้งโนดและโครงข่าย ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และ Effective Reliable Throughput (จำนวนแพ็กเกตที่ถูกส่งไปยังโนดปลายทางอย่างน่าเชื่อถือ) ระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่คำนึงถึงการใช้พลังงานที่มีผู้เสนอไว้ก่อนหน้านี้

1.5 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าโพรโทคอลการจัดเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอกที่มีอยู่
2. ศึกษาค้นคว้าปัจจัยอื่นๆ ในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีผลต่ออายุการใช้งานและหาสมการที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในส่วนนี้
3. พัฒนาและออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางโดยนำปัจจัยที่ได้จากการศึกษามา หาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย เพื่อทำให้โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ออกแบบเป็นไปตามวัตถุประสงค์
4. เขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของโพรโทคอลจัดหาเส้นทางที่ได้ออกแบบมาจากข้างต้นและปรับปรุงโพรโทคอลที่ได้ออกแบบ
5. ทดสอบแบบจำลองโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อระบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่เคยมีผู้ออกแบบมาแล้ว
6. สรุป วิเคราะห์ผลที่ได้ และรวบรวมข้อมูลทั้งหมดพร้อมทั้งจัดทำงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

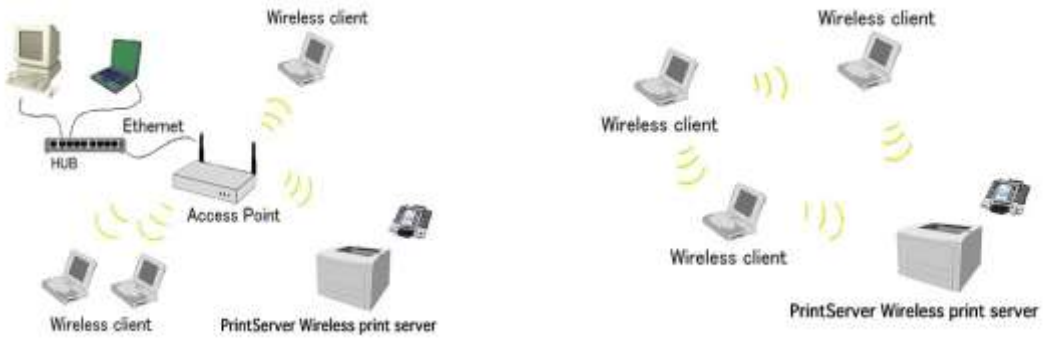
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับวิธีการต่าง ๆ ของโพรโทคอลการจัดเส้นทางของโครงข่ายแอดฮอก เพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น
2. ได้รู้ข้อดีและข้อเสียของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในออกแบบ
3. ได้ความรู้เกี่ยวการทำงานของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางและได้รู้ถึงผลกระทบของการใช้พลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงส่วนกลางต่ออายุการใช้งานของแต่ละโนด
4.. นำผลการศึกษาที่ได้จากวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบการทำงานจริง เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกต่อไป

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless network) เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะการสื่อสารแบบโครงข่ายเซลลูลาร์ (Cellular network) เนื่องจากสะดวกสบายในการพกพาและความยืดหยุ่นในการใช้งานในที่ต่าง ๆ เช่น ในที่ทำงานหรือสถานที่สาธารณะต่าง ๆ การสื่อสารแบบโครงข่ายแอดฮอก (Ad Hoc Network) เป็นการสื่อสารอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากโครงข่ายแอดฮอกเป็นการติดต่อสื่อสารกันโดยไม่จำเป็นจะต้องมีสถานีฐานหรือจุดเข้าถึง (Access Point) เหมือนในโครงข่ายเซลลูลาร์ หรือโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โนดทุกโนดในโครงข่ายสามารถติดต่อกันได้โดยตรงภายในระยะการส่งข้อมูล (Transmission range) แต่ถ้าต้องการสื่อสารกับโนดที่อยู่เกินระยะการส่งข้อมูล การสื่อสารนั้นจำเป็นต้องอาศัยโนดระหว่างทาง (Intermediate node) ในการถ่ายทอดข้อมูลนั้นไปยังโนดปลายทาง ดังนั้นโนดในโครงข่ายแอดฮอกจึงต้องมีความสามารถในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางได้



รูปที่ 2.1 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบมีสถานีฐานและไม่มีสถานีฐาน

2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอก (Characteristic of Ad Hoc Networks)

โครงข่ายแอดฮอกเป็นการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ทุก ๆ โนดจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระต่อกัน โนดแต่ละโนดจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวจัดเส้นทาง(Router) ซึ่งจะจัดเส□นทางการเคลื่อนที่ของแพ็กเกตไปยังสถานีอื่น ๆ ในโครงข่าย โดยปราศจากจุดเชื่อมต่อกลาง (Access point) ซึ่งเป็นเหตุทำให้

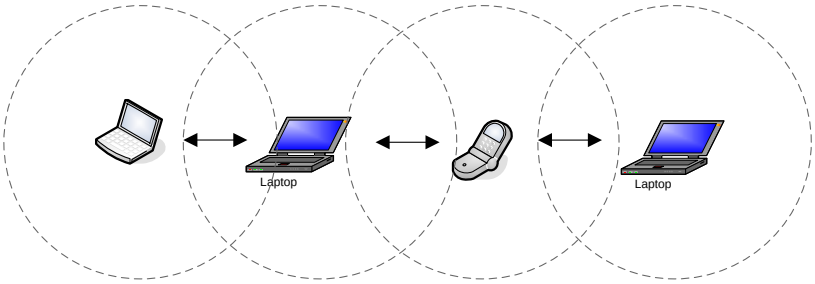
ทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งในแต่ละโนดก็จะมีข้อจำกัดหรือเงื่อนไขในการติดต่อสื่อสารต่าง ๆ มากมาย โดยคุณลักษณะหลักของโครงข่ายแอดฮอกนั้นใน [7] สรุปได้ดังนี้

2.1.1 **ทอพอโลยีแบบพลวัต** (Dynamic topology)

เนื่องจากโนดในโครงข่ายแอดฮอก แต่ละโนดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระต่อกัน และจากเงื่อนไขการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Random) หรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากไม่สามารถที่จะทำนายล่วงหน้าได้

2.1.2 **การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ** (Multi-hop communication)

เนื่องจากการสื่อสารในโครงข่ายแอดฮอกเป็นการสื่อสารกันโดยตรงโดยไม่ผ่านจุดของการเข้าถึง 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)

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายแอดฮอกมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน อีกทั้งยังไม่มีการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบรวมศูนย์ ดังนั้นโนดทุกโนดในโครงข่ายต้องมีความสามารถในการจัดการการเข้าถึง

ตัวกลางรวมถึงการควบคุมการไหลของทราฟฟิกให้ได้ผลซึ่งประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุดโดยการใช้มาตรฐานที่โนดทุก ๆ โนดรับรู้ร่วมกัน

2.1.4 ข้อจำกัดทางด้านแบนด์วิดท์ (Bandwidth constrained)

การสื่อสารแบบไร้สายจะมีประสิทธิภาพของการใช้แบนด์วิดท์ที่ต่ำกว่าการสื่อสารแบบใช้สาย เนื่องจากผลกระทบของการเข้าถึงแบบหลายทาง (Multiple access) เฟดดิง (Fading) สัญญาณรบกวน (Noise) ปัญหาของสถานีที่ซ่อนเร้น (Hidden station problem) และปัญหาสถานีที่รับฟังได้ (Exposed station problem) เป็นต้น ซึ่งผลกระทบของปัญหาเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพของการใช้แบนด์วิดท์มีค่าต่ำกว่าค่าแบนด์วิดท์สูงที่สุดที่สามารถใช้ได้

2.1.5 ข้อจำกัดทางด้านพลังงาน (Energy constrained)

พลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายก็เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญอย่างมาก เนื่องจากการสื่อสารของโครงข่ายแอดฮอกเป็นแบบหลายช่วงเชื่อมต่อดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นเมื่อพลังงานของอุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดหมดไปหรือไม่เพียงพอในการส่งข้อมูล อาจจะส่งผลกระทบในการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายได้ ทำให้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม ทำการค้นคว้าและวิจัยในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานในโครงข่ายแอดฮอก เพราะจะสามารถช่วยให้อายุการใช้งานของแต่ละโนดนานขึ้น

2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายแบบแอดฮอก (Ad hoc Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบแอดฮอกสามารถที่จะแบ่งตามคุณสมบัติได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ แบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive) แบบการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) และแบบผสมผสาน (Hybrid) ซึ่งจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวิธีเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้ากับแบบจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล โดยในรูปแบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้านั้นทุกโนดจะปรับปรุงข้อมูลเส้นทางของโครงข่ายอย่างต่อเนื่องและเมื่อโนดหนึ่งโนดใดต้องการที่จะส่งแพ็กเกต เส้นทางจะมีไว้เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นวิธีนี้ทำให้ไม่มีการประวิงเวลาในการจัดเส้นทาง อย่างไรก็ตามสำหรับรูปแบบที่มีการเคลื่อนที่ของโนดที่สูง การเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าจะทำให้ขาดแคลนจำนวนทรัพยากรที่จะใช้ในการให้ได้ซึ่งเส้นทางที่สมบูรณ์อยู่ตลอดเวลา ซึ่งตัวอย่างของโพรโทคอลการหาเส้นทางไว้ก่อน เช่น โพรโทคอล link state routing (LSR) และโพรโทคอล Distance vector routing (Bellman-Ford) [9] ไม่เคยที่จะถูกนำมาใช้ในโครงข่ายเคลื่อนที่ เพราะโพรโทคอลเหล่านี้มีความเร็วไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงข่าย หลังจากนั้นได้มีการนำโพรโทคอลพื้นฐานทั้งสอง (Link

state routing, distance vector routing) มาพัฒนาให้เข้ากับโครงข่ายแอดฮอก 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 นอกจากนี้ยังมีโพรโทคอลการจัดหาเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Energy Aware routing Protocols) และที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ (Battery Aware Routing Protocols) ซึ่งต่อไปจะสรุปการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางของโครงข่ายแอดฮอกที่จะใช้ในการประเมินสมรรถนะในงานวิจัยฉบับนี้

2.2.1 **โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบพื้นฐาน** (Basic Ad Hoc Routing Protocols)

โพรโทคอลในชั้นโครงข่ายจะมีหน้าที่หลักในการค้นหาเส้นทางการติดต่อสื่อสาร (Routing) และที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแบบแอดฮอกซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ วิธีการจัดหาเส้นทางแบบมีการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive Routing) ตัวอย่างโพรโทคอลเช่น Destination-Sequenced Distanced Vector Routing (DSDV) [10] เป็นต้น และวิธีการจัดหาเส้นทางแบบทำการจัดหาเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (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 เมื่อโครงข□ายถูกนำมาใช□งานภายใต□สภาวะแวดล□อมที่ระดับความเร็วของโนดต่ำ ๆ โพรโทคอล DSR จะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการอนุรักษ□พลังงาน ขณะที่โครงข□ายทำงานภายใต□สภาวะที่ความเร็วของโนดสูง ๆ ทั้งรูปแบบการเคลื่อนที่และโพรโทคอลที่จะนำมาใช□งานก็มีความสำคัญคือ ภายใต้โครงข□ายที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลุ□มจะ

เห็นได□ว□าโพรโทคอลแบบ On-demand เป□นทางเลือกที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลทั้งสองประเภทมีหลักการในการตัดสินใจเส้นทางในการสื่อสารคือ เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียในการสื่อสารและอายุการใช้งานของโนดในขณะที่พิจารณาเส้นทาง เพราะฉะนั้นโดยส่วนมากแล้วโพรโทคอลเหล่านี้จะทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่ต่ำและอาจทำให้ต้องสูญเสียพลังงานสำหรับการสื่อสารแต่ละครั้งค่อนข้างสูง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้สนใจเรื่องการอนุรักษณ์พลังงาน โดยออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น เพราะฉะนั้นในงานวิจัยจึงเลือกรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลแบบ 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) และแพ็กเกตที่สูญเสีย (Packet loss) แต่ยังมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์พลังงานด้วย โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ On-demand ที่ได้รับความสนใจและมีประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV และ DSR ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกโพรโทคอลแบบ AODV มาเป็นต้นแบบเพื่อใช้ในการพัฒนาให้สามารถรองรับในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานเพราะว่าโพรโทคอลแบบ AODV มีฟังก์ชันการทำงานที่รองรับกับวิธีการที่นำเสนอซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.5.1 และ AODV ยังใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอลแบบ DSR ในหลาย ๆ สถานะการณ์

2.2.2 **โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน** (Power Aware routing Protocols)

การเลือกเส้นทางในแบบที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น จะเป็นโพรโทคอลที่ยังไม่มีการคำนึงถึงค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเกต ซึ่งต่อมาได้มีผู้คิดค้นการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานขึ้นมา โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังมีเป้าหมายหลักในการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานรวมให้มากที่สุด โดยนำปัจจัยและเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงการใช้พลังงานของโนดหรือข่ายเชื่อมโยงมากำหนดเป็นค่าต้นทุน โดยจะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดจากเส้นทางที่ใช้ค่าต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งตัวอย่างของปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุน อย่างเช่น กำสังส่งของโนด (Transmission Power) พลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเกต (Transmission Energy) พลังงานที่ใช้ในการจองช่องสัญญาณเป็นต้น

ซึ่งหนึ่งในนั้นคือวิธีแบบ Minimum Total Transmission Routing (MTPR) [11] ซึ่งการเลือกเส้นทางในแบบวิธีนี้คือ จะเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังในการส่งแพ็กเกตต่อแพ็กเกตต่ำที่สุด โดยไม่พิจารณาพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ โดยเส้นทางที่ดีที่สุดที่จะถูกเลือก จะเป็นเส้นทางที่ใช้กำลังส่งต่ำที่สุด จึงทำให้ได้เส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อมากซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างช่วงเชื่อมต่อต่ำ จะทำให้เส้นทางนี้มีโนดในเส้นทางมากกว่ากรณีแบบอื่น ทำให้มีการหน่วงเวลาจากต้นทางไปยังปลายทางเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเส้นทางที่ได้อาจจะมีความเสถียรน้อย เพราะโอกาสที่โนดจะเคลื่อนที่ออกนอกทางเส้นทางจะมีมากกว่า ซึ่งจากที่บอกว่าโพรโทคอลนี้ไม่ได้พิจารณาถึงพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ของโนด ทำให้อายุการใช้งานของโนดไม่ได้เพิ่มขึ้น ในกรณีที่โนดสามารถปรับเปลี่ยนกำลังในการส่งได้นั้น โนดต้องหาระยะทางระหว่างโนดเพื่อทำให้การส่งใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยใช้ GPS เพื่อหาระยะทางสัมพัทธ์ แต่ข้อเสียของ GPS คือจะไม่ได้ระบุข้อมูลที่เกี่ยวกับคุณลักษณะของสภาพแวดล้อม และโนดจะต้องเสียพลังงานในส่วนของ overhead ของ GPS อีกด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตาม โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานก็ช่วยทำให้การใช้พลังงานในระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ต่อไปจะกล่าวถึงโพรโทคอลที่ถูกนำเสนอและได้รับความใจมาก่อนหน้านี้

2.2.2.1 Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR)

ในบทความอ้างอิง [11] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Transmission Power Routing (MTPR) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของโนดในโครงข่าย ซึ่งโพรโทคอล MTPR ได้กำหนดค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i กับโนด j เป็นกำลังที่โนด i ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโนด j ได้อย่างสำเร็จ ซึ่งแสดงแทนด้วย $P(n_i, n_j)$ เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนรวมสำหรับเส้นทาง l แสดงแทนด้วย (C_l) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ n_i และ n_D เป็นโนดต้นทางและโนดปลายทางตามลำดับ ดังนั้นโพรโทคอลการหาเส้นทางแบบ MTPR จะเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดเพื่อช่วยทำให้โนดในโครงข่ายใช้พลังงานลดต่ำลง ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังต่ำที่สุดนั้นจะทำการเลือกจากเซตของเส้นทางที่เป็นได้ทั้งหมด (A) ตามสมการที่ (2.2) ซึ่งโนดปลายทางจะเป็นผู้ทำการตัดสินใจ

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

เมื่อ P_r แสดงเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมต่ำที่สุด แต่ด้วยความสามารถของอุปกรณ์ไร้สายที่แตกต่างกันคือใช้กำลังส่งคงที่และกำลังส่งปรับเปลี่ยนได้อย่างพลวัติ ซึ่งทั้งสองแบบจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดให้กำลังส่งของแต่ละโนดเท่ากันและคงที่ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเหมือนกับการเลือกเส้นทางแบบสั้นที่สุด (Shortest-Path, SP)

2.2.2.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks

ในบทความอ้างอิงนี้ [9] ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ช่วยยืดอายุการใช้งานโดยนำเสนอตัวชี้วัดขึ้นมา ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาตัววัด 2 ตัวคือ “Minimize energy consumed per packet และ Minimize cost per packet (โดยค่า Cost อาจจะเป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งหรือรับ)” เพื่อนำมาใช้แทนการจัดสรรเส้นทางแบบเดิม โดยมองว่าถ้าเลือกใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่อหนึ่งแพ็กเกตที่มีค่าต่ำที่สุดก็จะทำให้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายมีค่าที่ต่ำด้วย

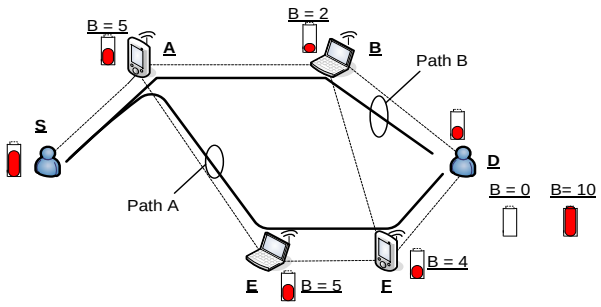
อย่างไรก็ตามเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งแพ็กเกตในหนึ่งช่วงเชื่อมต่อมีค่าคงที่ (ในกรณีกำลังส่งคงที่) ผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะเหมือนกับกรณีการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด แต่ถ้าคำนึงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการแย่งชิงช่องสัญญาณของข้อมูล ผลที่ได้จะแตกต่างออกไปจากข้างต้นในกรณีที่มีปริมาณโหลดสูง ๆ โดยเส้นทางที่ได้จะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่ง (Congestion) ของโนดสูง ๆ

การใช้ตัววัดนี้ถึงแม้ว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานโดยรวมได้แต่ไม่ได้ช่วยรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในแต่ละโนดเนื่องจากบางโนดที่อยู่ในเส้นทางจะต้องรับภาระในการส่งแพ็กเกตเป็นจำนวนมากและทำให้โนดดังกล่าวหมดอายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็วหรือกล่าวได้ว่าถ้าต้องการออกแบบโพรโทคอลเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย การใช้ตัววัดนี้อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณา

นอกจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานแล้ว ยังมีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ด้วย เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโนดและโครงข่ายให้นานยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดมีดังนี้

2.2.3 **โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่** (Battery Aware Routing Protocols)

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



รูปที่ 2.3 การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาถึงระดับความจุของแบตเตอรี

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) ซึ่งทั้งสองโพรโทคอลมีหลักการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้

โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR มีจุดประสงค์ในการออกแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโนดในโครงข่าย โดยมีหลักการว่าไม่ควรให้โนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดที่ต่ำอยู่ร่วมในเส้นทางหรือ กล่าวได้ว่าพยายามหลีกเลี่ยงการใช้งานโนดที่มีความจุแบตเตอรี่ต่ำนั้นเอง

โดยกำหนดให้ C_i^t เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโนด n_i ณ เวลา t ซึ่งมีค่าที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (0 หมายถึงความจุของแบตเตอรี่เป็นศูนย์ และ 1 หมายถึง ระดับความจุของแบตเตอรี่มีอยู่เต็ม) ถ้ามองในแง่ของความพึงพอใจในการส่งต่อ (Forward) แพ็กเกตแล้ว โนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำจะไม่ค่อยมีความสมัครใจมากนัก จากจุดนี้จึงได้กำหนดฟังก์ชันต้นทุนของแบตเตอรี่ ($f_i\left(c_i^t\right)$) สำหรับแต่ละโนด n_i ตามสมการที่ (2.3) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความจุที่เหลืออยู่ของโนด ณ ปัจจุบัน

$$f_i\left(c_i^t\right) = 1/c_i^t \qquad (2.3)$$

จากสมการหมายความว่าถ้าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโนดลดลงค่าฟังก์ชันต้นทุนของโนด n_i จะเพิ่มขึ้น โดยในระหว่างขั้นตอนกระบวนการจัดสรรเส้นทางที่โนดต้นทางทำการแพร่กระจายแพ็กเกตร้องขอเส้นทางไปยังโนดปลายทาง ทุก ๆ โนดจะต้องทำการคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนตามสมการที่ (2.3) ยกเว้นโนดต้นทางและโนดปลายทาง และเมื่อไม่ใช้โนดปลายทางก็จะต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเกตร้องขอเส้นทางไปเรื่อย ๆ แต่ก่อนที่จะแพร่กระจายออกไป โนดจะต้องรวมค่าฟังก์ชันต้นทุนที่คำนวณได้กับค่าฟังก์ชันต้นทุนของทุกโนดก่อนหน้านี้ทั้งหมดแล้ว จากนั้นก็เก็บค่าที่ได้ไว้ ณ ส่วนหัวของแพ็กเกต กระบวนนี้จะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนโนดปลายทางได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง ซึ่งโนดปลายทางก็ได้ข้อมูลค่าต้นทุนแบตเตอรี่ (Battery Cost) ของแต่ละเส้นทางซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$R_P = \sum_{i=0}^{D-1} f_i\left(c_i^t\right) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) เป็นตัวอย่างการคำนวณค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง P ซึ่งประกอบไปด้วยโนด 0 ซึ่งเป็นโนดต้นทางไปยังโนด D ซึ่งเป็นโนดปลายทาง ดังนั้นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงก็จะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้คือเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางต่ำที่สุด สมมุติว่าเส้นทาง P^* เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$R_{P^*} = \min\{R_P \mid P \in A\} \quad (2.5)$$

เมื่อ A เป็นเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทาง เพราะฉะนั้น MBCR สามารถป้องกันไม่ให้โนดมีการใช้พลังงานมากเกินไป ซึ่งก็สามารถทำให้โครงข่ายยืดอายุการใช้งานไปได้ อย่างไรก็ตามผลเสียของการใช้ค่าที่เกิดจากการบวกของแต่ละ $f_i\left(c_i^t\right)$ มาเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางคือ ในเส้นทางที่ได้รับการพิจารณาว่าเป็นเส้นทางที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงสุดนั้น อาจจะประกอบไปด้วยโนดที่มีระดับพลังงานที่ต่ำร่วมอยู่ก็ได้ ต่อมาทางผู้เสนอจึงได้พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นมาเพื่อทำให้แน่ใจว่าจะไม่มีกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นซึ่งนั้นก็คือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR)

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

$$R_P = \max_{i \in route\,P} f_i\left(c_i^t\right) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) ในเส้นทาง P โนดใดที่มีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ต่ำที่สุดหรือมีค่า $f_i\left(c_i^t\right)$ สูงที่สุดก็จะถูกกำหนดให้ค่าดังกล่าวของโนดนั้นเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางนั้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโพรโทคอลแบบ MMBCR ยังคงใช้สมการเดิมคือ สมการที่ (2.5) ซึ่งทำให้เราสามารถมองภาพรวมของโพรโทคอลนี้ได้ว่าเส้นทางที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ต่ำที่สุดจากโนดในแต่ละเส้นทางจะแสดงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงสุดของแต่ละเส้นทาง จากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพราะฉะนั้น วิธีการจัดสรร

เส้นทางแบบ 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 โนดระหว่างทางจะต้องทำการหยุดแพ็กเกตร้องขอเส้นทางดังกล่าวไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเกตดังกล่าวต่อไป โดยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่นำมาใช้ในการหาเวลาที่จะหยุดแพ็กเกต ซึ่งในบทความนี้ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลา 3 ประเภทคือ linear แทนด้วย $d_1(e)$ convex แทนด้วย ($d_2(e)$) และ concave แทนด้วย ($d_3(e)$) ซึ่งทั้งสามแบบมีสมการดังนี้

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

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

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

เมื่อ D เป็นค่าประวิงเวลาสูงสุด (ในบทความนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1 วินาที)

E เป็นค่าพลังงานจากแบตเตอรี่ ณ ตอนเริ่มต้นของโนด (E=5 จูล)

e เป็นค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ณ ปัจจุบัน (จูล)

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

$$d_i = \frac{D \times E}{e + E} \tag{2.10}$$

ในบทความนี้ยังคงใช้สถานการณ์ในการจำลอง คือ โนดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ 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] กล่าวว่าการเลือกเส้นทางจากการพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ของโนดจะให้ผลในทางที่ไม่ดี เพราะถ้าโนดเต็มใจที่จะรับทุก ๆ การร้องขอเพียงเพราะว่ามีระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูง ก็จะทำให้ปริมาณโหลดจำนวนมากจะไหลเข้ามาที่โนดนี้ทำให้โนดใช้พลังงานหมดเร็วกว่าที่กำหนดไว้ ในบทความนี้จึงนำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Drain Rate (MDR) โดยเสนอตัววัดใหม่ที่แสดงอัตราการใช้พลังงาน (Drain Rate) ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาถึงคุณลักษณะของทราฟฟิกโหลด ณ ขณะเวลานั้นของโนด ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราการใช้พลังงาน (DR_i) ของโนด i ได้จากสมการที่ (2.11)

$$DR_i = \frac{RE_t - RE_{t+1}}{T} \tag{2.11}$$

เมื่อ RE_t เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโนด i ณ เวลาสุ่ม t และ T เป็นระยะห่างของเวลาที่ใช้ในการสุ่มในครั้งที่ $t+1$ และ t โดยในบทความนี้กำหนดให้ทุก ๆ โนดจะต้องทำการปรับปรุงค่าอัตราการใช้พลังงานทุก ๆ 6 วินาที ($T_{t+1} - T_t = 6$ วินาที) ซึ่งค่าที่ได้มาใหม่นี้ (DR_{sample}) จะต้องนำไปถ่วงน้ำหนักกับค่าเดิมที่คำนวณได้ก่อนหน้าโดยใช้สมการที่ (2.12)

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

ในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของโนดซึ่งแสดงด้วยค่าอายุการใช้ของโนดจะสามารถหาได้สมการที่ (2.13) จากสมการ (C_i) แสดงค่าต้นทุนพลังงานของโนด i ณ เวลาใด ซึ่งสามารถอธิบายความหมายในทางกายภาพได้ว่าเป็นเวลานานเท่าไหร่ที่โนด i จะสามารถทำงานในเส้นทางนี้ได้ภายใต้

คุณลักษณะของทราฟฟิกและระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด ณ ขณะเวลานั้น หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าเป็นอายุการใช้งานที่เหลือของโนด i

$$C_i = \frac{RE_i}{DR_i} \tag{2.13}$$

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

ถึงแม้ว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงความจุแบตเตอรี่จะสามารถทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นและสมรรถนะก็สูงขึ้น แต่ในบางครั้งเส้นทางที่ถูกเลือกใช้สำหรับการส่งแพ็กเกตข้อมูลนั้นอาจจะมีการใช้พลังงานในการส่งแพ็กเกตที่สูง ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของแบตเตอรี่ไม่ได้ยืนยันว่าเส้นทางที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในข้างต้น เพราะฉะนั้นการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางควรจะถ่วงดุล (Tradeoff) ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารตลอดทั้งเส้นทางกับระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดในเส้นทาง เพราะฉะนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการเสนอกระบวนการจัดหาเส้นทางของโนดที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อให้ได้เส้นทางประกอบไปด้วยโนดที่มีความจุของแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูงเพียงพอต่อการสื่อสารและเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานในระดับต่ำและมีประสิทธิภาพ หรือกล่าวได้ว่าเป็นการนำเงื่อนไขทั้งสองประการมาทำการพิจารณาพร้อมกันซึ่งเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ทำให้โนดสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้นเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมมีหลักการทำงานพร้อมทั้งผลงานวิจัยที่เคยมีผู้คิดค้นมาดังหัวข้อต่อไป

2.2.4 **โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม** (Hybrid-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมเป็นการนำเอาข้อดีของการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ Energy-Aware routing protocols และ Battery-Aware Routing protocols มาพิจารณาพร้อมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายทั้งในด้านการใช้พลังงานและอายุการใช้งานให้ดีขึ้น โดยมองว่าการยืดอายุของโครงข่ายให้ได้สูงสุดนั้นการพิจาณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งไม่เพียงพอที่จะยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ปัจจัยทั้งสองเข้ามาพิจารณาพร้อมกันจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานให้มากขึ้นได้ ซึ่งปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนก็จะพิจารณาจากทั้งสองแบบดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งตัวอย่างโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมมีดังนี้

2.2.4.1 Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR)

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

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

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

จากนั้นเมื่อโนดปลายทางได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางแพ็กเกตแรกแล้วโนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเกตการร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่มีเส้นทางร่วมกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อหมดระยะเวลาที่

กำหนดไว้โนดจะทำการตรวจสอบจากเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Q) มีเซตของเส้นทางใดบ้างที่ตรงกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.15) ซึ่งแสดงด้วยเซต A

$$R_j^t \geq \gamma, \ \forall j \in A \qquad (2.15)$$

โดย γ เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 (หรืออาจจะกำหนดว่าให้เป็นร้อยละของระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นของโนดในโครข่าย โดยค่าระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นเท่ากับ 100) จากขั้นตอนข้างต้นเปรียบเสมือนกับการพิจารณาว่าขณะนี้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโนดในโครงข่ายส่วนมากเป็นอย่างไร ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการตัดสินว่าจะใช้วิธีการแบบใดในการเลือกเส้นทาง โดยดูจากจากสภาพของโครงข่าย ณ ขณะนี้ โดยการเลือกใช้จะพิจารณาได้ดังนี้

- กรณีที่ $A \cap Q \neq \phi$ แสดงว่ามีบางเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโนดในโครงข่ายยังมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงอยู่ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MTPR ในการเลือกเส้นทางจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต A

- กรณีที่ $A \cap Q = \phi$ แสดงว่ามีไม่มีเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งได้สะท้อนให้เห็นว่าโนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่รักษาสมดุลของการใช้พลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานของโนด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MMBCR ในการเลือกเส้นทางที่ดีจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต Q

ในกรณีที่เรากำหนดค่า $\gamma=0$ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR ก็จะกลายเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และถ้ากำหนดให้ $\gamma=100$ ก็จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ดังนั้นสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR จะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นหลัก

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 ได้เลียนแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง CMMBCR แต่ข้อแตกต่างระหว่างทั้งสองคือ ในโพรโทคอล CMDR ได้ใช้ค่าอายุการใช้งานของโนด (C_i ในสมการที่ (2.13)) เป็นตัวกำหนดว่าควรจะเลือกใช้โพรโทคอลแบบใดในการทำงานแทนการใช้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโนด (R_j^t ในสมการที่ (2.14)) ถ้ามีค่าอายุการใช้งานของโนดที่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (δ) จากเซตของเส้นทางเป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงได้จาก $C_i = \frac{RBP_i}{DR_i} > \delta$ โพรโทคอลนี้จะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR แต่ถ้าไม่เส้นทางใดที่ตรงตามเงื่อนไขจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดก็จะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MDR อย่างไรก็ตามสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ก็ยังขึ้นอยู่กับการเลือกค่า ขีดเริ่มเปลี่ยนที่นำมาพิจารณาเหมือนกับ CMMBCR

งานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบพิจารณาถึงพลังงานและแบบผสม 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 โดยพิจารณาถึงพลังงานทีใช้ของแต่ละโนดในแต่ละเส้นทางและอายุการใช้งานที่เหลือของแต่ละเส้นทางหรือพิจารณาถึงแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในแต่ละเส้นทาง โดยเส้นทางที่ถูกเลือกใช้จะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานตลอดทั้งเส้นทางที่ต่ำและค่าแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในเส้นทางมีค่ามากพอที่จะใช้งาน ซึ่งจากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงอายุการใช้งานของโนดและทั้งโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งสามารถลดค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเกต และเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตก็ลดลงเมื่อเทียบกับโพรโทคอล Power aware routing (PAR)

งานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบพิจารณาถึงพลังงานและแบบผสม โดยในแบบผสมนั้น ได้ทำการประยุกต์และปรับเปลี่ยนใช้โพรโทคอล CMLP ซึ่งพลังงานที่นำมาพิจารณาจะเป็นพลังงานที่สูญเสียในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งต่อไปจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง

2.3 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control, MAC)

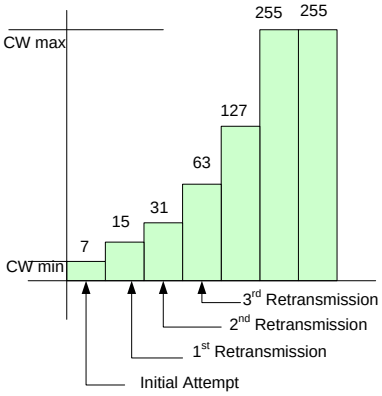
การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางตามมาตรฐาน IEEE 802.11 [17] ได้แบ่งโมดการทำงานเป็น 2 โมด คือ โมดDCF (Distributed Coordinate Function) เป็นวิธีการเข้าถึงตัวกลางแบบไม่ใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดย DCF จะใช้โพรโทคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access) ร่วมกับ binary exponential back-off เพื่อเป็นการลดการชนกันของข้อมูล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

การเข้าถึงตัวกลางแบบ PCF เป็นโมดที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายในโครงข่ายสามารถต่อกับโครงข่ายอื่นได้ โดยการเข้าถึงตัวกลางแบบนี้จะใช้ศูนย์กลางหรือจุดเข้าถึงในการรับส่งข้อมูล ในโมด PCF นี้โครงข่ายประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ สถานีผู้ใช้ (Client Station) ซึ่งก็คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (Desktop) คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค (Notebook) หรือเครื่องช่วยงานส่วนบุคคลแบบดิจิทัล (PDA) และสถานีแม่ข่ายหรือจุดเข้าถึง ซึ่งทำหน้าที่ต่อสถานีผู้ใช้เข้ากับโครงข่ายอื่น โดยสถานีผู้ใช้จะสามารถรับส่งข้อมูลโดยตรงกับสถานีแม่ข่ายที่ให้บริการแก่สถานีผู้ใช้นั้นอยู่เท่านั้น 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) หรือติดต่อสื่อสารกันเพื่อโอนย้ายการให้บริการสำหรับสถานีผู้ใช้ดังกล่าว

ในกรณีของโมด DCF จะใช้กับโครงข่ายที่ไม่ใช้ศูนย์กลางในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง เป็นโครงข่ายที่ไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มีการต่อกับโครงข่ายอื่น บริเวณของโครงข่าย IEEE 802.11 WLAN ในโมดนี้จะถูกเรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) ซึ่งสถานีผู้ใช้หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีผู้ใช้อื่น ๆ ในเขต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่าย แต่สถานีผู้ใช้จะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับโครงข่ายอื่น ๆ ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า แต่ละสถานีผู้ใช้จะรับส่งข้อมูลได้ภายในระยะการส่งข้อมูลเท่านั้น ซึ่งกลไกการเข้าถึงตัวกลางในโมด DCF จะกล่าวอีกครั้งในหัวข้อถัดไป

2.3.1 การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐาน

การควบคุมการเข้าถึงตัวกลางตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้แบ่งโมดการทำงานเป็น 2 โมด ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งโครงข่ายที่พิจารณาในงานวิจัยฉบับนี้เป็นโครงข่ายแอดฮอก ดังนั้นจะพิจารณาการทำงานในโมด DCF เท่านั้น โมด 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 จะทำงานเมื่อสถานีที่มีเฟรมข้อมูลที่จะส่งจะทำการตรวจดูช่องสัญญาณจนกระทั่งช่องสัญญาณว่างซึ่งช่วงเวลานี้มีค่าเท่ากับ 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 หรือตรวจพบว่ามีเฟรมข้อมูลอื่นส่งข้อมูลอยู่ด้วยก็จะกลับไปทำขั้นตอนการกำหนดค่า random back-off intervalใหม่ซึ่งค่า backoff นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16)

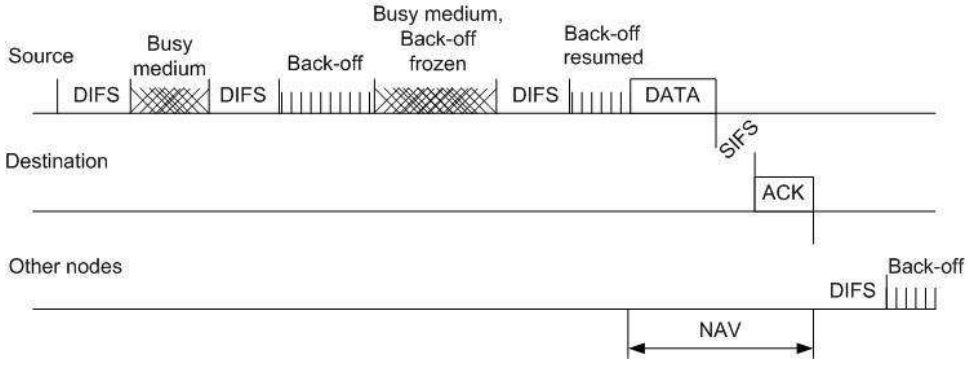
$$back\text{-}off\ \ time\ =\ rand(0, CW)\times slottime$$

(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 μS

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

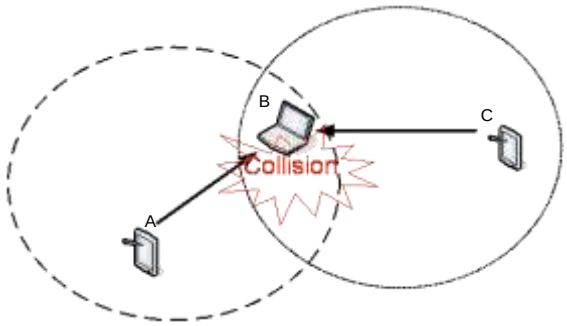


รูปที่ 2.5 กลไกของ IEEE 802.11

เนื่องจากการสื่อสารแบบแอดฮอก แต่ละโนดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ฉะนั้นปัญหาการชนกันของข้อมูล (Collision) จึงเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ถึงแม้มีการใช้โพรโทคอล CSMA/CA เพื่อช่วยในการจับจองช่องสัญญาณแล้วก็ตาม โดยปัญหาที่สำคัญที่ทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเกต คือปัญหาสถานีที่ซ่อนเร้นโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.2 ปัญหาสถานีซ่อนเร้น

ปัญหาสถานีซ่อนเร้น (Hidden terminal problem) เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดในโครงข่ายไร้สาย ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากที่โนดในโครงข่ายมากกว่าหนึ่งโนดส่งแพ็กเกตพร้อมกัน อันเนื่องมาจากมีโนดที่ต้องการส่งข้อมูลบางโนดไม่ได้อยู่ในขอบเขตการส่งคลื่นสัญญาณของโนดที่กำลังส่งสัญญาณออกมา แต่อยู่ในขอบเขตการส่งคลื่นสัญญาณของโนดรับเดียวกัน และเมื่อส่งข้อมูลออกมาส่งผลกระทบหรือทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเกตขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากรูปโนด A กำลังส่งแพ็กเกตไปยังโนด B ในขณะเดียวกันโนด C ตรวจสอบช่องสัญญาณพบว่าช่องสัญญาณว่างจึงส่งแพ็กเกตไปยังโนด B เช่นกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการชนกันของแพ็กเกตที่โนด B ขึ้น



รูปที่ 2.6 ปัญหาสถานีซ่อนเร้น

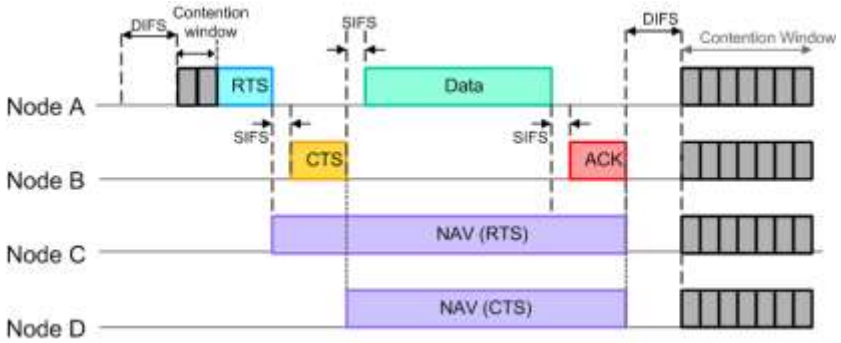
2.3.3 การแก้ไขปัญหาสถานีซ่อนเร้น

การตรวจสอบการชนกันของข้อมูลสามารถกระทำได้โดยการใช้โพรโทคอล 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 เพื่อแก้ไขปัญหาที่แต่ละโนดใน BSS หรือ IBSS อาจไม่ได้ยินสัญญาณจากโนดอื่นบางโนด กลไกดังกล่าวมีการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.7

เมื่อโนดที่ต้องการจะส่งข้อมูลได้รับสิทธิในการเข้าถึงตัวกลางแล้วจะส่งแพ็กเกตสั้นๆ ที่เรียกว่า RTS (Request To Send) เพื่อเป็นการจองช่องสัญญาณ ก่อนที่จะส่งแพ็กเกตข้อมูลจริง ซึ่งแพ็กเกต RTS ประกอบไปด้วยระยะเวลาที่คาดว่าจะใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ (Duration ID) รวมถึงที่อยู่ของโนดต้นทางและโนดปลายทาง เมื่อโนดปลายทางได้รับแพ็กเกต RTS ก็จะตอบรับกลับมาด้วยการส่งแพ็กเกต CTS (Clear To Send) ซึ่งจะบ่งบอกข้อมูลระยะเวลาที่คาดว่าโนดต้นทางจะส่งข้อมูลนั้นจะใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ หลักการก็คือทุกๆโนดใน BSS หรือ IBSS ควรจะได้รับแพ็กเกต RTS หรือไม่ก็ CTS อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง เมื่อได้รับ RTS หรือ CTS โนดทุก ๆ โนดจะทราบถึงว่าช่วงเวลาที่ระบุไว้ใน Duration ID ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ช่องสัญญาณจะถูกใช้และทุกโนดที่ยังไม่ได้รับสิทธิในการเข้าถึงตัวกลางจะตั้งค่า NAV (Network Allocation Vector) ให้เท่ากับ Duration ID ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาที่ยังไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ หรือเพื่อเป็นการเตือนให้ทราบว่าช่องสื่อสารไม่ว่าง ซึ่งสัญญาณ NAV เป็นเพียงสัญญาณภายในแต่ละโนดที่สมมติขึ้นมาเพื่อบอกให้โนดนั้น ๆ หยุดการส่งสัญญาณในช่วงเวลานั้น ๆ ซึ่งไม่มีการส่งสัญญาณนั้นจริงในโครงข่าย โดยโนดทุก ๆ โนดจะใช้กลไก Virtual Carrier Sense ดังกล่าวผนวกกับการฟังสัญญาณในช่องสัญญาณจริงๆ ในการตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่ โนดที่ส่งข้อมูลจะต้องรอรับ ACK (Acknowledgement) จากโนดที่ส่งข้อมูลไปให้ หากไม่ได้รับ ACK กลับมาภายในเวลาที่กำหนดจะถือว่าเกิดการชนของแพ็กเกตขึ้นและต้องทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำต่อไป



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 และEIFS 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)** ใช้กับสถานีซึ่งทำงานภายใต้โมด DCF สำหรับการส่งแพ็กเกต
- **Extended Inter-Frame Spacing (EIFS)** เป็นช่วงเวลาที่ยาวที่สุดของ IFS และเป็นการเข้าใช้ส่วนกลางที่มีระดับความสำคัญต่ำสุด EIFS ใช้สำหรับการเข้าจังหวะใหม่ ในกรณีที่ชั้นสื่อสารกายภาพตรวจเจอการรับเฟรมของชั้น MAC เกิดความผิดพลาด

โดยตารางที่ 2.1 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในมาตรฐานของ 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 μsec	20 μsec	8 μsec	20 μsec	9 μsec
SIFS	28 μsec	10 μsec	10 μsec	10 μsec	16 μsec
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 เพื่อจะลดการใช้พลังงานและพัฒนาสมการการใช้พลังงานให้ครอบคลุมมากที่สุด 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

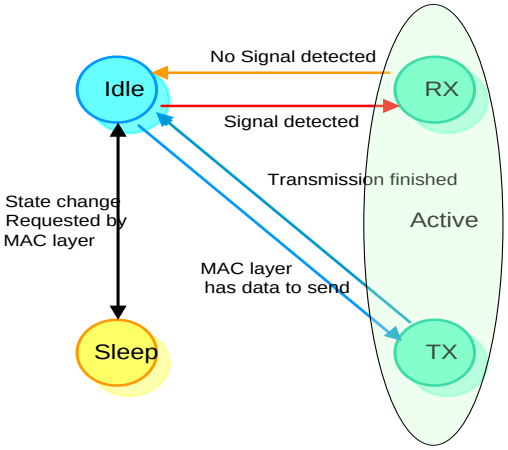
โดยต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงรูปแบบการใช้ของพลังงานในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งจะมีแบบจำลองการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไปดังนี้

2.4 แบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Energy Consumption Model of MAC)

โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางได้แบ่งการทำงานออกเป็น 4 โมด [1] ที่ใช้ในการจัดสรรการเข้าใช้ตัวกลางของโนดแต่ละโนด คือ โมดทำงาน (Active mode) โมดสถานะว่าง (Idle mode) โมดสถานะหลับ (Sleep mode) และโมดสถานะปิด (Power-off mode) โดยพลังงานจะมีการถูกใช้ไปมากหรือน้อยนั้น ก็จะขึ้นอยู่กับกระบวนการป้องการชนกันของข้อมูล ทั้งการส่งแพ็กเกตข้อมูลออกมาในโมดการทำงานแบบโมดการส่ง (Transmit mode) การรับแพ็กเกตข้อมูลในโมดการรับ (Receive mode) ซึ่งทั้งสองโมดจะรวมอยู่ในโมดทำงาน ส่วนโมดสถานะว่างจะเป็นสถานะที่โนดสามารถทำการส่งและรับข้อมูลได้ และโมดสถานะหลับ จะเป็นสถานะประหยัดพลังงานและใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งสถานะนี้จะไม่มีการรับและส่งข้อมูลจนกว่าจะถูกกระตุ้นขึ้นมาก่อน สุดท้ายคือโมดปิด จะเป็นสถานะที่ไม่มีตัวตน คือไม่มีการใช้พลังงานหรือพลังงานหมด ซึ่งก็จะปิดตัวไป

โดยแต่ละโมดก็จะมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในโมดสถานะปิดนั้น (Power-off mode) จะไม่มีการใช้พลังงานเลย จึงจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ แต่ในโมดอื่นๆนั้นจะมีการทำงานที่เชื่อมโยงกันดัง

แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการทำงานในแต่ละโมด โดยโมดว่างจะเป็นตัวกลางคอยเชื่อมโยงกับโมดอื่น ๆ



รูปที่ 2.8 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs

จากรูปที่ 2.8 อธิบายการทำงานในแต่ละโมดได้ดังนี้ เริ่มต้นที่โมดสถานะว่างซึ่งเป็นโมดที่โนดสามารถที่จะทำการรับหรือส่งข้อมูลก็ได้ เมื่อโนดมีข้อมูลจะส่ง โนดก็จะเปลี่ยนตัวเองจากสถานะว่างเป็นโมดการส่ง และเมื่อส่งข้อมูลดังกล่าวเสร็จก็จะกลับมาอยู่ในสถานะว่างเช่นเดิม แต่ถ้าขณะนั้นโนดไม่มีข้อมูลจะส่งไปยังโนดอื่นแต่ได้ยินหรือตรวจพบสัญญาณที่โนดอื่นส่งมา โนดก็จะเปลี่ยนถานะตัวเองไปอยู่ในโมดการรับและจะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมภายหลังจากรับข้อมูลดังกล่าวเสร็จสิ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าโนดหนึ่ง ๆ ไม่สามารถที่จะอยู่ในสถานะการทำงาน 2 โมดพร้อมกันในเวลาเดียวกันนั้นคือ ขณะที่โนดหนึ่ง ๆ ทำการส่งข้อมูลอยู่นั้นตัวมันเองก็ไม่สามารถที่จะทำการรับข้อมูลจากโนดอื่นได้ ส่วนโมดสภาวะหลับเป็นโมดที่โนดไม่สามารถจะทำการรับหรือส่งข้อมูลใด ๆ ได้จนกว่าจะมีสัญญาณจากชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมากระตุ้น เพราะฉะนั้นแล้วถ้าเรามาพิจารณาถึงกำลังที่จะต้องใช้ในแต่ละโมด แน่นอนว่าพลังงานที่จะต้องใช้นั้นย่อมจะแตกต่างกันออกไปแต่ก็พอที่จะคาดการณ์ได้ว่า พลังงานที่ใช้ในโมดการส่งจะต้องมากกว่าพลังงานที่ใช้ในโมดการรับ ส่วนพลังงานที่ใช้ในโมดสถานะการหลับน่าจะใช้น้อยที่สุด

นอกจากนั้นแล้วยังมีพลังงานที่จะต้องเสียในการเปลี่ยนแปลงสถานะ แต่พลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียในโมดอื่นและเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์หาแนวต่างในการลดการใช้พลังงาน ในงานวิจัยฉบับนี้จะยกเว้นการพิจารณาพลังงานในส่วนนี้โดยกำหนดให้พลังงานที่เสียในการเปลี่ยนแปลงสถานะมีค่าเป็นศูนย์ โดยค่าต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

อุปกรณ์ของผู้ผลิตแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายแต่ละราย ซึ่งในตาราง 2.2 แสดงค่ากำลังงานที่ใช้ในแต่ละโมดการทำงานของบางอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่ายที่ได้รับความนิยมของผู้ผลิตแต่ละราย โดยทุกตัวใช้มาตราฐานในการออกแบบการทำงานเดียวกันคือ ใช้มาตรฐาน IEEE802.11

ตารางที่ 2.2 กำลังที่ใช้ในแต่ละโมดการทำงานของอุปกรณ์แผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย

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

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เราสามารถคำนวณการใช้พลังงานในแต่ละโมดการทำงานซึ่งได้ด้วยสมการที่ (2.17) ซึ่งพลังงานที่โนดใช้ในแต่ละครั้งนั้นขึ้นอยู่กับ กำลังที่ใช้ในแต่ละโมดสถานะการทำงานและเวลาที่ใช้ในการทำงานในโมดนั้น ๆ

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

โดยที่ E_s พลังงานที่โนดจะต้องเสียเมื่อทำงานอยู่ในโมดสถานะ s (จูล)

P_s เป็นค่ากำลังงานที่โนดจะต้องเสียเมื่อทำงานอยู่ในโมดสถานะ s หน่วยเป็นวัตต์ (กำลังนี้สามารถคำนวณได้จากสูตร $P=V\times I$ หรือ กำลังที่สูญเสียเท่ากับผลคูณ ของความต่างศักย์ และ กระแส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าทั้งสองสามารถหาได้จากข้อมูลจำเพาะที่ผู้ผลิตให้มาพร้อมกับอุปกรณ์หรือบางครั้งอาจจะกำหนดค่ากำลังที่สูญเสียมาให้อย่างเช่นที่แสดงในตารางที่ 2.2)

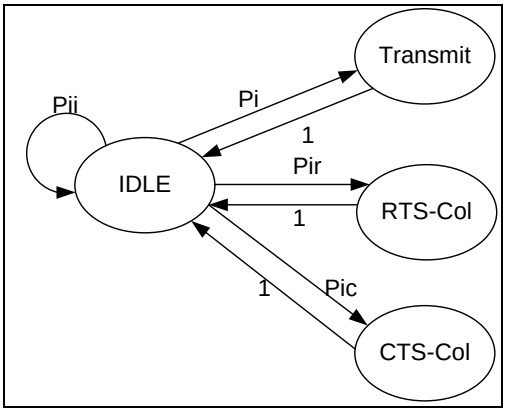
T_s เป็นเวลาที่ใช้ในการทำงาน ณ โมดสถานะ s มีหน่วยเป็นวินาที (เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแพ็กเกตที่ประมวลผลและอัตราการส่งแพ็กเกตของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถหาได้จาก $T = Packet\ Size / Transmission\ Rate$)

s เป็นโมดสถานะการทำงานทั้ง 4 โมดเช่น โมดการรับ โมดการส่ง โมดสถานะว่างและโมดสถานะหลับ

มีนักวิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเพื่อให้ครอบคลุมถึงพลังงานที่ใช้จริง ทั้งแบบ [22] ที่จะพิจารณาพลังงานในรูปแบบของฮอบเดี่ยว (Single Hop) แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะพิจารณาพลังงานที่ใช้การติดต่อสื่อสารแบบหลายฮอบ (Multi-hop communication) ซึ่งตัวอย่างแบบจำลองการใช้พลังงานในรูปแบบหลายฮอบนั้น ก็ได้มีนักวิจัยได้คิดค้นแบบจำลองการใช้พลังงานออกมามากมาย ดังต่อไปนี้

2.4.1 Modeling and Energy-Efficient MAC Layer Protocol

บทความของ Gobriel [23] ได้นำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นการเข้าถึงตัวกลาง โดยพิจารณาถึงผลกระทบของปัญหาโนดซ่อนเร้น จากโนดข้างเคียงซึ่งทำให้การส่งแพ็กเกตเกิดการชนขึ้นได้ ซึ่งจะมีการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตไม่สำเร็จ เพื่อคำควณหาค่าปริมาณงานที่จะได้ รวมถึงค่าพลังงานที่ใช้ โดยแพ็กเกตที่จะมีโอกาสในการชนคือแพ็กเกต RTS และ CTS เท่านั้น จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสเตจของโนดในแบบของ [23]

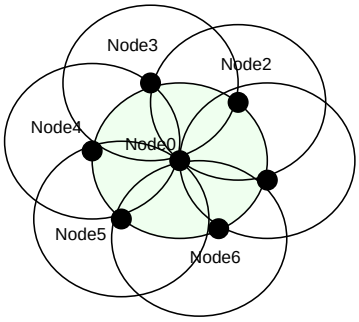


รูปที่ 2.9 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ การทำงานในช่องสื่อสาร

เนื่องจากแบบจำลองการใช้พลังงานในบทความดังกล่าวนั้นยังไม่คำนึงถึงผลกระทบจากพลังงานในการส่งของโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด (Interference range) ดังนั้นในบทความ [24] จึงได้นำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานที่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ของโนดแทรกสอดที่มีผลกระทบต่อการส่งแพ็กเกตของตัวส่งและตัวรับ

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

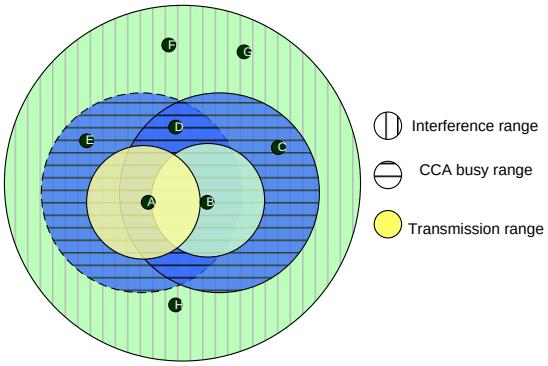
บทความ [24] นำเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานที่ครอบคลุมการใช้พลังงานเนื่องจากผลกระทบของการใช้พลังงานของโนดแทรกสอด โดยโอกาสการชนจะมีในทุกๆ แพ็กเกต รวมถึงแพ็กเกตข้อมูล ซึ่งจากรูปที่ 2.10 แสดงกลุ่มโนดที่อยู่นอกขอบเขตการติดต่อสื่อสารหรือที่อยู่ในช่วงแทรกสอดที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในช่วงของการติดต่อสื่อสารของตัวส่งได้ เนื่องจากปัญหาดังกล่าว จึงต้องคิดปัญหาที่จะเกิดการชนกันของแพ็กเกตเนื่องจากโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอดด้วย ซึ่งทุกช่วงเวลาของการส่งจะมีโอกาสที่การชนกันของแพ็กเกตสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา



รูปที่ 2.10 กลุ่มโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด

รูปที่ 2.11 อธิบายให้เห็นถึงพื้นที่และขอบเขตของโนดที่อยู่ในตำแหน่งที่จะมีผลกระทบกับการส่งแพ็ก เกตของตัวส่ง โดยพื้นที่ของการติดต่อสื่อสาร (Transmission Range) โนดที่อยู่ในช่วงดังกล่าว จะสามารถได้รับแพ็กเกตหรือสัญญาณต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน ส่วนในช่วงของพื้นที่ CCA (Clear Channel Assessment) โนดจะได้รับสัญญาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อโนดตัวส่งกำลังส่งแพ็กเกต แต่โนดที่อยู่ในพื้นที่ CCA ก็จะทำการเปลี่ยนสถานะของตัวเองให้อยู่ในสถานะไม่ว่างหรือช่วง NAV เป็นระยะเวลาเท่ากับช่วงหยุด EIFS ซึ่งก็อาจจะเพียงพอต่อการไม่ไปรบกวนโนดที่กำลังทำการส่งข้อมูลอยู่ และสุดท้ายโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด (Interference range)จะเป็นโนดที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามารบกวนการส่งข้อมูลได้ เนื่องจากโนดที่อยู่ในช่วงนี้จะไม่ได้รับสัญญาณหรือแพ็กเกตใดๆ

เนื่องจากสัญญาณที่ส่งไปไม่ถึง ทำให้โนดอาจจะมีการส่งแพ็กเกตออกมารบกวนโนดที่กำลังส่งอยู่ก็เป็นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเกตได้



รูปที่ 2.11 พื้นที่และขอบเขตการติดต่อสื่อสาร CCA และพื้นที่แทรกสอด

ซึ่งจาก [24] ได้ทำการจำลองดูผลกระทบของโนดแทรกสอดต่อปริมาณงาน พลังงานที่ใช้ และการประวิงเวลา ซึ่งผลที่ได้ ชี้ให้เห็นว่า ที่ปริมาณของโนดแทรกสอดมาก ๆ ค่าพลังงานที่ใช้ในการส่ง ขนาดความกว้างของ Contention Window และความหนาแน่นของโนด จะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยที่ปริมาณงานจะมากสุดเมื่อมีการใช้พลังงานต่อเฟรมที่ต่ำที่สุดแต่การประวิงเวลาจะไม่สั้นที่สุด พลังงานที่ใช้ในการส่งมากๆ ไม่สามารถรับรองการประวิงเวลาที่ต่ำที่สุดได้ ซึ่งเมื่อให้ค่าระยะทางของการส่งเพิ่มขึ้นจนเกินระยะที่เหมาะสมที่สุดในการส่ง จะทำให้ปริมาณของโนดแทรกสอดเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลทำให้ปริมาณงานลดลง เพราะโนดจะมีการแข่งขันกันมากขึ้นและควาน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเกตแล้วสำเร็จก็จะน้อยลงด้วย เนื่องจากมีโนดเพิ่มมากขึ้นทั้งในช่วงของการติดต่อสื่อสารของตัวส่งและโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด

แต่เนื่องจากในบทความที่นำเสนอของทั้งแบบ [24] และ [23] กำหนดค่า CW หลังเกิดการชนกันของแพ็กเกตให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นที่โนดจะสามารถส่งแพ็เกตได้ดังสมการที่ (2.18)

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

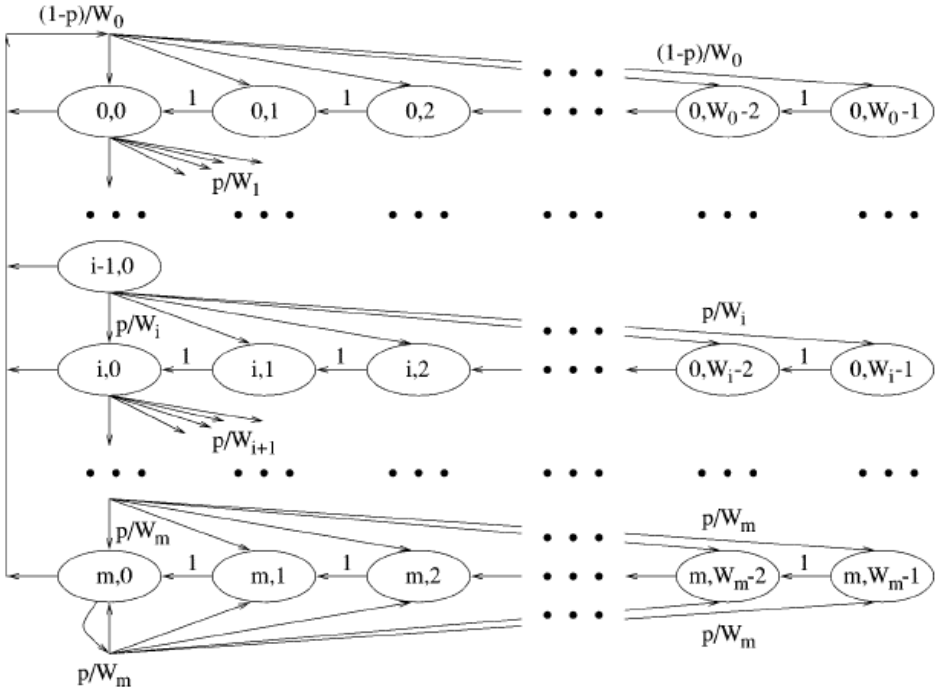
ซึ่งในความเป็นจริง เมื่อเกิดการชนกันของแพ็กเกต ค่า CW จะขยายเป็นสองเท่าจนกว่าจะถึงค่าสูงสุด ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1 ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนความน่าจะเป็นในการส่ง โดยให้สอดคล้องกับหลักการทำงานในมาตรฐาน IEEE802.11 อีกทั้งในบทความของ [24] แบบจำลองการใช้พลังงาน พิจารณาเฉพาะคู่โนดที่ส่งและรับแพ็กเกตเท่านั้น แต่ไม่คำนึงถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียจากการได้ยินแพ็กเกตของโนดข้างเคียง (Overhearing packet) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเสนอแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดยพิจารณาถึงผลกระทบของระดับพลังงานที่โนดแทรกสอดใช้ ที่จะส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเกต ผลกระทบของค่า CW เมื่อเกิดการชนของแพ็กเกต และพลังงานที่โนดในเส้นทางต้องเสียเนื่องจากการได้ยินแพ็กเกตซึ่งจะรวมถึงพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการละทิ้งแพ็กเกต (Discard packet) โดยรายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อต่อไป

ในการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเกตของแต่ละโนดรวมทั้งความน่าจะเป็นของการเกิดการชนกัน 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 จะได้ความน่าจะเป็นที่โนดจะมีการส่งแพ็กเกต ซึ่งไม่ขึ้นต่อวิธีในการเข้าใช้สื่อ เช่น วิธี RTS/CTS หรือแบบพื้นฐาน (Basic) ดังนั้นการศึกษาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นกับช่วงเวลาใดๆ จะสามารถหาค่าปริมาณงานของการเข้าถึงได้ เมื่อพิจารณาจำนวนสถานีที่เข้าแย่งใช้สื่อเท่ากับ n โนด 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 $(0,\ldots,m)$ ที่เวลา t สมมติว่าแต่ละสถานีพร้อมจะส่งข้อมูลตลอดเวลาและจะเริ่มทำงานตัวนับทันทีที่ตรวจพบว่าช่องสัญญาณว่างเป็นเวลาเท่ากับช่องว่างระหว่างเฟรมที่กำหนด และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลคือ p โดยสมมติว่าเป็นค่าคงที่และไม่ขึ้นกับเสตจของการ back-off ซึ่งสมมติฐานนี้จะมีความถูกต้องสูงเมื่อ CW และ n มีค่ามาก เนื่องจากการตั้งสมมติฐานค่า p เป็นค่าอิสระจึงสามารถแสดงแบบจำลองลูกโซ่ของ Markov นี้จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในสองมิติคือ $s(t)$ และ $b(t)$ $\{s(t),\ b(t)\}$จากแบบจำลองลูกโซ่ Markov ได้ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ดังต่อไปนี้

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

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

สมการที่ (2.19) สมการแรกแสดงถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงเสมอเมื่ออยู่ใน time slot ที่ $k+1$ ในเสตจที่ i เมื่อเวลาผ่านไปมาเป็น time slot ที่ k มีความน่าจะเป็นเท่ากับ 1 สมการที่สองคือความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จในเสตจที่ i และกลับมาเริ่มสุ่มช่วงเวลาใหม่ในเสตจที่ศูนย์อยู่ในช่วง (0,.., W_0-1) สมการที่สามคือความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลในเสตจที่ $i-1$และเกิดการชนกันจึงสุ่ม time slot ในเสตจที่ i สมการที่สี่ แสดงถึงความน่าจะเป็นที่เกิดการชนกันของข้อมูลในเสตจที่ mและสุ่ม time slot ในเสตจที่ m ให้ $b_{i,k}=\lim_{t\to\infty}P\{s(t)=i,b(t)=k\}, i\in(0,m), k\in(0,W_i-1)$ 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 mเนื่องจากการชนกันในเสตจที่ m ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเสตจ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ $b(t)$ ซึ่งจะแทนด้วยค่า k จะได้สมการดังนี้

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

ถ้าส่งข้อมูลโดยไม่เกิดการชนกันในเสตจใดก็ตามจะกลับมาแย่งใช้สื่อในเสตจศูนย์ใหม่ทุกครั้ง ดังนั้น

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

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

ต่อไปนี้เป็นการหาค่า $b_{0,0}$ โดยการแทน

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

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

แต่ละสถานีจะได้ส่งข้อมูลเมื่อตัวนับเวลานับลงถึงศูนย์โดยไม่คำนึงถึงเสตจดังนั้นความน่าจะเป็นที่แต่ละสถานีจะได้ส่งข้อมูลคือ τ

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

ความน่าจะเป็น τ ยังติดตัวแปรความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของข้อมูล p ซึ่งความน่าจะเป็น p ไม่สามารถหาได้โดยตรง แต่สามารถเขียนสมการของความน่าจะเป็น p ได้จากอยู่ในรูปช่วงเวลาระหว่างเฟรมและช่วงเวลาการแข่งขันแย่งใช้สื่อของการส่งข้อมูลในเวลาจริงจะต้องไม่เกิน DIFS ดังนั้นการแย่งใช้สื่อของข้อมูลในเวลาจริงจะต้องใช้เวลาไม่เกิน DIFS-PIFS ความน่าจะเป็น p สามารถเขียนในฟังก์ชันของ τ ได้ดังนี้

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

ให้ P_{tr} คือความน่าจะเป็นที่ใน time slot ถัดไปมีอย่างน้อยหนึ่งสถานีได้ส่งข้อมูลคือ

$$P_{tr} = 1 - (1-\tau)^n \tag{2.30}$$

ให้ P_s คือความน่าจะเป็นที่การส่งข้อมูลสำเร็จ ดังนั้นความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลได้สำเร็จคือมีอย่างน้อยหนึ่งสถานีที่ได้ส่งข้อมูลและส่งข้อมูลได้สำเร็จ

$$P_s P_{tr} = n\tau(1-\tau)^{n-1} \tag{2.31}$$

หาค่าปริมาณงานของระบบคือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยต่อเวลาที่ใช้ทั้งหมดคือเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลและเฮดเดอร์รวมกับเวลาที่เสียไปโดยเฉลี่ยเนื่องจากการชนกันของข้อมูลกับเวลาของ time slot ที่ว่างโดยเฉลี่ยได้สมการดังนี้

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

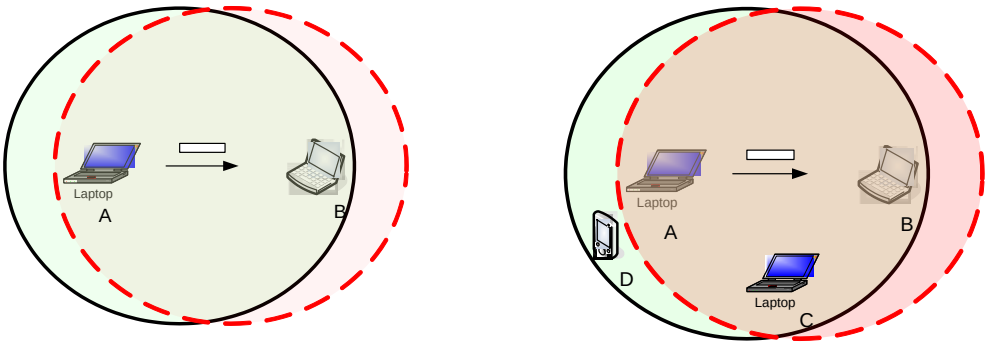
ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะนำสมการการหาความน่าจะเป็นที่จะมีการส่งแพ็กเกตในสมการที่ (2.28) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนในสมการที่ (2.29) มาคำนวณเพื่อหาแบบจำลองการใช้พลังงานในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดยต่อไปจะอธิบายถึงหลักการทำงานของงานวิจัยที่จะนำเสนอ

2.5 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในงานวิจัย

แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ กำหนดให้โนดทุกโนดในโครงข่ายมีกำลังส่งคงที่และเท่ากันทั้งหมด ซึ่งทำให้ระยะการส่งของแต่ละโนดก็คงที่และเท่ากันด้วยเช่นกัน ดังนั้นพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียในการส่งก็จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตเท่านั้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยฉบับนี้ยังคงแบ่งโมดการทำงานออกเป็น 4 โมดเหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.8 แต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของโมดการรับซึ่งจะอธิบายอีกทีในย่อหน้าถัดไป นอกจากนั้นการจะพิจารณาว่าโนดทำงานอยู่ในโมดใดนั้นจะพิจารณาจากลักษณะทราฟฟิกที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกัน ณ ขณะนั้น ลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายแบบแอดฮอกสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ทราฟฟิกแบบแพร่กระจาย (Broadcast Traffic) ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point to Point Traffic or Unicast) และสุดท้ายเป็นทราฟฟิกแบบได้ยิน (Overhearing Traffic) [26]

- ทราฟฟิกแบบแพร่กระจาย (Broadcast Traffic)

เมื่อโนดตัวส่งทำการส่งแพ็กเกตแบบแพร่กระจายออกไป โนดที่อยู่ในระยะการส่งทุกโนดจะต้องทำการรับแพ็กเกตดังกล่าวเพื่อนำไปประมวล เนื่องจากแพ็กเกตแบบแพร่กระจายเป็นแพ็กเกตที่ไม่ได้ระบุถึงที่อยู่ของผู้รับเอาไว้ ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนโมดการทำงาน ก็จะเป็นอะไรที่ตรงไปตรงมาคือ โนดที่ทำการส่งแพ็กเกตก็จะต้องเปลี่ยนตัวเองจากที่อยู่ในโมดสถานะว่างไปเป็นโมดการส่งเมื่อมีแพ็กเกตที่จะต้องส่ง ส่วนโนดทุกโนดที่อยู่ในระยะการส่งก็จะต้องเปลี่ยนสถานะมาทำงานในโมดการรับ



(ก) ทราฟฟิกแบบ Unicast (ข) ทราฟฟิกแบบ Overhear

รูปที่ 2.13 การติดต่อสื่อสารโดยใช้ทราฟฟิกแบบต่าง ๆ

- ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point to Point Traffic or Unicast)

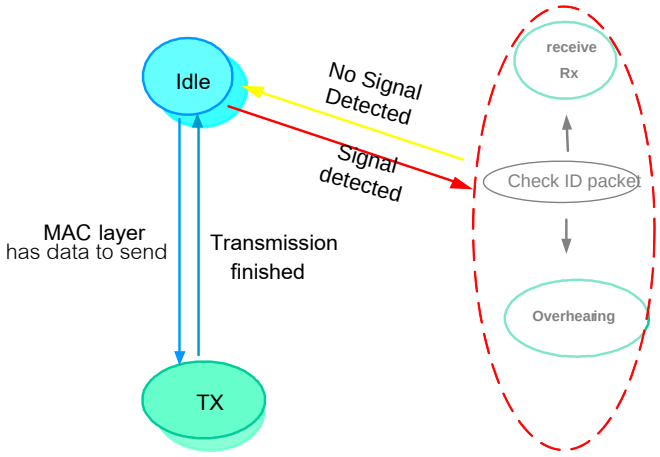
การติดต่อสื่อสารที่ใช้ทราฟฟิกแบบจุดต่อจุดหรือ Unicast นั้นภายในส่วนหัวของแพ็กเกตได้กำหนดที่อยู่ของผู้ที่รับแพ็กเกตนี้ไว้อย่างชัดเจน ถ้าพิจารณาการสื่อสารในรูปที่ 2.13 (ก) เมื่อโนด A ทำการส่งแพ็กเกตแบบ Unicast โดยระบุว่าจะส่งไปหาโนด B โนด A ก็จะเปลี่ยนมาทำงานในโมดการส่งและภายหลังจากที่โนด B ตรวจจับสัญญาณจากการส่งแพ็กเกตของโนด A โนด B ก็จะทำการตรวจสอบว่าแพ็กเกตเป็นแบบแพร่กระจายหรือแบบ Unicast ถ้าเป็นแบบแพร่กระจายก็จะดำเนินการเหมือนที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ถ้าเป็นกรณีหลังโนด B ก็จะต้องทำการตรวจสอบว่าแพ็กเกตดังกล่าวนั้นส่งมาหาตัวเองหรือไม่ ซึ่งในกรณีนี้คือส่งมาหาโนด B ดังนั้นโนด B ก็จะอยู่ในโมดการรับเพื่อรับแพ็กเกตนั้นไปประมวลผลอย่างอื่นต่อไป

- ทราฟฟิกแบบได้ยิน (Overhearing Traffic)

ในกรณีการสื่อสารด้วยทราฟฟิกแบบ Unicast ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะกำหนดให้การสื่อสารมีเฉพาะโนดที่ส่งและโนดที่รับข้อมูลอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.13 (ก) แต่มีหลายกรณีที่มีโนดอื่น ๆ อยู่ในระยะการส่งของโนดที่กำลังส่งหรือรับแพ็กเกตที่มีการสื่อสารแบบ Unicast ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.13 (ข) จากรูปเมื่อโนด A ทำการส่งแพ็กเกตแบบ Unicast ไปยังโนด B โดยในระยะการส่งของโนด A ครอบคลุมโนด C และ D อยู่ เพราะฉะนั้นเมื่อโนด C และ D ตรวจพบสัญญาณที่โนด A ส่งแพ็กเกตไปหาโนด B โนดทั้งสองจะต้องนำแพ็กเกตที่ตรวจจับได้ไปทำการทดสอบว่าเป็นแพ็กเกตที่ส่งมาหาต้นเองหรือไม่ ซึ่งในกรณีไม่ใช้แพ็กเกตที่ส่งมายังโนดทั้งสอง เพราะฉะนั้นโนดทั้งสองจะต้องทำการลบ

แพ็กเกตที่ได้ยินนี้ทิ้ง ซึ่งเราจะเรียกโนด C และ D ว่าเป็นโนดที่ได้ยิน (Overhearing node) และในงานวิจัยฉบับนี้ก็นิยามแพ็กเกตนี้ว่าเป็นแพ็กเกตที่ได้ยิน (Overhear packet) โดยการทำงานในโมดนี้โนดจะใช้กำลังในการตรวจสอบข้อมูลและลบแพ็กเกตดังกล่าวทิ้ง

จากที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถสรุปโมดการทำงานทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.8 จะแตกต่างกันตรงโมดการรับ โดยจากรูปแบบที่นำเสนอนั้นเมื่อโนดตรวจพบสัญญาณที่โนดอื่นส่งมานั้นโนดจะทำการพิจารณาที่ตัว Transceiver (TxRx) ว่าเป็นแพ็กเกตแบบ Unicast ใช่หรือไม่ ถ้าใช่ Transceiver ของโนดก็จะทำการตรวจสอบต่อไปว่าเป็นแพ็กเกตสำหรับตนเองหรือไม่ ถ้าใช่โนดก็เปลี่ยนโมดไปเป็นโมดการรับ (Actual Receive mode) แต่ถ้าไม่ใช่แพ็กเกตของตนเองก็จะเข้าสู่โมดการได้ยิน (Overhearing mode) แต่ถ้าเป็นแพ็กเกตแบบแพร่กระจายภายหลังจากที่โนดตรวจพบสัญญาณ ตัว Transceiver ก็จะเปลี่ยนโมดไปทำงานในโมดการรับจริงทันที (Actual Receive mode)



รูปที่ 2.14 โมดสถานะการทำงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของ NICs ที่นำเสนอ

ส่วนค่ากำลังในการทำงานแต่ละโมดที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้จะอ้างอิงค่าจริงจากแผ่นวงจรต่อประสานโครงข่าย ORiNOCO 11b PC Card [21] ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง (P_t) เท่ากับ 1.425 วัตต์ ค่ากำลังงานที่ใช้ในการรับ (P_r) เท่ากับ 0.925 วัตต์และพลังงานที่ใช้เมื่ออยู่ในโมดสถานะว่าง (P_{idle}) เท่ากับ 0.045 วัตต์ ในโมดสถานะหลับนั้นกำหนดให้ไม่มีการใช้พลังงานใดๆ ซึ่งจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ก็จะไม่คำนึงถึงการทำงานในโมดสถานะหลับอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.14 จะไม่มีการทำงานในโมดนี้ ส่วนกำลังที่ใช้ในโมดการได้ยิน (P_o) ที่ได้นำเสนอขึ้นมาในงานวิจัยฉบับนี้ก็เป็นอีกค่าหนึ่งที่ไม่ได้มีการกำหนดไว้ใน [21] แต่ ณ ที่นี้เราได้กำหนดให้ค่าดังกล่าวต่ำกว่า

กำลังที่ใช้ในการรับประมาณ 2 เท่า ($P_o = 0.46$ วัตต์) สาเหตุที่กำหนดให้มีค่าต่ำกว่าเพราะว่าพลังงานที่ใช้ในส่วนนี้เพียงแค่เป็นพลังงานที่ใช้ในการอ่านแพ็กเกตและทำการลบแพ็กเกตทิ้งไม่จำเป็นต้องประมวลผลต่อไป แต่ขณะที่ในโมดการรับนั้นเมื่อได้รับแพ็กเกตแล้วจะต้องใช้พลังงานในการประมวลผลแพ็กเกตนั้นต่อไป

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

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc on-demand distance vector (AODV) เป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่เส้นทางระหว่างโนดสื่อสารจะถูกสร้างขึ้นก็ต่อเมื่อโนดต้นทางมีความต้องการจะติดต่อสื่อสารกับโนดปลายทาง 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 จะถูกใส่เข้าไปในส่วนหัวของแพ็กเกตข้อมูลทุกแพ็กเกตก่อนที่โนดต้นทางจะทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลออกไปยังโนดถัดไปของเส้นทาง ซึ่งในขณะที่โพรโทคอลแบบ AODV โนดต้นทางและโนดระหว่างทาง (Intermediate node) จะทำการเก็บข้อมูลเส้นทางเฉพาะโนดถัดไปหรือกล่าวได้ว่าทุกโนดไม่จำเป็นจะต้องเก็บข้อมูลเส้นทางทั้งหมดระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทาง และโพรโทคอลได้ใช้ destination sequence number ในการตัดสินว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่ใหม่ล่าสุดระหว่างคู่โนด หนึ่ง ๆ

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ใช้แพ็กเกตข่าวสารทักทาย (Hello message) โดยจะทำการแพร่กระจายเป็นช่วงระยะเวลาที่เท่ากันอย่างต่อเนื่องไปยังโนดรอบข้าง เพื่อใช้ตรวจสอบการเชื่อมต่อกับโนดรอบข้างหรือพิจารณาว่าขณะนั้นมีโนดใดบ้างที่สามารถเชื่อมต่อกับตนเองแบบหนึ่งช่วงเชื่อมต่อได้บ้าง นอกจากนั้นยังสามารถใช้ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่ ณ ปัจจุบัน ถ้าในช่วงเวลาที่กำหนดโนดไม่ได้รับแพ็กเกตข่าวสารทักทายจากโนดรอบข้างเดิม โนดดังกล่าวก็จะสมมุติว่าโนดนั้นได้เคลื่อนที่ออกนอกช่วงระยะการส่งของตัวเองหรือโนดดังกล่าวไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่ไว้ใช้งานแล้ว และถ้าโนดที่อยู่ระหว่างทางตรวจพบว่าเส้นทางไปยังโนดถัดไปไม่สามารถใช้งานได้ โนดดังกล่าวจะทำการบันทึกว่าข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวเสียหายและจะทำการแจ้งข้อมูลความเสียหายไปยังกลุ่มโนดที่ใช้ข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวไปยังโนดปลายทางโดยการส่งแพ็กเก

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

2.5.2 **กระบวนการค้นหาเส้นทาง** (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดหนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อใดก็ตามที่โนดต้นทางต้องการจะติดต่อหรือส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางในโครงข่าย แต่ตรวจไม่พบเส้นทางที่จะส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางในตารางการจัดเส้นทาง ณ ชั้นเครือข่าย แต่กรณีที่โนดตรวจพบเส้นทางที่สามารถใช้งานได้ก็สามารถที่จะส่งข้อมูลไปตามเส้นทางที่ทราบได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยตารางการจัดเส้นทางของแต่ละโนดนั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโนดปลายทาง โนดถัดไปที่จะต้องส่งแพ็กเกตออกไปยังโนดปลายทาง และยังบอกถึงระยะเวลาที่สามารถใช้เส้นทางได้

กระบวนการค้นหาเส้นทางจะเริ่มที่โนดต้นทางสร้างแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (Route Request, RREQ) ซึ่งภายในแพ็กเกตประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ๆ สำหรับค้นหาเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งข้อมูลในแต่ละส่วนจะมีความหมายและการกำหนดค่าที่แตกต่างกันดังนี้

- Source address, SrcID หรือหมายเลขที่อยู่ของต้นทาง เป็นหมายเลขที่แสดงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละโนดและมีค่าที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะใช่เป็นหมายเลข IP เพื่อสำหรับบอกว่าแพ็กเกตดังกล่าวใครเป็นต้นทางในการส่งแพ็กเกต

- Source Sequence Number, SrcSeqNum หรือหมายเลขแสดงลำดับของต้นทาง เป็นหมายเลขของโนดต้นทางที่ใช้เพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่า โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือการตอบรับเส้นทาง

- Broadcast Identifier, BcastID หรือหมายเลขระบุแพ็กเกตการแพร่กระจาย เป็นตัวเลขจำนวนนับของแต่ละโนดที่จะเพิ่มค่าที่ละ “1” ทุกครั้งเมื่อทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ

- Destination Sequence Number, DestSeqNum หรือหมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง เป็นหมายเลขของโนดปลายทางเพื่อบอกว่าเส้นทางเป็นเส้นทางที่ใหม่หรือเก่าเช่นเดียวกับ SrcSeqNum โดยจะมีการเพิ่มค่าขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการส่ง RREQ หรือ

การตอบรับเส้นทาง แต่ในการกำหนดค่าลงในข้อมูลนี้ โนดต้นทางจะใส่ค่า DestSeqNum ล่าสุดของโนดปลายทางที่ตนเองทราบ แต่ถ้าไม่ทราบเลยจะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

- ❖ Hop Count หรือจำนวนช่วงการเชื่อมต่อ ใช้เพื่อบอกจำนวนครั้งที่แพ็กเกต RREQ ถูกส่งต่อผ่านโนดต่าง ๆ โดยจะเพิ่มค่าที่ละ “1” เมื่อผ่านโนดหนึ่งโนด ซึ่งค่าเริ่มต้นที่โนดต้นทางเป็นผู้กำหนดคือศูนย์

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

รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (Route Request)

ภายหลังจากที่โนดต้นทางสร้างแพ็กเกตการร้องขอเส้นทางและบรรจุค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้เสร็จเรียบร้อย โนดต้นทางจะทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่ง (Transmission Range) โนดต้นทาง ต้องการส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทาง โดยโนดต้นทางเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโนดรอบข้าง และเมื่อโนดรอบข้างได้รับแพ็กเกต RREQ จากโนดต้นทางแล้วก็จะดำเนินตามกระบวนการดังต่อไปนี้

2.5.2.1 โนดจะทำการตรวจสอบข้อมูล <SrcID, BcastID> ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละแพ็กเกต RREQ ซึ่งถูกนำใช้เพื่อลดจำนวนแพ็กเกตที่มีการแพร่กระจายมากเกินความจำเป็น โดยโนดจะทำการเปรียบเทียบค่าทั้งสองกับค่าในตารางข้อมูลส่วนตัวของแต่ละโนด เพื่อตรวจดูว่าแพ็กเกตที่ได้รับเคยถูกประมวลผลไปก่อนหน้า (เคยได้รับแพ็กเกต RREQ นี้แล้ว) แล้วหรือไม่ ถ้าได้ประมวลผลไปก่อนหน้านี้ โนดจะทำการลบแพ็กเกตนี้ทิ้งไปและจะไม่ดำเนินการใด ๆ ต่อไป แต่ถ้าเคยได้รับแพ็กเกต RREQ นี้เป็นครั้งแรกก็จะทำการบันทึกค่า <SrcID, BcastID> ที่อยู่ในส่วนหัวของแพ็กเกตไว้ในตารางข้อมูลส่วนตัวเพื่อใช้ในการตรวจสอบครั้งต่อไปเมื่อได้รับแพ็กเกต RREQ เข้ามา ต่อไปจะดำเนินกระบวนการตามข้อต่อไป

2.5.2.2 โนดทำการตรวจสอบว่าตัวเองเป็นโนดปลายทาง (DestID) หรือไม่ โดยการเปรียบเทียบหมายเลขที่อยู่ของตัวเองกับค่า DestID ในแพ็กเกต RREQ ที่ได้รับ ถ้าตรงกันแสดงว่าตัวเองเป็นโนดปลายทางที่โนดต้นทางต้องการจะติดต่อสื่อสาร โนดก็จะเข้าสู่กระบวนการตอบรับเส้นทางซึ่งจะกล่าวในภายหลัง แต่ถ้าตัวเองไม่ใช้โนดปลายทาง โนดจะดำเนินกระบวนการ ต่อไป

2.5.2.3 เมื่อโนดไม่ใช้โนดปลายทาง โนดจะต้องทำการตรวจสอบว่าตัวเองมีเส้นทางไปยังโนดปลายทางที่ใหม่และสามารถใช้งานได้ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูล (Route Table) หรือไม่ การจะดูว่าเป็นเส้นทางใหม่นั้น จะดูจากค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลกับค่าหมายเลขแสดงลำดับของปลายทางที่เก็บอยู่ในแพ็กเกต RREQ ถ้าค่าที่อยู่ในตารางมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่อยู่ในแพ็กเกตก็แสดงว่าเส้นทางนั้นเป็นเส้นทางที่ใหม่ แต่ในทางตรงกันข้าม เส้นทางที่แสดงอยู่ในตารางถือว่าเป็นเส้นทางที่เก่าไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะฉะนั้นถ้าโนดมีเส้นทางใหม่และสามารถใช้งานได้ โนดจะดำเนินกระบวนการตอบรับเส้นทางโดยไม่ต้องทำการแพร่กระจายแพ็กเกต 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 จะต้องทำการในลักษณะที่ข่ายเชื่อมโยงมีความเหมือนกันทั้งไปและกลับ (Symmetric Link) โดยที่เส้นทางย้อนกลับนี้จะถูกกำหนดระยะเวลาในการใช้งานไว้ ถ้าในช่วงเวลาที่กำหนดไม่มีการส่งแพ็กเกตอบรับเส้นทางเดินทางมา 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 ก็จะสร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโนดที่ส่งแพ็กเกตมาเช่นกันซึ่งเราเรียกเส้นทางนี้ว่าเป็น เส้นทางไปข้างหน้า (Forward Route) เพื่อป้องกันความสับสนกับเส้นทาง reverse route ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

จากนั้นเมื่อโนดต้นทางได้รับแพ็กเกต RREP ก็เป็นอันว่าจบขั้นตอนกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทาง โนดก็สามารถส่งแพ็กเกตข้อมูลไปยังโนดถัดไปตามที่ระบุไว้ในเส้นทาง forward route เพื่อส่งข้อมูลไปโนดปลายทาง

2.5.3 **กระบวนการดูแลเส้นทาง** (Route Maintenance)

การเคลื่อนที่อย่างอิสระของโนดในโครงข่ายแอดฮอกทำให้รูปแบบของทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า ทำให้โอกาสที่เส้นทางที่อยู่ระหว่างการสื่อสารระหว่างโนดใด ๆ สามารถจะขาดหรือเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ตลอดเวลา ดังนั้น โพรโทคอลที่ดีควรมีวิธีการดูแลหรือแจ้งขอผิดพลาดนี้ให้แก่โนดในโครงข่ายทราบเพื่อจะการซ่อมแซ่มหรือหาเส้นทางใหม่ นอกจากการเคลื่อนที่แล้วโนดก็อาจจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หมดก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ทำให้ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังใช้งานอยู่เกิดขาดหรือความเสียหาย (Link Failure)

กระบวนการดูแลเส้นทางจะถูกดำเนินเมื่อใดก็ตามที่ โนดต้นทางเคลื่อนที่ออกนอกระยะการส่งของโนดถัดไปของเส้นทาง อีกกรณีหนึ่งคือ โนดระหว่างที่อยู่ในเส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางหรือแบตเตอรี่ของโนดถูกใช้งานจนหมด (ไม่สามารถจะทำการใด ๆ ได้อีกต่อไป) โดยในกรณีแรกนั้น โนดต้นทางจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 แต่กรณีที่ 2 โนดที่ตรวจพบความผิดพลาด (โนดไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโนดถัดไปได้สำเร็จ) จะแจ้งข้อมูลความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงด้วยแพ็กเกตแสดงความเสียหาย (Route Error, RERR) ดังกล่าวไปบอกทุกโนดก่อนหน้านี้และโนดรอบข้างที่ยังทำงานอยู่ (Active neighbor) โดยการใช้หมายเลขแสดงลำดับค่าใหม่คือ ค่าหมายเลขแสดงลำดับที่มากกว่าค่าเดิมอยู่ “1” และจำนวน Hop Count จะถูกตั้งค่าให้เป็นอนันต์ (Infinite) สำหรับโนดที่ใช้งานอยู่ เมื่อโนดต้นทางได้รับข้อมูลความเสียหาย จากโนดที่ตรวจพบความเสียหายแล้ว โนดต้นทางอาจจะทำการเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งถ้ายังคงต้องการที่จะติดต่อสื่อสารกับโนดปลายทางอีกหรือหยุดการทำงาน

การป้องกันไม่ให้โนดใช้เส้นทางผ่านไปยังข่ายเชื่อมโยงที่เกิดข้อผิดพลาดดังกล่าวอีก ทุกโนดที่ได้ข้อความจากแพ็กเกต RERR จะต้องทำการตรวจสอบในตารางเส้นทางเดินของข้อมูลของตนเองว่ามีเส้นทางใดบางที่ต้องใช้โนดดังกล่าวเพื่อไปยังโนดปลายทาง ถ้าตรวจพบว่ามีเส้นทางดังกล่าวโนดจะทำการลบเส้นทางนั้นทิ้งไป ในส่วนขั้นตอนในการตรวจสอบสถานะของข่ายเชื่อมโยงว่าเกิดความเสียหายหรือไม่นั้นมีด้วยกัน 2 วิธีคือ การใช้ความสามารถของกระบวนการในชั้นข่ายเชื่อมโยงและชั้นเครือข่าย

- วิธีแรกคือ ใช้การแพร่กระจายแพ็กเกตข่าวสารทักทาย (Hello message) โนดจะทำการแพร่กระจาย hello message ไปยังโนดข้างรอบข้างซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลเฉพาะตัวของโนดนั้นและหมายเลขแสดงลำดับของโนด โดยที่ค่าหมายเลขแสดงลำดับของโนดจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงสำหรับการส่ง hello message โดย hello message ได้ถูกป้องกันไม่ให้มีการทำการแพร่กระจายแพ็กเกตต่อไปอีกครั้งหลังจากได้รับมาในครั้งแรกด้วยการตั้งค่า Time To Live (TTL) เท่ากับ 1 วินาที ภายหลังจากที่โนดรอบข้างได้รับแพ็กเกตดังกล่าวแล้วโนดก็จะต้องทำการปรับปรุงข้อมูลการเชื่อมต่อท้องถิ่น (Local Connectivity) แต่ถ้าโนดไม่ได้รับ hello message เป็นจำนวน allowed_hello_loss ติดต่อกันหรือช่วงเวลาที่กำหนดจากโนดรอบข้าง แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อท้องถิ่นจากเดิมออกไป (ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายหรือไม่มีการเชื่อมต่อกัน) ซึ่งถ้าเป็นกรณีที่ไม่ได้รับจากโนดรอบข้างที่ใช้งานในการส่งข้อมูลอยู่ โนดก็จะตัดสินว่าข่ายเชื่อมโยงถัดไปเกิดความเสียหายไม่สามารถส่งข้อมูลต่อไปได้

- วิธีที่สองคือ การใช้ link-layer notification ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้จากมาตรฐาน IEEE 802.11 [26] โดยแต่ละครั้งที่มีการส่งแพ็กเกตไปยังโนดถัดไปที่กำลังใช้งานอยู่ โนดจะต้องมีการตรวจสอบการเชื่อมต่อเช่น ไม่ได้รับแพ็กเกตการตอบรับจากการส่ง (Acknowledge) หรือไม่ได้รับแพ็กเกต Clear to send (CTS) หลังจากที่ส่ง Ready To Send (RTS) ออกไป

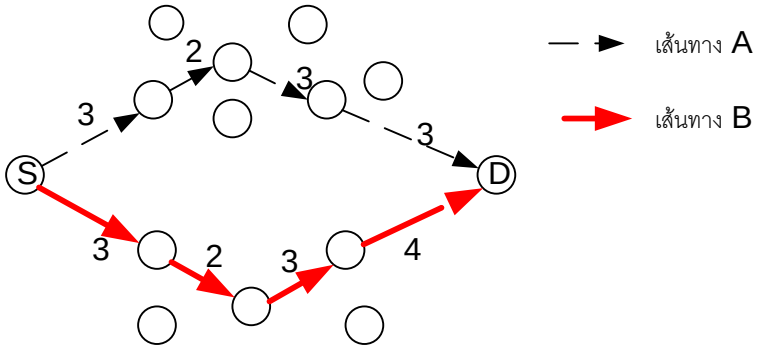
ในงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีแรกคือ การใช้แพ็กเกตข่าวสารทักทายในการตรวจจับความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยงและตรวจสอบสถานะของการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น เนื่องจากวิธีนี้ทำให้โนดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วแตกต่างจากวิธีที่สองที่จะต้องรอจนกว่าจะมีการรับส่งแพ็กเกตระหว่างโนดขึ้นจริง ๆ จึงจะสามารถตรวจจับข้อผิดพลาดได้ ซึ่งผลดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียของแพ็กเกตข้อมูลเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีการแบบแพ็กเกตข่าวสารทักทายที่จะต้องใช้จำนวนโอเวอร์เฮด (Overhead) แพ็กเกตมากขึ้นเพื่อตรวจจับการทำงานดังกล่าว นอกจากนั้นวิธีที่สองเป็นวิธีที่ไม่มีความสามารถในการพิจารณาว่าโนดใดเป็นโนดรอบข้าง (มีการเชื่อมต่อแบบท้องถิ่น) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์มากขึ้นซึ่งจะกล่าวรายละเอียดอีกครั้งตัวอย่างกระบวนการดูแลเส้นทางของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV

2.6 ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต

ในงานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อให้โนดสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้นานที่สุดและทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานขึ้น จากข้างต้น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลังสามารถแบ่งได้เป็นสามประเภท ในแต่ละประเภทมีจุดประสงค์หลักเหมือนกันคือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายหรือโนดให้ได้นานที่สุด แต่ก็จะมีแนวคิดและปัจจัยที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสองประเภท แต่ก่อนที่จะกล่าวรายละเอียดของโพรโทคอลที่จะนำเสนอในส่วนนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่พบรวมถึงข้อดีข้อเสียของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยทำแยกพิจารณาสำหรับโพรโทคอลแต่ละประเภทดังนี้

2.6.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกกำลัง

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง มีเป้าหมายในการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานให้มากที่สุด ซึ่งในบทความอ้างอิง [27, 28, 29] เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด โดยที่พลังงานรวมของเส้นทางได้จากพลังงานที่แต่ละโนดต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งข้อมูลหนึ่งแพ็กเกต ยกเว้นในกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RA [28] ที่ได้รวมพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากในการส่งแพ็กเกตซ้ำ แต่จากแบบจำลองการใช้พลังงานที่ได้นำเสนอไว้ในข้างต้น แสดงให้เห็นว่าโนดยังเสียพลังงานในการรับข้อมูลและการได้ยินข้อมูลด้วย เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดไม่ได้แสดงว่าโครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols) เพื่อทำให้โครงข่ายประหยัดพลังงานมากที่สุด โดยการเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดแทนที่จะเลือกจากเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งของโนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น นอกจากนั้นการคำนวณพลังงานที่แต่ละโนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากทั้งการรับ การส่งและการได้ยินจะพิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณด้วย



รูปที่ 2.17 เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางระหว่างโนด S และ D

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าถ้าใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR หรือ RA เส้นทางที่ดีที่สุดคือเส้นทาง A เพราะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานในการส่งรวมต่ำที่สุดคือ 11 หน่วย แต่ถ้าคำนึงถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจะเห็นได้ว่าเส้นทาง A จะสูญเสียพลังงานมากกว่าเส้นทาง B เพราะว่าเส้นทาง A จะต้องเสียพลังงานในการรับและการได้ยินของโนดที่ไม่เกี่ยวกับการสื่อสารที่มากกว่า เนื่องจากเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งสูง ดังนั้นการเลือกเส้นทาง A อาจจะไม่ใช่แนวทางที่ทำให้โครงข่ายประหยัดการใช้พลังงานมากที่สุด

2.6.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม

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

นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลทั้งสองไม่ได้บรรลุจุดประสงค์ทั้งในเรื่องของการใช้พลังงานต่ำที่สุดและรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโนดมากที่สุดพร้อมกันในเวลาเดียวกันดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

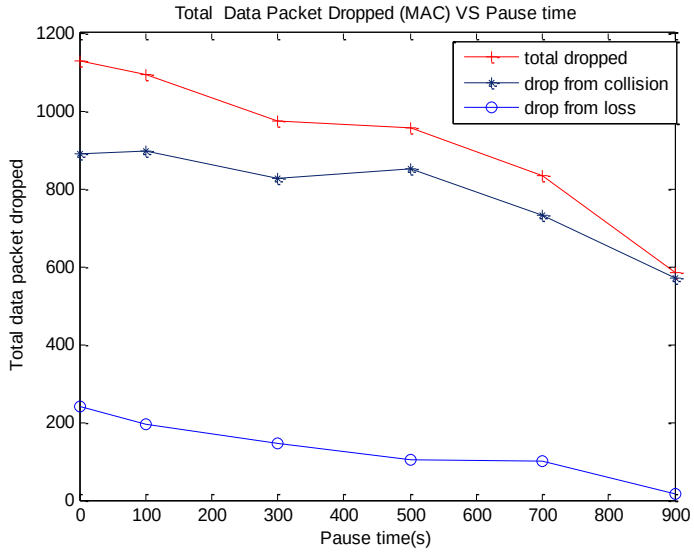
ในวิทยานิพน์ฉบับนี้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมไว้สองแบบ ซึ่งแบบแรกจะเป็นวิธีที่นำเอาค่าพลังงานที่ใช้ในส่วนของชั้นการควบคุมกลางกับค่าแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดมาทำการปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้ โดยในระหว่างกระบวนการค้นหาเส้นทางกำหนดให้โนดทำงานเหมือนกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือพร้อมทั้งคำนวณพลังงานที่โนดจะต้องใช้ ซึ่งจากการทำงานแบบคำนึงถึงเฉพาะระดับพลังงานที่เหลือของโนดจะเป็นตัวบ่งบอกถึงช่วงประวิงเวลา [13] ทำให้แพ็กเกตร้องขอเส้นทางที่ไปถึงยังโนดปลายทางเป็นแพ็กเกตแรก ๆ นั้นมาจากเส้นทางที่โนดมีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่สูง แต่แทนที่โนดจะใช้เส้นทางที่ได้จากแพ็กเกตแรกในการตอบรับเส้นทาง โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอจะกำหนดให้โนดปลายทางต้องหยุดรอไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อรอแพ็กเกตร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ แล้วจึงตัดสินใจโดยใช้เงื่อนไขทางด้านพลังงานคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดใช้พลังงานรวมของเส้นทางต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถที่จะบรรลุจุดประสงค์ทั้งสองอย่าง ณ ขณะเวลาเดียวกัน

ส่วนโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่สอง จะอ้างอิงบทความ [16] ที่เสนอโพรโทคอล CMLR ซึ่งจะเป็นการนำเสนอเพื่อยืดอายุการใช้งานของโนดให้นานยิ่งขึ้น โดยพิจารณาถึงพลังงานทีใช้ของแต่ละโนดในแต่ละเส้นทางและอายุการใช้งานที่เหลือของแต่ละเส้นทางหรือพิจารณาถึงแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในแต่ละเส้นทาง โดยเส้นทางที่ถูกเลือกใช้จะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานตลอดทั้งเส้นทางที่ต่ำและค่าแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดในเส้นทางมีค่ามากพอที่จะใช้งาน ซึ่งจากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงอายุการใช้งานของโนดและทั้งโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งสามารถลดค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเกต และเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตก็ลดลง

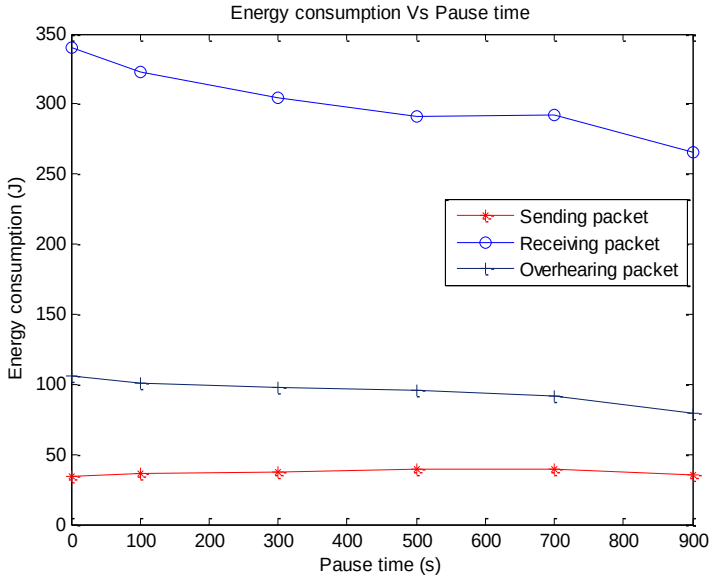
2.7 ผลการจำลองเบื้องต้น

เพื่อให้การศึกษามีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการจำลองเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม NS2.28 โดยใช้หลักการค้นหาเส้นทางแบบ AODV มาเป็นวิธีในการจำลองเพื่อศึกษาหาค่าต่างๆ ซึ่งการจำลองได้กำหนดให้มีโนดทั้งหมด 50 โนด มี 20 การเชื่อมต่อ ภายในพื้นที่ 1000x1000 m^2 ทุก ๆ โนดเคลื่อนที่แบบ random waypoint โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ เช่น ความเร็วสูงสุดของแต่ละโนดจาก 0 ถึง 18 (Maximum speed of mobile) ปรับเปลี่ยนค่าขนาดของแพ็กเกตข้อมูลจาก

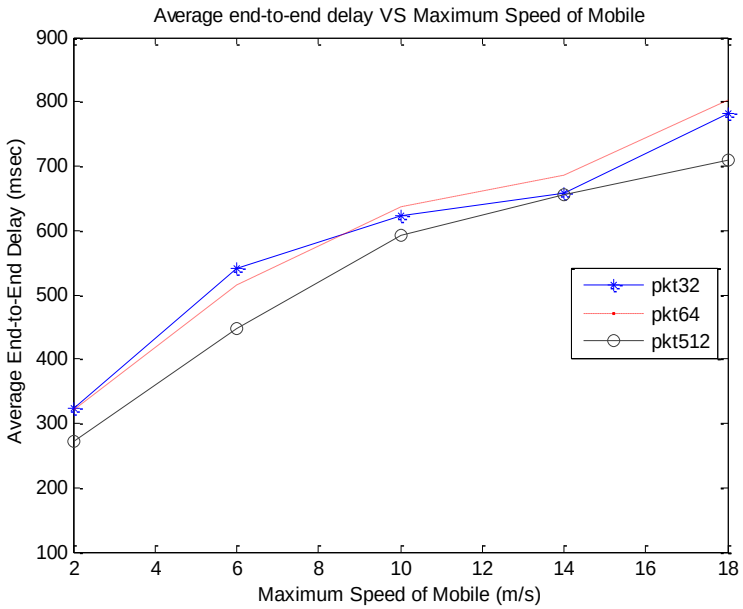
32 ,64 และ 512 ไบต์ (Packet size) อีกทั้งยังมีการปรับเปลี่ยนเวลาในการหยุดจาก 0 ถึง 900 วินาที (Pause time) จากเวลาในจำลองทั้งหมด 900 วินาที ส่วนกำลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตนั้นเท่ากับ 0.6635 วัตต์ กำลังงานที่ใช้ในการรับแพ็กเกตเป็น 0.395 วัตต์ และกำลังงานที่ใช้ในการละทิ้งแพ็กเกตเท่ากับ 0.200 วัตต์ โดยกำหนดให้แต่ละโนดมีพลังงานเริ่มต้นที่ 10 จูล ซึ่งจากการจำลองเบื้องต้นได้ผลดังรูปที่ 2.18



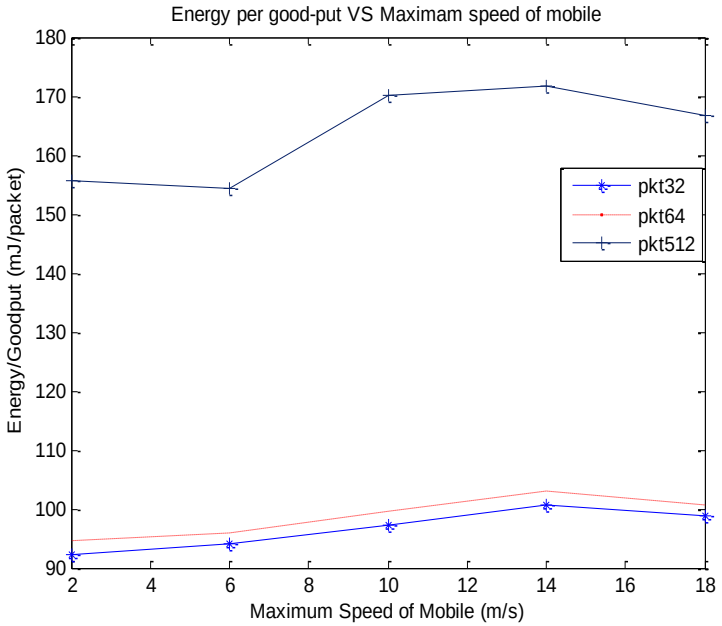
(ก) จำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งเมื่อปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุด



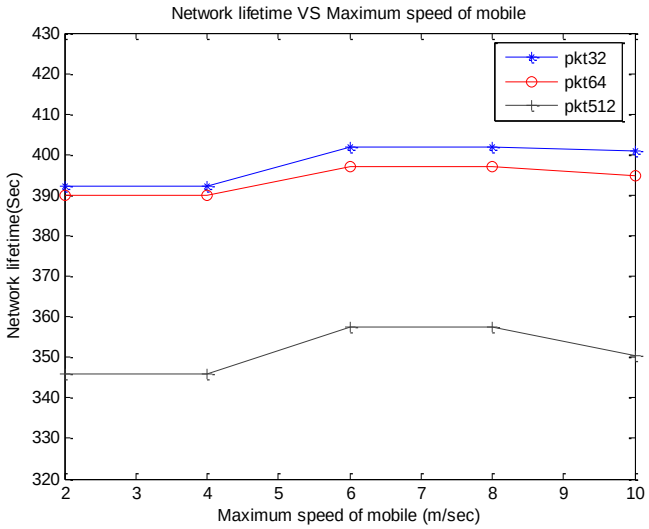
(ข) พลังงานที่ถูกใช้ในแต่ละชั้นเมื่อปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุด



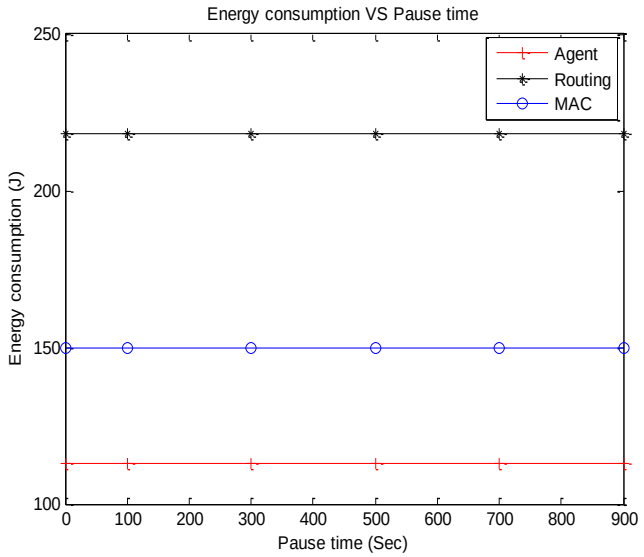
(ค) ค่าประวิงเวลาของแพ็กเกตเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของโนด



(ง) พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จ



(จ) อายุการใช้งานของโนดเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของโนด



(ฉ) พลังงานที่ถูกใช้เมื่อปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุดของโนด

รูปที่ 2.18 ผลการจำลองเบื้องต้น

จากรูป 2.18(ก) แสดงจำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้ง (Dropped data packet) โดยจำแนกออกเป็นสองสาเหตุใหญ่ๆ คือ จากการชนกันของแพ็กเกตและจากการสูญหายระหว่างทาง โดยปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการหยุดของโนด ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณแพ็กเกตข้อมูลที่ชนกันมีจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับแพ็กเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งทั้งหมด

รูปที่ 2.18(ข) แสดงพลังงานที่ใช้ทั้งหมดเทียบกับเวลาที่หยุด โดยแบ่งการใช้พลังงานออกเป็น 3 โมด คือ โมด การส่ง การรับและการได้ยินของแพ็กเกต ซึ่งพลังงานส่วนมากจะเสียจากการรับแพ็กเกตมากที่สุด ส่วนการส่งจะใช้พลังงานต่ำสุด

รูปที่ 2.18 (ค) แสดงการประวิงเวลาเฉลี่ยแต่ละเส้นทางเทียบกับความเร็วสูงสุดในแต่ละโนด โดยมีขนาดของแพ็กเกตข้อมูล 3 ขนาด ซึ่งผลที่ได้การประวิงเวลาเฉลี่ยนจะอยู่ระหว่าง 0.3 วินาที ถึง 0.8 วินาที

รูปที่ 2.18 (ง) แสดงพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดแต่ละแพ็กเกต โดยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของโนด ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดแพ็กเกตใหญ่ขึ้น จะทำให้ใช้พลังงานมากขึ้นตามไปด้วย หรือจำนวนแพ็กเกตที่ส่งสำเร็จลดลงเมื่อขนาดของแพ็กเกตใหญ่ขึ้น

รูปที่ 2.18 (จ) แสดงอายุการใช้งานของโครงข่ายจนกว่าจะมีโนดใดโนดหนึ่งไม่สามารถทำงานได้ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วของโนด ซึ่งจะได้เห็นได้ว่าขนาดของแพ็กเกตใหญ่ขึ้น มีผลทำให้อายุการใช้งานของโนดต่ำลง

และรูปที่ 2.18(ฉ) เป็นกราฟที่แสดงพลังงานที่ใช้แยกในแต่ละชั้น โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น คือ ชั้น Agent, Routing และชั้น MAC ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานที่ใช้จากชั้น Routing มีปริมาณมากกว่าชั้นอื่น และพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั้นจะไม่เปลี่ยนตามความเร็วของโนด ซึ่งพลังงานจากการส่งเฉพาะเฟรมข้อมูลจะหาได้จากชั้น Agent

จากผลการจำลองข้างต้น ทำให้ทราบว่าปริมาณแพ็กเกตที่ถูกละทิ้งมีจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดผลต่างๆตามมา ทั้งในด้านของการใช้พลังงาน ซึ่งจะทำให้โนดสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของโนดลดต่ำลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ ทำให้ผู้เขียนมีความคิดที่จะพัฒนาระบบการค้นหาเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านพลังงาน ซึ่งแนวทางการทำงานจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

บทที่ 3

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ

ในบทที่ผ่านมานั้นได้มีการกล่าวถึงผลกระทบเนื่องจากข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอกและทฤษฎีในการเข้าถึงตัวกลางตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ใช้ในโครงข่ายแอดฮอกไปแล้ว รวมถึงแบบจำลองการใช้พลังงานในโมดต่างๆ ซึ่งปัญหาด้านข้อจำกัดทางด้านพลังงานนำไปสู่แนวทางในการแก้ไขปัญหาและในงานวิจัยนี้เสอวิธีการออกแบบกระบวนการจัดหาเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอก ซึ่งจะเป็นการทำงานแบบข้ามขั้น (Cross Layer) โดยจะเป็นการทำงานข้ามขั้นของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางกับชั้นโครงข่าย ซึ่งจะพิจารณาพลังงานที่ใช้ (Energy consumption)ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเป็นหลัก และส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังชั้นโครงข่าย เพื่อทำการหาเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดจะถูกเลือก ส่วนเส้นทางอื่นจะถูกลบทิ้งไป เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะเป็นเส้นทางที่ไม่มีการชนกันของข้อมูลหรืออาจจะมีการชนกันของข้อมูลที่น้อยที่สุด จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้อายุการใช้งานของแต่ละโนด และทั้งโครงข่ายนานยิ่งขึ้น เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่ต่ำลง แบตเตอรี่ก็จะมีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น ปริมาณงานที่จะได้รับ (Throughput) ก็จะเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพของการให้บริการก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยนอกจากที่พิจารณาเฉพาะพลังงานที่ใช้ในส่วนของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแล้ว ยังจะพิจารณาถึงพลังงานของแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่ละโนดอีกด้วย โดยเส้นทางที่มีพลังงานแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดในเส้นทางเพียงพอต่อการสื่อสารและอยู่ในระดับที่สูงพอก็จะถูกพิจารณา เพราะจะได้เพิ่มอายุการทำงานของโครงข่ายให้นานขึ้น

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

3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน (Power Aware routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้มีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานที่ใช้ในส่วนของการเข้าถึงตัวกลางขึ้นใหม่ เพื่อนำไปใช้รวมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอจะเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

3.1.1 แบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอ

งานวิจัยฉบับนี้จะพิจารณาผลกระทบจากโนดแทรกสอด (Interference node) ผลกระทบหลังเกิดการชนของแพ็กเกตที่มีต่อค่าการปรับเปลี่ยนของ CW และผลกระทบจากพลังงานที่จะต้องสูญเสียจากโนดข้างเคียงเนื่องจากการได้ยินของแพ็กเกตด้วย ซึ่งจะทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากเพิ่มขึ้น โดยแต่ละโมดของการทำงานนั้นจะต้องทำงานเชื่อมโยงกันอยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นพลังงานที่ใช้จึงเป็นพลังงานรวมทั้งหมดที่คาดว่าจะถูกใช้ในเส้นทาง ซึ่งความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ จะอธิบายอยู่ในตารางที่ 3.1 โดยเวลาที่ใช้ในการที่โนดจะอยู่ในช่วงว่างเป็น

$$T_{ii} = \sigma \tag{3.1}$$

ส่วนเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเกต RTS, CTS, DATA และ ACK เมื่อเกิดการชนของแพ็กเกตดังกล่าวขึ้น จะเป็นดังสมการที่ (3.2) ถึงสมการที่ (3.5)

$$T_{ir} = T_{RTS} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} \tag{3.2}$$

$$T_{ic} = T_{CTS} = L_{DIFS} + L_{RTS} + L_{SIFS} + L_{CTS} + L_{SIFS} \tag{3.3}$$

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

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

ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจนสำเร็จเป็นดังสมการ

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

เมื่อ $L_{RTS}, L_{CTS}, L_H, L_{DATA}, L_{ACK}$ แทนความยาวของเฟรม RTS, CTS, DATA และ ACK ตามลำดับ

จาก [25] ได้ทำการหาความน่าจะเป็นที่โนดจะมีแพ็กเกตในการส่ง ณ ช่วงเวลาที่กำหนดสุ่มขึ้นมา ซึ่งจะได้ความน่าจะเป็นดังกล่าวได้ดังสมการ

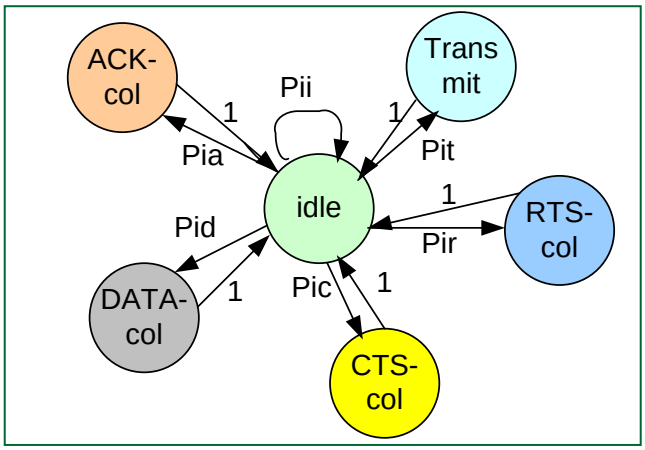
$$p = \frac{2(1-2\beta)}{(1-2\beta)(W+1) + \beta W(1-(2\beta)^m)} \tag{3.7}$$

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

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

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

จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) เราจะสามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการชนของแพ็กเกตและความน่าจะเป็นที่โนดจะส่งแพ็กเกต เมื่อทราบจำนวนของโนดข้างเคียง n ค่า $CW_{\min}$ และจำนวนเสตจมากสุดของการ back-off (m) โดยเราจะนำค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวมาใช้ในการหาความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของแต่ละโนด โดยสถานะของแต่ละโนดจะถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 สถานะ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะการทำงานในช่องสื่อสาร

ความน่าจะเป็นที่โนดจะไม่มีการส่งแพ็กเกตใด ๆ หรืออยู่ในช่วงสถานะว่างเป็นดังสมการ

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

ส่วนความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนสถานะจากสถานว่างเป็นสถานะที่ส่งแล้วสำเร็จจะเท่ากับ

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

โดยที่ค่า

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

ซึ่งค่าดังกล่าวจะเป็นค่าความน่าจะเป็นที่โนดในระยะช่วงแทรกสอด (Interference range)นอกเหนือขอบเขตการติดต่อสื่อสารของตัวส่งที่มีจำนวนโนดที่จะส่งแพ็กเกตในช่วงดังกล่าวน้อยกว่าจำนวนโนดที่จะสามารถส่งผลกระทบกับการส่งและรับแพ็กเกตของตัวส่งและตัวรับในช่วงเวลาที่มีการส่งแพ็กเกต ส่วนความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะของการส่งเฟรม RTS แล้วเกิดการชนกันขึ้น จะเป็นผลรวมของความน่าจะเป็นที่โนดในช่วงของการติดต่อสื่อสารส่งเฟรม RTS มากกว่าหนึ่งโนดรวมกับความน่าจะเป็นที่มีการส่งเฟรม RTS เพียงโนดเดียวแต่จำนวนโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอดมีการส่งแพ็กเกตมากพอที่จะส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเกต ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

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

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

ความน่าจะเป็นที่โนดจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่มีการชนกันของเฟรม CTS จะมีค่าเท่ากับ

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

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

นอกจากมีการชนกันของแพ็กเกตควบคุมแล้ว ยังมีการชนกันของข้อมูลอีกด้วย ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่มีการส่งข้อมูลแล้วเกิดการชนกันขึ้น เป็นดังสมการ

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

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

สุดท้าย ความน่าจะเป็นที่โนดจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะว่างเป็นสถานะที่มีการชนกันของแพ็กเกต ACK จะหาได้จากผลรวมของความน่าจะเป็นทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง ซึ่งจะได้

$$P_{ia} = 1 - P_{ii} - P_{it} - P_{ir} - P_{ic} - P_{id} \tag{3.18}$$

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

$$S_i P_{ii} + S_t + S_r + S_c + S_d + S_a = S_i \tag{3.19}$$

$$S_i P_{ii} + 1 - S_i = S_i \tag{3.20}$$

$$S_i = \frac{1}{2 - P_{ii}} \tag{3.21}$$

ซึ่งจะเป็นความน่าจะเป็นที่โนดจะอยู่ในสถานะว่างก่อนที่จะมีการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะสามารถนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำเร็จ จะได้ดังสมการที่ (3.22) โดยความหมายของตัวแปรที่ใช้ในสมการต่าง ๆ แสดงได้ตามตาราง

ตารางที่3.1 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ของสมการในงานวิจัย

σ	ความยาวของหนึ่งสล็อต
p	ความน่าจะเป็นที่โนดจะมีแพ็กเกตไว้รอส่ง ณ ช่วงเวลาที่กำหนด
W	ขนาดของ back-off widow ที่สั้นที่สุด
$S_i, S_t, S_r, S_c, S_d, S_a$	ความน่าจะเป็นของสถานะโนดแบบสถานะคงตัว
N	จำนวนโนดที่อยู่ในช่วงติดต่อสื่อสาร
N_{out}	จำนวนโนดที่อยู่นอกเขตการติดต่อสื่อสาร
$N_{\lim}$	จำนวนโนดที่อยู่ในช่วงแทรกสอด
$T_{RTS}, T_{CTS}, T_{DATA}, T_{ack}$	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	อัตราการเข้ามาของแพ็กเกต

ซึ่งพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำเร็จ จะรวมถึงพลังงานที่โนดใช้เมื่อโนดอยู่ในสถานะต่างๆ คือ สถานะว่าง สถานะการส่งแพ็กเกตสำเร็จ สถานะการรับแพ็กเกต และสถานะการส่งซ้ำของแพ็กเกตควบคุมและแพ็กเกตข้อมูลเมื่อเกิดการชนของแพ็กเกตขึ้น โดยพลังงานที่สูญเสียจากการส่งและรับแพ็กเก

ตข้อมูลนั้น จะคิดพลังงานที่ใช้จากโนดข้างเคียงของตัวส่งและตัวรับเนื่องจากการได้ยินของแพ็กเกต ซึ่งจะได้สมการดังนี้

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

สมการรวมในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางจะเป็นดังสมการที่ (3.22) เมื่อกำหนดให้ E_{mac} คือค่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมด ส่วน P_s , P_r P_o and P_{idle} เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่ง การรับ การละทิ้งของแพ็กเกตและพลังงานที่โนดใช้ในสถานะว่าง S_i และ S_t คือความน่าจะเป็นที่โนดจะอยู่ในเสตจว่างและเสตจการส่ง ตามลำดับ ค่า $S_{col-ctr}$ และ $S_{col-data}$ แสดงความน่าจะเป็นที่แพ็กเกตควบคุมและแพ็กเกตข้อมูลจะเกิดการชนเมื่อมีการส่ง ซึ่งหาได้จาก $S_i P_{ir}$, $S_i P_{ic}$, $S_i P_{id}$, $S_i P_{ia}$ สำหรับแพ็กเกต RTS, CTS, DATA และ ACK ตามลำดับ เมื่อ T_{ctr} และ T_{data} คือเวลาของการส่งแพ็กเกตควบคุมและแพ็กเกตข้อมูล และ N คือจำนวนโนดข้างเคียงที่อยู่ในช่วงของตัวส่งหรือตัวรับ

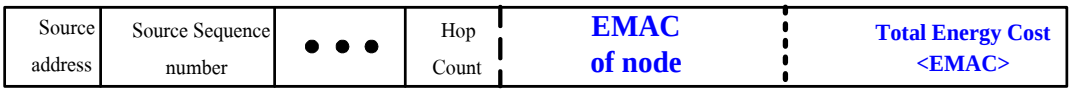
ในงานวิจัยฉบับนี้จะนำแบบจำลองการใช้พลังงานดังกล่าวมาใช้เพื่อค้นหาเส้นทางที่มีการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเส้นทางที่ใช้พลังงานในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่ำสุด จะเป็นเส้นทางที่มีการชนกันของข้อมูลต่ำสุด จึงมีการส่งซ้ำของแพ็กเกตน้อยที่สุด อีกทั้งพลังงานที่ได้ไม่ใช่เฉพาะคู่โนดรับและส่งเท่านั้น แต่จะรวมถึงพลังงานที่โนดในเส้นทางใช้ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ปริมาณงานเพิ่มขึ้น อีกทั้งอายุการใช้งานของโนดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยต่อไปจะอธิบายหลักการทำงานของโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งโพรโทคอลที่นำเสนอจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route discovery process) และกระบวนการดูแลเส้นทาง (Route maintenance process) ซึ่งแต่ละกระบวนการมีการทำงานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

3.1.2 **กระบวนการค้นหาเส้นทาง** (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอได้ประยุกต์ใช้กับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบโพรโทคอล AODV โดยจะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางเมื่อโนดต้องการจะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โนดจะต้องแพร่กระจายแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet หรือ RREQ) ไปทั่วทั้งโครงข่าย แต่ก่อนที่โนดต้นทางจะแพร่กระจายแพ็กเกตออกไป โนดจะต้องบันทึกค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นลงในแพ็กเกต RREQ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยแพ็กเกตการร้องขอเส้นทางที่นำมาใช้กับโพรโทคอลที่นำเสนอได้เพิ่มพื้นที่

จากเดิมขึ้น 2 ส่วนคือพลังงานที่คาดว่าโนดจะต้องสูญเสียจากชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางตามสมการที่ (3.22) (Energy of MAC, EMAC) ซึ่งเป็นพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเกตข้อมูลและแพ็กเกตควบคุม โดยพิจารณาผลกระทบจากโนดซ่อนเร้น (Hidden node)และโนดแทรกสอด (Interference node) ซึ่งจะส่งผลให้ทุกๆแพ็กเกตมีโอกาสที่จะเกิดการชน ดังนั้นพลังงานที่ได้จะรวมถึงพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียเนื่องจากส่งแพ็กเกตไปแล้ว แพ็กเกตดังกล่าวเกิดการชนขึ้น

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



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงาน

โดยโนดต้นทางจะต้องทำการคำนวณค่า $EMAC$ จากสมการ (3.22) แล้วบรรจุค่าที่ได้ลงในฟิลด์ $EMAC$ of node ของแพ็กเกต RREQ และกำหนดค่าเริ่มต้นของ $EMAC_p^{Total}$ ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโนดข้างเคียง ต่อมาเมื่อโนดข้างเคียงได้รับแพ็กเกต RREQ จะต้องทำการคำนวณค่าพลังงานที่สูญเสีย $EMAC$ อีกครั้ง เมื่อโนดคำนวณค่าดังกล่าวเรียบร้อยแล้วโนดจะนำ $EMAC$ ที่คำนวณได้ไปบวกกับค่าพลังงานที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ (อยู่ในฟิลด์ Total Energy Cost) แล้วบรรจุค่าใหม่ที่ได้ลงในฟิลด์ของค่าต้นทุนพลังงานรวมของเส้นทางที่คำนวณได้ดังนี้

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

จากสมการที่ (3.12) ถ้าสมมุติให้โนดในเส้นทาง p ประกอบไปด้วย ($S = 1, 2, ..., N = D$) สามารถคำนวณหาต้นทุนรวมพลังงานของเส้นทาง p ได้เป็น $EMAC_p^{Total} = \sum_{i=1}^{N-1} EMAC_i$ ภายหลังจากบรรจุค่าทั้งสองลงในฟิลด์ของแพ็กเกต RREQ เรียบร้อยแล้วโนดก็จะแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโนดข้างเคียงของตัวเองต่อไป ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเกต RREQ ไปถึงยังโนดปลายทาง

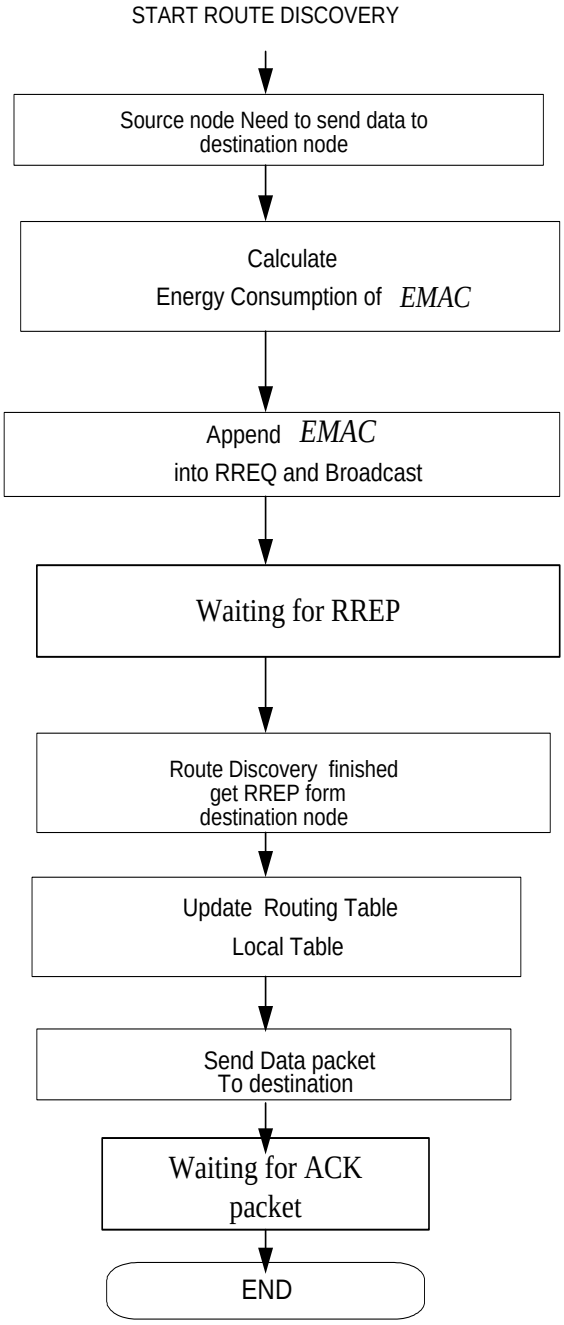
โดยขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่โนดปลายทางได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางเป็นจำนวนหนึ่งคือพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทาง โดยพิจารณาได้จากสมการที่ (3.24) นั้นคือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทาง

ต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนหน้านี้ที่พิจารณาจากเส้นทางที่สูญเสียพลังงานเฉพาะโนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น [27, 28]

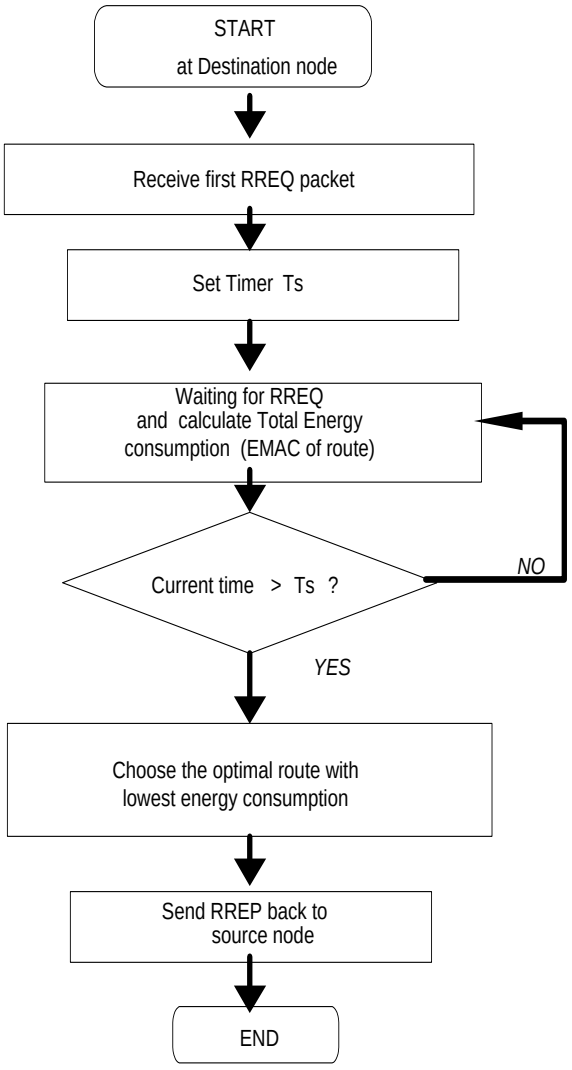
$$p^* = \min_{\forall p \in A}(EMAC_p^{Total}) \tag{3.24}$$

เมื่อ A เป็นเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่โนดปลายทางได้รับ ภายหลังจากที่โนดเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากสมการที่ (3.24) ได้แล้ว โนดปลายทางทำการตอบกลับไปยังโนดต้นทางด้วยแพ็กเกตตอบรับเส้นทาง (Route Reply Packet, RREP) โดยเส้นทางที่โนดปลายทางใช้ส่งจะเป็นเส้นทางที่คาดว่าจะมีการใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยทุกโนดที่อยู่ในเส้นทางเมื่อได้รับแพ็กเกตตอบรับเส้นทางแล้วจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเกตดัง กล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโนดต้นทาง ภายหลังจากโนดต้นทางได้รับแพ็กเกตการตอบรับเส้นทางแล้วโนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ถูกเลือกแล้วรอแพ็กเกตตอบรับ ACK ก็เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบที่นำเสนอ

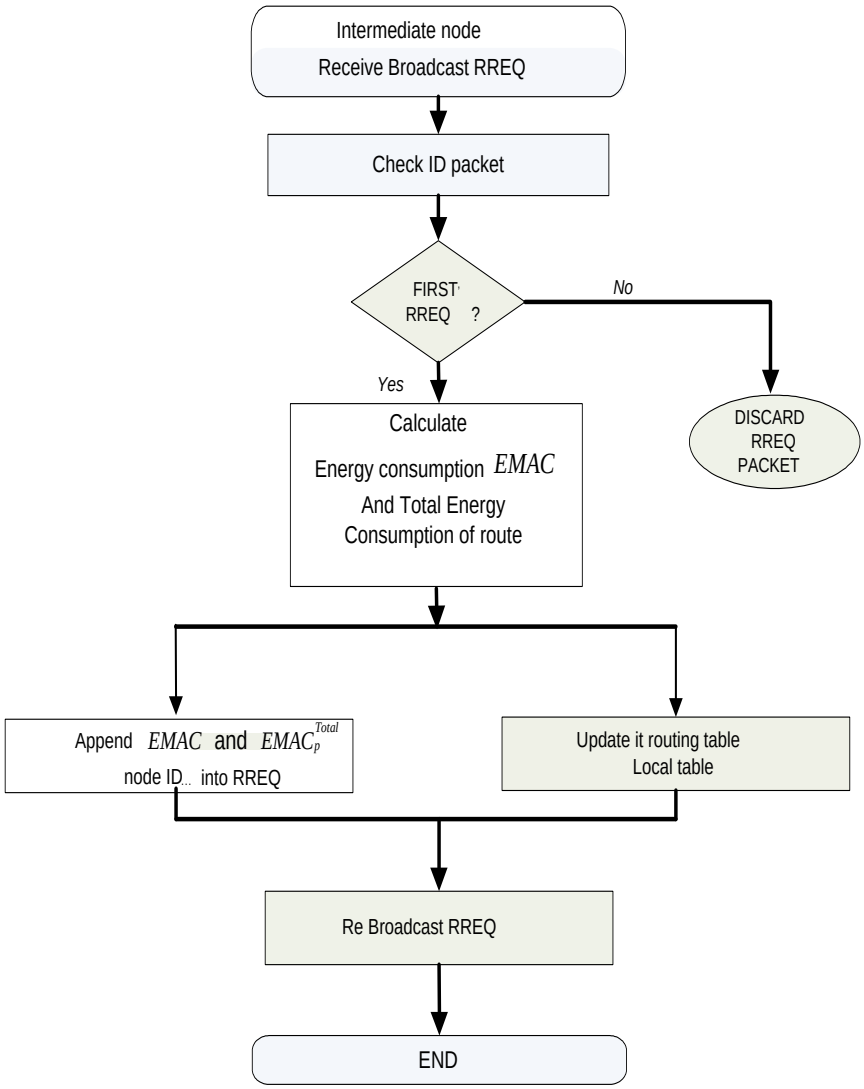
โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.5 โดยแยกตามกระบวนการที่โนดแต่ละโนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.4 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด



รูปที่ 3.4 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด



รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)

3.1.3 **ลักษณะพิเศษของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ**

ลักษณะพิเศษของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่ได้นำเสนอ ซึ่งเพิ่มเติมมาจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV นั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ซึ่งความพิเศษดังกล่าวจะทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเลือกใช้การเลือกเส้นทางอย่างมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานมากยิ่งขึ้นและยังช่วยเสริม

กระบวนการบางขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่เราต้องการจะพิจารณา โดยสามารถสรุปข้อแตกต่างเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV สามารถให้โนดระหว่างทางสามารถตอบรับเส้นทางได้ถ้าโนดนั้นมีเส้นทางที่สามารถใช้งานได้และมีความใหม่อยู่ในตารางการจัดเส้นทาง แต่ในโพรโทคอลที่นำเสนอจะยอมให้โนดปลายทางเท่านั้นที่สามารถตอบรับการร้องขอเส้นทางจากโนดต้นทางได้เนื่องจากเส้นทางที่อยู่ในตารางการจัดเส้นทางนั้น จะเป็นข้อมูลที่เก่าและอาจจะใช้พลังงานมากขึ้นถ้าเราเลือกใช้เส้นทางดังกล่าว

2. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะใช้แพ็กเกตทักทาย (Hello packet) เพื่อใช้ในการตรวจสอบหรือติดตามการเชื่อมต่อกับโนดข้างเคียง โดยการแพร่กระจายเป็นช่วงระยะเวลาที่สม่ำเสมอ แต่ในโพรโทคอลที่นำเสนอนอกจากจะใช้ตรวจสอบค่าดังกล่าวเพื่อเป็นกระบวนการดูแลเส้นทางแล้วยังใช้แพ็กเกตทักทายเพื่อนับจำนวนโนดข้างเคียงซึ่งจะใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับโนดข้างเคียงเพื่อบันทึกจำนวนโนดแทรกสอดในการนำไปคำนวณหาค่าพลังงานที่คาดว่าจะสูญเสียตามสมการ

3. กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV กำหนดให้โนดปลายทางเมื่อได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางเป็นแพ็กเกตแรกก็จะต้องทำการตอบรับเส้นทางทันที (เพราะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดในเชิงของเวลา) แต่สำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอนั้นโนดปลายทางจะต้องรอเป็นระยะเวลาหนึ่งหลังจากได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางแพ็กเกตแรกเข้ามาเพื่อรอแพ็กเกตการร้องขอเส้นทางจากเส้นทางอื่น ๆ เพื่อให้โนดสามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด เพราะถ้าตอบรับแพ็กเกตโดยทันทีเส้นทางที่ได้นั้นอาจจะใช้พลังงานมากกว่าเส้นทางอื่น ๆ ที่เข้ามาภายหลังก็เป็นไปได้

นอกจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงงานแล้ว งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลอีกประเภทหนึ่งคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมซึ่งมีรายละเอียดและหลักการทำงานดังนี้

3.2 **โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม** (Hybrid Protocol)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป้าหมายจะเหมือนกับโพรโทคอลแบบคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด โดยโพรโทคอลแบบผสมเกิดจากแนวความคิดที่ว่า การจะช่วยให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานให้มากที่สุดนั้นเราจะต้องเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำและขณะเดียวกันก็จะต้องเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งถ้าพิจารณา

เฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งก็สามารถจะช่วยยืดอายุได้เช่นกันแต่ประสิทธิภาพที่ได้จะไม่เท่ากับนำทั้งสองเงื่อนไขมาพิจารณาพร้อม ๆ กัน

เพราะฉะนั้นโพรโทคอลที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้จะนำเอาโพรโทรคอลใช้พลังงานต่ำที่สุดและโพรโทคอลแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโนด (*Battery-Aware Routing Protocol*) ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.3 มาทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายทั้งสองอย่างพร้อมกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสอนโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมไว้ 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโนดมาเป็นค่าประวิงเวลาก่อนการส่งแพ็กเกต โดยโนดปลายทางจะทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าพลังงานที่สูญเสียจากสมการที่ (3.22) ต่ำที่สุด ส่วนวิธีที่สองจะเป็นการนำค่าทั้งสองคือค่าพลังงานที่คาดว่าจะสูญเสียและค่าพลังงานที่เหลือของโนดมาคำนวณพร้อมกัน โดยเส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีระดับพลังงานที่เหลือมากและเส้นทางจะมีการใช้พลังงานน้อย โดยต่อไปจะเป็นหลักการทำงานของโพรโทคอลที่นำเสนอ

3.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่เหลือมาเป็นค่าประวิงเวลา

โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่หนึ่งนี้ จะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโนดมาคำนวณหาค่าประวิงเวลาก่อนที่จะทำการส่งแพ็กเกต โดยโนดที่มีค่าพลังงานที่เหลือของโนดสูงจะมีค่าของการประวิงเวลาที่ต่ำ ตรงกันข้ามกับโนดที่มีระดับพลังงานที่เหลือต่ำๆ จะมีค่าประวิงเวลาที่นานขึ้น โดยเส้นทางใดที่แพ็กเกตไปถึงปลายทางเป็นลำดับต้น ๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีระดับพลังงานสูงและทั้งเส้นทางมีการใช้พลังงานที่ต่ำ ซึ่งต่อไปจะเป็นกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลดังกล่าว

3.2.1.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโนดปลายทางแต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโนดปลายทางนั้น โนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปยังโนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเกต RREQ จะต้องบรรจุค่า $EMAC$ จากสมการที่ (3.22) และสุดท้ายคือ กำหนดค่าเริ่มต้นของ $EMAC_p^{Total}$ ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโนดข้างเคียง หลังจากโนดข้างเคียงได้รับแพ็กเกต RREQ โนดจะทำการหน่วงเวลาแพ็กเกต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งด้วยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่เสนอดังนี้

- **ฟังก์ชันการประวิงเวลา** (Delay Function)

กลไกการประวิงเวลาจะเปรียบเสมือนกับฟังก์ชันที่แปลงจากอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดไปเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาในการส่งแพ็กเกต RREQ ซึ่งมีหลายฟังก์ชันที่ถูกนำมาเสนอ โดยในบทความอ้างอิง [13] ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลาไว้ด้วยกัน 3 แบบ คือ Linear Convex และ Concave ซึ่งฟังก์ชันแบบ Concave ให้ผลลัพธ์ในการยืดอายุการใช้ของโครงข่ายได้ดีที่สุด โดยที่ Yu และ Lee [13] ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลาง่าย ๆ เพื่อนำมาใช้งานซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.25)

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

เมื่อ $d_{i,t}$ คือ ช่วงเวลาที่โนดใช้ในการหน่วงแพ็กเกต RREQ ของโนด i ณ เวลา t มีหน่วยเป็นมิลลิวินาทีส่วนค่า E คือ ค่าพลังงานสูงสุดของโนด (Maximum energy) มีหน่วยเป็นจูล (Joules) D เป็นเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาแพ็กเกตสูงสุด (Maximum delay) และ $e_{i,t}$ คือ พลังงานที่เหลืออยู่ของโนด i ณ เวลา t ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันในสมการที่ (3.25) ยังคงมีปัญหาคือ ค่าต่ำสุดของการหน่วงเวลาแพ็กเกตคือ $D/2$ ก็หมายความว่าถึงแม้ว่าโนดจะมีพลังงานจากแบตเตอรี่อยู่เต็มแต่โนดก็ยังคงถูกหน่วงเวลาแพ็กเกตไว้ถึง $D/2$ ในงานวิจัยนี้จึงเสนอว่าฟังก์ชันที่นำมาใช้ไม่ควรที่จะมีการหน่วงเวลามากเกินความจำเป็นในกรณีที่โนดมีพลังงานจากแบตเตอรี่เต็มหรือค่า $BAT(i,t)$ เท่ากับค่าพลังงานสูงสุดของโนดเพราะอาจจะทำให้สมรรถนะด้านอื่น ๆ ของระบบลดต่ำลงเช่น การประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเกตข้อมูลจากปลายถึงปลาย (Average End-to-End Delay) โดยโพรโทคอลที่นำเสนอจะยังคงใช้ฟังก์ชันแบบ Concave ซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.26)

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

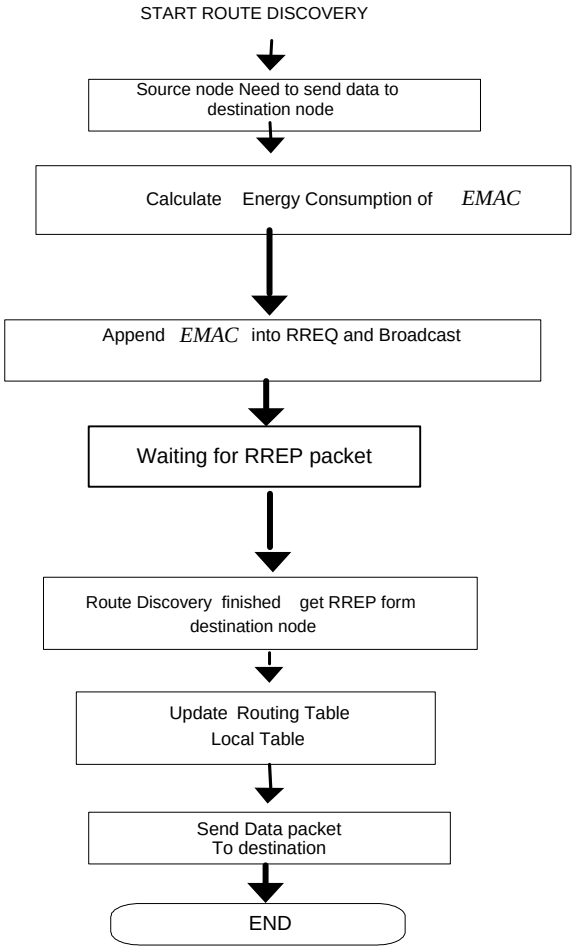
(3.26)

โดยฟังก์ชันที่นำเสนอจะลดค่าเฉลี่ยเวลาที่หน่วงแพ็กเกต และเพิ่มความแตกต่างของเวลาที่ใช้หน่วงแพ็กเกตระหว่างโนดที่ใกล้หมดอายุการใช้งานกับโนดที่มีอายุการใช้งานเหลืออยู่เต็ม เพราะฉะนั้นเส้นทางที่แพ็กเกต RREQ ไปถึงยังโนดปลายทางเป็นอันดับต้น ๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูงเพราะแพ็กเกต RREQ ที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่ต่ำจะถูก

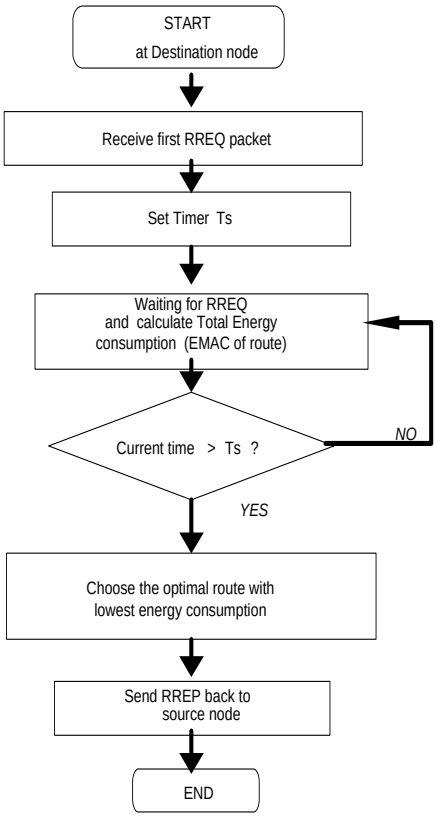
หน่วงเวลาไว้นาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแพ็กเกตเหล่านี้ก็จะถูกโนดอื่น ๆ ละทิ้งเนื่องจากแพ็กเกตที่เข้ามาไม่ใช่แพ็กเกตแรก

หลังจากคำนวณค่าประวิงเวลาก่อนส่งแพ็กเกตแล้วนั้น ก่อนที่จะทำการแพร่กระจายแพ็กเกต RREQ ไปยังโนดข้างเคียง ในช่วงเวลาที่แพ็กเกตถูกหน่วงอยู่นั้น (หรือก่อนที่หมดเวลาการหน่วงแพ็กเกต RREQ ที่ได้ตั้งไว้) โนดต้องคำนวณค่าพลังงานที่ได้จากสมการที่ (3.22) เหมือนกับขั้นตอนของการคำนวณพลังงานที่สูญเสียในโพรโทคอลแบบใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ เสร็จก็จะบรรจุค่าดังกล่าวลงไปในแพ็กเกต RREQ และแพร่กระจายแพ็กเกตไปยังโนดข้างเคียงต่อไป กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเกต RREQ ไปถึงยังโนดปลายทาง หลังจากโนดปลายทางได้รับ RREQ แรกแล้วจะตั้งเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อรอ RREQ ที่ได้จากเส้นทางอื่น ๆ หรืออาจจะกำหนดจำนวน RREQ ที่จะรับโดยแพ็กเกต RREQ ที่เข้ามาหลังจากเวลาที่กำหนดไว้จะถูกลบทิ้งทั้งหมด เมื่อหมดเวลาที่ตั้งไว้หรือได้รับแพ็กเกต RREQ ครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทาง โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.24) คือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หลังจากที่โนดเลือกเส้นทางได้แล้ว โนดปลายทางจะสร้างแพ็กเกตการตอบรับเส้นทาง (RREP) เพื่อตอบกลับไปบอกโนดต้นทางให้ทราบ โดยใช้เส้นทางที่เลือกไว้ข้างต้นในการส่งแพ็กเกตไปให้โนดต้นทาง โดยระหว่างที่ส่งแพ็กเกตตอบรับเส้นทางกลับไปนั้นโนดทุกโนดที่ได้รับแพ็กเกตจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเกตดังกล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโนดต้นทาง ภายหลังจากโนดต้นทางได้รับแพ็กเกตการตอบรับเส้นทางแล้วโนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเกตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ได้มาก็เป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.8 โดยแยกตามกระบวนการที่โนดแต่ละโนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนที่เกิดกับโนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.7 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.8

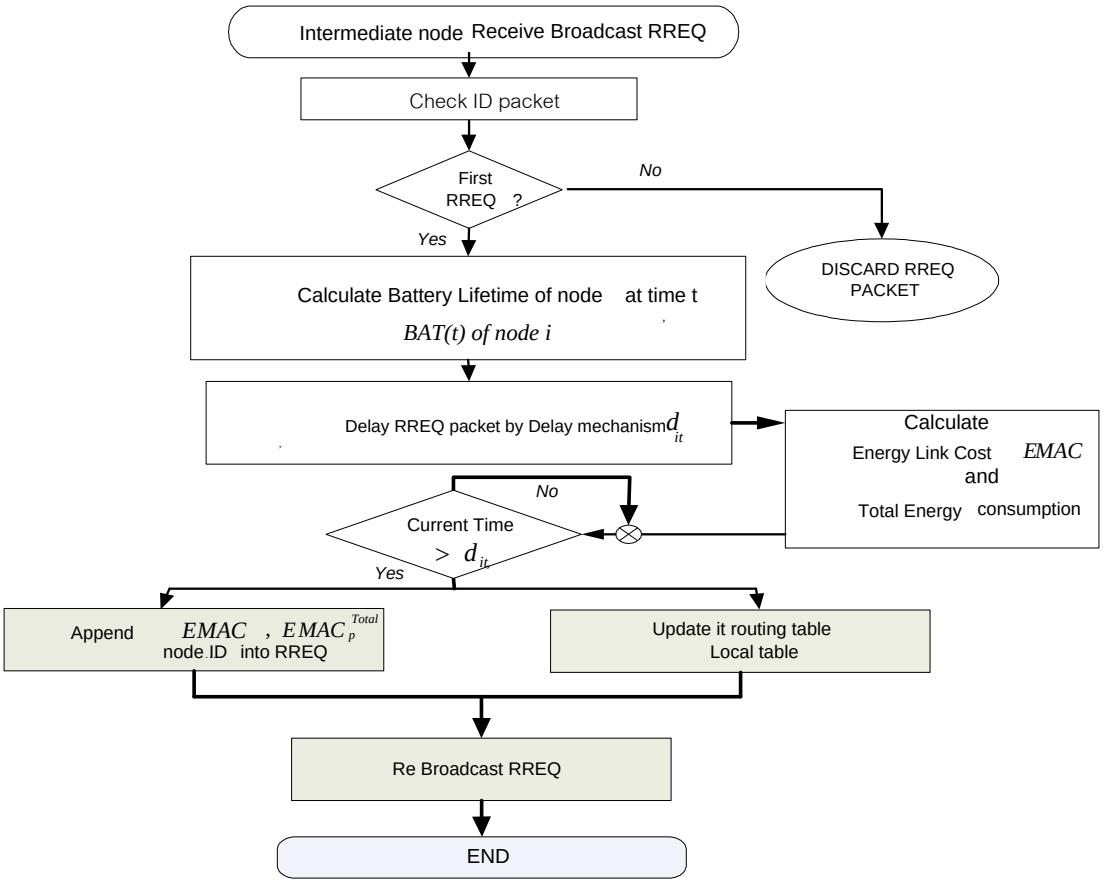


รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง



รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางแบบผสมวิธีที่หนึ่ง

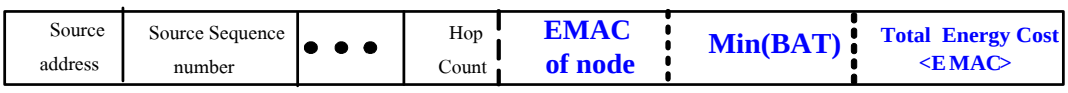
จากกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่ได้กล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า เส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในช่วงเวลาที่โนดปลายทางทำการรอแพ็กเกตร้องขอเส้นทาง และจากการใช้กลไกการประวิงเวลาทำให้เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ (Battery Lifetime) อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งทำให้เส้นทางที่ดีที่สุดเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่ายดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นทางที่ดีที่สุดของโพรโทคอลทั้งแบบการใช้พลังงานต่ำที่สุด และยืดอายุการใช้งานมากที่สุดที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น



รูปที่ 3.8 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดระหว่างทางแบบผสมที่นำเสนอแบบที่หนึ่ง

3.2.1.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำค่าพลังงานที่ใช้และพลังงานที่เหลือมาคำนวณพร้อมกัน

โพรโทคอลนี้จะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือต่ำสุดของแต่ละเส้นทางมาคำนวณพร้อมกับค่าพลังงานที่คาดว่าจะใช้ในสมการที่ (3.22) โดยกระบวนการค้นหาเส้นทางในโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สองนี้จะคล้ายกับแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานในหัวข้อ 3.1 แต่จะมีการบันทึกค่าพลังงานที่เหลือของโนดที่ต่ำที่สุดในแต่ละเส้นทางไว้เพื่อไปคำนวณหาค่าสุดท้ายเพื่อเป็นตัวตัดสินใจในการเลือกใช้เส้นทาง โดยโครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทางแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของแพ็กเกตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่สอง

โดยสมการที่ (3.27) แสดงถึงค่าอัตราส่วนระหว่างระดับพลังงานที่สูญเสียมากที่สุดกับระดับพลังงานที่เหลือมากที่สุด

$$\xi = \frac{EMAC_{MAX}}{BAT_{MAX}} \tag{3.27}$$

โนดจะทำการตรวจสอบค่าระดับพลังงานที่เหลือของตัวเองแล้วเปรียบเทียบกับโนดก่อนหน้า ซึ่งจะปรับปรุงค่าดังกล่าวมาเรื่อย ๆ เพื่อบันทึกค่าระดับพลังงานต่ำสุดของแต่ละเส้นทาง จากสมการ

$$BAT_i = \min(BAT_j(t)) \tag{3.28}$$

โดยที่ $j \in i$ ซึ่งเป็นโนดหนึ่งในเส้นทาง i

ในขณะเดียวกันโนดก็ทำการคำนวณค่าพลังงานตามแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานตามสมการที่(3.23) จากนั้นโนดปลายทางจะทำการเลือกเส้นทางจากสมการที่(3.29)

$$BEMAC_i = \frac{EMAC_i^{Total}}{\xi \cdot BAT_i} \tag{3.29}$$

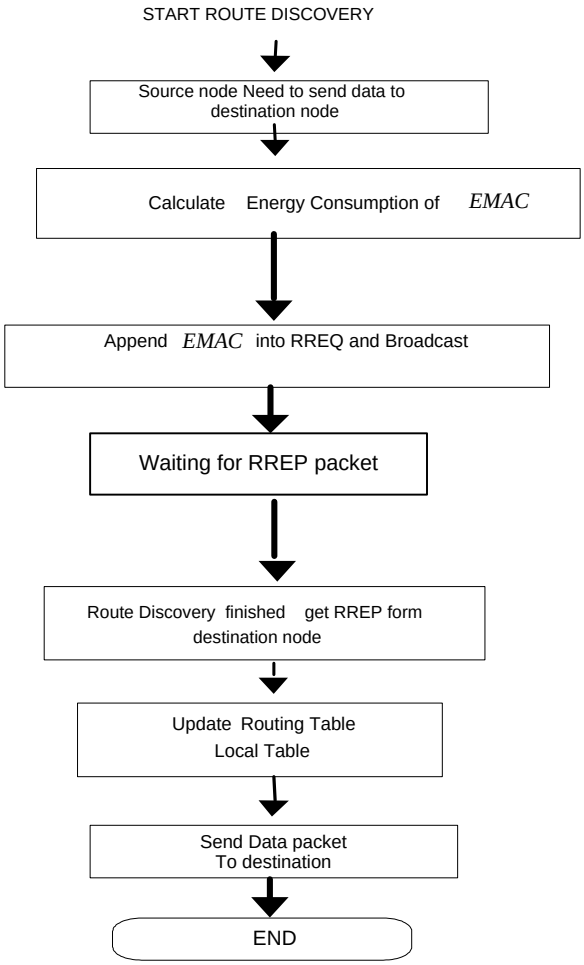
จากนั้นปลายทางจะเลือกเส้นทางที่มีค่า $BEMAC_i$ ต่ำที่สุด ซึ่งเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีพลังงานที่ใช้ตลอดทั้งเส้นทางต่ำและหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีโนดเหลือแบตเตอรี่ต่ำๆ ดังสมการที่ (3.30)

$$p^* = Min_{\forall i \in A}(BMAC_i) \tag{3.30}$$

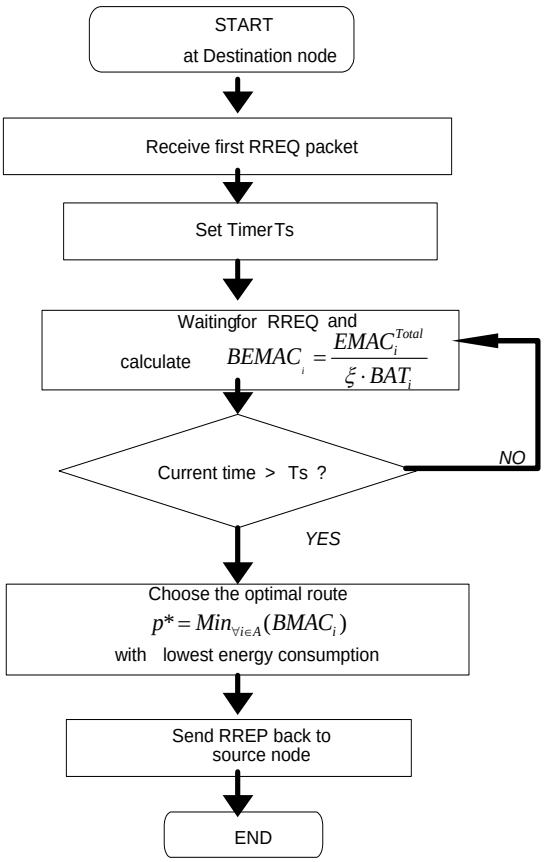
เมื่อ i เป็นเส้นทางหนึ่งในทั้งหมด A เส้นทาง ซึ่งเมื่อโนดปลายทางทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าตามสมการที่ (3.30) ที่มากที่สุดแล้ว โนดปลายทางจะทำการตอบกลับด้วย ACK ไปยังต้นทางด้วยเส้นทางที่เลือกไว้ เป็นการสิ้นสุดกระบวนการค้นหาเส้นทางในแบบการจัดสรรเส้นทางแบบผสมในวิธีที่สอง

เพื่อให้ง่ายในการเข้าใจกระบวนการทำงานของโนดจึงได้เขียนแผนผังกระบวนการค้นหาเส้นทางในแบบวิธีที่นำเสนอดังรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.12 โดยแยกตามกระบวนการที่โนดแต่ละโนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนที่เกิดกับโนดต้นทาง ส่วนผังงานใน

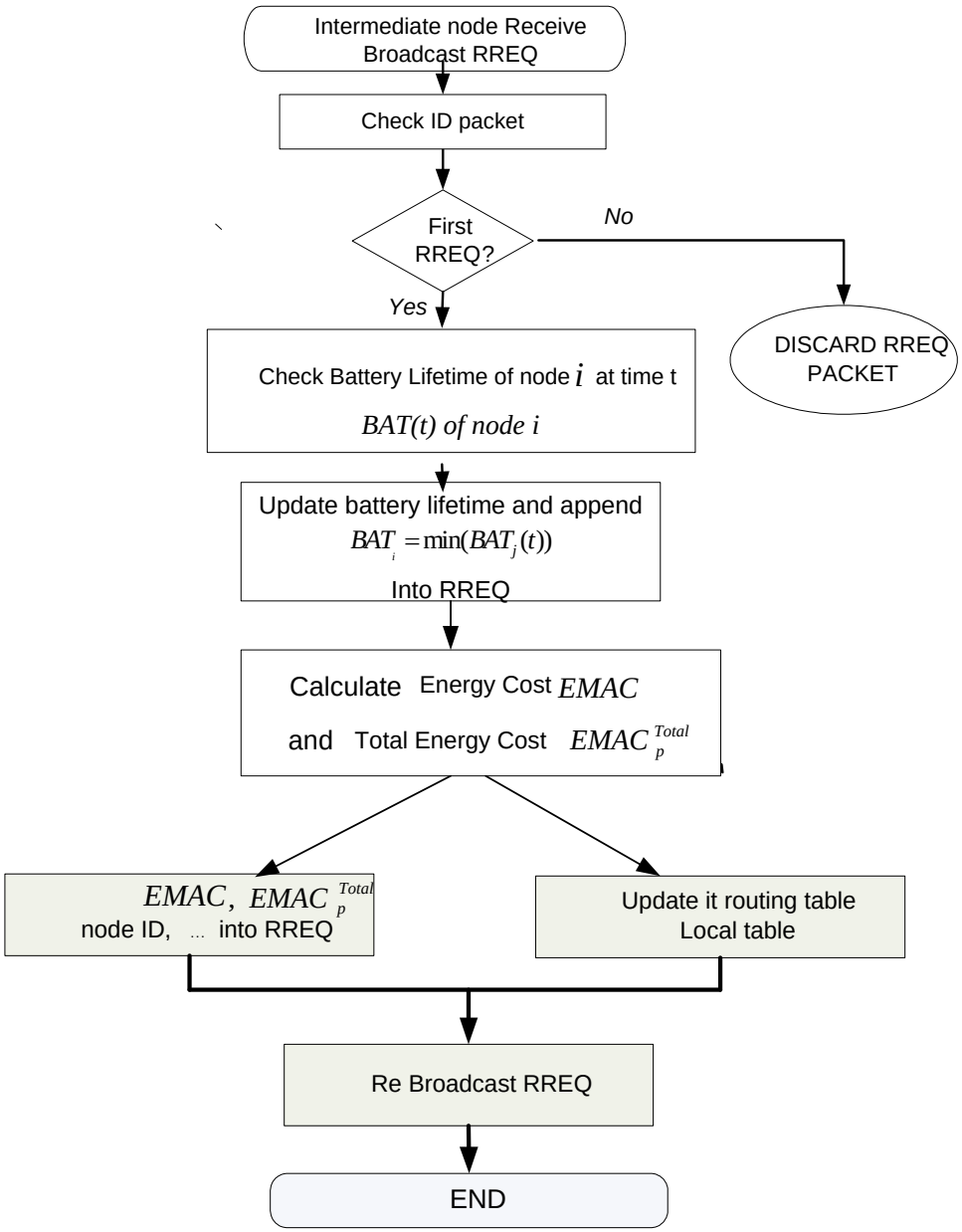
รูปที่ 3.11 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.10 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดต้นทางแบบผสมวิธีที่สอง



รูปที่ 3.11 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโนดปลายทางแบบผสมวิธีที่สอง



รูปที่ 3.12 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง

3.3 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง 2 แบบดังนี้ แบบที่หนึ่งคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ ใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy) และแบบที่สองคือโพรโทคอลแบบผสมซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในแต่ละโนด

โดยเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่หนึ่งคือลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ อย่างไรก็ตาม การพยายามลดการใช้พลังงานไม่ใช่เป็นแนวทางที่ดีที่สุดเพราะว่าพลังงานที่ใช้ไม่ได้สะท้อนถึงอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดโดยตรง

จึงมีการนำเสนอในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่คำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของโนด โดยนำตัววัดดังกล่าวมาใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางคือเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด โดยพยายามทำให้โครงข่ายสามารถยืดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยเลือกใช้เส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่นำเสนอในแบบการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงาน นอกจากนั้นเส้นทางดังกล่าวจะต้องผ่านโนดที่มีค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งเราเรียกโพรโทคอลนี้ว่าเป็น โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม

บทที่ 4

สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

หลักการทำงานและรายละเอียดของโพรโทคอลที่นำเสนอได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา ส่วนเนื้อหาของงานวิจัยในบทนี้ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงสภาพแวดล้อมของการจำลอง โดยจะกล่าวถึงรูปแบบที่ใช้ในการจำลองอย่างเช่น พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกถึงสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง เป็นต้น ส่วนที่สองจะกล่าวถึงผลการจำลองรวมทั้งการวิเคราะห์ผลสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยจะเปรียบเทียบกับโพรโทคอลมาตรฐาน IEEE 802.11 และเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอภายใต้รูปแบบการจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง นอกจากนั้นยังพิจารณาถึงจำนวนโนดที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดค่า “จำนวนโนดแทรกสอด (Interfering node)” ที่มีผลทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับโพรโทคอลแบบมาตรฐานว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือด้อยกว่าอย่างไรเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment)

สภาพแวดล้อมและโปรแกรมในการจำลองกระบวนการทำงานทั้งหมดในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Network Simulator 2 (NS2) [30] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่จำลองแบบตามลำดับเหตุการณ์ โดยสมรรถนะของโพรโทคอลจะเปลี่ยนไปเมื่อจำลองภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันและเพื่อทำให้เข้าใจโพรโทคอลที่นำเสนอในแง่มุมต่าง ๆ ได้มากขึ้นในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอภายใต้สถานการณ์ที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ใช้ในการจำลองมีดังนี้

4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองนั้นสามารถกำหนดได้หลากหลายพารามิเตอร์ แต่ปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบ (Offered load) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายโดยรวม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดที่ป้อนให้ระบบสามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก ขนาดของแพ็กเกต (Packet size)

จำนวนการเชื่อมต่อ (Number of connection) และอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ (Packet rate) ในการทดสอบนี้ต้องการจะประเมินว่าเมื่อปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อโพรโทคอลที่นำเสนออย่างไร ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะแสดงถึงปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายดีที่สุด คือ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ โดยการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลก็จะทำให้ปริมาณโหลดในแต่ละการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง

พารามิเตอร์	**ค่าที่ใช้**
จำนวนโนด	50 โนด
ขนาดของพื้นที่ในการจำลอง	1000 X 1000 เมตร^2
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	900 วินาที
จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ	40 ครั้ง
ลักษณะของทราฟฟิก	
จำนวนการเชื่อมต่อ	20 การเชื่อมต่อ
ทราฟฟิกที่ใช้ในการสื่อสาร	Constant Bit Rate (CBR)
อัตราการส่งแพ็กเกต	**4, 10, 15, 20, 25 แพ็กเกต/วินาที**
ขนาดของแพ็กเกต	512 ไบต์
รูปแบบการเคลื่อนที่	
แบบจำลองการเคลื่อนที่	Random Waypoint [31]
ความเร็วสูงสุดของโนด	10.0 เมตร/วินาที
เวลาหยุด (Pause Time)	60 วินาที

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางนั้นจะใช้ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยต่อไปจะกล่าวถึงแบบจำลองการใช้พลังงาน

- *แบบจำลองการใช้พลังงาน*

- กำหนดให้ทุกโนดมีกำลังในการส่งสัญญาณคงที่และเท่ากันทุกโนด (Constant-Power) ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง (P_t), การรับ (P_r) และการได้ยิน $(P_{overhear}, P_o)$ มีค่าเท่ากับ 0.6635, 0.395 , 0.200 วัตต์ และพลังงานที่ใช้เมื่อโนดอยู่ในสถานะว่าง (P_{idle}) เท่ากับ 0.045 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังงานที่ใช้ในโมดสถานะหลับมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการพิจารณาพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้

- พลังงานเริ่มต้นของโนดมีค่าเท่ากับ 10 จูล

- อัตราเร็วในการส่งแพ็กเกตข้อมูลเท่ากับ 11 Mbps ด้วยระยะทาง 180 เมตร

- อัตราเร็วในการส่งแพ็กเกตควบคุมในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (RTS/CTS/ACK) เท่ากับ 2 Mbps

4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่ใช้ในวิทยานิพน์ฉบับนี้ จะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ชี้วัดคุณภาพการให้บริการของโพรโทคอลทั่วไป ๆ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในงานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จ (Energy per Good-put) เป็นจำนวนพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายสูญเสียต่อจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่โนดปลายทางได้รับอย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนให้เห็นว่าโครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ถ้าค่าที่ได้มีค่าที่ต่ำนั้นแสดงว่าโครง่ขายมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูง หน่วยที่ใช้คือ จูล/แพ็กเกต

- อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network lifetime) สามารถวัดได้จากเวลาเริ่มต้นในการจำลองจนกระทั่งมีโนดแรกในโครงข่ายไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่เหลืออยู่หรือโนดนั้นไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป

- อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด (Average all nodes lifetime) เป็นค่าที่แสดงถึงอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยของทุก ๆ โนดในโครงข่ายจนหมดระยะเวลาการทดสอบ

- อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จ (Packet delivery ratio) สามารถคำนวณได้จาก จำนวนแพ็กเกตที่โนดปลายทางได้รับสำเร็จต่อจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ส่งออกจากโนดต้นทาง

- ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย (Average end-to-end delay) เป็นค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตหนึ่งแพ็กเกตจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทาง ซึ่งมีหน่วยเป็น วินาที

- จำนวนแพ็กเกตที่ถูกละทิ้ง (Dropped Packets) ทั้งหมดในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งคือแพ็กเกต RTS/CTS/DATA และ ACK ที่ถูกละทิ้งจากสาเหตุต่างๆ เช่น เกิดการชนของแพ็กเกต แพ็กเกตหาเส้นทางไม่เจอ เป็นต้น

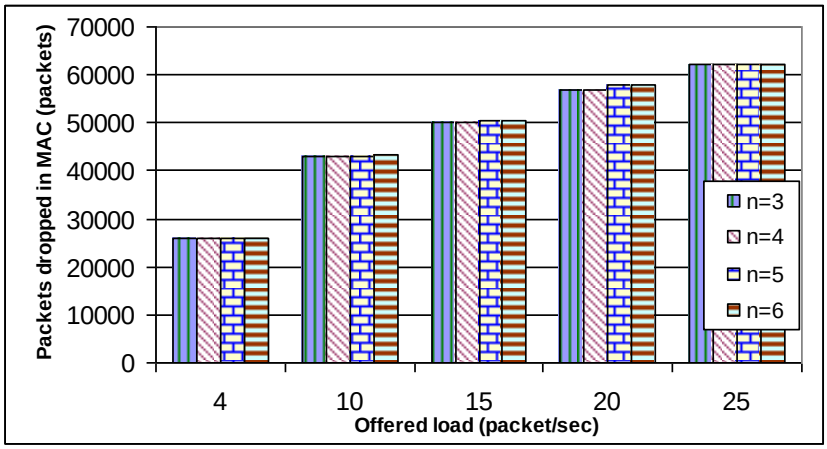
4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ

ในส่วนนี้จะแสดงผลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบของโพรโทคอลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโพรโทคอลมาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแต่ละประเภทจะทำการทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง

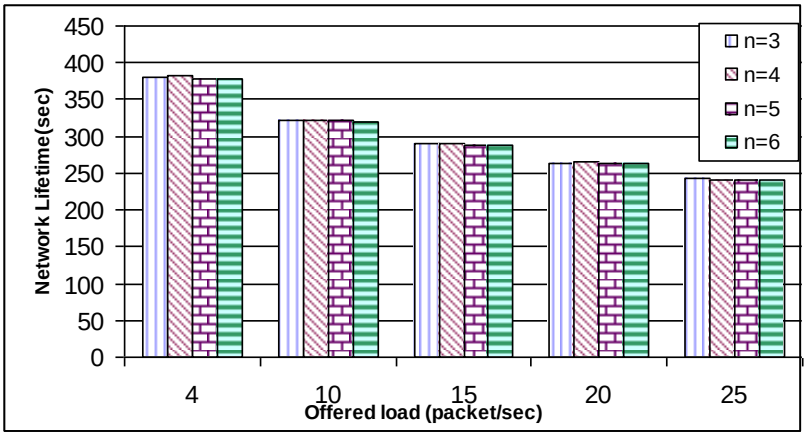
4.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน (Power-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่นำเสนอเป็นการนำพลังงานที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมาพิจารณาในการเลือกเส้นทาง โดยให้ “Energy of MAC (EMAC)” แทนชื่อย่อของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยแบบจำลองการใช้พลังงานดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องหาค่าจำนวนโนดแทรกสอด(Interfering node) ที่พลังในการส่งสามารถส่งผลกระทบต่อโนดที่กำลังส่งหรือรับแพ็กเกตอยู่ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการชนของแพ็กเกตได้ การจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมดังกล่าวจะทดสอบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่จะนำเสนอ โดยจำนวนโนดที่กำหนดแล้วสามารถลดการชนกันของแพ็กเกตมากที่สุดและอายุการใช้งานของโนดยาวนานที่สุด จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพต่อไป จากการจำลองเบื้องต้นเพื่อดูค่าจำนวนโนดแทรกสอดที่อยู่ในระยะแทรกสอด (Interference range) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ระยะดังกล่าวเท่ากับ 300 เมตร ดังนั้นระยะแทรกสอดจะอยู่ในช่วงมากกว่าระยะของการส่งแพ็กเกตควบคุมแต่ไม่เกินระยะ 300 เมตร จากการจำลองเบื้องต้นเพื่อดู

จำนวนโนดแทรกสอด พบว่าจำนวนโนดแทรกสอดที่เป็นไปได้จะไม่เกิน 6 โนด ดังนั้นเพื่อหาค่าจำนวนโนดแทรกสอดที่เมื่อส่งพร้อมกันแล้วสามารถมารบกวนกับโนดที่กำลังส่งและรับแพ็กเกต จะทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยปรับเปลี่ยนค่าโนดแทรกสอดจาก 3 โนด ถึง 6 โนด สาเหตุที่ไม่พิจารณาโนดแทรกสอด 1 โนดและ2 โนด เนื่องจากพลังงานจากโนดทั้งสองรวมกันยังไม่พอที่จะมารบกวนโนดที่ส่งหรือรับได้ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งจะแสดงถึงจำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนและอายุการใช้งานของโนด



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่อจำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



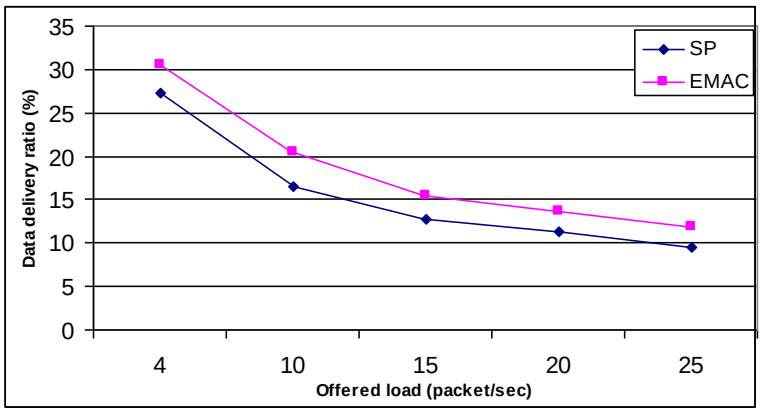
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของจำนวนโนดแทรกสอดต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

จากรูปที่ 4.1 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดเพิ่มมากขึ้น จำนวนโนดแทรกสอดที่กำหนดแล้วทำให้จำนวนแพ็กเกตที่เกิดการชนน้อยที่สุดมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ที่โนดแทรกสอดมีค่าเท่ากับ 3 และ 4 โนด จะช่วยลดจำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนดีกว่ากรณีกำหนดให้โนดแทรกสอดเท่ากับ 5 และ 6 โนด เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะมีความคับคั่งหรือจำนวนโนดแทรกสอดน้อย ซึ่งส่งผลให้เกิดการชนกันของโนดน้อยตามไปด้วย ส่วนในรูปที่ 4.2 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดเพิ่มมากขึ้น จำนวนโนดที่กำหนดแล้วทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายนานที่สุดคือ3 และ 4 โนด เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะมีการสูญเสียพลังงานจากการส่งแพ็กเกตซ้ำน้อยกว่ากรณีที่กำหนดให้โนดแทรกสอดเท่ากับ 5 และ 6 โนด แต่ถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวเท่ากับ 3 โนด ค่าประวิงเวลาในการส่งแพ็กเกตก็จะนานขึ้นเนื่องจากการหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งของโนดแทรกสอดมากเกินไป ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพโพรโทคอลการจัดสรรเส้นที่นำเสนอจะกำหนดให้จำนวนโนดแทรกสอดที่มีผลกระทบทำให้เกิดการชนของแพ็กเกตเท่ากับ 4 โนด

เมื่อได้ค่าของจำนวนโนดแทรกสอดที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอโดยจะใช้สัญลักษณ์ *EMAC* แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งโพรโทคอลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV ซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเงื่อนไขการตัดสินใจเส้นทาง (SP) และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR [8] แต่เนื่องจากในการจำลองได้กำหนดให้โนดมีกำลังส่งคงที่ ผลที่ได้จากโพรโทคอลแบบ MTPR จะเหมือนกับกรณีของโพรโทคอลแบบ AODV

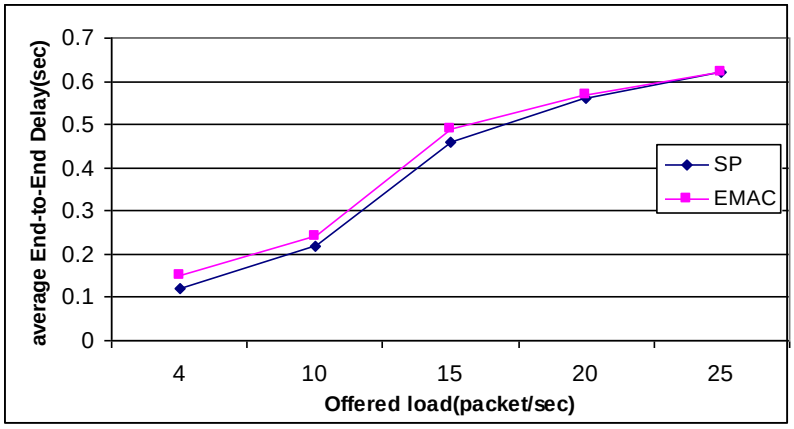
4.2.1.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง

ผลการทดสอบสำหรับโพรโทคอลในประเภทที่คำนึงถึงพลังงาน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.3 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

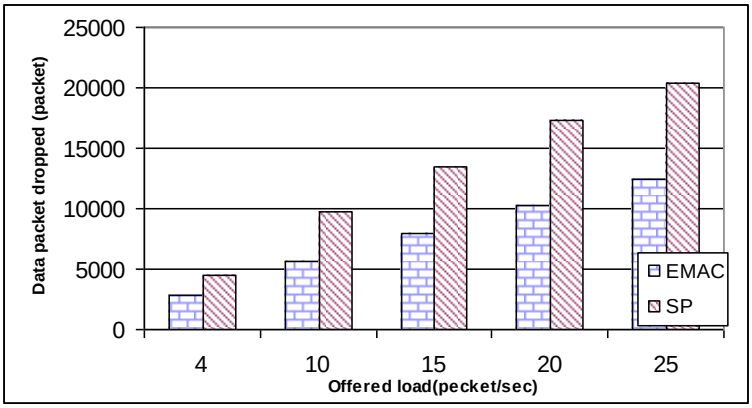
เส้นทางที่ได้ถือได้ว่าเป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือ โดยโพรโทคอลที่นำเสนอนอกจากจะเลือกเส้นทางที่มีความคับคั่งของโนดต่ำแล้วยังคำนึงถึงผลกระทบของกำลังงานที่โนดแทรกสอดใช้ในการรส่งแพ็กเกต ซึ่งถ้ามีจำนวนโนดแทรกสอดมากที่มีการส่งแพ็กเกตพร้อมๆกัน ก็จะมีผลทำให้เกิดการชนของแพ็กเกตได้ ถ้าโนดเกิดการชนของแพ็กเกตบ่อยๆ จะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานและจะส่งผลกระทบต่อทั้งโครงข่ายได้



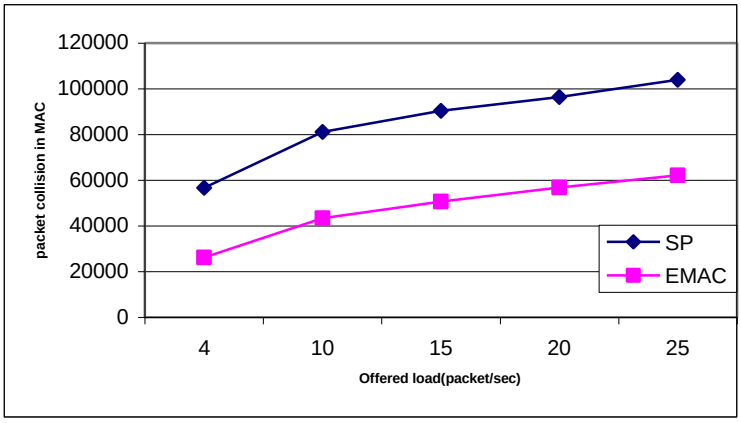
รูปที่ 4.4 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายทางเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

รูปที่ 4.4 แสดงการประวิงเวลาเวลาเฉลี่ยจากปลายทางถึงปลายทางเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล จากรูปโพรโทคอลแบบ SP จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดอีกทั้งไม่สนใจถึงจำนวนโนดข้างเคียง

ดังนั้นเส้นทางที่ได้จะให้ค่าประวิงเวลาที่ต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอนั้นเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่หลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งของโนดสูง ๆ ดังนั้นเส้นทางที่ได้ก็จะอ้อมขึ้นกว่าแบบ SP ซึ่งส่งผลต่อค่าประวิงเวลาของการส่งแพ็กเกต แต่ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่ามากขึ้นประมาณ 25 แพ็กเกตต่อวินาที โพรโทคอลแบบ SP จะให้การประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางของแพ็กเกตที่มีแนวโน้มสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ เพราะฉะนั้นการประวิงเวลาของแพ็กเกตนอกจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนฮอป (Hop count) แล้วยังขึ้นอยู่กับความคับคั่งที่เกิดขึ้นกับเส้นทางนั้นด้วย ซึ่งโพรโทคอลการที่นำเสนอ จะให้ค่าการประวิงเวลาที่ต่ำกว่าเมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลสูง ๆ เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอจะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งสูงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในกรณีที่ปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าต่ำ ๆ (อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลมีค่าต่ำ) การประวิงเวลาของแพ็กเกตจะเกิดจากความยาวของเส้นทางที่แพ็กเกตใช้เดินทางจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางเป็นหลัก

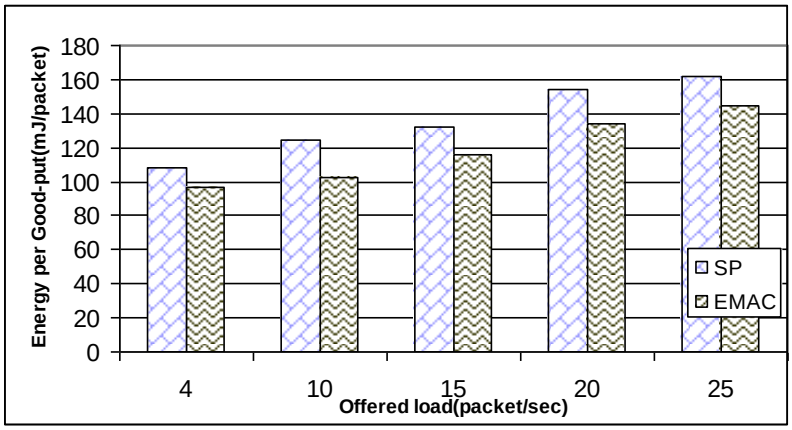


รูปที่ 4.5 จำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.6 จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

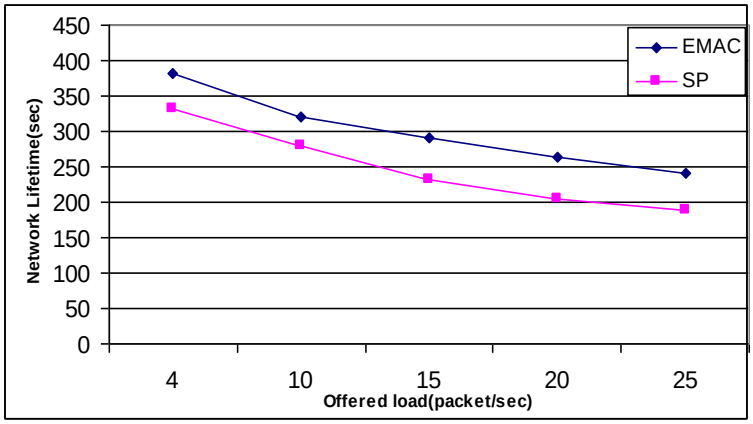
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงถึงจำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง และรวมทุกแพ็กเกตในเกิดการชนซึ่งในที่นี้จะรวมถึงแพ็กเกตข้อมูลกับแพ็กเกตควบคุม RTS/CTS และ ACK จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดการชนของแพ็กเกตข้อมูลและแพ็กเกตควบคุมได้มากขึ้นถึงสองเท่าของโพรโทคอลแบบ SP เนื่องจากแบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอนั้น คำนึงถึงผลกระทบของพลังงานที่โนดใช้ด้วย อีกทั้งพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความหนาแน่นของโนดสูงๆ ทำให้สามารถลดการชนกันของแพ็กเกต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



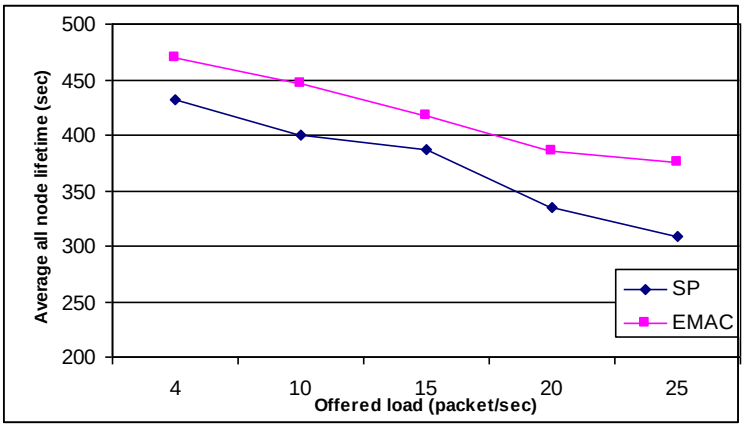
รูปที่ 4.7 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกต

รูปที่ 4.7 เป็นผลจากการทดสอบประสิทธิภาพด้านพลังงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ จากรูปที่ 4.7 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมีค่าลดลงคือ พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความคับคั่งของโครงข่ายซึ่งส่งผลให้การชนกันของข้อมูลมากขึ้น อีกทั้งข้อจำกัดของปริมาณแพ็กเกตที่แต่ละโนดสามารถรองรับได้เมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเพิ่มมากขึ้น แต่โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดการละทิ้งของแพ็กเกตข้อมูลได้ ดังนั้นประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานจึงดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP ที่ไม่คำนึงถึงความคับคั่งของโนดซึ่งทำให้แพ็กเกตเกิดการชนกันมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ



รูปที่ 4.8 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.9 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อจำนวนอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลจะทำให้ปริมาณโหลดที่มีในโครงข่ายเพิ่มขึ้น ทำให้โครงข่ายมีการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น โดยจากรูปที่ 4.8 โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP เฉลี่ยประมาณร้อยละ 16.25 ณ ทุกๆอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

โพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หรือพยายามลดพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากโนดข้างเคียงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารและพยายามลดจำนวนแพ็กเกตที่เกิดการชนเนื่องจากปัญหาของโนดซ่อนเร้นและโนดแทรกสอด จึงทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึงแม้ว่าปริมาณโหลดในโครงข่ายจะมีปริมาณที่สูงโพรโทคอลที่นำเสนอจะให้ค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดสูงกว่าโพรโทคอลแบบ SP ซึ่งแน่นอนว่าการเพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดจะเป็นการเพิ่มเวลาเพื่อให้โนดในโครงข่ายสามารถทำงานร่วมกันได้มากขึ้น ทำให้โครงข่ายสามารถส่งแพ็กเกตได้มากขึ้นและอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงใช้พลังงานที่นำเสนอ สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็ยังส่งผลทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ไม่พิจารณาถึงพลังงานอย่างเช่น โพรโทคอลแบบ SP นอกเหนือจากประสิทธิภาพด้านพลังงานแล้ว โพรโทคอลที่นำเสนอยังให้คุณภาพการให้บริการคือ อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จในระดับที่ดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP ซึ่งจำนวนแพ็กเกตที่เกิดการชนกันลดลงอย่างมาก จึงทำให้ลดการสูญเสียพลังงานจากการส่งแพ็กเกตซ้ำได้ในระดับหนึ่ง อีกทั้งค่าการประวิงเวลาก็มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

ต่อไปจะเป็นผลการทดสอบโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอทั้งสองแบบ โดยในแบบที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโนดมาใช้เป็นค่าประวิงเวลาก่อนที่จะส่งแพ็กเกต ส่วนในแบบที่สองจะเป็นการนำค่าทั้งพลังงานที่คาดว่าจะใช้ในแบบจำลองการใช้พลังงานที่ได้คิดค้นและค่าพลังงานที่เหลือของโนดมาพิจารณาพร้อมกัน

4.2.2 **โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม** (Hybrid Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอนอกจากจะคำนึงถึงการใช้พลังงานของเส้นทางแล้วยังคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโนดด้วย เพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานขึ้น ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอไว้สองแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโนดมาคำนวณเพื่อหาค่าประวิงเวลาก่อนที่จะทำการส่งแพ็กเกตต่อไป ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์ “BDEMAC (Battery Delay and Energy of MAC)”แทนโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง ส่วนแบบที่สองนั้นจะเป็นการนำค่าพลังงานที่เหลือของโนดและพลังงานที่เส้นทางใช้มาคิดคำนวณด้วยกัน ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยให้สัญลักษณ์ “BEMAC (Battery and Energy of MAC)” แทนโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมวิธีที่สอง ในส่วนของโพรโทคอลจะนำมาเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอนั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBCR)กรณีที่ค่า γ เท่ากับร้อยละ 50 [15] และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Shortest Path (SP) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโพรโทคอลที่นำเสนอ

เนื่องจากประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบ CMMBCR ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (γ) และในบทความ [15] ไม่ได้มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้งาน แต่โดยหลักการของโพรโทคอลที่ต้องการจะทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานต่ำที่สุดและโนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคพร้อมกันเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยจะเลือกใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดแบบ MTPR เมื่อเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางประกอบไปด้วยโนดที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงกว่าร้อยละ 50 ของระดับความจุสูงสุด แต่ถ้าไม่มีเส้นทางใดจากเส้นทางทั้งหมดมีระดับความจุแบตเตอรี่สูงกว่าค่าที่กำหนด โพรโทคอลแบบ CMMBCR จะเลือกใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR [12] ที่คำนึงถึงระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือต่ำสุดเป็นหลัก เพราะฉะนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (γ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 50 ของความจุแบตเตอรี่สูงสุด เพื่อกำหนดให้โพรโทคอลแบบ CMMBCR ได้ใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และ MMBCR อย่างเท่าเทียมกัน โดยจะไม่ใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใดแบบหนึ่งมากเกินไป

4.2.2.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมแบบที่หนึ่ง หรือ “BDEMAC“ที่นำเอาระดับพลังงานที่เหลือของโนดมาคำนวณเพื่อหาค่าประวิงเวลาก่อนที่จะมีการส่งแพ็กเกต เป็นการรวมเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่ทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งทำให้โนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่อย่างเสมอภาคเข้าด้วยกันเพื่อทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่ามากยิ่งขึ้น โดยก่อนที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบที่หนึ่งนั้น จำเป็นต้องทำการหาช่วงค่าของการประวิงเวลาและเวลาที่ใช้ในการรอคอยแพ็กเกตที่เหมาะสมก่อน เนื่องจากค่าทั้งสองเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยต่อไปจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลเมื่อปรับเปลี่ยนช่วงของการประวิงเวลา

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

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

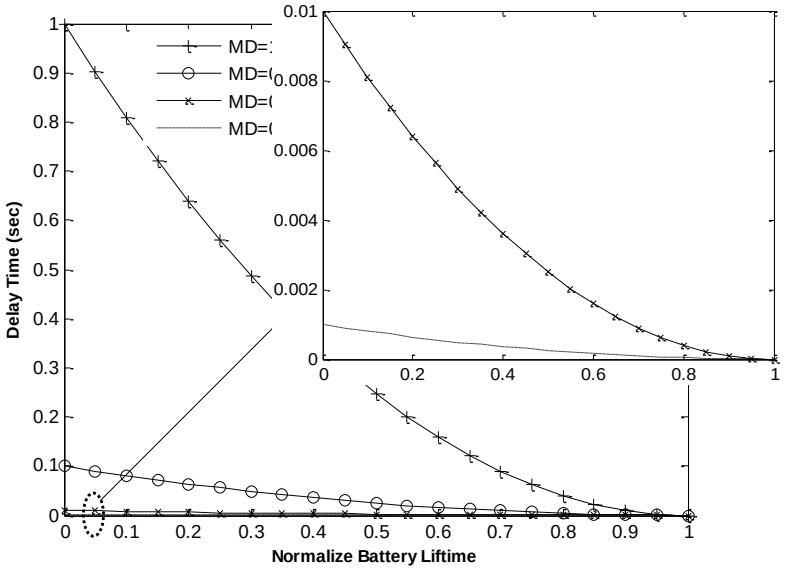
ค่าการประวิงเวลาสูงสุดและเวลาการรอคอยเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอควรจะกำหนดค่าการใช้งานให้เหมาะสม เพื่อจะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากที่สุด

- **การพิจารณาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุด** (Maximum Delay)

จุดประสงค์ของการใช้ค่าการประวิงเวลาที่ใช้ในโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยการประวิงเวลาที่เพิ่มเข้าไปในแต่ละโนดนั้น จะเป็นเวลาที่ใช้ในการควบคุมให้กระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นตามที่ต้องการ ดังนั้นโพรโทคอลจะมีความสามารถในการควบคุมการประวิงเวลาของแพ็กเกตร้องขอได้นั้น ค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่จะใช้นั้นจะต้องไม่ถูกรบกวนด้วยค่าการประวิงเวลาที่เกิดจากการทำงานในส่วนอื่น ๆ ของโครงข่าย ซึ่งค่าประวิงเวลาในส่วนอื่นจะเกิดจาก ค่าประวิงเวลาการแพร่กระจาย (Propagation Delay) ค่าประวิงเวลาการส่ง (Transmission Delay) และค่าประวิงเวลาที่เกิดจากการประมวลผลของโนด (Processing

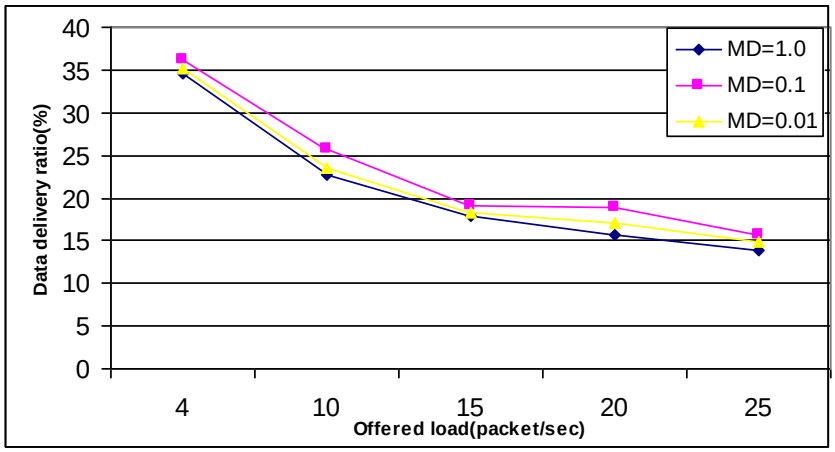
Delay) ดังนั้นค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่น่าจะให้ผลที่ดีควรจะมีค่าที่สูงกว่าค่าประวิงเวลาทั้งสามสาเหตุรวมกัน ซึ่งในงานวิจัยฉบับได้วัดค่าประวิงเวลาที่เกิดจากการส่งและการประมวลผล เมื่อส่งแพ็กเกตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) โดยใช้โปรแกรม NS2 และพบว่าค่าที่ได้อยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที ส่วนค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายมีค่าต่ำมากจนสามารถละเลยไปได้ แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดให้มีค่าสูง ๆ ก็ส่งผลที่ไม่ดีต่อโครงข่ายด้วยเช่นกัน เพราะจะเป็นการไปเพิ่มระยะเวลาการประวิงเวลาของแพ็กเกตข้อมูลให้แก่โครงข่าย อีกทั้งอาจจะทำให้เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่หมดอายุแล้ว

จากรูปที่ 4.10 แสดงฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม เมื่อให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุด (Maximum Delay แทนด้วยสัญลักษณ์ MD) 4 ค่า คือ 1.0 ,0.1, 0.01 และ 0.001 วินาที ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดสอบค่า 3 ค่า คือ MD = 1.0 วินาที MD = 0.1 วินาที MD = 0.01 วินาที โดยที่ MD = 0.001 นั้นเป็นเวลาที่สั้นเกินไป จึงไม่ได้นำมาทดสอบ โดยการทดสอบจะทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางจาก 4 ไปจนถึง 25 แพ็กเกตต่อวินาที ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบก็ยังคงใช้เหมือนกับการทดสอบข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาช่วงของค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่เหมาะสม

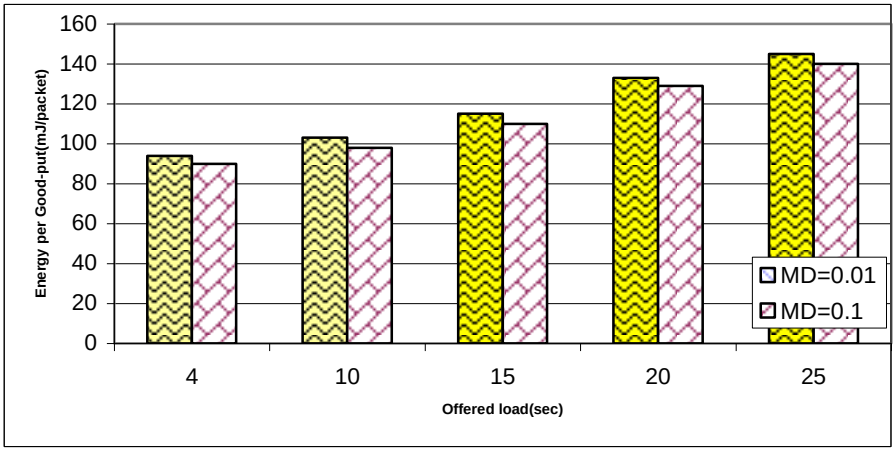
รูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงผลกระทบต่อสมรรถนะของโครงข่ายเมื่อปรับเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาสูงสุด ภายใต้การทดสอบที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง โดยในรูปที่ 4.11 แสดง อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จ ส่วนในรูปที่ 4.12 แสดงพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลและรูปที่ 4.13 เป็นค่าอายุการใช้งานของโครงข่าย



รูปที่ 4.11 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

จากรูปที่ 4.11จะพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าการประวิงเวลาสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.1 วินาทีจะทำให้โครงข่ายมีอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 1.0 และ MD = 0.01 วินาที ซึ่งการกำหนดค่า MD สูงเกินไป (MD = 1.0) จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายลดลง

รูปที่ 4.12 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพด้านพลังงานของโครงข่าย จากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นก็จะทำให้โพรโทคอลที่กำหนดค่าการประวิงเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.1 วินาทีจะให้ค่าทั้งสองค่าดีที่สุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางนั้น โดยจากรูปที่ 4.12 ค่าที่ได้ในกรณีที่กำหนดค่า MD = 0.1 จะเพิ่มอายุการใช้งานได้สูงที่สุดที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่กำหนดค่า MD = 0.01 ที่ให้ค่ารองลงมา นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาว่าโพรโทคอลใดมีการใช้พลังงานคุ้มค่ามากกว่ากันระหว่างค่า 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 ซึ่งจากสมุติฐานที่ได้กล่าวไว้ก่อนการทดสอบว่าช่วงของการประวิงเวลาสูงสุดที่จะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพนั้นน่าจะอยู่ในระดับ 100 มิลลิวินาที เพราะว่าเป็นช่วงที่ทำให้โพรโทคอลสามารถควบคุมการประวิงเวลาแพ็กเกตร้องขอเส้นทางในกระบวนการค้นหาเส้นทางได้โดยที่ไม่มีการประวิงเวลาในส่วนอื่นเข้า

มามีผลกระทบ 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)

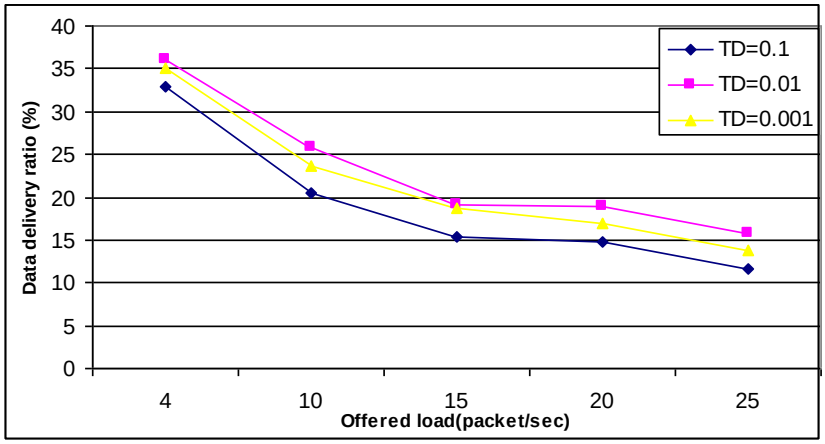
ค่าเวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย นอกเหนือจากค่าการประวิงเวลาสูงสุดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยค่าเวลาการรอคอยได้ถูกนำไปใช้กับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งแบบที่คำนึงถึงเฉพาะพลังงานและแบบผสมทั้งสองแบบ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเกตร้องขอเส้นทางที่มาจากเส้นทางอื่น ๆ ภายหลังจากที่แพ็กเกตร้องขอเส้นทางแพ็กเกตแรกมาถึงยังโนดปลายทาง เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าเวลาที่โนดปลายทางจะต้องรอคอยนั้นก็จะมีส่วนสำคัญ เนื่องจากเมื่อกำหนดระยะเวลาการรอคอยสูง ๆ จะทำให้โนดปลายทางได้ทราบข้อมูลของแต่ละเส้นทางเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจมากขึ้น ซึ่งทำให้เส้นทางที่เลือกก็จะยิ่งมีประสิทธิภาพมาก แต่เนื่องด้วยคุณลักษณะของโครงข่ายที่โนดมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เส้นทางที่โนดปลายทางเลือกใช้นั้นอาจจะเปลี่ยนสถานะไปจากเดิมหรือหมดอายุไปแล้ว ทำให้เส้นทางนั้นไม่สามารถใช้งานได้ (มีบางโนดเคลื่อนที่ออกนอกระยะการส่งของโนดที่อยู่ในเส้นทาง)

เมื่อกำหนดระยะเวลาการรอคอยต่ำๆ ข้อมูลที่โนดปลายทางได้รับ (แพ็กเกตร้องขอเส้นทาง) อาจมีจำนวนที่น้อย ซึ่งถ้ากำหนดค่าระยะเวลาการรอคอยไว้ต่ำ ๆ ในโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ ก็อาจจะทำให้ผลที่ได้จะใกล้เคียงกับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือเท่านั้น เพราะเส้นทางที่มาถึงปลายทางก่อนเวลารอคอยจะหมดนั้นมีโอกาสน้อยมาก เพราะเวลารอคอยต่ำเกินไป

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดสอบค่าระยะเวลาการประวิงเวลาด้วยกัน 3 ค่าเพื่อทำการเปรียบเทียบดูประสิทธิภาพกับค่าอื่น ๆ โดยค่าที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ TD = 0.1, TD = 0.01 และ TD = 0.001 วินาที โดยจะทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางจาก 4 ไปจนถึง 25 แพ็กเกตต่อวินาที ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบก็ยังคงใช้เหมือนกับการทดสอบข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าการประวิงเวลาต่อสมรรถนะของโครงข่าย ภายใต้การทดสอบที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทาง โดย

ในรูปที่ 4.14 แสดงอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จ ส่วนในรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จ และอายุการใช้งานของโครงข่ายตามลำดับ

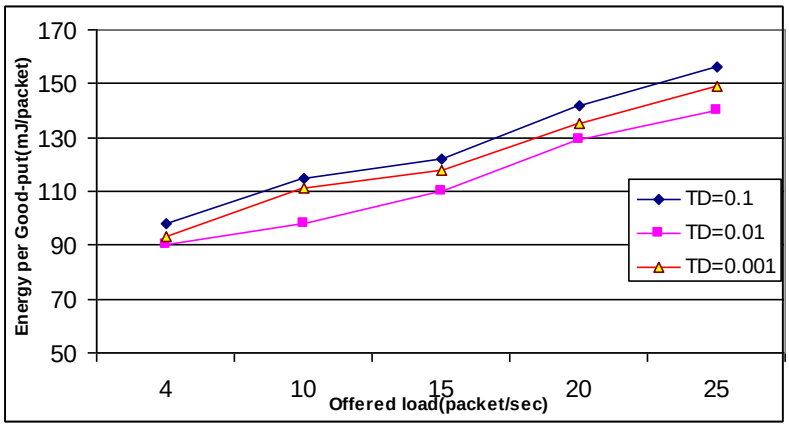


รูปที่ 4.14 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

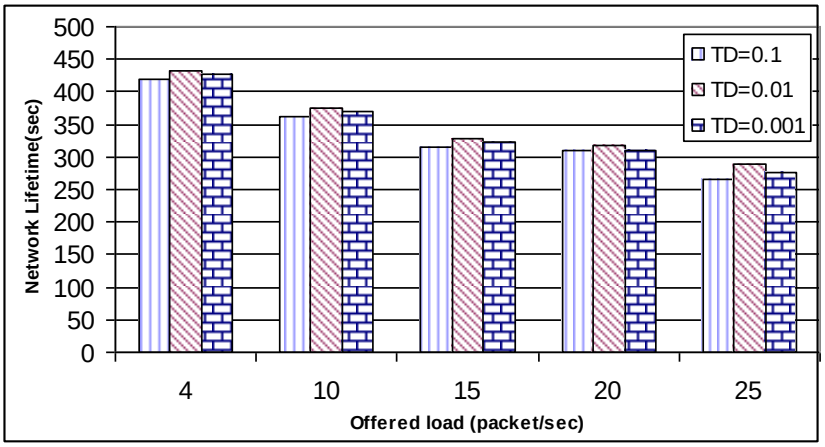
รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จของค่าการประวิงเวลาที่ใช้ในการทดสอบ จากรูปจะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า TD = 0.1 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ถือได้ว่าค่อนข้างสูงจะทำให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่า TD = 0.01 วินาที แต่เมื่อทำการลดค่าเวลาการประวิงจาก 0.1 ไปเป็น 0.01 และ 0.001 วินาทีจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของโครงข่ายจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเวลาการประวิงเวลาเท่ากับ 0.01 วินาที และจะลดต่ำลงอีกครั้งเมื่อเวลาการประวิงเท่ากับ 0.001 วินาที จากจุดนี้ก็แสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการประวิงที่เหมาะสมควรจะอยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที แต่ในความเป็นจริงค่าเวลาการประวิงที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของโครงข่ายหลาย ๆ ตัว อีกทั้งสภาพและสถานะการทำงานของโครงข่าย ณ ขณะเวลานั้นก็มีส่วนสำคัญต่อการกำหนดค่าเวลาการประวิง เพราะฉะนั้นไม่สามารถที่จะคาดเดาหรือคำนวณได้ล่วงหน้าว่า ณ สถานการณ์ของโครงข่ายแบบนี้ค่าใดจะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุด

ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จกรณีที่กำหนดค่า TD = 0.1, TD = 0.01 และ TD = 0.001 วินาที จากรูปทั้งสองแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการประวิงที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพ

ที่สุดจากค่าที่นำมาใช้ในการทดสอบทั้งหมดควรอยู่ในระดับ 10 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.15 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

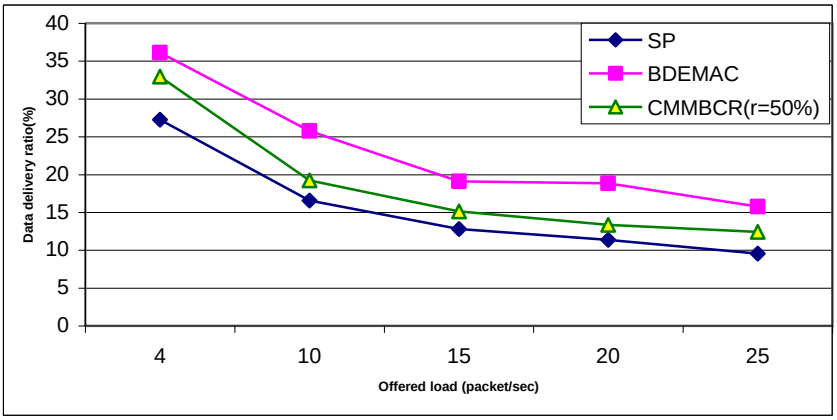


รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

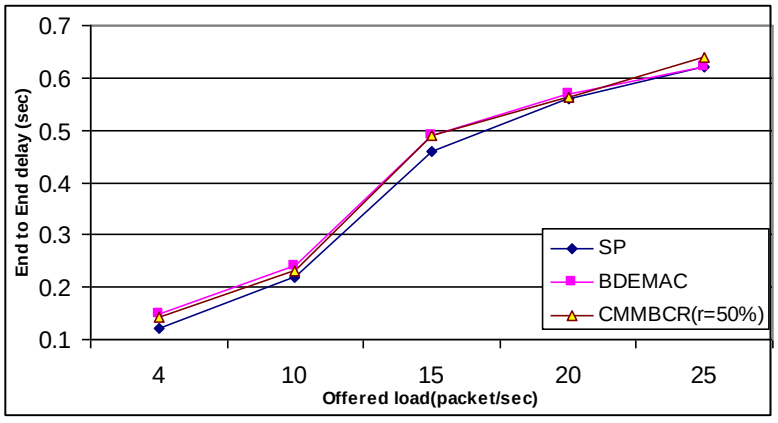
จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาการประวิง ก็มีผลต่อประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย ซึ่งค่าการประวิงเวลาที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งยากที่จะกำหนดได้ว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุดและสามารถนำไปใช้ได้กับทุก ๆ สถานการณ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถพิจารณาได้ว่าค่าที่นำไปใช้งานควรอยู่ในช่วงใด เพราะถ้ากำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 สามารถยืนยันได้ว่าค่าการประวิงเวลาในระดับ 10 มิลิ

วินาที) ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่าการกำหนดค่าการประวิงเวลาเท่ากับ 0.1 และ 0.001 วินาที (ในงานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดให้ค่าการประวิงเวลามีค่าเท่ากับ 0.01 วินาที)

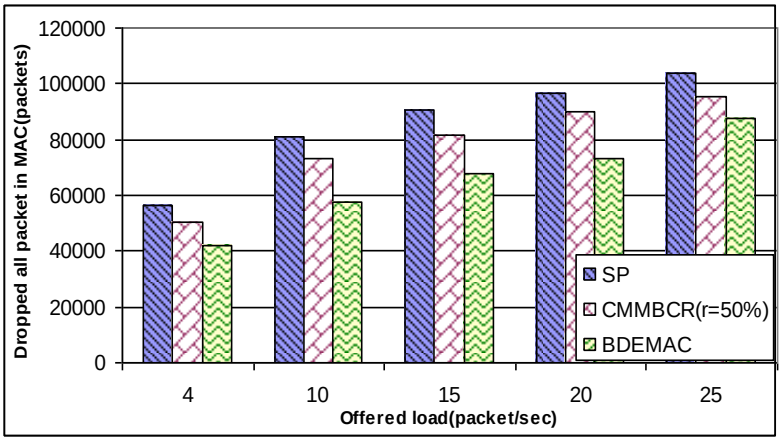
ซึ่งเมื่อได้ค่าประวิงเวลาและเวลาในการรอแพ็กเกตที่หมาะสมกับโพรโทคอลแล้ว ต่อไปจะเป็นผลการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่หนึ่งเมื่อเทียบกับโพรโทคอลอื่น ซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.17 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



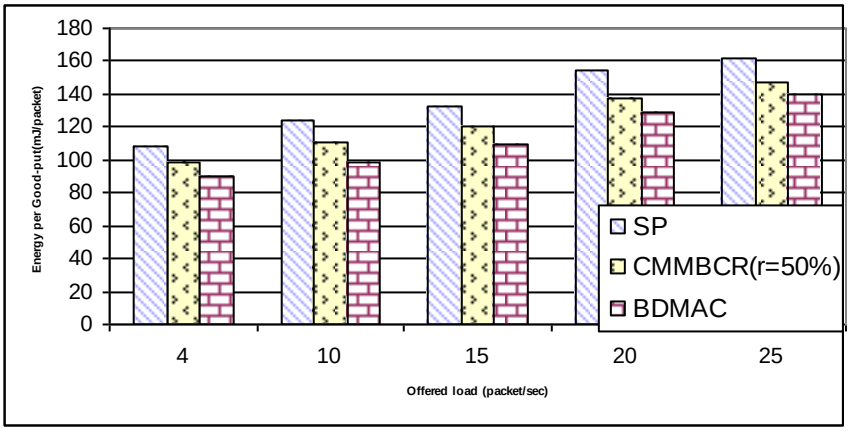
รูปที่ 4.18 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



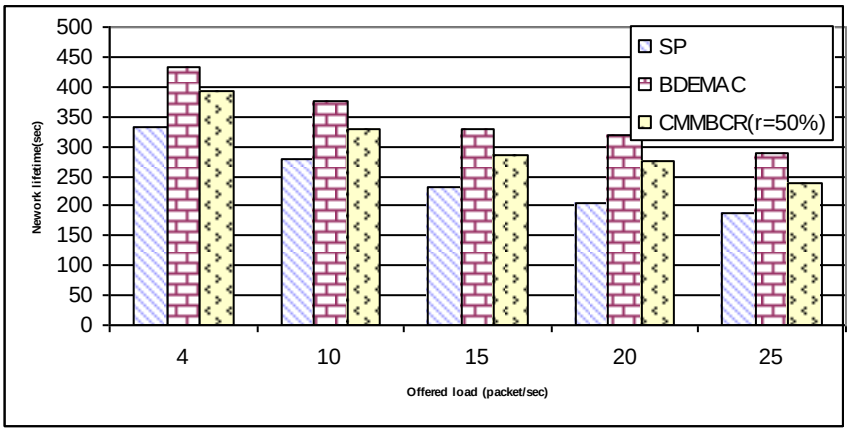
รูปที่ 4.19 จำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนในชั้น MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

รูปที่ 4.17 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโพรโทคอลทั้งสามแบบ จากรูปโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ(BDEMAC) จะให้ค่าการส่งแพ็กเกตสำเร็จสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนด พลังงานที่โนดในเส้นทางใช้ อีกทั้งความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโนดข้างเคียง โดยเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางมีอายุการใช้งานอยู่ในระดับที่สูงเพราะ ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงและความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณโหลดและจำนวนโนดข้างเคียงอยู่ในระดับที่ต่ำ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เส้นทางที่ได้สามารถส่งแพ็กเกตได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากรูปค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จที่ได้จะมากกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR และแบบ SP ร้อยละ 10.81 และร้อยละ 24.32 ตามลำดับ ณ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลเท่ากับ 4 แพ็กเกตต่อวินาที โดยสาเหตุที่โพรโทคอลแบบ CMMBCR มีค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จน้อยกว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอเพราะว่า ในช่วงแรกที่โนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงโพรโทคอลแบบ CMMBCR จะใช้โพรโทคอลแบบ MTPR (ผลที่ได้เหมือนกับโพรโทคอลแบบ SP เพราะกำหนดให้โนดมีกำลังส่งคงที่) และในช่วงที่โนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำ ๆ โพรโทคอลแบบ CMMMBCR จะเลือกใช้โพรโทคอลแบบ MMBCR ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ซึ่งเส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลแบบ MMBCR จะเป็นเส้นทางที่มีพลังงานที่เหลือของโนดสูงๆ โดยไม่พิจารณาพลังงานที่ใช้ ซึ่งทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าทั้งแบบ SP และ CMMBCR

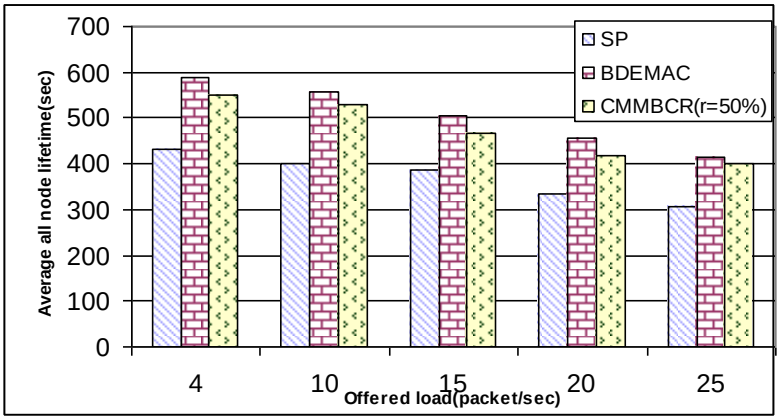
เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอได้กำหนดให้ทุกโนดยกเว้นโนดต้นทางและปลายทางจะต้องทำกระบวนการประวิงเวลาตามระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือในแต่ละโนด และโนดปลายทางจะต้องรอเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งภายหลังจากได้รับแพ็กเกตร้องขอเส้นทางแพ็กเกตแรก ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกเส้นทาง อีกทั้งเส้นทางที่ได้จะต้องเป็นเส้นทางที่โนดมีระดับของพลังงานที่เหลือสูงและมีความคับคั่งของโนดรอบข้างต่ำ ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอนี้มีการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นทางที่ได้จะอ้อมขึ้นเพื่อให้ได้ซึ่งเส้นทางที่เป็นไปตามความต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แต่จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าค่าการประวิงเวลาที่เพิ่มขึ้นมามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ในขณะที่โพรโทคอลแบบ SP ให้ค่าประวิงเวลาต่ำที่สุด สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีค่าประวิงเวลาไม่สูงมากนักเพราะว่า เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางมีความน่าเชื่อถือในแง่ของอายุการใช้งาน นอกจากนั้นโพรโทคอลที่นำเสนอยังเป็นเส้นทางที่คำนึงถึงผลกระทบของโนดซ่อนเร้นและโนดแทรกสอด ดังนั้นเส้นทางที่ได้จึงมีความคับคั่งของโนดต่ำ ซึ่งส่งผลให้จำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนในชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ที่ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากโนดรอบข้าง อีกทั้งอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นของโพรโทคอลที่นำเสนอ ทำให้โอกาสที่แพ็กเกตจะหาเส้นทางไม่เจอเนื่องจากระดับของแบตเตอรี่ของโนดไม่เพียงพอต่อการใช้งานต่ำลงไปด้วย จึงส่งผลให้จำนวนแพ็กเกตที่ชนกันของโพรโทคอลที่นำเสนอมีค่ามากกว่าโพรโทคอลอื่น โดยเฉพาะเมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตมีค่าสูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.20 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกต



รูปที่ 4.21 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.22 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

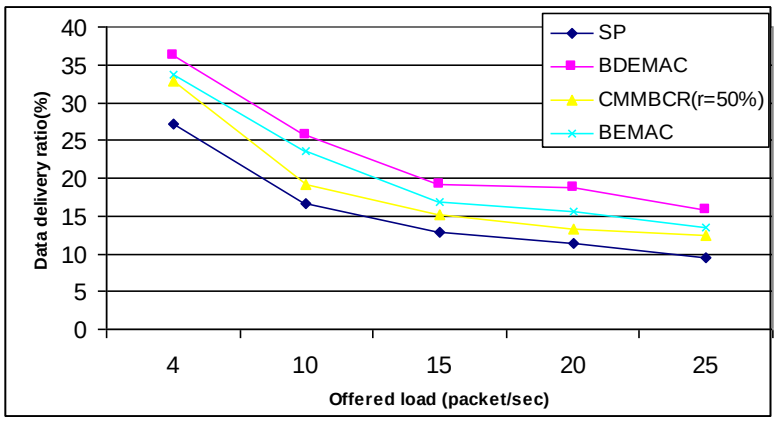
เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จ ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 ตามลำดับ พบว่าในทุกอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอจะให้ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR นั้นเนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ มีประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ในขณะที่ทั้งสองโพรโทคอลไม่มีการคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ซึ่งโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ซึ่งแสดง

ว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่โนดปลายได้สำเร็จของโครงข่าย

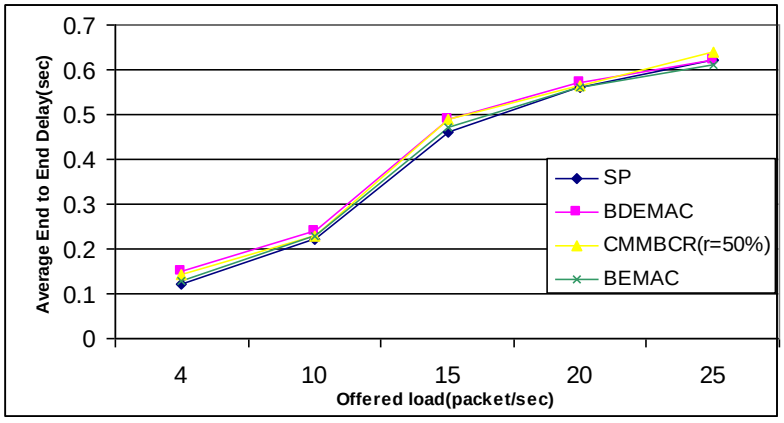
โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดีกว่า โพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อีกทั้งโนดในโครงข่ายของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยจากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าอัตราการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายเฉลี่ยสำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ที่มีอายุการใช้งานรองลงมา โดยขณะที่โพรโทคอลแบบ SP ให้ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีการคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่

4.2.2.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโนดต้นทางของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สอง

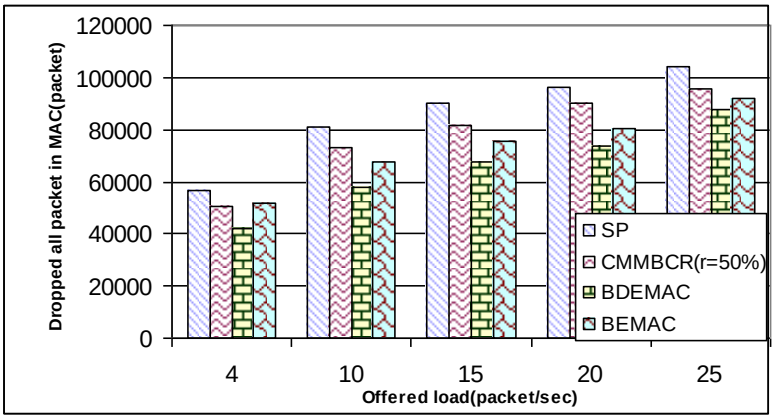
โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมแบบที่สอง ที่นำเอาระดับพลังงานที่เหลือของโนดต่ำสุดในแต่ละเส้นทางและค่าพลังงานที่คาดว่าจะใช้มาคำนวณพร้อมกันเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางของโนดปลายทาง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ “BEMAC (Battery and Energy of MAC)”แทนโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอวิธีที่สอง ซึ่งเป็นการทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพอีกทั้งทำให้โนดที่เหลือปริมาณพลังงานจากแบตเตอรี่ต่ำๆจะไม่ถูกใช้งานในกรณีที่มีเส้นทางอื่นเหลือพลังงานจากแบตเตอรี่มากกว่า เพื่อทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่ามากยิ่งขึ้น โดยรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่สองเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ BDEMAC CMMBCR และแบบ SP ในรูปที่ 4.23 แสดงอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล รูปที่ 4.24 แสดงค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย ในรูปที่ 4.25 แสดงจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC ส่วนในรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 แสดงพลังงานที่ใช้ต่อการส่งแพ็กเกตสำเร็จ อายุการใช้งานของโนด และอายุการใช้งานเฉลี่ย ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



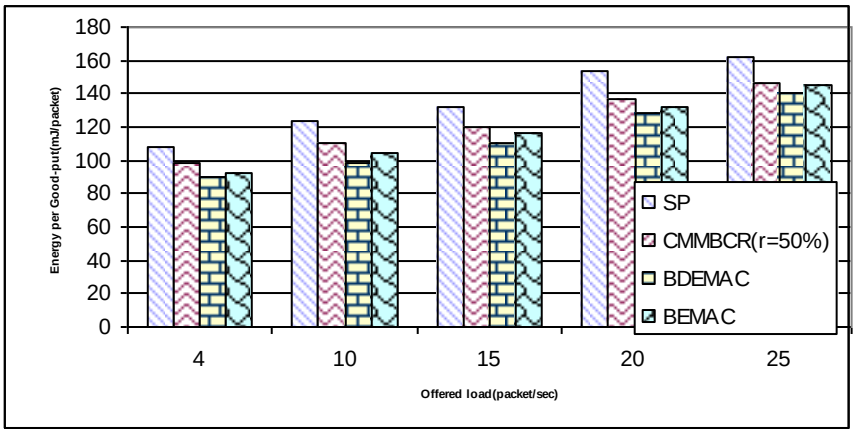
รูปที่ 4.24 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



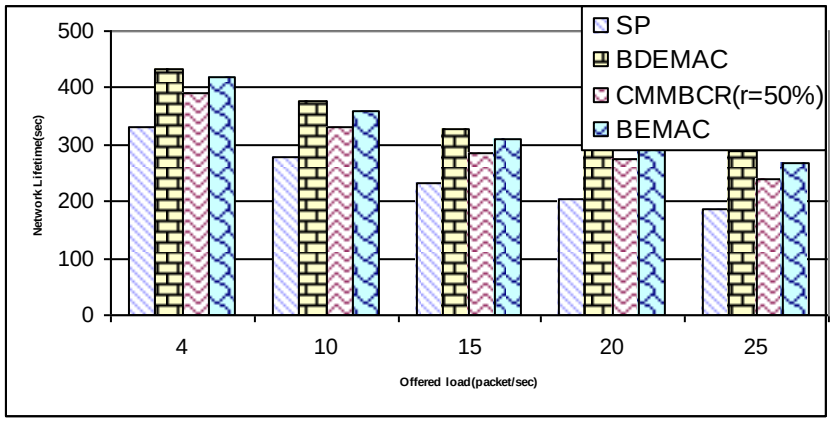
รูปที่ 4.25 จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกชนในชั้น MAC

รูปที่ 4.23 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโพรโทคอล จากรูปโพรโทคอลแบบ BEMAC จะให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จใกล้เคียงกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR ซึ่งมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP แต่ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอล BEMAC มีอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลที่ต่ำกว่าแบบ BDEMAC เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดต่ำสุดในแต่ละเส้นทางและพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเกตพร้อมกัน เส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่โนดในเส้นทางมีระดับแบตเตอรี่ที่เหลือสูงและเป็นเส้นทางที่มีการใช้พลังงานต่ำๆ แต่เนื่องจากในช่วงแรกๆ ความแตกต่างระหว่างระดับแบตเตอรี่ของโนดจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก เส้นทางที่ได้จึงเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำๆ แต่เมื่อความแตกต่างของแบตเตอรี่ในแต่ละโนดมีมากขึ้น ก็จะทำให้ระดับของแบตเตอรี่มีความสำคัญมากขึ้น เส้นทางที่ได้ในช่วงนี้จึงเป็นเส้นทางที่ทำให้ระดับแบตเตอรี่ที่เหลือมีความสำคัญมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากระดับแบตเตอรี่ที่คิดนั้นจะเป็นเฉพาะแบตเตอรี่ต่ำสุดเพียงโนดเดียวในแต่ละเส้นทางในขณะที่โพรโทคอลแบบ BDEMAC นำระดับแบตเตอรี่ที่เหลือมาคำนวณในทุกๆ โนดทำให้ประสิทธิภาพของโพรโทคอลแบบ BEMAC ต่ำกว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC

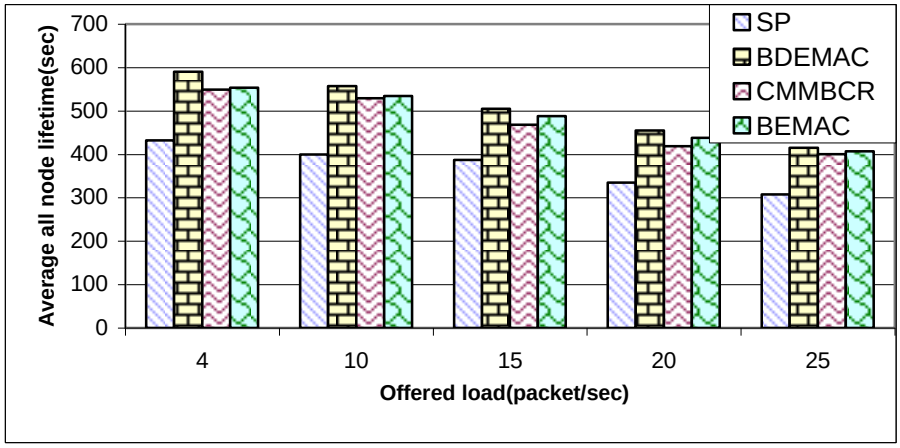
เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BEMAC ไม่มีการประวิงเวลาในการส่งแพ็กเกตดังนั้นค่าประวิงเวลาที่ได้ในรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลแบ BEMAC จะมีการประวิงเวลาที่ต่ำกว่าแบบ BDEMAC เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BDEMAC จะเสียเวลาในการส่งแพ็กเกตตามระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือ ซึ่งค่าประวิงเวลาที่โพรโทคอลแบบ CMMBCR และแบบ BEMAC จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเส้นทางที่ได้ในช่วงที่ระดับของแบตเตอรี่ที่เหลือแตกต่างกันมากๆ เส้นทางที่ได้จะเน้นเรื่องอายุการใช้งานเป็นหลัก ดังนั้นเส้นทางที่ได้อาจจะอ้อมและเสียเวลามากกว่าเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP ที่มีค่าประวิงเวลาที่ต่ำที่สุด นอกจากนั้นยังส่งผลให้จำนวนแพ็กเกตที่ถูกชนในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ BDEMAC แต่ให้จำนวนแพ็กเกตที่เกิดการชนน้อยกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR และแบบ SP เนื่องจากโพรโทคอลแบบ BEMAC คำนึงถึงปัญหาโนดซ่อนเร้นและโนดแทรกสอดที่จะส่งผลกระทบต่อการส่งแพ็กเกตด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 4.26 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.27 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.28 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จ ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายและอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูลของโพรโทคอล BEMAC กับโพรโทคอลแบบ CMMBCR BDEMAC และ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 ตามลำดับ พบว่าในทุกอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล โพรโทคอลแบบ BEMAC ที่นำเสนอจะให้ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP และโพรโทคอลแบบ CMMBCR แต่ให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานต่ำกว่าแบบ BDEMAC สาเหตุที่มีประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเกตที่ได้รับสำเร็จต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ซึ่งแสดงว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเกตข้อมูลที่โนดปลายได้สำเร็จของโครงข่าย แต่ที่ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบ BDEMAC นั้นเป็นเพราะว่าโพรโทคอลแบบ BDEMAC ได้ทำการคำนวณผลกระทบของระดับแบตเตอรี่ในทุกโนดและเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ในขณะที่โพรโทคอลแบบ BEMAC จะใช้ค่าอัตราส่วนของทั้งสองมาตัดสินพร้อมกันและค่าแบตเตอรี่ที่นำมาคำนวณก็เป็นค่าแบตเตอรี่ต่ำสุดเท่านั้นซึ่งแน่นอนว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานก็จะต่ำกว่าแบบ BDEMAC

โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดีกว่า โพรโทคอลแบบ SP และ CMMBCR ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เพราะว่าโพรโทคอล BEMAC ที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อีกทั้งโนดในโครงข่ายของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 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 แบตเตอรี่ทีเหลือในเส้นทางอาจเหลือน้อยแต่พลังงานที่ใช้ในเส้นทางก็น้อยด้วยเช่นกัน จึงทำให้อัตราส่วนของทั้งสองกรณีเท่ากัน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ ได้เลือกเส้นทาง

ที่มาถึงก่อนเป็นหลัก ดังนั้นเส้นทางที่ได้อาจจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานสูงกว่าเส้นทางอื่น หรืออาจจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำแต่แบตเตอรี่ที่เหลือในเส้นทางก็มีระดับที่ต่ำ ซึ่งถ้าเลือกเส้นทางดังกล่าว ก็จะทำให้อายุการใช้งานของโนดสั้นลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งโครงข่ายให้มีอายุการใช้งานเฉลี่ยที่ต่ำกว่าแบบ BDEMAC ดังรูปที่ 4.28

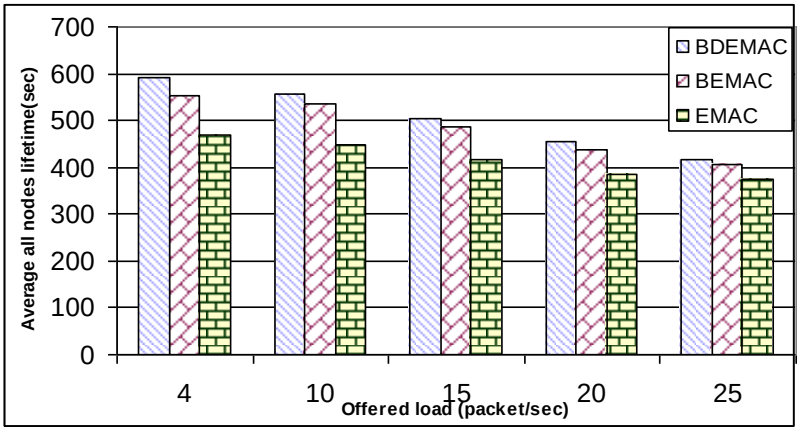
หัวข้อต่อไปจะเป็นการนำโพรโทคอลที่ได้เสนอไว้ในข้างต้น ท้งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงาน(EMAC) โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางแบบผสมทั้งวิธี BDEMAC และวิธี BEMAC มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงานและด้านการให้บริการ

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอ

การทดสอบในส่วนนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉพาะโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ทั้งสามโพรโทคอลคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงการใช้พลังงาน แบบที่สองและสามคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานที่ใช้และระดับแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดหรือเรียกว่าเป็นโพรโทคอลแบบผสมทั้งสองวิธีที่นำเสนอในข้างต้น เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามที่ได้ออกแบบไว้ มีจุดประสงค์หลักเหมือนกันนั้นคือยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด แต่จะมีความแตกต่างกันด้วยวิธีการที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่นำมาใช้งาน

เนื่องจากข้างต้นได้ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอในแต่ละแบบไปแล้ว ในส่วนนี้จึงพิจารณาเฉพาะบางพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งในด้านคุณภาพการให้บริการ เช่น ค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จ ส่วนในประสิทธิภาพด้านพลังงานจะพิจารณาจาก อายุการใช้งานของโครงข่าย และอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในดโครงข่ายเพื่อชี้ให้เห็นว่าโพรโทคอลใดในทั้งสามแบบที่มีประสิทธิภาพในด้านต่างๆ มากที่สุด

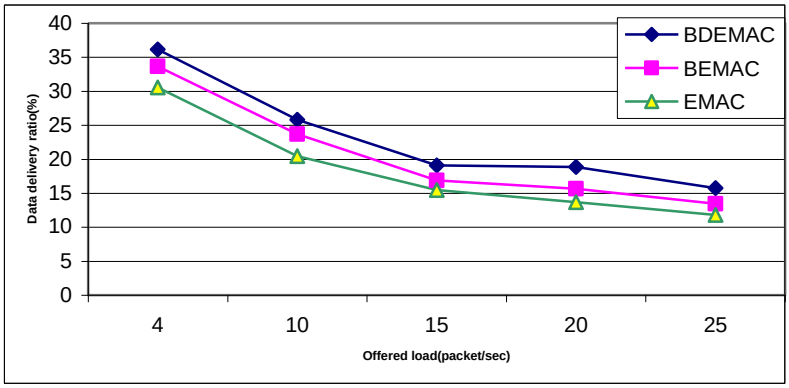
รูปที่ 4.29 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล
(กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)



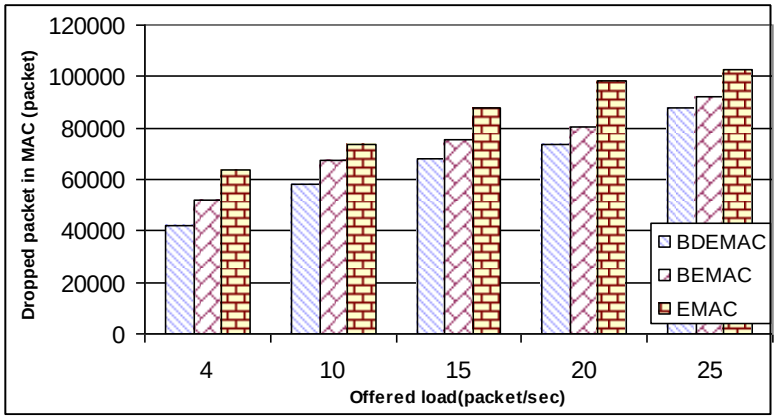
รูปที่ 4.30 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อ
เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล
(กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

จากรูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยทั้งสามประเภท โดยโพรโทคอลที่มีอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดคือโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอในวิธีที่หนึ่ง คือการนำค่าที่เหลือของพลังงานมาใช้เป็นค่าประวิงเวลา รองลงมาคือโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมวิธีที่สองที่นำค่าพลังงานที่เหลือของโนดต่ำสุดในเส้นทางกับพลังงานที่โนดใช้มาตัดสินใจพร้อมกัน และสุดท้ายคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงานที่ใช้เพียงอย่างเดียว เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอทั้งสองวิธีเกิดจากการรวมเอาข้อดีของทั้งโพรโทคอลแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด ที่เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด โดยเลือกเส้นทางที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งการผสมปัจจัยทั้งสองประการเข้าด้วยกันทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและการส่งแพ็กเกตไปยังโนดปลายทางมากกว่าการพิจารณาเฉพาะปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว อีกทั้งโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมนั้นจะพยายามกระจายทราฟฟิกให้ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่สูง แต่ขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงาน เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด โดยไม่ได้พิจารณาว่าเส้นทางที่เลือกนั้นผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงหรือไม่ จึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมสามารถทำให้โนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเสมอภาคมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ

แบบคำนึงถึงพลังงานเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.30 ซึ่งแสดงอายุการใช้งานเฉลี่ยของโครงข่าย จากเหตุผลตรงนี้ทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงานที่เหลือมีอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบคำนึงถึงพลังงานที่ใช้



รูปที่ 4.31 อัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล



รูปที่ 4.32 จำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกละทิ้งในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลางเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล

รูปที่ 4.31 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จซึ่งจะสะท้อนถึงวิสัยสามารถ(Throughput) ของโครงข่าย โดยถ้าเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางมีคุณภาพดีนั้นคือ เป็นเส้นทางที่มีโหลดอยู่ในระดับที่ต่ำและมีความน่าเชื่อถือสูง (เป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้นาน) ก็จะทำให้คุณภาพการให้บริการของโครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากรูปแสดงว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเกตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบผสมเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งในระดับที่ต่ำ โดยความคับคั่ง

ที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือ ความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณโหลดที่อยู่ในบัฟเฟอร์ของโนด และความคับคั่งที่เกิดจากจำนวนโนดข้างเคียง (โอกาสที่แพ็กเกตเกิดการชนกันสูงเมื่อมีจำนวนโนดข้างเคียงสูง) เนื่องจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจะเลือกเส้นทางที่โนดมีอายุการใช้งานที่สูง เพราะฉะนั้นถ้าโนดมีปริมาณโหลดอยู่มากก็จะทำให้อายุการใช้งานของโนดมีค่าที่ต่ำ นอกจากนั้นยังเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง ได้พิจารณาถึงจำนวนโนดข้างเคียงในการคำนวณด้วย โดยถ้าโนดที่อยู่ในเส้นทางมีจำนวนโนดข้างเคียงที่สูงก็จะส่งผลให้ค่าต้นทุนพลังงานมีค่าที่สูง ซึ่งก็แสดงว่าเส้นทางดังกล่าวทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานในระดับที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นแล้วเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะหมายถึงเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโนดข้างเคียงต่ำด้วยเช่นกัน

รูปที่ 4.32 แสดงจำนวนแพ็กเกตทั้งหมดที่ถูกละทิ้งในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทั้งสามโพรโทคอล พบว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงเฉพาะพลังงานจะมีจำนวนแพ็กเกตที่ถูกละทิ้งมากกว่าอีกสองวิธี เนื่องจากอายุการใช้งานของโนดในโพรโทคอลแบบ EMAC นั้นสั้นกว่าโพโทคอลแบบ BDEMAC และ BEMAC ทำให้แพ็กเกตหาเส้นทางไม่พบมากขึ้นเนื่องจากมีโนดที่หมดแบตเตอรี่เร็วกว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงระดับของแบตเตอรี่ ซึ่งเวลาที่สั้นลงมาทำให้แพ็กเกตที่ถูกละทิ้งมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากโนดในโครงข่ายเหลือน้อยลงทำให้แพ็กเกตหาเส้นทางไม่เจอ

จากผลการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 แบบที่แสดงในรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.32 สามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสม (Hybrid Routing Protocol) ได้พิจารณาข้อดีของโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งแบบคำนึงถึงพลังงานและแบบคำนึงถึงระดับแบตเตอรี่ที่เหลือของโนดมาพิจารณารวมกันในกระบวนการค้นหาเส้นทางจึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่คำนึงถึงเฉพาะพลังงาน

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

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอดฮอก โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 2 แบบ โพรโทคอลแรกที่นำเสนอคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Power Aware Routing Protocol) ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สัญลักษณ์ “EMAC (Energy of MAC)”แทนโพรโทคอลดังกล่าว โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานในส่วนของการควบคุมเข้าถึงตัวกลางต่ำที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากโนดอยู่ในสถานะว่างก่อนที่จะมีการเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะอื่นๆ พลังงานที่สูญเสียจากการส่ง การรับ และการได้ยินจากแบบจำลองการใช้พลังงานของโนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานในโนดข้างเคียงด้วย โดยพลังงานที่คำนวณได้จะไม่ใช่พลังงานที่ใช้เฉพาะคู่โนดส่งและรับเท่านั้น แต่จะรวมถึงโนดที่อยู่รอบข้างหรือโนดที่อยู่ในเส้นทางทั้งหมดที่สามารถรับแพ็กเกตได้ อีกทั้งแบบจำลองการใช้พลังงานที่นำเสนอ ได้พิจารณาผลกระทบของโนดแทรกสอด (Interference node) ด้วย เพื่อรับรองว่าโนดที่อยู่ในช่วงดังกล่าวจะไม่มารบกวนการส่งแพ็กเกต ทำให้แพ็กเกตเกิดการชน จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

- โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) นอกจากนั้นยังทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่ไม่สูงมากนักเพราะไม่ได้พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดในโครงข่าย

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบที่สองที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid Routing Protocol) โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับพลังงานที่เหลือของโนดมาพิจารณารวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้ได้นานที่สุด ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลแบบผสมไว้สองวิธี โดยในวิธีที่หนึ่งจะ

เป็นการนำค่าระดับแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ในแต่ละโนดมาคำนวณเพื่อหาค่าประวิงเวลาในการส่งต่อแพ็กเกต RREQ โนดปลายทางจะตัดสินใจเลือกเส้นทางจากปริมาณพลังงานที่ใช้ตามแบบโพรโทคอล EMAC โดยเส้นทางที่มาถึงในระดับต้นๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ “BDEMAC” แทนโพรโทคอลแบบผสมวิธีที่หนึ่ง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางดังกล่าวจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงาน และคุณภาพการให้บริการที่พิจารณาจากค่าอัตราการส่งแพ็กเกตสำเร็จที่มากกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบอื่นๆ

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

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

(1) การตัดสินใจเลือกเส้นทางควรจะเพิ่มการสูญเสียพลังงานจากการส่งแพ็กเกตในชั้นอื่นด้วย เช่น แพ็กเกต RREQ และ RREP จากชั้น Routing เพื่อทำให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการมากยิ่งขึ้น

(2) แบบจำลองการใช้พลังงานที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นแบบจำลองที่ไม่คำนึงพลังงานที่สูญเสียขณะที่โนดอยู่ในสถานะหลับ (Sleep mode) พลังงานที่ใช้ในการประมวลผลและพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังนั้นหากพิจารณาพลังงานในส่วนนี้ก็จะทำให้ระบบที่ใช้มีความเป็นจริงมากขึ้น

(3) โนดที่ใช้ในการทดสอบควรจะมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่ง เพื่อลดการใช้พลังงานที่สูญเสียโดยไม่จำเป็นและสามารถลดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งก็จะทำให้แบนด์วิทธ์ในการส่งข้อมูลของโครงข่ายเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นโนดควรจะรู้ตำแหน่งของโนดในโครงข่ายเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทาง เนื่องจากการส่งข้อมูลของโนดได้ทราบทิศทางในการส่งที่แน่นอน

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

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, Research, 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. Proceedings17-20 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. Freeney. An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc network. Mobile Networks and Applications Journal, 6, Number 3 (2001): 239-249.

[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 Simualtor," 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.

ภาคผนวก

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, pp. 1090-1095.

ประวัติผู้วิจัย

ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเลคทรอนิคส์และการสื่อสาร จาก มหาวิทยาลัย บริสตอล ประเทศสหราชอาณาจักร และ ปริญญาเอก สาขาวิชา โครงข่ายสื่อสาร จาก อิมพีเรียล คอลเลจ ลอนดอน (สังกัด มหาวิทยาลัย ลอนดอน ขณะสำเร็จการศึกษา) ประเทศสหราชอาณาจักร เข้าทำงานเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และ รองหัวหน้าภาควิชาฯฝ่ายระบบสารสนเทศ

ประวัติผู้ช่วยงานวิจัย

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