กลไกซ่อมแซมเส้นทางตามคำขอในเครือข่ายเคลื่อนที่แบบแอดฮอกโดยอาศัยวิธีการดักฟัง

นายจิรวัฒน์ ศิริหล้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ON-DEMAND ROUTE REPAIR MECHANISM IN MANETS USING OVERHEARING METHOD

Mr.Jirawat Sirilar

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Computer Science
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลไกซ่อมแซมเส้นทางตามคำขอในเครือข่ายเคลื่อนที่แบบแอดฮอกโดยอาศัยวิธีการดักฟัง
โดย	นาย จิรวัฒน์ ศิริหล้า
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกริก ภิรมย์โสภา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมเอก อินทนากรวิวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จิรวัฒน์ ศิริหล้า : กลไกซ่อมแซมเส้นทางตามคำขอในเครือข่ายเคลื่อนที่แบบแอดฮอกโดยอาศัยวิธีการดักฟัง. (AN ON-DEMAND ROUTE REPAIR MECHANISM IN MANETS USING OVERHEARING METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย, 75 หน้า.

เครือข่ายไร้สายเป็นเครือข่ายที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากเครือข่ายไร้สายได้ช่วยเพิ่มขีดความสามารถของการติดต่อสื่อสารในชีวิตประจำวันให้มีความคล่องตัวและสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น โดยเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานหรือ MANETs มีคุณลักษณะที่โดดเด่นในเรื่องความอิสระในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย ซึ่งส่งผลให้รูปแบบเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่อย่างตลอดเวลา และในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครือข่ายจำเป็นต้องพึ่งพาโพรโทคอลจัดเส้นทาง เพื่อทำหน้าที่ค้นหาและบำรุงรักษาเส้นทางในการติดต่อสื่อสารให้แก่อุปกรณ์ ซึ่งโพรโทคอลจัดเส้นทางจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของเครือข่ายประเภทนี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโพรโทคอลจัดเส้นทางลดลงเป็นอย่างมากทั้งในด้านของปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่าย, ค่าความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูล, และประสิทธิภาพการส่งกลุ่มข้อมูล รวมไปถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครือข่าย

จากผลการทดลองด้วยการจำลองการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานด้วยโปรแกรมจำลองเครือข่าย (Network Simulation) ของโพรโทคอลจัดเส้นทาง Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) พบว่าประสิทธิภาพของโพรโทคอลจัดเส้นทางที่ลดลงเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายไม่มีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้จึงทำการปรับปรุงกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยอาศัยข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังเป็นตัวช่วยประกอบการซ่อมแซมเส้นทาง ส่งผลให้ปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายลดลงตั้งแต่ 29% ถึง 59% ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการส่งกลุ่มข้อมูลของโพรโทคอลจัดเส้นทางดีขึ้นอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก Kultida Rojviboonchai

ปีการศึกษา 2553

5170252821 : MAJOR COMPUTER SCIENCE
KEYWORDS : MANETs / ROUTING PROTOCOLS / ROUTE REPAIR / OVERHEARING

JIRAWAT SIRILAR : AN ON-DEMAND ROUTE REPAIR MECHANISM IN MANETS USING OVERHEARING METHOD. ADVISOR : KULTIDA ROJVIBOONCHAI Ph. D., 75 pp.

Wireless networks are being very popular today, which improve the capabilities of communication in daily life to be more flexible and more comfortable. The infrastructureless wireless networks or MANETs have unique features in the free movement of equipment within the network. The resulting network topology is changing with time. The communications between devices in network are responsibility of routing protocols, which create and maintain communication paths among the devices. The routing protocols will be directly affected by the rate of change of network topology, which is a unique characteristic of this network. As a result, the performance of the routing protocols are greatly degraded in term of packet delivery ratio, average delay and overhead of the network. The experimental results of Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) by simulations of Network Simulator NS-2.34 indicated that the performance degradation of the routing protocol is caused by inefficiencies of route repair process.

In this thesis, I propose a novel route repair mechanism that can improve the performance of routing protocols in an overall network. The key feature is to overhear route information from packets traveling around. Therefore, the route repair can be successful with less overhead than the conventional routing protocols such as AODV by using overheard information. Simulation results show that my proposed route repair mechanism can improve performance in terms of overhead and packet delivery ratio. The average packet delivery ratio is nearly 99%. The overhead of network is reduced about 29% to 59% when comparing to the conventional AODV.

Department : Computer Engineering Student's Signature .....
Field of Study : Computer Science Advisor's Signature Kultida Rojviboonchai
Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มิอาจสำเร็จสมบูรณ์ได้หากปราศจากความช่วยเหลือ ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และแนวทางในการทำงานวิจัยจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ซึ่งทุ่มเทให้การดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี พร้อมทั้งเป็นแรงผลักดันในการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

กราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ผศ.ดร.เกริก ภิรมย์โสภา, ผศ.ดร.เฉลิมเอก อินทนากรวิวัฒน์ และผศ.ดร.ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์ ที่สละเวลาแนะนำข้อคิดและข้อเสนอแนะ รวมถึงมุมมองที่หลากหลายอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ ประสบการณ์ที่ดีในการใช้ชีวิตในมหาวิทยาลัยและการทำงานวิจัย พร้อมทั้งโอกาสที่ดีในการพูดคุยกับอาจารย์ที่มีความรู้และความสามารถ เพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆทุกคน

ขอบคุณทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และแบ่งปันสิ่งต่างๆให้แก่กันเสมอ

และสุดท้าย ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว โดยเฉพาะคุณพ่อและคุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการทำการวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 10

1.3 ขอบเขตการวิจัย 10

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 11

1.5 คุณค่าทางวิชาการ 11

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ 11

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 12

2.1.1 IEEE 802.11 LAN/MAN Wireless LANS Standard 12

2.1.2 ประเภทของโพรโทคอลจัดเส้นทางในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน 18

2.1.3 Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Protocol 21

2.2 แนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง 32

2.2.1 ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง 34

2.2.2 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางที่เพิ่มเติมเข้าสู่โพรโทคอล 37

2.2.3 กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO 40

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 45

3.1 การวัดและประเมินผล 45

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 47

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 47

4.1.1 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับ
จำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทาง 47

หน้า

4.1.2 ความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ย 52
4.1.3 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง 56
4.1.4 ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล 59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 62
5.1 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 62
บทที่ 6 การวิเคราะห์ข้อมูลในด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 64
6.1 การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ 64
6.2 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายไร้สาย 66
รายการอ้างอิง 72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า
ตารางที่ 1 ความแตกต่างของเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐานและไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน ... 4
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของมาตรฐาน IEEE 802.11 ... 14
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบมาตรฐานของโพรโทคอล IEEE 802.11 ... 17
ตารางที่ 4 โครงสร้างตารางข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล AODV ... 24
ตารางที่ 5 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของการพัฒนาปรับปรุง
กระบวนการบำรุง- รักษาเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทาง ... 32
ตารางที่ 6 โครงสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง ... 34
ตารางที่ 7 ตัวอย่างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง ... 35
ตารางที่ 8 โครงสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราว ... 36
ตารางที่ 9 ตารางข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังของโหนดต่างๆ ... 44
ตารางที่ 10 ค่ากำหนดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบโพรโทคอล ... 46
ตารางที่ 11 อัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในขั้นตอนการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูล ... 66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ภาพรวมการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐาน 2
รูปที่ 2 ภาพรวมการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน 3
รูปที่ 3 จำนวนกลุ่มข้อมูลค่าใช้จ่ายในการติดต่อสื่อสารของเครือข่าย
เมื่อโหนดในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ 8
รูปที่ 4 ปริมาณค่าใช้จ่ายในการติดต่อสื่อสารของเครือข่าย
เมื่อโหนดในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ 9
รูปที่ 5 ลักษณะของเครือข่ายที่ก่อให้เกิดปัญหา Hidden terminals 13
รูปที่ 6 กระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐาน 14
รูปที่ 7 กระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐานที่มีเฟรมตอบรับ 15
รูปที่ 8 กระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบ CSMA/CA ที่มีเฟรมตอบรับ 15
รูปที่ 9 โพรโทคอลจัดเส้นทางของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน 18
รูปที่ 10 ประสิทธิภาพและความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลของโพรโทคอล AODV และ DSR
เมื่อทำการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายที่มีจำนวน 100 โหนด 21
รูปที่ 11 โครงสร้างกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ของโพรโทคอล AODV 22
รูปที่ 12 โครงสร้างกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง (RREP) ของโพรโทคอล AODV 23
รูปที่ 13 โครงสร้างกลุ่มข้อมูลแจ้งความผิดพลาดของเส้นทาง (RERR) 24
รูปที่ 14 แผนผังการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางและ
การสร้างกลุ่มข้อมูลร้องขอเส้นทาง 25
รูปที่ 15 แผนผังการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางและ
การสร้างกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง 26
รูปที่ 16 แผนผังการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางและ
การรับกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง 26
รูปที่ 17 แผนผังการทำงานของกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง 28
รูปที่ 18 แผนผังภาพรวมการทำงานของกลไกซ่อมแซมเส้นทางที่นำเสนอ 33
รูปที่ 19 ตัวอย่างลักษณะของเครือข่ายที่ทำการส่งข้อมูลจากโหนด 1 ไปยังโหนด 5 35
รูปที่ 20 แผนผังการทำงานของกระบวนการสร้างและปรับปรุง ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง 37
รูปที่ 21 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREQ) 38
รูปที่ 22 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREP) 39
รูปที่ 23 แผนผังการทำงานภาพรวมของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง 40
รูปที่ 24 แผนผังการทำงานเมื่อโหนดได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง 41
รูปที่ 25 แผนผังการทำงานเมื่อรับกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง 42
รูปที่ 26 ตัวอย่างการทำงานของกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO 44

หน้า

รูปที่ 27 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 49
รูปที่ 28 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง 50
รูปที่ 29 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 51
รูปที่ 30 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง 51
รูปที่ 31 ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง 53
รูปที่ 32 ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 54
รูปที่ 33 ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง 55
รูปที่ 34 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง 56
รูปที่ 35 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 57
รูปที่ 36 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง 58
รูปที่ 37 ปริมาณหน่วยความจำเฉลี่ยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทาง ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง 59
รูปที่ 38 ปริมาณหน่วยความจำเฉลี่ยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทาง ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 60
รูปที่ 39 ปริมาณหน่วยความจำเฉลี่ยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทาง ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง 61
รูปที่ 40 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน 67
รูปที่ 41 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน 67
รูปที่ 42 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 70
รูปที่ 43 ค่าความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 70
รูปที่ 44 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทางภายใต้เครือข่าย ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง 71

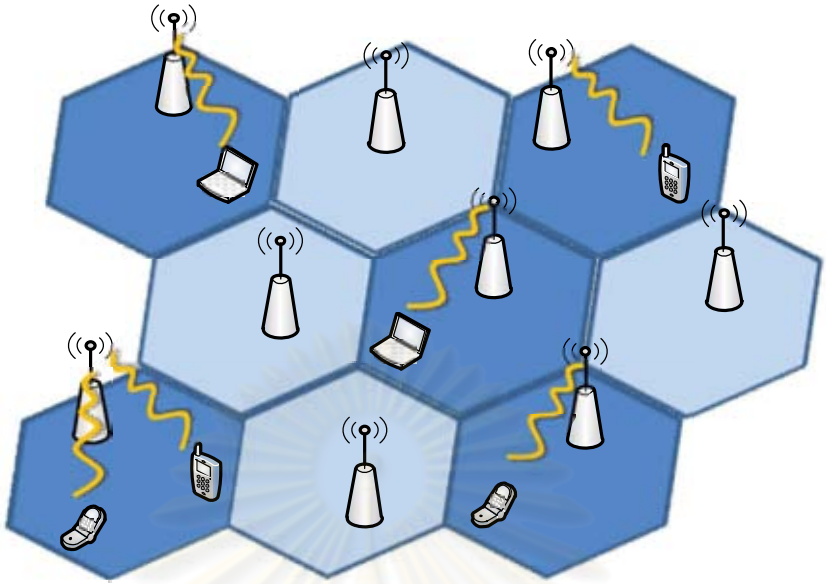
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เครือข่ายไร้สายได้มีการพัฒนาไปอย่างมากเพื่อตอบสนองความต้องการและพัฒนาขีดความสามารถของการติดต่อสื่อสารในชีวิตประจำวันให้มีความคล่องตัวและสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น โดยเครือข่ายไร้สายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในหลากหลายสถานการณ์และหลายพื้นที่ รวมไปถึงพื้นที่ที่มีความยากลำบาก, พื้นที่ที่ประสบภัย, หรือแม้กระทั่งสนามรบ เป็นต้น ด้วยจุดเด่นหลักๆ ของเครือข่ายไร้สายที่ทำให้ได้รับความนิยม ได้แก่ ความเรียบง่ายและความคล่องตัวของการประยุกต์ใช้เครือข่าย ลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายไม่ซับซ้อนและบำรุงรักษาง่าย นอกจากนี้เครือข่ายบางประเภทยังมีความสามารถในการทำงานแบบกระจาย ที่ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือในการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่ายไร้สายได้อีกด้วย อีกทั้งอุปกรณ์พกพาต่างๆ ในปัจจุบัน เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่, เครื่องช่วยงานส่วนบุคคลแบบดิจิทัล, แล็ปท็อปคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาขีดความสามารถในการทำงานและศักยภาพในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เครือข่ายไร้สายได้รับความนิยมและมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน

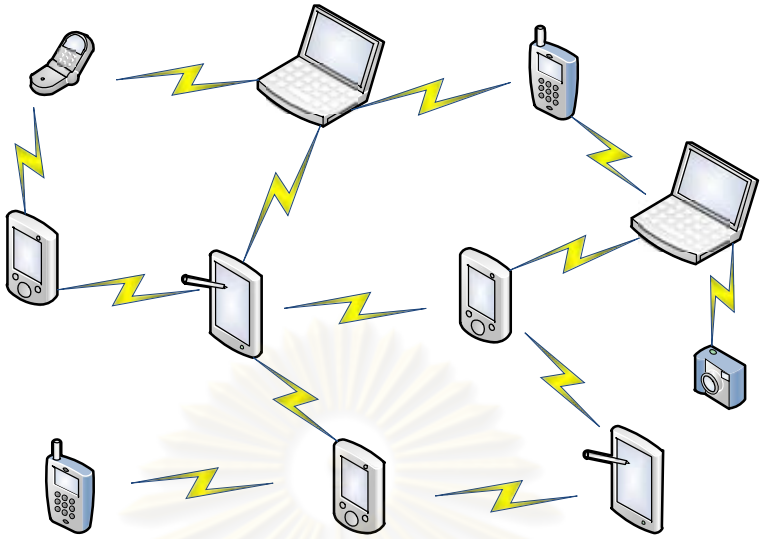
เครือข่ายไร้สายสามารถแบ่งได้หลายประเภท โดยขึ้นกับวัตถุประสงค์และลักษณะวิธีการของการจำแนกประเภท เช่น จำแนกโดยพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายไร้สาย, เทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อกลางของเครือข่ายไร้สาย, หรือลักษณะการใช้งานและโปรแกรมประยุกต์ที่รองรับในเครือข่ายไร้สาย แต่หลักเกณฑ์ที่นิยมนำมาใช้ในการจำแนกประเภทของเครือข่ายไร้สาย คือ การใช้โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของเครือข่ายไร้สายในการจำแนก โดยสามารถจำแนกประเภทของเครือข่ายออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ เครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure-based wireless network) และเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกหรือเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructureless (ad hoc) wireless network) เครือข่ายไร้สายทั้งสองมีรูปแบบการทำงานและการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน

เครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure-based wireless network) เป็นเครือข่ายไร้สายที่ใช้โครงสร้างพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งานเครือข่าย โดยบริการต่างๆ ภายในเครือข่ายจะรวมอยู่ที่โครงสร้างพื้นฐาน ก่อนทำการส่งต่อไปยังอุปกรณ์ปลายทางอื่นๆ ดังรูปที่ 1 แสดงภาพรวมการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐาน อุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ในเครือข่ายไร้สายจะถูกกำหนดหน้าที่ล่วงหน้าไว้เรียบร้อยแล้ว ซึ่งอุปกรณ์หลักๆที่ทำหน้าที่ในเครือข่ายประเภทนี้ ได้แก่ สถานีฐาน (Base station) และอุปกรณ์ปลายทางหรือโหนด (Node) โดยสถานีฐานจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารภายในระบบเครือข่ายไร้สายกับอุปกรณ์ปลายทางในเครือข่ายทั้งหมด ส่วนอุปกรณ์ปลายทางจะดำเนินการติดต่อโดยตรงผ่านสถานีฐานเท่านั้น ทำให้ขนาดของพื้นที่ในการให้บริการเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐานขึ้นกับกำลังรับ – ส่งสัญญาณหรือพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน การประยุกต์ใช้เครือข่ายดังกล่าวที่เห็นได้ชัดเจน ได้แก่ เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไร้สาย และเครือข่ายไร้สายแบบท้องถิ่น (Wireless LAN) เป็นต้น



รูปที่ 1 ภาพรวมการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐาน

สำหรับเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกหรือเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเครือข่ายที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยเพียงอุปกรณ์ปลายทางหรือโหนดภายในเครือข่ายเท่านั้น ซึ่งโหนดในเครือข่ายจะไม่มีการกำหนดหน้าที่การทำงานในเครือข่ายไว้ล่วงหน้า แต่มีความสามารถในการทำงานได้ทุกหน้าที่และสามารถทำการตัดสินใจได้ด้วยตนเอง ดังนั้นการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่ายจึงเป็นการส่งต่อข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ภายในพื้นที่ครอบคลุมของกำลังรับ-ส่งของโหนดต้นทาง จนกระทั่งข้อมูลถึงโหนดปลายทาง ทำให้มีลักษณะรูปแบบการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน ดังรูปที่ 2 และด้วยลักษณะของการติดต่อสื่อสารของเครือข่ายดังกล่าว ทำให้เครือข่ายไร้สายประเภทนี้ไม่ต้องการโครงสร้างพื้นฐานในการสร้างเครือข่าย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่ไม่มีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกหรือพื้นที่ที่มีความยากลำบากในการวางโครงสร้างพื้นฐานได้เป็นอย่างดี เช่น ภายในป่า บนเกาะ พื้นที่ห่างไกล-ทุรกันดาร รวมไปถึงพื้นที่ประสบภัยพิบัติ อย่างไรก็ดี เมื่อโหนดในเครือข่ายต้องการติดต่อสื่อสารเพื่อทำการส่งข้อมูลภายในเครือข่าย จะต้องทำการค้นหาเส้นทางก่อนดำเนินการส่งกลุ่มข้อมูล ซึ่งเป็นหน้าที่หลักของโพรโทคอลจัดเส้นทาง (Routing protocol) ที่จะทำการค้นหาและบำรุงรักษาเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการ ดังนั้นโพรโทคอลจัดเส้นทางจึงเป็นส่วนสำคัญและส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน



รูปที่ 2 ภาพรวมการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน

เครือข่ายไร้สายทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันทั้งลักษณะโครงสร้างของเครือข่าย, รูปแบบวิธีการติดต่อสื่อสาร, รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ หรือแม้แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในเครือข่าย โดยสามารถแยกความแตกต่างของทั้งสองเครือข่ายได้ดังตารางที่ 1 ที่กำหนดให้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไร้สายเป็นตัวแทนของเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐานเปรียบเทียบกับเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของเครือข่ายทั้งสองประเภทในตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าในการพิจารณาปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นของเครือข่ายทั้งสองประเภท พบว่าส่วนใหญ่เกิดจากข้อจำกัดและคุณลักษณะของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ที่มีคุณลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. การรบกวนการติดต่อสื่อสารในระดับสูง ส่งผลให้ความเชื่อถือได้ของการติดต่อสื่อสารลดลง ซึ่งการรบกวนดังกล่าวเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น การถูกรบกวนโดยอุปกรณ์ข้างเคียงที่ใช้ช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน, การลดทอนสัญญาณเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิด, และการรบกวนภายในตัวอุปกรณ์เอง เป็นต้น

2. มีแบนด์วิดท์ที่ใช้ได้น้อยและมีอัตราการส่งข้อมูลในระดับต่ำเมื่อเทียบกับการติดต่อสื่อสารในเครือข่ายแบบใช้สาย ซึ่งส่งผลให้การติดต่อสื่อสารในเครือข่ายแบบไร้สายมีค่าความล่าช้า, ค่าความแตกต่างของความล่าช้า (Jitter) และระยะเวลาในการสร้างการติดต่อสื่อสารที่มากกว่าเครือข่ายแบบใช้สาย

3. ทรัพยากรของอุปกรณ์ที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น ความสามารถในการประมวลผล, หน่วยความจำของอุปกรณ์, และพลังงานของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและระยะเวลาการทำงานโดยรวมของเครือข่ายไร้สาย

4. ทรัพยากรในการส่งข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น ตัวกลางในการติดต่อสื่อสารที่ใช้งานร่วมกัน, ย่านความถี่ที่สามารถใช้งานได้ รวมไปถึงพื้นที่ครอบคลุมของอุปกรณ์ในการติดต่อสื่อสาร กล่าวคือ อุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อสื่อสารระหว่างกันจะต้องอยู่ในพื้นที่ครอบคลุมของกำลังรับ-ส่ง

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้างพื้นฐานและไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน **[1]**

	Cellular Networks	**Ad Hoc Wireless Networks**
Infrastructure	Fixed infrastructure-based	Infrastructure-less
Connectivity links	Single-hop wireless links	Multi-hop wireless links
Bandwidth	Guaranteed bandwidth	Shared radio channel
Routing	Centralized routing	Distributed routing
Type of networks	Circuit-switched	Packet-switched
Smooth of connectivity	Seamless connectivity	Frequent path breaks due to mobility
Cost and time of deployment	High cost and time of deployment	Quick and cost-effective deployment
Reusable of frequency	Reuse of frequency spectrum through geographical channel reuse	Dynamic frequency reuse based on carrier sense mechanism
Time synchronization	Easier to achieve time synchronization	Time synchronization is difficult and consumes bandwidth
Bandwidth reservation	Easier to employ bandwidth reservation	Requires complex medium access control protocols
Application	Application domains include mainly civilian and commercial sectors	Application domains include battlefields, emergency search and rescue operations, and collaborative computing
Cost of maintenance	High cost of network maintenance	Self-organization and maintenance properties are built into the network
Complexity of mobile hosts	Mobile hosts are of relatively low complexity	Mobile hosts require more intelligence
Objective of routing protocols	Major goals of routing and call admission are to maximize the call acceptance ratio and minimize the call drop ratio	Main aim of routing is to find paths with minimum overhead and also quick reconfiguration of broken path
Currently development status	Widely deployed and currently in the third generation of evolution	Several issues are to be addressed for successful commercial deployment

ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อสื่อสาร ซึ่งเป็นคุณลักษณะและข้อจำกัดที่สำคัญอย่างหนึ่งของการติดต่อสื่อสารของเครือข่ายไร้สาย

เมื่อพิจารณาถึงปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากคุณลักษณะของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายของเครือข่ายทั้งสองประเภท พบว่าเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานจะได้รับผลกระทบมากที่สุด เนื่องจากอุปกรณ์ในเครือข่ายมีความซับซ้อนและมีความสามารถของการทำงานในระดับสูงเพื่อรองรับหน้าที่การทำงานที่หลากหลาย รวมไปถึงต้องทำการสร้างและบริหารจัดการการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่ายด้วยตัวของอุปกรณ์เอง ประกอบกับอุปกรณ์ในเครือข่ายส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์แบบพกพาที่สามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างอิสระ ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ปัญหาของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานมีความซับซ้อนและรุนแรงมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากเครือข่ายไร้สายประเภทดังกล่าวมีการประยุกต์ใช้งานที่เรียบง่ายและสะดวก ประกอบกับอุปกรณ์พกพาต่างๆได้มีการพัฒนาความสามารถของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายที่ดีขึ้น ทำให้เครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น และด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ปัญหาของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นปัญหาที่น่าสนใจและท้าทายที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ตัวอย่างปัญหาหลักๆ ที่สำคัญของเครือข่ายประเภทนี้สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ปัญหาการเข้าถึงตัวกลาง เป็นปัญหาในส่วนของการจัดสรรการเข้าถึงหรือการใช้งานตัวกลางเพื่อใช้ในการส่งข้อมูล เนื่องจากเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานใช้ตัวกลางร่วมกันในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาดังกล่าว อันได้แก่ ความเท่าเทียมกันในการเข้าถึงตัวกลาง, ปัญหาอุปกรณ์แฝงตัว (Hidden terminals), การประสานเวลา, และการจองทรัพยากรเครือข่าย เป็นต้น

2. ปัญหาการจัดเส้นทางในเครือข่าย หน้าที่หลักของโพรโทคอลจัดเส้นทางจะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลเส้นทางเพื่อทำการพิจารณาเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดไปยังอุปกรณ์ปลายทาง แต่เนื่องจากคุณลักษณะของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของโพรโทคอลจัดเส้นทาง อันได้แก่ การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย ทำให้ลักษณะของเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและส่งผลให้ข้อมูลเส้นทางที่โพรโทคอลจัดเส้นทางใช้ในกระบวนการพิจารณาเลือกเส้นทางเกิดความคาดเคลื่อนหรือไม่ถูกต้อง อันเป็นผลทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นทางไปยังอุปกรณ์ปลายทางได้สำเร็จ หรือเส้นทางเกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้การได้ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายด้วย โดยส่งผลให้มีระยะเวลาในการซ่อมแซมเส้นทางนานกว่าปกติและอาจทำการซ่อมแซมเส้นทางด้วยข้อมูลเส้นทางที่ไม่ถูกต้อง ทำให้การซ่อมแซมเส้นทางครั้งนั้นๆ ล้มเหลวอีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบโพรโทคอลจัดเส้นทางจึงควรพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากคุณลักษณะของเครือข่ายดังกล่าวด้วย เพื่อให้โพรโทคอลจัดเส้นทางสามารถรองรับและทนทานต่อลักษณะของเครือข่ายที่เปลี่ยนแปลงอย่าง

พลวัตรได้ โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางที่มีประสิทธิภาพที่ดีควรจะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างและบำรุงรักษาเส้นทาง (Overhead) ที่เหมาะสมและน้อยที่สุด รวมไปถึงมีระยะเวลาในการสร้างหรือพิจารณาเลือกเส้นทางได้อย่างรวดเร็วพร้อมทั้งมีความสามารถในการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาการจัดเส้นทางในเครือข่าย เช่น ข้อจำกัดของแบนด์วิดท์, การช่วงชิงการเข้าถึงตัวกลางในการติดต่อสื่อสาร, ขนาดของเครือข่าย, ความเป็นส่วนตัวและความปลอดภัยภายในเครือข่าย เป็นต้น ซึ่งล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของโพรโทคอลจัดเส้นทางสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานด้วยเช่นกัน

3. ปัญหาการจัดการพลังงาน เนื่องจากอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานต้องการความคล่องตัวในการทำงาน จึงจำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่หรือแหล่งพลังงานภายในตัวของอุปกรณ์เอง ซึ่งแหล่งพลังงานดังกล่าวถือเป็นทรัพยากรที่มีค่าเป็นอย่างยิ่งและมีอยู่อย่างจำกัดสำหรับอุปกรณ์นั้นๆ ดังนั้นเพื่อให้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถทำงานได้นานที่สุด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุดของอุปกรณ์ คือ ส่วนที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สาย และในการส่งข้อมูลครั้งหนึ่งๆไปยังอุปกรณ์ปลายทาง อุปกรณ์จะต้องเสียพลังงานส่วนหนึ่งในกระบวนการค้นหาและสร้างเส้นทางเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลดังกล่าว หรือแม้กระทั่งใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย ดังนั้นโพรโทคอลจัดเส้นทางซึ่งมีหน้าที่ในส่วนดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างและซ่อมแซมเส้นทางซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานอีกด้วย

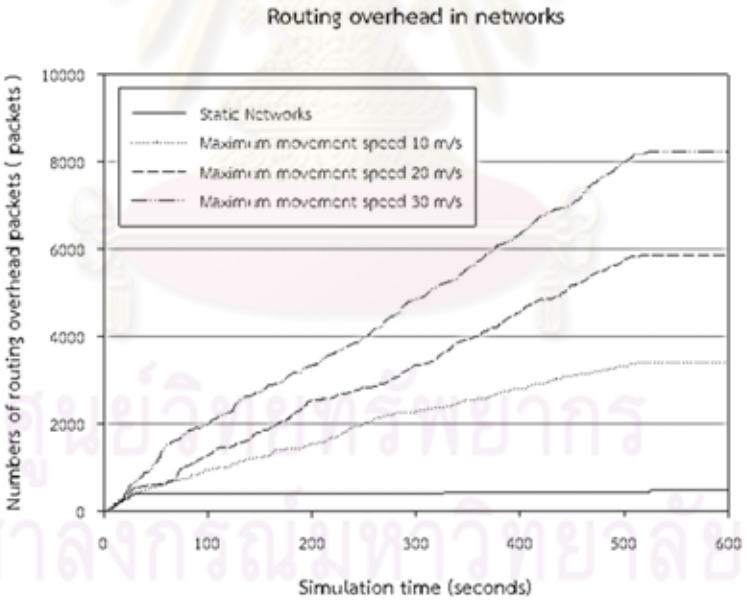
จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลจัดเส้นทางถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากเป็นตัวกลางสำคัญที่ทำหน้าที่ในการสร้างและบำรุงรักษาเส้นทางการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่าย และจากปัญหาหลักๆ ที่สำคัญของเครือข่ายที่ส่งผลกระทบต่อโพรโทคอลจัดเส้นทางดังที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในเครือข่ายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้โพรโทคอลจัดเส้นทางได้รับผลกระทบในด้านประสิทธิภาพการทำงานมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลเส้นทางมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งข้อมูลเส้นทางเป็นส่วนสำคัญในของกระบวนการสร้างหรือซ่อมแซมเส้นทางการติดต่อสื่อสารไปยังอุปกรณ์ปลายทาง

ผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายสามารถส่งผลกระทบต่อเนื่องไปยังทุกโหนดในเครือข่าย เนื่องจากโพรโทคอลจัดเส้นทางบางโพรโทคอลจะทำการร้องขอข้อมูลเส้นทางไปยังทุกโหนดในเครือข่ายเพื่อทำการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายเพียงเส้นทางเดียว ทำให้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการสร้างและซ่อมแซมเส้นทางโดยรวมของเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนครั้งที่ทำการซ่อมแซมเส้นทาง นอกจากนี้ยังถือได้ว่าเป็นการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพอีกด้วย เนื่องจากมีโหนดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเส้นทางที่ได้รับการซ่อมแซมจำเป็นต้องเข้ามามีส่วนร่วมในการรับ-ส่ง

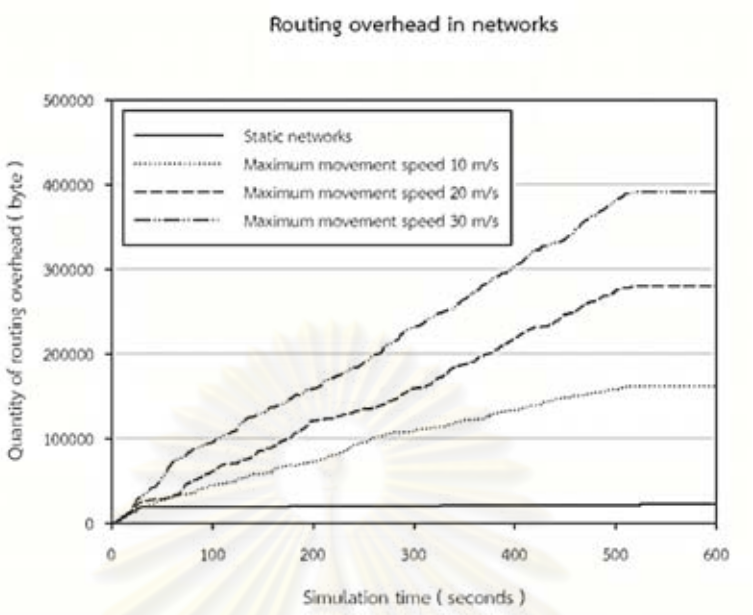
กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการร้องขอข้อมูลเส้นทางในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางด้วย และยังส่งผลทำให้ความล่าช้าในการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ในเครือข่ายมีความล่าช้าเพิ่มมากขึ้น เพราะต้องรอให้กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางเสร็จสิ้นก่อน จึงสามารถทำการส่งข้อมูลต่อไปได้ ในขณะเดียวกันอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องอาจต้องหยุดการส่งข้อมูลชั่วคราวหรือถูกแย่งใช้ช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทางที่ใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายให้เสร็จสิ้นก่อนจึงจะสามารถทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลต่อไปได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในเครือข่ายถือเป็นปัญหาที่สำคัญ ที่ส่งผลกระทบต่อเครือข่าย ทั้งในด้านของประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลในเครือข่าย ความล่าช้าในการส่งข้อมูล, รวมไปถึงปริมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการจัดการเส้นทางและพลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหาย

เพื่อให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นของโพโทคอลจัดเส้นทาง AODV เมื่ออุปกรณ์ในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ จึงได้ทำการทดลองด้วยโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS2 เพื่อทราบถึงปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อรูปแบบของเครือข่ายมีความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่าย และทำการเปรียบเทียบกับเครือข่ายแบบหยุดนิ่ง โดยกำหนดการทดลองให้เครือข่ายมีจำนวนโหนด 50 โหนด ภายในพื้นที่ 500 x 500 ตารางเมตร โดยใช้โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลจัดเส้นทางในเครือข่าย และมีจำนวนการติดต่อสื่อสารจำนวน 5 คู่ ด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ 4 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที การติดต่อสื่อสารของเครือข่ายจะเริ่มต้นทันทีเมื่อทำการทดลอง และสิ้นสุดเมื่อวินาทีที่ 500 ของระยะเวลาการทดลอง โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 10, 20, และ 30 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองดังรูปที่ 3 และ 4 ที่แสดงปริมาณและจำนวนค่าใช้จ่ายของเครือข่ายที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบต่างๆ กัน พบว่าในขณะที่ทำการทดลอง จำนวนกลุ่มข้อมูลและปริมาณค่าใช้จ่ายทีเกิดขึ้นในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่ายหยุดลง โดยสามารถวิเคราะห์ได้ว่า จำนวนกลุ่มข้อมูลและปริมาณค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่ายที่ส่งผลให้เส้นทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารเกิดความเสียหาย ทำให้โพรโทคอลจัดเส้นทางต้องเข้ามามีส่วนช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหาย ในขณะที่การติดต่อสื่อสารสิ้นสุดลงจะพบว่าจำนวนกลุ่มข้อมูลและปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไม่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากโพรโทคอลจัดเส้นทางไม่จำเป็นต้องดูแลรักษาเส้นทาง แม้ว่าเส้นทางจะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่ายก็ตาม และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง จำนวนกลุ่มข้อมูลและปริมาณค่าใช้จ่ายของเครือข่ายในการดูแลรักษาเส้นทางจะแปรผันตรงกับความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย ซึ่งจะพบว่ามีค่าใช้จ่ายที่มากกว่าเครือข่ายแบบหยุดนิ่งถึง 7, 12, และ 17 เท่าตามลำดับ

ปริมาณค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของเครือข่ายเป็นผลมาจากกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางในเครือข่ายของโพรโทคอลจัดเส้นทาง ซึ่งโพรโทคอลจัดเส้นทางส่วนใหญ่จะมีกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางที่คล้ายคลึงกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่ใช้ระยะเวลานานและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ส่งผลให้การส่งกลุ่มข้อมูลขาดความต่อเนื่องและมีระยะเวลาในการส่งกลุ่มข้อมูลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในส่วนของโพรโทคอลจัดเส้นทาง โดยมีแนวโน้มและรูปแบบการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้พลังงานไปในทิศทางเดียวกับปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางที่ต้องดำเนินการร้องขอข้อมูลเส้นทางไปทั่วทั้งเครือข่าย แล้วจึงให้โหนดปลายทางพิจารณาตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นเมื่อเส้นทางภายในเครือข่ายเกิดความเสียหายขึ้น จะส่งผลให้ทุกโหนดในเครือข่ายได้รับผลกระทบจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางดังกล่าวด้วย ซึ่งถือเป็นผลกระทบที่รุนแรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่าย



รูปที่ 3 จำนวนกลุ่มข้อมูลค่าใช้จ่ายในการติดต่อสื่อสารของเครือข่าย
เมื่อโหนดในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ



รูปที่ 4 ปริมาณค่าใช้จ่ายในการติดต่อสื่อสารของเครือข่าย
เมื่อโหนดในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ

จากปัญหาที่พบนี้จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงโพรโทคอลจัดเส้นทางให้มีประสิทธิภาพการทำงานในการดูแลรักษาเส้นทางการติดต่อสื่อสารที่ดีขึ้น ด้วยการปรับปรุงความสามารถในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เพื่อลดปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นภายในเครือข่าย ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเครือข่ายและโพรโทคอลจัดเส้นทางดีขึ้นอีกด้วย

โดยสรุปแล้วพบว่าสาเหตุของปัญหาหลักๆที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไร้สาย เป็นผลเนื่องมาจากโหนดในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักอย่างหนึ่งของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครือข่ายลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากค่าใช้จ่าที่เกิดจากกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางของเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้น เพราะเส้นทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารเกิดความเสียหายบ่อยครั้ง รวมไปถึงทำให้โหนดในเครือข่ายเสียโอกาสในการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูล เพราะต้องมีส่วนร่วมกับกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางให้เสร็จเรียบร้อยก่อน นอกจากนี้ยังส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการรับส่งกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทางที่ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีเพียงพอ

ด้วยเหตุนี้จึงได้เสนอแนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง เพื่อให้โพรโทคอลมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และสามารถรองรับกับปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่าย โดยอาศัยประโยชน์จากวิธีการดักฟังการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเส้นทางที่อยู่ในบริเวณนั้นๆ ซึ่งจะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง ทำให้การซ่อมแซมเส้นทางเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว, ถูกต้องแม่นยำ สามารถลดค่าใช้จ่ายและผลกระทบต่อโหนดอื่นๆในเครือข่ายได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการปรับปรุงกลไกซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทางของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้นพร้อมทั้งสามารถควบคุมทิศทางของการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูล

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. พิจารณาผลกระทบของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่ายเท่านั้น

2. ทำการปรับปรุงกระบวนการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานในส่วนของกลไกการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหาย

3. การดักฟังกลุ่มข้อมูลของโหนดในเครือข่ายจะดำเนินการเมื่อโหนดอยู่ในบริเวณที่สามารถทำการดักฟังได้เท่านั้น

4. การตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของเส้นทางจะดำเนินการโดยชั้นเชื่อมต่อ (Link layer) และจะทำการแจ้งมายังโพรโทคอลจัดเส้นทางเมื่อการเชื่อมต่อเกิดความเสียหาย

5. การพัฒนาและการทดสอบดำเนินการโดยโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-2.34 และนำผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อแสดงและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6. การทดสอบการทำงานของระบบจะทำบนระบบจำลองที่มีการสูญเสียหรือการผิดพลาดของข้อมูลในช่องสัญญาณไร้สาย (Wireless Channel) บนพื้นฐานของ IEEE802.11

7. การทดสอบการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทางจะทำการทดสอบภายใต้เครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตั้งแต่ 30 โหนด และไม่เกิน 100 โหนด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาโพรโทคอลพื้นฐานที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการทำงานรวมถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภทต่างๆ

2. ศึกษาแนวคิดและวิธีการทำงานของโพรโทคอลที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานอย่างละเอียด

3. พิจารณาและวิเคราะห์ถึงส่วนของโพรโทคอลจัดเส้นทางที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย

4. ศึกษาวิธีการปรับปรุงโพรโทคอล AODV เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

5. ทำการออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลตามวัตถุประสงค์

6. ทดสอบและเก็บข้อมูลการทำงานของโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยใช้โปรแกรม Network Simulator เวอร์ชั่น 2.34

7. วิเคราะห์ผลการทดลอง

8. ปรับปรุงส่วนที่มีการทำงานผิดพลาดหรือเพื่อเพิ่มความสามารถให้กับการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง

9. สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.5 คุณค่าทางวิชาการ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์ปัญหาของโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบตามคำขอของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานในส่วนของประสิทธิภาพการใช้งาน รวมไปถึงได้รวบรวมแนวคิดและกระบวนการจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาปรับปรุงโพรโทคอลให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มมากขึ้น พร้อมทั้งได้เสนอแนวความคิดการลดปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลเส้นทางจากการดักฟังข้อมูลเส้นทางเพื่อทำการสร้างเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหายอีกด้วย และนอกจากนี้ยังสามารถนำโพรโทคอลที่ได้รับการปรับปรุงแล้วไปประยุกต์ใช้ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานได้ทันทีโดยมีประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

1. หัวเรื่อง “OHO: OverHearing On-Demand Route Repair Mechanism for Mobile Ad Hoc Networks” โดย จิรวัฒน์ ศิริหล้า และ กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย ในบันทึกการประชุมทางวิชาการ “The seventh IEEE Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Conference (ECTI-CON 2010)” ซึ่งจัด ณ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 19-21 พฤษภาคม 2553

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

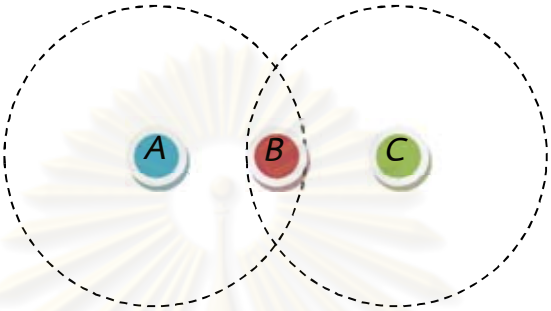
เนื่องจากงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายซึ่งมีมาตรฐานที่กำหนดโดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิค (IEEE) จึงขอสรุปรายละเอียดโดยสังเขปของ 802.11 ดังนี้

2.1.1 IEEE 802.11 LAN/MAN Wireless LANS Standard

ในปี 2540 สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิค หรือ Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) ได้ประกาศมาตรฐาน IEEE 802.11 **[2]** เป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นมาตรฐานทางเทคโนโลยีสำหรับเครือข่ายไร้สายที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยมาตรฐานดังกล่าวได้ระบุถึงข้อกำหนดต่างๆของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายทั้งในส่วนของชั้นกายภาพ (Physical Layer) และชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Media Access Control Layer) ในช่วงเริ่มต้นได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ภายในเครือข่ายให้มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่ 1 และ 2 Mbps หลังจากนั้นจึงได้พัฒนาให้มีความสามารถในการรับส่งกลุ่มข้อมูลที่ 5.5, 11 และ 54 Mbps ตามลำดับ โดยใช้ความถี่ในการติดต่อสื่อสารที่ 2.4 หรือ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่วิทยุของ Industrial, Scientific and Medical (ISM) ที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม, วิทยาศาสตร์และทางการแพทย์

โดยธรรมชาติแล้วเครือข่ายไร้สายจะใช้คลื่นวิทยุเป็นช่องทางในการติดต่อสื่อสารผ่านอากาศซึ่งเป็นตัวกลางหนึ่งในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งการใช้คลื่นวิทยุมีทั้งข้อดีและข้อเสียในการใช้งาน เช่น สามารถติดต่อสื่อสารกันได้สะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการประยุกต์ใช้ แต่ข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือในขณะที่ทำการติดต่อสื่อสารจะทำให้อุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวจะไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้เนื่องจากไม่สามารถใช้ตัวกลางร่วมกันในเวลาเดียวกันได้และเพื่อเป็นการป้องกันการชนกันของข้อมูล รวมไปถึงปัญหาการแย่งใช้ตัวกลางเพื่อทำการติดต่อสื่อสาร นอกจากนี้การติดต่อสื่อสารแบบไร้สายมีอัตราความผิดพลาดในการส่งข้อมูลผ่านตัวกลางที่สูงอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ในส่วนของการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางของเครือข่ายไร้สายจึงได้มีการกำหนดกลไกที่ใช้ในการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) โดยกลไกดังกล่าวจะทำการตรวจสอบการใช้งานตัวกลางว่ามีการใช้ตัวกลางในการส่งข้อมูลในขณะนั้นอยู่หรือไม่ โดยก่อนทำการส่งข้อมูลใดๆจะทำการตรวจสอบตัวกลางก่อนเสมอ ถ้าตรวจสอบพบว่าตัวกลางถูกใช้ในการติดต่อสื่อสาร จะรอจนกระทั่งตัวกลางนั้นๆ ว่างลง ซึ่งมีความแตกต่างจากหลักการ CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 **[3]** ที่จะทำการตรวจสอบตัวกลางระหว่างการส่งข้อมูลด้วยว่าเกิดการชนกันของข้อมูลหรือไม่ ถ้าเกิดการชนกันของข้อมูลจะหยุดการส่งทันทีและทำการส่งข้อมมูลนั้นๆ ใหม่อีกครั้ง แต่อย่างไรก็ดีกลไกดังกล่าวยังไม่สามารถป้องกันการใช้ตัวกลางพร้อมกันในกรณีปัญหา Hidden Terminal ได้ โดยมีลักษณะปัญหาดังเช่นรูปที่ 5 กล่าวคือ โหนด C ซึ่งอยู่นอกรัศมีการติดต่อสื่อสารของโหนด A ทำให้โหนด C ที่ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนด B ได้ทำการตรวจสอบ

ตัวกลางแล้วพบว่าตัวกลางนั้นว่างอยู่ จึงได้ทำการส่งข้อมูลไปยังโหนด B ในทันที โดยที่ในขณะนั้น โหนด B กำลังทำการรับข้อมูลจากโหนด A อยู่ ทำให้เกิดการชนกันของการส่งกลุ่มข้อมูล ส่งผลให้การส่งกลุ่มข้อมูลของทั้งโหนด A และ C ไม่ประสบความสำเร็จ



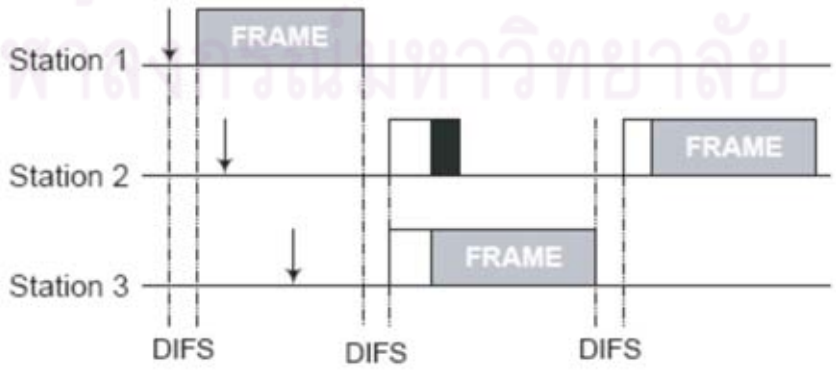
รูปที่ 5 ลักษณะของเครือข่ายที่ก่อให้เกิดปัญหา Hidden terminals

จากกรณีปัญหาดังกล่าวจึงได้มีกลไกอีกชิ้นหนึ่งที่เข้ามาช่วยในการตรวจสอบตัวกลางเพื่อแก้ปัญหา Hidden terminals และป้องกันการแย่งใช้งานตัวกลาง ด้วยการใช้กลไกของ Distributed Coordination Function (DCF) โดยโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลจะทำการ ตรวจสอบตัวกลางเป็นระยะเวลา DCF Inter-Frame Space (DIFS) ว่าตัวกลางมีการใช้งานอยู่ในขณะนั้นหรือไม่ หากมีการใช้งานอยู่ในขณะนั้น โหนดจะทำการสุ่มค่าขึ้นมาค่าหนึ่งซึ่งมีค่าระหว่างค่า Contention window ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ในแต่ละมาตรฐานดังตารางที่ 2 แล้วจึงนำไปคูณกับช่องเวลา (slottime) ซึ่งจะเป็นคาบระยะเวลาเพื่อใช้เป็นระยะเวลาในการรอที่จะตรวจสอบเพื่อเข้าใช้ตัวกลางอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าเวลารอคอยการตรวจสอบช่องสัญญาณ หรือ Backoff Time ในขณะที่โหนดทำการนับเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบตัวกลางแล้วพบว่าตัวกลางมีการใช้งาน จะทำการหยุดนับเวลาดังกล่าวจนกระทั่งตัวกลางว่างเป็นระยะเวลาที่เท่ากับ DIFS จึงเริ่มทำการนับเวลา Backoff ต่อจนกระทั่งหมดเวลาดังกล่าวจึงมีสิทธิ์ตรวจสอบตัวกลางเพื่อใช้ในการส่งข้อมูล ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นดังเช่นรูปที่ 6 กลไกดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาการชนกันของข้อมูลและลดปัญหาการแย่งชิงการเข้าถึงตัวกลางได้ในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเครือข่ายและแก้ปัญหา Hidden terminal ได้ทั้งหมด เนื่องมาจากตัวกลางในการติดต่อสื่อสารเป็นตัวกลางที่มีอัตราการเกิดข้อผิดพลาดในการส่งข้อมูลที่สูงกว่าเครือข่ายแบบใช้สาย ทำให้การส่งข้อมูลของโหนดที่ได้สิทธิ์ในการใช้ตัวกลางอาจเกิดข้อผิดพลาดในการส่งข้อมูลได้ง่ายตามคุณสมบัติของตัวกลางและระยะห่างระหว่างโหนดที่ทำการส่งข้อมูล ทำให้โหนดที่ทำการส่งข้อมูลไม่สามารถทราบได้เลยว่าการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งประสบความสำเร็จหรือไม่

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของมาตรฐาน IEEE 802.11 **[1]**

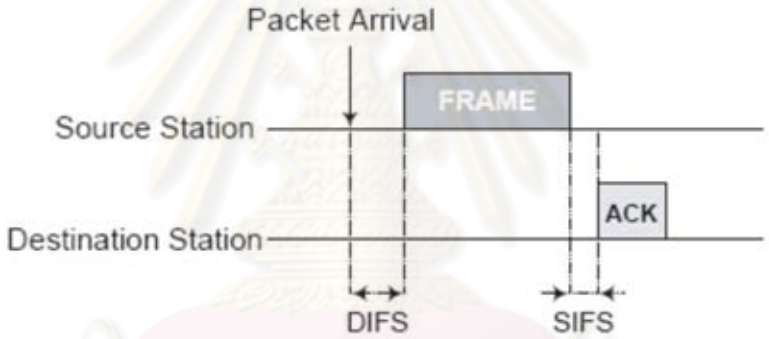
Parameter	802.11 (FHSS)	802.11 (DSSS)	802.11 (IR)	802.11b	802.11a
t_{slot}	50 µsec	20 µsec	8 µsec	20 µsec	9 µsec
SIFS	28 µsec	10 µsec	10 µsec	10 µsec	16 µsec
DIFS	SIFS + (2 x t_{slot})				
Operating Frequency	2.4 GHz	2.4 GHz	850-950 nm	2.4 GHz	5 GHz
Maximum Data Rate	2 Mbps	2 Mbps	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
CWmin	15	31	63	31	15
CWmax	1023	1023	1023	1023	1023

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงพัฒนากระบวนการ CSMA/CA ให้มีความสามารถในการตรวจสอบว่าการส่งข้อมูลในครั้งนั้นๆ ประสบความสำเร็จหรือไม่ โดยการเพิ่มกระบวนการในส่วนของโหนดที่ทำการรับข้อมูลให้ทำการส่งเฟรมข้อมูลตอบรับหรือ Acknowledgement (Ack) กลับไปยังโหนดที่ส่งข้อมูล จึงทำให้ CSMA/CA มีความสามารถในการตรวจสอบความสำเร็จในการส่งข้อมูล ซึ่งช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ของเครือข่ายอีกด้วย หรือเรียกว่า CSMA/CA With Acknowledgement การปรับปรุงดังกล่าวได้ทำการเพิ่มตัวนับเวลา Short Inter-Frame Space (SIFS) ซึ่งมีคาบระยะเวลาที่สั้นกว่า DIFS ก่อนทำการส่งเฟรม Ack กลับไปยังโหนดที่ทำการส่งข้อมูล โดยถ้าโหนดที่ทำการส่งข้อมูลไม่ได้รับเฟรม Ack จากโหนดที่ได้รับข้อมูลภายในระยะเวลาที่กำหนด จะเริ่มทำการส่งเฟรมข้อมูลนั้นๆ ใหม่อีกหนึ่งครั้งดังรูปที่ 7 แต่อย่างไรก็ดีการพัฒนาปรับปรุงครั้งนี้ไม่ได้คำนึงถึงปัญหา Hidden Terminal ซึ่งเป็นปัญหาหลักและมีความสำคัญของชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในเครือข่ายไร้สาย

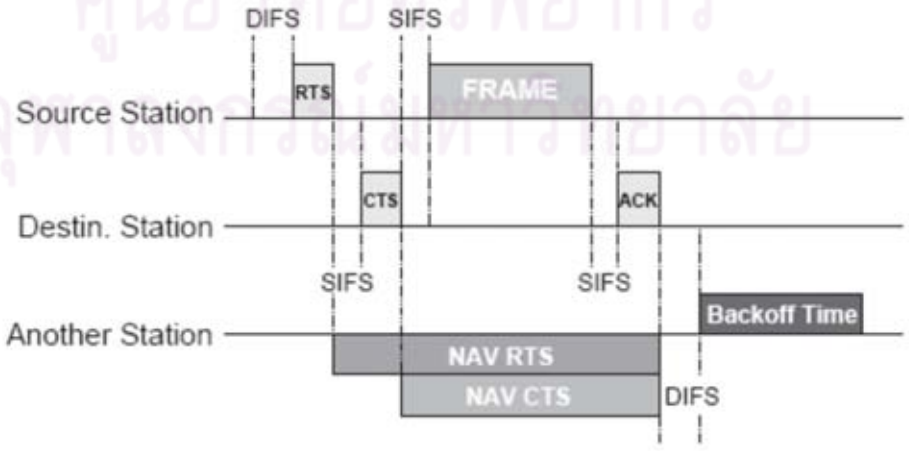


รูปที่ 6 กระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐาน **[4]**

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้เพิ่มกระบวนการในขั้นตอนก่อนการส่งข้อมูลขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวได้เพิ่มเฟรมควบคุม (Control frame) ที่ใช้ในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง ได้แก่ Request To Send (RTS) และ Clear To Send (CTS) กระบวนการดังกล่าวจะเริ่มดำเนินการเมื่อโหนดนั้นๆ ได้สิทธิ์ในการใช้ตัวกลางแล้ว จึงทำการแพร่กระจายเฟรม RTS ออกไปยังเครือข่าย เมื่อโหนดอื่นๆที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกับโหนดที่ทำการส่งข้อมูลได้รับเฟรมดังกล่าวจะทราบว่าจะมีการใช้ตัวกลางนั้นๆ พร้อมทั้งหยุดการนับเวลา Backoff และรอจนกระทั่งการใช้ตัวกลางครั้งนั้นสำเร็จเรียบร้อย จากการได้ยินเฟรมตอบรับ (Ack) ส่วนโหนดที่เป็นโหนดที่รับข้อมูลเมื่อได้รับเฟรม RTS แล้วจะทำการตอบกลับโดยการส่งเฟรม CTS ไปยังโหนดที่ต้องการจะส่งข้อมูล โดยถ้าโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลได้รับเฟรม CTS ก็จะเริ่มทำการส่งข้อมูลนั้นๆ ทันที ในกรณีที่ไม่ได้รับเฟรม CTS แสดงว่าโหนดที่ต้องรับข้อมูลนั้นๆ อาจมีการติดต่อสื่อสารกับโหนดอื่นๆในเครือข่ายหรือเกิดความสูญเสียของเฟรมข้อมูลเกิดขึ้น ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 กระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบพื้นฐานที่มีเฟรมตอบรับ **[4]**



รูปที่ 8 กระบวนการเข้าถึงตัวกลางแบบ CSMA/CA ที่มีเฟรมตอบรับ **[4]**

เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ประกาศเป็นมาตรฐานในรุ่นแรก มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและยังไม่มีการรองรับคุณสมบัติใหม่ๆ ที่เหมาะสมในปัจจุบัน ทำให้ทาง IEEE ได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดเพื่อทำการพัฒนาชุดมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มจะทำการพัฒนาในเฉพาะส่วนที่ตนเองได้รับมอบหมาย คณะทำงานที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g, และ IEEE 802.11i โดยมีรายละเอียดพร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบมาตรฐานต่างๆดังตารางที่ 3 ดังนี้

IEEE 802.11a

มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีในการเข้าสัญญาณข้อมูลแบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) โดยปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps โดยใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งไม่อนุญาตให้ใช้ได้ในบางประเทศ และเนื่องจากมาตรฐานนี้มีระยะในการติดต่อสื่อสารที่ค่อนข้างสั้นคือ ประมาณ 30 เมตร ซึ่งต่างจากมาตรฐาน 802.11b ที่มีระยะในการติดต่อสื่อสารไกลสุดถึง 100 เมตร ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลทำให้ มาตรฐาน 802.11a เป็นที่นิยมค่อนข้างน้อย

IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีในการเข้าสัญญาณข้อมูลแบบ Complimentary Code Keying (CCK) ผนวกกับ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ของ ISM ซึ่งมีอุปกรณ์หลายชนิดที่ใช้ความถี่นี้ในการใช้งานไม่ว่าจะเป็น Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สาย หรือแม้กระทั่งเตาไมโครเวฟ อย่างไรก็ดี มาตรฐาน 802.11b เป็นที่นิยมอย่างมากเนื่องจากมีระยะการใช้งานติดต่อสื่อสารที่ไกลและอุปกรณ์ที่ใช้งานมีราคาถูก

IEEE 802.11g

มาตรฐาน 802.11g ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการเข้าสัญญาณข้อมูลแบบ OFDM กับช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ทำให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54 Mbps และมีระยะการใช้งานติดต่อสื่อสารที่ใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.11b นอกจากนี้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐาน IEEE 802.11g สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b ได้อีกด้วย พร้อมทั้งอุปกรณ์มีราคาที่ถูกลง ด้วยเหตุนี้เป็นผลทำให้มาตรฐาน 802.11g มีความนิยมใกล้เคียงกับมาตรฐาน 802.11b

IEEE 802.11e

มาตรฐาน 802.11e ได้ทำการปรับปรุงในส่วนของชั้นการเข้าถึงตัวกลาง (MAC Layer) ให้รองรับการใช้งาน Qualitiy of Service (QoS) ที่เกี่ยวข้องกับด้านมัลติมีเดีย เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ให้รองรับ QoS โดยที่ไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนมาตรฐานเดิม ดังนั้นมาตรฐานนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้

IEEE 802.11i

มาตรฐาน 802.11i ได้ทำการปรับปรุงส่วนของชั้นการเข้าถึงตัวกลาง (MAC Layer) ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 ในช่วงเริ่มต้นมีจุดอ่อนทางด้านความปลอดภัยของเครือข่ายเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) ที่ทำการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่าย

IEEE 802.11n

มาตรฐาน 802.11n ได้ทำการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพทางด้านอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงมากขึ้น โดยการประยุกต์ใช้สายอากาศในรูปแบบของ Multiple Input, Multiple output antennas (MIMO) ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดได้ถึง 140 Mbps นอกจากนี้อุปกรณ์ที่รองรับ IEEE 802.11n ยังสามารถใช้กับอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11 อื่นๆได้อีกด้วย

IEEE 802.11y

มาตรฐาน 802.11y ได้ทำการพัฒนาต่อจากมาตรฐาน 802.11a เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ช่องสัญญาณวิทยุความถี่ที่ 5 GHz ซึ่งบางประเทศไม่อนุญาตให้นำไปใช้ โดยได้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณวิทยุความถี่มาใช้ที่ 3.7 GHz เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยยังคงความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราสูงสุดที่ 54 Mbps และระยะในการติดต่อสื่อสารที่ 30 เมตร

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบมาตรฐานของโพรโทคอล IEEE 802.11

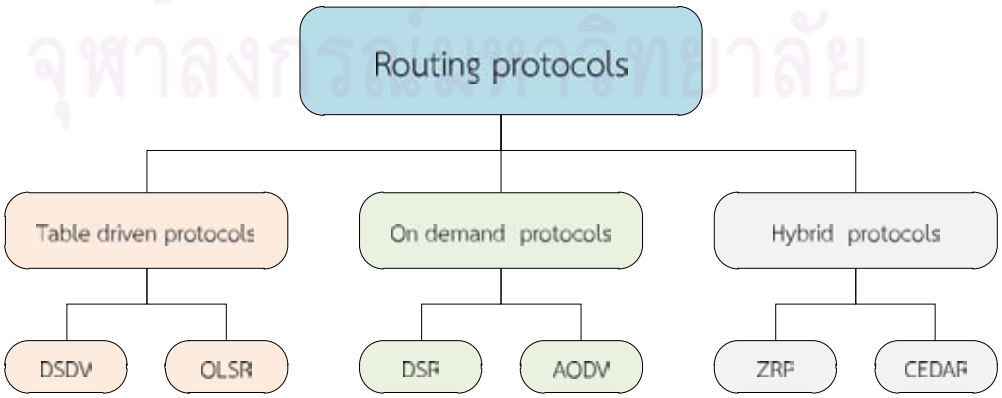
802.11 Protocol	Frequency (GHz)	Bandwidth (MHz)	Maximum data rate (Mbps)	Allowable MIMO streams	Modulation	Approximate indoor range (Meters)
-	2.4	20	2	1	DSSS	35
A	5	20	54	1	OFDM	35
B	2.4	20	11	1	DSSS	40
G	2.4	20	54	1	OFDM,DSSS	40
N	2.4 / 5	20 / 40	72.2 / 150	4	OFDM	70
Y	3.7	20	54	1	OFDM	35

2.1.2 ประเภทของโพรโทคอลจัดเส้นทางในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน

ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานมีโพรโทคอลที่ใช้สำหรับการค้นหาเส้นทางเป็นจำนวนมากเมื่อทำการแบ่งประเภทโพรโทคอลจัดเส้นทางโดยใช้ลักษณะของกระบวนการค้นหาและซ่อมแซมเส้นทางจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ Table Driven Routing Protocol, On-Demand Routing Protocol และ Hybrid Routing Protocol ดังรูปที่ 9 โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

โพรโทคอลแบบ Table Driven Routing จะทำการกระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางออกไปทั่วทั้งเครือข่ายอย่างสม่ำเสมอด้วยคาบระยะเวลาที่แน่นอน แล้วจึงรวบรวมข้อมูลเส้นทางของโหนดต่างๆ ภายในเครือข่ายเพื่อทำการสร้างและปรับปรุงตารางเส้นทาง (Routing Table) ของตนเองเป็นระยะๆ เนื่องจากโพรโทคอลจัดเส้นทางในลักษณะนี้มีการปรับปรุงข้อมูลภายในตารางเส้นทางอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ข้อดีของโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภทนี้ คือ เส้นทางที่บรรจุอยู่ในตารางเส้นทางของแต่ละโหนดมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงอย่างสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเครือข่าย ทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางภายในเครือข่ายสามารถดำเนินการได้ทันที เพราะมีข้อมูลของเส้นทางอยู่ในตารางเส้นทางเรียบร้อยแล้ว สำหรับข้อด้อยหลักๆ ของโพรโทคอลประเภทนี้คือ มีปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางและดูแลปรับปรุงเส้นทางเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการแพร่กระจายข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางเพื่อทำการปรับปรุงเส้นทางอยู่อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโหนดภายในเครือข่ายเป็นอย่างมาก โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางในกลุ่มนี้ที่ได้รับความนิยมได้แก่ DSDV**[5]**,OLSR**[6]**

ในส่วนของโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ On-Demand Routing จะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางออกไปเฉพาะกรณีที่โหนดต้นทางต้องการติดต่อสื่อสารไปยังโหนดปลายทาง และเมื่อทราบข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางแล้ว จึงเริ่มทำการส่งข้อมูลไปตามเส้นทางดังกล่าว โดยข้อมูลเส้นทางที่ได้รับมาจะทำการเก็บไว้ในตารางเส้นทางเช่นเดียวกับโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Table Driven แต่จะไม่ดำเนินการปรับปรุงข้อมูลในตารางเส้นทางเป็นระยะๆ ส่งผลให้สามารถลดจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการปรับปรุงตารางเส้นทางลงได้



รูปที่ 9 โพรโทคอลจัดเส้นทางของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน

โดยข้อจำกัดของโพรโทคอลประเภทนี้ คือ ระยะเวลาในการใช้ทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางก่อนทำการรับ – ส่งข้อมูลใดๆระหว่างโหนดที่มีระยะเวลาที่ยาวนาน และข้อมูลเส้นทางในการติดต่อสื่อสารอาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายได้ง่าย โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางในกลุ่มนี้ที่ได้รับความนิยมได้แก่ DSR**[7]**, AODV**[8],[9]**

สำหรับโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภทสุดท้ายจะทำการแบ่งเครือข่าย ออกเป็นส่วนย่อยๆ โดยแต่ละส่วนย่อยๆ จะมีตัวแทนกลุ่มทำหน้าที่ในการติดต่อสื่อสารระหว่างกลุ่มย่อยต่างๆ หลังจากนั้นตัวแทนกลุ่มย่อยจึงทำการส่งต่อให้แก่สมาชิกภายในกลุ่มของตนเอง โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภทนี้จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครือข่ายเมื่อโหนดที่เป็นตัวแทนกลุ่มไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ ทำให้สมาชิกภายในกลุ่มย่อยไม่สามารถทำการติดต่อสื่อสารกับกลุ่มย่อยอื่น ๆ ได้ หรือปัญหาในการเลือกตัวแทนกลุ่มให้มีความเหมาะสมที่สุด รวมไปถึงระเบียบวิธีการเมื่อสมาชิกภายในกลุ่มย่อยทำการเปลี่ยนกลุ่มเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่าย ประกอบกับโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภทนี้มีความซับซ้อนในการใช้งานที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการติดต่อประสานงานหลายส่วน ไม่ว่าจะเป็นการเข้าร่วมหรือออกจากการเป็นสมาชิกของกลุ่มย่อย การค้นหาเส้นทางระหว่างตัวแทนของกลุ่มย่อยเพื่อทำการติดต่อสื่อสาร รวมไปถึงกระบวนการคัดเลือกตัวแทนกลุ่มย่อย ทำให้การประยุกต์ไปใช้งานมีความซับซ้อนสูงกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทางทั้งสองประเภทข้างต้น โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางในกลุ่มนี้ที่ได้รับความนิยมได้แก่ ZRP**[10]**, CEDAR**[11]**

แนวคิดหลักของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน เน้นความเรียบง่ายและรวดเร็วในการติดต่อสื่อสาร รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานในสถานที่ที่ยากลำบากหรือไม่มีโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ทำให้โพรโทคอลแบบลูกผสมไม่เหมาะสมกับสถานการณ์ดังกล่าว แต่เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเครือข่ายไร้สายที่มีการวางโครงสร้างเครือข่ายไว้เรียบร้อยแล้วหรือต้องการความซับซ้อนในการติดต่อสื่อสารที่สูงขึ้น ทำให้กล่าวได้ว่าโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Table driven และโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ On-demand มีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานมากที่สุด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการค้นหาเส้นทางและปรับปรุงเส้นทางระหว่างโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Table Driven และ โพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ On-Demand พบว่าปริมาณกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการค้นหาเส้นทางและ/หรือปรับปรุงเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ On-Demand จะมีปริมาณที่น้อยกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Table Driven เนื่องจากโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ On-Demand จะทำการค้นหาเส้นทางเฉพาะในกรณีที่โหนดในเครือข่ายต้องการเส้นทางติดต่อสื่อสารไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Table Driven ที่จะทำการค้นหาเส้นทางและปรับปรุงเส้นทางอยู่อย่างสม่ำเสมอ แม้ว่าจะไม่มีการติดต่อสื่อสารกันภายในเครือข่ายก็ตาม ส่งผลให้ปริมาณกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางและปรับปรุงเส้นทางมีปริมาณมากกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภท On-Demand อย่างเห็นได้ชัด โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางประเภท On-Demand ที่เป็นที่นิยมได้แก่ Dynamic Source Routing Protocol (DSR) **[7]** และ Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV) **[8],[9]** แม้ว่าทั้งสองโพรโทคอลมีลักษณะการค้นหาเส้นทางในการติดต่อสื่อสารตามคำขอที่เหมือนกัน แต่มีกระบวนการค้นหาเส้นทางที่แตกต่างกัน กล่าวคือ โพรโทคอล DSR เป็น

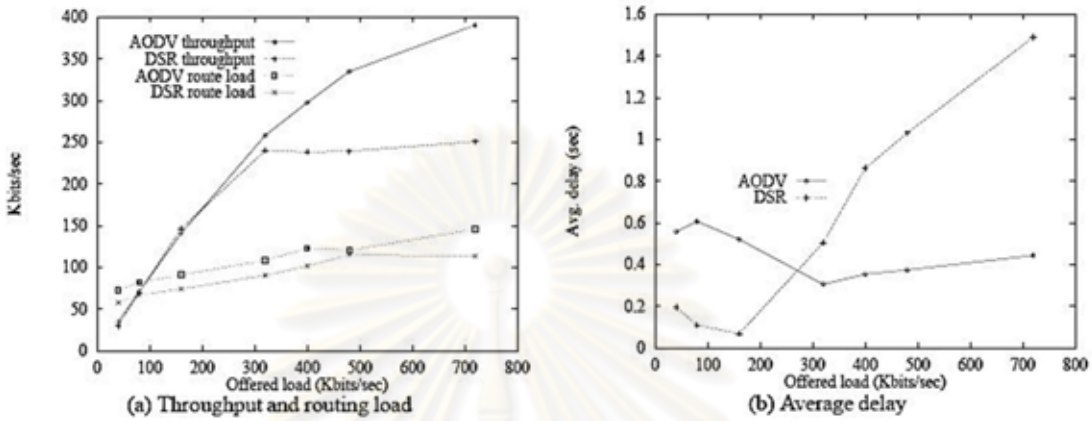
โพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Source Routing เมื่อต้องการค้นหาเส้นทาง โหนดต้นทางจะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางซึ่งบรรจุเส้นทางย้อนกลับมายังโหนดต้นทางเข้าสู่เครือข่าย แล้วจึงทำการส่งต่อจนกระทั่งโหนดปลายทางได้รับกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางดังกล่าว โดยในระหว่างที่ทำการส่งโหนดอื่นๆที่ได้รับ จะบันทึกข้อมูลเส้นทางที่บรรจุอยู่ในส่วนหัวของกลุ่มข้อมูลลงในตารางเส้นทาง ทำให้โหนดปลายทางสามารถสร้างเส้นทางและส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทาง โดยวิธีการบรรจุเส้นทางย้อนกลับไปยังโหนดต้นทาง ทำให้โหนดในเครือข่ายมีเส้นทางได้หลายเส้นทางสำหรับติดต่อสื่อสารไปยังโหนดปลายทางหนึ่งๆ ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอล AODV ที่จะมีเพียงหนึ่งเส้นทางต่อหนึ่งโหนดปลายทางเท่านั้น และในแต่ละเส้นทางจะมีหมายเลขลำดับกำกับอยู่ ซึ่งกำหนดโดยโหนดปลายทาง เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดวังวนของกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางพร้อมทั้งสามารถระบุถึงเส้นทางที่ใหม่และป้องกันการใช้ข้อมูลเส้นทางที่ไม่มีการปรับปรุงอีกทางหนึ่งด้วย โดยในตารางเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะบรรจุข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านที่ใช้ในการส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง และหมายเลขลำดับของแต่ละเส้นทางเท่านั้น

จากงานวิจัยของ Perkins C. และคณะ**[12]** และ Maltz D. และคณะ**[13]** ได้ทำการเปรียบเทียบโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ On-Demand ระหว่างโพรโทคอล Dynamic Source Routing Protocol (DSR) และโพรโทคอล Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV) พบว่าปริมาณของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงเส้นทางมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายเพิ่มสูงขึ้นภายใต้เครือข่ายที่มีจำนวนโหนดที่เท่ากัน และเมื่อจำนวนโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางมีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

จากงานวิจัยดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล DSR แสดงประสิทธิภาพได้ดีกว่าโพรโทคอล AODV เฉพาะในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดและความคับคั่งของการจราจรของข้อมูลในระดับต่ำ แต่สำหรับเครือข่ายที่มีปริมาณการจราจรของข้อมูลที่คับคั่ง ประกอบกับจำนวนโหนดในเครือข่ายมีปริมาณมากกลับพบว่าโพรโทคอล AODV สามารถแสดงประสิทธิภาพในการรับ – ส่งกลุ่มข้อมูลได้เป็นอย่างดี และมีความล่าช้าในการติดต่อสื่อสารที่น้อยกว่าโพรโทคอล DSR ดังรูปที่ 10 ที่แสดงประสิทธิภาพของการส่งกลุ่มข้อมูลและค่าความล่าช้าของทั้งสองโพรโทคอลเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการส่งกลุ่มข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายที่มีจำนวน 100 โหนด เนื่องมาจากโพรโทคอล DSR ขาดกระบวนการจัดการเส้นทางสำรองที่ไม่สามารถใช้งานได้ในตารางเส้นทาง ทำให้มีการนำเส้นทางเหล่านั้นมาใช้งาน ซึ่งส่งผลถึงประสิทธิภาพโดยรวมของเครือข่ายเป็นอย่างมาก ในขณะที่โพรโทคอล AODV ที่มีเพียงหนึ่งเส้นทางในการติดต่อสื่อสารไปยังโหนดปลายทางทำให้ง่ายต่อการจัดการดูแลเส้นทางภายในตารางเส้นทาง แต่มีข้อเสียคือความล่าช้าและปริมาณค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง

เมื่อพิจารณาถึงโพรโทคอลที่เหมาะสมในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานนั้นควรเป็นโพรโทคอลที่มีความเสถียรภาพในการติดต่อสื่อสารทุกสภาพแวดล้อม รวมไปถึงมีกระบวนการค้นหาเส้นทางและปรับปรุงรักษาเส้นทางที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โพรโทคอล AODV มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน และปรับปรุงพัฒนามากกว่าโพรโทคอลอื่นๆ เนื่องจากเหตุผลในด้านของการจัดการเส้นทางในตาราง

เส้นทางที่ไม่ซับซ้อนและใช้พื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่น้อย การค้นหาเส้นทางที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพ รวมไปถึงเสถียรภาพของประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายที่มีปริมาณการจราจรที่คับคั่ง และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงภายในเครือข่ายที่สูง



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพและความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลของโพรโทคอล AODV และ DSR เมื่อทำการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายที่มีจำนวน 100 โหนด **[12]**

2.1.3 Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Protocol

โพรโทคอล Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) เป็นโพรโทคอลที่ใช้ในกระบวนการจัดการเส้นทางภายในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อให้การติดต่อสื่อสารดำเนินไปได้โดยอาศัยโหนดเพื่อนบ้านเป็นตัวช่วยในการส่งต่อข้อมูลนั้นๆ ไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการติดต่อ โพรโทคอล AODV ได้มีการพัฒนามากจากโพรโทคอล Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) **[5]** ซึ่งเป็นโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบ Table Driven ที่ทำการกระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางออกไปทั่วทั้งเครือข่ายอย่างสม่ำเสมอในคาบระยะเวลาที่แน่นอน แล้วจึงรวบรวมข้อมูลเส้นทางของโหนดต่างๆ ภายในเครือข่ายเข้ามาเก็บและปรับปรุงตารางเส้นทางเป็นระยะๆ โดยในแต่ละเส้นทางจะมีหมายเลขลำดับ (Sequence Number) ของโหนดปลายทาง เพื่อบอกถึงความใหม่ของเส้นทางที่อยู่ในตารางเส้นทาง แต่ด้วยข้อด้อยบางประการของโพรโทคอลแบบ Table Driven จึงได้มีการพัฒนาโพรโทคอล AODV ขึ้นมา โดยอาศัยแนวคิดในการใช้หมายเลขลำดับของเส้นทางของโพรโทคอล DSDV มาประยุกต์ใช้และทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นแบบตามคำขอ กล่าวคือจะทำการค้นหาเส้นทางเมื่อโหนดต้นทางต้องการทำการติดต่อสื่อสารไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและบำรุงรักษาเส้นทางในเครือข่ายมีปริมาณลดลง แต่ส่งผลให้ความล่าช้าของกลุ่มข้อมูลมีระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากต้องรอข้อมูลเส้นทางจากกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อใช้เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

ส่วนประกอบที่สำคัญของโพรโทคอล AODV ส่วนหลักๆคือ กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการต่างๆของโพรโทคอล, ตารางข้อมูลเส้นทาง และกระบวนการการทำงานของโพรโทคอล AODV ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.1.3.1 กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ ของโพรโทคอล

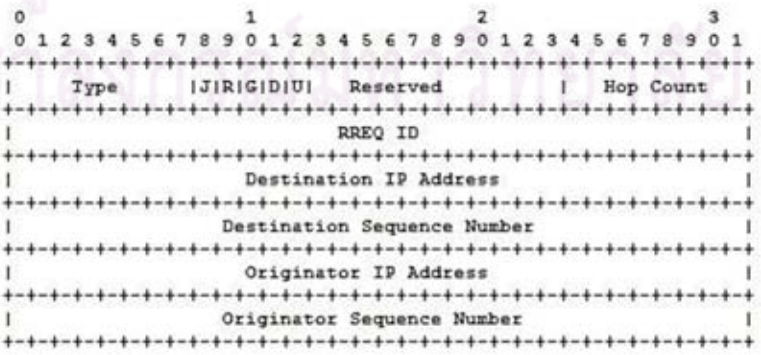
กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในโพรโทคอล AODV ที่สำคัญๆจะมีอยู่ด้วยกันทั้งหมดประมาณ 4 กลุ่มข้อมูล ซึ่งแต่ละกลุ่มข้อมูลจะมีหน้าที่และความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆของโพรโทคอล AODV โดยมีรายละเอียดของแต่ละกลุ่มข้อมูลดังนี้

1. **กลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทาง หรือ Route request message (RREQ)** เป็นกลุ่มข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในการร้องขอข้อมูลเส้นทางของกระบวนการค้นหาเส้นทางและกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง โดยโครงสร้างของกลุ่มข้อมูลร้องขอเส้นทางจะมีลักษณะดังรูปที่ 11 ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลขกลุ่มข้อมูล RREQ, โหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง, และโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูล RREQ และหมายเลขลำดับของโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูล RREQ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 หมายเลขกลุ่มข้อมูล RREQ : เป็นหมายเลขลำดับของกลุ่มข้อมูล RREQ โดยหมายเลขดังกล่าวจะดูแลโดยโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูลดังกล่าว และจะมีหมายเลขที่ไม่ซ้ำกันเพื่อป้องกันการเกิดการวนกลับในส่งกลุ่มข้อมูล RREQ ภายในเครือข่าย หรือป้องกันการรับและส่งกลุ่มข้อมูลเดิมซ้ำหลายๆ ครั้ง

1.2 โหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง : จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจของกระบวนการสร้างหรือซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลว่าเส้นทางนั้นๆ มีความเป็นปัจจุบันเพียงใด และยังใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นทางของตารางเส้นทางไปยังโหนดปลายทางอีกด้วย

1.3 โหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูลและหมายเลขลำดับของโหนด : จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นทางย้อนกลับของตารางเส้นทางไปยังโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูล RREQ เพื่อทำการส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทาง

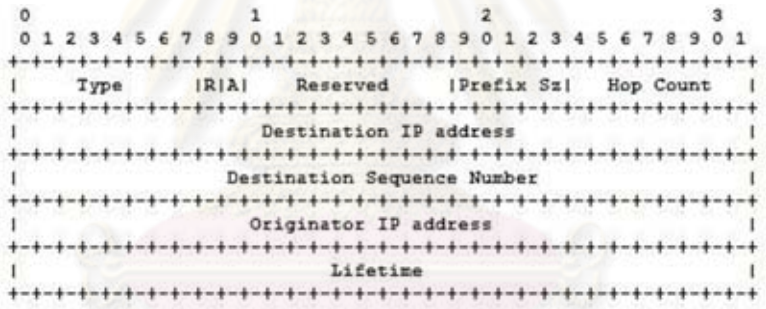


รูปที่ 11 โครงสร้างกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ของโพรโทคอล AODV

2. กลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง หรือ Route reply message (RREP) เป็นกลุ่มข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในการตอบรับข้อมูลเส้นทางของกระบวนการค้นหาเส้นทางและกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง กลุ่มข้อมูลนี้จะถูกส่งจากโหนดปลายทางไปยังโหนดต้นทางตามเส้นทางย้อนกลับที่ได้ถูกสร้างไว้ตั้งแต่เมื่อได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทาง เพื่อทำการแจ้งให้โหนดต้นทางทราบถึงข้อมูลเส้นทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร โดยกลุ่มข้อมูล RREQ มีโครงสร้างกลุ่มข้อมูลดังรูปที่ 12 ซึ่งประกอบไปด้วยโหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง, และโหนดที่ทำการค้นหาเส้นทาง รวมไปถึงอายุของเส้นทาง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

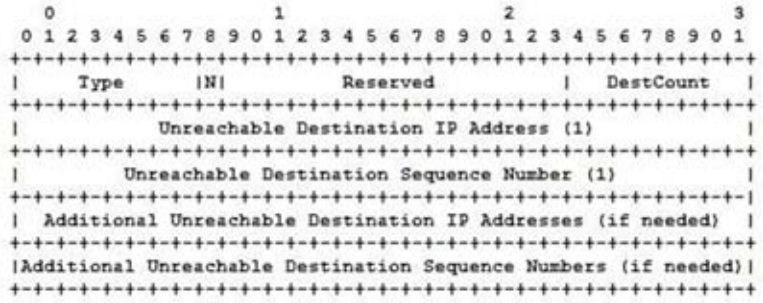
2.1 โหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางของกลุ่มข้อมูล RREP : ใช้เพื่อแจ้งหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางที่เป็นปัจจุบัน ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการสร้างหรือซ่อมแซมเส้นทาง โดยโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางให้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มข้อมูล RREP

2.2 โหนดต้นทาง : เพื่อใช้เป็นการระบุว่าโหนดใดในเครือข่ายทำการร้องขอเส้นทางในการส่งกลุ่มข้อมูลมายังโหนดปลายทาง ซึ่งเป็นปลายทางของกลุ่มข้อมูล RREP และทำให้การส่งกลุ่มข้อมูลดังกล่าวกลับไปยังโหนดที่ทำการร้องขอเส้นทางได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 12 โครงสร้างกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง (RREP) ของโพรโทคอล AODV

3. กลุ่มข้อมูลแจ้งความผิดพลาดของเส้นทาง หรือ Route error message (RERR) เป็นกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการแจ้งข้อมูลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของเส้นทางต่างๆ โดยกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะถูกเรียกใช้เมื่อโพรโทคอล AODV ตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นในเส้นทาง และไม่ต้องการทำการซ่อมแซมเส้นทาง หรือการซ่อมแซมเส้นทางประสบความล้มเหลว จึงจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลดังกล่าวเพื่อแจ้งถึงความผิดพลาดของเส้นทางให้แก่โหนดต้นทางและโหนดที่เกี่ยวข้องทราบ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของกลุ่มข้อมูลดังรูปที่ 13 ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลโหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางที่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 13 โครงสร้างกลุ่มข้อมูลแจ้งความผิดพลาดของเส้นทาง (RERR)

4. กลุ่มข้อมูลตรวจสอบการเชื่อมต่อ หรือ Hello message เป็นกลุ่มข้อมูลที่มีโครงสร้างลักษณะเดียวกันกับกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง เพียงแต่จะทำการเปลี่ยนข้อมูลโหนดปลายทางและหมายเลขลำดับโหนดปลายทางเป็นข้อมูลและหมายเลขลำดับของตนเอง พร้อมทั้งกำหนดให้อายุของกลุ่มข้อมูลมีค่าเท่ากับ 1 และจะทำการแพร่กระจายออกไปเป็นช่วงเวลา โดยจุดประสงค์ของกลุ่มข้อมูลนี้ ใช้เพื่อการตรวจสอบสถานการณ์เชื่อมต่อกับโหนดเพื่อนบ้านเท่านั้น ซึ่งกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้เมื่อในกรณีที่ชั้นเชื่อมต่อ (Link Layer) ไม่มีความสามารถในการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อระหว่างโหนด

2.1.3.2 ตารางข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล AODV

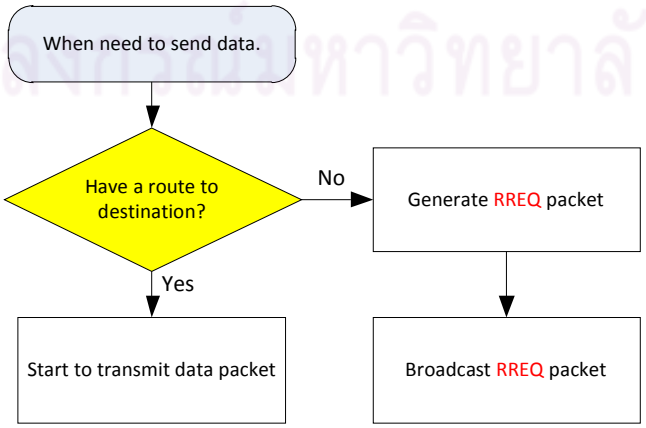
สำหรับตารางข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะเป็นตารางที่มีข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการส่งต่อกลุ่มข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ตารางข้อมูลเส้นทางจะถูกสร้างจากกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยมีโครงสร้างและส่วนประกอบดังตารางที่ 4 โดยข้อมูลที่สำคัญของตารางเส้นทาง ได้แก่ โหนดปลายทาง, หมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง, โหนดถัดไปที่ใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูล, จำนวนครั้งในการส่งต่อถึงโหนดปลายทาง, ข้อมูลของโหนดก่อนหน้า, อายุและสถานะของข้อมูลเส้นทาง การสร้างและปรับปรุงตารางเส้นทางส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งจะทำการสร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโหนดต้นทางเมื่อได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทาง และจะทำการสร้างเส้นทางไปยังโหนดปลายทางเมื่อได้รับกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง โดยรายละเอียดในการสร้างและปรับปรุงตารางข้อมูลเส้นทางจะกล่าวในส่วนของกระบวนการทำงานของโพรโทคอล AODV

ตารางที่ 4 โครงสร้างตารางข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล AODV

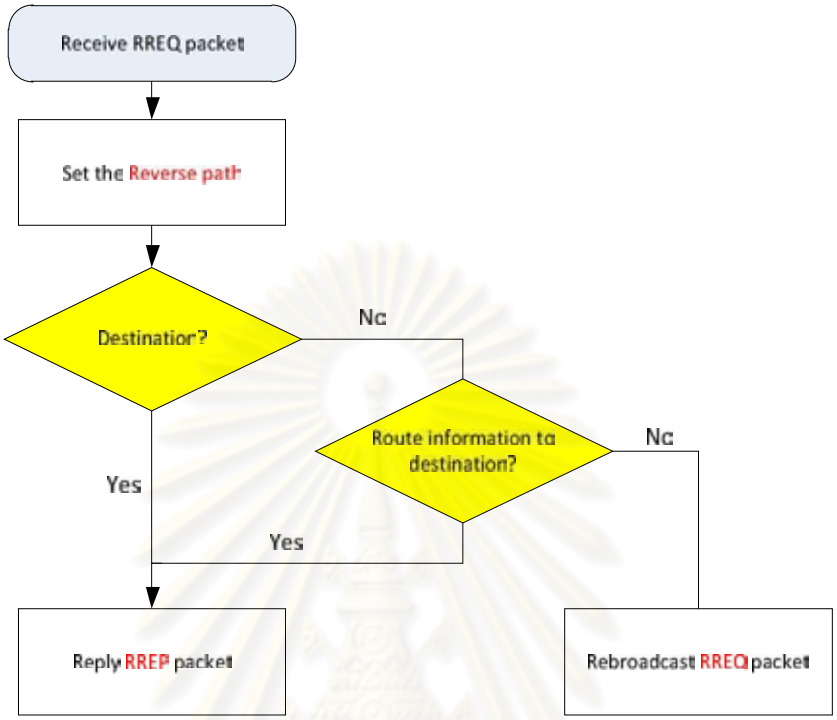
Dest.	Seq No.	Next hop	Hop count	Precursor list	Expire time	Status
....	....	....	....	....	....	...

2.1.3.3 กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV

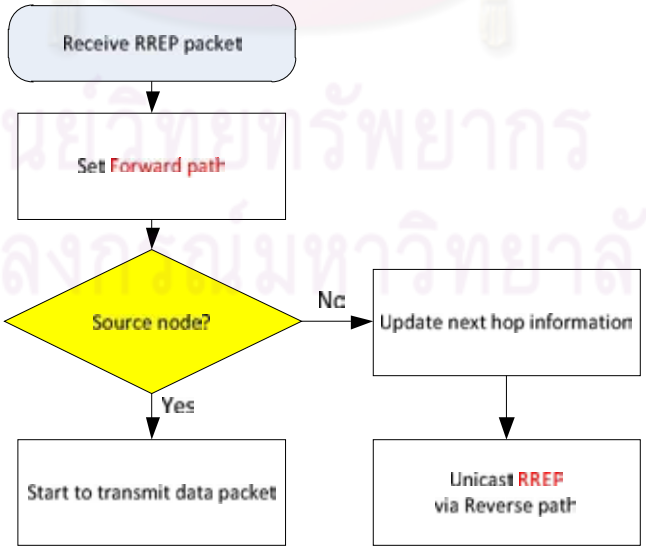
เมื่อโหนดใดๆ ต้องการส่งกลุ่มข้อมูลไปยังโหนดอื่นๆ ในเครือข่าย จะทำการตรวจสอบตารางข้อมูลเส้นทาง เพื่อทำการค้นหาเส้นทางที่ใช้ในการส่งต่อ แต่ถ้าไม่มีข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางดังกล่าว จึงจะเข้าสู่กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV ที่เริ่มต้นด้วยการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลร้องของเส้นทาง หรือ Route request message (RREQ) ไปทั่วทั้งเครือข่าย ซึ่งมีแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 14 โดยโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะทำการบันทึกหมายเลขกลุ่มข้อมูลไว้ เพื่อป้องกันการเกิดการวนกลับของกลุ่มข้อมูล RREQ หลังจากนั้นจึงทำการสร้างเส้นทางย้อนกลับ (Reverse route) ไปยังโหนดที่ทำการค้นหาเส้นทางหรือโหนดต้นทาง พร้อมทั้งทำการพิจารณาเส้นทางในตารางของตนเองว่า มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ระบุไว้ในกลุ่มข้อมูล RREQ ได้หรือไม่ ในกรณีที่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้นๆ แต่มีหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางที่น้อยกว่าที่ระบุไว้ในกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทาง หรือไม่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้นๆ จึงจะทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลนี้ไปยังโหนดเพื่อนบ้านต่อๆไป ส่วนในกรณีที่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางและมีหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางที่มากกว่าที่ระบุไว้ในกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทาง แสดงว่าโหนดดังกล่าวมีเส้นทางที่ใหม่กว่า หรือในกรณีที่โหนดปลายทางได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าว จึงจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทาง ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 15 ในกรณีที่โหนดปลายทางได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทางจะตรวจสอบหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางที่บรรจุอยู่ใน RREQ ถ้ามีลำดับที่สูงกว่าหมายเลขลำดับของตนเองจะทำการเพิ่มหมายเลขลำดับของตนเองขึ้นไปให้สูงกว่าหมายเลขลำดับที่ระบุในกลุ่มข้อมูล RREQ โดยในการพิจารณาเลือกเส้นทางของโหนดปลายทางจะพิจารณาเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมาจากจำนวนครั้งที่ถูกส่งต่อของกลุ่มข้อมูลร้องขอข้อมูลเส้นทาง หลังจากนั้นจึงทำการส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง หรือ Route reply message (RREP) ที่มีการระบุหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางกลับไปตามเส้นทางย้อนกลับที่ได้สร้างไว้ จนกระทั่งถึงโหนดที่ทำการร้องขอเส้นทาง กระบวนการค้นหาเส้นทางจึงเสร็จสิ้นลงแล้วจึงเริ่มกระบวนการส่งข้อมูล โดยกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV สามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 14 แผนผังการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางและการสร้างกลุ่มข้อมูลร้องขอเส้นทาง



รูปที่ 15 แผนผังการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางและการสร้างกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง



รูปที่ 16 แผนผังการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางและการรับกลุ่มข้อมูลตอบรับเส้นทาง

2.1.3.4 กระบวนบำรุงรักษาเส้นทางของโพรโทคอล AODV

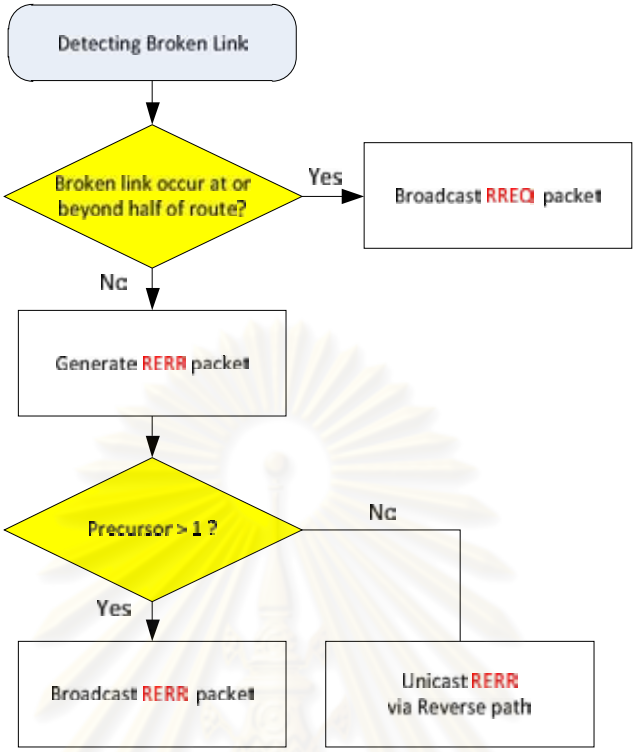
กลไกที่โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของเส้นทางมีอยู่ด้วยกันหลักๆ 2 กลไก ดังนี้ กลไกที่ 1 โพรโทคอลจัดเส้นทางได้รับข้อมูลจากชั้นเชื่อมโยง (Link Layer) ว่าเส้นทางหรือการเชื่อมต่อ (Link) ที่เชื่อมต่อระหว่างสองโหนดเกิดความเสียหาย โดยในชั้นเชื่อมโยงจะพยายามทำการส่งเฟรมร้องขอการส่งข้อมูล (RTS) ไปยังโหนดที่ต้องการติดต่อสื่อสารเป็นจำนวนอย่างมากที่สุด 7 ครั้ง ก่อนทำการแจ้งมายังโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ว่าลิงค์หรือเส้นทางนั้นๆ เกิดความเสียหายขึ้น ส่วนกลไกที่ 2 นี้จะใช้เมื่อชั้นเชื่อมโยงไม่มีความสามารถในการตรวจพบเส้นทางที่เสียหาย ทำให้โพรโทคอลต้องทำการจัดการดูแลการเชื่อมต่อของเส้นทางนั้นๆ เอง โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลขนาดเล็ก (Hello message) เป็นระยะๆ เพื่อติดต่อสื่อสารกับโหนดข้างเคียง รวมไปถึงเป็นการตรวจสอบการเชื่อมต่อกับโหนดข้างเคียงเป็นระยะๆ อีกด้วย

ในกรณีที่เส้นทางเกิดความเสียหาย ขณะทำการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางอยู่นั้น กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องโดยมีแนวทางในการจัดการกับเส้นทางที่เกิดความเสียหายขึ้น 2 แนวทางคือ ซ่อมแซมเส้นทางที่เกิดความเสียหาย หรือ สร้างเส้นทางใหม่ตั้งแต่โหนดต้นทาง ซึ่งเงื่อนไขที่โพรโทคอล AODV ใช้ในการตัดสินใจเลือกแนวทางในการซ่อมแซมเส้นทางจะพิจารณาจากจุดที่เกิดความเสียหายในเส้นทางการส่งข้อมูล โดยปกติแล้วถ้าจุดที่เกิดความเสียหายอยู่ระหว่างโหนดปลายทางและจุดกึ่งกลางเส้นทาง โพรโทคอล AODV จะทำการซ่อมแซมเส้นทางจากจุดที่เกิดความเสียหายดังกล่าว ซึ่งต่างจากในกรณีที่จุดที่เส้นทางเกิดความเสียหายใกล้กับโหนดต้นทาง โพรโทคอลจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลแจ้งความผิดพลาดของเส้นทาง (RERR) ที่ระบุเส้นทางที่เกิดความเสียหาย รวมไปถึงเส้นทางที่ได้รับผลกระทบกลับ ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อเริ่มทำการค้นหาเส้นทางใหม่ตั้งแต่โหนดต้นทางไปจนถึงโหนดปลายทาง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถสรุปได้เป็นแผนผังการทำงานที่แสดงดังรูปที่ 17

2.1.3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาปรับปรุงกระบวนบำรุงรักษาเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบตามคำขอ

ในขณะที่การเคลื่อนที่ของโหนดเป็นลักษณะพื้นฐานของเครือข่าย ซึ่งส่งผลให้รูปแบบของเครือข่ายเกิดการเปลี่ยนแปลงและเส้นทางเกิดความเสียหายบ่อยครั้ง ทำให้โพรโทคอลจัดเส้นทางต้องทำการซ่อมแซมเส้นทางตลอดเวลา อันเป็นผลทำให้มีปริมาณกลุ่มข้อมูล ที่ใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางในเครือข่ายมีเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังส่งผลถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโหนดในเครือข่ายที่ลดต่ำลง โดยแนวคิดที่นิยมนำมาใช้ในการลดปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายคือ การควบคุมการส่งข้อมูล

การควบคุมการส่งข้อมูล (Broadcast Control) จะใช้การหน่วงเหนี่ยวการส่งกลุ่มข้อมูลที่ได้นั้นให้ล่าช้าออกไปหรือลดจำนวนในการส่งกลุ่มข้อมูลที่ไม่มีความจำเป็นในเครือข่ายลง โดยปกติแล้วแนวคิดนี้มักใช้ในขั้นตอนของการค้นหาเส้นทาง เนื่องจากในขั้นตอนการค้นหาเส้นทางนั้นจะต้องทำการกระจายกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางไปทั่วทั้งเครือข่ายเพื่อทำให้มีปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ใน



รูปที่ 17 แผนผังการทำงานของกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง

กระบวนการดังกล่าวเป็นจำนวนมาก และด้วยการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยวิธีการควบคุมการส่งกลุ่มข้อมูลแบบมีเงื่อนไข จะช่วยให้สามารถลดปริมาณการส่งข้อมูลในกระบวนการค้นหาเส้นทางลงได้ โดยการกำหนดให้โหนดที่มีส่วนเกี่ยวข้องเท่านั้นหรืออยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางนั้นๆ ต่อไปได้

งานวิจัยจำนวนหนึ่งได้มีการนำแนวคิดในการควบคุมการส่งกลุ่มข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับโพรโทคอลจัดเส้นทาง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทางในรูปแบบต่างๆ กัน โดยงานวิจัยแต่ละชิ้นมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้, ข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้

งานวิจัยของ Zhu W. และคณะ**[14]** ได้เสนอแนวคิดการจัดการเส้นทางแบบล่วงหน้า (Preemptive routing) หรือ โพรโทคอล CPDSR ที่จะทำการเตือนโหนดต้นทางเมื่อคาดว่าเส้นทางที่ใช้อยู่อาจเกิดความเสียหายได้ในอนาคต และให้ทำการปรับเปลี่ยนเส้นทางไปยังเส้นทางอื่น ส่งผลให้กลุ่มข้อมูลสูญหายและค่าความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลมีจำนวนที่ลดลง นอกจากนี้แนวคิดดังกล่าวสามารถลดจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการแจ้งเส้นทางที่เกิดความเสียหายได้อีกด้วย โดยโพรโทคอล CPDSR ใช้หลักการของการใช้งานแคชในการพิจารณาเลือกเส้นทางของกระบวนการปรับเปลี่ยนเส้นทาง นอกจากนี้ยังได้เสนอช่วงระยะเวลาตอบสนองของการปรับเปลี่ยนเส้นทางที่เหมาะสมเมื่อมีการระบุถึงความไม่มั่นคงของเส้นทาง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของแนวคิดการจัดการเส้นทางแบบล่วงหน้า

งานวิจัยของ Liu G. และคณะ**[15]** ได้เสนอกลไกการซ่อมแซมเส้นทางแบบท้องถิ่น เพื่อทำการซ่อมแซมเส้นทางที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่าย โดยการกำหนดให้ทำการซ่อมแซมในบริเวณที่จำกัดการส่งกลุ่มข้อมูลไม่เกิน 2 ครั้ง เพื่อทำการค้นหาเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหาย โดยใช้แนวคิดในการควบคุมการแพร่กระจายของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโพรโทคอลดีขึ้น แต่ไม่สอดคล้องกับแนวคิดของโพรโทคอล AODV ในส่วนของการใช้หมายเลขลำดับเพื่อใช้ระบุความเป็นปัจจุบันของเส้นทาง

งานวิจัยของ Crisostomo S. และคณะ**[16]** ได้เสนอโพรโทคอล Preemptive local route repair (PLRR) ที่ทำการปรับปรุงพัฒนาโพรโทคอล AODV ให้มีความสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเส้นทางก่อนที่เส้นทางจะเกิดความเสียหายขึ้น โดยอาศัยข้อมูลเสถียรภาพของการเชื่อมต่อ ซึ่งได้จากการประเมินข้อมูลตำแหน่งของโหนด, ทิศทางการเคลื่อนที่ และเวลาที่ใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลตรวจสอบการเชื่อมต่อ (Hello message) ทำให้สามารถคาดการณ์และประเมินเสถียรภาพของการเชื่อมต่อระหว่างโหนดเพื่อนบ้านได้ นอกจากนี้โพรโทคอล PLRR ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของโหนดเพื่อนบ้านเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบใช้ตำแหน่งอื่นๆ ทำให้โพรโทคอลดังกล่าวสามารถปรับปรุงคุณภาพการให้บริการ (QoS) ได้ดียิ่งขึ้น และยังสามารถลดอัตราเส้นทางที่เกิดความเสียหายได้อีกด้วย

งานวิจัยของ Otakahm A. และคณะ**[17]** ได้เสนอโพรโทคอล AODV-2T ที่ทำการปรับปรุงพัฒนามาจากโพรโทคอล AODV ให้มีความสามารถในการค้นหาและสร้างเส้นทางสำรอง เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลได้อย่างทันท่วงทีเมื่อคาดว่าเส้นทางอาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ โดยการตรวจสอบความแรงของสัญญาณในการติดต่อสื่อสาร และพลังงานคงเหลือของโหนดเพื่อนบ้าน โดยการตรวจสอบแต่ละประเภทจะมีขีดแบ่งอยู่ด้วยกัน 2 ค่า กล่าวคือ เมื่อทำการตรวจสอบแล้วพบว่าค่าที่ได้น้อยกว่าขีดแบ่งขั้นแรกจะทำการสร้างเส้นทางสำรองขึ้นทันที และเมื่อใดก็ตามที่ค่าที่ได้จากการตรวจสอบมีค่าเท่ากับขีดแบ่งที่สองจึงจะทำการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองทันที ทำให้โพรโทคอลดังกล่าวสามารถลดจำนวนการเกิดเส้นทางที่เสียหายและยังช่วยในเรื่องของการลดจำนวนการสูญเสียกลุ่มข้อมูลและเพิ่มความต่อเนื่องของการส่งกลุ่มข้อมูลอีกด้วย แต่อย่างไรก็ดี ด้วยวิธีการดังกล่าวของโพรโทคอล AODV-2T ส่งผลให้ปริมาณค่าใช้จ่ายในเครือข่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 15% - 18% เมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV เนื่องจากมีการค้นหาเส้นทางเพื่อใช้เป็นเส้นทางสำรองอยู่บ่อยครั้ง

งานวิจัยของ Pandey M. และคณะ**[18]** ได้ทำการพิจารณาและเสนอขั้นตอนวิธีตรวจสอบการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่ายหรือ Mobility detection algorithm (MDA) เพื่อทำการแบ่งแยกสาเหตุการสูญหายของกลุ่มข้อมูลในเครือข่ายระหว่างการสูญหายกลุ่มข้อมูลเนื่องจากเส้นทางเกิดความเสียหายเพราะการเคลื่อนที่ของโหนด หรือสาเหตุจากความคับคั่งของการส่งกลุ่มข้อมูลในขณะนั้น เนื่องจากโพรโทคอลจัดเส้นทางของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานส่วนมากจะสรุปว่ากลุ่มข้อมูลสูญหายเนื่องจากเส้นทางเกิดความเสียหาย ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายมีมากขึ้น โดยที่เส้นทางนั้นๆไม่ได้เกิดความเสียหายขึ้น แต่เกิดจากความคับคั่งของการส่งกลุ่มข้อมูลในบริเวณนั้นๆ และด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างขั้นตอนวิธีตรวจสอบ

การเคลื่อนและโพรโทคอลจัดเส้นทางสามารถลดปริมาณค่าใช้จ่ายของเครือข่ายลงได้และช่วยเพิ่มปริมาณงานของเครือข่ายเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ขั้นตอนวิธีตรวจสอบการเคลื่อนที่ของงานวิจัยดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโพรโทคอลจัดเส้นทางได้หลากหลายอีกด้วย

งานวิจัยของ Wenying G. และคณะ**[19]** ได้ทำการพัฒนากระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยใช้แนวคิดในสร้างเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหาย โดยแนวคิดดังกล่าวได้ทำการเพิ่มเติมข้อมูลโหนดในเส้นทางนั้นๆ ทำให้โหนดที่ตรวจสอบจุดที่เกิดความเสียหายสามารถส่งกลุ่มข้อมูลร้องขอเพื่อทำการสร้างเส้นทางไปยังโหนดที่ถัดจากโหนดที่เกิดความเสียหายได้ ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาในการซ่อมแซมหรือสร้างเส้นทางลงได้ แต่เนื่องจากมีการเพิ่มเติมข้อมูลโหนดในเส้นทางเข้าสู่กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ส่งผลให้ปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV

งานวิจัยของ Bai-Long X. และคณะ**[20]** ได้เสนอแนวคิดของกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง (LRR) ที่ทำการค้นหาเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหาย โดยทำการค้นหาเส้นทางในบริเวณที่เกิดความเสียหายเท่านั้น โดยการกำหนดอายุ (TTL) ของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางให้มีค่าเท่ากับ 2 หรือ 3 เพื่อเป็นการจำกัดพื้นที่ในการค้นหาเส้นทาง ส่งผลให้กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นสำหรับเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง ทำให้กลไก LRR เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายบ่อยครั้ง ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโพรโทคอลจัดเส้นทางอีกด้วย

งานวิจัยของ He Y. และคณะ**[21]** เสนอขั้นตอนวิธีซ่อมแซมเส้นทางแบบรวดเร็ว หรือ Fast route repair algorithm (FRR) เพื่อให้การส่งกลุ่มข้อมูลแบบทันที (real-time packet) มีความต่อเนื่องมากที่สุด โดยขั้นตอนวิธีซ่อมแซมเส้นทางแบบรวดเร็วจะมีการสร้างตารางจำนวนครั้งการส่งต่อที่น้อยที่สุด (Minimum hop count table) ที่ถูกดูแลรักษาโดยโหนดรอบๆเส้นทาง ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการดักฟังของเครือข่ายที่อยู่บริเวณรอบๆเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล และเมื่อเส้นทางเกิดความเสียหาย กระบวนการซ่อมแซมจะถูกจำกัดให้อยู่เฉพาะบริเวณที่เกิดความเสียหายเท่านั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าว และเส้นทางที่ถูกเลือกเพื่อใช้ในการซ่อมแซมเส้นทางจะมีจำนวนครั้งการส่งต่อที่น้อยที่สุดโดยการพิจารณาเลือกจากตารางจำนวนครั้งการส่งต่อที่น้อยที่สุด ซึ่งด้วยกลไกดังกล่าวสามารถช่วยให้การส่งต่อกลุ่มข้อมูลเป็นไปอย่างลื่นไหลและช่วยเพิ่มคุณภาพของการส่งวีดิทัศน์แบบทันกาล (real-time video transmission)

จากงานวิจัยของ Pham N. D. และคณะ**[22]** ได้เสนอแนวคิดในการลดปริมาณข้อมูลส่วนเกิน ด้วยการจำกัดการแพร่กระจายของกลุ่มข้อมูลในการค้นหาเส้นทางให้อยู่ในบริเวณที่จำกัด โดยแนวความคิดดังกล่าวคาดหวังว่าโหนดปลายทางน่าจะอยู่ในบริเวณใกล้ๆ กับจุดที่เส้นทางเกิดความเสียหายขึ้น จึงทำการกำหนดให้ขอบเขตการค้นหาของกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางมีขอบเขตที่จำกัด และเมื่อการค้นหาเส้นทางในครั้งแรกไม่ประสบความสำเร็จ จึงเพิ่มขอบเขตในการค้นหาเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งพบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางได้ ซึ่งพบว่าปริมาณค่าใช้จ่ายของโหนดที่อยู่บริเวณที่ต้องการติดต่อสื่อสารหรือจุดที่เกิดเส้นทางความเสียหายจะมีปริมาณค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าโหนดอื่นๆในเครือข่าย เมื่อจำนวนครั้งในการค้นหาเส้นทางที่ไม่ประสบความสำเร็จเพิ่มมากขึ้น เพราะโหนดดังกล่าวต้องทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลร้องขอเส้นทางมากกว่าโหนดอื่นๆในเครือข่าย นอกจากนี้

โพรโทคอล AODV ได้มีการประยุกต์ใช้งานวิจัยดังกล่าวในกระบวนการค้นหาและซ่อมแซมเส้นทางเป็นจำนวนมากอีกด้วย

งานวิจัยของ Sarma N. และคณะ**[23]** ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดในเรื่องของแบนด์วิดท์และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่ายเคลื่อนที่แบบไร้สายอย่างพลวัตร ส่งผลให้คุณภาพการให้บริการของเครือข่าย จึงได้เสนอกลไกการซ่อมแซมเส้นทางที่มีประสิทธิภาพ 2 รูปแบบ คือ การบำรุงรักษาเส้นทางโดยโหนดระหว่างทางที่ใช้กลไกการซ่อมแซมเส้นทางแบบพิเศษ และการบำรุงรักษาเส้นทางจากโหนดปลายทาง อันเป็นผลทำให้สามารถลดความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลและปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่าย เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการคุณภาพการให้บริการในแต่ละประเภทของกลุ่มข้อมูล

งานวิจัยShrestha N. และคณะ**[24]** ได้พัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการดักฟัง เพื่อพิจารณาถึงปริมาณการรบกวนหรือความคับคั่งในการส่งกลุ่มข้อมูล มาใช้เป็นปัจจัยในการสร้างเส้นทาง โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้เครือข่ายมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนามมากขึ้น จากผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มระยะเวลาในการทำงานของเครือข่ายได้ ยกเว้นในกรณีของเครือข่ายที่มีความหนาแน่นน้อยๆ เนื่องจากไม่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงผ่านบริเวณที่มีความคับคั่งหรือมีการรบกวนสูงได้

โดยจากการวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการบำรุงรักษาเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทางต่างๆ ที่ได้นำเสนอมาข้างต้นสามารถสรุปความแตกต่างได้ดังตารางที่ 5 ซึ่งสามารถแบ่งแยกแนวคิดของการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการบำรุงรักษาเส้นทางได้เป็น 2 แนวคิดคือ การสร้างเส้นทางหลีกเลี่ยงหรือเส้นทางสำรองก่อนเส้นทางปัจจุบันจะเกิดความเสียหาย และการซ่อมแซมเส้นทางเมื่อตรวจพบความเสียหายของเส้นทาง ซึ่งแต่ละแนวคิดจะมีข้อดีและข้อด้อยในแต่ประเด็น เช่น ปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่าย และความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูล เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้เพิ่มโพรโทคอลที่นำเสนอหรือโพรโทคอล OHO เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างโพรโทคอลต่างๆได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยโพรโทคอลที่นำเสนอจะมีความโดดเด่นในด้านของปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายที่มีปริมาณที่น้อยกว่าโพรโทคอลอื่นๆในรูปแบบเดียวกับ เนื่องจากสามารถควบคุมทิศทางในการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางโดยพิจารณาจากข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง รวมไปถึงมีความสอดคล้องกับแนวคิดในการใช้หมายเลขลำดับของโพรโทคอล AODV เพื่อเป็นการป้องกันการใช้ข้อมูลเส้นทางที่ไม่ได้รับการปรับปรุงให้เป็นปัจจุบัน

ตารางที่ 5 ความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการบำรุง-รักษาเส้นทางของโพรโทคอลจัดเส้นทาง

Protocol	Type	Overhead	E2E Delay	Direction of rebroadcast	Sequence concept
CPDSR	Preemptive	High	Low	-	Yes
PLRR	Preemptive	High	Low	-	Yes
AODV-2T	Preemptive	High	Low	-	Yes
PATCH	Broadcast Control	Moderate	Moderate	Omnidirectional rebroadcast	No
OPTAODV	Broadcast Control	Moderate	Moderate	Omnidirectional rebroadcast	No
LRR	Broadcast Control	Moderate	Moderate	Omnidirectional rebroadcast	No
FRR	Broadcast Control	Moderate	Moderate	Omnidirectional rebroadcast	No
AODV	-	High	High	Omnidirectional rebroadcast	Yes
OHO	Broadcast Control	Low	Moderate	Directional rebroadcast	Yes

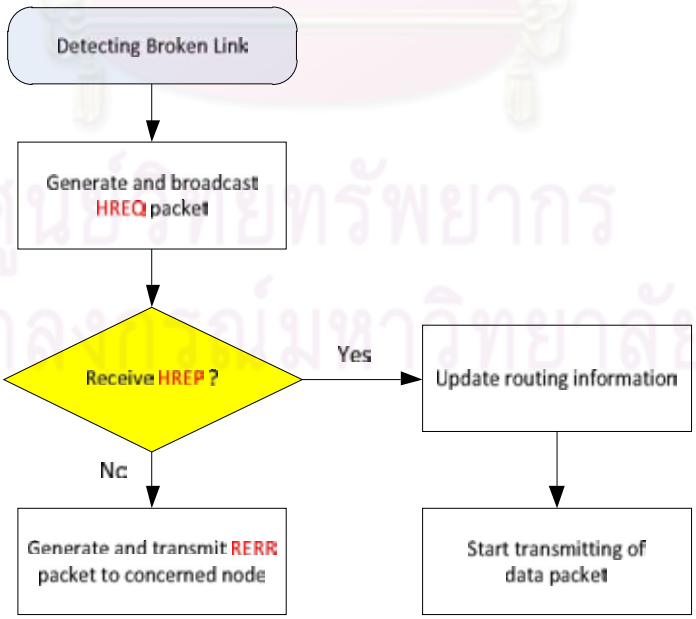
2.2 แนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทาง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น พบว่าปัญหาและผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ส่วนใหญ่เกิดมาจากการที่กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เกิดความเสียหายมีประสิทธิภาพไม่ดีเพียงพอ อันเนื่องมาจากกระบวนการดังกล่าวจะแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลร้องขอไปทั่วเครือข่าย ทำให้ขาดความต่อเนื่องของการส่งกลุ่มข้อมูลของโหนดต่างๆ ในเครือข่าย เนื่องจากต้องเข้ามามีส่วนร่วมในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง นอกจากนี้ยังเพิ่มปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเป็นจำนวนมากอีกด้วย ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่าย งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการปรับปรุงกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางโดยอาศัยการดักฟังกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้เป็นตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง หรือ Overhearing on-demand route recovery mechanism (OHO)

ในขณะที่เส้นทางระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเกิดความเสียหาย กลไกที่นำเสนอจะเข้าไปมีส่วนช่วยในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหาย โดยจะทำการค้นหาโหนด

ใกล้เคียงเพื่อสร้างเส้นทางเลี่ยงจุดเชื่อมต่อที่เสียหายนั้น โดยอาศัยข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการได้จากการดักฟังเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจของกลไกการซ่อมแซมเส้นทางของโหนดนั้นๆ

ภาพรวมของกระบวนการทำงานของกลไกซ่อมแซมเส้นทางที่นำเสนอ จะมีกระบวนการทำงานดังนี้ คือ เมื่อโหนดที่ตรวจพบว่าเส้นทางเกิดความเสียหายจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางแบบพิเศษ หรือ กลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (Help request message) ออกไป เมื่อโหนดเพื่อนบ้านได้รับจะพิจารณาข้อมูลจากตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง (Overhearing Table) ว่าตนเองสามารถเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางเลี่ยงได้หรือไม่ และในกรณีที่ตนเองสามารถเป็นตัวช่วยในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางนั้นๆ ได้ จะทำการส่งกลุ่มข้อมูล HREQ ไปยังโหนดที่ต้องการสร้างเส้นทางเลี่ยง ซึ่งเป็นโหนดที่อยู่ในเส้นทางที่เกิดความเสียหายเดิม เพื่อให้ทำการส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง เพื่อให้ทำการปรับปรุงหมายเลขลำดับแล้วจึงส่งกลับมายังโหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทาง โดยเมื่อการซ่อมแซมเส้นทางครั้งนั้นๆ ประสบความสำเร็จจะส่งผลให้การส่งข้อมูลจะดำเนินต่อไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องมากขึ้น แต่ในกรณีที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้หรือการซ่อมแซมเส้นทางประสบความล้มเหลว จะทำการส่งกลุ่มข้อมูลที่ระบุว่าเส้นทางไม่สามารถใช้การได้ (RERR) ได้ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อทำการค้นหาเส้นทางใหม่ ซึ่งกระบวนในภาพรวมของการทำงานดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยแผนผังการทำงานดังรูปที่ 18 โดยกลไกที่นำเสนอมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ 3 ส่วน คือ ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง, กลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางที่เพิ่มเติมเข้าสู่โพรโทคอล, และกระบวนการทำงานของโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 18 แผนผังภาพรวมการทำงานของกลไกซ่อมแซมเส้นทางที่นำเสนอ

2.2.1 ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง

ตารางข้อมูลการดักฟังข้อมูลเส้นทางเป็นตารางที่ใช้การเก็บข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง ซึ่งจะเป็นตารางที่เพิ่มขึ้นมาโดยเฉพาะและมีความแตกต่างจากตารางเส้นทางของโพรโทคอล AODV ทำให้จำเป็นต้องใช้พื้นที่หน่วยความจำเพิ่มขึ้นในการเก็บตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง ตารางข้อมูลดังกล่าวจะใช้เป็นตัวช่วยประกอบการตัดสินใจในการเข้าร่วมกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโหนดนั้นๆ เพื่อสร้างเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหาย โดยข้อมูลในตารางจะประกอบไปด้วย โหนดปลายทาง, ข้อมูลของโหนดที่อยู่ในเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง, และอายุของเส้นทาง ดังตารางที่ 6 นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดของตารางข้อมูลการดักฟังในแต่ละเส้นทางที่จะกำหนดให้มีการเก็บข้อมูลโหนดในเส้นทางได้ไม่เกิน 10 โหนดเท่านั้น ทำให้มีการใช้พื้นที่หน่วยความจำต่อหนึ่งเส้นทางไม่เกิน 48 ไบต์

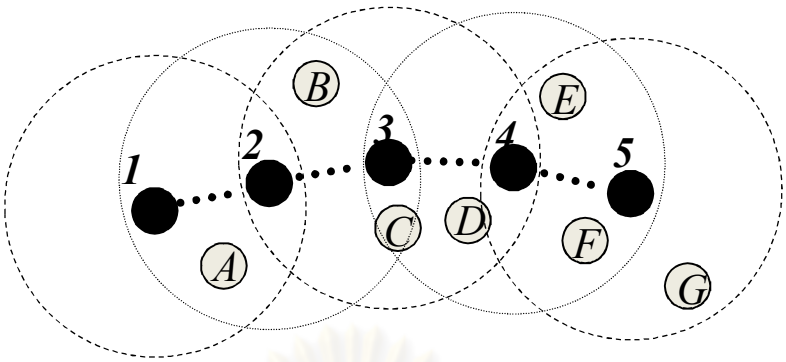
ตารางที่ 6 โครงสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง

Dest.	1st Node	2nd Node	...	10th Node	Expire time
....	....	....	....	....	....

2.2.1.1 การสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง

การสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางจะเริ่มดำเนินการเมื่อโหนดอยู่ในบริเวณเส้นทางการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูลและสามารถทำการดักฟังกลุ่มข้อมูลที่กำลังทำการส่งจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่ง ทำให้โหนดที่ทำการดักฟังทราบข้อมูลจากกลุ่มข้อมูลที่ทำการดักฟังว่ากลุ่มข้อมูลดังกล่าวส่งจากโหนดใด ไปที่โหนดใด และมีปลายทางที่ใด เมื่อโหนดที่ทำการดักฟังทราบแล้วจึงทำการเก็บข้อมูลเข้าสู่ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง โดยส่วนที่เหลือของกลุ่มข้อมูลจะถูกละทิ้ง เพื่อเป็นการปกป้องความเป็นส่วนบุคคล และป้องกันปัญหาทางด้านความปลอดภัยที่อาจเกิดขึ้นได้ ในการสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางจะพิจารณาเฉพาะข้อมูลของโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูลเท่านั้น ที่จะนำมาบันทึกลงในตารางดังกล่าว ยกเว้นในกรณีที่โหนดที่รับกลุ่มข้อมูลนั้นๆ จะเป็นโหนดปลายทางจึงจะทำการบันทึกโหนดปลายทางลงในตารางอีกครั้งหนึ่งด้วย เพื่อช่วยในกระบวนการพิจารณาสร้างเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหายของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงขอยกตัวอย่างลักษณะของเครือข่ายไร้สายดังรูปที่ 19 โดยสามารถอธิบายตัวอย่างในการสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางได้ดังนี้ หลังจากที่เส้นทางการติดต่อสื่อสารของโหนดต้นทางและโหนดปลายทางสามารถเชื่อมต่อกันได้แล้ว การส่งข้อมูลจะเริ่มขึ้นโดยใช้เส้นทางดังกล่าวคือ จากโหนด 1 ซึ่งเป็นโหนดต้นทางส่งต่อไปยังโหนดที่ 2, 3, 4 และ 5



รูปที่ 19 ตัวอย่างลักษณะของเครือข่ายที่ทำการส่งข้อมูลจากโหนด 1 ไปยังโหนด 5

ซึ่งเป็นโหนดปลายทางตามลำดับ โดยโหนดที่อยู่ในบริเวณที่ครอบคลุมการส่งข้อมูลของเส้นทางได้แก่ โหนด A, B, C, D, E, F และ G สามารถดักฟังหรือได้ยินการส่งข้อมูลของโหนดภายใต้เส้นทางดังกล่าว จะทำการสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางขึ้นดังตัวอย่างเช่น โหนด B ได้ยินกลุ่มข้อมูลที่ทำการส่งในขณะนั้น ซึ่งส่งจากโหนดที่ 2 ไปยังโหนดที่ 3 โดยมีปลายทางที่โหนดที่ 5 โหนด B จะนำข้อมูลดังกล่าวมาบรรจุลงในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางของตนเอง ในขณะเดียวกันโหนด C สามารถได้ยินการส่งข้อมูลเช่นเดียวกัน ก็จะทำการบันทึกลงในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางเช่นเดียวกับโหนด B หลังจากนั้นโหนด 3 ได้ทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลไปยังโหนดที่ 4 โดยที่โหนด B และ C ยังคงได้ยินการส่งกลุ่มข้อมูลดังกล่าว จึงได้ทำการปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง และเมื่อโหนดที่ 4 ทำการส่งต่อไปยังโหนดปลายทาง มีเพียงโหนด C เท่านั้นที่สามารถได้ยินการส่งต่อกลุ่มข้อมูลในครั้งนี้เนื่องจากอยู่ภายในระยะการติดต่อสื่อสารของโหนดที่ 4 จึงได้ทำการปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง ซึ่งข้อมูลที่บรรจุในตารางการดักฟังเส้นทางจะใช้เพียงข้อมูลโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูลนั้นๆ ออกมา โดยตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นโหนด B จะมีตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางดังตารางที่ 7(a) ส่วนโหนด C จะมีตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางดังตารางที่ 7(b)

ตารางที่ 7 ตัวอย่างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางของ (a) โหนด B และ (b) โหนด C

Dest.	1st Node	2nd Node	3rd Node	Expire time
5	2	3	4	Time

(a)

Dest.	1st Node	2nd Node	3rd Node	4th Node	Expire time
5	2	3	4	5	Time

(b)

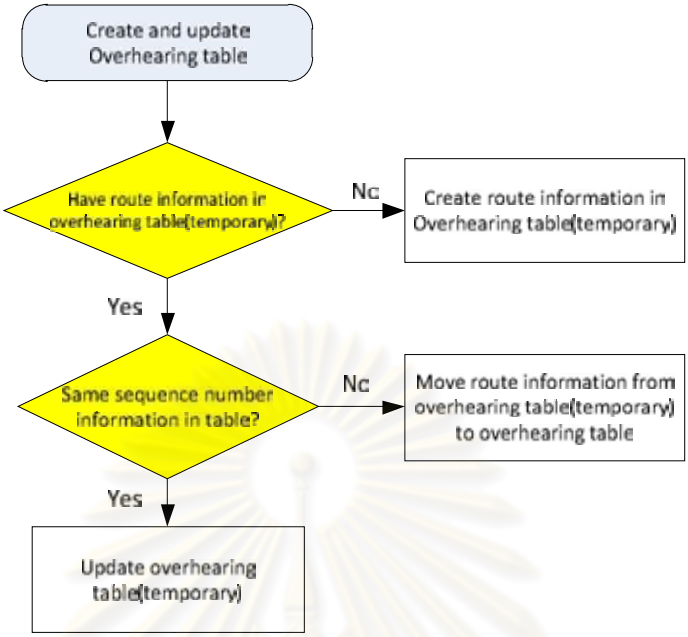
2.2.1.2 การปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง

กระบวนการปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางถือเป็นส่วนสำคัญในการปรับปรุงข้อมูลภายในตารางให้มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของโหนดภายในเครือข่าย โดยในกระบวนการนี้จะมีตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราว ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางแต่ได้ทำการเพิ่มส่วนของหมายเลขกลุ่มข้อมูลซึ่งเป็นค่าเฉพาะของกลุ่มข้อมูลหนึ่งๆ ที่ไม่ซ้ำกับกลุ่มข้อมูลอื่นๆ เพื่อใช้ในกระบวนการระบุเส้นทางของกลุ่มข้อมูลหนึ่งๆ ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราวมีลักษณะดังตารางที่ 8 โดยกระบวนการปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางมีกระบวนการดังนี้ เมื่อโหนดทราบข้อมูลที่ได้จากการดักฟังจะทำการตรวจสอบในตารางการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราวว่ามีข้อมูลเส้นทางที่มีปลายทางตรงกับข้อมูลที่ได้รับมาหรือไม่ ในกรณีที่ไม่พบข้อมูลดังกล่าวจะทำการสร้างข้อมูลเส้นทางของปลายทางดังกล่าวขึ้นมาใหม่พร้อมทั้งบันทึกหมายเลขกลุ่มข้อมูลลงในตาราง โดยข้อมูลดังกล่าวทั้งหมดจะถูกบรรจุอยู่ในตารางการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราว สำหรับกรณีที่มีข้อมูลเส้นทางของปลายทางอยู่ในตารางการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราวจะทำการตรวจสอบหมายเลขกลุ่มข้อมูลว่าตรงกับที่บันทึกอยู่ในตารางหรือไม่ เพื่อเป็นการป้องกันการปรับปรุงเส้นทางอย่างผิดพลาดเนื่องจากกลุ่มข้อมูลที่มีปลายทางเดียวกัน แต่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกัน โดยเมื่อทำการตรวจสอบแล้วพบว่าหมายเลขกลุ่มข้อมูลสอดคล้องตรงกันจึงเริ่มดำเนินการปรับปรุงเส้นทางให้เป็นปัจจุบัน ส่วนในกรณีที่หมายเลขกลุ่มข้อมูลไม่สอดคล้องกันจะทำการย้ายข้อมูลเส้นทางของปลายทางดังกล่าวทั้งหมดบรรจุลงในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางพร้อมทั้งกำหนดอายุของข้อมูลดังกล่าว แล้วจึงทำการลบข้อมูลเส้นทางของปลายทางดังกล่าวในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราว โดยกระบวนการการปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังแผนผังการทำงานดังรูปที่ 20

เพื่อเป็นการป้องกันการใช้ข้อมูลในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเครือข่าย จึงได้ทำการกำหนดอายุของข้อมูลภายในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางไว้ โดยเมื่อไม่มีการปรับปรุงข้อมูลในช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือข้อมูลหมดอายุ จะทำการลบข้อมูลในตารางเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการใช้ข้อมูลที่เก่า ซึ่งจากกระบวนการข้างต้นจะทำให้ตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางมีข้อมูลเส้นทางที่สอดคล้องต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโหนดในเครือข่ายได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 8 โครงสร้างตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางแบบชั่วคราว

Time	Dest.	1st Node	2nd Node	...	nth Node	Sequence number
....	....	....	....	....	....	....



รูปที่ 20 แผนผังการทำงานของกระบวนการสร้างและปรับปรุงตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทาง

2.2.2 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางที่เพิ่มเติมเข้าสู่โพรโทคอล

กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO ที่สำคัญๆจะมีอยู่ด้วยกัน 2 กลุ่มข้อมูล ซึ่งถูกเพิ่มเข้ามานอกเหนือจากกลุ่มข้อมูลที่มีอยู่ในโพรโทคอล AODV อันได้แก่ กลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง หรือ Help request message (HREQ) และกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง หรือ Help reply message (HREP) ซึ่งแต่ละกลุ่มข้อมูลจะมีหน้าที่และความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆของกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO และมีรายละเอียดของแต่ละกลุ่มข้อมูลดังนี้

1. โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง หรือ Help request message (HREQ)

กลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางเป็นกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการร้องขอข้อมูลเส้นทางและตัวช่วยของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง โดยโครงสร้างของกลุ่มข้อมูลร้องขอเส้นทางจะมีลักษณะดังรูปที่ 21 ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลขกลุ่มข้อมูล HREQ, โหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง, โหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูล HREQ และหมายเลขลำดับของโหนดที่ทำการส่งกลุ่มข้อมูล HREQ, และโหนดที่ไม่สามารถติดต่อได้หรือโหนดที่สียหาย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ประเภทของกลุ่มข้อมูล : เพื่อทำการระบุว่า เป็นกลุ่มข้อมูลประเภทใดของโพรโทคอล ซึ่งกลุ่มข้อมูลแต่ละประเภทของโพรโทคอลจะมีค่าที่เฉพาะตัวสำหรับกลุ่มข้อมูลแต่ละประเภท เพื่อใช้ในการระบุชนิดของกลุ่มข้อมูลโพรโทคอล AODV ที่โหนดได้รับมา

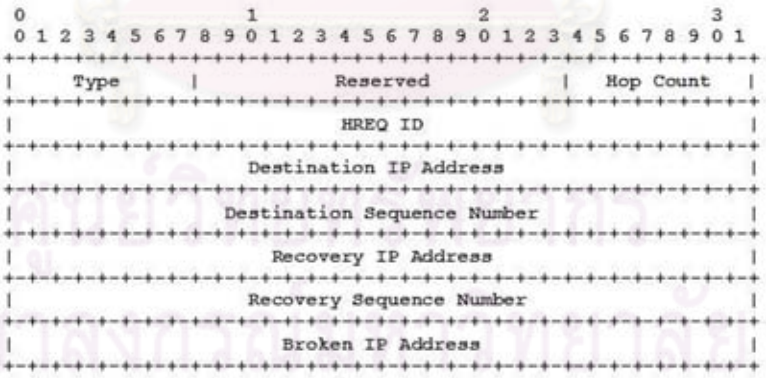
1.2 Hop Count : จะระบุระยะทางที่เหลือของเส้นทางที่ไปยังโหนดปลายทาง และจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง ในกรณีที่โหนดนั้นๆสามารถเป็นตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง

1.3 หมายเลขกลุ่มข้อมูล HREQ : เป็นหมายเลขลำดับของกลุ่มข้อมูล HREQ เพื่อป้องกันการเกิดการวนกลับในส่งกลุ่มข้อมูล HREQ ภายในเครือข่าย หรือป้องกันการรับและส่งกลุ่มข้อมูลเดิมซ้ำหลายๆ ครั้ง

1.4 โหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง : จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่ทำการปรับปรุง และยังใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นทางของตารางเส้นทางไปยังโหนดปลายทางอีกด้วย

1.5 โหนดที่ทำการร้องของการซ่อมแซมเส้นทาง : เพื่อเป็นการระบุว่า โหนดใดในเครือข่ายทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทาง รวมไปถึงเป็นข้อมูลที่ใช้ในการสร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทางอีกด้วย

1.6 โหนดที่เกิดความเสียหาย : เป็นข้อมูลที่โหนดที่สามารถช่วยเหลือในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง ใช้ในการพิจารณาว่า ตนเองอยู่ในบริเวณตำแหน่งที่เส้นทางเกิดความเสียหาย และใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมในการช่วยเหลือในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง โดยทำการพิจารณาว่ามีข้อมูลโหนดที่เกิดความเสียหายอยู่ในตารางการดักฟังเส้นทาง และสามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงโหนดดังกล่าวได้หรือไม่



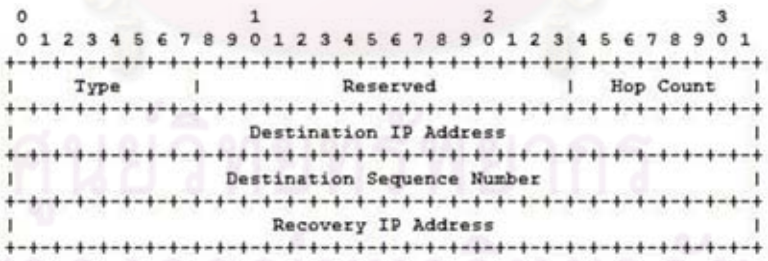
รูปที่ 21 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREQ)

2. โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง หรือ Help reply message (HREP) ประกอบด้วย

เป็นกลุ่มข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในการตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง กลุ่มข้อมูลนี้จะถูกส่งจากโหนดปลายทางไปยังโหนดที่ทำการร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง เพื่อทำการแจ้งให้โหนดดังกล่าวทราบถึงข้อมูลเส้นทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร โดยกลุ่มข้อมูล HREQ มีโครงสร้างกลุ่มข้อมูลดังรูปที่ 22 ซึ่งประกอบไปด้วยโหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง, และโหนดที่ทำการร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 โหนดปลายทางและหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางของกลุ่มข้อมูล HREP : ใช้เพื่อแจ้งหมายเลขลำดับของโหนดปลายทางที่เป็นปัจจุบัน ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าว โดยทำการระบุลงในกลุ่มข้อมูล HREP เมื่อการซ่อมแซมเส้นทางครั้งนั้นเกี่ยวข้องกับโหนดปลายทาง ซึ่งทำให้การสร้างเส้นทางมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

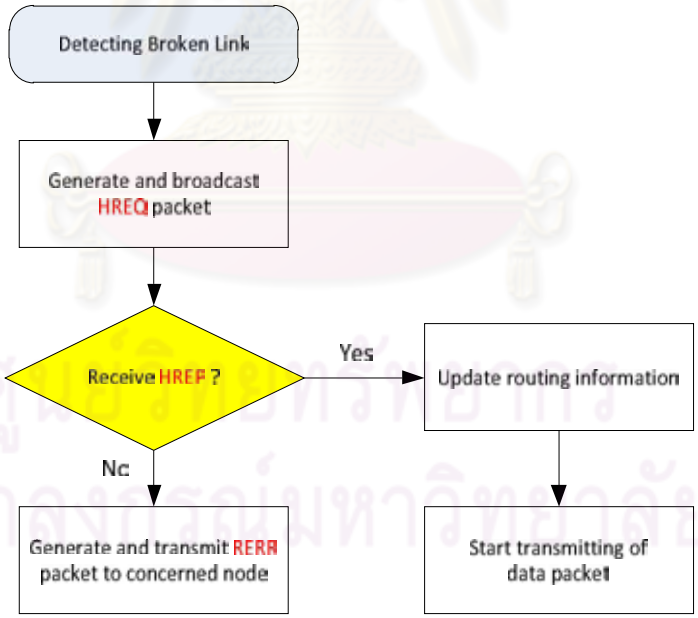
2.2 โหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทาง : เพื่อใช้เป็นการระบุว่าโหนดใดในเครือข่ายทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทางซึ่งเป็นปลายทางของกลุ่มข้อมูล HREP และทำการส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางกลับไปยังโหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทางได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางประสบความสำเร็จ



รูปที่ 22 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREP)

2.2.3 กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO

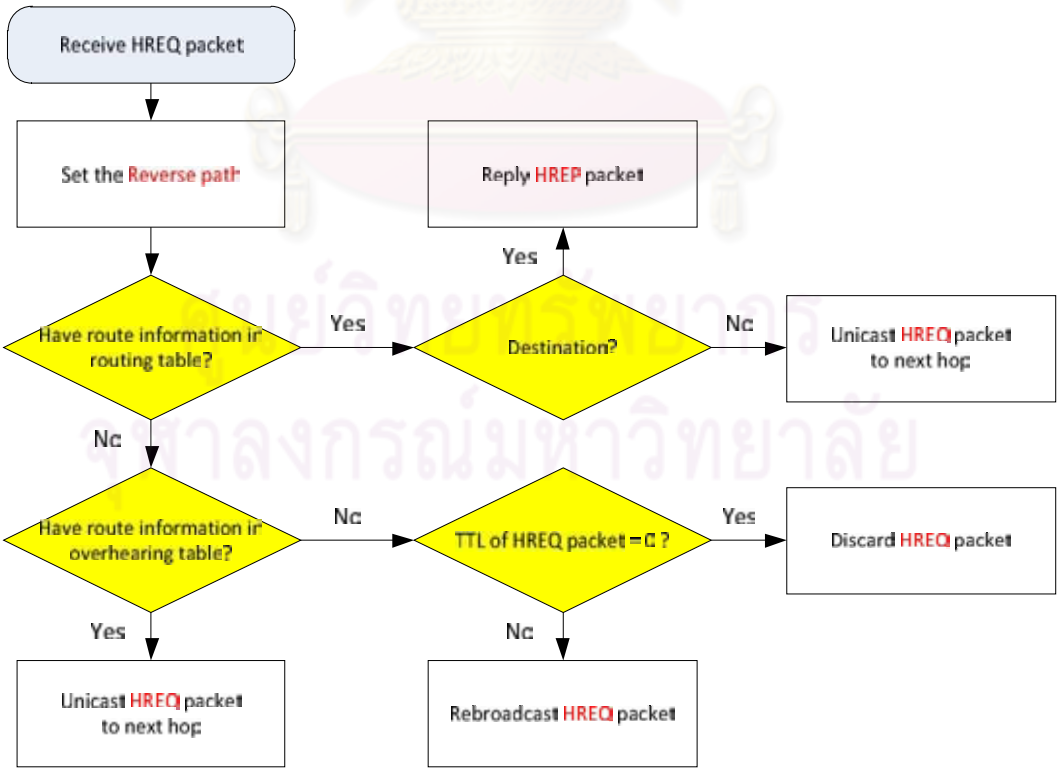
กระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง จะเกิดขึ้นเมื่อโพรโทคอลจัดเส้นทางตรวจพบว่า เส้นทางได้เกิดความเสียหายขึ้น โดยโหนดที่ทำการตรวจพบจะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางแบบพิเศษหรือกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREQ) พร้อมทั้งตั้งเวลาในการรอรับกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREP) ซึ่งการตั้งเวลารอคอยดังกล่าว โหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทางจะพิจารณาจากจำนวนครั้งในการส่งต่อไปยังโหนดปลายทางที่อยู่ในตารางข้อมูลเส้นทาง กล่าวคือ ถ้าจำนวนครั้งในการส่งต่อไปยังโหนดปลายทางมีค่ามาก คาบระยะเวลาการรอคอยก็จะนานขึ้น โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 0.05 และมีค่าไม่เกิน 0.1 วินาที และในกรณีที่ไม่ได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าวภายในระยะเวลาที่กำหนด โหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทางจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลที่ระบุความผิดพลาดของเส้นทางไปยังโหนดที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำการปรับปรุงตารางเส้นทางและทำการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางใหม่อีกครั้งหนึ่ง ส่วนในกรณีที่ได้รับกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง โหนดที่ทำการร้องขอการซ่อมแซมเส้นทางจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางแล้วจึงเริ่มดำเนินการส่งกลุ่มข้อมูลต่อไป ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการดังกล่าวด้วยแผนผังการทำงานดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แผนผังการทำงานภาพรวมของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง

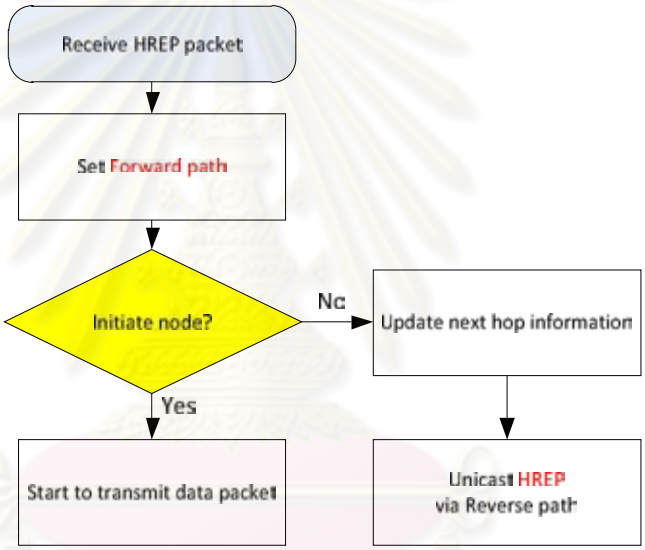
สำหรับโหนดเพื่อนบ้านที่ได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง จะทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่อยู่ในตารางข้อมูลการดักฟังเส้นทางและพิจารณาว่าตนเองสามารถเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางเลี่ยงหรือสามารถมีส่วนช่วยในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางนั้นๆ หรือไม่

โดยในการพิจารณาการช่วยเหลือจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลโหนดที่ทำการร้องขอการช่วยเหลือและโหนดที่เกิดความเสียหายของเส้นทางกับข้อมูลที่อยู่ในตารางข้อมูลการดักฟังว่ามีข้อมูลดังกล่าวหรือไม่ ซึ่งถ้ามีข้อมูลดังกล่าวจึงจะทำการพิจารณาเลือกข้อมูลโหนดที่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหาย โดยจะพิจารณาโหนดที่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงได้เข้าใกล้กับโหนดปลายทางมากที่สุด หรือโหนดที่สามารถเลี่ยงจุดที่เกิดความเสียหายได้ไกลที่สุด ในกรณีที่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงได้จะทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางไปยังโหนดที่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงได้ ซึ่งเป็นโหนดที่อยู่ในเส้นทางเดิมที่เกิดความเสียหายขึ้น และเมื่อโหนดที่อยู่ในเส้นทางที่เกิดความเสียหายดังกล่าวได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าว จะทำการส่งกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางต่อจนกระทั่งถึงโหนดปลายทาง โดยโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางจะทำการสร้างเส้นทางย้อนกลับไปยังโหนดที่เริ่มกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง เพื่อใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางในอนาคต ส่วนในกรณีที่โหนดได้รับกลุ่มข้อมูล HREQ เมื่อพิจารณาแล้วว่าไม่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงได้จะทำการตรวจสอบอายุของกลุ่มข้อความ HREQ ว่าหมดอายุหรือไม่ ถ้ายังไม่หมดอายุจะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลดังกล่าวออกไป ส่วนในกรณีที่กลุ่มข้อมูล HREQ หมดอายุจึงจะทำการละทิ้งกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการดังกล่าวด้วยแผนผังการทำงานดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 แผนผังการทำงานเมื่อโหนดได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง

เมื่อโหนดปลายทางได้รับกลุ่มข้อมูลขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางจะพิจารณาเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจำนวนครั้งในการส่งต่อกลุ่มข้อมูลดังกล่าว แล้วจึงทำการเพิ่มหมายเลขลำดับของตัวเองและทำการส่งกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางกลับไปยังโหนดที่เริ่มกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางโดยใช้เส้นทางย้อนกลับซึ่งได้ถูกสร้างตั้งแต่ตอนที่ได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง โดยโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะทำการปรับปรุงหรือสร้างตารางเส้นทางของโหนดปลายทางนั้นๆ รวมไปถึงโหนดที่เริ่มกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางด้วยเช่นกัน แล้วจึงเริ่มการส่งกลุ่มข้อมูลต่อไป โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถอธิบายเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 25



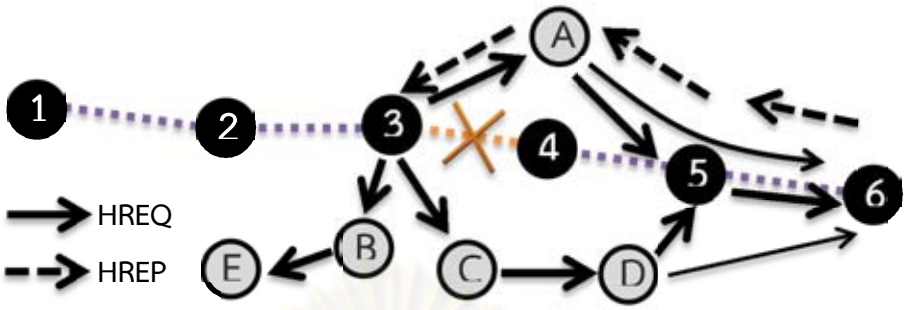
รูปที่ 25 แผนผังการทำงานเมื่อรับกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจของกระบวนการทำงานของกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO จึงขอยกตัวอย่างการทำงานดังนี้ เมื่อกำหนดให้เครือข่ายมีรูปแบบดังรูปที่ 26 และโหนดที่ 1 และ 6 เป็นโหนดต้นทางและปลายทางในการส่งกลุ่มข้อมูลตามลำดับ โดยมีเส้นทางการส่งข้อมูลจากโหนด 2, 3, 4, และ 5 ตามลำดับ โหนดที่สามารถทำการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลได้แก่ โหนด A, B, C, และ D โดยมีตารางเส้นทางการดักฟังดังตารางที่ 9 โดยเมื่อการเชื่อมต่อระหว่างโหนด 3 และ 4 เกิดความเสียหาย โหนด 3 ซึ่งตรวจพบความเสียหายดังกล่าวจะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREQ) ออกไปโดยมีอายุของกลุ่มข้อมูลเท่ากับ 2 และมีการตั้งเวลารอคอยของกระบวนการดังกล่าวที่ 0.08 วินาที ซึ่งพิจารณาจากระยะห่างของโหนดปลายทางและค่ากำหนด

เมื่อโหนด A, B, และ C ได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางจากโหนดที่ 3 จะทำการพิจารณาค้นหาข้อมูลของโหนดที่เกิดความเสียหายในตารางเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง เมื่อตรวจพบโหนดที่เกิดความเสียหายในตารางดังกล่าว จึงจะทำการค้นหาโหนดที่สามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงได้ อย่างกรณีตัวอย่าง โหนด B และ C ทราบว่าตนเองสามารถช่วยสร้างเส้นทางเลี่ยงได้ เนื่องจากในตารางเส้นทางที่ได้จากการดักฟังมีข้อมูลของโหนดที่เสียหาย แต่ไม่มีข้อมมูลของโหนดที่ทำสามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงได้ ประกอบกับกลุ่มข้อมูลที่ได้รับมายังไม่หมดอายุจึงทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลดังกล่าวออกไป เพื่อขยายวงในการค้นหาโหนดที่สามารถช่วยซ่อมแซมเส้นทาง ในขณะที่โหนด A ได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าว และพิจารณาข้อมูลในตารางการดักฟังเส้นทาง พบว่าสามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงไปยังโหนด 6 ซึ่งเป็นโหนดปลายทางได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วข้อมูลของโหนดปลายทางที่ปรากฏอยู่ในตารางเป็นเพียงข้อมูลเพิ่มเติมที่ได้จากการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลของโหนดที่ 5 เนื่องจากโหนดปลายทางจะไม่มีการส่งกลุ่มข้อมูลใดๆ เข้าสู่เครือข่าย จึงทำให้การดักฟังกลุ่มข้อมูลจากโหนดปลายทางไม่สามารถทำได้ จึงต้องเพิ่มเติมข้อมูลของโหนดปลายทางในกรณีที่ดักฟังกลุ่มข้อมูลแล้วพบว่าการส่งกลุ่มข้อมูลนั้นถูกส่งไปยังโหนดปลายทาง ด้วยเหตุนี้การติดต่อโดยตรงไปยังโหนดปลายทางอาจไม่สามารถทำได้ เนื่องจากระยะที่ห่างกันเกินไป จึงจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนรูปแบบการส่งข้อมูลจากการส่งโดยตรงไปยังโหนดปลายทางเป็นการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลแทน แต่สำหรับในกรณีอื่นๆ ที่พิจารณาแล้วว่าสามารถสร้างเส้นทางเลี่ยงไปยังโหนดอื่นๆได้และโหนดนั้นไม่ใช่โหนดปลายทาง จะทำการส่งกลุ่มข้อมูลไปที่โหนดนั้นๆ โดยตรง สำหรับในส่วนของโหนด E ที่ไม่มีตารางข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง หรือมีตารางข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง แต่ไม่มีข้อมูลของโหนดที่เสียหาย เมื่อได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะทำการละทิ้งทันที

เมื่อกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทางมาถึงโหนดปลายทาง โดยเหตุผลที่ต้องส่งกลุ่มข้อมูลดังกล่าวให้ถึงโหนดปลายทาง เพราะเนื่องจากแนวคิดของโพรโทคอล AODV ที่ใช้หมายเลขลำดับของโหนดในการระบุถึงเส้นทางที่มีความเป็นปัจจุบันมากที่สุด และป้องกันการเกิดการสร้างเส้นทางที่วนกลับ (Routing loop) ซึ่งทำให้การส่งกลุ่มข้อมูลล้มเหลว ด้วยเหตุนี้เมื่อโหนดปลายทางได้รับกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะทำการพิจารณาเปรียบเทียบหมายเลขลำดับภายในกลุ่มข้อมูลและของโหนดปลายทาง แล้วจึงปรับปรุงให้เป็นปัจจุบัน แล้วจึงส่งกลุ่มข้อมูลกลับไปยังเส้นทางย้อนกลับที่ได้ถูกสร้างขึ้นในตอนที่ได้รับกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง

จากตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าโหนดปลายทางพิจารณาเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยพิจารณาจากจำนวนครั้งในการส่งของกลุ่มข้อมูล HREQ และเมื่อกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมไปถึงโหนดที่ทำการร้องขอหรือโหนด 3 ก็จะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางให้เป็นปัจจุบัน แล้วจึงทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลไปยังเส้นทางที่ได้ทำการปรับปรุงเรียบร้อยแล้วต่อไป



รูปที่ 26 ตัวอย่างการทำงานของกลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO

ตารางที่ 9 ตารางข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังของโหนดต่างๆ

Node		Dest.	1st Node	2nd Node	3rd Node	4th Node	Expire time
A		6	3	4	5	6	Time

Node		Dest.	1st Node	2nd Node	Expire time
B		6	3	4	Time

Node		Dest.	1st Node	2nd Node	Expire time
C		6	3	4	Time

Node		Dest.	1st Node	2nd Node	3rd Node	Expire time
D		6	4	5	6	Time

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การวัดและประเมินผล

การวัดและประเมินผลประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทำงานระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล OHO ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยทำการปรับปรุงกลไกซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV ซึ่งทำการเปรียบเทียบในประเด็นต่างๆ โดยใช้เกณฑ์ดังต่อไปนี้ในการพิจารณาประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลการทำงานของโพรโทคอลทั้งสอง

1. อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทาง (Packet delivery ratio) วัตถุประสงค์ของเกณฑ์นี้เพื่อใช้ในการวัดประสิทธิภาพของความสำเร็จในการส่งกลุ่มข้อมูล

2. ความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ย (Average packet delay) แสดงถึงระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลผ่านเครือข่ายจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลที่น้อยย่อมส่งผลถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าของโพรโทคอลนั้นๆ

3. ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง (Overhead) เป็นปริมาณของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง ซึ่งส่งผลถึงประสิทธิภาพในการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง กล่าวคือ เมื่อในเครือข่ายมีปริมาณกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทางมาก จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้เครือข่าย (Network utilization) ลดลง และเนื่องจากกลุ่มข้อมูลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวไม่สามารถหลีกเลี่ยงให้เกิดขึ้นในเครือข่ายได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการสร้างหรือผลิตกลุ่มข้อมูลประเภทดังกล่าวให้เหมาะสมและน้อยที่สุด โดยอาจกล่าวได้ว่าโพรโทคอลที่มีปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวในปริมาณที่น้อยย่อมแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในกระบวนการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทางของเครือข่าย

4. ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล เนื่องจากหน่วยความจำของโหนดในเครือข่ายถือเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญและมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นเกณฑ์ในการพิจารณาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโพรโทคอลจัดเส้นทางจึงควรพิจารณาถึงปริมาณการใช้หน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางอีกด้วย โดยโพรโทคอลที่ดีควรมีการใช้หน่วยความจำในปริมาณที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลเส้นทาง

ในการวัดและประเมินผลจะใช้โปรแกรมจำลองเครือข่ายหรือ Network Simulator (Ns-2.34) **[25]** ทำการทดสอบโพรโทคอล AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยกำหนดขนาดของเครือข่ายไว้ที่ 1500 x 300 ตารางเมตร และมีการแปรผันจำนวนโหนดภายในเครือข่ายเริ่มต้นจาก 30, 50, 70 และ 100 โหนด เพื่อให้ลักษณะเครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งกำหนดให้โหนดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดตั้งแต่ 10, 20 และ 30 m/s โดยใช้โมเดล Random waypoint ในการสร้างการเคลื่อนที่ให้กับโหนดและกำหนดให้ทุกโหนดในเครือข่ายไม่มี

การหยุดนิ่งอยู่กับที่หลังจากการเคลื่อนที่ครั้งหนึ่งๆ โดยการทดลองจะใช้เวลาทั้งหมด 900 วินาที และมีปริมาณเส้นทางที่ต้องใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลตั้งแต่ 1, 5 และ 10 เส้นทาง เพื่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของความคับคั่งของกลุ่มข้อมูลภายในเครือข่าย โหนดต้นทางจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลด้วยอัตราการส่งกลุ่มข้อมูลที่ 4 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที ขนาด 512 ไบต์ต่อกลุ่มข้อมูล โดยทำการทดลองทั้งหมด 10 ลักษณะเครือข่ายที่แตกต่างกันภายใต้ค่ากำหนดของการทดสอบคงเดิมในแต่ละแบบ โดยสามารถสรุปค่ากำหนดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบได้ดังตารางที่ 10

เนื่องจากงานวิจัยของ Yoon J. และคณะ**[26]** ได้ทำการทดสอบรูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนดแบบ RandomWaypoint พบว่าเมื่อมีการกำหนดค่าความเร็วเคลื่อนที่ต่ำสุดของโหนดเท่ากับ 0 เมตรต่อวินาที จะทำให้ค่าความเร็วเฉลี่ยมีค่าไม่คงที่และลดลง ซึ่งส่งผลให้ปริมาณค่าใช้จ่าย, จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้ง, และระยะเวลาความล่าช้าของกลุ่มข้อมูลมีค่าที่ลดลง งานวิจัยดังกล่าวจึงได้แนะนำให้กำหนดค่าความเร็วเคลื่อนที่ต่ำสุดของโหนดอย่างน้อยเท่ากับหรือมากกว่า 1 เมตรต่อวินาที เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว

ตารางที่ 10 ค่ากำหนดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบโพรโทคอล

มาตรฐานการสื่อสารแบบไร้สาย	IEEE 802.11
รูปแบบการส่งคลื่นผ่านตัวกลาง	TwoRayGround
รูปแบบสายอากาศ	OmniAntenna
รูปแบบแถวคอย	DropTail/PriQueue
จำนวนกลุ่มข้อมูลในแถวคอย	50 กลุ่มข้อมูล
ขนาดของเครือข่าย	1500 x 300 ตารางเมตร
รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนด	RandomWaypoint
จำนวนโหนดภายในเครือข่าย	30, 50, 70, และ 100 โหนด
ความเร็วเคลื่อนที่สูงสุด	10, 20, และ 30 เมตรต่อวินาที
ความเร็วเคลื่อนที่ต่ำสุด	1 เมตรต่อวินาที
ปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล	1, 5, และ 10 เส้นทาง
อัตราการส่งกลุ่มข้อมูลแต่ละเส้นทาง	4 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที
ระยะเวลาการส่งกลุ่มข้อมูลแต่ละเส้นทาง	800 วินาที
ขนาดกลุ่มข้อมูล	512 ไบต์
จำนวนครั้งในการทดสอบ	10 ครั้ง
ระยะเวลาทดสอบ	900 วินาที

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะแสดงถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอล AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลการทำงานของโพรโทคอลซึ่งนำเสนอในบทก่อนหน้า โดยจะทำการแสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทำงานของโพรโทคอลเป็นส่วนๆ ดังนี้

4.1.1 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทาง (Packet delivery ratio)

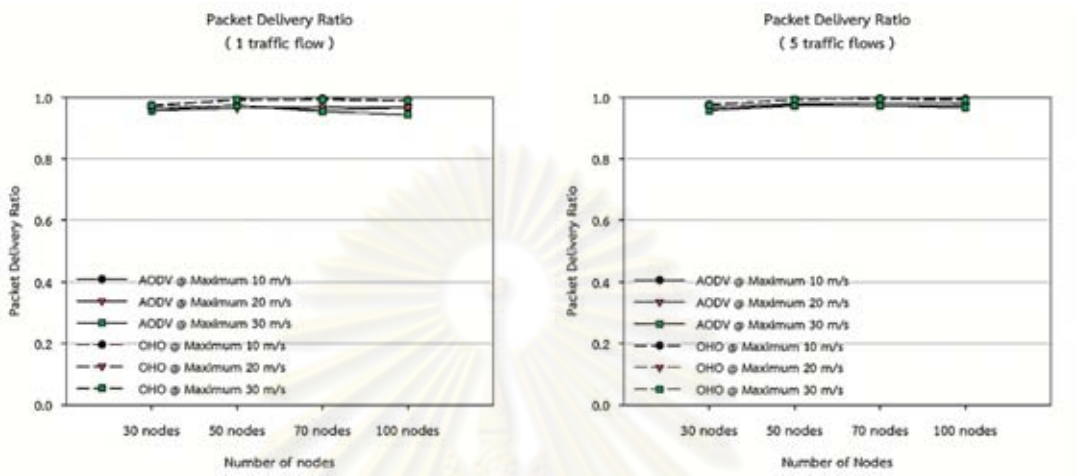
จากผลการทดลองพบว่า โพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV ซึ่งมีอัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทางโดยเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 99% โดยสาเหตุที่โพรโทคอล AODV มีอัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทางที่น้อยกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอเนื่องมาจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะทำการซ่อมแซมเส้นทางเมื่อจุดที่เกิดความเสียหายอยู่ใกล้กับโหนดปลายทาง ส่วนในกรณีที่เกิดความเสียหายใกล้กับโหนดต้นทางจะทำการละทิ้งกลุ่มข้อมูลที่มีปลายทางนั้นๆ ทั้งหมด ก่อนทำการส่งกลุ่มข้อมูลแจ้งความเสียหายของเส้นทาง (RERR) ไปยังโหนดต้นทางเพื่อให้เริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งโหนดที่ได้รับกลุ่มข้อมูลแจ้งความเสียหายของเส้นทางจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางและตรวจสอบกลุ่มข้อมูลที่มีอยู่ในแถวคอยของตนเอง ในกรณีที่มีกลุ่มข้อมูลที่ต้องใช้เส้นทางที่เสียหายดังกล่าวก็จะทำการละทิ้งกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจากแถวคอย จากกระบวนการดังกล่าวส่งผลให้โพรโทคอล AODV มีการละทิ้งกลุ่มข้อมูลที่มากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ ส่วนในกรณีที่อยู่ในเงื่อนไขของการซ่อมแซมเส้นทาง โหนดที่ทำการซ่อมแซมจะทำการบันทึกกลุ่มข้อมูลแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งใช้ระยะเวลาที่นานและมีปริมาณค่าใช้จ่ายที่สูง โดยผลการทดสอบและการวิเคราะห์ทั้งสองจะกล่าวในส่วนต่อไป และในขณะที่โหนดที่ทำการซ่อมแซมเส้นทางอยู่นั้น โหนดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางที่เกิดความเสียหายจะไม่สามารถทราบได้เลยว่าเส้นทางเกิดความเสียหาย จึงยังคงดำเนินการส่งกลุ่มข้อมูลไปตามเส้นทางตามปรกติจนกระทั่งถึงโหนดที่กำลังดำเนินการซ่อมแซมเส้นทาง ซึ่งโหนดดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลที่ถูกส่งเข้ามาอย่างต่อเนื่องเข้าสู่แถวคอย แต่เนื่องจากเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลอยู่ในกระบวนการซ่อมแซมและปริมาณของแถวคอยของโหนดมีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้เมื่อใช้ระยะเวลาในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางนานประกอบกับกลุ่มข้อมูลที่ถูกส่งเข้ามาอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้แถวคอยของโหนดนั้นๆเต็มอย่างรวดเร็ว ทำให้โหนดนั้นๆ จำเป็น

ที่จะต้องละทิ้งกลุ่มข้อมูลที่ถูกส่งเข้ามาใหม่อยู่เรื่อยๆ จนกว่าจะสามารถซ่อมแซมเส้นทางได้สำเร็จหรือหมดระยะเวลารอคอยของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อโหนดในเครือข่ายมีความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งกลุ่มข้อมูลของโพรโทคอล AODV ลดลง เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ภายในเครือข่ายส่งผลให้มีการซ่อมแซมเส้นทางที่เพิ่มมากขึ้นพร้อมทั้งมีอัตราความล้มเหลวในการซ่อมแซมเส้นทางเพิ่มมากขึ้น เพราะข้อมูลเส้นทางที่โหนดได้รับมานั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันตามการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่าย ส่งผลให้โอกาสในการซ่อมแซมเส้นทางสำเร็จนั้นลดลง ซึ่งแตกต่างจากเครือข่ายที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายที่น้อยกว่า

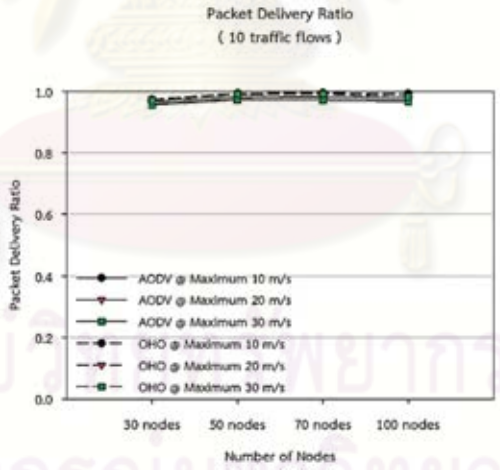
ในขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอจะทำการซ่อมแซมเส้นทางในทุกกรณีที่ตรวจพบความเสียหายของเส้นทาง ซึ่งโหนดที่ตรวจพบจะทำการบันทึกกลุ่มข้อมูลก่อนดำเนินการตามกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง โดยกระบวนการดังกล่าวมีระยะเวลารอคอยกลุ่มข้อมูลตอบรับการช่วยเหลือ (HREP) ที่สั้นและเหมาะสม ส่งผลให้ระยะเวลาในการรอคอยโดยรวมของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางมีระยะเวลาที่สั้นกว่าของโพรโทคอล AODV ทำให้มีกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งเนื่องจากแถวคอยเต็มมีจำนวนน้อยกว่าโพรโทคอล AODV และยังส่งผลให้จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ถูกส่งเข้าสู่เครือข่ายจากโหนดต้นทางในช่วงเวลาที่โหนดที่ตรวจพบความเสียของเส้นทางกำลังดำเนินการซ่อมแซมเส้นทางมีจำนวนน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ซึ่งในกรณีที่ซ่อมแซมเส้นทางไม่สำเร็จกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะถูกละทิ้งทั้งหมด ทำให้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพโดยรวมของการส่งข้อมูล

โดยผลการทดลองในส่วนของอัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่ต้นทางแสดงได้ดังรูปที่ 27 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลที่นำเสนอและโพรโทคอล AODV มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมาก โดยโพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV ในทุกการทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการดักฟังมาเป็นตัวช่วยในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง และเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพของโพรโทคอลทั้งสองจึงได้ทำการพิจารณาเฉพาะในส่วนของอัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่ต้นทางโดยมีมาตรตราส่วนตั้งแต่ 0.92 จนถึง 1 ดังแสดงในรูปที่ 28 ถึง 30

จากผลการทดลองดังรูปที่ 28 ถึง 30 แสดงประสิทธิภาพการส่งกลุ่มข้อมูลของเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่สูงสุดภายใต้ความหนานแน่นของโหนดที่แตกต่างกันโดยมีปริมาณการเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่ 1, 5, และ 10 เส้นทางตามลำดับ พบว่าเครือข่ายที่มีความเร็วการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการส่งกลุ่มข้อมูลที่ลดลงตามลำดับอันเนื่องมาจากเส้นทางที่ใช้ในการส่งต่อกลุ่มข้อมูลเกิดความเสียหายมากขึ้นและมีการละทิ้งกลุ่มข้อมูลจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV มากขึ้นตามลำดับ แต่สำหรับกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอจะพยายามทำการลดจำนวนการละทิ้งของกลุ่มข้อมูลให้น้อยลงโดยการกำหนดระยะเวลารอคอยของกระบวนการซ่อมแซมที่สั้น ประกอบกับกระบวนการดังกล่าวใช้ข้อมูลในการซ่อมแซมเส้นทางแบบท้องถิ่นทำให้สามารถซ่อมแซมเส้นทางได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ถูกละทิ้งเนื่องจากแถวคอยเต็มและจากเส้นทางที่เกิดความเสียหายมีจำนวนลดลง



(a) (b)

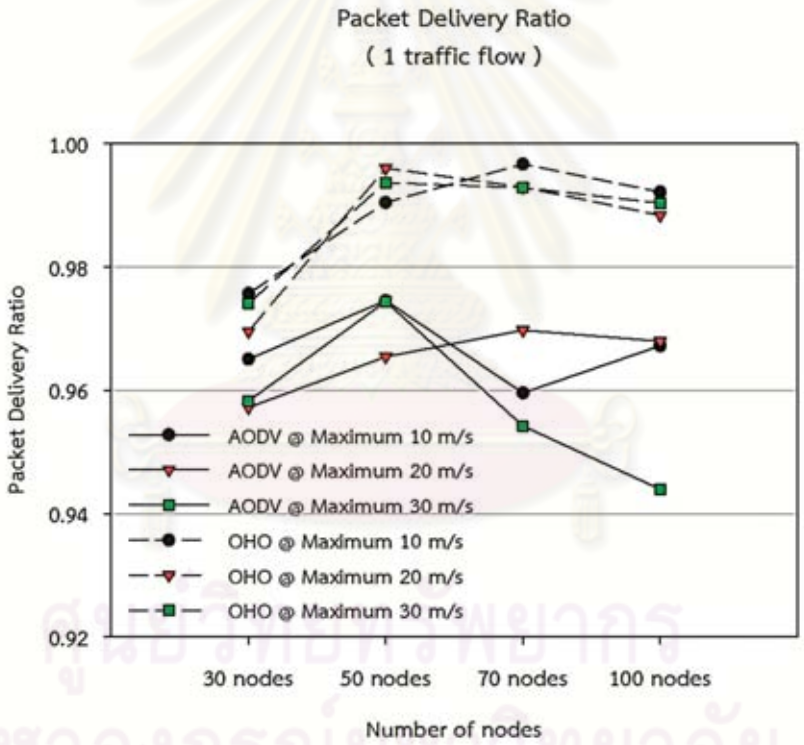


(c)

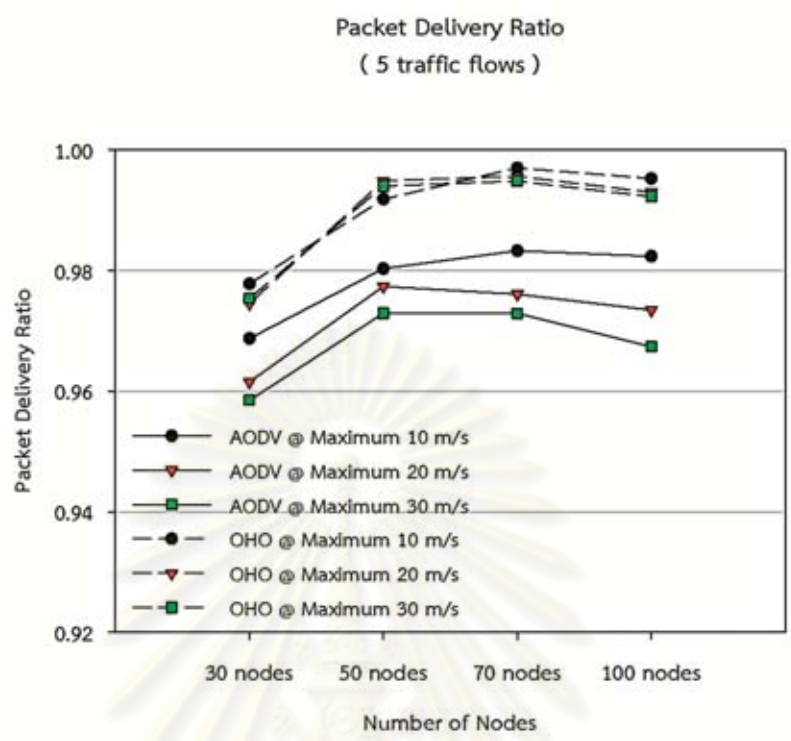
รูปที่ 27 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล
ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล
(a) 1 เส้นทาง (b) 5 เส้นทาง (c) 10 เส้นทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

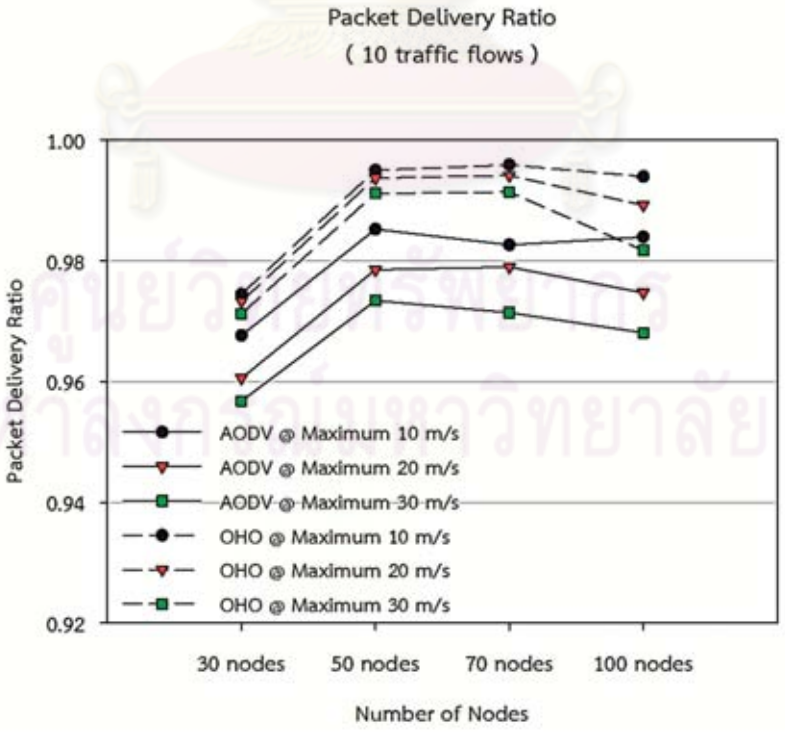
สำหรับกรณีของเครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่ 10 เส้นทาง พบว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโหนด 100 โหนด มีอัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทางลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลกระทบจากกระบวนการหลีกเลี่ยงการชนกันของกลุ่มข้อมูล (Collision avoidance) หรือ MAC Interaction ทำให้ใช้ระยะเวลารอคอยในการใช้ช่องสัญญาณที่นานกว่าเครือข่ายที่มีปริมาณการจราจรของกลุ่มข้อมูลในระดับที่ต่ำกว่า ประกอบกับกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอมีระยะเวลารอคอยกลุ่มข้อมูลตอบรับการช่วยเหลือที่สั้น ทำให้กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางเกิดความล้มเหลวบ่อยครั้ง และส่งผลโดยตรงต่ออัตราส่วนการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูลในเครือข่าย



รูปที่ 28 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง



รูปที่ 29 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง

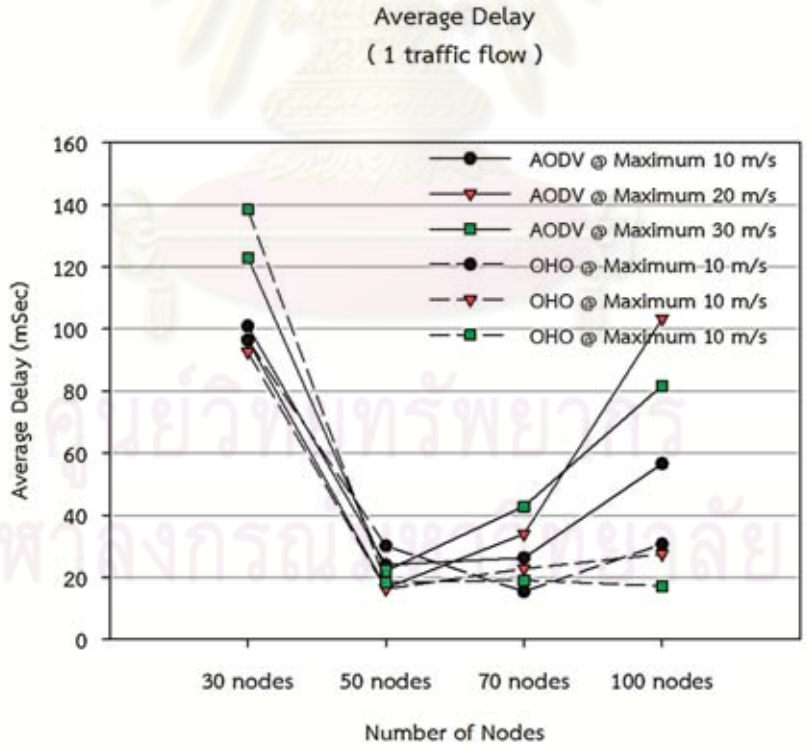


รูปที่ 30 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง

4.1.2 ความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ย (Packet Delay)

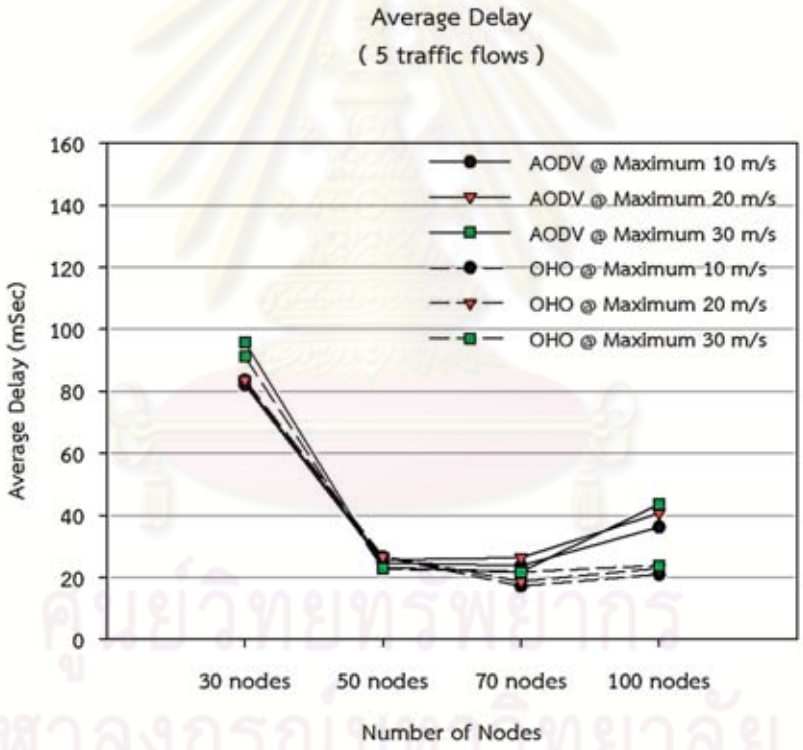
ในบทก่อนหน้าได้อธิบายถึงสาเหตุของความล่าช้าที่เกิดขึ้นในเครือข่าย ซึ่งสาเหตุหลักๆเกิดจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่ใช้ระยะเวลานานในการซ่อมแซมเส้นทาง โดยจากผลการทดลองพบว่าในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดในระดับต่ำมีค่าเฉลี่ยความล่าช้าของการส่งกลุ่มข้อมูลที่สูง เนื่องจากความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายที่ต่ำทำให้โอกาสในการสร้างเส้นทางหรือซ่อมแซมเส้นทางได้สำเร็จมีน้อยและเส้นทางที่ใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลเกิดความเสียหายบ่อยครั้งทำให้โหนดในเครือข่ายจำเป็นต้องคอยจนกระทั่งสามารถสร้างเส้นทางได้สำเร็จ จึงจะสามารถดำเนินการส่งกลุ่มข้อมูลต่อไปได้ ซึ่งอาจใช้ระยะเวลาที่นาน ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลมีค่าที่สูงขึ้น ในขณะที่เครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดที่สูงมาก เช่น เครือข่ายที่มีจำนวน 100 โหนด จะพบว่าค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลมีค่าสูงกว่าเครือข่ายที่มีจำนวน 50 และ 70 โหนด เนื่องจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เกิดความเสียหายจะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปทั่วทั้งเครือข่าย ซึ่งส่งกระทบต่อทุกโหนดในเครือข่ายจะต้องเข้ามามีส่วนร่วมในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายดังกล่าว ทำให้โหนดต่างๆที่อยู่ระหว่างการดำเนินการส่งกลุ่มข้อมูลต้องหยุดทำการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูลชั่วคราว เพื่อเข้ามามีส่วนร่วมในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งข้อมูลของเครือข่ายที่มีความหนาแน่นสูงมีค่ามากกว่าเครือข่ายที่มีความหนานแน่นของโหนดต่ำกว่า นอกจากนี้ผลกระทบจากอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายอันเนื่องจากความเร็วของการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เส้นทางมีโอกาสเกิดความเสียหายได้บ่อยครั้งขึ้น เมื่อเส้นทางเกิดความเสียหายบ่อยครั้งจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลมีค่าที่สูงขึ้นอันเนื่องมาจากเหตุผลข้างต้น ทำให้สามารถสรุปปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูล คือ ความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่าย โดยกล่าวได้ว่าเครือข่ายที่มีความหนาแน่นน้อยเกินไปหรือมากเกินไปจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลสูงขึ้น เนื่องจากไม่สามารถสร้างหรือซ่อมแซมเส้นทางได้ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ความหนาแน่นในเครือข่ายต่ำ สำหรับกรณีที่ความหนาแน่นในเครือข่ายสูง จะเกิดการขัดขวางการดำเนินการส่งกลุ่มข้อมูลทำให้เกิดความล่าช้าขึ้นในเครือข่ายได้ ส่วนปัจจัยในด้านอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่าย อันเกิดจากการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่าย พบว่า เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายสูงขึ้นจะส่งผลให้เส้นทางเกิดความเสียหายได้บ่อยครั้ง ทำให้ต้องใช้กระบวนการซ่อมแซมและค้นหาเส้นทางบ่อยครั้งซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าของเครือข่ายที่มีความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายที่สูงจะมีค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลที่สูงกว่าเครือข่ายที่มีความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่สูงสุดของโหนดภายในเครือข่ายที่ต่ำกว่า

จากผลการทดลองดังรูปที่ 31 ถึง 33 ที่แสดงค่าความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1, 5, และ 10 เส้นทาง เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความล่าช้าของการส่งกลุ่มข้อมูลระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอ พบว่าโพรโทคอลที่นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลที่น้อยกว่าโพรโทคอล AODV ในเครือข่ายที่มีโหนดตั้งแต่ 50 โหนดขึ้นไป โดยมีค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลที่ประมาณ 20 – 25 มิลลิวินาที อันเป็นผลมาจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่ทำการซ่อมแซมเส้นทางแบบท้องถิ่นโดยอาศัยข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังมาเป็นส่วนประกอบของกระบวนการ ทำให้สามารถทำการซ่อมแซมปรับปรุงเส้นทางได้อย่างรวดเร็ว และไม่ส่งผลกระทบต่อโหนดอื่นๆที่อยู่ในเครือข่าย จึงมีค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลที่ต่ำกว่าโพรโทคอล AODV สำหรับเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดต่ำ โพรโทคอลที่นำเสนอจะมีค่าเฉลี่ยความล่าช้าที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าเล็กน้อยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากไม่สามารถสร้างเส้นทางได้สำเร็จ เพราะเครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดที่ต่ำจนทำให้เครือข่ายเกิดการแบ่งออกเป็นส่วนๆ ส่งผลให้การสร้างเส้นทางไปยังโหนดปลายทางไม่ประสบผลสำเร็จ



รูปที่ 31 ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย
ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง

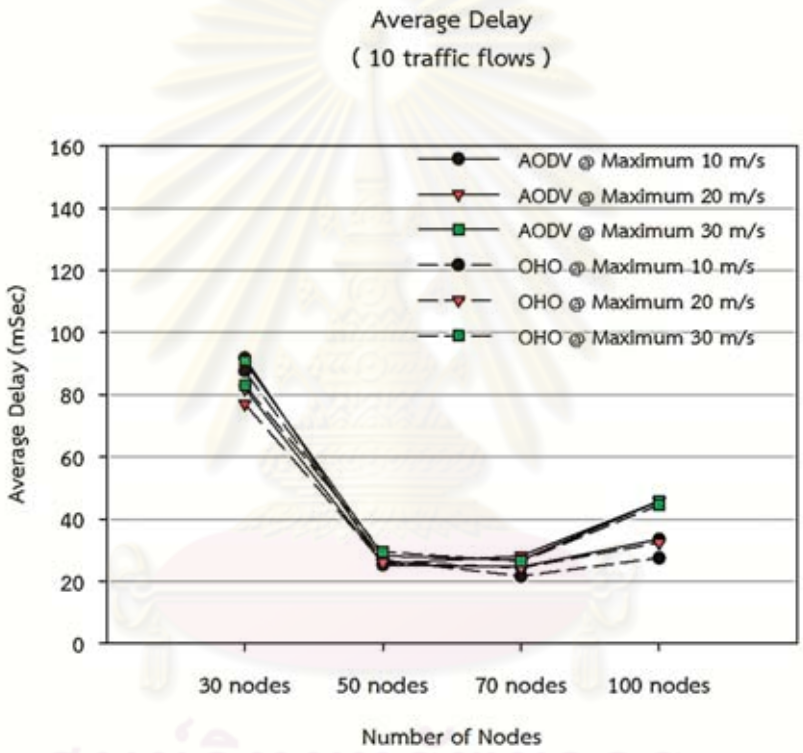
อย่างไรก็ดี จากผลการทดลองค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่ 10 เส้นทาง พบว่าเมื่อความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าของการส่งกลุ่มข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกับโพรโทคอล AODV อันเป็นผลเนื่องมาจากความสำเร็จของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางอยู่ในระดับต่ำ เพราะหมดคาบระยะเวลารอคอยกลุ่มข้อมูลตอบรับตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREP) เนื่องจากผลกระทบของกระบวนการหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล (Collision Avoidance) หรือ MAC Interaction ที่ส่งผลให้กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางต้องรอคอยให้ช่องสัญญาณว่างจึงจะทำการส่งกลุ่มข้อมูลร้องขอตัวช่วยในการซ่อมแซมเส้นทาง (HREQ) ซึ่งอาจใช้ระยะเวลานานขึ้นเมื่อบริเวณดังกล่าวมีการจราจรของข้อมูลหนาแน่น ประกอบกับระยะเวลารอคอยการตอบรับตัวช่วยของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอมีระยะเวลาที่สั้น ทำให้กระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง



รูปที่ 32 ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย
ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลารอคอยของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางโพรโทคอลที่นำเสนอจะเข้าสู่กระบวนการแจ้งความเสียหายของเส้นทางไปยังโหนดต้นทางแล้วจึงเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความล่าช้าของการส่งกลุ่มข้อมูลในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณการจราจรของข้อมูลในปริมาณมากมีค่าใกล้เคียงกับโพรโทคอล AODV ซึ่งในจุดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการยืดระยะเวลาการรอคอยการตอบรับตัวช่วยของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางให้มีความสอดคล้องกับปริมาณความหนาแน่นของการจราจรของข้อมูลในเครือข่ายนั้นๆ เพื่อให้มีอัตราความสำเร็จในการซ่อมแซมเส้นทางที่เพิ่มสูงขึ้น



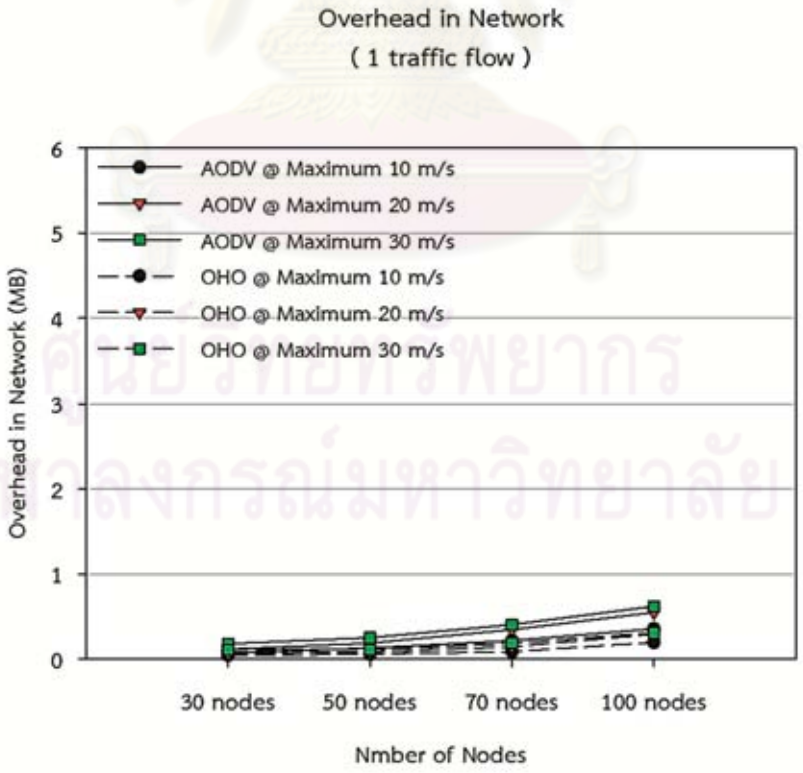
รูปที่ 33 ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย
ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง (Overhead)

จากข้อมูลในบทที่ 1 ทำให้ทราบว่าปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง (Overhead) จะเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย ซึ่งปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวเกิดจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV ที่ทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการซ่อมแซมออกไปทั่วทั้งเครือข่าย ทำให้ปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวมีเป็นจำนวนมาก ในขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอมีกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางแบบท้องถิ่นที่อาศัยข้อมูลเส้นทางจากการดักฟังเป็นตัวช่วยในการพิจารณาซ่อมแซมเส้นทาง ทำให้เกิดปริมาณกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมเส้นทางในปริมาณที่น้อยกว่าโพรโทคอล AODV

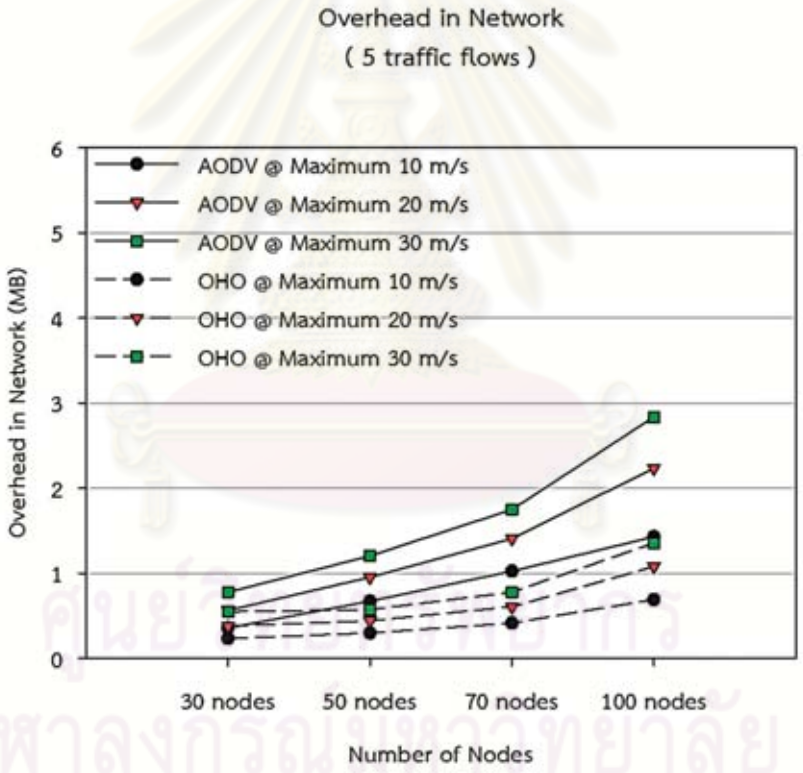
โดยจากผลการทดลองดังรูปที่ 34 ถึง 36 ที่แสดงปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและซ่อมแซมเส้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน พบว่าโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทางได้ 29% เป็นอย่างน้อย และสามารถลดปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวได้สูงสุดที่ 59% สำหรับเครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง หรือสามารถลดปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวเฉลี่ยประมาณ 48% จากกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการค้นหาและซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการปรับปรุงกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางให้มีรูปแบบ



รูปที่ 34 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง
ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง

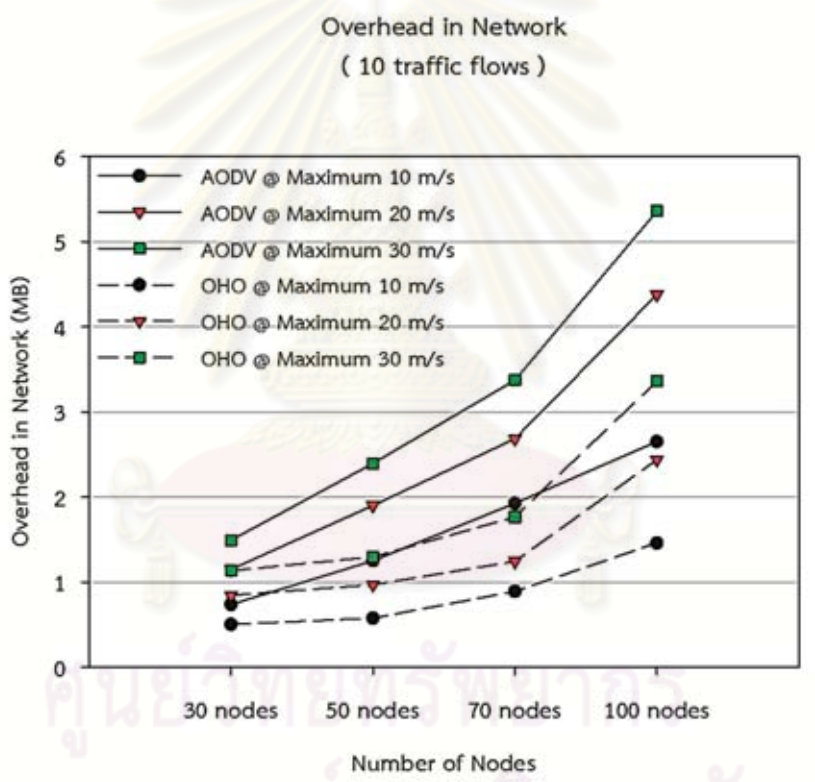
การซ่อมแซมเส้นทางแบบท้องถิ่น ทำให้การซ่อมแซมเส้นทางใช้ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ที่จะทำการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางทั่วทั้งเครือข่าย ซึ่งก่อให้เกิดปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวเป็นจำนวนมาก และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้องกันกระบวนการค้นหาและซ่อมแซมเส้นทางพบว่าโพรโทคอลที่นำเสนอมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ต่ำกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของโพรโทคอล AODV เมื่อจำนวนโหนดในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น

ปัจจัยหลักที่มีผลเกี่ยวข้องกับปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่ายอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่าย, ปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล, และจำนวนโหนดภายในเครือข่าย โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่ายจะส่งผลต่ออัตราการเกิดความเสียหายของเส้นทาง



รูปที่ 35 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง

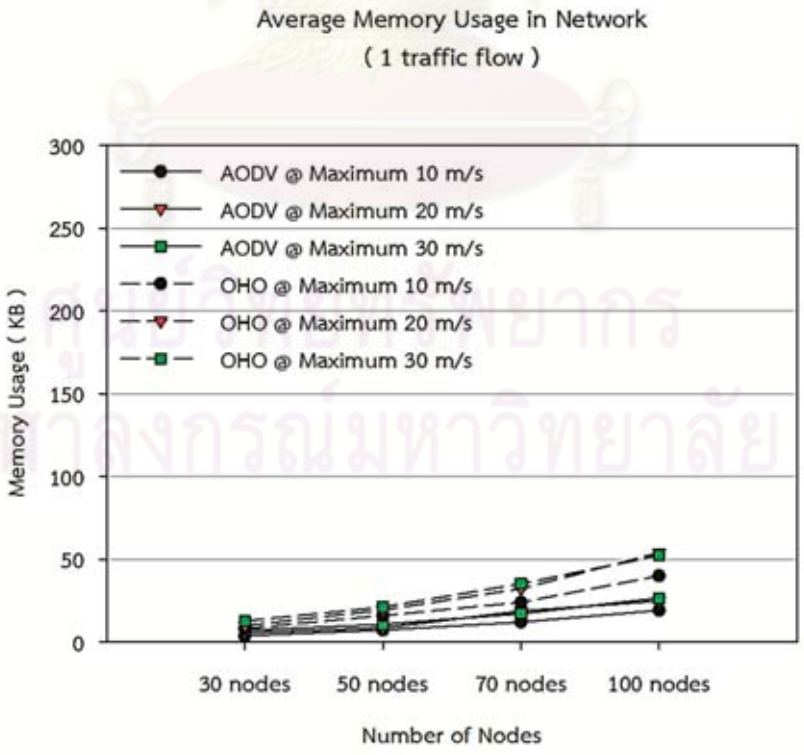
ในกรณีที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงในระดับสูงจะส่งผลให้เส้นทางเกิดความเสียหายได้บ่อยครั้งขึ้น และกระบวนการค้นหาหรือซ่อมแซมเส้นทางจะถูกเรียกใช้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับกรณีที่เครือข่ายมีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลจำนวนมากจะทำให้ปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากมีเส้นทางที่เกิดความเสียหายหรือได้รับผลกระทบจากความเสียหายของเส้นทางอื่นๆเพิ่มมากขึ้น และเช่นเดียวกันกับปัจจัยด้านจำนวนโหนดภายในเครือข่าย โดยเมื่อมีจำนวนโหนดในเครือข่ายมากขึ้นย่อมส่งผลให้มีปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 36 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทาง
ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง

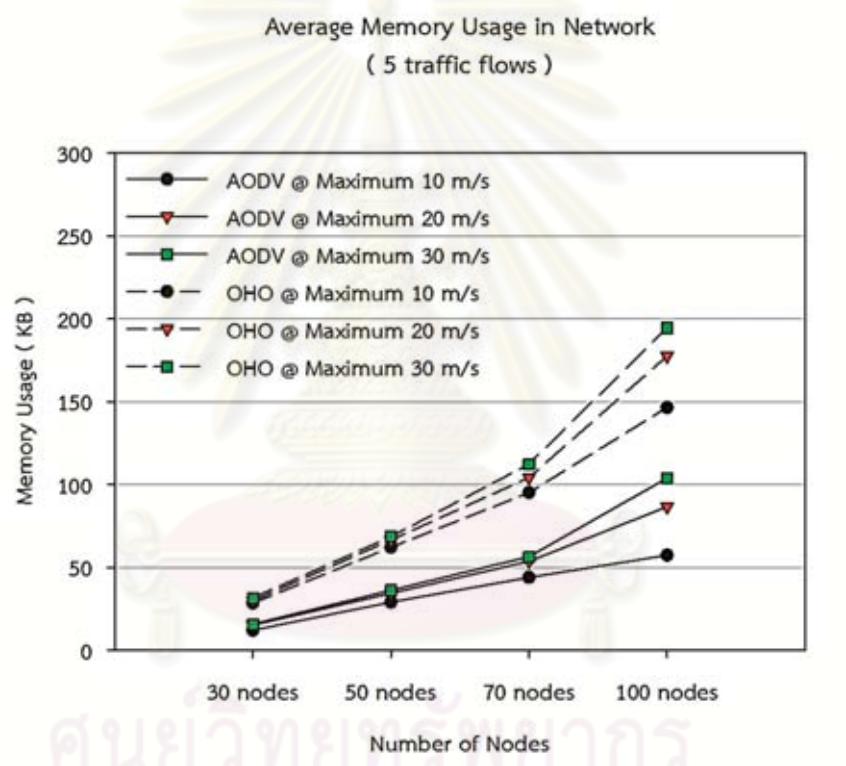
4.1.4 ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางของโพรโทคอล

ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้ข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังเป็นข้อมูลในการพิจารณาซ่อมแซมเส้นทาง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องจัดเก็บเพิ่มเติมจากตารางข้อมูลเส้นทาง ทำให้โหนดจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้ในการจัดเก็บข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังดังกล่าว โดยจากผลการทดลองพบว่า เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่ 1 เส้นทาง ดังรูปที่ 37 โหนดจะมีการใช้หน่วยความจำที่เพิ่มขึ้นมากกว่าโพรโทคอล AODV เพิ่มขึ้นมากสุดถึง 2 เท่า โดยการเพิ่มขึ้นของหน่วยความจำที่ใช้จะขึ้นกับความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายในบริเวณที่มีการติดต่อสื่อสาร สำหรับเครือข่ายที่มีความหนาแน่นมาก เช่น เครือข่ายที่มีจำนวน 100 โหนด จะมีจำนวนโหนดที่สามารถดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลมากกว่าเครือข่ายที่มีความหนาแน่นน้อย ทำให้ปริมาณหน่วยความจำที่ถูกใช้งานเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 38 และ 39 แสดงปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางของเครือข่ายที่มีปริมาณการส่งกลุ่มข้อมูลที่ 5 และ 10 เส้นทางตามลำดับ พบว่าเมื่อเครือข่ายมีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้โหนดในเครือข่ายจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อจัดเก็บข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังที่มีปริมาณเส้นทางเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นมากส่งผลให้โหนดที่สามารถดักฟังข้อมูลเส้นทางได้มากขึ้น จึงทำให้หน่วยความจำที่ต้องใช้งานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจใช้หน่วยความจำโดยรวมทั้งเครือข่ายมากที่สุดประมาณ 300 KB สำหรับเครือข่ายที่มีจำนวน 100 โหนด และมีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทางภายในเครือข่าย

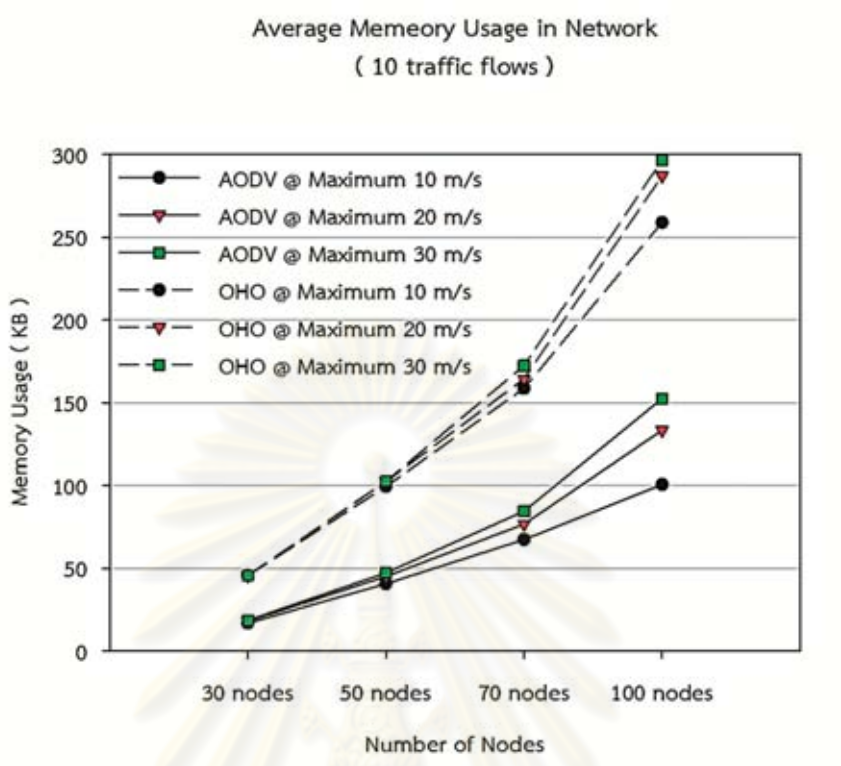


รูปที่ 37 ปริมาณหน่วยความจำเฉลี่ยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทาง
ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 1 เส้นทาง

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณหน่วยความจำโดยรวมทั้งเครือข่ายที่ถูกใช้งานมากที่สุดที่ประมาณ 300 KB สำหรับเครือข่ายที่มีจำนวนโหนด 100 โหนดและมีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง และจากผลการทดลองพบว่าโหนดในเครือข่ายจะใช้หน่วยความจำเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของโพรโทคอลที่นำเสนอมากที่สุดที่ประมาณ 13 KB ต่อโหนด ซึ่งถือเป็นปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยความจำของอุปกรณ์ในปัจจุบันที่มีขนาดหน่วยความจำอย่างน้อยในระดับเมกะไบต์เป็นอย่างต่ำ โดยจากปริมาณการใช้งานหน่วยความจำที่เพิ่มขึ้นมากกว่าโพรโทคอล AODV ไม่น่าจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายอย่างร้ายแรง



รูปที่ 38 ปริมาณหน่วยความจำเฉลี่ยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง



รูปที่ 39 ปริมาณหน่วยความจำเฉลี่ยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทาง
ภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 10 เส้นทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างเป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากความสะดวกในการประยุกต์ใช้ แต่อย่างไรก็ดีเครือข่ายไร้สายก็มีคุณลักษณะเฉพาะตัวของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายที่แตกต่างจากเครือข่ายอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในด้านของประสิทธิภาพการรับส่งกลุ่มข้อมูล หรือข้อจำกัดทางด้านระยะในการรับส่งกลุ่มข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากคุณลักษณะเฉพาะตัวของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย โดยมุ่งเน้นการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในเครือข่าย ที่ส่งผลทำให้เส้นทางการติดต่อสื่อสารเกิดความเสียหายบ่อยครั้ง เป็นผลทำให้โพรโทคอลจัดเส้นทางต้องรับภาระหน้าที่ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเส้นทางอย่างหนัก ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายจากกระบวนการดังกล่าวในปริมาณมาก ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่ายและประสิทธิภาพในการรับส่งกลุ่มข้อมูลลดต่ำลง นอกจากนี้ยังส่งผลถึงความล่าช้าในการรับส่งกลุ่มข้อมูลอีกด้วย

โพรโทคอลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล AODV ซึ่งเป็นโพรโทคอลจัดเส้นทางที่ได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการซ่อมแซมเส้นทางให้เป็นการร้องขอข้อมูลเส้นทางแบบท้องถิ่น พร้อมทั้งเพิ่มรูปแบบการเก็บข้อมูลเส้นทางโดยใช้การดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลเส้นทางในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV พบว่าโพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV ทั้งในด้านของอัตราการรับส่งกลุ่มข้อมูล โดยโพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการรับ - ส่งกลุ่มข้อมูลเฉลี่ยถึง 99% สำหรับเครือข่ายที่มีความหนาแน่นเพียงพอให้กลไกซ่อมแซมเส้นทางที่นำเสนอทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือแม้กระทั่งเครือข่ายที่มีความหนาแน่นน้อยๆ โพรโทคอลที่นำเสนอยังคงแสดงประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าโพรโทคอล AODV ด้วยเช่นกัน ในด้านความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอมีค่าความล่าช้าที่น้อยกว่าโพรโทคอล AODV โดยเฉลี่ยที่ 25% ถึง 45% ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นเพียงพอให้กลไกซ่อมแซมเส้นทางที่นำเสนอทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนในด้านของปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายพบว่ากลไกซ่อมแซมเส้นทางที่นำเสนอสามารถลดปริมาณกลุ่มข้อมูลดังกล่าวลงได้เป็นอย่างมากคือตั้งแต่ 25% ถึง 55% ของปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในเครือข่ายที่ใช้โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV อย่างไรก็ดีโพรโทคอลที่นำเสนอต้องการพื้นที่หน่วยความจำที่เพิ่มขึ้นเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟัง โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณความต้องการหน่วยความจำของโพรโทคอลที่นำเสนอมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นกว่าปริมาณการใช้หน่วยความจำของโพรโทคอล AODV เป็นอย่างมาก แต่จากการพิจารณาถึงปริมาณการใช้หน่วยความจำที่ต้องการเปรียบเทียบกับปริมาณหน่วยความจำของอุปกรณ์ในปัจจุบัน พบว่าปริมาณหน่วยความจำที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย

เนื่องจากมีปริมาณความต้องการหน่วยความจำโดยรวมมีขนาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับปริมาณหน่วยความจำของอุปกรณ์ในปัจจุบันซึ่งมีปริมาณมากว่าในระดับหลายพันเท่า

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโพรโทคอลทั้งสองในเบื้องต้นอีกด้วยซึ่งเป็นแนวทางการวิจัยในอนาคตและได้กล่าวรายละเอียดในบทถัดไป จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าพลังงานของอุปกรณ์ส่วนใหญ่ถูกใช้ในกระบวนการค้นหาและซ่อมแซมเส้นทางของทั้งโพรโทคอล AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยโพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้พลังงานในส่วนดังกล่าวมากกว่าโพรโทคอล AODV เพียงเล็กน้อย โดยเมื่อจำแนกการใช้พลังงานของกระบวนการดังกล่าว พบว่ากลไกซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอล OHO มีการใช้พลังงานในการส่งกลุ่มข้อมูลของกระบวนการดังกล่าวน้อยกว่าโพรโทคอล AODV เป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนออาศัยการดักฟังกลุ่มข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเส้นทางที่อยู่บริเวณรอบๆตัวเอง ซึ่งการดักฟังกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในกระบวนการดังกล่าวด้วย ทำให้ปริมาณการใช้พลังงานโดยรวมของโพรโทคอลที่นำเสนอมีปริมาณมากกว่าโพรโทคอล AODV ในทุกเครือข่าย แต่อย่างไรก็ดีได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบพฤติกรรมของการดักฟังกลุ่มข้อมูลของโพรโทคอลที่นำเสนอให้มีการดักฟังเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ เพื่อทำการลดปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการดังกล่าว โดยจากผลการทดลองพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการดังกล่าวลงได้มากกว่าครึ่งหนึ่ง โดยที่ยังคงประสิทธิภาพการทำงานที่ใกล้เคียงกับโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนทำการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการดักฟังเป็นอย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของโพรโทคอลที่นำเสนอดีกว่าโพรโทคอล AODV ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดในระดับสูง

อย่างไรก็ดีโพรโทคอลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังคงต้องการการวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของระยะเวลารอคอยของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางให้มีความเหมาะสม และไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความล่าช้าอย่างร้ายแรงในกรณีที่การซ่อมแซมเส้นทางล้มเหลว รวมไปถึงคาบระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดักฟังกลุ่มข้อมูล โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคาบระยะเวลาการดักฟัง ทั้งในด้านของอัตราการส่งกลุ่มข้อมูลต่อวินาที และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเครือข่าย ซึ่งคาบระยะเวลาในการดังฟังกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจะส่งผลในเรื่องของประสิทธิภาพของการใช้พลังงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
แนวทางการวิจัยในอนาคต
การวิเคราะห์ข้อมูลในด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

6.1 การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (EFFICIENCY OF ENERGY CONSUMPTION)

ในขณะที่การเคลื่อนที่ของโหนดเป็นลักษณะพื้นฐานของเครือข่าย ส่งผลให้เส้นทางเกิดความเสียหายบ่อยครั้ง ทำให้โพรโทคอลจัดเส้นทางต้องทำการซ่อมแซมเส้นทางบ่อยครั้ง อันเป็นผลทำให้มีปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายมีเป็นจำนวนมาก ผลกระทบดังกล่าวยังส่งผลถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโหนดในเครือข่ายที่ลดต่ำลงอีกด้วย โดยแนวคิดในการลดการใช้พลังงานของเครือข่ายไร้สายได้มีการค้นคว้าอย่างเป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายส่วนมากใช้พลังงานจากแบตเตอร์รี่ ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาการใช้งาน ทำให้เกิดแนวคิดในการประหยัดพลังงานสำหรับเครือข่ายไร้สายเกิดขึ้น งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานหรือการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แนวคิดหลักๆ คือ

1. การเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงานของอุปกรณ์เมื่อไม่มีการใช้งาน (Sleeping Mode) **[27],[28]** กล่าวคือ เมื่ออุปกรณ์ใดๆ ที่ไม่มีการใช้งานแล้ว หรือไม่มีความจำเป็นต้องรับข้อมูลหรือส่งข้อมูลในเครือข่ายไร้สายแล้ว ควรเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงานเพื่อให้มีการใช้พลังงานของโหนดน้อยที่สุด และเป็นการรักษาพลังงานของอุปกรณ์ไว้ให้มากที่สุด อย่างไรก็ดีแนวความคิดคิดดังกล่าวเหมาะสมสำหรับเครือข่ายตัวรับรู้แบบไร้สาย (Wireless sensor networks) เนื่องจากอุปกรณ์ในเครือข่ายดังกล่าวมีอัตราการเคลื่อนที่ที่ต่ำ พร้อมทั้งยังมีอัตราการส่งข้อมูลที่น้อยและสามารถกำหนดช่วงระยะเวลาในการติดต่อสื่อสารได้อย่างแน่นอนอีกด้วย ซึ่งแตกต่างจากเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง และมีช่วงเวลาในการติดต่อสื่อสารที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานไม่เหมาะสมในการนำแนวคิดดังกล่าวไปประยุกต์ใช้

2. การควบคุมกำลังการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ (Transmission Power Control) **[29]** เป็นการกำหนดพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลให้กับโหนดเพื่อนบ้านหรืออุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียง โดยแนวคิดหลักๆของการควบคุมกำลังในการส่งคือ ทำการปรับกำลังส่งของโหนดให้เพียงพอกับระยะของโหนดที่ทำการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดเพื่อนบ้าน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อโหนดเพื่อนบ้านอยู่ใกล้กับโหนดที่กำลังต้องการส่งข้อมูลจะทำการลดกำลังส่งหรือทำการปรับกำลังส่งให้เพียงพอกับระยะทางระหว่างโหนดทั้งสอง ทำให้สามารถลดจำนวนการใช้พลังงานของโหนดแต่ละโหนดได้ ด้วยแนวคิดการควบคุมกำลังการส่งกลุ่มข้อมูลให้เหมาะสม ส่งผลให้ให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูลที่เกินความจำเป็น แต่เนื่องจากแนวคิดนี้จำเป็นต้องพึ่งพากระบวนการประมาณระยะทาง

ระหว่างโหนด ทำให้แนวคิดดังกล่าวค่อนข้างมีความซับซ้อนและอาศัยข้อมูลเพื่อใช้ในกระบวนการจากชั้นเครือข่ายอื่นๆ ประกอบกับการประมาณกำลังส่งทำได้ยากและไม่แม่นยำเพียงพอ และอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครือข่ายได้อีกด้วยทำให้แนวคิดนี้ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร

3. การหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีพลังงานเหลือน้อย (Power-aware route selection) **[30]** ในเครือข่ายไร้สายเมื่อจำนวนโหนดที่หมดพลังงานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครือข่ายไร้สาย และอาจส่งผลร้ายแรงจนทำให้เครือข่ายไม่สามารถใช้งานได้อีกด้วย ดังนั้นการเลือกเส้นทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารควรคำนึงถึงปริมาณการใช้พลังงานของแต่ละเส้นทางให้มีความเหมาะสมและควรมีการกระจายตัวของการใช้พลังงานภายในเครือข่ายให้มีความเท่าเทียมกัน ดังนั้นการเปลี่ยนเส้นทางไปยังเส้นทางอื่นๆ และลดการใช้เส้นทางที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่าค่าพลังงานเฉลี่ยของเครือข่าย เพื่อช่วยยืดระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของจำนวนโหนดที่หมดพลังงานภายในเครือข่าย

4. การควบคุมการส่งข้อมูล (Broadcast Control) **[31]** แนวคิดการควบคุมการส่งข้อมูลนั้น จะใช้การหน่วงเหนี่ยวการส่งกลุ่มข้อมูลที่ได้นั้นให้ล่าช้าออกไปหรือลดจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูลที่ไม่มีความจำเป็นในเครือข่ายลง โดยปกติแล้วแนวคิดนี้นิยมใช้ในขั้นตอนของการค้นหาเส้นทาง เนื่องจากในขั้นตอนการค้นหาเส้นทางนั้นจะต้องทำการกระจายกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางไปทั่วทั้งเครือข่าย เพื่อทำการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง ด้วยวิธีการควบคุมการส่งกลุ่มข้อมูลแบบมีเงื่อนไข ทำให้สามารถลดปริมาณการส่งกลุ่มข้อมูลของกระบวนการค้นหาเส้นทางลงได้ โดยการกำหนดให้โหนดที่มีส่วนเกี่ยวข้องหรืออยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดเท่านั้น จึงจะสามารถทำการส่งต่อกลุ่มข้อมูลค้นหาเส้นทางนั้นๆ ต่อไปได้

เมื่อทำการพิจารณาแนวคิดต่างๆ ที่ใช้ในการลดการใช้พลังงานในเครือข่ายไร้สาย ร่วมกับลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าปริมาณพลังงานส่วนใหญ่ที่ถูกใช้นอกเหนือจากการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูลเกิดจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่เสียหายอันเนื่องมาจากเครือข่ายเกิดความเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแนวคิดการลดการใช้พลังงานในเครือข่ายที่เหมาะสมและที่เกี่ยวข้องโดยตรงต่อกับโพรโทคอลจัดเส้นทาง คือ แนวคิดของการควบคุมการส่งข้อมูล (Broadcast Control) ประกอบกับโพรโทคอลที่นำเสนอมีการปรับปรุงในส่วนของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่ดำเนินการซ่อมแซมแบบท้องถิ่นทำให้มีการลดปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวเป็นอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงได้เพิ่มการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโพรโทคอลที่นำเสนออีกด้วย

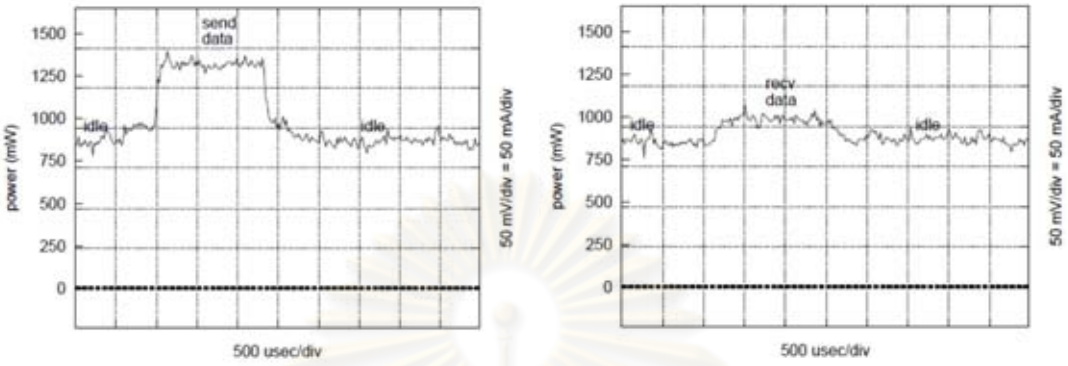
6.2 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายไร้สาย

จากงานวิจัยของ Feeney L. และคณะ**[31]** ได้ทำการทดสอบการใช้พลังงานในการรับ-ส่งข้อมูลของอุปกรณ์เครือข่ายแบบไร้สาย IEEE 802.11 โดยทำการวัดการใช้พลังงานจากอุปกรณ์ Lucent IEEE802.11 WaveLan Card ซึ่งการใช้พลังงานในการรับส่งกลุ่มข้อมูลแบบแพร่กระจายได้แสดงดังรูปที่ 40 และการใช้พลังงานในการรับส่งกลุ่มข้อมูลระหว่างโหนดได้แสดงดังรูปที่ 41 จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ในขั้นตอนการส่งกลุ่มข้อมูลจะมีปริมาณการใช้พลังงานที่สูงที่สุด คือประมาณ 1.3 มิลลิวัตต์ แต่มีจุดที่น่าสังเกตคือ ปริมาณการใช้พลังงานในขั้นตอนการรับข้อมูลของอุปกรณ์และในขณะที่อุปกรณ์อยู่ในสภาวะไม่ได้ใช้งาน พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันมาก โดยในการรับข้อมูลจะใช้พลังงานประมาณ 0.97 มิลลิวัตต์ ส่วนในขณะที่โหนดอยู่ในสภาวะที่ไม่ได้ใช้งาน จะมีการใช้พลังงานที่ 0.84 มิลลิวัตต์ ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 15% ซึ่งจุดนี้เป็นผลทำให้การดักฟังข้อมูลเส้นทางการติดต่อสื่อสารใดๆ จะมีการใช้พลังงานที่มากกว่าปกติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ข้อมูลเส้นทางที่ได้รับจากการดักฟังจะช่วยให้สามารถทราบถึงข้อมูลของเส้นทางที่ใช้ในการส่งกลุ่มข้อมูล อันเป็นประโยชน์ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอ

นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวยังได้ทำการสรุปอัตราการพลังงานในกระบวนการต่างๆของอุปกรณ์ไร้สายเป็นแบบสมการเส้นตรงดังตารางที่ 11 ซึ่งข้อมูลและอัตราการใช้พลังงานในกระบวนการต่างๆของอุปกรณ์ไร้สายได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองเพื่อทำการวัดหาปริมาณการใช้พลังงานโดยรวมของเครือข่าย ในการทดสอบทางด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะทำการทดสอบโดยใช้ค่ากำหนดต่างๆที่เหมือนกับตารางที่ 10 ในบทที่ 3 พร้อมทั้งกำหนดปริมาณเส้นทางการส่งข้อมูลที่ 5 เส้นทาง เนื่องจากการวิเคราะห์ในบทที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในด้านต่างๆของโพรโทคอลที่นำเสนอมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการทดสอบเครือข่ายด้วยปริมาณเส้นทางการส่งข้อมูลที่ 5 เส้นทางจะสามารถเป็นตัวแทนการทดสอบเครือข่ายอื่นๆได้เช่นเดียวกัน

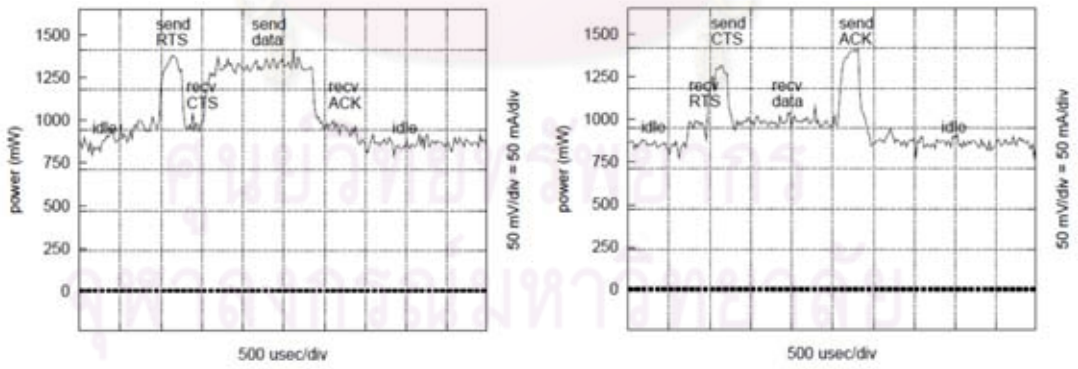
ตารางที่ 11 อัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในขั้นตอนการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูล

	μW·sec/byte	μW·sec
Point-to-point sending	1.9 x size	+ 454
Broadcast sending	1.9 x size	+ 266
Point-to-point receiving	0.5 x size	+ 356
Broadcast receiving	0.5 x size	+ 56
Idle (ad hoc)	843 mW	
Idle (BSS)	66 mW	



(a) (b)

รูปที่ 40 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน (a)การส่งกลุ่มข้อมูลแบบแพร่กระจาย (b)การรับกลุ่มข้อมูลแบบแพร่กระจาย **[31]**



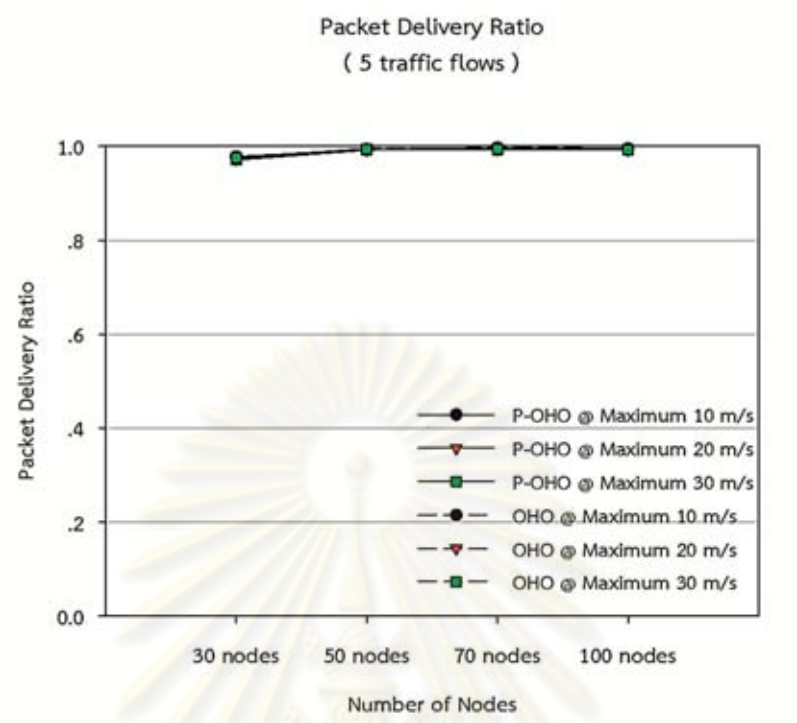
(a) (b)

รูปที่ 41 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน (a) การส่งกลุ่มข้อมูลระหว่างโหนด (b) การรับกลุ่มข้อมูลระหว่างโหนด **[31]**

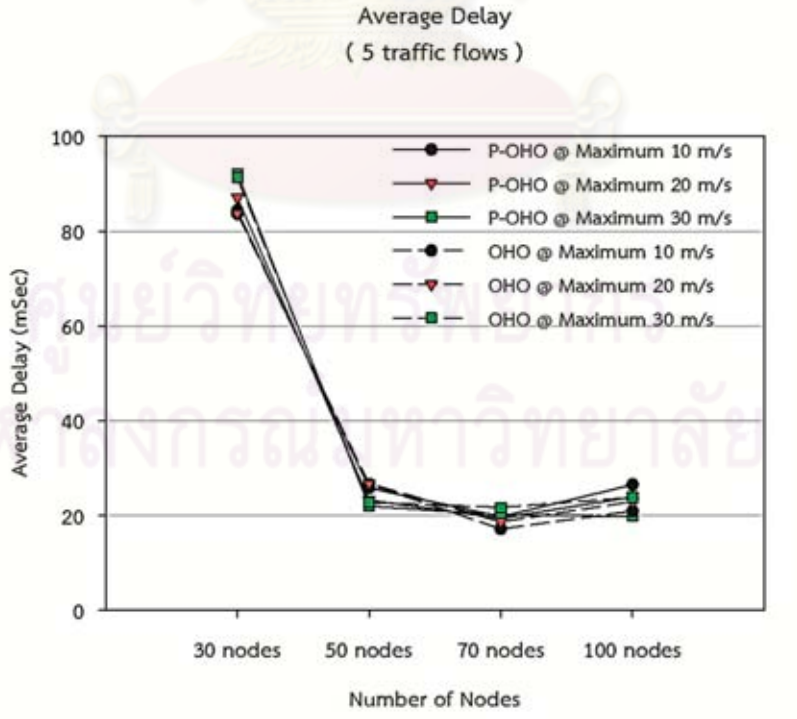
จากผลการทดลองด้านการใช้พลังงานในเบื้องต้นในด้านปริมาณการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลหนึ่งกลุ่มข้อมูลของโพรโทคอลต่างๆ พบว่าโพรโทคอล AODV มีการใช้พลังงานในการส่งกลุ่มข้อมูลหนึ่งๆ เพิ่มขึ้นตามความหนานแน่นของเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากผลกระทบของกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางที่มีการแพร่กระจายกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ในขณะที่กลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO จะมีการใช้พลังงานในการส่งกลุ่มข้อมูลหนึ่งๆ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับโพรโทคอล AODV จากผลการทดลองเบื้องต้นดังกล่าวพบว่ากลไกซ่อมแซมเส้นทางมีการใช้พลังงานในการส่งกลุ่มข้อมูลที่มากกว่าโพรโทคอล AODV ประมาณ 8% - 20% เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นของโพรโทคอล AODV พบว่าอัตราการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ความหนานแน่นของโหนดในเครือข่าย และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย โดยเครือข่ายที่มีความหนาแน่นสูงย่อมส่งผลให้โหนดที่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องสูญเสียพลังงานบางส่วนในกระบวนการดังกล่าวด้วย ประกอบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้เส้นทางเกิดความเสียหายได้บ่อยขึ้น ส่วนสาเหตุที่กลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO มีการใช้พลังงานในการส่งที่มากกว่าโพรโทคอล AODV เนื่องมาจากกลไก OHO จำเป็นต้องพึ่งพาการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลรอบๆโหนด เพื่อนำมาใช้ในการสร้างข้อมูลเส้นทางบริเวณรอบๆ ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานในการดักฟังของโหนด ประกอบกับโหนดทำการดักฟังกลุ่มข้อมูลทุกกลุ่มที่อยู่ในบริเวณการรับสัญญาณของโหนด จึงทำให้ปริมาณการใช้พลังงานในส่วนของการดักฟังมีปริมาณมากกว่าที่กลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO สามารถทำการลดการใช้พลังงานของเครือข่ายลงได้ และเมื่อรวมการใช้พลังงานทั้งสองส่วนแล้วทำให้กลไกซ่อมแซมเส้นทาง OHO มีปริมาณการใช้พลังงานในการส่งกลุ่มข้อมูลหนึ่งๆ ที่มากกว่าโพรโทคอล AODV

เนื่องจากกลไกที่นำเสนอมีการใช้ประโยชน์จากการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเส้นทาง แต่กระบวนการดักฟังจำเป็นต้องใช้พลังงานเพื่อทำการรับกลุ่มข้อมูล ซึ่งจากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าพลังงานที่ถูกใช้ในการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลในเครือข่ายมีปริมาณมาก โดยปริมาณพลังงานที่ใช้ในการดักฟังจะขึ้นกับปัจจัยทางด้านความหนาแน่นของเครือข่ายและปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลรอบๆโหนดที่ทำการดักฟังเท่านั้น ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูลแบบ CBR ของโพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าโพรโทคอล AODV เนื่องจากปริมาณการใช้พลังงานที่สูงของการดักฟังกลุ่มข้อมูลทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเชิงลบมากกว่าที่การปรับปรุงกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงแนวคิดในการลดปริมาณการใช้พลังงานในส่วนของการดักฟังกลุ่มข้อมูลลง โดยที่โพรโทคอลยังคงประสิทธิภาพที่ดีในด้านอื่นๆ ไว้ด้วย

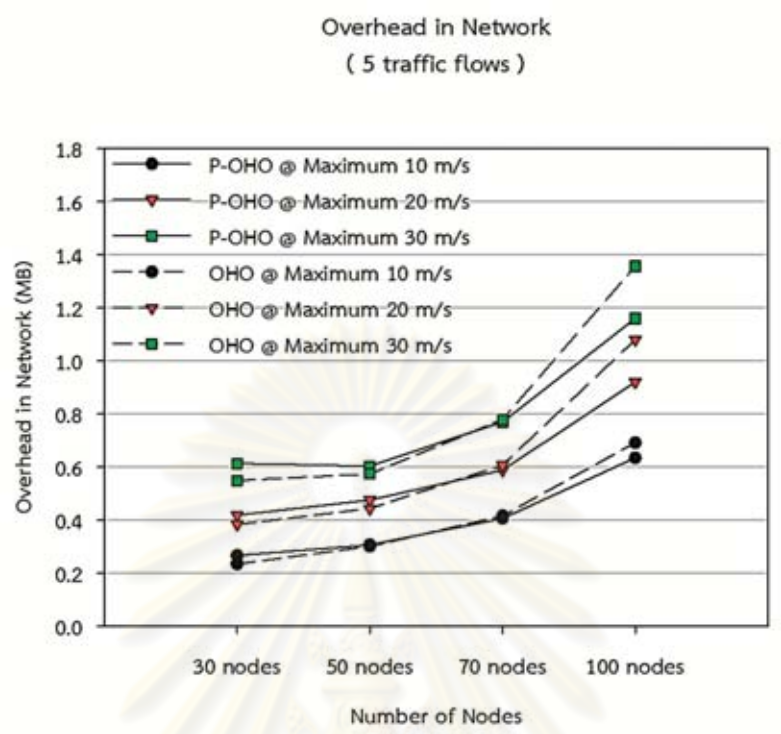
เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลให้การดักฟังกลุ่มข้อมูลมีการใช้พลังงานในปริมาณที่สูง พบว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการดักฟังคือ ปริมาณของเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลในบริเวณของโหนดนั้นๆ อัตราการส่งกลุ่มข้อมูลต่อวินาทีของเส้นทางนั้นๆ และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย กล่าวคือเมื่อมีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูลและอัตราการส่งกลุ่มข้อมูลที่สูงจะทำให้โหนดที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวมีการใช้พลังงานในการดักฟังที่สูง แต่เนื่องจากข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง ดังนั้นควรจะมีการปรับปรุงข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายหรือเส้นทางอย่างสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้า ทำให้ข้อมูลเส้นทางที่ได้จากการดักฟังเป็นข้อมูลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเส้นทางบ่อยครั้ง ซึ่งทำให้การดักฟังกลุ่มข้อมูลครั้งนั้นๆ ไม่มีประโยชน์เท่าที่ควร ด้วยเหตุนี้แนวคิดในการดักฟังการส่งกลุ่มข้อมูลแบบเป็นคาบเวลาจึงเข้ามามีบทบาทในการลดปริมาณการใช้พลังงานจากการดักฟัง โดยปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อคาบระยะเวลาในการดักฟังคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายและอัตราการส่งกลุ่มข้อมูล ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดคาบระยะเวลาในการดักฟังให้ครอบคลุมและเหมาะสมกับปัจจัยทั้งสอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบและวิเคราะห์หาคาบระยะเวลาหรือรูปแบบในการประมาณคาบเวลาที่เหมาะสมในการดักฟังซึ่งยังเป็นข้อจำกัดของงานวิจัยนี้อีกประการหนึ่งด้วย และเพื่อเป็นการพิสูจน์แนวคิดดังกล่าว จึงได้ทำปรับปรุงโพรโทคอลที่นำเสนอให้มีการดักฟังเป็นคาบระยะเวลาที่คงที่ โดยกำหนดให้ทำการดักฟังเป็นระยะเวลา 1 วินาที ทุกๆระยะเวลา 2 วินาที โดยจากผลการทดลองในเบื้องต้นสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการดักฟังกลุ่มข้อมูลได้เป็นอย่างมากและส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV อย่างเห็นได้ชัดในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นและอัตราการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายในระดับสูง และในขณะเดียวกันโพรโทคอลที่ทำการปรับปรุงในส่วนของการดักฟังก็ยังคงมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับโพรโทคอลที่นำเสนอเป็นอย่างมากทั้งในด้านของอัตราการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูล, ความล่าช้าในการรับ-ส่งกลุ่มข้อมูล, และปริมาณค่าใช้จ่ายในเครือข่ายดังรูปที่ 42 ถึง 44 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวคิดในการดักฟังเป็นคาบเวลาสามารถช่วยในเรื่องของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์ได้อีกด้วย



รูปที่ 42 อัตราส่วนจำนวนการรับกลุ่มข้อมูลที่โหนดปลายทางเทียบกับจำนวนการส่งกลุ่มข้อมูล
ที่โหนดต้นทางภายใต้เครือข่ายที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง



รูปที่ 43 ค่าความล่าช้าในการส่งกลุ่มข้อมูลแบบเฉลี่ยภายใต้เครือข่าย
ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง



รูปที่ 44 ปริมาณกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาและปรับปรุงซ่อมแซมเส้นทางภายใต้เครือข่าย ที่มีปริมาณเส้นทางการส่งกลุ่มข้อมูล 5 เส้นทาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Murthy, C. S. R., and Manoj, B.S. Ad Hoc Wireless Networks: Architestures and Protocols. NJ, USA: Prentice Hall PTR Upper Saddle River, 2004.

[2] IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE 802.11: IEEE-SA, 2007.

[3] IEEE Standard for Information technology-Specific requirements - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications IEEE 802.3: IEEE-SA, 2008.

[4] Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., and Stojmenovic, I. Mobile Ad Hoc Networking. 1st ed. USA: Wiley-IEEE Press, 2004.

[5] Perkins, C., and Bhagwat, P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. ACM SIGCOMM Computer Communication Review 24 (October 1994): 234-244.

[6] Clausen, T., and Jacquet, P. RFC 3626: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). United States: RFC Editor, 2003.

[7] Maltz, D., and Broch, J. RFC 4728: The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks. United States: RFC Editor, 2007.

[8] Perkins, C., and Royer, E. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. United States: IETF Editor, 2003.

[9] Perkins, C., and Royer, E. RFC 3561: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. United States: RFC Editor, 2003.

[10] Haas, Z. J. A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks. Proceedings of 6th International Conference on Universal Personal Communications, pp.562-566. USA: Wiley-IEEE Press, 1997.

[11] Sinha, P., Sivakumar, R., and Bharghavan, V. CEDAR: a core-extraction distributed ad hoc routing algorithm. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 17 (August 1999): 1454-1465.

[12] Perkins, C., Royer, E., Das, S., and Marina, M. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc netwoks. Proceedings of the 8th International Conference on IEEE Personal Communications, pp.16-28. USA: Wiley-IEEE Press, 2001.

[13] Maltz, D., Broch, J., Johnson, D., Hu, Y. C., and Jetcheva, J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.85-97. New York: ACM New York, 1998.

[14] Zhu, W., Zhang, X., Liu, Y., and Li, N. Improve preemptive routing performance in mobile ad hoc networks with Cache-enabled method. Proceedings of the 3rd International Conference on Communications and Networking in China, pp.732-736. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[15] Liu, G., Wong, K. J., Lee, B. S., Seet, B. C., Foh, C. H., and Zhu, L. PATCH : A novel local recovery mechanism for mobile ad-hoc networks. Proceedings of the 58th IEEE Vehicular Technology Conference, 2003, pp.2995-2999. USA: Wiley-IEEE Press, 2003.

[16] Crisostomo, S., Sargento, S., Brandao, P., and Prior, R. Improving AODV with preemptive local route repair. Proceedings of the International Workshop Wireless Ad-Hoc Networks, 2004, pp.223-227. USA: Wiley-IEEE Press, 2004.

[17] Otakahn, A., and Lertwatechakul, M. An Improvement of Ad Hoc Route Maintenance. Proceedings of the International Symposium Communications and Information Technologies, 2008, pp.95-99. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[18] Pandey, M., Pack, R., Wang, L., Duan, Q., and Zappala, D. To Repair or Not To Repair: Helping Ad-hoc Routing Protocols to Distinguish Mobility from Congestion. Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications, pp.2311-2315. USA: Wiley-IEEE Press, 2007.

[19] Wenying, G., and Pengwei, L. An optimized AODV protocol for ad hoc network. Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008, pp.1-4. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[20] Bai-Long, X., Wei, G., Jun, L., and Si-Lu, Z. An improvement for local route repair in mobile ad hoc networks. Proceedings of the 6th International Conference IEEE ITS Telecommunications, 2006, pp.691-694. USA: Wiley-IEEE Press, 2006.

[21] He, Y., Li, C., He, Z., and Xiong, Z. Fast Route Repair for Continuous Video Transmission over Mobile Ad Hoc Networks. Proceedings of the 4th International Conference Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008, pp.1-5. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[22] Pham, N. D., and Choo, H. Energy efficient expanding ring search for route discovery in MANETs. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 2008, pp.3002-3006. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[23] Sarma, N., Nandi, S., and Tripathi, R. Enhancing Route Recovery for QAODV Routing in Mobile Ad Hoc Networks. Proceedings of the International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 2008, pp.39. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[24] Shrestha, N., and Mans, B. Exploiting Overhearing: Flow-Aware Routing for Improved Lifetime in Ad Hoc Networks. Proceedings of the IEEE International Conference Mobile Ad hoc and Sensor Systems, 2007, pp.1-5. USA: Wiley-IEEE Press, 2007.

[25] Varadhan, K. The Network Simulator (NS-2). [online]. (2010). Availabble from: http://www.isi.edu/nsnam/ns [2010, October 28]

[26] Yoon, J., Liu, M., and Noble, M. Random waypoint considered harmful. Proceedings of the IEEE 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp.1312-1321. USA: Wiley-IEEE Press, 2003.

[27] Singh, S., and Reghavendra, C. S. Power Efficient MAC Protocol for Mul-tihop Radio Networks. Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1998, pp.153-157. USA: Wiley-IEEE Press, 1998.

[28] Dhurandher, S.K., Misra, S., Obaidat, M. S., Bansel, V., Singh, P., and Punia, V. An energy-efficient on-demand routing algorithm for mobile ad-hoc networks. Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2008, pp.958-961. USA: Wiley-IEEE Press, 2008.

[29] Gao, C., and Jantti, R., A reactive power-aware on-demand routing protocol for wireless ad hoc networks. Proceedings of the 59th IEEE Vehicular Technology Conference, 2004, pp. 2171-2175. USA: Wiley-IEEE Press, 2004.

[30] Toh, C. K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. IEEE Communications Magazine (June 2001).

[31] Feeney, L. M., and Nilsson, M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp.1548-1557. USA: Wiley-IEEE Press, 2001.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรวัฒน์ ศิริหล้า เกิดเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน 2528 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาเทคโนโลยีการบินบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการจราจรทางอากาศ สถาบันการบินพลเรือน ภายใต้ความร่วมมือของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 (เกียรตินิยมอันดับ 2) และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย