



วิทยานิพนธ์

การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย
โดยการเลือกตัด

**REDUNDANCY REDUCTION BROADCAST IN MOBILE
AD HOC NETWORKS BY SELECTIVE PRUNING**

นายไทรวิช วงศ์สัมมาชีพ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

ปริญญา

วิทยาการคอมพิวเตอร์

สาขา

วิทยาการคอมพิวเตอร์

ภาควิชา

เรื่อง การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายโดยการเลือกตัด

Redundancy Reduction Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks by Selective Pruning

นามผู้วิจัย นายไตรวิช วงศ์สัมมาชีพ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ขวลิศ ศรีสถาพรพัฒน์, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพุมล กิตติสิน, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนันต์ ผลเพิ่ม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุมาพร ศิริธรรานนท์, M.S.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายโดยการเลือกตัด

Redundancy Reduction Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks by Selective Pruning

โดย

นายไทรวิช วงศ์สัมมาชีพ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

พ.ศ. 2550

ไทรวิช วงศ์สัมมาชีพ 2550: การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย
โดยการเลือกตัด ปริญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)
สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ประชานกรรมการที่ปรึกษา:
อาจารย์ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์, Ph.D. 101 หน้า

การแพร่สัญญาณเป็นการทำงานขั้นพื้นฐานของการสื่อสารในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย เช่น
โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบตามความต้องการอาศัยการแพร่สัญญาณเพื่อหาเส้นทางในการเชื่อมต่อ การแพร่
สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายใช้การกระจายทุกทิศทางในการส่งข้อมูลไปยังทุกโหนด แต่ละโหนดใน
เครือข่ายจะส่งแพ็คเก็ตออกไป 1 ครั้ง หลังจากได้รับแพ็คเก็ตแพร่สัญญาณ ทำให้เกิดความซ้ำซ้อนของการส่ง
แพ็คเก็ต การแย่งใช้ช่องสัญญาณ และการชนกันของสัญญาณ จึงมีนักวิจัยเสนอวิธีการแบบต่างๆ เพื่อแก้ไข
ปัญหาเหล่านี้

ส่วนแรกของวิทยานิพนธ์นำเสนอขั้นตอนวิธีที่ได้รับการพัฒนาการเลือกโหนดจากขั้นตอนวิธีละโมบ
(Greedy Algorithm) ให้สามารถลดความซ้ำซ้อนของการเลือกโหนดในการแพร่สัญญาณ เรียกขั้นตอนวิธีที่
เสนอนี้ว่า ขั้นตอนวิธีลดความซ้ำซ้อน (Redundancy Reduction Algorithm) ส่วนที่สองนำเสนอโพรโทคอลการ
แพร่สัญญาณ 2 วิธีคือ Redundancy Reduction Broadcast (RRB) ซึ่งใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2
ฮอปเพื่อลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณ และ Redundancy Reduction Broadcast with Scalable
Broadcast (RRB-SB) ซึ่งใช้กลไกการหน่วงเวลาจาก Scalable Broadcast Algorithm (SBA) เพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพการทำงานในเครือข่ายเมื่อโหนดมีการเคลื่อนที่

ส่วนสุดท้ายนำเสนอผลการทดลองการใช้ขั้นตอนวิธีลดความซ้ำซ้อนในโพรโทคอลการจัดเส้นทาง
Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) แทนที่ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดแบบ Multipoint Relaying
(MPR) โพรโทคอลใหม่นี้เรียกว่า OLSR with Redundancy Reduction Algorithm (OLSR-RRA) ซึ่งสามารถลด
ค่าใช้จ่ายในการหาเส้นทางลงเมื่อเทียบกับ OLSR ในส่วนของการประเมินสมรรถนะใช้โปรแกรม GloMoSim
เพื่อทดสอบการทำงานของโพรโทคอลในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่ง
ของข้อมูล และความเร็วของโหนด

Trivich Wongsummachep 2007: Redundancy Reduction Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks by Selective Pruning. Master of Science (Computer Science),
Major Field: Computer Science, Department of Computer Science. Thesis Advisor:
Mr. Chavalit Srisathapornphat, Ph.D. 101 pages.

Broadcast is a fundamental communication operation in ad hoc networks. As an example, on-demand ad hoc routing protocols rely on route request broadcasts to discover routes. Flooding, a common broadcast protocol used in ad hoc networks where each node rebroadcasts once after hearing a broadcast packet, causes redundant rebroadcasts, network-wide congestions and packet collisions. Several algorithms have been introduced to alleviate the problems.

First, we propose the new algorithm: Redundancy Reduction Algorithm (RRA), which is an improvement of Greedy Algorithm for selecting the rebroadcast nodes. RRA can reduce the number of rebroadcast nodes to lower than Greedy Algorithm. Second, we propose two novel algorithms: Redundancy Reduction Broadcast (RRB), which utilizes two-hop neighbor information in order to reduce the number of nodes involved in rebroadcast and Redundancy Reduction Broadcast with Scalable Broadcast (RRB-SB), which incorporates delay mechanism from Scalable Broadcast Algorithm (SBA) to further improve broadcast efficiency in mobile networks.

Moreover, we implement RRA to replace Multipoint Relaying (MPR) in Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) and serve as its selection algorithm. The new routing algorithm, which is called OLSR with Redundancy Reduction Algorithm (OLSR-RRA), indicates routing overhead reduction in comparison to the original OLSR. GloMoSim is used in performance evaluation with the variations on node density, node mobility and traffic congestion.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ ผศ.ดร. สุชุมาล กิตติสิน กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอกที่ได้ช่วยเหลือพร้อมให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความพยายามอย่างไม่ย่อท้อ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และความช่วยเหลือด้านต่างๆ รวมทั้ง ผศ.ดร.สมหญิง ไทยนิมิต ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพื่อช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณพ่อกิตติวัฒน์ วงศ์สัมมาชีพ และคุณแม่ภคินันท์ วงศ์สัมมาชีพของข้าพเจ้าที่ทำให้กำลังใจ และคอยห่วงใยเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องในห้องปฏิบัติการปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หากปราศจากท่านทั้งหลายงานวิจัยฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ โครงการปริญญาโท ที่ได้สนับสนุนด้านอุปกรณ์ และสถานที่ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

ไทรวิช วงศ์สัมมาชีพ

พฤษภาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
ขอบเขตและข้อจำกัด	3
การตรวจเอกสาร	4
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับงานวิจัย	4
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	54
ผล	54
วิจารณ์	81
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	89
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความแตกต่างระหว่างเครือข่ายไร้สายปกติกับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย	5
2	คุณลักษณะของโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	31
3	ค่าตัวแปรสำหรับการทดลองขั้นตอนวิธี RRA	47
4	ค่าคงที่สำหรับการทดลองโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	48
5	ค่าคงที่สำหรับการทดลองโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OLSR	50

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ตัวอย่างเครือข่ายไร้สายปกติเปรียบเทียบกับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย	5
2 การทำงานของโปรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ proactive	8
3 การทำงานของโปรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive	9
4 การทำงานของโปรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical	10
5 ขั้นตอนการทำงานของวิธีกระจายทุกทิศทาง	12
6 ความซ้ำซ้อนของการส่งแพ็คเก็ต (ก) การส่งแพ็คเก็ตโดยใช้ Flooding Protocol (ข) การส่งแพ็คเก็ตโดยใช้จำนวนโหนดเท่าที่จำเป็น	13
7 พื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์เมื่อโหนด B แพร่สัญญาณต่อจากโหนด A	14
8 จำนวนครั้งที่ได้รับสัญญาณกับพื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่ม	16
9 การแย่งกันส่งสัญญาณของโหนด B และโหนด C เมื่อทำการแพร่สัญญาณต่อจากโหนด A	17
10 การชนกันของสัญญาณจากโหนด A และโหนด C ที่โหนด B	18
11 ประเภทของวิธีการที่ใช้ในการแพร่สัญญาณ	20
12 ความสามารถในการลดจำนวนโหนดกับความน่าเชื่อถือของโปรโทคอลที่มีพื้นฐานบนความน่าจะเป็น	22
13 ขั้นตอนการทำงานของ SBA	24
14 ขั้นตอนการเลือกโหนดด้วยวิธีละโมภ	26
15 ขั้นตอนการทำงานของ Dominant Pruning	27
16 ขอบเขตที่ใช้ในการพิจารณาในการเลือกโหนด (ก) DP (ข) PDP	28
17 ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR	29
18 ขั้นตอนการทำ Neighbor Sensing ของ OLSR	34
19 โหนดที่ถูกเลือกเป็น MPR ของโหนด N	35
20 การหาเส้นทางของ OLSR	36
21 ขั้นตอนวิธี RRA	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22	เปรียบเทียบการเลือกโหนด (ก) ขั้นตอนวิธีละโมบ กับขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR (ข) ขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR กับขั้นตอนวิธี RRA
23	ขั้นตอนการทำงานของ RRB-SB
24	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 1 ตั้งแต่ 30 จนถึง 120 โหนด
25	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 1 ตั้งแต่ 30 จนถึง 120 โหนด
26	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 1 ตั้งแต่ 30 จนถึง 120 โหนด (ไม่รวมการแพร่สัญญาณแบบ flooding)
27	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 2 ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โหนด
28	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 2 ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โหนด
29	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 2 ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โหนด (ไม่รวมการแพร่สัญญาณแบบ flooding)
30	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด
31	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด
32	ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด	62
34	ค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด	63
35	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	63
36	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	64
37	ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	65
38	ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	66
39	ค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	67
40	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	68
41	จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	69
42	ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	69
43	ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	70
44	ค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกิดในการส่งข้อมูล เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	72
46	จำนวนแพ็คเกิดควบคุม เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	73
47	ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	73
48	ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเกิด เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	74
49	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกิดในการส่งข้อมูล เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	75
50	จำนวนแพ็คเกิดควบคุม เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	76
51	ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	76
52	ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเกิด เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	77
53	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกิดในการส่งข้อมูล เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	78
54	จำนวนแพ็คเกิดควบคุม เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	79
55	ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 56 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของ
โหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$C(x)$	=	เซตของโหนดที่โหนด x ทำการครอบคลุมในการเลือกโหนดเพื่อทำการส่งแพ็คเก็ต
$F(x)$	=	เซตของโหนดที่ถูกเลือกจากโหนด x เพื่อทำการส่งแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ
$N(x)$	=	เซตของโหนดเพื่อนบ้านของโหนด x
$N^2(x)$	=	เซตของโหนดเพื่อนบ้านของโหนด x ในระยะ 2 ฮอป
$U(x)$	=	เซตของโหนดเพื่อนบ้านของโหนด x ในระยะ 2 ฮอปที่ยังไม่ถูกครอบคลุม

คำอธิบายอักษรย่อ

AHBP	=	Ad Hoc Broadcast Protocol
DP	=	Dominant Pruning
PDP	=	Partial Dominant Pruning
MPR	=	Multipoint Relaying
OLSR	=	Optimize Link State Routing Protocol
OLSR-RRA	=	Optimize Link State Routing Protocol using Redundancy Reduction Algorithm
RRA	=	Redundancy Reduction Algorithm
RRB	=	Redundancy Reduction Broadcast
RRB-SB	=	Redundancy Reduction Broadcast with Scalable Broadcast
SBA	=	Scalable Broadcast Algorithm

การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายโดยการเลือกตัด

Redundancy Reduction Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks by Selective Pruning

คำนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ไร้สายเป็นที่นิยมมากขึ้น จากความต้องการในการติดต่อสื่อสารบนอุปกรณ์ที่สามารถพกพาได้ ทำให้สามารถทำการติดต่อได้จากทุกหนทุกแห่ง เช่น โน้ตบุ๊ก (notebook) และ พีดีเอ (Personal Digital Assistant) ความสามารถดังกล่าวทำให้งานวิจัยด้านเครือข่ายไร้สาย (wireless network) ได้รับความสนใจ เนื่องจากเครือข่ายไร้สายมีคุณลักษณะที่แตกต่างจากเครือข่ายมีสาย การทำงานในเครือข่ายไร้สายจึงมีความแตกต่างออกไป เพราะเครือข่ายไร้สายต้องมีการจัดการการทำงานที่เพิ่มขึ้น เช่น การจัดการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของโหนด (node) ในเครือข่าย และการจัดการการชนกัน (collision) ของสัญญาณวิทยุ เป็นต้น

เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายเป็นเครือข่ายไร้สายที่ประกอบด้วยโหนดที่เป็นอิสระต่อกันมาเชื่อมต่อกันด้วยสัญญาณวิทยุ ทำให้เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายทำงานได้ในบริเวณจำกัดและเป็นเครือข่ายแบบชั่วคราว (temporary network) ทอพอโลยี (topology) ของเครือข่ายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากการที่แต่ละโหนดมีความเป็นอิสระต่อกัน ทำให้เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีความคล่องตัวสูง โหนดสามารถเชื่อมต่อหรือหยุดการเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้ตามต้องการ เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายถูกนำไปใช้ทางด้านการทหาร และการช่วยเหลือผู้ประสบภัยที่ต้องจัดตั้งเครือข่ายได้อย่างรวดเร็วและมีการเปลี่ยนแปลงง่าย การส่งสัญญาณในเครือข่ายไร้สายปัจจุบันใช้การแพร่สัญญาณ (broadcast) ด้วยวิธีกระจายทุกทิศทาง (flooding) ในการส่งแพ็คเกจไปยังทุกโหนดในเครือข่าย (Jetcheva *et al.*, 2001) ในงานวิจัยด้านการหาเส้นทาง การกระจายทุกทิศทางถูกใช้ในการหาเส้นทางแบบตามความต้องการ (on-demand routing) โดยใช้วิธีการส่งแพ็คเกจร้องขอเส้นทาง RREQ (route request packet) ไปยังโหนดในเครือข่ายเพื่อให้โหนดปลายทางได้รับ แต่การกระจายทุกทิศทางนั้นมีความซ้ำซ้อน (overhead) ในการส่งข้อมูลสูงเนื่องจากความซ้ำซ้อนในการส่ง จึงมีการวิจัยเพื่อลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจของการแพร่สัญญาณลงด้วยวิธีการแบบต่างๆ

การลดจำนวนโหนดในการส่งแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณสามารถทำได้หลายวิธี งานวิจัยทางด้านนี้ได้ถูกแบ่งเป็น 2 รูปแบบหลัก (Williams and Camp, 2002) คือ วิธีที่ใช้ความน่าจะเป็น (probabilistic approach) ในการตัดสินใจว่าโหนดจะส่งต่อแพ็คเก็ตหรือไม่ พื้นฐานความน่าจะเป็นที่ใช้ได้จากการเก็บข้อมูลของเครือข่ายในระยะเวลาหนึ่ง เช่น จำนวนแพ็คเก็ตที่รับหรือพลังงานที่เป็นตัวบ่งชี้ระยะห่างระหว่างโหนดที่ส่งและโหนดที่ได้รับสัญญาณ อีกรูปแบบคือวิธีแบบเชิงจำกัด (deterministic approach) ในการตัดสินใจว่าโหนดใดควรจะส่งต่อแพ็คเก็ต วิธีการนี้ใช้ข้อมูลความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะใกล้ จึงจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้าน เพื่อนำมาใช้พิจารณาลดจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณ การทำงานของวิธีนี้จำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่ใช้ให้เหมาะสมกับประสิทธิภาพของการแพร่สัญญาณที่ได้รับ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิจัยเพื่อลดจำนวนโหนดที่ใช้ส่งแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณ โดยเลือกใช้วิธีแบบเชิงจำกัดซึ่งใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป (2-hop neighbor knowledge) การเก็บข้อมูลในระยะ 2 ฮอปจำเป็นที่จะต้องมีการส่งข้อความทักทาย (hello message) เพื่อบอกข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านที่อยู่ติดกัน งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนดเพื่อส่งต่อแพ็คเก็ตโดยพัฒนาจากขั้นตอนวิธีละโมบ (Greedy Algorithm) (Lim and Kim, 2000) เรียกขั้นตอนวิธีใหม่นี้ว่า ขั้นตอนวิธีลดความซ้ำซ้อน (RRA) และนำขั้นตอนวิธี RRA เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR (Multipoint Relaying) (Qayyum *et al.*, 2002) ที่ได้รับการพัฒนามาจากขั้นตอนวิธีละโมบเหมือนกัน ส่วนต่อมาได้ทำการออกแบบโปรโตคอล (protocol) ของการแพร่สัญญาณโดยนำขั้นตอนวิธี RRAมาใช้ เรียกโปรโตคอลการแพร่สัญญาณใหม่ว่า การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณ (RRB) และออกแบบโปรโตคอลที่ผสมการทำงานโปรโตคอล RRB กับการทำงานของโปรโตคอล SBA (Scalable Broadcast Algorithm) เพื่อให้สามารถทำงานได้ดีในเครือข่ายที่ทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เรียกว่า การลดความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณโดยใช้การแพร่สัญญาณที่ปรับขนาดได้ (RRB-SB) ส่วนสุดท้ายเป็นการนำขั้นตอนวิธี RRAใช้ในโปรโตคอลการจัดเส้นทาง OLSR (Optimized Link-State Routing) การทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นเองและโปรแกรมจำลอง GloMoSim (Global Mobile Information System Simulator) โดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของจำนวนโหนดในเครือข่าย ความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย และความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่าย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป
2. เพื่อปรับปรุงโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการส่งแพ็คเก็ตลง และเพิ่มความน่าเชื่อถือในการส่งในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่
3. เพื่อศึกษาลักษณะของเครือข่ายที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมกับการทำงานของการแพร่สัญญาณแบบการพิจารณาโดยใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป
4. เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของขั้นตอนวิธี RRA กับขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR บนโปรโตคอลการจัดเส้นทาง OLSR

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนดแบบใหม่ที่ลดจำนวนโหนดที่ถูกเลือกในการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ
2. งานวิจัยเพื่อพัฒนาขั้นตอนการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นซึ่งช่วยลดจำนวนโหนดที่ใช้ และความคับคั่งของสัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย
3. สามารถนำขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนดไปใช้ในกระบวนการหาเส้นทางได้จริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหาเส้นทาง
4. ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการพัฒนาและการวัดประสิทธิภาพของโปรโตคอลการแพร่สัญญาณและโปรโตคอลการจัดเส้นทาง

ขอบเขตและข้อจำกัด

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในเครือข่ายซึ่งเกิดจากโปรแกรมจำลองเครือข่าย
2. ผลงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายมีไม่จำกัด
3. โหนดในเครือข่ายมีลักษณะเหมือนกันทั้งทางด้านกายภาพ รวมถึงโปรโตคอล ที่ทำงานอยู่บนอุปกรณ์

การตรวจเอกสาร

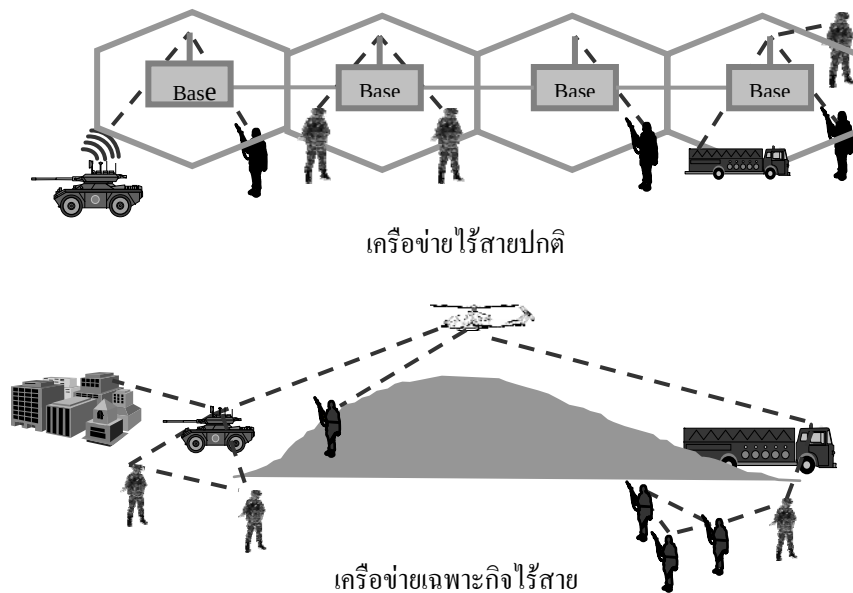
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับงานวิจัย

เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย (Mobile Ad Hoc Network) หรือเรียกย่อว่า MANET (Perkins, 1999) เป็นเครือข่ายไร้สายที่โหนดในเครือข่ายสามารถแยกกันทำงานได้อย่างอิสระ แต่ละโหนดในเครือข่ายสามารถติดต่อกับโหนดที่อยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณผ่านทางสัญญาณวิทยุ ทำให้โหนดสามารถเคลื่อนได้อย่างอิสระ โหนดในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายทำหน้าที่เหมือนเป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง (router) ด้วย เนื่องจากในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายไม่มีการวางโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) จากการที่โหนดในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายสามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้ทอพอโลยีของเครือข่ายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา การทำงานของโหนดจึงอยู่ในรูปแบบ standalone เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายไม่จำเป็นต้องมีสถานีแม่ข่าย (base station) หรือจุดเชื่อมต่อ (access point) ในการทำงาน ส่วนใหญ่เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายเป็นเครือข่ายปิดไม่มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) การส่งข้อมูลในเครือข่ายเป็นแบบ ฮอปต่อฮอป (hop by hop) ทำให้การทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีความเป็นอิสระมากกว่าเครือข่ายที่อาศัยอุปกรณ์ตัวกลางในการส่ง เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายได้รับการสนับสนุนจาก DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ตั้งแต่ช่วงต้นปี 1970 โดยเริ่มจากการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายอย่างง่ายเรียกว่า packet radio networks เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายถูกจัดให้เป็นรูปแบบหนึ่งของ IEEE 802.11 (Wi-Fi) ในรูปแบบเฉพาะกิจ เรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) แต่ละโหนดจะสามารถติดต่อกันได้โดยตรงอย่างอิสระไม่จำเป็นต้องใช้สถานีแม่ข่าย

ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการช่วยติดต่อ การติดต่อของเครือข่ายไร้สายปกติต้องติดต่อผ่านทางโครงสร้างพื้นฐาน แต่ในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายการติดต่อทำโดยส่งข้อมูลผ่านโหนดอื่นในเครือข่ายแทน ทำให้การเชื่อมต่อของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีความเป็นอิสระ ไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐาน จึงสามารถจัดตั้งเครือข่ายได้ทันทีตามความต้องการถึงแม้ในบริเวณนั้นไม่มีโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย โหนดในเครือข่ายจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับโหนดอื่นพร้อมทั้งหาเส้นทางในการส่งข้อมูล

ดังนั้นโหนดในเครือข่ายจำเป็นต้องมีโปรโตคอลการจัดเส้นทางทำงานอยู่ด้วย สามารถแสดงความแตกต่างได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ตัวอย่างเครือข่ายไร้สายปกติเปรียบเทียบกับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

ตารางที่ 1 ความแตกต่างระหว่างเครือข่ายไร้สายปกติกับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

ลักษณะ	เครือข่ายไร้สายปกติ	เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย
ลักษณะของเครือข่าย	เครือข่ายถาวร	เครือข่ายชั่วคราว
มีโครงสร้างพื้นฐานเครือข่าย	มี	ไม่มี
มีโครงสร้างพื้นฐานเครือข่าย	มี	ไม่มี
มีศูนย์กลางควบคุม	มี	ไม่มี
ทนต่อการล่มของเครือข่าย	ไม่ทน	ทน
ความสามารถในการเชื่อมต่อ	จำกัด	ไม่จำกัดจำนวน
ความสามารถในการจัดตั้ง	ต้องวางโครงสร้างพื้นฐาน	ทันที
	ล่วงหน้า	
การเชื่อมต่อแบบไร้สาย	ปกติ 1 ฮอป	ตั้งแต่ 1 ฮอปขึ้นไป
การทำงานของโหนด	อุปกรณ์ปลายทาง	อุปกรณ์ปลายทางและจัดหาเส้นทาง

ตารางที่ 1 แสดงความแตกต่างระหว่างเครือข่ายไร้สายปกติกับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย ทำให้เห็นว่าเครือข่ายทั้งสองถึงจะเป็นเครือข่ายไร้สายเหมือนกัน แต่จากการที่มีโครงสร้างของเครือข่ายที่แตกต่างกันจึงทำให้เครือข่ายทั้งสองแบบนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างมาก และมีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน

จากการที่เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง จึงได้ถูกนำไปใช้งานหลายด้าน ด้านธุรกิจสามารถนำไปใช้ในโรงงาน หรือบริเวณงานก่อสร้าง ด้านการศึกษาสามารถใช้ในงานประชุมนอกสถานที่ ด้านการใช้งานส่วนบุคคลเป็นการใช้งานเครือข่ายภายในบ้าน หรือการทำงานของเครือข่ายส่วนบุคคล (Personal Area Network) ที่ใช้ Bluetooth ในการเชื่อมต่อ ด้านการให้บริการนำไปใช้บนเครือข่ายรถแท็กซี่ และสนามกีฬา ด้านงานภาครัฐสามารถนำไปใช้ในการเกิดเหตุฉุกเฉิน การช่วยเหลือทางภัยพิบัติ และสามารถนำไปใช้ทางการทหาร ในปัจจุบันเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากปัญหาด้านความปลอดภัย และความเป็นส่วนตัว เพราะการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายต้องยอมให้โหนดในเครือข่ายส่งข้อมูลผ่านโหนดตนเองได้ จากความสามารถของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายการใช้งานในอนาคตมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น

เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีลักษณะการทำงานที่ไม่เหมือนกับการทำงานของเครือข่ายมีสายโดยทั่วไป จึงมีสิ่งที่จะต้องพิจารณาเพิ่มเติมของการทำงานในเครือข่าย จากการที่อุปกรณ์ในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเป็นอุปกรณ์ไร้สาย ทำให้การส่งข้อมูลเป็นการส่งแบบการกระจายสัญญาณออกไปเป็นรัศมีโดยรอบ ทำให้สิ่งที่เป็นข้อจำกัดของการทำงานในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย ได้แก่

การเคลื่อนที่ของโหนด การที่โหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้ทอพอโลยีมีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ดังนั้นการหาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลในเครือข่ายจะทำได้ยาก เมื่อโหนดมีการเคลื่อนที่โหนดในเครือข่ายต้องเปลี่ยนแปลงข้อมูลของทอพอโลยีตามไปด้วย อีกทั้งแต่ละโหนดสามารถเชื่อมต่อและหยุดการเชื่อมต่อได้ทุกเมื่อ ทำให้การจัดการเครือข่ายเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น

การรองรับจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้น การที่โหนดในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเป็นผลทำให้เกิดความคับคั่งของข้อมูล หากการทำงานจำเป็นต้องส่งแพ็คเก็ตจำนวนมากในเครือข่าย ทำให้เกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง เมื่อมีการแพร่สัญญาณในเครือข่ายที่

มีโหนดจำนวนมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น และหากเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นตามจำนวนโหนดในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อจำนวนฮอปในการส่งข้อมูลด้วย

พลังงานที่ใช้ พลังงานของโหนดในเครือข่ายเป็นหัวข้อหนึ่งที่เป็นปัญหาสำคัญของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย เนื่องจากโหนดในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีพลังงานจำกัด อีกทั้งยังต้องทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง ดังนั้นจึงมีการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าโหนดในเครือข่ายไร้สายปกติ จึงต้องหาวิธีใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และสามารถทำงานได้ในระยะเวลายาวนานขึ้น

ความปลอดภัย เนื่องจากโหนดในเครือข่ายมีศักยภาพที่ต่างกันทั้งยังไม่ได้เป็นของเจ้าของคนเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นการที่ยอมให้โหนดตนเองเป็นทางผ่านของข้อมูล และจากการที่แต่ละโหนดต้องเป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง ทำให้เกิดปัญหาทางด้านความเป็นส่วนตัว และความปลอดภัย โหนดในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายทำงานแบบนิรนาม (anonymous) จึงต้องอาศัยความไว้วางใจเป็นหลักในการทำงานเพื่อส่งข้อมูลในเครือข่าย

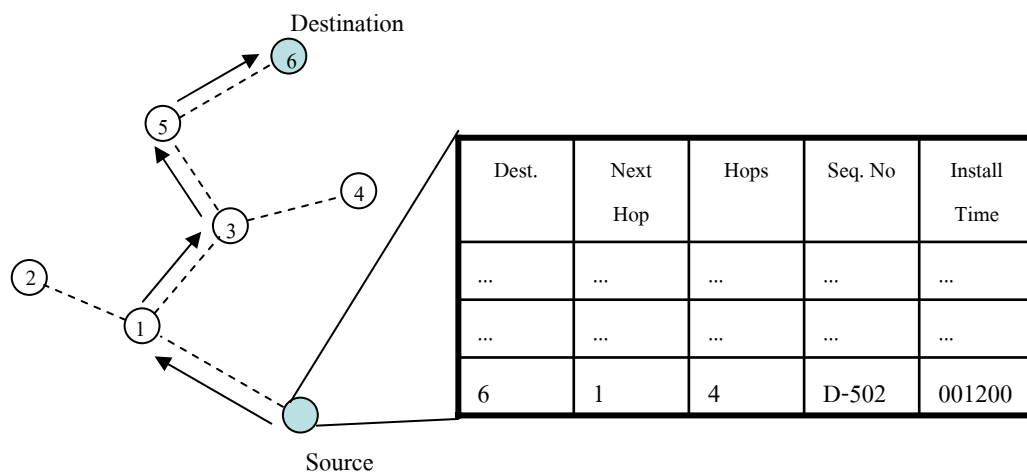
โพรโทคอลการจัดหาเส้นทางบนเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

โพรโทคอลการจัดหาเส้นทาง (Routing Protocols) เป็นโพรโทคอลที่ทำงานในระดับชั้นเครือข่าย (Network layer) เพื่อหาเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง เนื่องจากโหนดในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายต้องอาศัยโหนดอื่นในเครือข่ายทำงานเป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง งานวิจัยทางด้านการหาเส้นทางจึงถูกการพัฒนามาเพื่อให้เหมาะสมกับข้อจำกัดของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย IETF WG MANET (IETF Working Group Mobile Ad Hoc Network) เป็นองค์กรหลักที่รวบรวม แลกเปลี่ยนข้อมูลโพรโทคอลการจัดเส้นทาง และปรับปรุงข้อกำหนดคุณลักษณะของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายเพื่อให้ทำงานได้อย่างเหมาะสม โพรโทคอลการจัดเส้นทางในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้

1. โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ Proactive

เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ที่ทำการหาเส้นทางไปยังทุกโหนดเก็บไว้ในตาราง จึงมีอีกชื่อหนึ่งว่า table-driven routing protocol โพรโทคอลการจัดเส้นทางลักษณะนี้จึงสามารถส่งข้อมูลได้ทันทีเมื่อมีความต้องการในการส่งข้อมูลไปยังโหนดในเครือข่าย ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่า

เมื่อโหนดต้นทาง (source) ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง (destination) คือโหนด 6 โหนดต้นทางจะมีเส้นทางที่หาไว้ก่อนหน้าเก็บอยู่ในตาราง เพื่อสามารถใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโหนด 6 ได้ จากรูปเป็นรูปแบบตารางเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง Destination Sequence Distance Vector Routing protocol (DSDV) (Perkins and Bhagwat, 1994) เนื่องจากมีเส้นทางที่ต้องการอยู่ล่วงหน้าจึงสามารถส่งข้อมูลไปตามเส้นทางได้ทันที เส้นทางที่เก็บในตารางจะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดในการติดต่อโดยนับจากจำนวนฮอปการส่ง ในการทำงานโหนดจะแลกเปลี่ยนข้อมูลเป็นระยะเพื่อปรับปรุงเส้นทางที่ใช้ในการติดต่อ หรือเมื่อทอพอโลยีของเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลง โพรโทคอลการจัดเส้นทางลักษณะนี้เหมือนกับการค้นหาเส้นทางในการติดต่อกับโหนดปลายทางของอุปกรณ์จัดหาเส้นทางในเครือข่ายมีสายปกติ จึงทำให้โพรโทคอลประเภทนี้เหมาะกับเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โพรโทคอลในประเภทนี้ เช่น DSDV และ Optimized Link State Routing protocol (OLSR) (Clausen *et al.*, 2001)

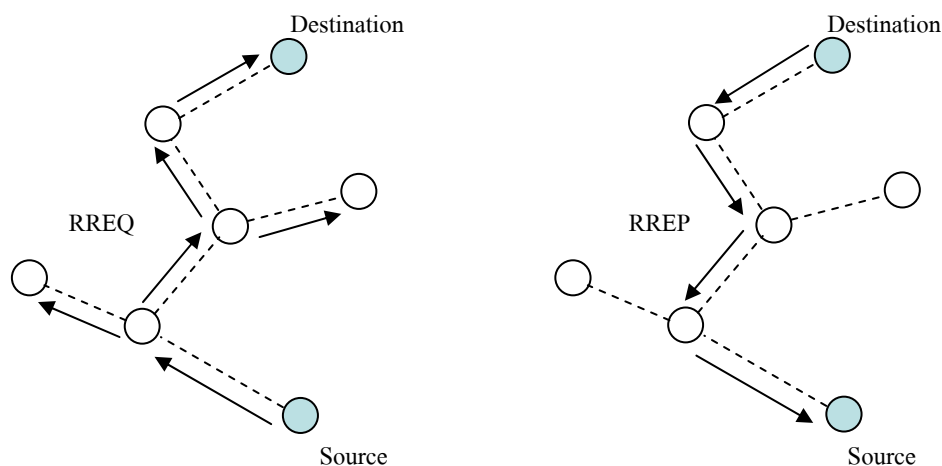


ภาพที่ 2 การทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ proactive

2. โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ Reactive

เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ที่โหนดจะทำการหาเส้นทางเมื่อมีความต้องการส่งข้อมูล จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า on-demand routing protocol เพราะจะทำการหาเส้นทางตามความต้องการส่งข้อมูลของแต่ละโหนด โพรโทคอลลักษณะนี้ไม่มีการหาเส้นทางเตรียมไว้ล่วงหน้า เหมือนกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง แบบ proactive ทำให้การส่งข้อมูลแต่ละครั้งต้องเสียเวลาในการจัดหาเส้นทางก่อน ดังภาพที่ 3 เป็นการหาเส้นทางในการติดต่อจากโหนดต้นทางไปยังโหนด

ปลายทาง การหาเส้นทางของโพรโทคอลลักษณะนี้จำเป็นต้องทำการส่งแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางออกไปแบบแพร่สัญญาณไปยังทุกโหนดในเครือข่าย แต่ละฮอปที่แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางผ่านจะจดจำเส้นทางไว้ในส่วนหัว (header) ของแพ็กเก็ตเพื่อใช้เป็นเส้นทางในการติดต่อสื่อสารกลับเมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง โหนดปลายทางจะทำการส่งแพ็กเก็ตตอบกลับ (RREP) โดยจะแนบเส้นทางที่จะใช้ในการติดต่อที่เหมาะสมที่ซึ่งได้จากส่วนหัวของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางไปกับแพ็กเก็ตตอบกลับด้วย แพ็กเก็ตตอบกลับจะถูกส่งกลับตามเส้นทางที่ถูกเลือกจากเส้นทางที่ส่งแพ็กเก็ตร้องขอมา เมื่อโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตตอบกลับจะสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางผ่านเส้นทางที่ได้รับตอบกลับมา ทำให้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ reactive มีความเหมาะสมกับเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีบ่อย ตัวอย่างโพรโทคอลประเภทนี้ เช่น Dynamic Source Routing protocol (DSR) (Johnson *et al.*, 2003) และ Ad Hoc On Demand Vector Routing protocol (AODV) (Perkins and Royer, 1999)

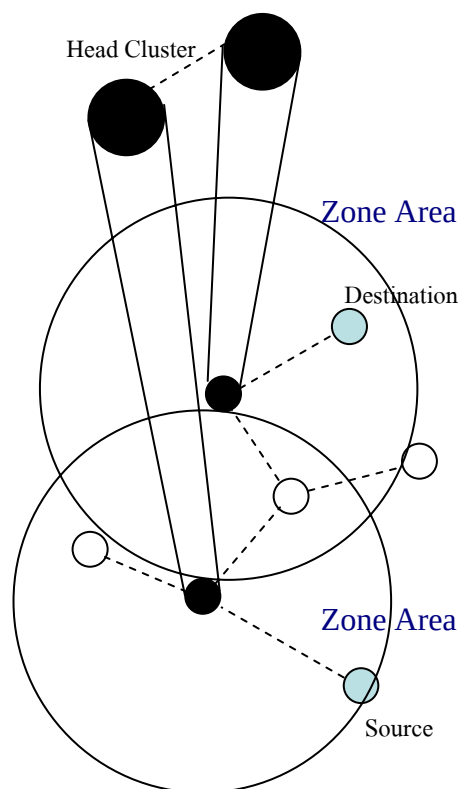


ภาพที่ 3 การทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive

3. โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ Hierarchical

เป็นโพรโทคอลการทำงานแบบผสม โดยได้นำข้อดีของโพรโทคอลแบบ proactive และ reactive มารวมไว้ด้วยกัน จึงมีอีกชื่อเรียกหนึ่งว่า hybrid routing protocol การทำงานของโพรโทคอลจะกำหนดขอบเขตเป็นจำนวนฮอปสูงสุดที่จะการทำงานแบบ proactive เพื่อสามารถติดต่อกับโหนดที่อยู่ในขอบเขตได้ทันที ถ้าโหนดปลายทางอยู่ภายในบริเวณที่ครอบคลุมด้วยการ

ทำงานแบบ proactive แต่หากเป็นการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่อยู่ภายนอกขอบเขตของการทำงานแบบ proactive โพรโทคอลในกลุ่มนี้จะส่งแพ็คเก็ตค้นหาเส้นทางออกไปเหมือนกับโพรโทคอลแบบ reactive เพื่อทำการหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง ภาพที่ 4 แสดงให้เห็นรูปแบบของ hierarchical routing protocol เปรียบเทียบโหนดสีดำให้เป็นโหนดหัวของกลุ่ม (head cluster) เมื่อมีการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะส่งไปให้โหนดหัวของกลุ่ม เพื่อพิจารณาว่ามีโหนดปลายทางอยู่ในขอบเขตหรือไม่ ถ้าโหนดปลายทางไม่อยู่ในกลุ่ม โหนดหัวของกลุ่มจะทำการแพร่สัญญาณไปยังโหนดหัวของกลุ่มอื่นต่อไปเพื่อให้ตรวจสอบว่าขอบเขตของกลุ่มใดมีโหนดปลายทางอยู่ เมื่อโหนดหัวของกลุ่มที่มีโหนดปลายทางอยู่ได้รับแพ็คเก็ต จะส่งแพ็คเก็ตตอบกลับไปยังโหนดต้นทางเพื่อให้เส้นทางในการติดต่อ ตัวอย่างโพรโทคอลประเภทนี้ เช่น Cluster Based Routing Protocol (CBRP) (Jiang *et al.*, 1999) และ Zone Routing Protocol (ZRP) (Haas *et al.*, 2002)

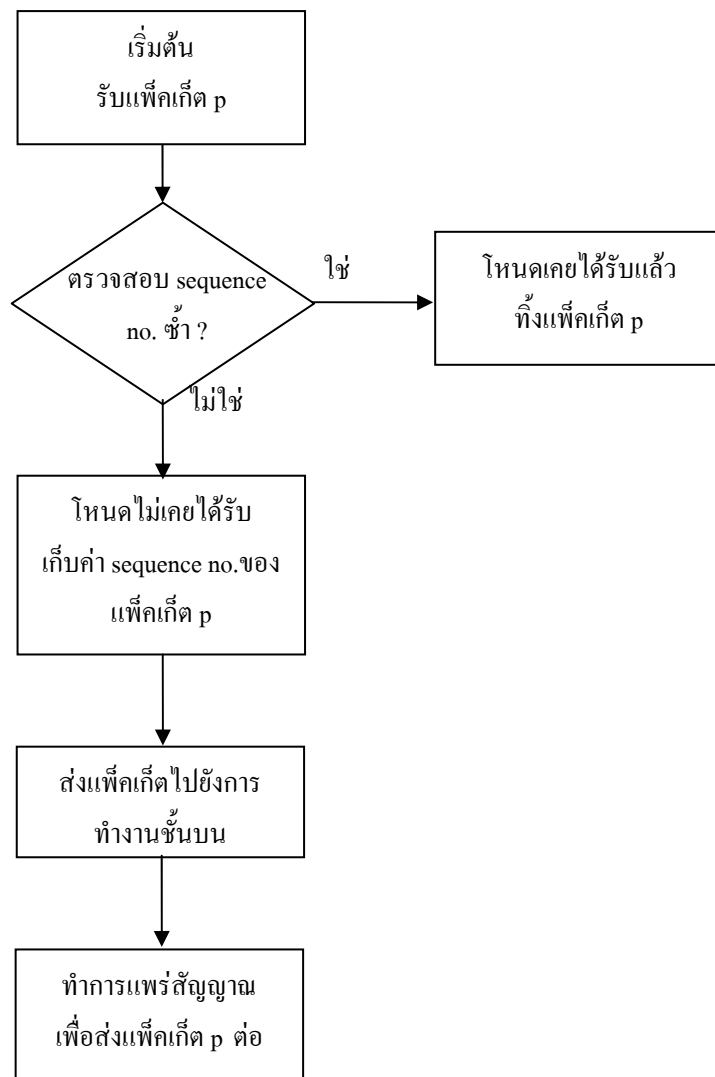


ภาพที่ 4 การทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical

การแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

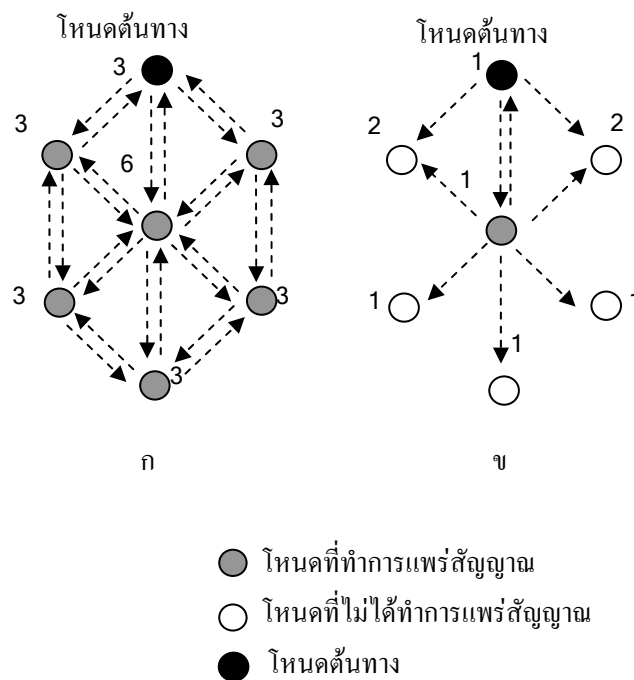
การแพร่สัญญาณเป็นรูปแบบการส่งข้อมูลเพื่อไปยังทุกโหนดในเครือข่ายโดยอาศัย broadcast address ซึ่งเป็นการกำหนดหมายเลขเครื่องปลายทางแบบ one-to-all ในการแพร่สัญญาณเครื่องทุกเครื่องที่อยู่ในเครือข่ายจะได้รับข้อมูล โดยทั่วไปในโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive จะหาเส้นทางโดยส่งแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางออกไปในรูปแบบการแพร่สัญญาณ ดังนั้นการแพร่สัญญาณจึงเป็นส่วนสำคัญในการทำงานในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย นอกจากจะใช้ในการหาเส้นทางแล้วการแพร่สัญญาณในเครือข่ายไร้สายยังสามารถส่งข้อมูลเพื่อไปยังทุกโหนดในเครือข่ายได้ เช่น ใช้ในการส่งข้อความเตือนไปยังทุกโหนด จากการที่การแพร่สัญญาณมีความสำคัญมากดังนั้นขั้นตอนวิธีในการส่งแพ็คเก็ตเพื่อให้ไปยังทุกโหนดนั้นจึงมีความสำคัญมากเนื่องจากสามารถกระทบต่อการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายทั้งหมด รูปแบบการทำงานของ การแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายปัจจุบันเป็นแบบการกระจายทุกทิศทาง (flooding) เพื่อส่งแพ็คเก็ตไปยังทุกโหนดในเครือข่าย

การแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางนั้นเป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดในการทำงาน มีความซับซ้อนในการทำงานต่ำ ต้องการเพียงหน่วยความจำเล็กน้อยในการเก็บข้อมูลของแพ็คเก็ตที่เคยได้รับมาในอดีต เพื่อใช้ในการตัดสินใจในการที่โหนดจะทำการส่งต่อแพ็คเก็ต กล่าวคือการแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางนั้นทุกโหนดในเครือข่ายที่ได้รับแพ็คเก็ตเป็นครั้งแรกจะส่งต่อแพ็คเก็ตนั้น 1 ครั้งและเมื่อได้รับแพ็คเก็ตนั้นซ้ำจะไม่ทำการส่งแพ็คเก็ตนั้นออกไปอีก การแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางถูกเสนอให้ใช้ในการแพร่สัญญาณสำหรับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายที่มีจำนวนโหนดในเครือข่ายน้อยหรือมีการเปลี่ยนแปลงสูง (Jetcheva *et al.*, 2001) และ IETF Internet draft (Jetcheva *et al.*, 2001) ได้กำหนดให้การแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางเป็นวิธีการพื้นฐานในการแพร่สัญญาณ



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของวิธีกระจายทุกทิศทาง

จากกระบวนการทำงานของการกระจายทุกทิศทาง จะเห็นว่าเมื่อโหนดได้รับแพ็กเก็ตแล้ว ต้องส่งต่อแพ็กเก็ตนั้นออกไปอีก 1 ครั้งเพื่อให้โหนดเพื่อนบ้านทุกโหนดของโหนดนั้นได้รับแพ็กเก็ต เมื่อโหนดนั้นได้รับแพ็กเก็ตซ้ำเข้ามาอีกจึงไม่จำเป็นต้องส่งต่อแพ็กเก็ตนั้นออกไป เพราะโหนดเพื่อนบ้านได้รับแพ็กเก็ตแล้ว การทำงานในลักษณะนี้ถึงแม้ว่าเครือข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลง ทอพอโลยีก็ไม่มีผลกระทบต่อการทำงาน เนื่องจากทุกโหนดจำเป็นต้องส่งต่อแพ็กเก็ตอยู่แล้วทำให้สามารถทำงานได้ดีในเครือข่ายที่โหนดมีการเคลื่อนที่



ภาพที่ 6 ความซ้ำซ้อนของการส่งแพ็คเก็ต (ก) การส่งแพ็คเก็ตโดยใช้ Flooding Protocol (ข) การส่งแพ็คเก็ตโดยใช้จำนวนโหนดเท่าที่จำเป็น

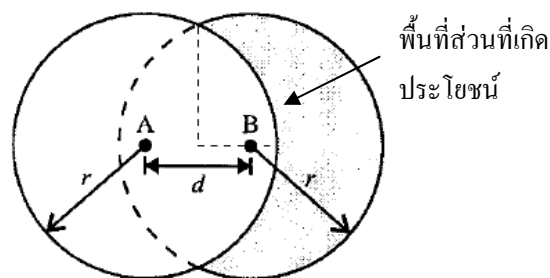
ภาพที่ 6(ก) แสดงให้เห็นว่าการแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางมีค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลสูงมาก ตัวเลขบนรูปแสดงถึงจำนวนครั้งที่แต่ละโหนดได้รับแพ็คเก็ต จะเห็นว่าโหนดในรูป 6(ก) ได้รับจำนวนแพ็คเก็ตที่มีความซ้ำซ้อนเกินความจำเป็นไปอย่างมาก โหนดที่ได้รับแพ็คเก็ตมากที่สุดได้รับแพ็คเก็ตถึง 6 ครั้ง และมีความเสี่ยงต่อการเกิดการชนกันของแพ็คเก็ตสูง การแพร่สัญญาณด้วยวิธีนี้ทำให้มีการส่งสัญญาณของทุกโหนดรวมกัน 7 ครั้ง เมื่อพิจารณาปัญหาที่เกิดจากการแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางจะเห็นว่า การส่งแพ็คเก็ตซ้ำซ้อนทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน เกิดความคับคั่งของช่องสัญญาณส่งผลให้แพ็คเก็ตส่งไปถึงโหนดในเครือข่ายได้อย่างล่าช้า และการชนกันของแพ็คเก็ตที่มีผลต่อการสูญหายของแพ็คเก็ต เนื่องจากในการแพร่สัญญาณไม่จำเป็นต้องให้ทุกโหนดในเครือข่ายส่งต่อแพ็คเก็ต ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตในเครือข่ายเฉพาะกิจไว้หลาย ดังภาพที่ 6(ข) ทุกโหนดในเครือข่ายไม่จำเป็นต้องส่งต่อแพ็คเก็ตเพื่อให้ครอบคลุมทั้งเครือข่าย จากภาพจะเห็นว่า การใช้โหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตเพียงโหนดเดียว คือ โหนดสีเทาตรงกลางก็สามารถทำให้การแพร่สัญญาณครอบคลุมได้ทั้งเครือข่าย และลดค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตเหลือเพียงการส่งสัญญาณ 2 ครั้งเท่านั้น

รูปแบบของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย การทำงานเป็นแบบที่ไม่มีความรู้ทอพอโลยีของเครือข่ายล่วงหน้าทั้งยังไม่มีวิธีการส่ง RTS/CTS (Request-to-Send/Clear-to-Send) เพื่อจองช่องสัญญาณ (Saikat *et al.*, 2003) เพราะการแพร่สัญญาณไม่ได้เจาะจงโหนดผู้รับ ซึ่งทำให้โอกาสในการชนกันของแพ็คเก็ตมีมากยิ่งขึ้นอีกทั้งการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายไม่มีการส่ง ACK (Acknowledgement) เพื่อยืนยันการได้รับแพ็คเก็ต ดังนั้นความน่าเชื่อถือ (reliable) ในการส่งจึงเป็นอีกปัญหาหนึ่งของการแพร่สัญญาณ

ในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย การที่ทุกโหนดทำการส่งต่อแพ็คเก็ต 1 ครั้งเมื่อได้รับแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณด้วยวิธีกระจายทุกทิศทาง มีผลทำให้เกิดปัญหากับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย (Tseng *et al.*, 2002) ดังนี้

1. ความซ้ำซ้อน (Redundancy)

การทำงานของการทำงานการแพร่สัญญาณด้วยวิธีกระจายทุกทิศทางมีค่าใช้จ่ายในด้านความซ้ำซ้อนของการแพร่สัญญาณสูงมาก เนื่องจากทุกโหนดต้องส่งต่อแพ็คเก็ตทั้งที่บางโหนดไม่มีความจำเป็นในการส่งเลย สามารถวิเคราะห์ค่าความซ้ำซ้อนของการส่งแพ็คเก็ตโดยไม่จำเป็นได้ดังนี้



ภาพที่ 7 พื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์เมื่อโหนด B แพร่สัญญาณต่อจากโหนด A

ภาพที่ 7 พื้นที่แรงเป็นพื้นที่ซึ่งเกิดประโยชน์เมื่อโหนด B ทำการแพร่สัญญาณต่อจากโหนด A เมื่อโหนด A ทำการส่งสัญญาณออกมาในรัศมี r จะทำให้พื้นที่โดยรอบโหนด A ซึ่งมีค่าเป็น πr^2 เป็นพื้นที่ที่ครอบคลุมโดยสัญญาณจากโหนด A โหนด B เมื่อได้รับสัญญาณจากโหนด A จะทำการส่งสัญญาณต่อ โดยพื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์ในการส่งสัญญาณต่อของโหนด B จะน้อย

กว่าพื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์ของโหนด A เนื่องจากมีพื้นที่บางส่วนซ้อนทับกับพื้นที่การส่งสัญญาณของโหนด A พื้นที่ในส่วนที่เกิดประโยชน์ของโหนด B (Benefit(B)) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

ให้ Benefit(x) คือพื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์เมื่อโหนด x ทำการแพร่สัญญาณต่อ
Area(x) คือพื้นที่ซึ่งถูกรอบคลุมด้วยสัญญาณจากโหนด x

$$\text{Benefit(B)} = \text{Area(B)} - \text{Area(A} \cap \text{B)} \quad (1)$$

$$\text{Area(B)} - \text{Area(A} \cap \text{B)} = \pi r^2 - \text{Area(A} \cap \text{B)} \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 สามารถหาค่า Area(A ∩ B) ได้โดยกำหนดให้โหนด A และโหนด B อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง d ซึ่ง d เป็นระยะทางที่ไกลที่สุดเท่ากับระยะทางเมื่อโหนด B อยู่ที่สุดขอบของรัศมีการส่งสัญญาณ (d = r)

$$\text{Area(A} \cap \text{B)} = 4 \int_{d/2}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (3)$$

$$\text{ให้ } d = r, \quad \text{Area(A} \cap \text{B)} = 4 \int_{r/2}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (4)$$

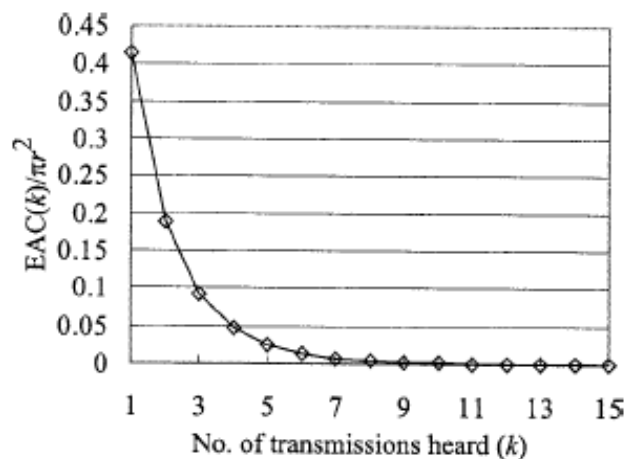
$$\text{Area(A} \cap \text{B)} = \frac{4\pi r^2}{3} + \frac{\sqrt{3}r^2}{2} \quad (5)$$

นำสมการที่ 5 แทนลงในสมการ 2 ได้ค่า Benefit(B) ซึ่งมีค่ามากที่สุดคือ

$$\text{Max Benefit(B)} = \pi r^2 - \frac{4\pi r^2}{3} + \frac{\sqrt{3}r^2}{2} \quad (6)$$

$$\text{Max Benefit(B)} = 0.61 \pi r^2 \quad (7)$$

จากสมการที่ 7 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์ของโหนด B มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 61% ของบริเวณการส่งสัญญาณของโหนด B โดยขึ้นอยู่กับระยะห่าง (d) ระหว่างโหนด A และโหนด B ดังนั้นเมื่อหาปริพันธ์ตั้งแต่ระยะห่างระหว่าง 0 ถึง r พื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์มีค่าเท่ากับ 41% ของบริเวณการส่งสัญญาณของโหนด B ตรงกับกราฟผลการทดลอง (Tseng *et al.*, 2002) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 จำนวนครั้งที่ได้รับสัญญาณกับพื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่ม

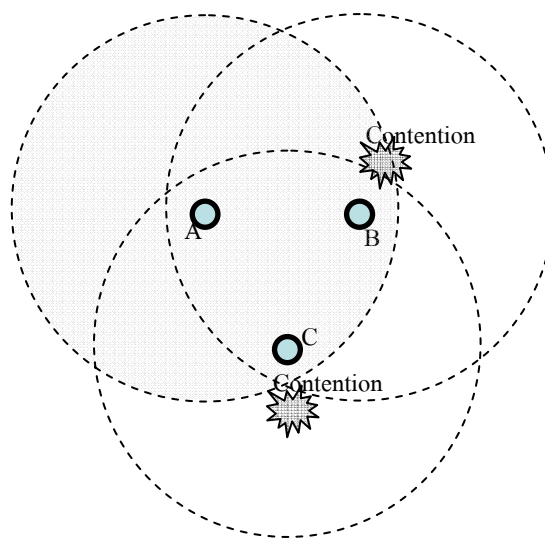
ที่มา: Yu-Chee Tseng (2002: 156)

ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนครั้งที่ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้น พื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่ม (Expected Addition Coverage : EAC) จะลดลง เมื่อโหนดได้รับสัญญาณซ้ำมากกว่า 4 ครั้ง พื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่มลดลงต่ำกว่า 5% ของพื้นที่การส่งสัญญาณทั้งหมด จึงแทบไม่มีประโยชน์เลยที่โหนดนั้นจะส่งสัญญาณต่อ ในการแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางถึงแม้โหนดจะได้รับแพ็คเก็ตซ้ำเป็นจำนวนมาก แต่โหนดยังต้องส่งแพ็คเก็ตออกไปอีกทั้งที่อาจไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ในการทำงานเลยก็ตาม

2. การแย่งชิงช่องสัญญาณ (Contention)

ในการแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางโหนดในเครือข่ายต้องทำการส่งแพ็คเก็ตต่อเมื่อได้รับแพ็คเก็ตนั้นเป็นครั้งแรก นอกจากจะทำให้เกิดความซ้ำซ้อนที่ไม่จำเป็นในการส่งแล้วยังส่งผลให้เกิดการแย่งชิงช่องสัญญาณในการส่งด้วย เนื่องจากเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีการใช้

ช่องทางการสื่อสารร่วมกัน (shared media) เมื่อโหนดในเครือข่ายที่มีระยะการส่งสัญญาณถึงกัน ต้องการส่งสัญญาณในเวลาใกล้เคียงกัน โหนดเหล่านั้นจะแย่งใช้ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่ง ยิ่งเมื่อมีความซ้ำซ้อนในการส่งแพ็คเก็ตมากขึ้นทำให้การแย่งใช้ช่องสัญญาณส่งมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูล (delivery latency) เพิ่มตามไปด้วย ดังภาพที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากโหนด A แพร่สัญญาณออกไปแล้ว เมื่อโหนด B และ โหนด C ได้รับสัญญาณดังกล่าวจะพยายามแย่งใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งต่อแพ็คเก็ต โดยเฉพาะเมื่อโหนด A มีโหนดเพื่อนบ้านจำนวนมาก การแพร่สัญญาณด้วยวิธีการกระจายทุกทิศทางจะทำให้โหนดเพื่อนบ้านของโหนด A เกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย



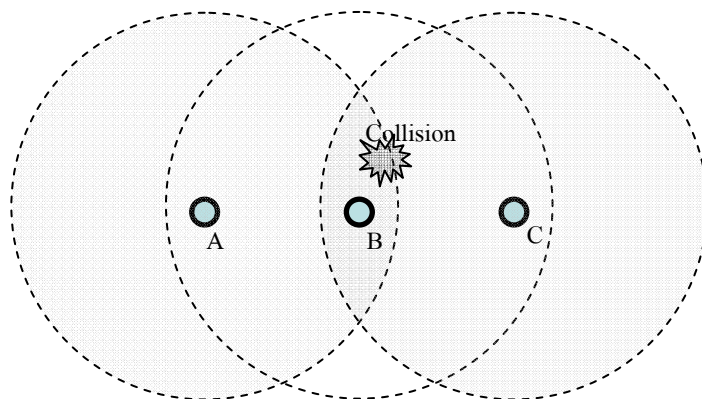
ภาพที่ 9 การแย่งกันส่งสัญญาณของโหนด B และโหนด C เมื่อทำการแพร่สัญญาณต่อจากโหนด A

จากส่วนความซ้ำซ้อนค่าเฉลี่ยของพื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์มีเมื่อโหนดทำการส่งสัญญาณต่อมีค่าเท่ากับ 41% ของพื้นที่การส่งสัญญาณทั้งหมด จากภาพที่ 9 เราสามารถหาโอกาสที่จะเกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณ จากการที่โหนด B และโหนด A มีพื้นที่ในการส่งสัญญาณซ้อนทับกัน หากมีโหนดเพื่อนบ้านของ A ในบริเวณที่สัญญาณซ้อนทับกันนี้ เช่น โหนด C ดังภาพ โหนด B และ โหนด C จะเกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณต่อเมื่อได้รับสัญญาณจากโหนด A พื้นที่บริเวณที่ทำให้เกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณคือส่วนที่โหนด A และ โหนด B ซ้อนทับกัน สามารถหาได้เท่ากับ พื้นที่การส่งสัญญาณของโหนด B – พื้นที่ส่วนที่เกิดประโยชน์ของโหนด B มีค่าเป็น $100\% - 41\% = 59\%$ หมายความว่าเมื่อโหนดส่งแพ็คเก็ตไปแล้ว โอกาสที่โหนดเพื่อนบ้าน 2

โหนดจะแย่งใช้ช่องสัญญาณเท่ากับ 59% และหากจำนวนโหนดเพื่อนบ้านมากขึ้นโอกาสเกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3. การชนกันของสัญญาณ (Collision)

การที่เครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายมีการทำงานแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) และไม่มีการใช้งาน RTS/CTS ในการแพร่สัญญาณ ทำให้การแพร่สัญญาณเกิดการชนกันของสัญญาณได้ง่าย และเกิดปัญหาการซ่อนกันของโหนด (hidden terminal) ดังภาพที่ 10 โหนด A และโหนด C ไม่สามารถส่งสัญญาณถึงกันได้ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบการใช้ช่องสัญญาณของกันและกันได้ เมื่อโหนด A และโหนด C ส่งสัญญาณไปยังโหนด B ในระยะเวลาใกล้เคียงกันทำให้เกิดการชนกันของสัญญาณที่โหนด B โหนด B จะไม่สามารถรับข้อมูลได้ทั้งจากโหนด A และ โหนด C การส่งแพ็กเก็ตออกมาในเวลาใกล้เคียงกัน โดยไม่มีการตรวจสอบการชนกัน (Collision Detection) ส่งผลให้การชนกันของแพ็กเก็ตเกิดเป็นปัญหามากขึ้น แต่ในความเป็นจริงก่อนโหนดจะส่งแพ็กเก็ตออกมาจะมีการทำ backoff delay เพื่อหน่วงเวลาในการส่งและลดการชนกันของสัญญาณในเครือข่าย โหนดในเครือข่ายจะสุ่มค่าหน่วงเวลาขึ้นมาก่อนทำการส่งแพ็กเก็ตออกไปเพื่อลดอัตราการชนกันของสัญญาณที่ส่งออกมาในกรณีโหนดที่อยู่ติดกันต้องการส่งแพ็กเก็ตในเวลาเดียวกัน



ภาพที่ 10 การชนกันของสัญญาณจากโหนด A และโหนด C ที่โหนด B

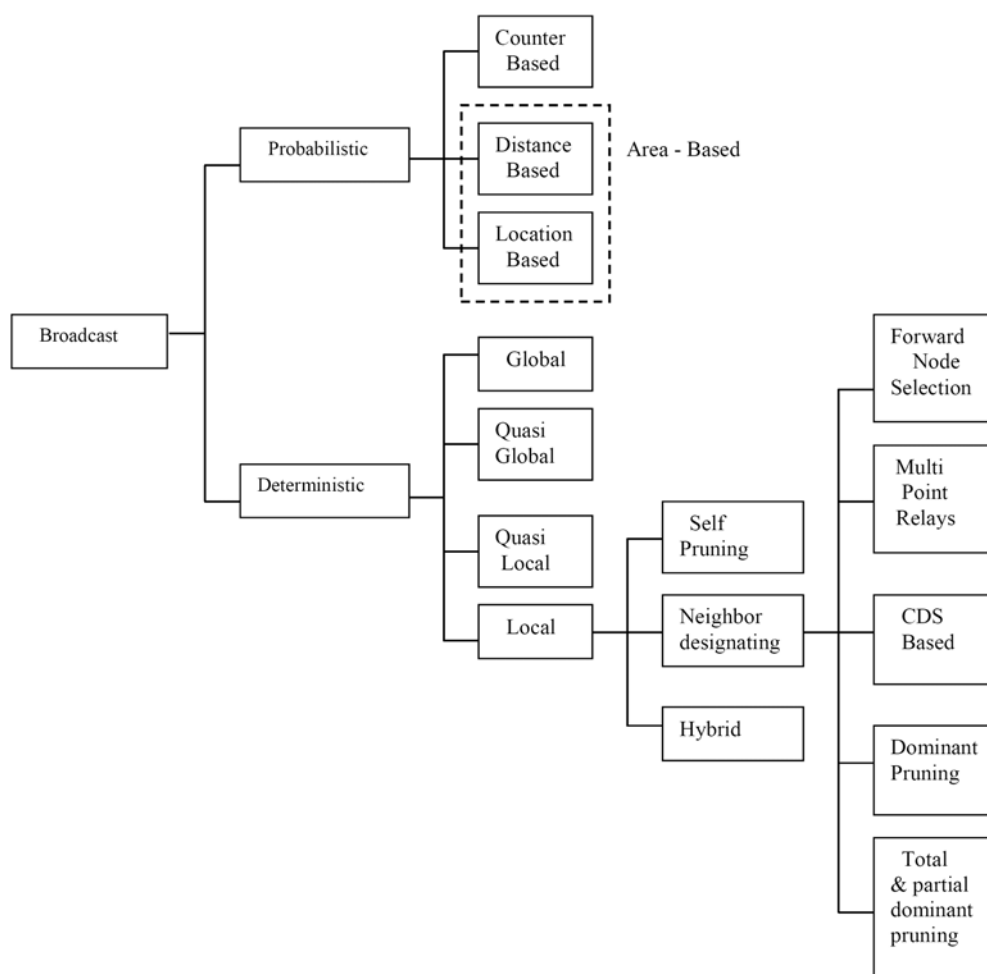
เครือข่ายที่มีการแพร่สัญญาณด้วยวิธีกระจายทุกทิศทางเมื่อโหนดทำการส่งแพ็กเก็ตออกไปแล้วโหนดเพื่อนบ้านทั้งหมดของโหนดนั้นต้องทำการส่งต่อแพ็กเก็ต การส่งต่อแพ็กเก็ตของ

โหนดเพื่อนบ้านในเวลาใกล้เคียงกันนั้นอาจทำให้เกิดการชนกันของแพ็คเก็ต และยังเครือข่ายมีความคับคั่งของข้อมูลสูง โอกาสที่จะเกิดการชนกันของสัญญาณก็จะมากขึ้นตามไปอีกด้วย การชนกันของสัญญาณทำให้เกิดการสูญหายของแพ็คเก็ต และมีผลกระทบต่ออัตราการส่งแพ็คเก็ตปลายทาง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาปัญหาของการแพร่สัญญาณพบว่า การแพร่สัญญาณนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ทุกโหนดในเครือข่ายส่งต่อแพ็คเก็ต แต่ใช้เพียงโหนดที่เหมาะสมก็สามารถแพร่สัญญาณครอบคลุมได้ทั้งเครือข่าย ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหารูปแบบของ NP-problem ที่ต้องใช้เวลานานในการคำนวณเพื่อหาคำตอบ ทำให้การทำงานจริงจึงไม่สามารถหาวิธีในการเลือกโหนดที่ดีที่สุดได้ จึงมีงานวิจัยที่พยายามลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งยังสามารถส่งแพ็คเก็ตไปถึงทุกโหนดในเครือข่ายได้ เช่นเดียวกับการแพร่สัญญาณด้วยวิธีกระจายทุกทิศทาง

ภาพที่ 11 แสดงการจำแนกงานวิจัยของการแพร่สัญญาณ (Poola, 2004) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แนวทางหลักคือ แนวทางที่อาศัยความน่าจะเป็น (probabilistic approach) และแนวทางที่เป็นแบบเชิงจำกัด (deterministic approach) แนวทางที่อาศัยความน่าจะเป็นสามารถแบ่งออกได้เป็น การใช้พื้นฐานของจำนวนครั้งที่ได้รับแพ็คเก็ต (counter-based) และใช้พื้นฐานของบริเวณ (area-based) ส่วนแนวทางที่เป็นแบบเชิงจำกัดสามารถแบ่งได้จากขอบเขตของการรวบรวมข้อมูล ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานี้เน้นหนักในการใช้ข้อมูลความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลแบบเฉพาะที่ (local) การเก็บข้อมูลแบบเฉพาะที่สามารถจำแนกได้เป็น การตัดสินใจตัดโหนดตนเอง (self-pruning) ที่แต่ละโหนดจะตัดสินใจเพื่อที่จะส่งต่อแพ็คเก็ตด้วยโหนดตนเอง การตัดสินใจโดยโหนดเพื่อนบ้าน (neighbor designating) เป็นการให้โหนดเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะทำการส่งต่อแพ็คเก็ต และแบบผสม (hybrid) ที่รวมเอาการทำงานของทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน



ภาพที่ 11 ประเภทของวิธีการที่ใช้ในการแพร่สัญญาณ

ที่มา: Shrikant Poola (2004: 5)

โพรโทคอลที่มีพื้นฐานบนความน่าจะเป็น (Probabilistic Based Protocols)

โพรโทคอลในกลุ่มนี้ทำการแพร่สัญญาณโดยอาศัยความน่าจะเป็นที่แต่ละโหนดจะทำการส่งต่อแพ็คเก็ตจากค่าของสถานะแวดล้อมของโหนด หรือจากการสุ่มค่าขึ้นมา ทำให้โพรโทคอลในกลุ่มนี้ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการทำงานมากนักเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากโหนดเพื่อนบ้านในการตัดสินใจ แต่จะใช้หลักความน่าจะเป็นในการพิจารณาการส่งต่อแพ็คเก็ตแทน โพรโทคอลในกลุ่มนี้ใช้พารามิเตอร์บางตัวที่มีผลต่อการส่งต่อแพ็คเก็ต เช่น จำนวนแพ็คเก็ตที่ได้รับ มาช่วยในการพิจารณาว่าโหนดต้องส่งต่อแพ็คเก็ตหรือไม่ (Tseng *et al.*, 2002)

1. Probabilistic scheme

โพรโทคอลนี้เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดที่ใช้ความน่าจะเป็นเลือกโหนดที่จะทำการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณ แต่ละโหนดจะถูกกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่จะส่งต่อแพ็คเก็ต เมื่อโหนดได้รับแพ็คเก็ตในครั้งแรกโหนดจะทำการสุ่มค่าเพื่อใช้พิจารณาในการส่งขึ้นมา แล้วนำค่าที่สุ่มขึ้นมาไปเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นที่ถูกกำหนดไว้ แล้วพิจารณาว่าโหนดต้องส่งต่อแพ็คเก็ตหรือไม่ การทำงานของโพรโทคอลนี้หากกำหนดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 1 เมื่อได้รับแพ็คเก็ตเป็นครั้งแรกโหนดจะส่งต่อแพ็คเก็ตเสมอ เหมือนกับการแพร่สัญญาณด้วยวิธีกระจายทุกทิศทาง ตัวอย่างของโพรโทคอลในกลุ่มนี้ ได้แก่ Gossip-based broadcast (Haas *et al.*, 2002)

2. Counter-based scheme

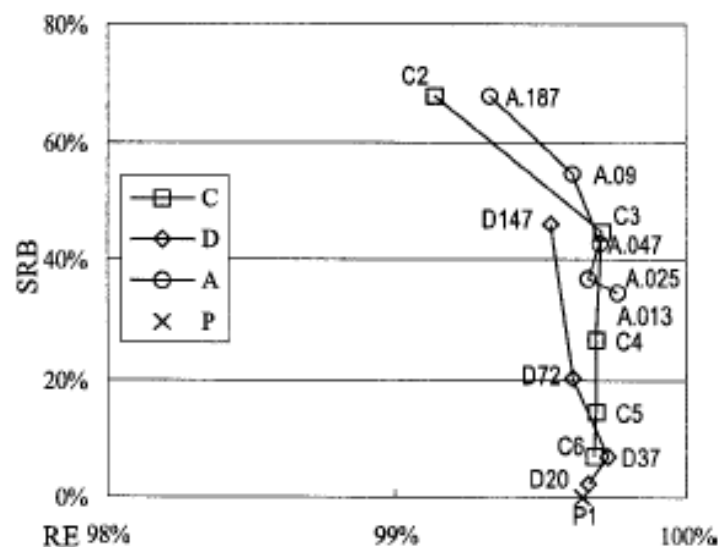
โพรโทคอลนี้ใช้จำนวนครั้งที่ได้รับแพ็คเก็ตเดียวกัน ในการพิจารณาว่าโหนดต้องส่งต่อแพ็คเก็ตหรือไม่ แต่ละโหนดมีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ของจำนวนครั้งที่ได้รับแพ็คเก็ตซ้ำจากโหนดเพื่อนบ้าน เมื่อโหนดได้รับแพ็คเก็ตเป็นครั้งแรกจะยังไม่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในทันที แต่จะหน่วงเวลาในการส่งเป็นระยะเวลาที่สุ่มขึ้นมา ในระหว่างที่หน่วงเวลาโหนดจะนับจำนวนแพ็คเก็ตเดิมที่ได้รับซ้ำ และเมื่อจำนวนแพ็คเก็ตที่ได้รับซ้ำเกินค่าขีดเริ่มเปลี่ยน โหนดจะยกเลิกการส่งต่อแพ็คเก็ตดังกล่าว ไม่เช่นนั้นเมื่อสิ้นสุดการหน่วงเวลาโหนดจะส่งต่อแพ็คเก็ต

3. Distance-based scheme

โพรโทคอลนี้ใช้ระยะทางจากโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตไปยังโหนดเพื่อนบ้านที่รับแพ็คเก็ตในการพิจารณา แต่ละโหนดมีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของระยะทาง เมื่อโหนดได้รับแพ็คเก็ตเป็นครั้งแรกจะยังไม่ส่งต่อแพ็คเก็ตในทันที แต่จะหน่วงเวลาในการส่งเป็นระยะเวลาที่สุ่มขึ้นมา ระหว่างที่อาจหน่วงเวลาถ้าได้รับแพ็คเก็ตเดิมซ้ำให้พิจารณาระยะทางระหว่างตนเองกับโหนดที่ทำการส่งโดยคำนวณจากค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ หากระยะทางที่ส่งมามีค่าน้อยกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของระยะทาง โหนดนั้นจะยกเลิกการส่งต่อแพ็คเก็ตดังกล่าว ไม่เช่นนั้นเมื่อสิ้นสุดการหน่วงเวลาโหนดจะส่งต่อแพ็คเก็ต

4. Location-based scheme

โพรโทคอลนี้ใช้พื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่มจากการแพร่สัญญาณของโหนดที่ส่งแพ็คเกจในการพิจารณา โพรโทคอลนี้ต้องใช้ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System) เพื่อระบุตำแหน่งของโหนดและนำมาคำนวณพื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่มในการส่งสัญญาณ หลักการในการตัดสินใจส่งต่อแพ็คเกจคล้ายกับโพรโทคอล Counter-based scheme และ Distance-based scheme เพียงแต่ใช้พื้นที่ส่วนที่สามารถครอบคลุมเพิ่มมาเปรียบเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด



ภาพที่ 12 ความสามารถในการลดจำนวนโหนดกับความน่าเชื่อถือของโพรโทคอลที่มีพื้นฐานบนความน่าจะเป็น

ที่มา: Yu-Chee Tseng (2002: 163)

ภาพที่ 12 แสดงการศึกษาการทำงานของโพรโทคอลที่มีพื้นฐานบนความน่าจะเป็น (Tseng *et al.*, 2002) โดยแกน x เป็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล RE (Reliable) และแกน y คือ การลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณต่อ SRB (Save Rebroadcast) โดย A แทนผลที่ได้จากโพรโทคอล Location-based scheme ตัวเลขด้านหลังแสดงถึงพื้นที่ที่ครอบคลุมที่เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้ C แทนผลที่ได้จากโพรโทคอล Counter-based scheme ตัวเลขด้านหลังแสดงถึงจำนวนครั้งที่ได้รับแพ็คเกจซ้ำที่เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยน และ D แทนผลที่ได้จากโพรโทคอล Distance-based scheme ตัวเลขด้านหลังแสดงถึงระยะทางที่เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยน จากกราฟพบว่าโพรโทคอลที่มี

พื้นฐานบนความน่าจะเป็นไม่มีความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็คเก็ตถึงทุกโหนด กราฟแสดงว่าไม่มีวิธีการไหนที่ทำงานบนพื้นฐานความน่าจะเป็นแล้วมีค่าความน่าเชื่อถือเป็น 100% ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลเพื่อให้ทุกโหนดได้รับแพ็คเก็ตแปรผกผันกับการลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณต่อ โพรโทคอลที่มีพื้นฐานบนความน่าจะเป็นได้รับการพัฒนา (Tseng *et al.*, 2003) เพื่อที่จะให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนสามารถเปลี่ยนไปตามสภาวะแวดล้อม เช่น จำนวนของโหนดเพื่อนบ้าน ทำให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของแต่ละโหนดมีค่าที่ไม่เท่ากันโดยค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของโพรโทคอลที่ปรับปรุงใหม่สามารถแทนค่าได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำวิเคราะห์แล้ว การปรับปรุงเพื่อให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนให้เหมาะสมกับแต่ละโหนดมากขึ้นทำให้การแพร่สัญญาณมีความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น

โพรโทคอลที่มีพื้นฐานแบบเชิงจำกัด (Deterministic Based Protocol)

การแพร่สัญญาณแบบเชิงจำกัดนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่ได้รับความนิยมมากคือการใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านช่วยในการเลือกโหนดเพื่อส่งต่อแพ็คเก็ต โพรโทคอลในรูปแบบนี้จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลโหนดเพื่อนบ้าน ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจะยิ่งมีมากขึ้นเมื่อทำการเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านเป็นบริเวณกว้างขึ้น เช่น การเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 3 ฮอปจะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปมาก ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงใช้ข้อมูลความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปในการพัฒนา การเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านส่วนใหญ่ทำโดยใช้ข้อความทักทาย (hello message) การทำงานหลักของโพรโทคอลรูปแบบนี้คือการเลือกโหนดที่จำเป็นในการส่งต่อแพ็คเก็ต หรือพิจารณาให้โหนดที่ได้รับแพ็คเก็ตต้องทำการส่งแพ็คเก็ตหรือไม่ โพรโทคอลที่มีพื้นฐานเชิงจำกัดได้แก่

1. Scalable Broadcast Algorithm (SBA)

เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป โหนดจะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันเพื่อสร้างตารางของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป ตารางนี้ใช้ในการพิจารณาการได้รับแพ็คเก็ตในระหว่างการแพร่สัญญาณ เมื่อโหนดได้รับแพ็คเก็ตที่ไม่เคยได้รับเข้ามาเป็นครั้งแรกโหนดจะทำการหน่วงเวลาในการส่งเป็นระยะเวลาที่สุ่มขึ้นมา (Peng and Lu, 2000) ระหว่างการหน่วงเวลาถ้าโหนดได้รับแพ็คเก็ตซ้ำจะทำการตรวจสอบว่าโหนดเพื่อนบ้านโหนดใดได้รับแพ็คเก็ตจากการส่งแพ็คเก็ตนั่นบ้างโดยใช้ความรู้จากตารางเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป จาก

ตารางเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปทำให้ทราบว่าโหนดเพื่อนบ้านนั้นส่งแพ็คเก็ตไปถึงยังโหนดเพื่อนบ้านใดบ้าง เมื่อทำการรออนุกรบระยะเวลา ถ้าตรวจสอบได้ว่าโหนดเพื่อนบ้านทั้งหมดได้รับแพ็คเก็ตแล้ว เพื่อลดความซ้ำซ้อนในการส่งต่อแพ็คเก็ตโหนดจะไม่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ต แต่ถ้ายังมีโหนดเพื่อนบ้านที่ไม่ได้รับแพ็คเก็ต โหนดจะทำการส่งต่อแพ็คเก็ต การทำงานในลักษณะนี้ยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูงก็ตาม วิธีการทำงานของโปรโตคอล SBA แสดงดังภาพที่ 13

1. โหนดที่ทำการส่งแพ็คเก็ต (p) แล้วเมื่อได้รับ p ซ้ำจะละทิ้ง p นั้น
2. โหนดที่ได้รับแพ็คเก็ต (p) เป็นครั้งแรก
 - 2.1 ถ้าโหนดที่ส่ง p สามารถครอบคลุมการส่ง p ถึงโหนดเพื่อนบ้านทั้งหมด โหนดจะไม่ทำการส่งต่อ p
 - 2.2 ถ้าไม่สามารถครอบคลุมการส่ง p ถึงโหนดเพื่อนบ้านทั้งหมด โหนดจะทำการหนดวงเวลาเป็นระยะเวลา t โดย

$$0 < t < \Delta \times \left(\frac{d_{N \max} + 1}{d_{me} + 1} \right)$$

โดย Δ คือ ค่าคงที่ที่ตั้งขึ้นเพื่อใช้เป็นค่าหน่วยเวลา

$d_{N \max}$ คือ จำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่มากที่สุดของโหนดเพื่อนบ้าน

d_{me} คือ จำนวนโหนดเพื่อนบ้านของโหนดที่ถูกเลือกให้ทำการส่ง ต่อ

- 2.3 ภายในเวลาดังกล่าวถ้าโหนดได้ p ซ้ำ โหนดจะทำการพิจารณาว่าโหนดที่ส่งมาสามารถครอบคลุมการส่ง p ถึงโหนดเพื่อนบ้านที่ยังไม่ได้รับ p ทั้งหมดหรือไม่ หากโหนดเพื่อนบ้านได้รับ p นั้นครบแล้วโหนดจะไม่ทำการส่งต่อ p
- 2.4 เมื่อรออนุกรบการหนดวงเวลาแล้วโหนดเพื่อนบ้านยังไม่ได้รับ p ครบทั้งหมด โหนดจะทำการส่งต่อ p

ภาพที่ 13 ขั้นตอนการทำงานของ SBA

ภาพที่ 13 แสดงวิธีการทำงานของโปรโตคอล SBA จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของโปรโตคอล SBA ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เหมาะสม ค่าหน่วยเวลาช่วยในการลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ต ค่าหน่วยเวลายิ่งมากโหนดจะรอรับฟังการส่งต่อแพ็คเก็ตของโหนดเพื่อนบ้านนานขึ้น แต่ถ้าการหน่วงเวลามีค่ามากเกินไปจะทำให้การส่งแพ็คเก็ตมีความล่าช้ามากขึ้นด้วย จากการทดลองของ (Williams and Camp, 2002) แสดงให้เห็นว่าการทำงานของโปรโตคอล SBA ในเครือข่ายที่มีความคับคั่งของข้อมูลที่ต่างกัน ค่าความหน่วงมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยการแพร่สัญญาณในเครือข่ายที่มีความคับคั่งของข้อมูลมากควรที่จะมีระยะเวลาหน่วงในการส่งที่เป็นช่วงที่ยาวและนานกว่า เครือข่ายที่มีความคับคั่งของข้อมูลน้อย ระยะเวลาหน่วงในการส่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเพิ่มหรือลดค่า Δ ในสมการการสุ่มค่าหน่วยเวลาตามภาพที่ 13

2. Dominant Pruning (DP)

เป็นโปรโตคอลที่ใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป เพื่อเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จำเป็นสำหรับการส่งต่อแพ็คเก็ตเพื่อให้โหนดเพื่อนบ้านทั้งหมดในระยะ 2 ฮอปทั้งหมดได้รับแพ็คเก็ต (Lim and Kim, 2000) การแจ้งโหนดที่ถูกเลือกให้ส่งต่อแพ็คเก็ตจะทำในขณะส่งต่อแพ็คเก็ต ข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกให้ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตจะถูกแนบลงไปในส่วนหัวของแพ็คเก็ต เมื่อโหนดที่ถูกเลือกได้รับแพ็คเก็ตจะทำการเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่ต้องทำการส่งต่อแพ็คเก็ตจากโหนดตน และส่งแพ็คเก็ตต่อออกไปจนแพ็คเก็ตถูกส่งไปถึงยังทุกโหนดในเครือข่าย วิธีการเลือกโหนดเพื่อนบ้านเพื่อทำการส่งต่อแพ็คเก็ตใช้ขั้นตอนวิธีละโมบ ดังแสดงในภาพที่ 14


```

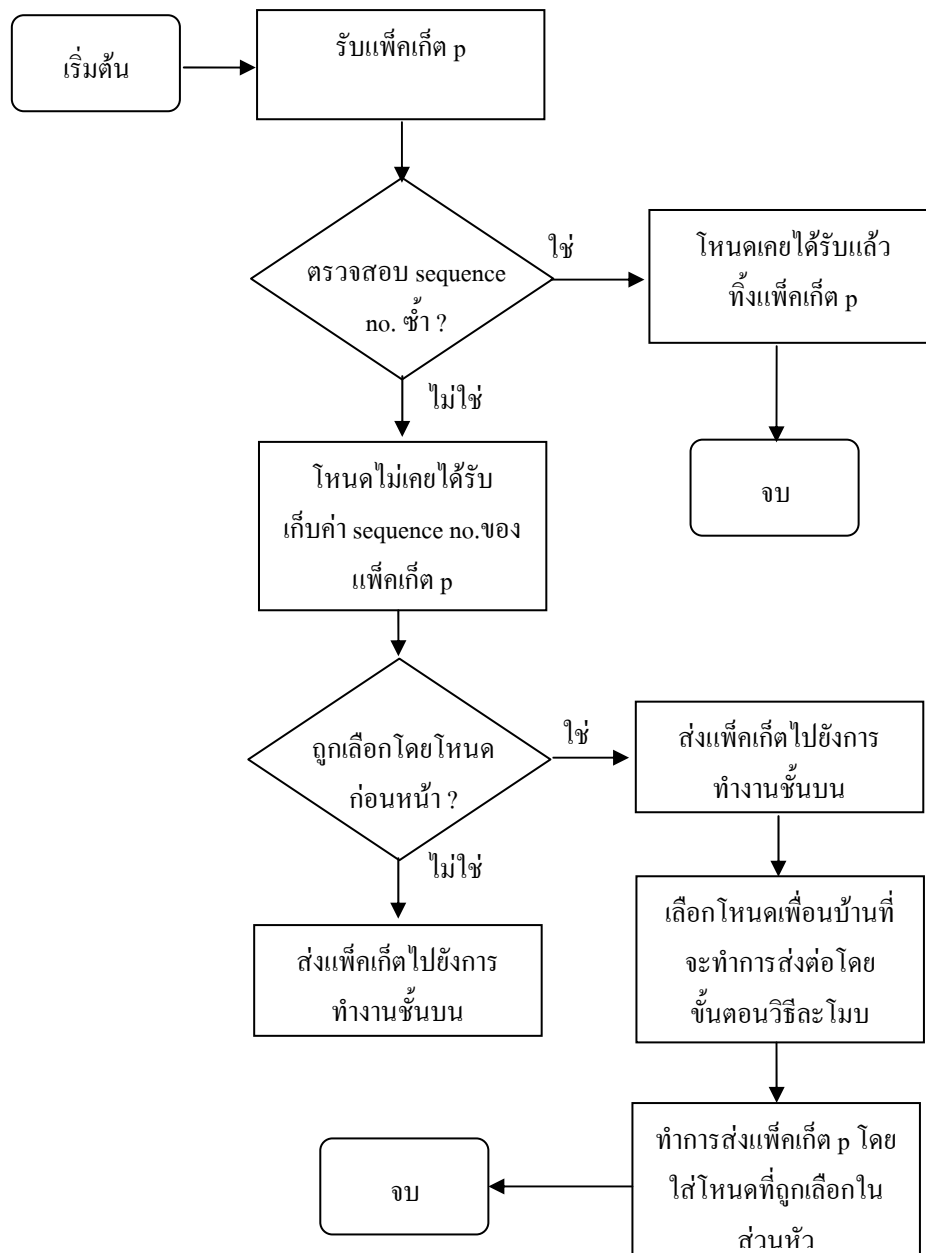
1:  $N(p)$  = neighbors of previous sender p
2:  $N(u)$  = neighbors of u
3:  $N^2(u)$  = 2-hop neighbors of u
4:  $F(u)$  = neighbors selected by u to be forwarding nodes
5:  $U(u)$  = 2-hop neighbors of u that are uncovered
6:  $F(u) \leftarrow \phi$ 
7:  $U(u) \leftarrow N^2(u) - N(p)$ 
8: Find  $v \in N(u)$ , where  $|N(v) \cap U(u)|$  is maximum
9:  $F(u) \leftarrow F(u) \cup v$ 
10:  $U(u) \leftarrow U(u) - N(v)$ 
11: if  $U(u) = \phi$  then
12:   exit
13: else
14:   go to 8
15: end if

```

ภาพที่ 14 ขั้นตอนการเลือกโหนดด้วยวิธีละโมบ

การเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีละโมบทำโดยเลือกโหนดที่จะทำการส่งต่อแพ็คเก็ตจากโหนดเพื่อนบ้านที่มีโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่ยังไม่ถูกครอบคลุมจำนวนมากที่สุด แล้วทำการเลือกไปจนกว่าโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปทั้งหมดจะถูกโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกมาครอบคลุมการส่งแพ็คเก็ตถึงทั้งหมด ในการส่งต่อแพ็คเก็ตทำการแจ้งโหนดเพื่อนบ้านที่เป็นโหนดที่ถูกเลือกโดยใส่ข้อมูลโหนดที่ถูกเลือกให้ส่งต่อแพ็คเก็ตในส่วนหัวของแพ็คเก็ตที่ทำการส่ง ทำให้โหนดเพื่อนบ้านเมื่อได้รับแพ็คเก็ตแล้วจะทราบว่าเป็นโหนดที่ถูกเลือกให้ทำการส่งต่อแพ็คเก็ต

ภาพที่ 15 แสดงการทำงานของโปรโตคอล DP



ภาพที่ 15 ขั้นตอนการทำงานของ Dominant Pruning

วิธีการทำงานของ DP ได้รับการปรับปรุงโดยลดขอบเขตของการพิจารณาเรียก โพรโทคอลที่พัฒนาใหม่นี้ว่า Partial Dominant Pruning (PDP) (Lou and Wu, 2002) วิธีการทำงานของโพรโทคอล PDP คล้ายกับโพรโทคอล DP โดยส่วนที่ต่างออกไปคือการกำหนดขอบเขตที่ใช้ในการพิจารณาเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะส่งต่อแพ็คเก็ต การทำงานของโพรโทคอล DP ขอบเขตของการพิจารณาจะเป็นพื้นที่ส่วนที่ครอบคลุมเพิ่ม และเลือกโหนดเพื่อนบ้านให้ครอบคลุมโหนด

ส่งต่อแพ็คเก็ตมีลักษณะเหมือนกับการสร้างโครงสร้างแบบต้นไม้เพื่อใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ต โปรโตคอล MPR ไม่มีการส่งข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านไปกับแพ็คเก็ต เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย ในขณะที่ทำการส่งแพ็คเก็ต ภาพที่ 17 แสดงขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR

```

1:  $F(u) \leftarrow \emptyset$ 
2:  $U(u) \leftarrow N^2(u) - N(p)$ 
3: Find  $v \in N(u)$ , where only  $v$  can cover some nodes in  $N^2(u)$ 
4:  $F(u) \leftarrow F(u) \cup v$ 
5:  $U(u) \leftarrow U(u) - N(v)$ 
6: if there are nodes in  $U(u)$  that can be covered by only a node in  $N(u)$ 
   then
7:   go to 3
8: end if
9: Find  $v \in N(u)$ , where  $|N(v) \cap U(u)|$  is maximum
10:  $F(u) \leftarrow F(u) \cup v$ 
11:  $U(u) \leftarrow U(u) - N(v)$ 
12: if  $U(u) = \emptyset$  then
13:   exit
14: else
15:   go to 9
16: end if

```

ภาพที่ 17 ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR

4. Ad Hoc Broadcast Protocol (AHBP)

เป็นโปรโตคอลที่ใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป การเลือกโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตใช้ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR แต่โหนดที่ถูกเลือกมาจะเรียกว่า Broadcast Relay Gateway (BRG) โปรโตคอล AHBP มีการทำงานที่ต่างออกไป ดังนี้

4.1 AHBP ไม่มีการเลือกและกำหนดโหนดที่ต้องทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในขณะส่ง hello message แต่จะทำการเลือกโหนดเพื่อนบ้านในขณะทำการส่งต่อแพ็คเก็ต ข้อมูลโหนดที่ถูกเลือกจะถูกส่งแนบไปกับส่วนหัวของแพ็คเก็ต การทำงานในลักษณะนี้จะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครือข่ายได้ดีกว่าการกำหนดโหนดที่ต้องทำการส่งตายตัวในขณะส่ง hello message

4.2 AHBP ใช้การลดขอบเขตของการพิจารณาจากการตัดโหนดเพื่อนบ้านที่ได้รับการครอบคลุมจากการส่งแพ็คเก็ตของโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตมา เพื่อลดขอบเขตที่ใช้ในการพิจารณาเลือกโหนดทำให้โหนดที่ถูกเลือกให้ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตมีจำนวนน้อยลง

4.3 AHBP ได้ปรับปรุงวิธีการในการแพร่สัญญาณเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็คเก็ตในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง โหนดที่ได้รับแพ็คเก็ตจากโหนดที่ไม่ใช่โหนดเพื่อนบ้านจะทำการส่งแพ็คเก็ต 1 ครั้งแบบไม่มีการเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะทำการส่งต่อแพ็คเก็ต เนื่องจากโหนดอาจเคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณอื่น จึงได้รับแพ็คเก็ตจากโหนดที่ไม่รู้จักได้ เรียกว่า โพรโทคอลที่ได้รับการปรับปรุงนี้ว่า AHBP-EX (Extend-AHBP)

โพรโทคอล AHBP มีวิธีการในการส่งข้อมูลเหมือนกับโพรโทคอล DP คือไม่มีการกำหนดโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตล่วงหน้า โหนดทำการเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะส่งต่อแพ็คเก็ตในขณะที่ต้องทำการส่ง แต่ใช้วิธีการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR โพรโทคอล AHBP เป็นการทำงานที่เกิดจากการนำเอาโพรโทคอล DP และ MPR มารวมกัน ข้อดีของการเลือกโหนดในขณะทำการส่งก็คือสามารถที่จะเลือกโหนดได้จากข้อมูลที่เป็นปัจจุบันต่างจากการเลือกโหนดไว้ก่อนของโพรโทคอล MPR อย่างไรก็ดี MPR มีประสิทธิภาพในการเลือกโหนดดีกว่าขั้นตอนวิธีละโมบ จากผลการทดลอง (B. Williams and T. Camp, 2002) โพรโทคอล AHBP มีปัญหาในเรื่องของการเคลื่อนที่ของโหนด ถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาเป็น AHBP-EX แล้วก็ตาม เนื่องจากขณะที่เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงสูงข้อมูลความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป มีความผิดพลาดของข้อมูลสูง ทำให้การเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะส่งต่อไม่สามารถเลือกโหนดที่เหมาะสมได้

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

Protocols	Use of Hello Message	Complexity of Algorithm	Proactive/Reactive	Suitable for Scenarios	
				Density	Mobility
Simple Flooding	No	Low	Reactive	Medium	Medium
Scoped Flooding					
Probability	No	Low	Reactive	Medium/High	Medium/ Low
Counter-Based	No	Low	Reactive	Medium	Any
Distance-Based	No	Low	Reactive	High	Low
Location-Based	No	Medium	Reactive	High	Low
Flooding with Self Pruning	Yes	Medium	Reactive	Medium	Medium
SBA	Yes	Medium	Reactive	Low	High
Dominant Pruning	Yes	Medium	Reactive	Medium	Medium
Multipoint Relaying	Yes	High	Proactive	High	Low
AHBP	Yes	High	Reactive	Medium	Low
CDS-Based	Yes	High	Reactive	Medium	Low
LENWB	Yes	High	Reactive	Medium	Medium
Hyper Flooding	Yes	Medium	Reactive	Low	High

ตารางที่ 2 (Stojmenovic and Wu, 2004) แสดงให้เห็นคุณลักษณะของโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ รวมถึงความเหมาะสมของโปรโตคอลกับลักษณะของเครือข่าย โปรโตคอลที่มีพื้นฐานบนความน่าจะเป็นส่วนใหญ่จะไม่มีการใช้ hello message เพราะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำการเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้าน มีความซับซ้อนของขั้นตอนวิธี (complexity of algorithm) ค่อนข้างมากเป็นแบบที่ตัดสินใจในขณะทำการส่ง (reactive) เหมาะกับเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ช้า มีจำนวนโหนดในเครือข่ายมาก โปรโตคอลการแพร่สัญญาณที่ใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 สอฟมีการเก็บข้อมูลโดยใช้ hello message มีความซับซ้อนของการทำงานสูง ส่วนมากเป็นการทำงานแบบที่ตัดสินใจในขณะทำการส่ง ยกเว้น Multipoint Relaying ที่เลือกโหนดเพื่อนบ้านไว้ล่วงหน้า (proactive) โปรโตคอลกลุ่มนี้ส่วนมากไม่เหมาะสมกับเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง ยกเว้น SBA และ Hyper Flooding ที่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงเครือข่ายได้ดี อย่างไรก็ตาม โปรโตคอลทั้งสองเหมาะสมกับเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดในเครือข่ายน้อย ซึ่งต่างจาก MPR ที่เหมาะสมกับเครือข่ายที่มีความหนาแน่นสูง

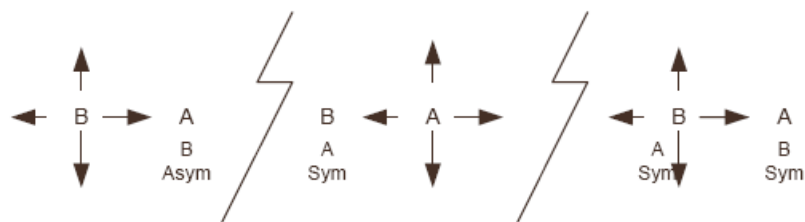
โปรโตคอลการจัดเส้นทาง OLSR (Optimized Linked State Routing Protocol)

เป็นโปรโตคอลการจัดเส้นทาง แบบหาเส้นทางล่วงหน้า (proactive routing protocol) ที่พัฒนามาจากโปรโตคอล Linked State แบบดั้งเดิม โปรโตคอล OLSR เป็นโปรโตคอลที่หาเส้นทางล่วงหน้าเก็บไว้ในตาราง เมื่อมีความต้องการส่งข้อมูลก็สามารถได้รับเส้นทางในการส่งทันที โปรโตคอล OLSR ออกแบบให้สามารถลดขนาดของแพ็กเก็ตควบคุม และลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณแพ็กเก็ตควบคุมด้วย โปรโตคอล OLSR อาศัยหลักการทำงานของโปรโตคอล MPR ช่วยในการลดจำนวนโหนดที่แพร่สัญญาณ ทำให้สามารถรองรับการทำงานในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นของโหนดสูงได้ดี (Laouti *et al.*, 2002) จากการทำงานของแพ็กเก็ตควบคุมที่ต้องทำงานเป็นรอบเวลา ทำให้สามารถใช้แพ็กเก็ตควบคุมตรวจสอบการขาดของเส้นทางการเชื่อมต่อ (link break) โปรโตคอล OLSR ไม่มีการจัดการในกรณีเส้นทางใช้งานไม่ได้ (link failure) เนื่องจากโปรโตคอลได้ทำการหาเส้นทางที่จะไปถึงทุกโหนดไว้ล่วงหน้าและถือว่าเส้นทางเหล่านั้นสามารถใช้ได้ โดยเส้นทางที่เก็บไว้จะเป็นคู่ของ [โหนดต้นทาง, โหนดปลายทาง] เส้นทางที่ถูกเก็บไว้เหล่านี้จะถูกปรับปรุงเป็นระยะด้วยแพ็กเก็ตควบคุมอยู่แล้วจึงมีความมีความน่าเชื่อถือในการใช้งานเส้นทางเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง

การทำงานของโปรโตคอล OLSR เปลี่ยนแปลงจากโปรโตคอล Linked State ที่ใช้งานกันในเครือข่ายมีสายในหลายด้านเพื่อให้การทำงานมีความสามารถมากขึ้น ในปัจจุบันโปรโตคอล OLSR ได้รับการยอมรับจาก IETF เพื่อออก RFC (Request for Comment) ฉบับที่ RFC3626 (Clausen and Jacquet, 2003) และในปัจจุบันโปรโตคอล OLSR ได้ออก Internet draft version 2 (Clausen *et al.*, 2006) ที่มีการพัฒนาการทำงานไปอีกระดับหนึ่งด้วย การทำงานของ OLSR นั้นอาศัยข้อความ (message) อยู่ 2 รูปแบบหลักคือ hello message และ TC (topology control) message ในการเก็บข้อมูลและการสร้างตารางเส้นทาง (routing Table) การส่ง hello message ส่งแค่ในระยะ 1 ฮอปทุกช่วงเวลาเพื่อเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป ส่วน TC message จะถูกส่งแบบไปทั่วทั้งเครือข่ายอาศัยการแพร่สัญญาณ โครงสร้างที่เกิดจากการเลือกโหนด MPR เพื่อลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ต ซึ่งโปรโตคอล OLSR สามารถหาเส้นทางที่เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยเมื่อพิจารณาจากจำนวนฮอปที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตไปยังปลายทาง การส่งข้อมูลจะเป็นการส่งแบบฮอปต่อฮอป โปรโตคอล OLSR ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ IP Packet แบบเดิม การทำงานของโปรโตคอล OLSR สามารถแบ่งออกเป็นหน้าที่หลักได้ 4 ประเภท (Clausen *et al.*, 2001) ดังนี้

1. Neighbor sensing

เป็นการทำงานเพื่อตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ (link) กับโหนดเพื่อนบ้าน โหนดจะเก็บข้อมูลผ่านทาง hello message ที่ส่งออกไปในทุกช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อไปยังโหนดเพื่อนบ้าน และทำการตรวจสอบโหนดที่เป็นโหนดเพื่อนบ้านและสถานะของการเชื่อมต่อ การเชื่อมต่อที่ใช้ในโปรโตคอล OLSR มีรูปแบบเป็นทิศทางเดียว (Uni-Directional Link) การเชื่อมต่อสองทิศทาง (Bi-Directional Link) หรือการเชื่อมต่อแบบ MPR ภายใน hello message ประกอบด้วยรายการโหนดเพื่อนบ้านและสถานะการเชื่อมต่อ โหนดสามารถตรวจสอบโหนดเพื่อนบ้านได้ดังภาพที่ 18 ในขั้นแรกโหนด B ส่ง hello message ออกไป เมื่อโหนด A ได้รับจะสามารถรู้ได้ว่าโหนด B สามารถส่งเชื่อมต่อมายังโหนด A ได้เป็นแบบทิศทางเดียว (asymmetry : asym) ต่อมาเมื่อโหนด A ทำการส่ง hello message ออกไปใน hello message ของโหนด A จะมีที่อยู่ (address) ของโหนด B พร้อมทั้งบอกว่า โหนด B สามารถเชื่อมต่อกับโหนด A ได้แบบทิศทางเดียว เมื่อโหนด B ได้รับ hello message ของโหนด A จะทราบทันทีว่าโหนด B สามารถเชื่อมต่อกับโหนด A ได้แบบสองทิศทาง (symmetry : sym) สุดท้ายเมื่อโหนด B ทำการส่ง hello message อีกครั้ง โหนด A จะทราบว่าตนเองสามารถเชื่อมต่อกับโหนด B ได้แบบสองทิศทาง

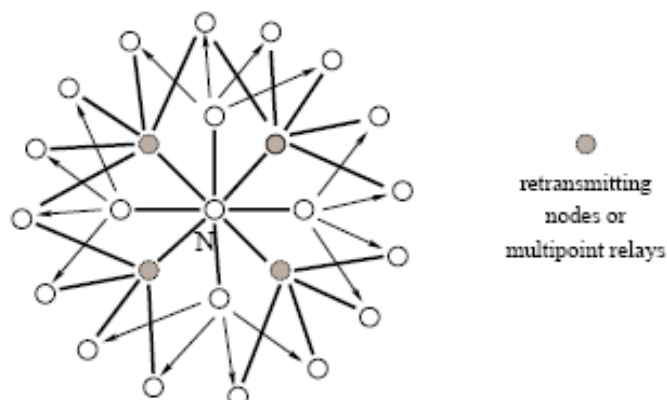


ภาพที่ 18 ขั้นตอนการทำ Neighbor Sensing ของ OLSR

การทำงานในรูปแบบนี้จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านรวมทั้งสถานะการเชื่อมต่อ และข้อมูลของโหนดในระยะ 2 ฮอปที่โหนดเพื่อนบ้านทำการเชื่อมต่ออยู่ โหนดในเครือข่ายจึงสามารถเลือกโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตด้วยขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดของ MPR เมื่อทำการเลือก MPR ของโหนดได้แล้ว โหนดจะส่ง hello message ออกไปเพื่อให้โหนดเพื่อนบ้านทราบว่าโหนดใดเป็น MPR บ้างโดยใช้สถานะการเชื่อมต่อเป็นแบบ MPR การเชื่อมต่อแบบ MPR คือสถานะการเชื่อมต่อกับโหนดเพื่อนบ้านแบบสองทิศทาง และโหนดเพื่อนบ้านโหนดนั้นถูกเลือกเป็น MPR จากการทำงานดังกล่าวทำให้สามารถสร้างตารางของ MPR selector ซึ่งคือโหนดเพื่อนบ้านที่เลือกโหนดนั้นเป็น MPR เพื่อนำไปใช้ในการหาเส้นทาง และการแพร่สัญญาณของแพ็คเก็ตควบคุมในเครือข่ายต่อไป

2. Multipoint Relay Selection

เป็นวิธีการเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะต้องทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ โพรโทคอล OLSR ใช้ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR ในการคำนวณเพื่อหา MPR โหนด MPR เป็นเซตของโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกให้ครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป โดยโหนด MPR ที่ถูกเลือกมานั้นจะต้องมีการเชื่อมต่อเป็นแบบสองทางด้วย เพื่อสามารถสร้างโครงสร้างต้นไม้ที่ช่วยในการแพร่สัญญาณในเครือข่าย ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 โหนดที่ถูกเลือกเป็น MPR ของโหนด N

ที่มา: Philippe Jacquet (2001: 3)

การคำนวณเพื่อหาโหนด MPR จะทำคำนวณใหม่ต่อเมื่อ มีการเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมต่อกับโหนดเพื่อนบ้าน ทั้งแบบหยุดการเชื่อมต่อและการมีโหนดเข้ามาเชื่อมต่อใหม่แบบสองทิศทาง และเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่ทำการเชื่อมต่อได้สองทิศทางด้วย

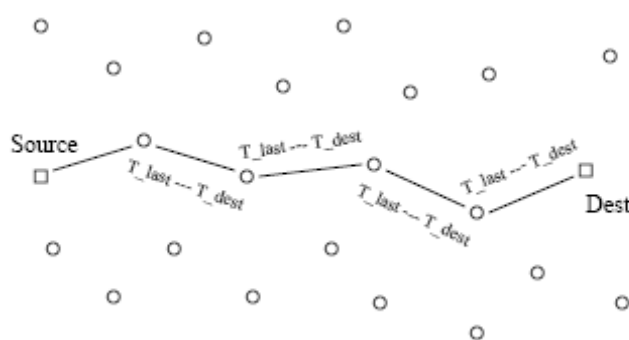
3. MPR Information Declaration

เป็นการทำงานเพื่อส่งข้อมูลของ MPR selector ไปยังทุกโหนดในเครือข่ายให้ทราบ ทอพอโลยีของเครือข่าย เก็บไว้ในตารางทอพอโลยีเพื่อใช้ในการหาเส้นทางของการส่งข้อมูล การส่งข้อมูล MPR Selector ไปทำได้โดยการส่งไปกับ TC message ซึ่งทำการส่งแบบแพร่สัญญาณโดยใช้วิธีการ MPR ช่วยแพร่สัญญาณเพื่อลดจำนวนโหนดในการส่งสัญญาณ TC message จะถูกส่งเป็นช่วงระยะเวลา แต่หากมีการเปลี่ยนแปลง MPR selector ของโหนด จะทำการส่ง TC message ออกมาก่อนถึงเวลาที่กำหนด และทำการตั้งค่าช่วงเวลาใหม่ แต่ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนหมดช่วงเวลาโหนดจะส่ง TC message ออกมาแล้วทำการตั้งค่าเวลาใหม่ เมื่อโหนดในเครือข่ายได้รับ TC message จะนำข้อมูลที่ได้เก็บไว้ในตารางทอพอโลยีโดยมีหลักการคือ เมื่อได้รับ TC message มา และมีข้อมูลของโหนดต้นทางที่ส่งมาอยู่แล้วในตารางแล้ว ถ้า MPR selector sequence number มีค่าน้อยกว่าค่าในตารางจะทิ้งเพื่อกើตนั้น แต่ถ้ามีค่ามากกว่าจะลบค่าเก่าในตาราง และเพิ่มค่า MPR

selector ใหม่เข้าไป แต่ถ้าในตารางยังไม่มีข้อมูลของโหนดต้นทางที่ส่งมาเลยจะทำการเก็บข้อมูลลงในตารางทันที

4. Routing Table Calculation

จากการที่แต่ละโหนดส่ง MPR selector ไปกับ TC message ให้สามารถเก็บข้อมูลของคู่โหนด [โหนดในฮอปสุดท้าย (T_{last}), โหนดปลายทาง (T_{dest})] ได้จากคู่ของ MPR selector และโหนดต้นทางที่ส่ง การหาเส้นทางทำได้โดยจากโหนดปลายทางจะทราบว่าโหนดคู่ต่อไปที่ติดกันมีโหนดใดบ้างจากตารางทอพอโลยี และหาคู่การเชื่อมต่อไปจนถึงโหนดปลายทาง ดังภาพที่ 20 แสดงวิธีการหาเส้นทางจากข้อมูลในตารางทอพอโลยี การหาเส้นทางแบบนี้ทำให้ได้เส้นทางที่มีจำนวนฮอปน้อยที่สุด



ภาพที่ 20 การหาเส้นทางของ OLSR

ที่มา: Philippe Jacquet (2001: 5)

หลักการในการสร้างตารางเส้นทางเริ่มจากโหนดที่ต้องการสร้างตาราง โหนดเพื่อนบ้านทั้งหมดของโหนดนั้นจะถูกเก็บไว้ในตารางเส้นทางโดยมีระยะทางเชื่อมต่อเป็น 1 ฮอป จากนั้นเพิ่มระยะทางเชื่อมต่อขึ้นไปทีละ 1 ฮอปแล้วหาคู่โหนดจากตารางทอพอโลยีที่มีโหนดในฮอปสุดท้ายอยู่เป็นโหนดปลายทางในตารางเส้นทาง ทำให้สามารถเพิ่มโหนดปลายทางของคู่โหนดนั้นเข้ามาในตาราง โดยตรวจสอบจากจำนวนฮอปส่งไปยังโหนดปลายทางใหม่เท่ากับระยะทางเชื่อมต่อในขณะนั้นหรือไม่ เมื่อทำครบทุกคู่โหนดแล้วให้เพิ่มระยะขึ้นอีกจนกว่าจะได้ตารางเส้นทางที่มีความสมบูรณ์สามารถหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางในเครือข่ายได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ฮาร์ดแวร์

1.1 คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ หน่วยประมวลผล AMD AthlonXP 2500 ความเร็ว 1.8 กิกะเฮิร์ต หน่วยความจำหลัก DDR3200 512 เมกะไบต์ หน่วยความจำสำรอง 80 กิกะไบต์ ความเร็วรอบ 7200 รอบต่อนาที

1.2 เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย nilapat.cs.sci.ku.ac.th, sukreep.cs.sci.ku.ac.th และ chompooparn.cs.sci.ku.ac.th ของภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

2. ซอฟต์แวร์

2.1 ระบบปฏิบัติการ Fedora Core3, Ubuntu และ WindowsXP

2.2 คอมไพเลอร์ GNU C และ C++

2.3 VIM editor

2.4 BASH shell script

2.5 โปรแกรมจำลองเครือข่าย GloMoSim (Global Mobile Information System Simulator)

2.6 โปรแกรมภาษา PASEC (PARallel Simulation Environment for Complex systems)

วิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาขั้นตอนวิธีที่เลือกโหนดของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย เนื่องด้วยการทำงานของการทำงานของการแพร่สัญญาณด้วยวิธีกระจายทุกทิศทางมีความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูล ดังนั้นจึงได้มีโพรโทคอลการแพร่สัญญาณรูปแบบอื่นขึ้นมา ซึ่งขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR เป็นวิธีการเลือกโหนดเพื่อนบ้านเพื่อครอบคลุมโหนดในระยะ 2 ฮอปทั้งหมด วิธีการนี้ได้รับการพัฒนามาจากขั้นตอนวิธีละโมบที่เป็นวิธีที่งานที่สุดในการเลือกโหนดเพื่อนบ้านในการส่งต่อแพ็คเก็ต ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR มีประสิทธิภาพในการลดจำนวนโหนดที่ใช้ในเครือข่ายมากกว่าขั้นตอนวิธีละโมบ การเลือกโหนด MPR จากโหนดเพื่อนบ้านที่จำเป็นต้องเลือกออกมาก่อนเพื่อให้ส่งแพ็คเก็ตถึงโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่เชื่อมต่อกับโหนดนั้น โหนดเดียวยังไม่สามารถเลือกโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตได้น้อยสุด งานวิจัยนี้จึงเสนอขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการเลือกโหนดแบบใหม่ซึ่งพัฒนามาจากขั้นตอนวิธีแบบละโมบ และมีประสิทธิภาพในการเลือกโหนดมากกว่าขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR งานวิจัยนี้ยังเสนอโพรโทคอลที่ใช้ในการแพร่สัญญาณแบบใหม่ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง และทดสอบการทำงานของขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดแบบใหม่กับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OLSR การทดลองทั้งหมดทำโดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย ความซับซ้อนของการส่งข้อมูลในเครือข่าย และความเร็วของโหนดในเครือข่าย

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลอง

1. ขั้นตอนวิธี RRA (Redundancy Reduction Algorithm)

ขั้นตอนวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนามาจากการทำงานของขั้นตอนวิธีละโมบโดยมีส่วนที่เพิ่มเติมมาจากขั้นตอนวิธีละโมบคือ ส่วนตรวจสอบโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกว่าสามารถตัดออกได้หรือไม่เนื่องจากเกิดความซ้ำซ้อนของการเลือก ความซ้ำซ้อนของการเลือกโหนดเกิดจากโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกก่อนหน้านี้ไม่มีความจำเป็นที่ต้องส่งต่อแพ็คเก็ต จากการที่โหนดที่ถูกเลือกมาภายหลังสามารถครอบคลุมการส่งต่อแพ็คเก็ตไปยังโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปของโหนดนั้นทุกโหนดแล้ว ขั้นตอนวิธี RRA สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 21

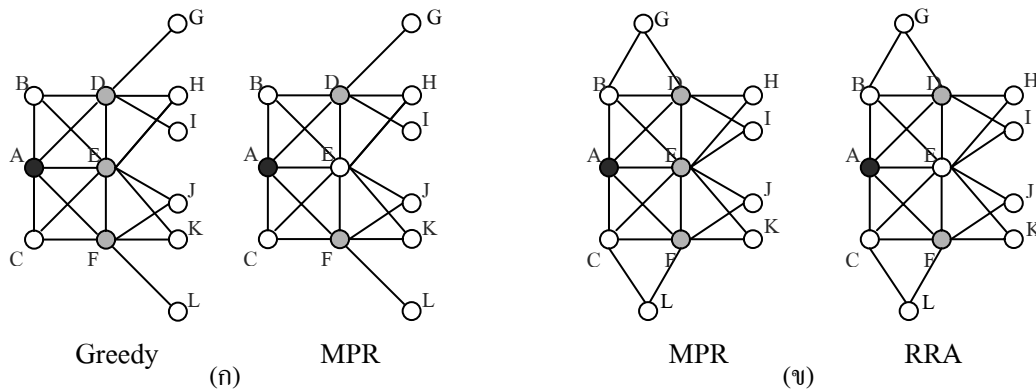
```

1:  $C(v_i) = \{x \mid x \in N^2(u) \wedge x \text{ is only covered by } v_i\}$ 
2:  $F(u) \leftarrow \emptyset$ 
3:  $U(u) \leftarrow N^2(u) - N(p)$ 
4:  $C(v_i) \leftarrow \emptyset$  for  $v_i \in N(u)$ 
5:  $W = \{w \mid w \in N(u) \wedge |N(w) \cap U(u)| \text{ is maximum} \}$ 
6: select  $v$ , which  $v \in W \wedge N(v)$  is maximum
7: for all  $v_i \in F(u)$  do
8:    $C(v_i) \leftarrow C(v_i) - N(v)$ 
9: end for
10:  $F(u) \leftarrow F(u) \cup v$ 
11:  $U(u) \leftarrow U(u) - N(v)$ 
12:  $C(v) \leftarrow N(v)$ 
13: if  $U(u) \neq \emptyset$  then
14:   go to 5
15: end if
16: for all  $v_i \in F(u)$  and  $C(v_i) = \emptyset$  do
17:    $F(u) \leftarrow F(u) - v_i$ 
18: end for

```

ภาพที่ 21 ขั้นตอนวิธี RRA

ภาพที่ 21 ขั้นตอนวิธี RRA ใช้การเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่สามารถครอบคลุมการส่งแพ็คเก็ตถึงโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 สอพมากที่สุดเหมือนกับขั้นตอนวิธีละโมบ ต่างกันที่ในแต่ละครั้งที่เลือกโหนดเพื่อนบ้านจะนำโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 สอพของโหนดที่เลือกมาลดการครอบคลุมโหนดในระยะ 2 สอพของโหนดที่ถูกเลือกมาก่อน เมื่อเสร็จสิ้นการเลือกโหนดให้นำแต่ละโหนดที่ถูกเลือกมาทำการพิจารณาอีกครั้งว่าโหนดใดที่ไม่มีความจำเป็นที่จะทำการส่งต่อแพ็คเก็ตเนื่องจากโหนดที่ถูกเลือกภายหลังทำการครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 สอพ ของโหนดนั้นหมดแล้ว



ภาพที่ 22 เปรียบเทียบการเลือกโหนด (ก) ขั้นตอนวิธีละโมบ กับขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR (ข) ขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR กับขั้นตอนวิธี RRA

ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกโหนดของแต่ละขั้นตอนวิธี ให้โหนด A เป็นโหนดที่เลือกโหนดเพื่อนบ้าน B, C, D, E และ F เพื่อให้ครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปของโหนด A คือโหนด G, H, I, J, K และ L ภาพที่ 22(ก) เปรียบเทียบการเลือกโหนดของขั้นตอนวิธีละโมบ กับขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR ขั้นตอนวิธีละโมบจะเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่ครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปได้มากที่สุดทำให้ลำดับการเลือกโหนดเพื่อนบ้านของโหนด A เป็นดังนี้ โหนด E ถูกเลือกเป็นอันดับแรกเพื่อครอบคลุมโหนด H, I, J และ K จากนั้นจะเลือกโหนด D และ F ภายหลังเพื่อให้ครอบคลุมโหนด G และ L ตามลำดับ ขั้นตอนวิธีละโมบสามารถเลือกโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตเกิดจากโหนด A คือ โหนด D, E และ F ส่วนขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR เลือกโหนด MPR จากโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่สามารถส่งแพ็คเก็ตเกิดถึงได้โดยผ่านโหนดเพื่อนบ้านเพียงโหนดเดียวก่อน จากภาพโหนด G สามารถจะส่งแพ็คเก็ตเกิดถึงได้โดยอาศัยการส่งผ่านโหนด D เท่านั้น ในทำนองเดียวกันโหนด L สามารถส่งแพ็คเก็ตเกิดถึงโดยผ่านทางโหนด F ได้เท่านั้น ดังนั้นขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR จะเลือกโหนด D และ F ขึ้นมาก่อนที่จะทำการเลือกเหมือนขั้นตอนวิธีละโมบ แต่เมื่อเลือกโหนด D และ F มากี่เพียงพอที่จะครอบคลุมการส่งแพ็คเก็ตเกิดถึงโหนดในระยะ 2 ฮอปทั้งหมด ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR จึงเลือกเพียงโหนด D และ F ในการส่งต่อแพ็คเก็ต จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR มีประสิทธิภาพในการเลือกโหนดเหนือกว่าขั้นตอนวิธีละโมบเมื่อมีบางโหนดในระยะ 2 ฮอปที่สามารถส่งถึงได้ด้วยโหนดเพื่อนบ้านเพียงตัวเดียว

ภาพที่ 22(ข) แสดงการเปรียบเทียบการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR กับขั้นตอนวิธี RRA จากภาพไม่มีโหนดใดเลยในระยะ 2 ฮอปที่สามารถส่งถึงได้ด้วยโหนดเพื่อน

บ้านเพียงตัวเดียว ทำให้การเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR ไม่มีความแตกต่างจากการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีละโมบ ดังนั้นขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR จะเลือกโหนดที่สามารถครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปได้มากที่สุด คือโหนด E เพื่อครอบคลุมโหนด H, I, J และ K จากนั้นขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR จะเลือกโหนด D และ F เพื่อครอบคลุมการส่งให้ถึงโหนด G และ L ตามลำดับ ด้วยวิธีการนี้ทำให้โหนด A สามารถเลือกโหนดที่ส่งต่อแพ็คเก็ต คือโหนด D, E และ F เหมือนกับขั้นตอนวิธีละโมบ แต่เมื่อทำการพิจารณารูปแบบเครือข่ายดังกล่าวพบว่าเลือกเพียงโหนด D และ F ก็สามารถครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปได้ทั้งหมด ขั้นตอนวิธี RRA จึงถูกนำมาใช้ในการเลือกโหนดเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการลดจำนวนโหนดที่เลือกได้เพิ่มขึ้น เริ่มด้วยการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีละโมบคือเลือกโหนดที่สามารถครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปได้มากที่สุด ในที่นี้คือโหนด E ซึ่งครอบคลุมโหนด H, I, J และ K และเก็บเซตของโหนดในระยะ 2 ฮอปที่ถูกครอบคลุมของโหนด E ไว้ ต่อมาตามขั้นตอนวิธีละโมบจะเลือกโหนด B, C, D หรือ F ก็ได้ แต่จากวิธีการเลือกที่เพิ่มเข้าไปถ้าโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกพิจารณา มีจำนวนโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่จะครอบคลุมเท่ากัน ให้เลือกโหนดที่มีจำนวนโหนดเพื่อนบ้านมากที่สุดก่อน จากกระบวนการดังกล่าวทำให้เหลือโหนดที่พิจารณาเพียงโหนด D กับ F ซึ่งมีจำนวนโหนดเพื่อนบ้านมากกว่าโหนด B และ C เมื่อ D ถูกเลือกพบว่าโหนด D สามารถครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้าน ในระยะ 2 ฮอป คือ H, I และ L ให้นำเซตของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปของโหนด D หักจากเซตของโหนดที่เลือกมาก่อนหน้าคือโหนด E ทำให้โหนด E เหลือเซตของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่ทำการครอบคลุมคือ J และ K และหลังจากเราเลือกโหนด F ครอบคลุมโหนด J, K และ L เมื่อทำขั้นตอนการลดจำนวนโหนดในเซตการครอบคลุมของโหนดก่อนหน้า โหนด E และ D เมื่อพิจารณาที่โหนด E จะได้ว่าเซตของโหนด E ไม่มีโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่ถูกครอบคลุมแล้วจากการที่โหนด J และ K อยู่ในการครอบคลุมของโหนด F แทน แต่โหนด D ยังมีเซตของโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่ครอบคลุมคงเดิมเพราะโหนด F ไม่ได้ครอบคลุมการส่งถึงโหนดโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปที่โหนด D ครอบคลุมเลย ดังนั้นหลังจากกระบวนการเลือกเสร็จสิ้น โหนด A สามารถพิจารณาเพื่อคัดโหนดที่ไม่มีความจำเป็นที่จะใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตออก ขั้นตอนวิธี RRA ทำให้โหนด A จะเลือกเพียงโหนด D และ F ในการส่งต่อแพ็คเก็ตซึ่งเป็นการเลือกที่มีประสิทธิภาพมากกว่าขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR ที่เลือกโหนดในจำนวนที่มากกว่า

2. โพรโทคอลการแพร่สัญญาณ RRB (Redundancy Reduction Broadcast)

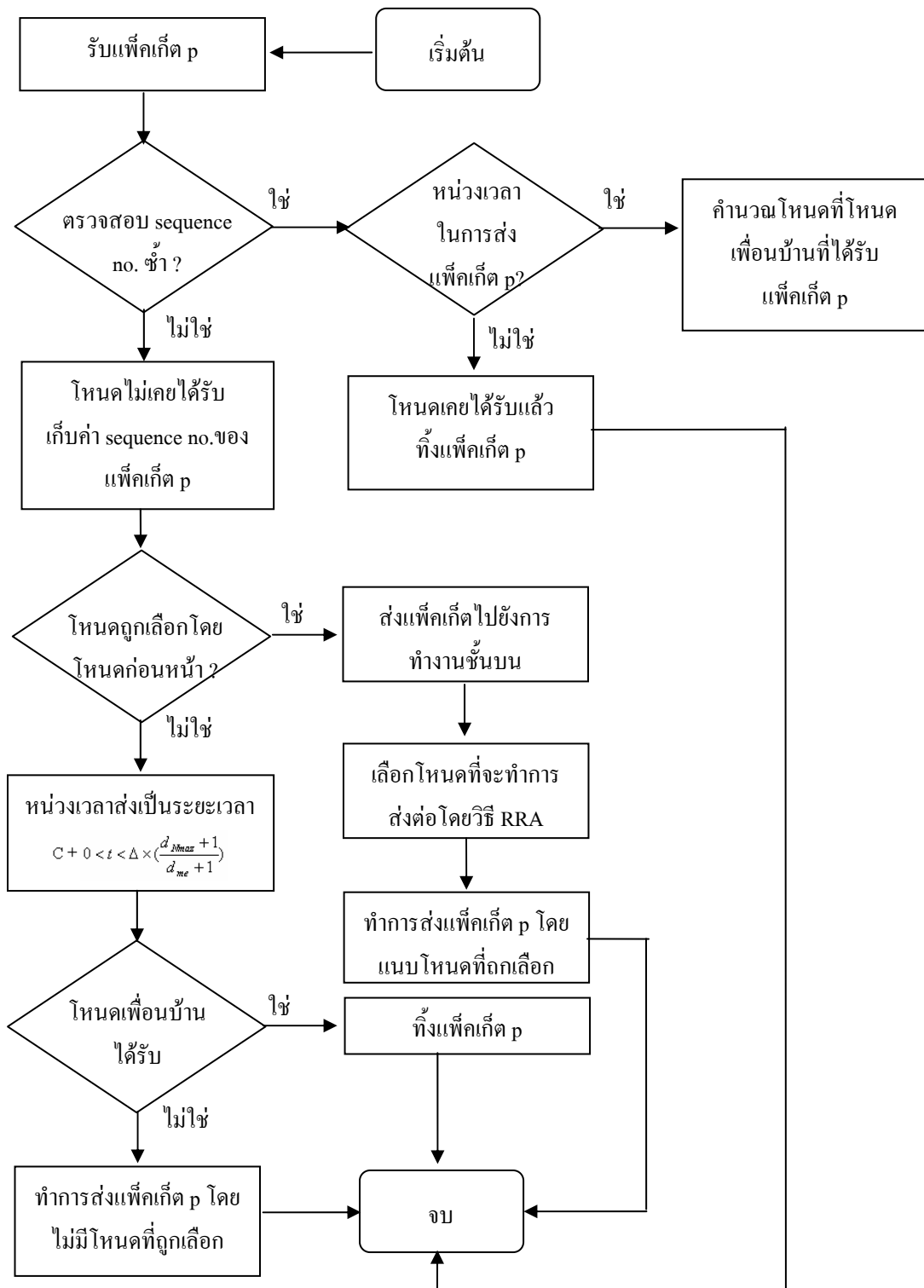
โพรโทคอลการแพร่สัญญาณ RRB พัฒนามาจากโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ AHPB เนื่องจากโพรโทคอล AHPB ใช้การเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธีเลือกโหนด MPR ทำให้สามารถนำขั้นตอนวิธี RRA เลือกโหนดแทนซึ่งยังคงหลักการส่งแบบเดิมของโพรโทคอล AHPB อยู่ โพรโทคอล RRB เปลี่ยนแปลงเฉพาะขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการเลือกโหนดเพื่อส่งต่อแพ็คเก็ต การที่เลือกโพรโทคอล AHPB เป็นพื้นฐานการพัฒนาเนื่องจากเป็นโพรโทคอลที่ทำงานได้ดีในเครือข่ายที่มีความคับคั่งของข้อมูลสูง และมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกได้ตามสถานการณ์จากการเลือกโหนดเมื่อมีความต้องการในการส่งต่อแพ็คเก็ต ต่างจากโพรโทคอล MPR ที่เลือกโหนดไว้ก่อนหน้า ทำให้เป็นผลเสียในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามโพรโทคอล RRB ยังมีปัญหาด้านการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีของเครือข่าย เมื่อเครือข่ายมีโหนดที่เคลื่อนที่มาก ข้อมูลความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป ไม่มีประโยชน์ในการใช้พิจารณาโหนดเพื่อนบ้านที่จะส่งต่อแพ็คเก็ตเพราะโหนดอาจจะเคลื่อนที่ไปจากจุดเดิม ส่งผลให้ในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของโพรโทคอลที่ใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปไม่สามารถแพร่สัญญาณเพื่อส่งแพ็คเก็ตถึงทุกโหนดในเครือข่าย

3. โพรโทคอลการแพร่สัญญาณ RRB-SB (Redundancy Reduction Broadcast with Scalable Broadcast)

โพรโทคอลการแพร่สัญญาณ RRB-SB เป็นโพรโทคอลที่เลือกเอาการทำงานของโพรโทคอล RRB และ SBA มาทำงานร่วมกันอย่างง่าย เนื่องจากโพรโทคอล RRB มีความสามารถทำงานในเครือข่ายที่มีความคับคั่งของข้อมูลสูง และเป็นโพรโทคอลที่สามารถลดจำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตได้เป็นจำนวนมาก แต่โพรโทคอล RRB มีข้อเสียในด้านความน่าเชื่อถือของการส่งแพ็คเก็ตไปยังทุกโหนดในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง แต่โพรโทคอลการแพร่สัญญาณ SBA สามารถรองรับการทำงานในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูงได้ แต่ประสิทธิภาพของโพรโทคอล SBA ทางด้านการลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณนั้นต่ำกว่าการโพรโทคอล RRB โพรโทคอล SBA ยังก่อให้เกิดความล่าช้าในการส่งแพ็คเก็ตมากกว่าอีกด้วย จากการที่โพรโทคอลทั้งสองสามารถทำงานได้ดีในเครือข่ายที่มีคุณสมบัติต่างกัน งานวิจัยนี้จึงนำโพรโทคอลทั้งสองมาทำงานร่วมกันเพื่อให้โพรโทคอล RRB-SB สามารถทำงานได้ดีทั้งในเครือข่ายที่มีความคับคั่งของข้อมูลสูง และมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง โพรโทคอล RRB-SB

เป็นโพรโทคอลที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล RRB ด้านความน่าเชื่อถือในการส่ง แพ็คเก็ตในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูงแต่ใช้จำนวนโหนดที่ในการส่งที่มากขึ้น

ภาพที่ 23 แสดงขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล RRB-SB มีดังนี้ เมื่อโหนด ได้รับแพ็คเก็ตจากการแพร่สัญญาณ จะตรวจสอบแพ็คเก็ตนั้นจากตารางแพ็คเก็ตว่าเคยรับแพ็คเก็ต นั้นมาก่อนหรือไม่ หากโหนดตรวจสอบจากตารางแพ็คเก็ตแล้วพบว่าไม่เคยได้รับแพ็คเก็ตนั้น โหนดจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่แนบมากับแพ็คเก็ตว่าโหนดถูกเลือกจากโหนดเพื่อนบ้านที่ทำการส่งแพ็คเก็ตให้หรือไม่ ถ้าโหนดถูกเลือกจากโหนดเพื่อนบ้านที่ส่งแพ็คเก็ตมาให้ทำการส่งต่อแพ็คเก็ต โหนดจะทำการเลือกเซตของโหนดเพื่อนบ้านด้วยวิธีการลดความซ้ำซ้อนเหมือนกับการทำงานของโพรโทคอล RRA เพื่อเลือกโหนดเพื่อนบ้านที่จะทำการส่งต่อแพ็คเก็ต จากนั้นโหนดจะส่งต่อแพ็คเก็ตโดยจะทำการส่งเซตของโหนดเพื่อนบ้านที่ถูกเลือกแนบไปกับส่วนหัวของแพ็คเก็ตที่ทำการส่งออกไป เพื่อให้เกิดการแพร่สัญญาณเหมือนกับการทำงานของโพรโทคอล RRA ที่แพร่สัญญาณโดยอาศัยโหนดเพื่อนบ้านที่เลือกเป็นโหนดที่ทำการแพร่สัญญาณ แต่เมื่อทำการตรวจสอบแพ็คเก็ตจากตารางแพ็คเก็ตแล้วพบว่าโหนดไม่ได้ถูกเลือกจากโหนดเพื่อนบ้านให้ส่งต่อแพ็คเก็ต โหนดจะทำการสุ่มค่าหนึ่งเวลาขึ้นมาเพื่อตรวจสอบสถานการณ์แพร่สัญญาณของแพ็คเก็ตนั้น ค่าหนึ่งเวลาที่ได้จากการสุ่มใช้เพื่อหนึ่งเวลาเพื่อรอรับฟังโหนดเพื่อนบ้านที่ทำการส่งแพ็คเก็ต ถ้าโหนดได้รับแพ็คเก็ตเดิมซ้ำจากเพื่อนบ้านโหนดอื่นในช่วงเวลาที่หนึ่งเวลาคอย โหนดจะใช้เวลา รู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป เพื่อตรวจสอบโหนดเพื่อนบ้านอื่นๆ ที่ได้รับแพ็คเก็ตจากการแพร่สัญญาณของโหนดเพื่อนบ้านนั้น และทำการลดจำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่ยังไม่ได้รับแพ็คเก็ตลงถ้าหากมีเพื่อนบ้านที่ได้รับแพ็คเก็ตจากการส่งสัญญาณในครั้งนั้นเหมือนกัน ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะเหมือนกับการทำงานของโพรโทคอล SBA เมื่อโหนดที่ไม่ได้ถูกเลือกทำการหนึ่งเวลาจนครบช่วงระยะเวลาที่ทำการสุ่มขึ้นมาแล้ว โหนดจะทำการตรวจสอบจากข้อมูลที่ได้ออรับฟังในช่วงที่ทำการหนึ่งเวลา หากเพื่อนบ้านทั้งหมดได้รับแพ็คเก็ตเรียบร้อยแล้วโหนดนั้นก็จะไม่ทำการส่งแพ็คเก็ตออกมา แต่ถ้าไม่โหนดจะทำการส่งแพ็คเก็ตออกไป 1 ครั้งเพื่อให้โหนดเพื่อนบ้านที่ไม่ได้รับแพ็คเก็ตนั้นได้รับแพ็คเก็ต โดยแพ็คเก็ตที่ส่งออกไปนั้นจะทำการส่งออกไปโดยไม่ทำการเลือกโหนดที่ส่งต่อแนบไปกับแพ็คเก็ต แพ็คเก็ตที่ส่งออกไปนี้เป็นแค่แพ็คเก็ตที่ส่งออกไปให้โหนดเพื่อนบ้านทุกโหนดได้รับแพ็คเก็ต



ภาพที่ 23 ขั้นตอนการทำงานของ RRB-SB

หลักการของโพรโทคอล RRB-SB คือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทำงานตามลักษณะของเครือข่าย จากการที่โพรโทคอลทั้งสองทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสมโดยอาศัยค่าหน่วยเวลาที่มีการเพิ่มค่าคงที่เข้าไป ค่าคงที่ที่เพิ่มเข้าไปเพื่อไม่ต้องการให้การทำงานของการทำงานบนโพรโทคอล RRB แต่ละโหนดจะทำงานเสมือนหนึ่งว่าทำงานบนโพรโทคอลอื่นใดอันหนึ่งเท่านั้น จากการที่มีการแบ่งการทำงานอย่างชัดเจนระหว่างโหนดที่ถูกเลือกให้ส่งต่อแพ็คเก็ต กับโหนดที่ไม่ถูกเลือกส่งต่อแพ็คเก็ต โหนดที่ไม่ถูกเลือกให้ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตจะตรวจสอบว่าโหนดเพื่อนบ้านได้รับแพ็คเก็ตครบแล้วหรือไม่ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาของโหนดที่ไม่ถูกเลือกถ้าโหนดเพื่อนบ้านยังไม่ได้รับแพ็คเก็ตครบทุกโหนด โหนดที่ไม่ถูกเลือกจะส่งต่อแพ็คเก็ตเพื่อให้โหนดเพื่อนบ้าน เปรียบเหมือนการทำงานเพื่อตรวจสอบการทำงานของโหนดที่ถูกเลือก เพราะหากโหนดที่ถูกเลือกส่งแพ็คเก็ตออกไปได้อย่างปกติแล้วโหนดเพื่อนบ้านของโหนดที่ไม่ถูกเลือกจะถูกครอบคลุมการส่งแพ็คเก็ตถึงหมดทุกโหนด ทำให้การทำงานของโหนดที่ไม่ถูกเลือกจะส่งแพ็คเก็ตออกมา น้อยมาก

ในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดด้วยความเร็วต่ำหรือไม่เคลื่อนที่ จำนวนโหนดที่ใช้ส่งต่อแพ็คเก็ตของโพรโทคอล RRB-SB เกือบจะเท่ากับของโพรโทคอล RRB เลย เนื่องจากเมื่อโหนดไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้การเลือกโหนดที่จะส่งต่อแพ็คเก็ตทำได้มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็คเก็ตถึงยังทุกโหนด เมื่อโหนดได้รับแพ็คเก็ตมาแล้วไม่ถูกเลือกให้เป็นโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตจะหน่วงเวลาเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ค่าคงที่ที่เพิ่มเข้ามาในการหน่วงเวลามากพอที่จะทำให้การทำงานของโหนดที่ถูกเลือกสามารถส่งแพ็คเก็ตออกมาเพื่อครอบคลุมโหนดเพื่อนบ้านทั้งหมดของโหนดที่ไม่ถูกเลือกได้ เปรียบเสมือนกับการทำงานของโหนดที่ถูกเลือกเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการแพร่สัญญาณในเครือข่าย และการทำงานของโหนดที่ไม่ถูกเลือกเป็นการทำงานเพื่อตรวจสอบการทำงานของโครงสร้างในการแพร่สัญญาณอีกที ดังนั้นในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ำ โครงสร้างของการแพร่สัญญาณก็จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังนั้น การทำงานในส่วนของโหนดที่ไม่ถูกเลือกก็จะไม่ต้องทำการส่งต่อแพ็คเก็ตออกมาตามไปด้วย ยังผลทำให้โพรโทคอล RRB-SB สามารถรักษาประสิทธิภาพในการลดจำนวนโหนดของ RRB ไว้ได้

ในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูงทำให้การแพร่สัญญาณโดยใช้โครงสร้างมีความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยี เปรียบเสมือนกับโครงสร้างไม่สามารถส่งต่อแพ็คเก็ตไปถึงยังทุกโหนดได้ ดังนั้นโหนดมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงถ้าข้อมูลของโหนดเพื่อน

บ้านในระยะ 2 สอพอจะผิดพลาดทำให้การทำงานของโหนดที่ไม่ถูกเลือก มีการส่งแพ็คเก็ตออก เพื่อให้โหนดเพื่อนบ้านได้รับแพ็คเก็ต อย่างไรก็ตามการทำงานของโพรโทคอล RRB-SB เป็นการเพิ่มจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการแพร่สัญญาณในเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง โพรโทคอล RRB-SB มีปัญหาทางด้านความล่าช้าในการส่งข้อมูล คล้ายกับการทำงานของโพรโทคอล SBA เมื่อโหนดในเครือข่ายเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเพราะเปรียบเทียบว่ารูปแบบการทำงานหลักที่ใช้เปลี่ยนมาเป็นการทำงานแบบหน่วงเวลาแทน

การวางแผนการทดลอง

1. เครื่องมือจำลองเครือข่าย

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ที่ทำการพัฒนาเองด้วยภาษา C เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพของการเลือกโหนดของขั้นตอนวิธีที่ศึกษา โปรแกรมวิเคราะห์ที่พัฒนาเป็นโปรแกรมอย่างง่ายไม่ใช่โปรแกรมจำลองการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย เป็นเพียงการวิเคราะห์โดยใช้ตัวแปร (parameter) ทางคณิตศาสตร์เท่านั้น โปรแกรมที่พัฒนาเป็นการวิเคราะห์เครือข่ายไร้สายที่โหนดไม่มีการเคลื่อนที่ คือ เป็นเสมือนกระดานที่มีโหนดวางอยู่แบบสุ่ม และมีรัศมีของการสื่อสาร ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณการเชื่อมต่อกันของโหนดได้ การวิเคราะห์เครือข่ายนี้เป็นการวิเคราะห์แบบพื้นฐานจึงอาศัยแค่ตำแหน่งของโหนด และการเชื่อมต่อกันเพียงพอแล้ว

ส่วนอื่นของงานวิจัยใช้โปรแกรม GloMoSim (Zeng *et al.*, 1998) เพื่อจำลองเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย GloMoSim เป็นโปรแกรมจำลองที่ไม่เสียค่าใช้จ่ายเมื่อใช้งานเพื่อการศึกษา และมีการพัฒนาพื้นฐานการทำงานในเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สายไว้อย่างครบถ้วน ในปัจจุบันยังมียุติที่ใช้งาน และเขียนโปรแกรมเสริมสำหรับโปรแกรม GloMoSim อยู่ เช่น โพรโทคอล OLSR (Niigata University, 2004) ของมหาวิทยาลัย Niigata ประเทศญี่ปุ่น ที่ถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้งานในโปรแกรม GloMoSim ซึ่งเป็นโปรแกรมส่วนหนึ่งที่จะใช้ในการทดลองนี้ด้วย

2. การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้เริ่มด้วยการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพในการเลือกโหนดของการแพร่สัญญาณ จากนั้นทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลการแพร่ RRB และ

RRB-SB ที่เป็นโพรโทคอลที่นำเอาขั้นตอนวิธี RRA มาใช้ ส่วนสุดท้ายทำการทดลองโดยนำขั้นตอนวิธี RRA มาใช้งานในโพรโทคอลจัดหาเส้นทาง OLSR มีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

2.1 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี RRA

เป็นการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเลือกโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณ ประสิทธิภาพในการเลือกโหนดสามารถวัดได้จากจำนวนโหนดที่ใช้ในส่งต่อแพ็คเก็ตไปยังโหนดในเครือข่าย และความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ในการทดลองนี้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ที่เขียนด้วยภาษา C เพื่อวิเคราะห์ค่าจำนวนโหนดที่แต่ละขั้นตอนวิธีใช้ มีรายละเอียดของการทดลอง ดังนี้

2.1.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลอง

- ก. การกระจายทุกทิศทาง (Flooding)
- ข. การเลือกโหนด MPR (MPR Selection)
- ค. ขั้นตอนวิธีละโมบ (Greedy Algorithm)
- ง. ขั้นตอนวิธี RRA (Redundancy Reduction Algorithm)

2.1.2 ค่าตัวแปร ค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรสำหรับการทดลองขั้นตอนวิธี RRA

ค่าตัวแปร	ค่า	
	เครือข่ายที่ 1	เครือข่ายที่ 2
ขอบเขตของเครือข่าย	100×100 เมตร ²	500×500 เมตร ²
รัศมีของการส่งสัญญาณ	50 เมตร	100 เมตร
จำนวนโหนดในเครือข่าย	30 – 120 โหนด	100 – 500 โหนด
อัตราการเพิ่มโหนด	10 โหนด	50 โหนด
จำนวนรอบการทำงาน	10 รอบ	10 รอบ

2.2 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

ทำการทดลองโดยสุ่มโหนดในเครือข่ายที่ต้องการส่งแพ็คเก็ตแบบแพร่สัญญาณ ใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย GloMoSim เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย ความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย และความเร็วของโหนดในเครือข่าย มีรายละเอียดของการทดลอง ดังนี้

2.2.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลอง

- ก. Flooding
- ข. AHBP-EX (Ad Hoc Broadcast Protocol Extend)
- ค. SBA (Scalable Broadcast Algorithm)
- ง. RRB (Redundancy Reduction Broadcast)
- จ. RRB-SB (Redundancy Reduction Broadcast with Scalable Broadcast)

2.2.2 ค่าคงที่ ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลองสามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าคงที่สำหรับการทดลองโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

ค่าคงที่	ค่า
ขอบเขตของเครือข่าย	350×350 เมตร ²
รัศมีของการส่งสัญญาณ	100 เมตร
ขนาดของแพ็คเก็ตข้อมูล	64 ไบต์
รูปแบบตำแหน่งของโหนด	RANDOM
รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนด	RANDOM-WAYPOINT
เวลาหยุดเคลื่อนที่ (pause time)	0 วินาที
เวลาในการจำลองเครือข่าย	120 วินาที
จำนวนครั้งของการทดลอง	10 ครั้ง
ช่วงเวลาการส่ง hello message	1 วินาที
ค่าคงที่ในการสุ่มการหน่วงเวลา	0.05 วินาที

ตาราง 3 แสดงค่าคงที่ต่างๆ ที่เป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองแต่ละส่วนจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามที่ได้กำหนดไว้ ค่าคงที่ในการสุ่มค่าการหน่วงเวลาของโพรโทคอล SBA ให้มีค่าเท่ากับ 0.05 วินาที แต่ในการทำงานของโพรโทคอล RRB-SB ให้มีค่าพื้นฐานเป็น 0.02 วินาทีบวกกับค่าที่ได้จากการสุ่มโดยใช้ค่าคงที่ 0.03 วินาที

2.2.3 ค่าตัวแปร โดยมีค่าพื้นฐานในการทดลองอยู่ที่ จำนวนโหนด 50 โหนด จำนวนครั้งการแพร่สัญญาณ 1 ครั้งต่อวินาที และ โหนดไม่เคลื่อนที่ (0 เมตรต่อวินาที)

ก. จำนวนโหนดในเครือข่าย มีค่าตั้งแต่ 30 โหนด ไปจนถึง 100 โหนด โดยทำการเพิ่มค่าครั้งละ 10 โหนด

ข. จำนวนครั้งการแพร่สัญญาณในเครือข่าย

- 1) 1 ครั้งต่อวินาที
- 2) 5 ครั้งต่อวินาที
- 3) 10 ครั้งต่อวินาที
- 4) 20 ครั้งต่อวินาที
- 5) 30 ครั้งต่อวินาที

ค. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนด

- 1) 0 – 5 เมตรต่อวินาที
- 2) 5 – 10 เมตรต่อวินาที
- 3) 10 – 15 เมตรต่อวินาที
- 4) 15 – 20 เมตรต่อวินาที

2.3 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OLSR

โพรโทคอล OLSR-RRR ปรับปรุงโดยการใช้ขั้นตอนวิธี RRA ในการทำงาน ในการทดลองนี้ใช้รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ CBR (constant bit rate) ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลจัดเส้นทาง รายละเอียดของการทดลอง ดังนี้

2.3.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลอง

ก. OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)

ข. OLSR-RRB (OLSR with Redundancy Reduction Broadcast)

2.3.2 ค่าคงที่ ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลองสามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงที่สำหรับการทดลองโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OLSR

ค่าคงที่	ค่า
ขอบเขตของเครือข่าย	500×500 เมตร ²
รัศมีของการส่งสัญญาณ	100 เมตร
รูปแบบการส่งข้อมูล	constant bit rate (CBR)
ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูล	512 ไบต์
อัตราการส่งข้อมูล	4 แพ็กเก็ตต่อวินาที
รูปแบบตำแหน่งของโหนด	RANDOM
รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนด	RANDOM-WAYPOINT
ความเร็วต่ำสุดของโหนด	0 เมตรต่อวินาที
เวลาหยุดเคลื่อนที่ (pause time)	0 วินาที
เวลาในการจำลองเครือข่าย	300 วินาที
จำนวนครั้งของการทดลอง	50 ครั้ง
ช่วงเวลาการส่ง hello message	2 วินาที
ช่วงเวลาการส่ง topology control message	5 วินาที
ช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval)	95%

2.3.3 ค่าตัวแปร โดยมีค่าพื้นฐานในการทดลองอยู่ที่ จำนวนโหนด 100 โหนด
จำนวนโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต 10 โหนด และโหนดไม่เคลื่อนที่ (0 เมตรต่อวินาที)

ก. จำนวนโหนดในเครือข่าย

- 1) 50 โหนด
- 2) 100 โหนด
- 3) 150 โหนด

ข. จำนวนโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต

- 1) 10 โหนด
- 2) 20 โหนด
- 3) 30 โหนด

ค. ความเร็วสูงสุดของโหนด

- 1) 5 เมตรต่อวินาที
- 2) 10 เมตรต่อวินาที
- 3) 15 เมตรต่อวินาที
- 4) 20 เมตรต่อวินาที

3. การวัดประสิทธิภาพ

เนื่องจากการที่ได้ทำการทดลองในหลายส่วนทำให้การวัดประสิทธิภาพในแต่ละส่วนมีความแตกต่างกันจึงทำให้มีการวัดประสิทธิภาพด้วยค่าที่แตกต่างกันไปโดยมีค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพดังนี้

3.1 Broadcast delivery ratio คือ อัตราส่วนของการได้รับแพ็คเกจของการแพร่สัญญาณ ทำการวัดจากจำนวนโหนดที่ได้รับแพ็คเกจจากการแพร่สัญญาณเทียบกับจำนวนโหนดทั้งหมดในเครือข่าย ค่าอัตราส่วนของการได้รับแพ็คเกจเป็นค่าบ่งชี้ถึงความสำเร็จในการแพร่สัญญาณในเครือข่าย สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Broadcast delivery ratio} = \frac{\text{จำนวนโหนดที่ได้รับแพ็คเกจ}}{\text{จำนวนโหนดทั้งหมดในเครือข่าย}} \quad (8)$$

3.2 Packet delivery ratio คือ อัตราส่วนของการได้รับแพ็คเกจของโหนดปลายทาง โดยนับจากจำนวนแพ็คเกจที่โหนดปลายทางทั้งหมดได้รับเทียบกับจำนวนแพ็คเกจที่ต้นทางทั้งหมดทำการส่ง ค่าอัตราส่วนของการได้รับแพ็คเกจของโหนดปลายทางบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการหาเส้นทาง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Packet delivery ratio} = \frac{\text{จำนวนแพ็คเกจปลายทางได้รับ}}{\text{จำนวนแพ็คเกจที่ส่งจากต้นทาง}} \quad (9)$$

3.3 Number of retransmitting nodes per broadcast คือ จำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณ 1 ครั้ง ค่าจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณบอกถึงความซ้ำซ้อนในการส่งแพร่สัญญาณ และบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานของขั้นตอนวิธีที่สามารถลดความซ้ำซ้อนในการแพร่สัญญาณได้มากน้อยเพียงใด

3.4 Broadcast overhead คือ ค่าใช้จ่ายในส่วนการแพร่สัญญาณจะให้ค่าใช้จ่ายเท่ากับจำนวนแพ็คเก็ตที่ใช้ในการแพร่สัญญาณต่อจำนวนแพ็คเก็ตข้อมูลที่โหนดในเครือข่ายได้รับ จำนวนแพ็คเก็ตที่ใช้ในการแพร่สัญญาณรวมเอาค่าใช้จ่ายในการส่ง hello message ไปด้วย สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Broadcast overhead} = \frac{\text{จำนวนแพ็คเก็ตที่ส่งทั้งหมด}}{\text{จำนวนแพ็คเก็ตข้อมูลที่โหนดในเครือข่ายได้รับ}} \quad (10)$$

3.5 Control packet Overhead คือ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปในการส่งแพ็คเก็ตโดยไม่นับรวมแพ็คเก็ตข้อมูลที่ทำการส่ง เพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงานว่ามีการส่งแพ็คเก็ตที่เกินความจำเป็นเป็นจำนวนเท่าไร โดยในที่นี้เราจะใช้ค่านี้เพื่อนวัดจำนวนแพ็คเก็ตควบคุมของการหาเส้นทาง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Control packet overhead} = \text{จำนวน hello message} + \text{จำนวน tc message} \quad (11)$$

3.6 Routing overhead คือ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากปลายต้นทางไปถึงยังปลายทาง ให้มีค่าเป็นจำนวนแพ็คเก็ตควบคุมที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตต่อจำนวนแพ็คเก็ตทั้งหมดที่ส่งไปถึงยังปลายทาง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Routing overhead} = \frac{\text{จำนวนแพ็คเก็ตควบคุม}}{\text{จำนวนแพ็คเก็ตควบคุม} + \text{จำนวนแพ็คเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับ}} \quad (12)$$

3.7 Control packet overhead คือ ค่าใช้จ่ายในการหาเส้นทางที่ใช้ในการหาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลในเครือข่าย ค่าใช้จ่ายในการหาเส้นทางใช้จำนวนแพ็คเก็ตควบคุมที่ใช้ในการหาเส้นทาง

เป็นตัววัดประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่ายในการหาเส้นทางเท่ากับจำนวนแพ็คเก็ตควบคุมทั้งหมดที่ใช้ในการหาเส้นทางของโพรโทคอลตลอดการทำงาน

3.8 Average end-to-end delay คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลแพ็คเก็ตจากโหนดต้นทางไปยังปลายทางจะมีความล่าช้าที่เกิดจากการประมวลผล การเข้าคิว และเวลาที่สัญญาณใช้เดินทาง คำนวณได้จากผลเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตแต่ละแพ็คเก็ตไปถึงปลายทาง โดยในส่วนของทดสอบประสิทธิภาพในการแพร่สัญญาณเราจะคิดค่าจากเวลาที่ส่งแพ็คเก็ตไปถึงยังทุกโหนดโดยเฉลี่ย

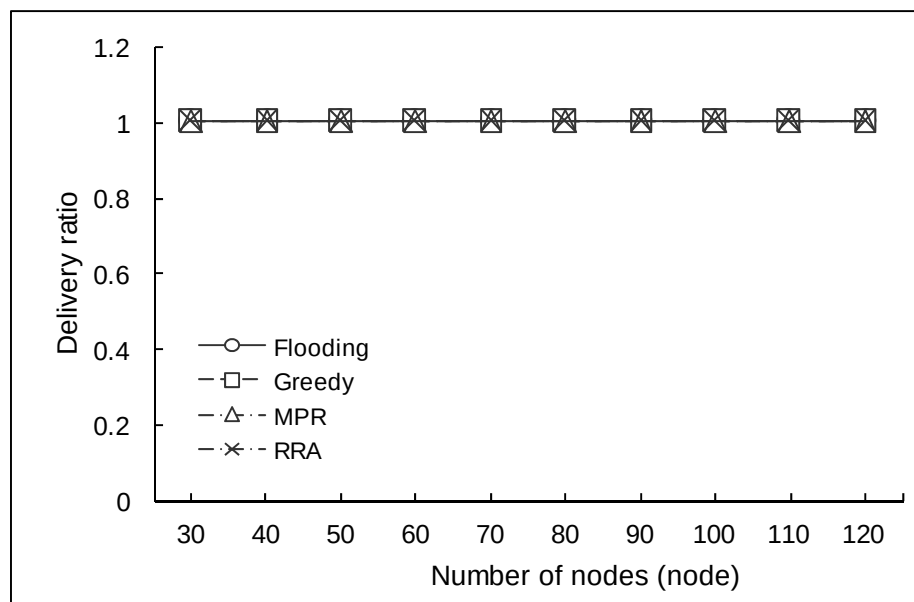
3.9 Maximum end-to-end delay คือ เป็นเวลานานที่สุดที่แพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ กล่าวคือเป็นเวลาที่ใช้ในการเดินทางออกจากโหนดต้นทางที่ทำการส่งไปจนถึงโหนดสุดท้ายในเครือข่ายที่ได้รับแพ็คเก็ตนี้ และไม่มีการส่งต่อแพ็คเก็ตนี้ต่อไปอีก

ผลและวิจารณ์

ผล

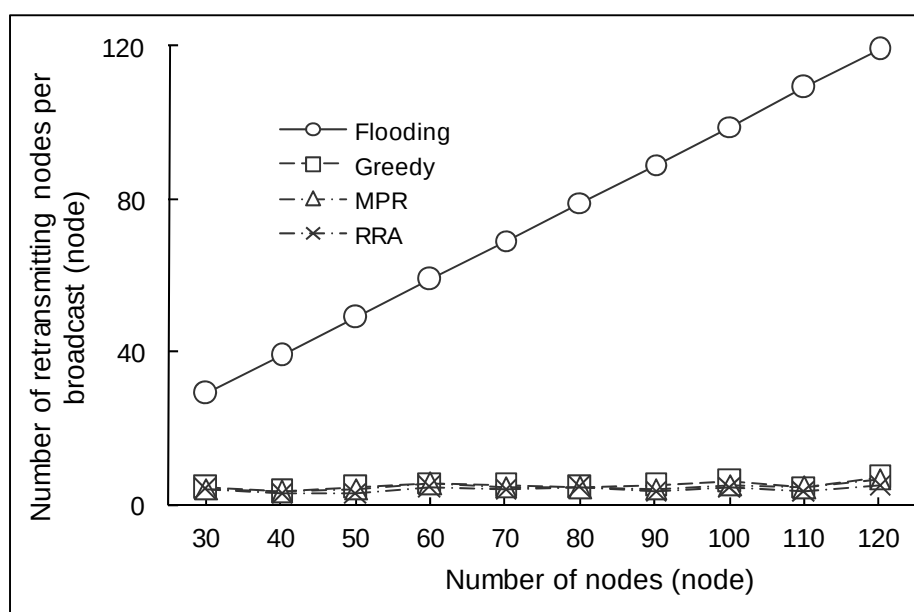
1. ผลการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี RRA

จากผลการทดลองภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ ที่ได้จากการจำลองเครือข่ายด้วยการคำนวณโดยหลักการทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าเท่ากับ 1 คำนี้นี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อโหนดทำการแพร่สัญญาณออกไปแล้ว ทุกโหนดในเครือข่ายจะได้รับแพ็คเก็ตนั้น และจะเห็นว่าวิธีการเลือกโหนดในการส่งแพ็คเก็ตไม่ว่าจะด้วย วิธีการ flooding, ขั้นตอนวิธีละโมบ, ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR และขั้นตอนวิธี RRA สามารถส่งแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณไปถึงยังทุกโหนดในเครือข่ายได้ 100% จากผลการทดลองถึงแม้ว่าเราจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดในเครือข่ายให้มีค่ามากขึ้นทุกวิธีการแพร่สัญญาณก็ยังสามารถที่จะส่งแพ็คเก็ตไปยังทุกโหนดได้ 100% ดังนั้นผลแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายไม่มีผลกระทบต่อการส่งแพ็คเก็ตหากไม่มีการชนกันของสัญญาณวิทยุจากโหนดที่อยู่ใกล้กัน



ภาพที่ 24 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 1 ตั้งแต่ 30 จนถึง 120 โหนด

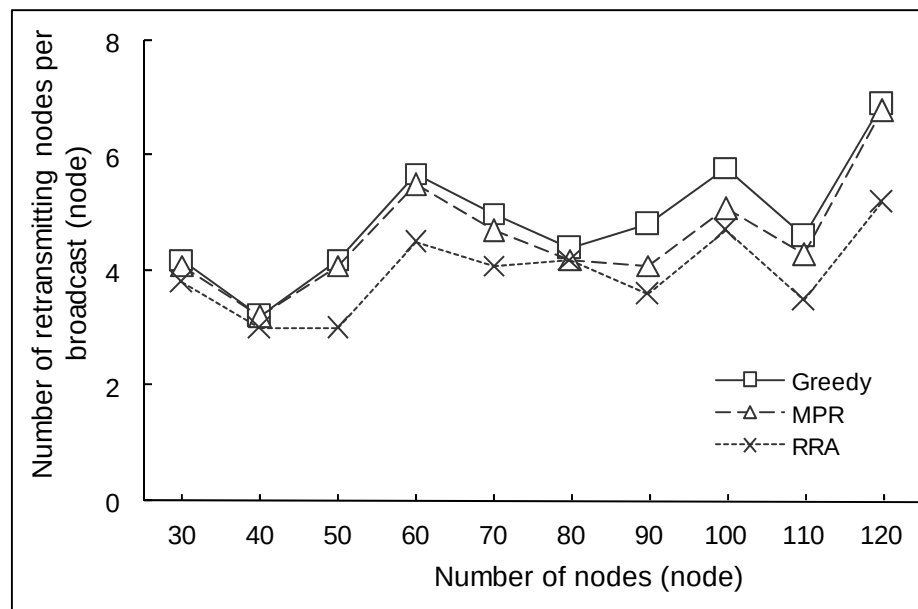
จากผลการทดลองภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่าวิธีการ flooding ใช้ทุกโหนดในการแพร่สัญญาณจึงทำให้มีค่าจำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตเท่ากับจำนวนโหนดในเครือข่าย ซึ่งเมื่อจำนวนโหนดในเครือข่ายเพิ่มขึ้นโหนดที่ทำการแพร่สัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ต่างจากวิธีการอื่นที่ทำการทดลองซึ่งจะเลือกโหนดในการแพร่สัญญาณ ทำให้โหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณมีค่าเกือบคงที่ในเครือข่ายที่มีขอบเขตคงที่ และถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดในเครือข่าย การแพร่สัญญาณก็จะใช้เพียงโหนดที่ถูกเลือกในการแพร่สัญญาณ ทำให้วิธีการ flooding จึงมีค่ามากกว่าวิธีการอื่นๆ ที่เลือกเฉพาะบางโหนดในการแพร่สัญญาณ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างขั้นตอนวิธี RRA และ วิธีการ flooding พบว่าขั้นตอนวิธี RRA ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าการแพร่สัญญาณด้วยวิธี flooding โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 96.79% ที่จำนวนโหนด 100 โหนด ขั้นตอนวิธี RRA ใช้จำนวนโหนดในการแพร่สัญญาณเฉลี่ยอยู่ที่ 3.96 โหนด



ภาพที่ 25 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 1 ตั้งแต่ 30 จนถึง 120 โหนด

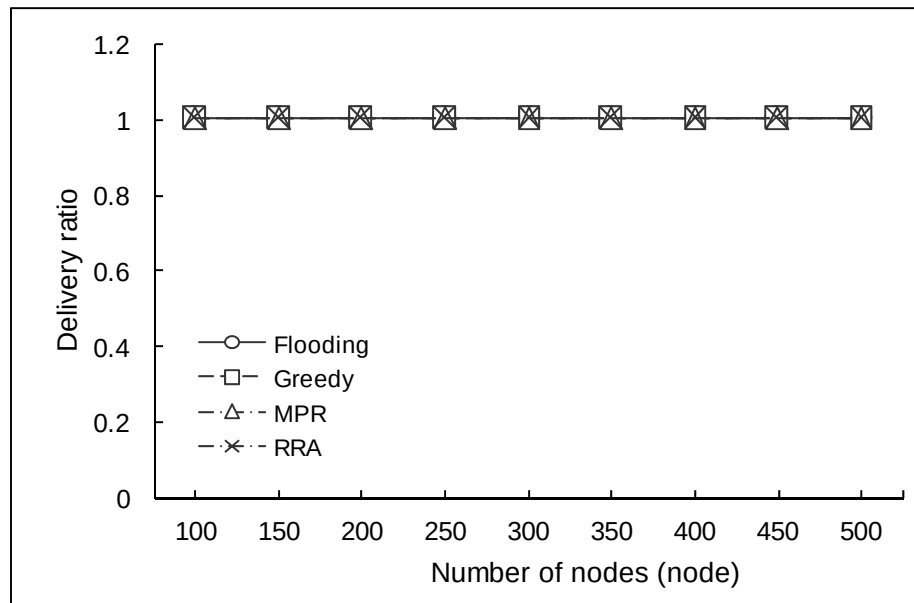
จากผลการทดลองภาพที่ 26 เป็นผลการทดลองเดียวกับผลการทดลองภาพที่ 25 แต่นำมาตัดผลที่ได้จากวิธีการ flooding ออกไปเพื่อให้เห็นค่าอื่นๆ ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากกราฟจะเห็นว่าจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณของขั้นตอนวิธี RRA นั้นมีค่าน้อยที่สุด และขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR มีค่าจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณน้อยกว่าขั้นตอนวิธีละโมบในกราฟแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี RRA สามารถลดจำนวนโหนดในการแพร่สัญญาณได้น้อยกว่า

ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 26.83% ที่จำนวนโหนด 50 โหนด และที่จำนวนโหนดเท่ากับ 80 โหนดทั้งสองขั้นตอนวิธีมีค่าเท่ากับ 4.2 โหนด



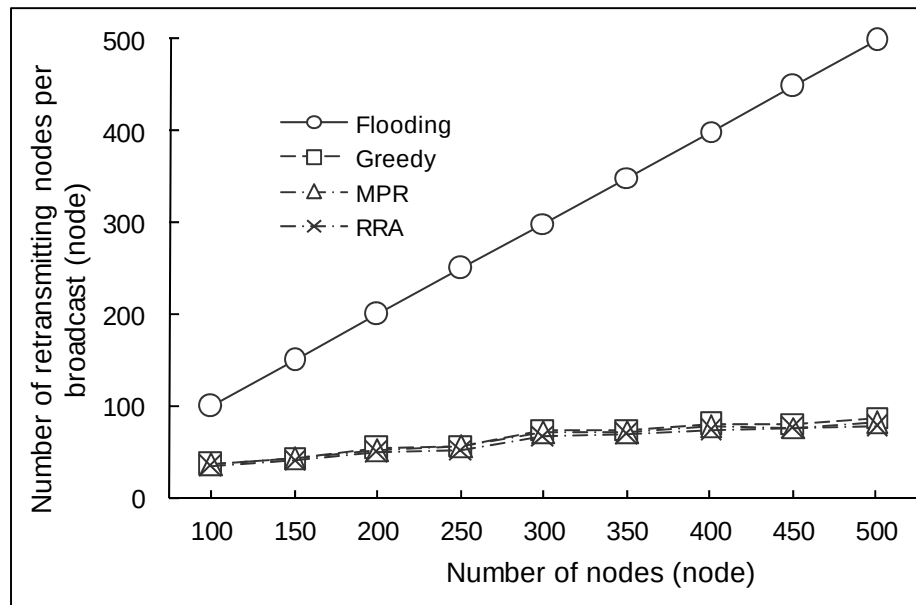
ภาพที่ 26 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อเพื่อเกิดในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 1 ตั้งแต่ 30 จนถึง 120 โหนด (ไม่รวมการแพร่สัญญาณแบบ flooding)

จากผลการทดลองภาพที่ 27 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ ที่ได้จากการจำลองเครือข่ายด้วยการคำนวณโดยหลักการทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าเท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าวิธีการ flooding, ขั้นตอนวิธีละโมบ, ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR และขั้นตอนวิธี RRA สามารถส่งแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณไปถึงยังทุกโหนดในเครือข่ายได้ 100% จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองภาพที่ 24 จะเห็นว่าการทดลองทั้งสองให้ค่าที่เท่ากันถึงแม้ว่าเราจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดในเครือข่ายให้มีค่ามากขึ้น และขยายขอบเขตของเครือข่ายให้ใหญ่ขึ้นจาก 100×100 เมตร² เป็นขอบเขตขนาด 500×500 เมตร² ก็ตาม ทุกวิธีการแพร่สัญญาณก็ยังสามารถที่จะส่งแพ็คเก็ตไปยังทุกโหนดได้ 100% ดังนั้นผลแสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของเครือข่ายไม่มีผลกระทบต่อการส่งแพ็คเก็ต หากทุกโหนดในเครือข่ายเชื่อมต่อซึ่งกันและกัน

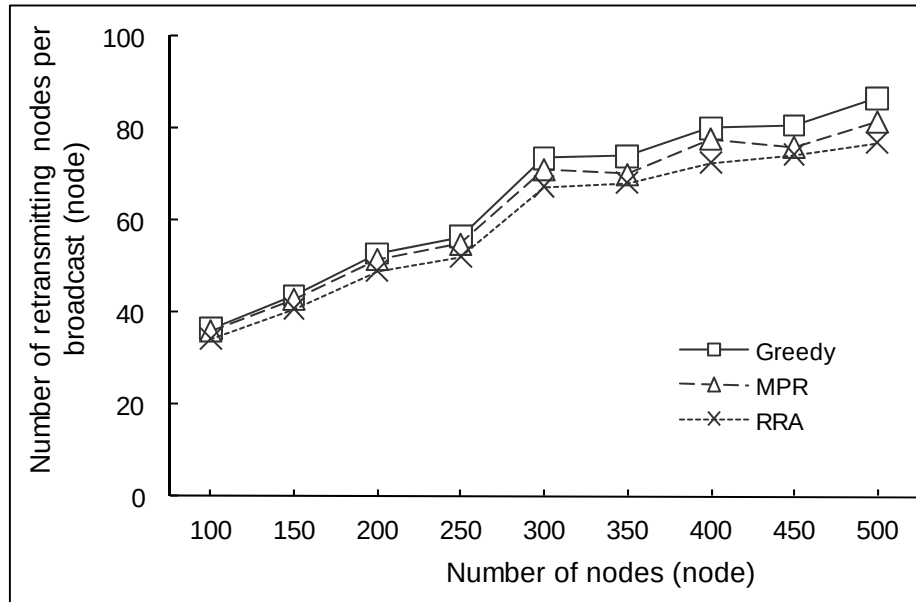


ภาพที่ 27 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตเกิดการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 2 ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โหนด

จากผลการทดลองภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่าวิธีการ flooding ใช้ทุกโหนดในการแพร่สัญญาณจึงทำให้มีค่าจำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตเท่ากับจำนวนโหนดในเครือข่าย ซึ่งเมื่อจำนวนโหนดในเครือข่ายเพิ่มขึ้นโหนดที่ทำการแพร่สัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ต่างจากวิธีการที่ทำการเลือกโหนดในการแพร่สัญญาณที่มีค่าเกือบคงที่ในเครือข่ายที่มีขอบเขตคงที่ และถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดในเครือข่าย การแพร่สัญญาณก็จะใช้เพียงโหนดที่ถูกเลือกในการแพร่สัญญาณ ทำให้วิธีการ flooding จึงมีค่ามากกว่าวิธีการอื่นๆ ที่เลือกเฉพาะบางโหนดในการแพร่สัญญาณ จากกราฟขั้นตอนวิธี RRA ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าการแพร่สัญญาณด้วยวิธี flooding โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 84.59% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 500 โหนด จากการที่เครือข่าย 2 มีขอบเขตของเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับเครือข่าย 1 ส่งผลให้จำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตเพิ่มจากการทดลองในเครือข่าย 1 โดยขั้นตอนวิธี RRA ใช้จำนวนโหนดในการแพร่สัญญาณเฉลี่ยอยู่ที่ 59.46 โหนด



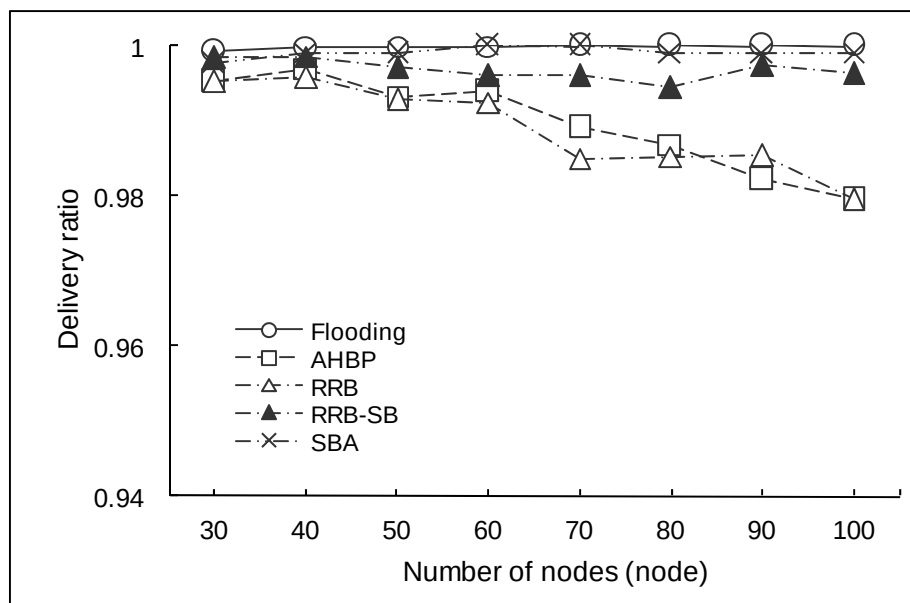
ภาพที่ 28 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อเพื่อเกิดในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 2 ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โหนด



ภาพที่ 29 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อเพื่อเกิดในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายที่ 2 ตั้งแต่ 100 จนถึง 500 โหนด (ไม่รวมการแพร่สัญญาณแบบ flooding)

จากผลการทดลองภาพที่ 29 เป็นผลการทดลองเดียวกับผลการทดลองภาพที่ 28 แต่นำมาตัดผลที่ได้จากวิธีการ flooding ออกไปเพื่อให้เห็นค่าอื่นๆ ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณของขั้นตอนวิธี RRA นั้นมีค่าน้อยที่สุดในทุกกรณี และขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR มีจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณน้อยกว่าขั้นตอนวิธีละโมบในทุกกรณี กราฟแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี RRA สามารถลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณได้น้อยกว่าขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR โหนดมีค่าน้อยที่สุดคือ 6.82% ที่จำนวนโหนด 400 โหนด

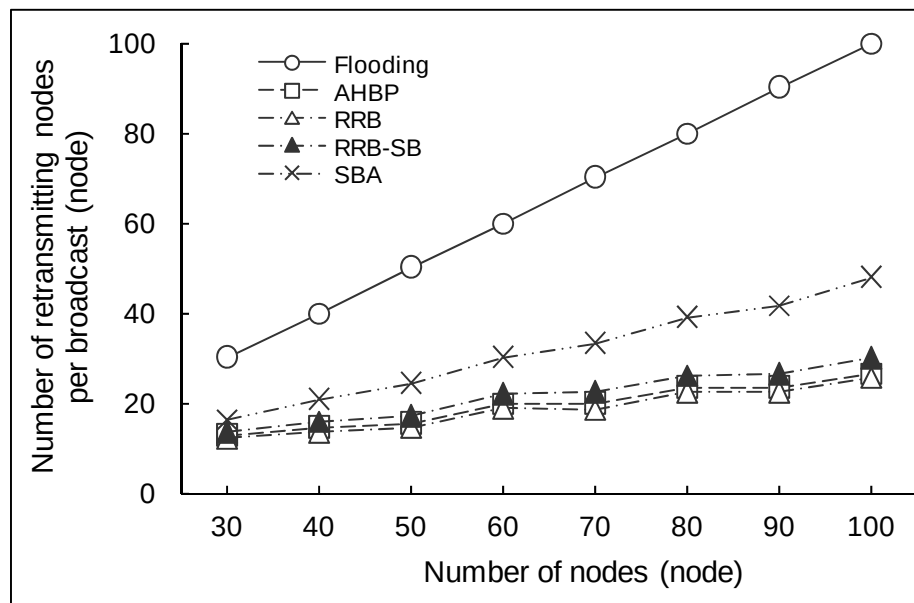
2. ผลการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ



ภาพที่ 30 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด

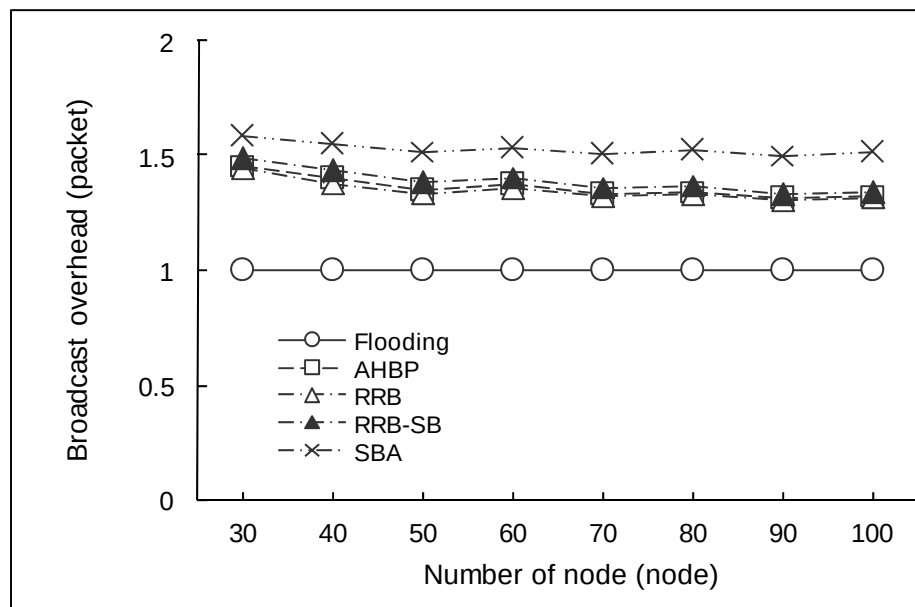
จากผลการทดลองภาพที่ 30 แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจในการแพร่สัญญาณซึ่งได้ทดลองบนโปรแกรมจำลองเครือข่าย และทำการเปลี่ยนค่าโหนดในเครือข่ายเพื่อเปลี่ยนความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย จากกราฟจะเห็นได้ว่าการแพร่สัญญาณโดยวิธีการ flooding มีอัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจในการแพร่สัญญาณมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.9999 หรือ 99.99% ในขณะที่โปรโตคอลการแพร่สัญญาณแบบอื่นมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจอยู่ที่ 98.90%, 98.96%, 99.68% และ 99.91% จาก โปรโตคอล RRB, AHBP, RRB-SB และ

SBA ตามลำดับ ทำให้โปรโตคอล RRB มีค่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณต่ำที่สุดที่ 98.90% และการทำงาน RRB-SB สามารถช่วยให้สามารถเพิ่มอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณเพิ่มขึ้นจากโปรโตคอล RRB เท่ากับ 0.73%



ภาพที่ 31 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด

จากผลการทดลองภาพที่ 31 แสดงให้เห็นถึงจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณแต่ละครั้งว่าต้องใช้จำนวนโหนดเท่าไรในการส่งต่อแพ็คเก็ต จากกราฟจะเห็นว่าค่าจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding มีค่าเกือบเท่าหรือเท่ากับค่าของจำนวนโหนดในเครือข่าย จึงทำให้มีค่าจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตมากที่สุด รองลงมาคือโปรโตคอล SBA ซึ่งใช้การหน่วงเวลา จากผลการทดลองโปรโตคอล RRB ใช้จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าโปรโตคอล AHBP โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 6.22% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 40 โหนด โปรโตคอล RRB-SB ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโปรโตคอล AHBP และ RRB พบว่าโปรโตคอล RRB-SB ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโปรโตคอล RRB โดยมีค่ามากที่สุดคือ 20.42% ที่จำนวนโหนด 70 โหนด

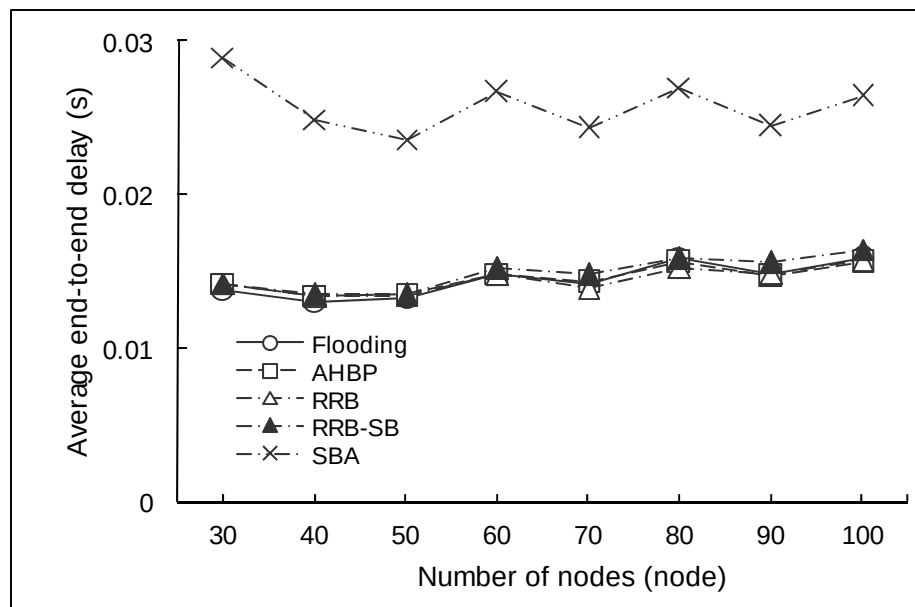


ภาพที่ 32 ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพ
โปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด

จากผลการทดลองภาพที่ 32 แสดงให้เห็นถึงค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณของ
โปรโตคอลการแพร่สัญญาณแบบต่างๆ การแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding จะมีจำนวนแพ็คเก็ตที่
ส่งออกมาเท่ากับจำนวนแพ็คเก็ตที่ได้รับจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณเป็น 1 และมีค่าน้อย
ที่สุด ในโปรโตคอลอื่นๆ ที่ต้องทำการส่ง hello message เพื่อเก็บข้อมูลโหนดเพื่อนบ้านจึงทำให้มี
ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณมากกว่า จากกราฟจะได้ว่าโปรโตคอล SBA มีค่าใช้จ่ายในการแพร่
สัญญาณมากที่สุด โปรโตคอล RRB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าโปรโตคอล AHP
โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.49% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 40 โหนด แต่ว่าโปรโตคอล RRB-SB มี
ค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโปรโตคอล AHP และ RRB พบว่าโปรโตคอล RRB-SB มี
ค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโปรโตคอล RRB โดยมีค่ามากที่สุดคือ 4.06% ที่จำนวน
โหนด 40 โหนด

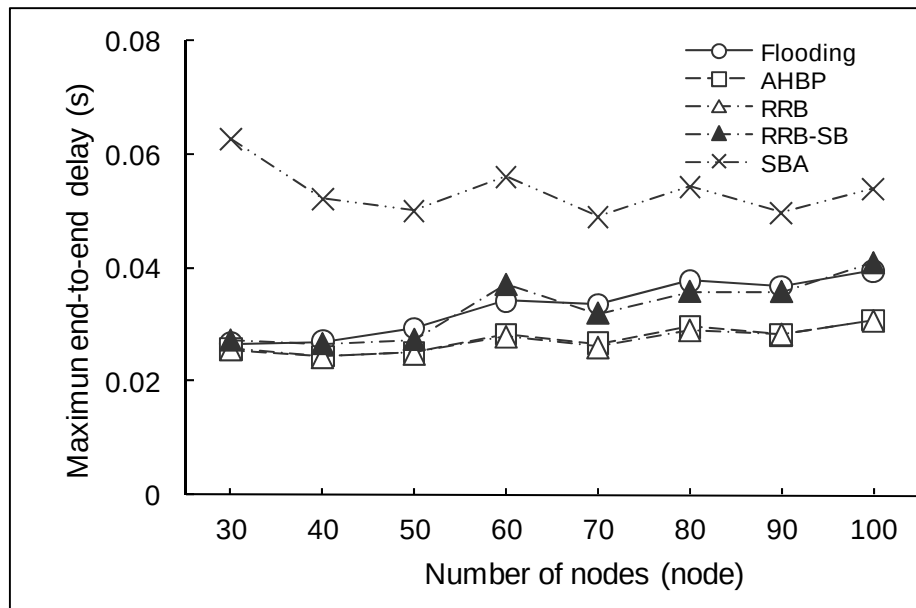
จากผลการทดลองภาพที่ 33 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตซึ่งมี
ผลกับการทำงานของโปรโตคอล SBA มากที่สุดเนื่องจากโปรโตคอล SBA ใช้ค่าหน่วงเวลาในการ
ส่งต่อแพ็คเก็ต ทำให้โปรโตคอล SBA ใช้เวลาเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตมีค่ามากที่สุด
โปรโตคอลอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นต้องหน่วงเวลาในการส่ง จึงทำให้มีค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่ง
แพ็คเก็ตที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.43, 14.50, 14.43 และ 14.86 มิลลิวินาที จากการแพร่

สัญญาณโดยวิธี flooding, AHBP, RRB และ RRB-SB ตามลำดับ ซึ่งโปรโตคอล SBA มีค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตมากที่สุดที่ 36.46 มิลลิวินาที

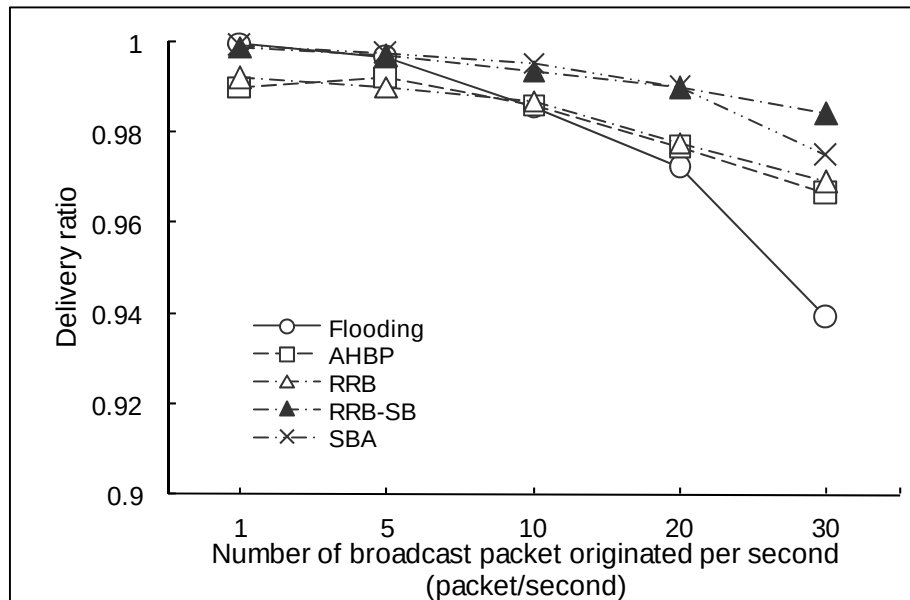


ภาพที่ 33 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด

จากผลการทดลองภาพที่ 34 แสดงให้เห็นถึงค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตซึ่งมีผลกับการทำงานของโปรโตคอล SBA มากที่สุดเนื่องจากโปรโตคอล SBA ใช้ค่าหน่วงเวลาในการส่งต่อแพ็คเก็ต ทำให้โปรโตคอล SBA ใช้เวลาการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตมีค่ามากที่สุด โปรโตคอลอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นต้องหน่วงเวลาในการส่ง จึงทำให้มีค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.12, 27.38, 27.12 และ 32.86 มิลลิวินาที จากการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding, AHBP, RRB และ RRB-SB ตามลำดับ ซึ่งโปรโตคอล SBA มีค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตมากที่สุดที่ 73.64 มิลลิวินาที

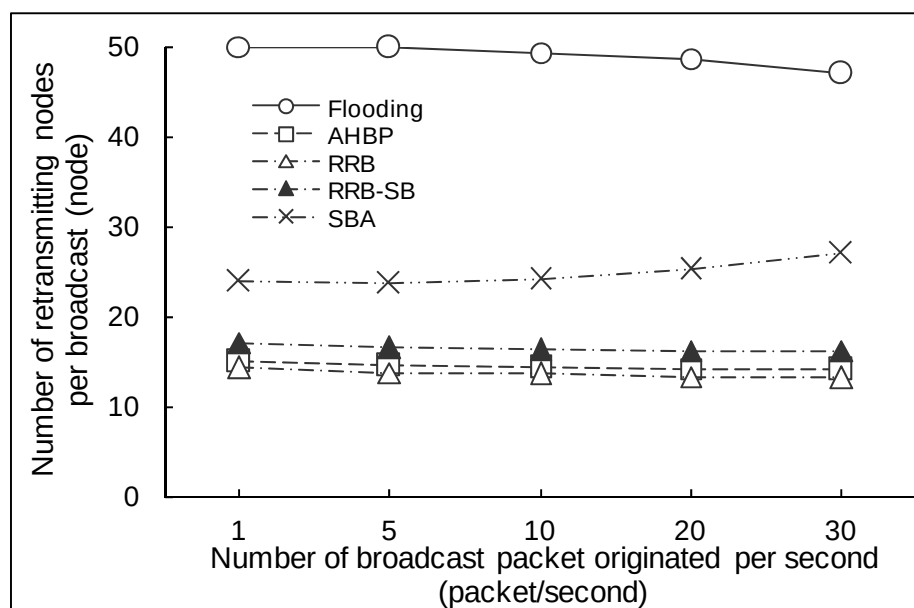


ภาพที่ 34 ค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ ตั้งแต่ 30 จนถึง 100 โหนด



ภาพที่ 35 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

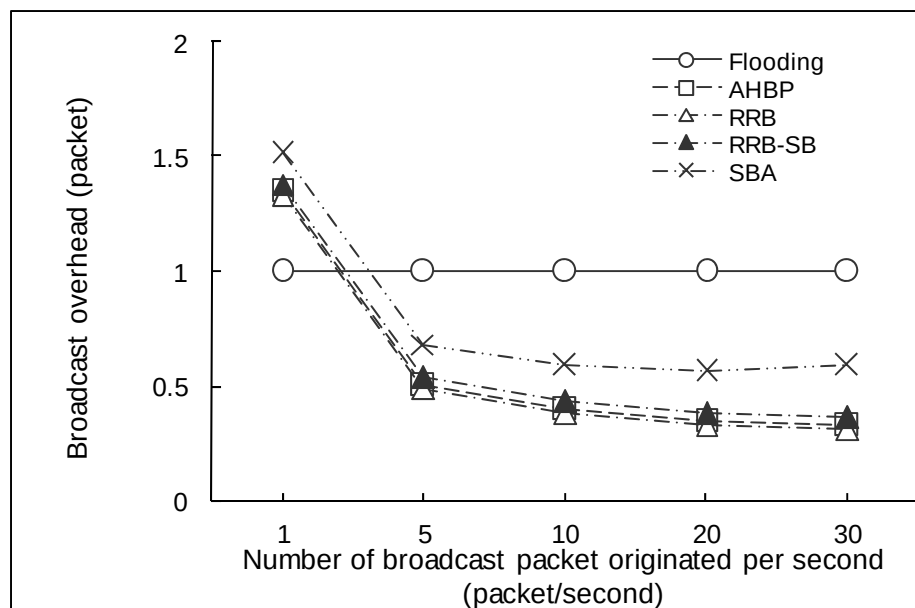
จากผลการทดลองภาพที่ 35 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณได้รับผลกระทบจากจำนวนแพ็คเก็ตในเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้น โดยโพรโทคอลที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือ การแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding เนื่องจากเกิดการชนกันของแพ็คเก็ตที่ส่งออกมาเพิ่มขึ้น แต่โพรโทคอลอื่นๆ ที่ทำการเลือกโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตได้รับผลกระทบจากความคับคั่งของข้อมูลน้อยกว่า เมื่อทำการพิจารณาถึงความคับคั่งของข้อมูลมากที่สุด จะเห็นว่าโพรโทคอล RRB-SB มีค่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตมากที่สุด และการแพร่สัญญาณโดยการ flooding มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 98.43% และ 93.92% ตามลำดับ จากผลการทดลองค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณของแต่ละโพรโทคอลเท่ากับ 97.87%, 98.24%, 98.33%, 99.28% และ 99.14% จากการแพร่สัญญาณด้วยวิธี flooding, AHBP, RRB, RRB-SB และ SBA ตามลำดับ



ภาพที่ 36 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ

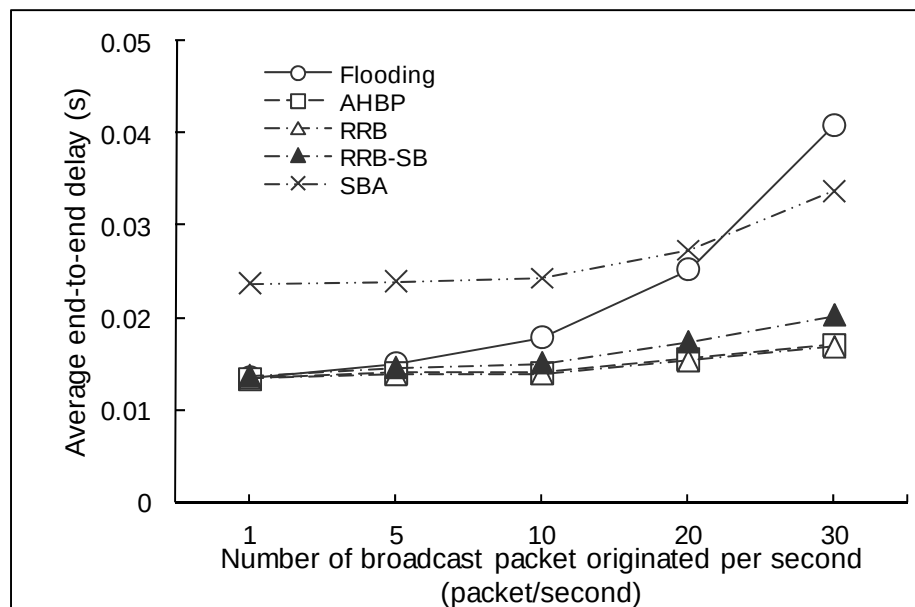
จากผลการทดลองภาพที่ 36 แสดงให้เห็นถึงจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณแต่ละครั้งว่าต้องใช้จำนวนโหนดเท่าใดในการส่งต่อแพ็คเก็ต จากกราฟจะเห็นว่าค่าจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding มีค่าเกือบเท่าหรือเท่ากับค่าของจำนวนโหนดในเครือข่าย จึงทำให้มีค่าจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตมากที่สุด รองลงมาคือโพรโทคอล SBA ซึ่งใช้การหน่วงเวลา จากผลการทดลองโพรโทคอล RRB ใช้จำนวน

โหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าโพรโทคอล AHP ที่สุด 6.67% ที่จำนวนการแพร่สัญญาณต่อวินาทีเท่ากับ 30 ครั้งต่อวินาที โพรโทคอล RRB-SB มีจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล AHP และ RRB พบว่าโพรโทคอล RRB-SB มีจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล RRB โดยมีค่ามากที่สุดคือ 22.89% ที่จำนวนการแพร่สัญญาณต่อวินาทีเท่ากับ 30 ครั้งต่อวินาที



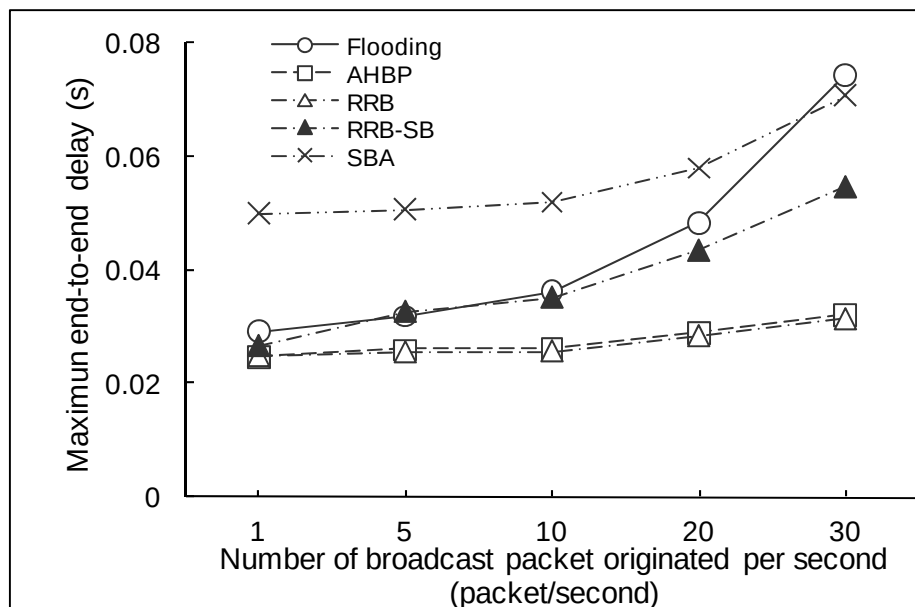
ภาพที่ 37 ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 37 แสดงให้เห็นถึงค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณของโพรโทคอลการแพร่สัญญาณแบบต่างๆ การแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding จะมีจำนวนแพ็คเก็ตที่ส่งออกมาเท่ากับจำนวนแพ็คเก็ตที่ได้รับจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณเป็น 1 และมีค่าน้อยที่สุด ในโพรโทคอลอื่นๆ เมื่อต้องทำการแพร่สัญญาณไปมากกว่า 1 ครั้งต่อวินาที ซึ่งมากกว่า การส่ง hello message จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณน้อยลงมากกว่า 1 โพรโทคอล RRB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าโพรโทคอล AHP โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 6.20% ที่จำนวนการแพร่สัญญาณต่อวินาทีเท่ากับ 30 ครั้งต่อวินาที โพรโทคอล RRB-SB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล AHP และ RRB พบว่าโพรโทคอล RRB-SB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล RRB โดยมีค่ามากที่สุดคือ 18.41% ที่จำนวนการแพร่สัญญาณต่อวินาทีเท่ากับ 30 ครั้งต่อวินาที



ภาพที่ 38 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 38 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตซึ่งมีผลกับการทำงานของโปรโตคอล SBA มากที่สุดเนื่องจากโปรโตคอล SBA ใช้ค่าหน่วงเวลาในการส่งต่อแพ็คเก็ต ทำให้โปรโตคอล SBA ใช้เวลาเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตมีค่ามากที่สุด โปรโตคอลอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นต้องหน่วงเวลาในการส่ง จึงทำให้มีค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อที่เครือข่ายมีความคับคั่งของข้อมูลสูงการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding จะมีค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตมากที่สุดเท่ากับ 40.96 มิลลิวินาที และค่าเฉลี่ยสำหรับแต่ละโปรโตคอลเท่ากับ 14.76, 14.63 และ 16.14 มิลลิวินาที จากการแพร่สัญญาณโดยวิธี AHBP, RRB และ RRB-SB ตามลำดับ

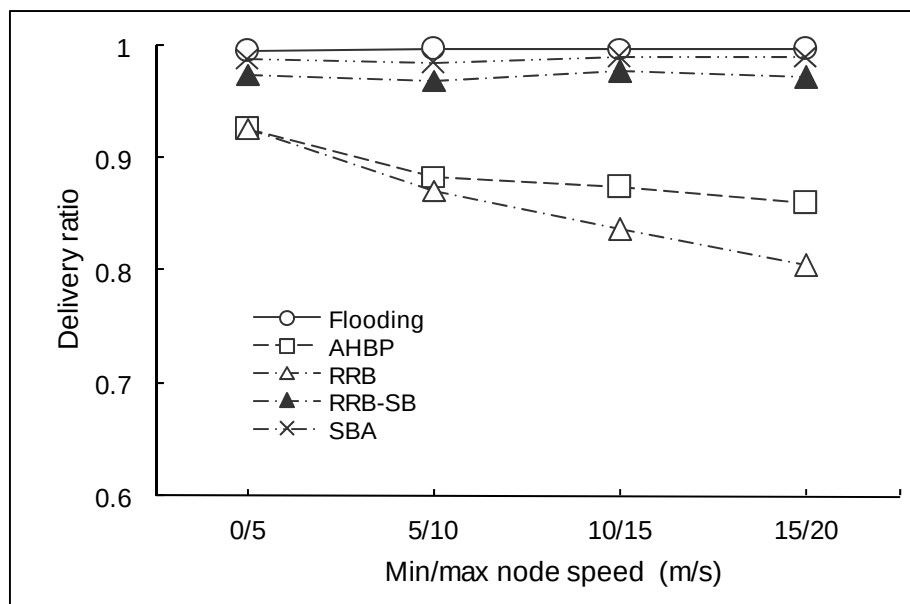


ภาพที่ 39 ค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการแพร่สัญญาณต่อวินาทีในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 39 แสดงให้เห็นถึงค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตซึ่งมีผลกับการทำงานของโพรโทคอล SBA มากที่สุดเนื่องจากโพรโทคอล SBA ใช้ค่าหน่วงเวลาในการส่งต่อแพ็คเก็ต ทำให้โพรโทคอล SBA ใช้เวลาการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตมีค่ามากที่สุด แต่เมื่อที่เครือข่ายมีความคับคั่งของข้อมูลเท่ากับ 30 แพ็คเก็ตต่อวินาที การแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding จะมีค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตมากที่สุดเท่ากับ 74.49 มิลลิวินาที โพรโทคอลอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นต้องหน่วงเวลาในการส่ง จึงทำให้มีค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.56, 27.22 และ 38.52 มิลลิวินาที จากการแพร่สัญญาณโดยวิธี AHBP, RRB และ RRB-SB ตามลำดับ

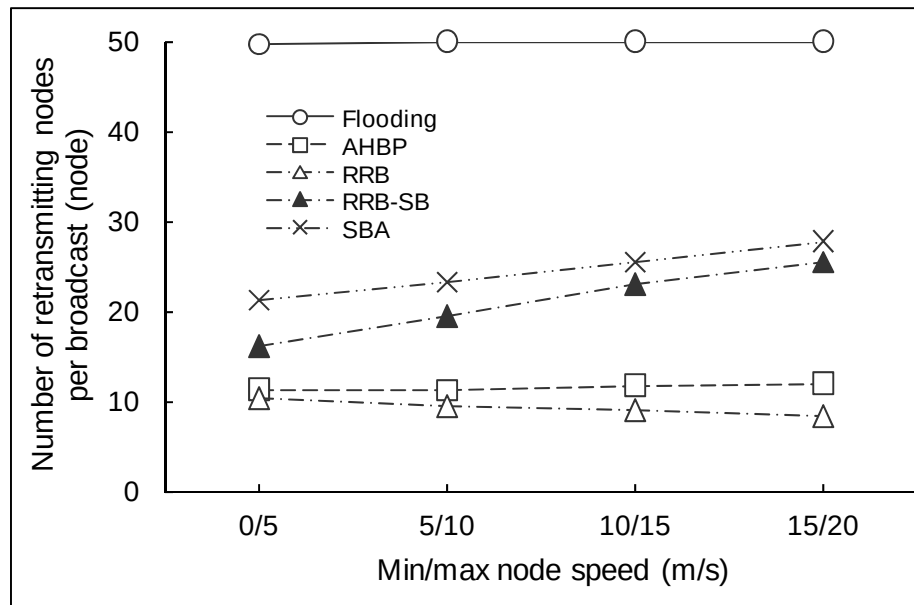
จากผลการทดลองภาพที่ 40 แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณซึ่งได้ทดลองบนโปรแกรมจำลองเครือข่าย และทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในเครือข่ายเพื่อทดสอบโพรโทคอลการแพร่สัญญาณบนเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ จากกราฟจะเห็นว่า การแพร่สัญญาณโดยวิธีการ flooding มีอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 99.67% ซึ่งที่ความเร็ว 0/5 เมตรต่อวินาที โพรโทคอล AHBP มีอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณน้อยที่สุดเท่ากับ 92.54% และในขณะที่โพรโทคอล RRB มีค่าน้อยที่สุดเมื่อโหนดมีความเร็วตั้งแต่ 5/10 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป โดยมีค่าอัตราส่วนการได้รับ

แพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณน้อยกว่าโปรโตคอล AHBP โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 6.48% ที่ความเร็ว โหนด 15/20 เมตรต่อวินาที แต่โปรโตคอล RRB-SB ที่ได้พัฒนาจากโปรโตคอล RRB มีอัตราส่วน การได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณมากกว่าโปรโตคอล RRB โดยมีค่ามากที่สุดคือ 20.81% ที่ ความเร็ว โหนด 15/20 เมตรต่อวินาที และโปรโตคอล RRB มีค่าอัตราส่วนการ ได้รับแพ็คเก็ตน้อย ที่สุดเท่ากับ 80.45% ที่ความเร็ว โหนดสูงสุด 15/20 เมตรต่อวินาที

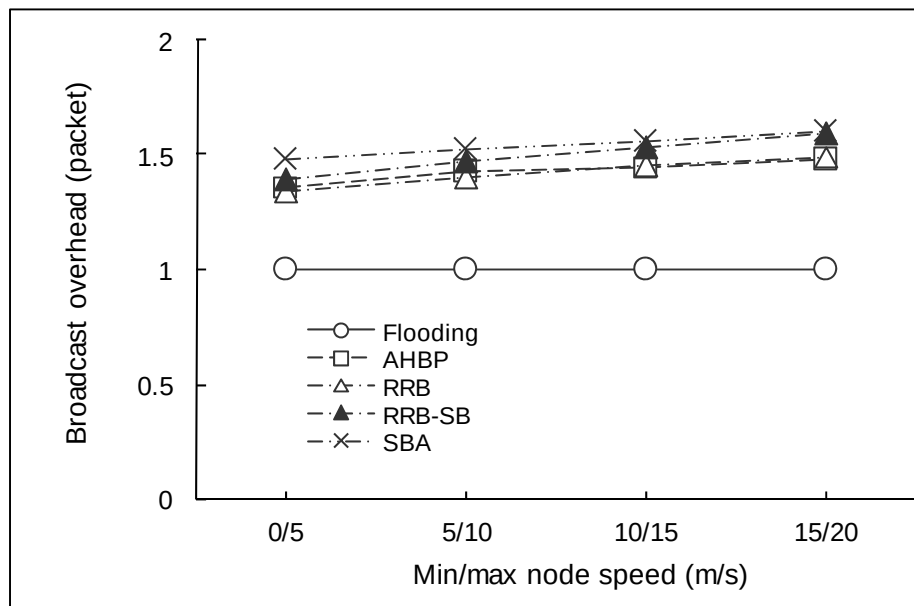


ภาพที่ 40 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนด ในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 41 แสดงให้เห็นถึงจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตในการ แพร่สัญญาณแต่ละครั้ง จากกราฟจะเห็นว่าจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตของการแพร่ สัญญาณโดยวิธี flooding มีค่าเกือบเท่าหรือเท่ากับจำนวนโหนดในเครือข่าย จึงทำให้มีจำนวน โหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตมากที่สุด รองลงมาคือโปรโตคอล SBA สำหรับโปรโตคอล RRB ใช้ จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าโปรโตคอล AHBP โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 29.63% ที่ ความเร็ว โหนด 15/20 เมตรต่อวินาที โปรโตคอล RRB-SB มีจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อ แพ็คเก็ตมากกว่าโปรโตคอล AHBP และ RRB พบว่าโปรโตคอล RRB-SB มีจำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อ แพ็คเก็ตมากกว่าโปรโตคอล RRB โดยมีค่ามากที่สุดคือ 207.43% ที่ความเร็ว โหนด 15/20 เมตรต่อ วินาที

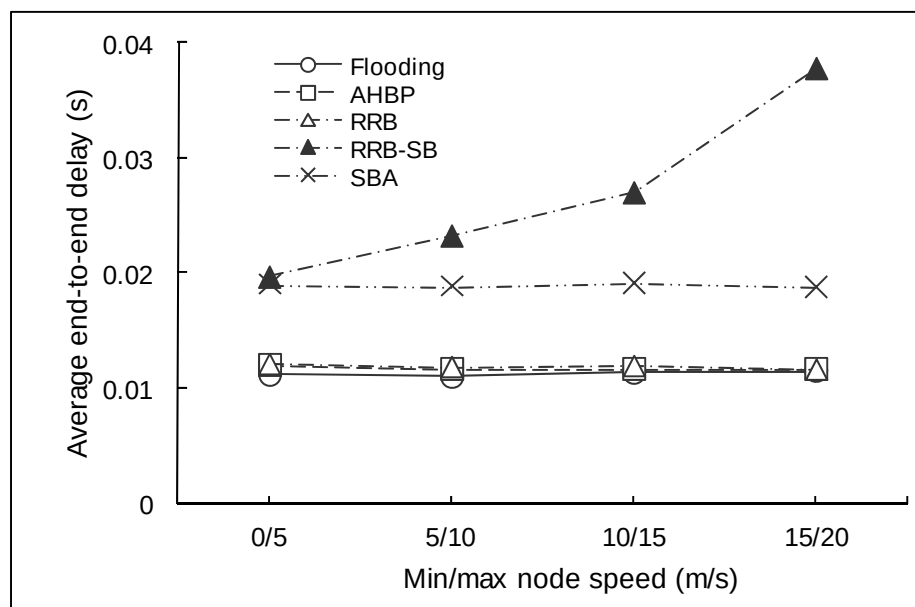


ภาพที่ 41 จำนวนโหนดที่ทำการส่งต่อเพื่อเกิดในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ



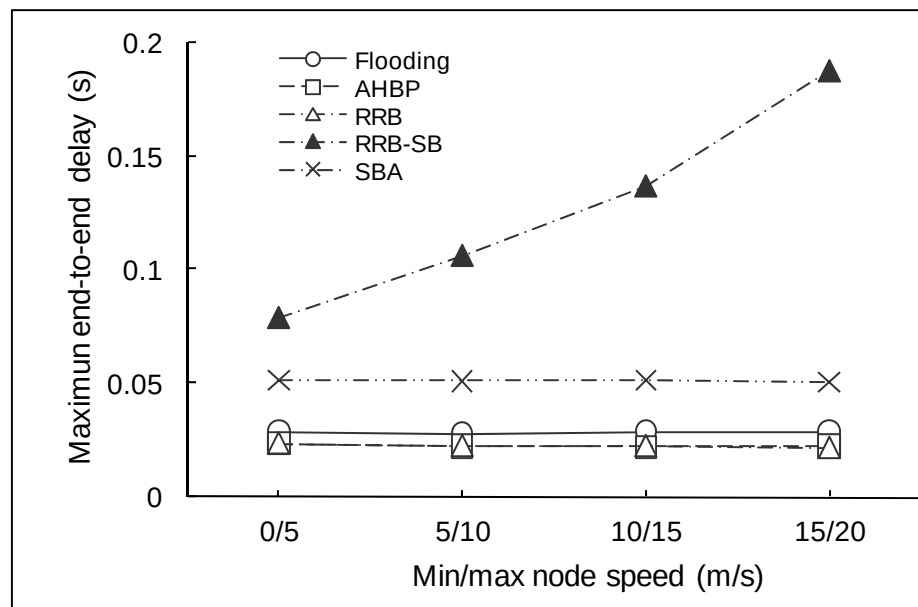
ภาพที่ 42 ค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 42 แสดงให้เห็นถึงค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณของ โพรโทคอลการแพร่สัญญาณแบบต่างๆ จากกราฟจะได้ว่าโพรโทคอล SBA มีค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณมากที่สุด โพรโทคอล RRB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตน้อยกว่าโพรโทคอล AHBP ที่ความเร็วโหนด 0/5 และ 5/10 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 1.77% และ 1.70% ตามลำดับ แต่ที่ความเร็วโหนด 10/15 และ 15/20 เมตรต่อวินาที โพรโทคอล RRB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล AHBP เท่ากับ 0.16% และ 6.04% ตามลำดับ โพรโทคอล RRB-SB มีค่าใช้จ่ายในการส่งต่อแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล AHBP และ RRB โดยมีค่ามากกว่าโพรโทคอล RRB ที่สุด 6.50% ที่ความเร็วโหนด 15/20 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 43 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 43 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตซึ่งมีผลกับการทำงานของโพรโทคอล RRB-SB มากที่สุดในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดสูง ทำให้ RRB-SB ทำงานคล้ายกับการทำงานของ SBA แต่ RRB-SB มีค่าหน่วยเวลาคงที่ค่าหนึ่งจึงทำให้ได้รับผลกระทบในด้านค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต โดยมีค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลามากสุดที่ 37.75 มิลลิวินาที ที่ความเร็วโหนด 15/20 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยสำหรับแต่ละโพรโทคอล เท่ากับ 11.26, 11.70, 18.67, 26.91 และ 18.89 มิลลิวินาที จากการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding, AHBP, RRB, RRB-SB และ SBA ตามลำดับ



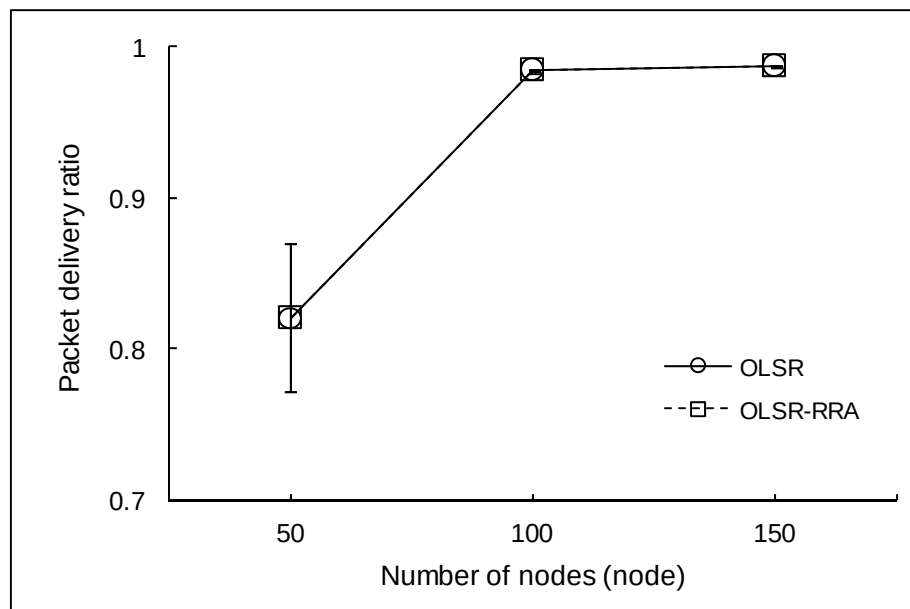
ภาพที่ 44 ค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วของโหนดในการวัดประสิทธิภาพโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ

จากผลการทดลองภาพที่ 44 แสดงให้เห็นถึงค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตซึ่งมีผลกับการทำงานของโปรโตคอล RRB-SB มากที่สุดดังได้กล่าวไปแล้ว โดยมีค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการแพร่สัญญาณมากที่สุดที่ 187.98 มิลลิวินาที ที่ความเร็วโหนด 15/20 เมตรต่อวินาที แต่สำหรับโปรโตคอลอื่นๆ ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ต อย่างไรก็ตามโปรโตคอล SBA ก็ยังมีค่าการหน่วงเวลาสูงสุดของการส่งแพ็คเก็ตมากรองลงมาจากโปรโตคอล RRB-SB ค่าเฉลี่ยสำหรับแต่ละโปรโตคอลเท่ากับ 28.67, 22.72, 22.54, 127.61 และ 51.07 มิลลิวินาที จากการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding, AHBP, RRB, RRB-SB และ SBA ตามลำดับ

3. การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการจัดเส้นทาง OLSR

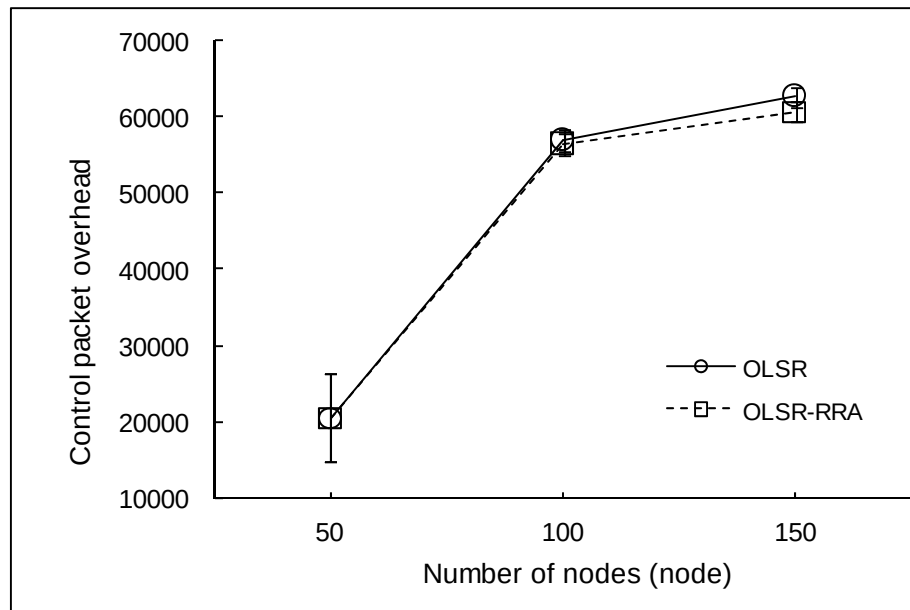
จากผลการทดลองภาพที่ 45 แสดงอัตราส่วนการได้รับข้อมูลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย จากกราฟแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนด จากการทดลองขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธี RRA ไม่สามารถทำให้เห็นความแตกต่างได้อย่างเด่นชัดในด้านของอัตราส่วนการได้รับข้อมูล ค่าอัตราส่วนการได้รับข้อมูลของโปรโตคอล OLSR-RRA มีค่าน้อยกว่า OLSR เท่ากับ 0.03% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 50 โหนด และ ค่าอัตราส่วนการ

ได้รับข้อมูลของโปรโตคอล OLSR-RRA มีค่ามากกว่า OLSR เท่ากับ 0.007% และ 0.008% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 100 และ 150 โหนดตามลำดับ

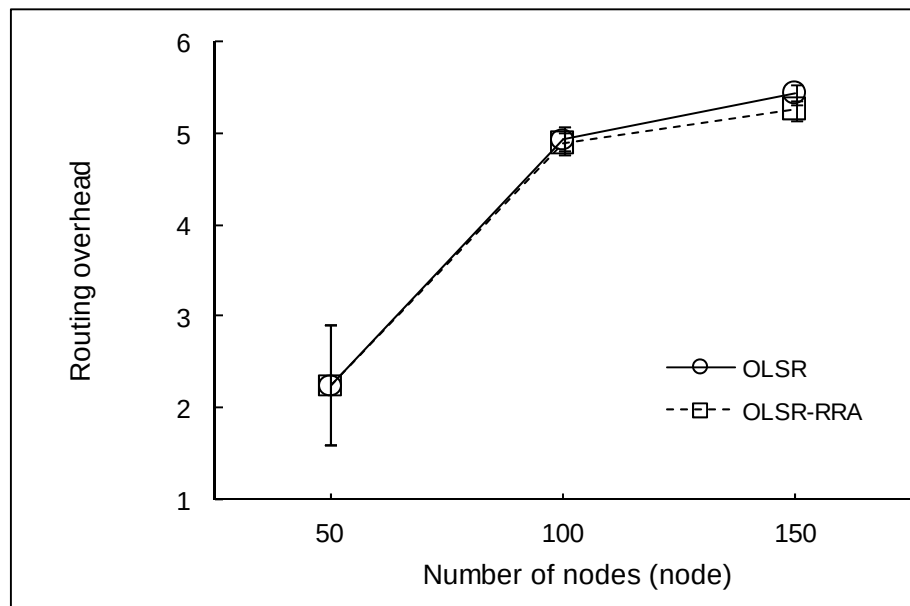


ภาพที่ 45 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตเกิดในการส่งข้อมูล เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 46 แสดงให้เห็นค่าของจำนวนแพ็คเก็ตที่ควบคุมที่ใช้ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อจำนวนโหนดในเครือข่ายหนาแน่นมากขึ้น จำนวนแพ็คเก็ตที่ควบคุมก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดลองนี้เมื่อพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น ค่าของทั้งสองโปรโตคอลยังมีส่วนที่ซ้อนทับกันอยู่ จึงไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัดว่าโปรโตคอล OLSR-RRA ใช้จำนวนแพ็คเก็ตที่ควบคุมน้อยกว่าโปรโตคอล OLSR โดยที่โปรโตคอล OLSR-RRA มีจำนวนแพ็คเก็ตที่ควบคุมที่คิดจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า OLSR เท่ากับ 0.22%, 1.04% และ 3.13% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 50, 100 และ 150 โหนดตามลำดับ จากผลที่ได้จากค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น โปรโตคอล OLSR-RRA มีประสิทธิภาพในการลดจำนวนแพ็คเก็ตที่ควบคุมได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

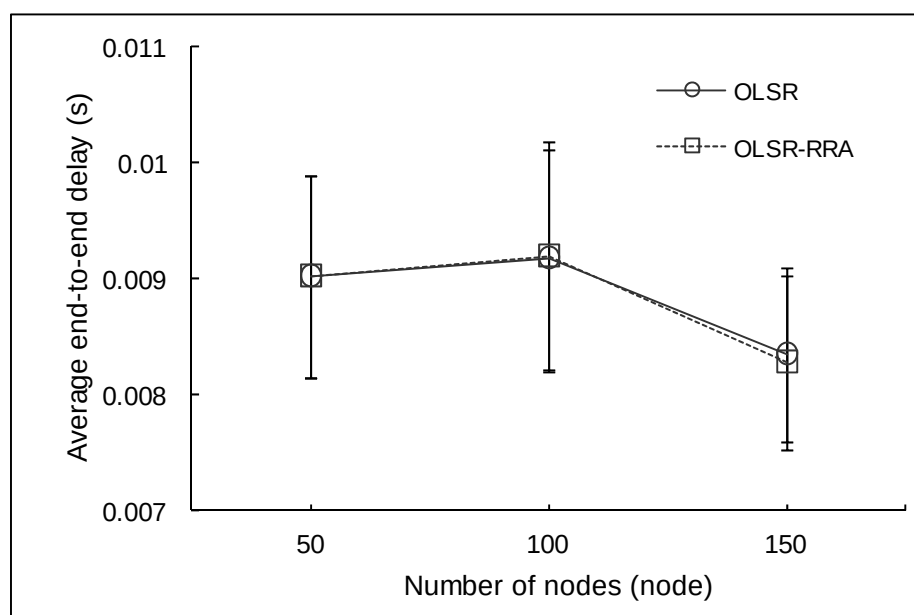


ภาพที่ 46 จำนวนแพ็คเกจควบคุม เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR



ภาพที่ 47 ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

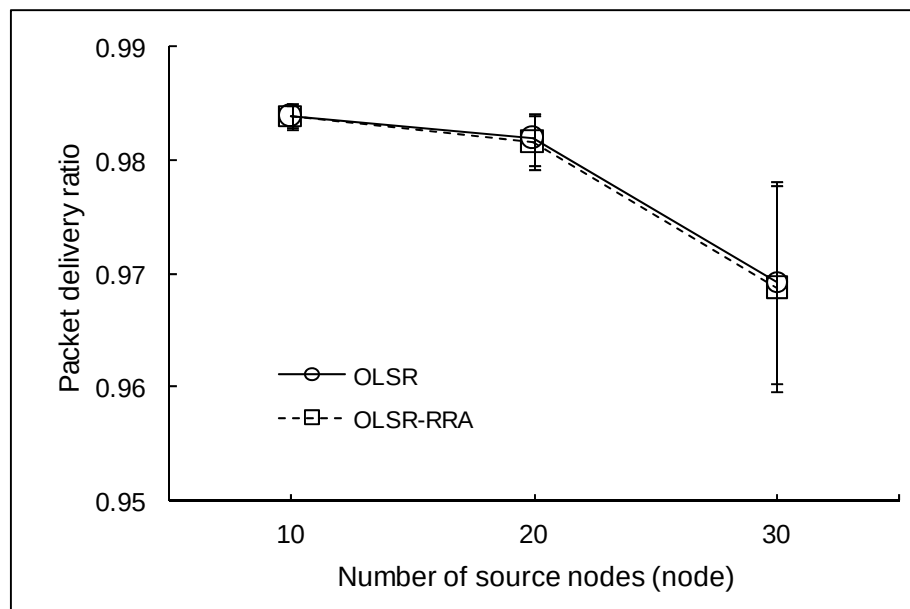
จากผลการทดลองภาพที่ 47 แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางมีแนวโน้มเดียวกับความสามารถในการลดจำนวนแพ็คเก็ตควบคุม คือโปรโตคอล OLSR-RRA สามารถลดค่าใช้จ่ายได้เพิ่มขึ้นเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น แต่จากช่วงความเชื่อมั่น ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางนั้นยังไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัดเช่นเคย จากค่าเฉลี่ยเราจะได้ว่าโปรโตคอล OLSR-RRA สามารถลดค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางได้น้อยกว่าโปรโตคอล OLSR เท่ากับ 0.15%, 1.05% และ 3.14% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 50, 100 และ 150 โหนดตามลำดับ



ภาพที่ 48 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเกิด เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 48 แสดงค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเกิดจากต้นทางไปยังยังปลายทางของโปรโตคอลการจัดเส้นทาง จากช่วงความเชื่อมั่นของโปรโตคอลทั้งสองมีค่าทับกันจึงไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัดว่าโปรโตคอลใดมีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเกิดน้อยกว่ากัน เมื่อใช้ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเกิดทำการพิจารณาได้ว่า ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 50 โหนด โปรโตคอล OLSR และ OLSR-RRA มีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเกิดเท่ากัน เท่ากับ 9.01 มิลลิวินาที ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 100 โหนด โปรโตคอล OLSR-RRA มีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตเกิดมากกว่าโปรโตคอล OLSR เท่ากับ 0.26% และ ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 150 โหนด

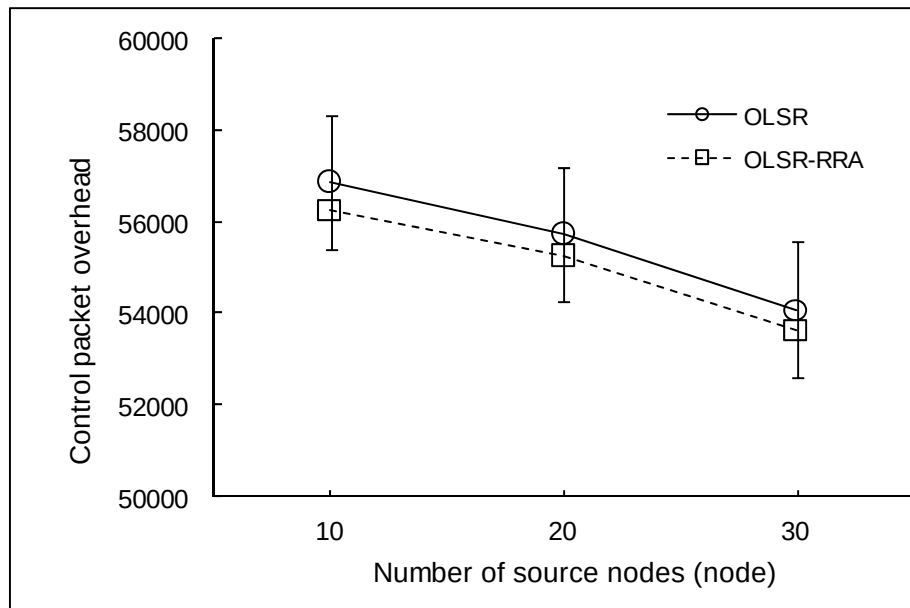
โพรโทคอล OLSR-RRA มีค่านี้น้อยกว่าโพรโทคอล OLSR เท่ากับ 0.72%



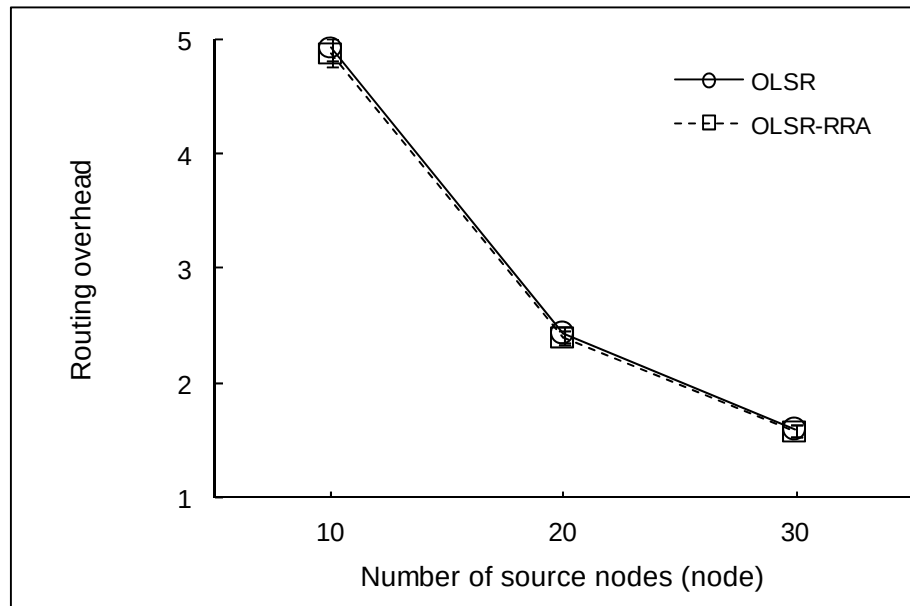
ภาพที่ 49 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจในการส่งข้อมูล เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 49 แสดงอัตราส่วนการได้รับข้อมูลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย จากผลการทดลองขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธี RRA ไม่สามารถทำให้เห็นความแตกต่างได้อย่างเด่นชัดในด้านของอัตราส่วนการได้รับข้อมูล ค่าอัตราส่วนการได้รับข้อมูลของโพรโทคอล OLSR-RRA มีค่ามากกว่า OLSR เท่ากับ 0.007% ที่จำนวนโหนดต้นทางเท่ากับ 10 โหนด และ ค่าอัตราส่วนการได้รับข้อมูลของโพรโทคอล OLSR-RRA มีค่าน้อยกว่า OLSR เท่ากับ 0.029% และ 0.062% ที่จำนวนโหนดต้นทางเท่ากับ 20 และ 30 โหนดตามลำดับ

จากผลการทดลองภาพที่ 50 แสดงให้เห็นค่าของจำนวนแพ็คเกจที่ควบคุมที่ใช้ จากกราฟเมื่อพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น ค่าของทั้งสองโพรโทคอลยังมีส่วนที่ซ้อนทับกันอยู่ จึงไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัดว่าโพรโทคอล OLSR-RRA ใช้จำนวนแพ็คเกจที่ควบคุมน้อยกว่าโพรโทคอล OLSR โดยที่โพรโทคอล OLSR-RRA มีจำนวนแพ็คเกจที่ควบคุมที่คิดจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า OLSR เท่ากับ 1.04%, 0.88% และ 0.83% ที่จำนวนโหนดต้นทางเท่ากับ 10, 20 และ 30 โหนดตามลำดับ

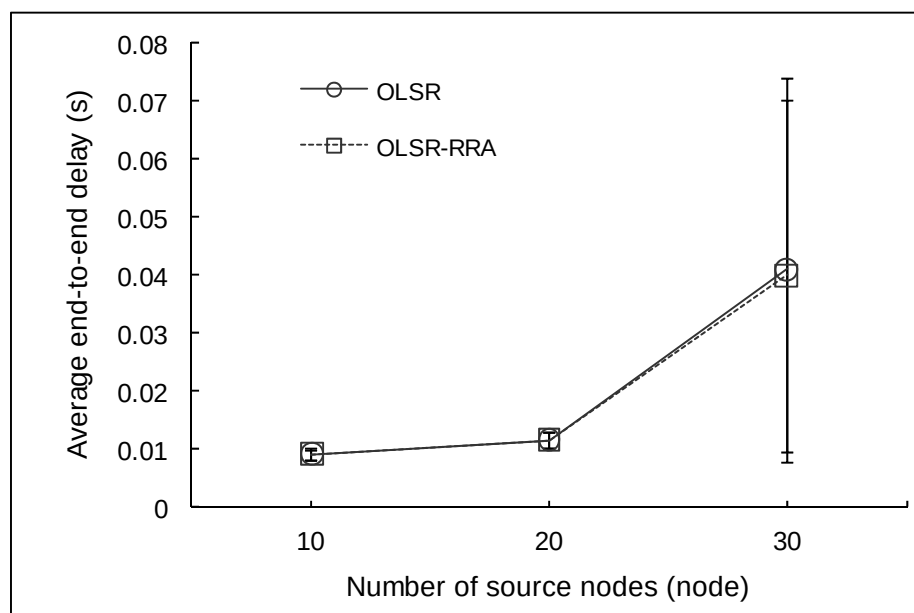


ภาพที่ 50 จำนวนแพ็คเกจควบคุม เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR



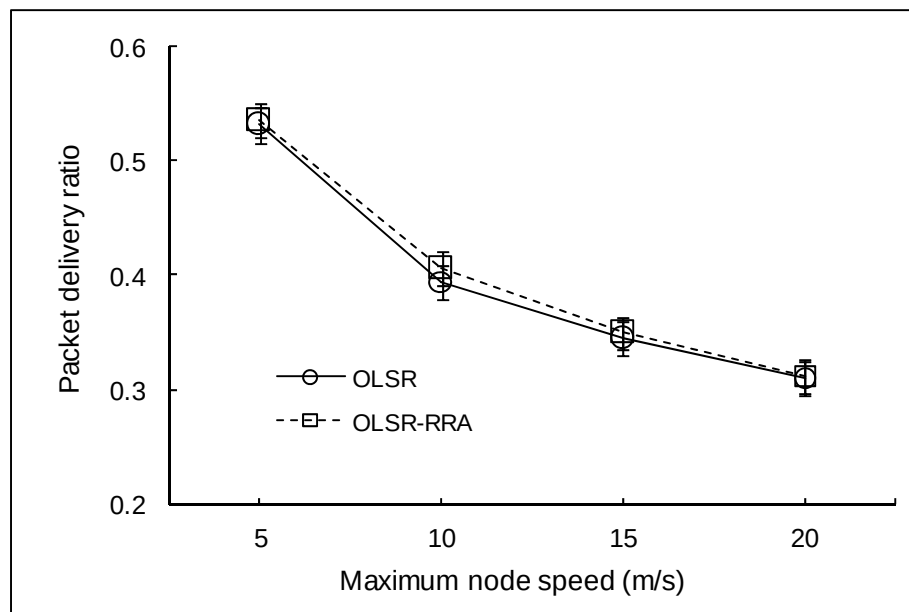
ภาพที่ 51 ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 51 แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางเมื่อมีจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลมากขึ้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางลดลง เมื่อพิจารณาจากช่วงความเชื่อมั่น ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางนั้นยังไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัด จากค่าเฉลี่ยเราจะได้ว่าโพรโทคอล OLSR-RRA สามารถลดค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปยังยังปลายทางได้น้อยกว่าโพรโทคอล OLSR เท่ากับ 1.05%, 0.85% และ 0.78% ที่จำนวนโหนดต้นทางเท่ากับ 10, 20 และ 30 โหนดตามลำดับ



ภาพที่ 52 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR

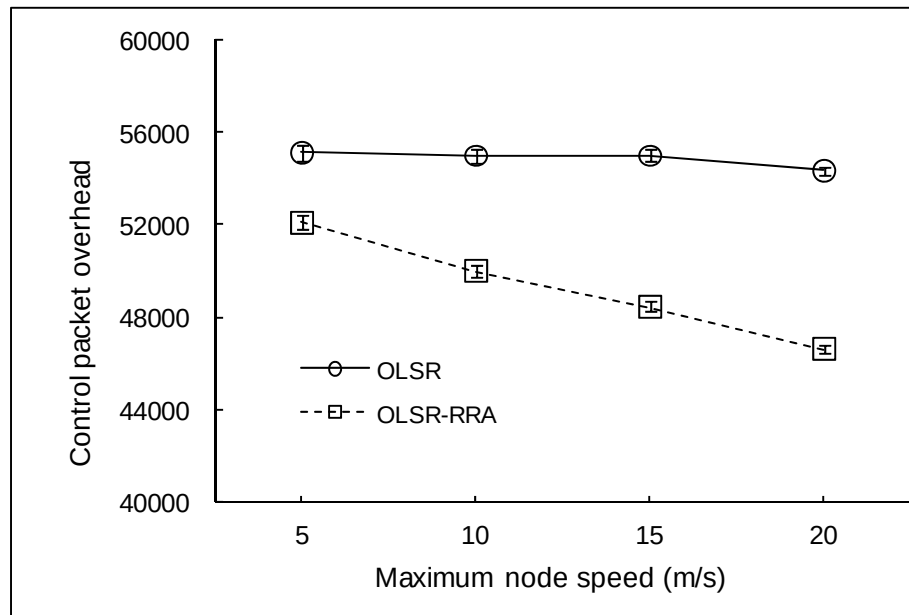
จากผลการทดลองภาพที่ 52 แสดงค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตจากต้นทางไปยังยังปลายทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง จากช่วงความเชื่อมั่นของโพรโทคอลทั้งสองมีค่าทับกันจึงไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัดว่าโพรโทคอลใดมีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตน้อยกว่ากัน เมื่อใช้ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตทำการพิจารณาได้ว่า ที่จำนวนโหนดต้นทางเท่ากับ 10 และ 20 โหนด โพรโทคอล OLSR-RRA มีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล OLSR เท่ากับ 0.256% และ 0.259% ตามลำดับ ที่จำนวนโหนดต้นทางเท่ากับ 30 โหนด โพรโทคอล OLSR-RRA มีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตน้อยกว่าโพรโทคอล OLSR เท่ากับ 2.56%



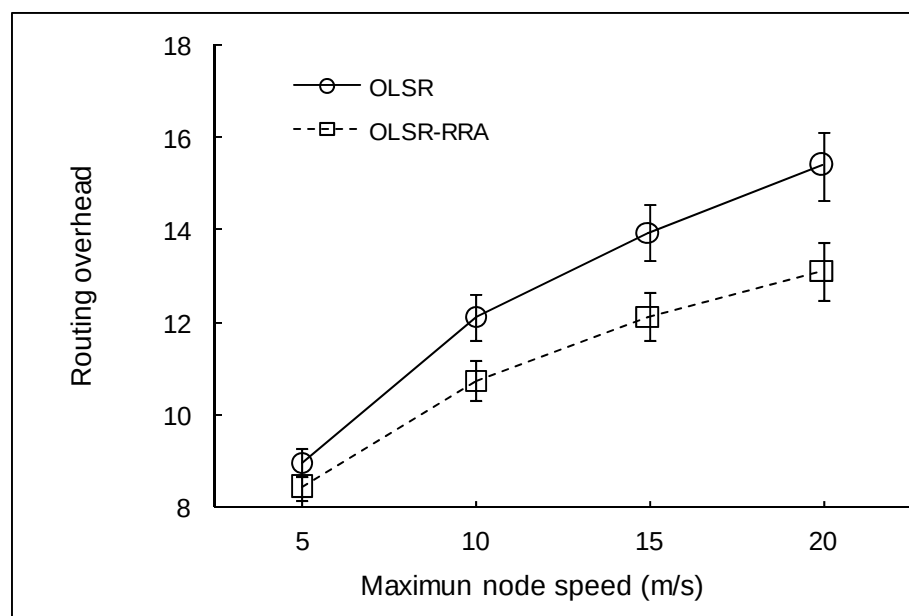
ภาพที่ 53 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจเกิดในการส่งข้อมูล เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนด ในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 53 แสดงอัตราส่วนการได้รับข้อมูลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูงสุดของโหนดในเครือข่าย จากผลการทดลองขั้นตอนวิธีการเลือกโหนดด้วยขั้นตอนวิธี RRA ไม่สามารถทำให้เห็นความแตกต่างได้อย่างเด่นชัดในด้านของอัตราส่วนการได้รับข้อมูล ค่าอัตราส่วนการได้รับข้อมูลของโปรโตคอล OLSR-RRA มีค่ามากกว่า OLSR เท่ากับ 0.73%, 2.93%, 1.34% และ 0.60% ที่ความเร็วสูงสุดของโหนดเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

จากผลการทดลองภาพที่ 54 แสดงให้เห็นค่าของจำนวนแพ็คเกจที่ควบคุมที่ใช้ จากกราฟเมื่อพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น ค่าของทั้งสองโปรโตคอลทั้งสองนั้นแยกออกจากกัน จึงสามารถชี้ชัดได้ว่าโปรโตคอล OLSR-RRA ใช้จำนวนแพ็คเกจควบคุมน้อยกว่าโปรโตคอล OLSR ในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดสูง เครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดด้วยความเร็วสูงจะทำให้ทอพอโลยีของเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ โหนดในเครือข่ายจึงจำเป็นต้องส่งแพ็คเกจควบคุมออกมาในปริมาณมากขึ้น ทำให้โปรโตคอล OLSR-RRA ที่เลือกโหนดในการส่งต่อแพ็คเกจน้อยกว่าสามารถลดจำนวนแพ็คเกจควบคุมลงได้ โดยที่โปรโตคอล OLSR-RRA มีจำนวนแพ็คเกจควบคุมที่คิดจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า OLSR เท่ากับ 5.44%, 9.06%, 11.89% และ 14.20% ที่ความเร็วสูงสุดของโหนดเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

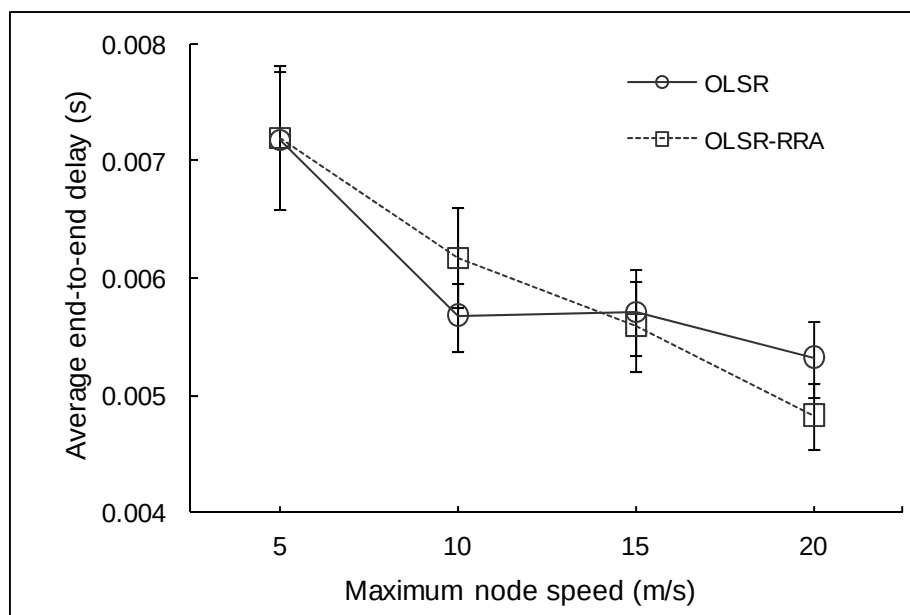


ภาพที่ 54 จำนวนแพ็คเกจควบคุม เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR



ภาพที่ 55 ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโปรโตคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 55 แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทางมีแนวโน้มเดียวกับความสามารถในการลดจำนวนแพ็คเก็ตควมคุม คือโพรโทคอล OLSR-RRA สามารถลดค่าใช้จ่ายได้เพิ่มขึ้นเมื่อเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง เมื่อพิจารณาช่วงความเชื่อมั่นที่ความเร็วสูงสุดของโหนดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที ค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทางนั้นยังไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัด แต่ค่าความเชื่อมั่นที่ความเร็วสูงสุดของโหนดเท่ากับ 10, 15 และ 20 เมตรต่อวินาที นั้นสามารถชี้ชัดได้ว่าโพรโทคอล OLSR-RRA สามารถลดค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลไปถึงยังปลายทางได้น้อยกว่าโพรโทคอล OLSR โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.15%, 1.05% และ 3.14% ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 50, 100 และ 150 โหนดตามลำดับ



ภาพที่ 56 ค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ต เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วสูงสุดของโหนดในการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงโพรโทคอลการหาเส้นทาง OLSR

จากผลการทดลองภาพที่ 56 แสดงค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตจากต้นทางไปถึงยังปลายทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง จากช่วงความเชื่อมั่นของโพรโทคอลทั้งสองมีค่าทับกันจึงไม่สามารถบ่งชี้ได้เด่นชัดว่าโพรโทคอลใดมีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตน้อยกว่ากัน เมื่อใช้ค่าเฉลี่ยของค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตทำการพิจารณาได้ว่า ที่ความเร็วสูงสุดของโหนดเท่ากับ 5 และ 10 เมตรต่อวินาที โพรโทคอล OLSR-RRA มีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตมากกว่าโพรโทคอล OLSR เท่ากับ 0.26% และ 8.98% ตามลำดับ ที่ความเร็วสูงสุดของโหนดเท่ากับ

15 และ 20 เมตรต่อวินาที โพรโทคอล OLSR-RRA มีค่าหน่วงเวลาของการส่งแพ็คเก็ตน้อยกว่าโพรโทคอล OLSR เท่ากับ 2.19% และ 9.33%

วิจารณ์

งานวิจัยที่เสนอเป็นการพัฒนาโพรโทคอลที่ใช้ในการแพร่สัญญาณ โดยทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีใหม่ในการเลือกโหนดเพื่อใช้ในการส่งต่อแพ็คเก็ตในเครือข่าย และทำการวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักคือ การวิเคราะห์ด้วยค่าทางคณิตศาสตร์ การทดลองบนโพรโทคอลการแพร่สัญญาณ และการทดลองบนโพรโทคอลการจัดเส้นทาง แล้วทำการวัดค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเราสนใจในด้านการลดจำนวนโหนดของการแพร่สัญญาณลงแล้วยังคงสามารถทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเหมือนเช่นเดิม จากผลการทดลองเบื้องต้น เราสามารถนำมาวิจารณ์ได้ดังนี้

การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี RRA เนื่องจากการทดลองนี้เป็นโปรแกรมจำลองเครือข่ายอย่างง่ายเพื่อวิเคราะห์ค่าทางคณิตศาสตร์เท่านั้น ผลที่ได้จากการทดลองนี้จึงเป็นผลเบื้องต้นเพื่อช่วยยืนยันว่าขั้นตอนวิธี RRA สามารถที่จะเลือกโหนดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR จากผลการทดลองเราจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความสมบูรณ์ กล่าวคือเมื่อมีการส่งสัญญาณออกไปโหนดที่อยู่โดยรอบจะได้รับสัญญาณนั้น โดยไม่เกิดการชนกันของสัญญาณ ทำให้ทุกโพรโทคอลสามารถที่จะส่งแพ็คเก็ตได้ถึงทุกโหนดในเครือข่ายถ้าโหนดในเครือข่ายไม่แยกออกจากกัน ค่าโหนดที่ทำการส่งต่อที่ได้ของขั้นตอนวิธีละโมบ ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR รวมถึงขั้นตอนวิธี RRA นั้น เปรียบเสมือนได้กับโหนดที่ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อเป็นโครงข่ายในการส่งแพ็คเก็ตไปยังทุกโหนดในเครือข่าย จากการทดลองนี้เราสามารถสรุปได้ว่า วิธีการเลือกโหนดของขั้นตอนวิธี RRA สามารถเลือกโหนดในการส่งต่อได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR และขั้นตอนวิธีละโมบ เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมปิด

การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการแพร่สัญญาณในการทดลองนี้ได้เลือกโพรโทคอลการแพร่สัญญาณแบบต่างๆ มาใช้ในการทดลองและกำหนดรูปแบบเครือข่ายในการทดลองตามแบบการทดลองของ Williams and Camp (2002) ที่ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการแพร่สัญญาณแบบต่างๆ โดยค่าที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดลองของ Williams and Camp ถึงแม้ว่าจะใช้โปรแกรมจำลอง

เครือข่ายที่แตกต่างกันก็ตามที ในการทดลองเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่ายนั้นเพื่อใช้วัดประสิทธิภาพการทำงานบนเครือข่ายที่มีความหนาแน่นสูง แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า โพรโทคอลที่เลือกโหนดในการส่งต่อเมื่อมีความคับคั่งของโหนดสูงจะเกิดการชนกันของสัญญาณวิทยุจากแพ็คเก็ตข้อมูล กับแพ็คเก็ตที่ตกหาย ส่งผลให้ผลที่ได้จากการทดลองแรก โพรโทคอล AHBP และ RRB มีค่าความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็คเก็ตที่ต่ำกว่าโพรโทคอลอื่นๆ อย่างไรก็ตามโพรโทคอล RRB ก็สามารถแพร่สัญญาณด้วยจำนวนโหนดที่ถูกเลือกน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการแพร่สัญญาณแบบเชิงจำกัดอื่นๆ ในการทดลอง ในเครือข่ายที่มีการส่งแพ็คเก็ตมากขึ้นการทำงานของโพรโทคอลการแพร่สัญญาณแบบเชิงจำกัด จะมีการทำงานที่ดีขึ้นเนื่องจากสามารถลดจำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตได้น้อยลง ต่างจากการทำงานของสัญญาณโดยวิธีการ flooding ที่ก่อให้เกิดการชนกันของสัญญาณอย่างมากจึงทำค่าต่างๆ ในการทำงานมีค่าที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยโพรโทคอล RRB-SB มีความสามารถในการส่งแพ็คเก็ตไปถึงยังปลายทางได้มากที่สุดเนื่องจากมีการลดจำนวนโหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตเพื่อลดความคับคั่งของข้อมูลและมีการตรวจสอบการได้รับแพ็คเก็ตในส่วนของการหน่วงเวลา การทดลองเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีนั้นมีผลกระทบต่อการทำงานของโพรโทคอลที่เลือกโหนดในการส่งอย่างมาก แต่เป็นรูปแบบเครือข่ายที่เหมาะสมกับการทำงานของการแพร่สัญญาณโดยวิธีการ flooding และวิธีการที่ใช้ค่าหน่วงเวลาช่วยพิจารณา จากการทดลองจะเห็นว่าโพรโทคอล RRB-SB สามารถที่จะรองรับการทำงานในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ในระดับหนึ่งจากการทำงานของโพรโทคอล RRB-SB ในส่วนที่ใช้การหน่วงเวลา แต่การทำงานในรูปแบบนี้ได้อีกก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการหน่วงเวลาในการส่งแพ็คเก็ตจากต้นทางไปยังปลายทางอย่างมาก

การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OLSR นั้น เนื่องจากโพรโทคอล OLSR ใช้ขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนดแบบ MPR โพรโทคอล OLSR-RRA จึงเป็นการนำขั้นตอนวิธี RRA มาทดลองใช้ในโพรโทคอลการทำงานจริงอย่างการจัดเส้นทาง ในการทดลองเปลี่ยนจำนวนโหนด ขณะที่โหนดมีจำนวน 50 โหนดเนื่องจากการที่เรากำหนดค่าในการวางโหนดเป็นแบบ RANDOM จึงทำให้เกิดการไม่เชื่อมต่อกันของเครือข่าย จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่โหนดเท่ากับ 50 โหนด ค่าความเชื่อมั่นมีช่วงกว้างอย่างมาก และจากการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าจำนวนโหนดต้นทางที่ทำการส่งแพ็คเก็ตเป็น 30 โหนดแล้วนั้น ค่าความหน่วงเวลาในการทดลองมีค่าความเชื่อมั่นกว้างเนื่องจากการชนกันของแพ็คเก็ตและเกิดการแย่งช่องสัญญาณนั่นเอง จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพที่วัดได้มีค่าแกว่งในวงกว้าง จากผลการทดลองจะเห็นว่าโพรโทคอล OLSR-RRA นั้นมีการทำงานได้ใกล้เคียงกับการทำงานของโพรโทคอล OLSR แบบเดิมอย่างมาก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการเลือกโหนดเพื่อนบ้านในการส่งต่อแพ็คเก็ตในการแพร่สัญญาณให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป เนื่องมาจากการทำงานของการแพร่สัญญาณโดยวิธี flooding นั้นก่อให้เกิดปัญหาในเครือข่ายที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกัน จึงมีผู้เสนอวิธีการที่ใช้ความรู้จักโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปมาเพื่อเลือกโหนดในการแพร่สัญญาณ จากการศึกษาขั้นตอนวิธีดังกล่าวทำให้พบว่าขั้นตอนวิธีดังกล่าวยังไม่สามารถที่จะเลือกโหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ยังมีกรณีที่ขั้นตอนวิธีการเลือกโหนด MPR ได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เราจึงได้ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการเลือกโหนดแบบใหม่ขึ้นมา และทำการทดสอบผลเบื้องต้นด้วยการจำลองเครือข่ายแบบง่าย จากการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนวิธี RRA นั้นสามารถที่จะลดจำนวนโหนดที่เลือกในการแพร่สัญญาณได้ลงจากขั้นตอนการเลือกโหนด MPR และยังคงส่งข้อมูลไปถึงยังทุกโหนดในเครือข่ายอีกด้วย จากการสังเกตพบว่าเมื่อโหนดในเครือข่ายมีความหนาแน่นมากขึ้นขั้นตอนวิธี RRA จะยังสามารถที่ลดจำนวนโหนดในเครือข่ายลงได้มากขึ้น

เมื่อเราได้ทำการพิสูจน์หลักการทำงานของขั้นตอนวิธี RRA แล้วนั้นเราจึงได้นำขั้นตอนวิธีดังกล่าวมาประยุกต์กับโปรโตคอลการแพร่สัญญาณ จากการทดลองเห็นได้ว่าโปรโตคอล RRB ที่ทำงานบนพื้นฐานเดียวกับโปรโตคอล AHBP สามารถที่จะลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณได้มากขึ้นกว่าการทำงานของโปรโตคอล AHBP และ โปรโตคอล RRB-SB ที่ใช้พื้นฐานเดียวกับโปรโตคอล SBA ก็สามารถลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการแพร่สัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับโปรโตคอล SBA แต่โปรโตคอล RRB ยังมีปัญหาในด้านความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็คเก็ตไปถึงยังปลายทางในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า โปรโตคอล RRB สามารถลดจำนวนโหนดในการแพร่สัญญาณได้ และทำงานได้ดีในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของแพ็คเก็ตสูง รวมทั้งเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดสูง โปรโตคอล RRB-SB สามารถลดจำนวนโหนดในการแพร่สัญญาณได้ต่ำกว่า SBA แต่ยังมีปัญหาของการหน่วงเวลาเมื่อโหนดมีการเคลื่อนที่

ขั้นตอนสุดท้ายเราได้ทำการทดลองนำขั้นตอนวิธี RRA มาใช้กับปัญหาที่ใหญ่กว่านั้นคือนำมาใช้กับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OLSR จากผลการทดลองขั้นตอนวิธี RRA ไม่สามารถลดจำนวนแพ็คเก็ตควบคุมได้มากอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเครือข่ายเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น หรือเปลี่ยนแปลงความคับคั่งของเครือข่ายก็ตาม โพรโทคอล OLSR-RRA ที่ใช้ขั้นตอนวิธี RRA จะสามารถลดจำนวนแพ็คเก็ตควบคุมได้อย่างมีนัยสำคัญต่อเมื่อเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูง ทำให้ต้องส่งแพ็คเก็ตควบคุมออกมาในจำนวนมาก โพรโทคอล OLSR-RRA จะใช้โหนดในการส่งต่อแพ็คเก็ตที่น้อยกว่าจึงทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการแพร่สัญญาณได้ดีกว่านั่นเอง

ข้อเสนอแนะ

ทำการปรับปรุงหาค่าช่วงเวลาในการส่งแพ็คเก็ตที่ทักทายที่เหมาะสม ในการเก็บข้อมูลเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอป หรือทำการปรับเปลี่ยนค่าช่วงเวลาในการส่งแพ็คเก็ตที่ทักทายไปตามสถานะของเครือข่ายในเวลานั้นๆ จากการที่โพรโทคอล RRB-SB มีปัญหาทางด้านการหวนเวลา ควรหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสม หรือทำการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานของ RRB-SB ใหม่เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของแพ็คเก็ตสูง และเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีสูงด้วย สุดท้ายควรนำขั้นตอนวิธี RRA ไปประยุกต์กับงานทางด้านอื่นหรือในแนวทางอื่น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Bilgin, F. 2004. **Development of New Broadcast Protocols in a Mobile Ad Hoc Network Based on Machine Learning.** Master of Science thesis, Colorado School of Mines.
- Clausen, T., P. Jacquet, A. Laouiti, P. Muhlethaler, A. Qayyum and L. Viennot. 2001. Optimized Link State Routing Protocol, *In IEEE INMIC* . Pakistan.
- Clausen, T. and P. Jacquet. 2003. **Optimized Link State Routing Protocol (OLSR).** Available Source: <http://hipercom.inria.fr/olsr/rfc3626.txt>, September 23, 2004.
- Clausen, T., C. Dearlove and P. Jacquet. 2006. **The Optimized Link-State Routing Protocol version 2.** Available Source: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-olsrv2-02>, September 30, 2006.
- Haas, Z. J., J. Y. Halpern and L. Li. 2002. Gossip-based ad hoc routing, *In IEEE INFOCOM* .
- Haas, Z. J., M. R. Pearlman and P. Samar. 2002. **The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks.** Available Source: <http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt>, August 25, 2004.
- Jacquet, P., P. Mühlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum and L. Viennot. 2001. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks, *In the 5th IEEE Multi Topic Conference (INMIC 2001).*
- Jetcheva, J., Y. Hu and D. Maltz. 2001. **A Simple Protocol for Multicast and Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks.** Available Source: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-simple-mbcast-01>, June 5, 2004.

- Jiang, M., J. Li and Y.C. Tay. 1999. **Cluster Based Routing Protocol (CBRP)**. Available Source: <http://www.comp.nus.edu.sg/~tayyc/cbrp/draft-ietf-manet-cbrp-spec-01.txt>, June 5, 2004.
- Johnson, D. B., D. A. Maltz, C. Mellon and Y. Hu. 2003. **The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)**. Available Source: <http://www3.ietf.org/proceedings/04mar/I-D/draft-ietf-manet-dsr-09.txt>, June 5, 2004.
- Laouiti, A., P. Muhlethaler, A. Najid and E. Plakoo. 2002. Simulation Results of the OLSR Routing Protocol for Wireless Network, *In 1st Mediterranean Ad-Hoc Networks workshop (Med-Hoc-Net)* . Sardegna, Italy.
- Lim, H. and C. Kim. 2000. Multicast Tree Construction and Flooding in Wireless Ad Hoc Networks, pp. 61-68. *In the ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*.
- Lou, W. and J. Wu. 2002. On Reducing Broadcast Redundancy in Ad Hoc Wireless Networks, pp. 111-122. *In IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- Niigata University. 2005. **OLSR-Niigata**. OLSR. Available Source: <http://www.net.ie.niigata-u.ac.jp/mase/olsr-e.php>, May 30, 2005.
- Peng, W. and X. Lu. 1999. Efficient Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks Using Connected Dominating Sets. **Journal of Software - Beijing**.
- Peng, W. and X. Lu. 2000. On the Reduction of Broadcast Redundancy in Mobile Ad Hoc Networks, *In MOBIHOC* .
- Peng, W. and X. Lu. 2002. AHBP: An Efficient Broadcast Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. **Journal of Science and Technology - Beijing**.

Perkins, C. E. and P. Bhagwat. 1994. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector (DTDV) for Mobile Computers, pp. 234-244. *In the SIGCOMM 1994 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications.*

Perkins, C.E. 2001. **AD HOC NETWORKING.** Addison-Wesley, USA.

Perkins, C.E. 2003. **Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing.** Available Source: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, June 5, 2005.

Poola, S. 2004. **Advanced Topics in Distributed Systems Broadcasting Algorithms in Mobile Ad Hoc Networks.** 17.

Poola, S. and J. Hahner. 2004. Broadcast Algorithms in Mobile Ad Hoc Networks, *In INFOTECH.*

Qayyum, A., L. Viennot and A. Laouiti. 2002. Multipoint relaying for Flooding Broadcast Message in Mobile Wireless Networks, p. 3898–3907. *In 35th Hawaii Int’l Conf. on System Sciences (HICSS-35).*

Saikat, R., C. Jeffrey and S. David. 2003. RTS/CTS-induced Congestion in Ad-Hoc Wireless LANs, pp. 1516-1521. *In IEEE WCNC.*

Stojmenovic, I. and J. Wu. 2004. Broadcasting and Activity Scheduling in Ad Hoc Networks. **Mobile Ad Hoc Networking** : 205-229.

Terwilliger, M. and R. A. Meyer. 2001a. **GloMoSim: Global Mobile Information Systems Simulation Library.** About GloMoSim. Available Source: <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim>, August 10, 2004.

- Terwilliger, M. and R. A. Meyer. 2001b. **PARSEC: Parallel Simulation Environment for Complex System.** UCLA Parsec Programming Language. Available Source: <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/parsec>, August 10, 2004.
- Tseng, Y., S. Ni, Y. Chen and J. Sheu. 2002. The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. **Wireless Networks** (8): 153-167.
- Tseng, Y., S. Ni and E. Shih. 2003. Adaptive Approaches to Relieving Broadcast Storms in a Wireless Multihop Mobile Ad Hoc Network. **IEEE Transactions on Computers** 52 (5): 545-557.
- Williams, B. and T. Camp. 2002. Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks, pp. 194-205. *In the ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC).*
- Zeng, X., R. Bagrodia and M. Geria. 1998. GloMoSim: A Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks, *In the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulations.*

ภาคผนวก

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายไตรวิช วงศ์สัมมาชีพ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 กุมภาพันธ์ 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-