



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

ปริญญา

วิทยาการคอมพิวเตอร์

วิทยาการคอมพิวเตอร์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การลดค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ ด้วยการกระจายแพ็คเก็ตทุกทิศทางแบบอาศัยระยะทาง

Distance Based Flooding for Reducing AODV Routing Overhead in Mobile Ad Hoc Networks

นามผู้วิจัย นางสาวสุกัญญา จิวสกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริกร จันทร์นวล, M.Sc.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การลดค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจด้วยการ
กระจายแพ็คเก็ตทุกทิศทางแบบอาศัยระยะทาง

Distance Based Flooding for Reducing AODV Routing Overhead in Mobile Ad Hoc Networks

โดย

นางสาวสุกัญญา จิวสกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุกัญญา จิวสกุล 2557: การลดค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจด้วยการกระจายแพ็คเก็ตทุกทิศทางแบบอาศัยระยะทาง
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์) สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์
ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์, Ph.D. 72 หน้า

เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ (MANET) เป็นเครือข่ายที่โหนดสามารถสื่อสารกันได้ทันทีที่อยู่ในรัศมีการแพร่สัญญาณ โดย AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจแบบตามต้องการที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ที่อาศัยเทคนิคการส่งแพ็คเก็ตแบบกระจาย (broadcasting) หรือ flooding ยังคงเป็นปัญหาสำคัญและควรได้รับการแก้ไข

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF (AODV-Distance Based Flooding) ที่ได้นำกลไกการดักฟังความแรงสัญญาณ (received power) จาก RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านมาช่วยลดค่าใช้จ่ายในเครือข่ายที่มีความถี่ของการค้นหาเส้นทางมากกว่า 1 ครั้ง โดยไม่กระทบต่อความเร็วในการค้นหาเส้นทาง

เพื่อนำเสนอผลการทดลอง งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS3 (Network Simulator 3) ในการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ AODV-DBF กับ AODV ที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS (Expanding Ring Search) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่โหนดเคลื่อนที่ตลอดเวลา AODV-DBF จะมีอัตราการรับแพ็คเก็ตข้อมูลสูงกว่า AODV ประมาณ 1.99 เท่าและ 1.29 เท่า และใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางน้อยกว่า AODV ประมาณ 0.66 เท่าและ 0.97 เท่า สำหรับกรณี flooding และ ERS ตามลำดับ

Sukanya Jewsakul 2014: Distance Based Flooding for Reducing AODV Routing Overhead in Mobile Ad Hoc Networks. Master of Science (Computer Science), Major Field: Computer Science, Department of Computer Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Chavalit Srisathapornphat, Ph.D. 72 pages.

A wireless mobile ad hoc network (MANET) is a collection of mobile nodes that can communicate immediately when they are in each other's transmission range. AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) is a reactive wireless ad hoc routing protocol that has been studied and developed continuously. However, a routing overhead of AODV's route discovery process based on flooding technique is a serious problem and should be improved.

This research proposes AODV-DBF (AODV-Distance Based Flooding) routing protocol which reduces routing overhead in the case of frequently route discovery process over AODV by overhearing received power information when neighbors broadcast RREQ without any routing delay.

To present the experimental results, this research uses NS3 (Network Simulator 3) to simulate and compare the efficiency of AODV-DBF and AODV with flooding and ERS (Expanding Ring Search). The experimental results show in the case of continuously moving nodes, AODV-DBF improves packet delivery ratio by 1.99 and 1.29 times compared to AODV and reduces end-to-end delay by 0.66 and 0.97 times compared to AODV with flooding and ERS, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไข
วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุชุมล กิติสิน และ
อ.ดร.เสฏฐวิทย์ เกิดผล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และมอบความช่วยเหลือในการจัดทำ
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง และขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วัสกา วิสุทธีวิเศษ ที่ได้กรุณาให้
คำแนะนำเกี่ยวกับการวิจัยเพื่อพัฒนาให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน
มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้พัฒนาตนเองและสังคมต่อไป ขอขอบคุณ
ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ที่มอบโอกาสและทุนการศึกษา ตลอดจน
สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบุคลากร เพื่อนๆ และพี่ๆ
โครงการปริญญาโททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษาและให้
กำลังใจเสมอมา

สุกัญญา จิวสกุล
มิถุนายน 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
วิธีการ	20
ผลและวิจารณ์	36
ผล	36
วิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	72

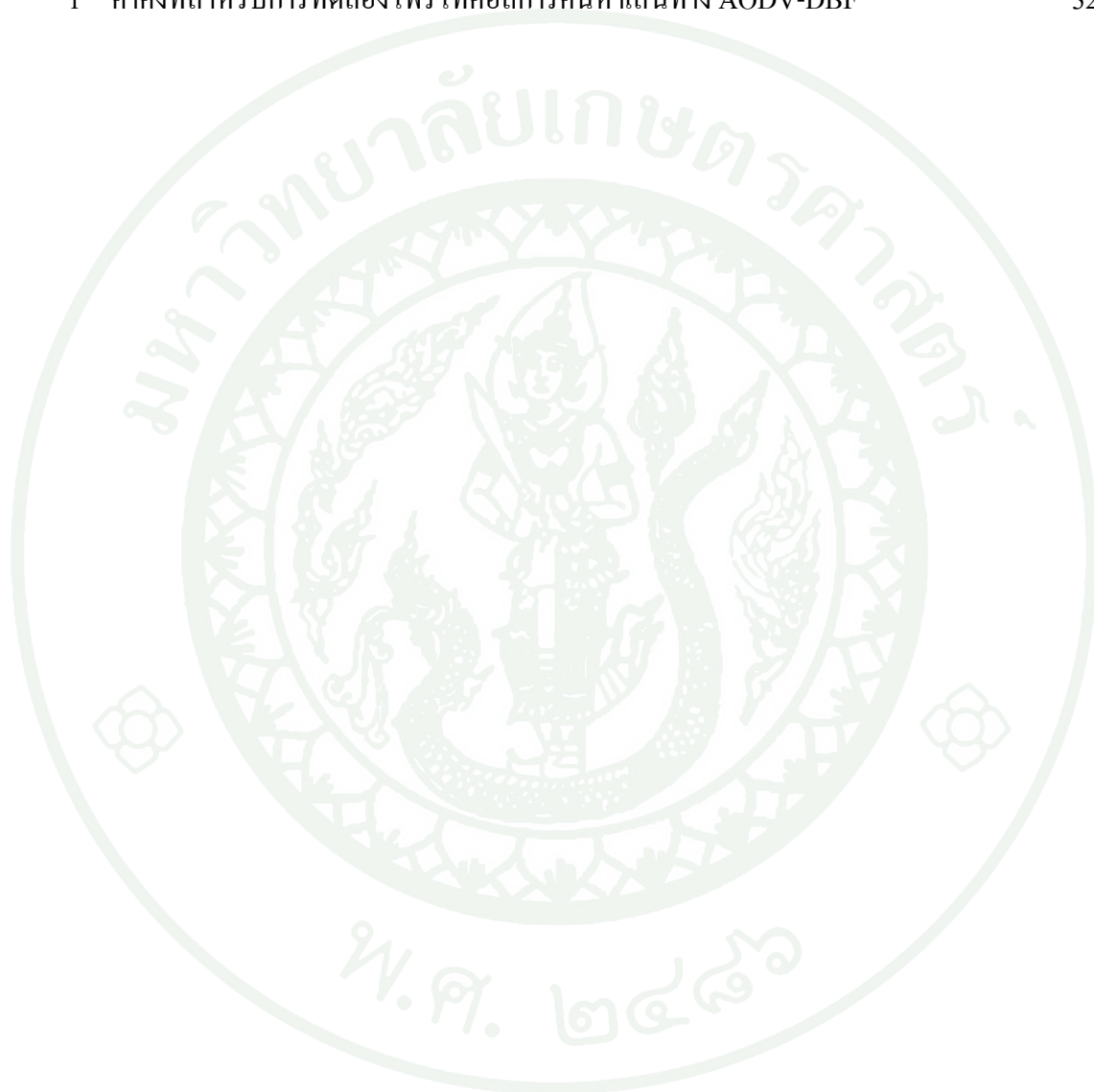
สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1 ค่าคงที่สำหรับการทดลองโปรโตคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF

32



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ตัวอย่างเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ	4
2 แบบจำลองเหตุการณ์แถวคอยในธนาคารแห่งหนึ่ง	9
3 การส่ง RREQ ใน AODV-BBS	17
4 การเปรียบเทียบโครงสร้าง RREQ	21
5 วิธีการจัดการเขตข้อมูล previous node IP address และ previous node received power ขณะรับ RREQ ใน AODV-DBF	22
6 โครงสร้างและการจัดการตารางข้อมูลกำลังสัญญาณใน โพรโทคอล AODV-DBF	23
7 การอนุมานระยะทางระหว่างโหนด	24
8 ขั้นตอนวิธีของโพรโทคอล AODV-DBF	26
9 กลไกการดักฟัง RREQ ใน AODV-DBF	28
10 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	37
11 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	37
12 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	38
13 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	40
14 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	41
15 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	44
17	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด	45
18	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	46
19	ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	47
20	เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	48
21	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	49
22	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	50
23	ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	51
24	เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	52
25	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจข้อมูลของ โหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	54
27	ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	55
28	เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	56
29	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	57
30	อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจข้อมูลของ โหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	58
31	ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	59
32	เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	60
33	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของ โหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที	61

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AODV	=	Ad hoc On demand Distance Vector
ERS	=	Expanding Ring Search
DBF	=	Distance Based Flooding
MANETs	=	Mobile Ad hoc NETworks
WLANs	=	Wireless Local Area Networks
RREQ	=	Route REQuest
RREP	=	Route REPLY
RERR	=	Route ERRor
NS3	=	Network Simulator 3
DES	=	Discrete Event Simulation
TTL	=	Time To Live

การลดค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ ด้วยการกระจายแพ็คเก็ตทุกทิศทางแบบอาศัยระยะทาง

Distance Based Flooding for Reducing AODV Routing Overhead in Mobile Ad Hoc Networks

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่มีประสิทธิภาพ เช่น ระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless Local Area Networks) หรือเรียกโดยย่อว่า WLANs มีความก้าวหน้า และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อุปกรณ์พกพาแบบไร้สาย เช่น โทรศัพท์มือถือ (mobile phone) แท็บเล็ต (tablet) คอมพิวเตอร์พกพา (laptop) ฯลฯ ถูกพัฒนาให้มีความทันสมัย และสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตามเครือข่ายไร้สายท้องถิ่นยังคงเป็นเครือข่ายที่ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐาน เช่น จุดเชื่อมต่อ (access point) มารองรับ ส่งผลให้เครือข่ายประเภทนี้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งค่อนข้างสูง และไม่เหมาะสำหรับผู้ใช้งานที่ต้องการเชื่อมต่อเครือข่ายเพียงชั่วคราว ด้วยเหตุนี้ระบบเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจจึงถูกพัฒนาขึ้น ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้แม้ไม่มีโครงสร้างรองรับ และถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในขอบเขตของทางทหาร การช่วยเหลือกู้ภัย การศึกษา และงานวิจัยเชิงวิชาการเป็นต้น

เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจเป็นเครือข่ายที่กลุ่มของ โหนด (node) สามารถสื่อสารผ่านสัญญาณวิทยุ (wireless link) ได้โดยตรงด้วยลักษณะการส่งข้อมูลแบบหลายฮอปกล่าวคือ โหนดในเครือข่ายจะมีขอบเขตการแพร่สัญญาณ (transmission range) อย่างจำกัด ในกรณีที่โหนดปลายทางไม่อยู่ในขอบเขตการส่งสัญญาณของโหนดต้นทาง โหนดเหล่านี้จะต้องอาศัยโหนดระหว่างทางหลายโหนดช่วยส่งผ่านข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการ ดังนั้นแต่ละโหนดในเครือข่ายจึงไม่เพียงทำหน้าที่เป็น โฮสต์ (host) เท่านั้น แต่โหนดเหล่านี้ยังคงต้องทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง (router) ให้กับโหนดอื่นๆในเครือข่ายอีกด้วย อย่างไรก็ตามโหนดต้นทางสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ก็ต่อเมื่อทราบเส้นทางที่สามารถใช้ในการลำเลียงข้อมูลไปยังปลายทางได้เท่านั้น ด้วยเหตุนี้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำข้อมูลเส้นทางที่ค้นพบไปใช้ในกระบวนการส่งแพ็คเก็ตข้อมูล (data packet)

ในปัจจุบันโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบตามต้องการ (on demand routing protocol) จำนวนมากได้นำวิธีการส่งแพ็คเก็ตแบบกระจายทุกทิศทาง (flooding หรือ broadcasting) มาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง (route discovery) เพื่อให้ทุกโหนดในขอบเขตการแพร่สัญญาณได้รับและส่งต่อ (rebroadcast) แพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง (route request packet) ไปยังโหนดปลายทางได้ อย่างไรก็ตามวิธีการกระจายแพ็คเก็ตทุกทิศทางเป็นวิธีที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่าย (overhead) ในเครือข่ายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกรณีที่มีโหนดอยู่ในเครือข่ายอย่างหนาแน่น (dense network) ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวิธีการลดจำนวนแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางด้วยวิธีการต่างๆ เช่น วิธีการส่งแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางด้วยความน่าจะเป็น (probabilistic broadcasting) และวิธีการควบคุมพื้นที่การกระจายแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง (ERS: expanding ring search)

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิจัยเพื่อลดจำนวนโหนดที่เข้าร่วมในกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) ด้วยการนำกลไกการดักฟังข้อมูลความแรงสัญญาณของโหนดเพื่อนบ้านมาช่วยลดค่าใช้จ่ายในเครือข่ายที่มีความถี่ของการค้นหาเส้นทางมากกว่า 1 ครั้งและรักษาโอกาสที่แพ็คเก็ตข้อมูลจะไปถึงโหนดปลายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องอาศัยการหน่วงเวลา เรียกโพรโทคอลใหม่นี้ว่าโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF (AODV-Distance Based Flooding) การทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS3 เพื่อจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ AODV-DBF กับ AODV ที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนด จำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดที่แตกต่างกัน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในด้านการลดค่าใช้จ่ายจากการค้นหาเส้นทาง โดยไม่มีผลกระทบต่อความเร็วในการค้นหาเส้นทาง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ขั้นตอนวิธีใหม่สามารถลดค่าใช้จ่ายและจำนวนโหนดที่เข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ขั้นตอนวิธีใหม่สามารถเลือกโหนดที่ไกลที่สุดได้โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ค้นหาตำแหน่ง เช่น Global Positional System (GPS)

ขอบเขตและข้อจำกัด

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเครือข่ายที่สร้างจากโปรแกรมจำลองเครือข่าย
2. โหนดในเครือข่ายมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกันทุกประการ รวมถึงกำลังของการส่งสัญญาณที่แต่ละโหนดใช้สำหรับส่งทุกแพ็คเก็ตข้อมูล

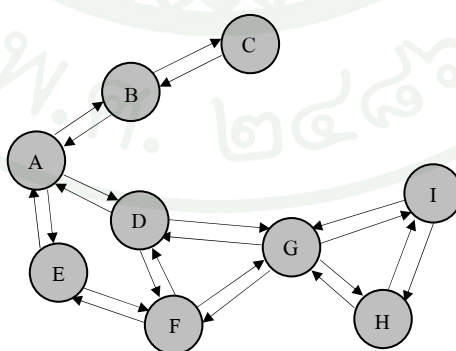
การตรวจเอกสาร

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับงานวิจัย

เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ

เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Mobile Ad hoc Networks) หรือเรียกโดยย่อว่า MANETs เป็นเครือข่ายที่กลุ่มของโหนดสามารถสื่อสารผ่านสัญญาณวิทยุ (wireless link) ได้โดยตรง ด้วยลักษณะการส่งข้อมูลแบบหลายฮอป กล่าวคือในกรณีที่โหนดปลายทางไม่อยู่ในขอบเขตการส่งสัญญาณของโหนดต้นทาง โหนดเหล่านี้จะต้องอาศัยโหนดระหว่างทางหลายโหนดช่วยส่งผ่านข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการแบบฮอปต่อฮอป (hop to hop) ดังนั้นแต่ละโหนดในเครือข่ายจึงไม่เพียงทำหน้าที่เป็นโฮสต์เท่านั้น แต่ยังคงต้องทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทางให้กับโหนดอื่นๆ ในเครือข่ายอีกด้วย เนื่องจากลักษณะของเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐาน และสามารถรองรับโหนดในเครือข่ายได้อย่างไม่จำกัด ส่งผลให้เครือข่ายประเภทนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในทางทหาร การช่วยเหลือผู้ภัย การศึกษาวิจัยด้านวิชาการ และการใช้งานส่วนบุคคล

ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการส่งข้อมูลแบบหลายฮอปในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ โดยแต่ละโหนดสามารถสื่อสารกันได้ทันทีที่อยู่ภายในรัศมีการเชื่อมต่อซึ่งกันและกัน โดยไม่ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐาน



ภาพที่ 1 ตัวอย่างเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ

แม้ว่าเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจจะมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูงกว่าเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น แต่เครือข่ายประเภทนี้ยังคงมีคุณลักษณะและข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการพิจารณาได้แก่

การส่งข้อมูลของโหนด เนื่องจากโหนดในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจมีการส่งข้อมูลแบบกระจายทุกทิศทาง ดังนั้นถ้าจำนวนของโหนดในเครือข่ายเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดความคับคั่งและการชนกันของแพ็กเก็ตข้อมูล ตลอดจนเกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังปลายทางมากขึ้น

การเคลื่อนที่ของโหนด เนื่องจากโหนดในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจสามารถเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว และทิศทางที่เป็นอิสระ ส่งผลให้ลักษณะทอพอโลยี (topology) ของเครือข่ายอาจเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา และการออกแบบโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางให้มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น

ทรัพยากรของโหนด เนื่องจากโหนดในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจมีทรัพยากรเช่น แบนด์วิธ (bandwidth) และพลังงานอย่างจำกัด ส่งผลให้ทรัพยากรเหล่านี้ควรถูกใช้งานอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ

เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจเป็นเครือข่ายที่ประกอบด้วยโหนดตั้งแต่ 2 โหนดขึ้นไปที่สามารถสื่อสารกันได้ทันทีที่อยู่ในรัศมีการสื่อสารซึ่งกันและกัน แต่ในกรณีที่โหนดปลายทางไม่อยู่ในรัศมีการสื่อสารของโหนดต้นทางแล้ว โหนดเหล่านี้จะต้องอาศัยโหนดระหว่างทางช่วยส่งผ่านข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการ อย่างไรก็ตามโหนดต้นทางจะสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ก็ต่อเมื่อทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น ด้วยเหตุนี้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางจึงถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการค้นหาเส้นทางของเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจในปัจจุบันสามารถแบ่งโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางตามกลไกการค้นหาและบำรุงรักษาเส้นทางได้ 3 ประเภทดังนี้ (Liu and Kaiser, 2005)

1. โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ proactive

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ proactive (proactive routing protocol) หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า table-driven routing protocol เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่มีการค้นหาเส้นทางของทุกโหนดในเครือข่ายไว้ล่วงหน้าแม้ไม่มีการส่งแพ็คเก็ต และทำการปรับปรุงข้อมูลเส้นทางเป็นระยะ ๆ หรือเมื่อเกิดความเปลี่ยนแปลงกับทอพอโลยีของเครือข่าย โดยข้อมูลเส้นทางที่ได้จะถูกนำไปเก็บไว้ในตารางทำให้โหนดต้นทางสามารถสื่อสารกับโหนดปลายทางได้ทันทีที่ต้องการ โพรโทคอลประเภทนี้ เช่น Destination Sequence Distance Vector routing protocol (DSDV) (Perkins and Bhagwat, 1994) เป็นต้น

2. โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ reactive

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ reactive (reactive routing protocol) หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า on-demand routing protocol เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่ทำการค้นหาเส้นทางก็ต่อเมื่อมีความต้องการจากโหนดเท่านั้น โพรโทคอลประเภทนี้ไม่มีการค้นหาเส้นทางไว้ล่วงหน้าจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น AODV และ Dynamic Source Routing protocol (DSR) (Johnson and Maltz, 1996) เป็นต้น

3. โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ hybrid

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ hybrid (hybrid routing protocol) เป็นโพรโทคอลที่รวบรวมข้อดีของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ proactive และ reactive ไว้ด้วยกัน Liu and Kaiser (2005) ได้กล่าวว่าโดยทั่วไปแล้วโพรโทคอลนี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์กับสถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบมีลำดับชั้น (hierarchical network architectures) ตัวอย่างของโพรโทคอลประเภทนี้ เช่น Zone Routing Protocol (ZRP) (Haas *et al.*, 2002) เป็นต้น

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV

ใน AODV (Perkins and Royer, 1999) โหนดต้นทางจะเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางด้วยการกระจายแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง (RREQ: route request) ไปยังปลายทาง เมื่อโหนดระหว่างทางได้รับ RREQ จะตรวจสอบว่าตนเองเคยได้รับแพ็คเก็ตเหล่านี้มาก่อนหรือไม่ หากไม่เคย และไม่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางแล้ว จะกระจาย RREQ ต่อไป แต่ถ้าตนเองเป็นโหนดปลายทาง หรือมีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางแล้ว จะส่งแพ็คเก็ตตอบกลับเส้นทาง (RREP: route reply) ไปยังโหนดต้นทางแบบ unicast โดยการย้อนเส้นทางเดิม (reverse route) ขณะเดียวกันโหนดระหว่างทางที่ได้รับ RREP จะสร้างเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง (forward route) เพื่อใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูล

ในระหว่างการส่งข้อมูล หากมีโหนดบนเส้นทางไม่สามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดถัดไปได้ หรือเกิดการขาดของลิงก์ (link break) โหนดที่พบ link break นี้จะเริ่มต้นกระบวนการบำรุงรักษาเส้นทางด้วยการส่งแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดของเส้นทาง (RERR: route error) ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่

การจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง

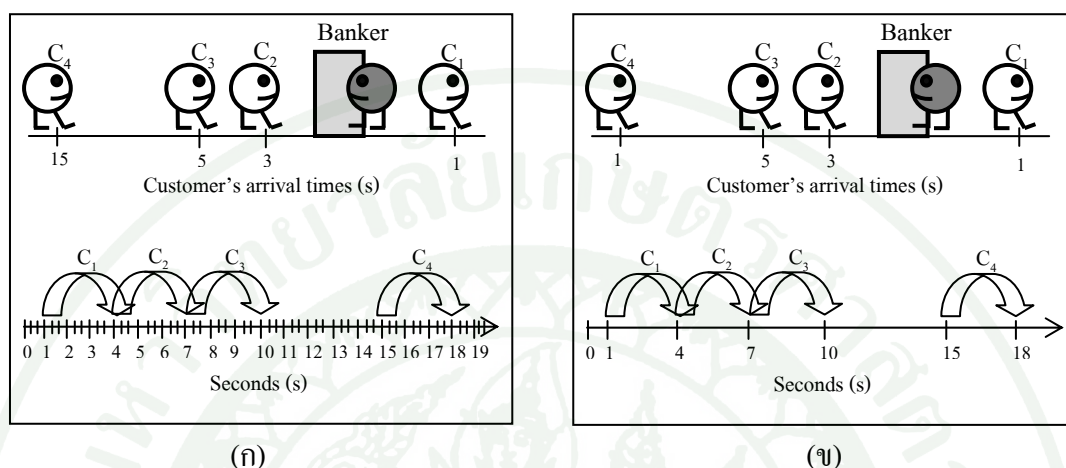
แบบจำลอง (model) เป็นตัวแทนลักษณะหรือพฤติกรรมของระบบที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและประเมินการทำงานของระบบจริง ในกรณีที่แบบจำลองไม่ซับซ้อนอาจนำวิธีการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการหาคำตอบหรือผลลัพธ์จากการทำงานได้ แต่ในกรณีที่แบบจำลองมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น การจำลองเหตุการณ์ (simulation) ด้วยคอมพิวเตอร์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาและหาผลลัพธ์ของแบบจำลองเหล่านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การจำลองเหตุการณ์เป็นกระบวนการออกแบบและจำลองระบบงานจริงเพื่อเรียนรู้พฤติกรรมของระบบภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้ จากความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันส่งผลให้การจำลองเหตุการณ์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง ถึงแม้ว่าการสร้างแบบจำลองเหตุการณ์จำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในโครงสร้างและกระบวนการทำงานของระบบงานจริง ตลอดจนผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองอาจไม่ใช่ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ แต่การจำลองเหตุการณ์ยังคงเป็นเครื่องมือที่ช่วยวิเคราะห์ปัญหาภายใต้เงื่อนไขของระบบงานจริงที่มีความ

หลากหลายและมีการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์ตลอดเวลาได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นการจำลองเหตุการณ์ยังช่วยลดเวลาในการศึกษาวิเคราะห์ระบบ เพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกัน ตลอดจนสามารถควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองได้ง่ายกว่าจึงช่วยลดความเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบงานจริงได้ จากการศึกษาพบว่าเราสามารถแบ่งแบบจำลองเหตุการณ์ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงเวลาได้เป็นแบบจำลองเหตุการณ์แบบต่อเนื่อง (continuous event simulation) และแบบจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete event simulation) โดยเวลาของแบบจำลอง (simulation time) หมายถึงเวลาที่ถูกรวบรวมโดยนาฬิกาของแบบจำลอง (simulation clock) กล่าวคือเวลาของแบบจำลองเป็นเวลาที่ถูกระบุขึ้นเพื่อใช้ในแบบจำลองและไม่ใช่เวลาที่เกิดขึ้นตามนาฬิกาจริง จากการศึกษาพบว่า การเคลื่อนที่ของเวลาในแบบจำลองประกอบด้วย การเคลื่อนที่ตามเวลาและการเคลื่อนที่ตามเหตุการณ์ โดยการเคลื่อนที่ตามเวลาเป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะต่อเนื่องด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของเวลาบนนาฬิกาจำลองแล้วให้เวลาบนนาฬิกาจำลองเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยการเพิ่มเวลาด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนการเคลื่อนที่ตามเหตุการณ์เป็นการเคลื่อนที่ของเวลาในลักษณะไม่ต่อเนื่อง โดยนาฬิกาของแบบจำลองประเภทนี้จะเดินไปข้างหน้าก็ต่อเมื่อมีเหตุการณ์ถัดไปรออยู่เท่านั้น ดังนั้นแบบจำลองที่มีการเคลื่อนที่ของเวลาตามเหตุการณ์จำเป็นต้องทราบล่วงหน้าว่าจะมีเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นในช่วงเวลาใดของระบบบ้างจึงจะสามารถกำหนดและเคลื่อนที่นาฬิกาบนแบบจำลองได้

ภาพที่ 2 แสดงแบบจำลองเหตุการณ์แถวคอยในธนาคารแห่งหนึ่งซึ่งมีพนักงานให้บริการ 1 คน เวลาของแบบจำลองเริ่มขึ้นที่วินาทีที่ 0 ลูกค้าแต่ละรายใช้บริการด้วยระยะเวลา 3 วินาที และออกจากธนาคารเมื่อได้รับบริการเรียบร้อยแล้ว โดยภาพที่ 2 (ก) แสดงแบบจำลองเหตุการณ์แบบต่อเนื่อง และภาพที่ 2 (ข) แสดงแบบจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง จากภาพสมมติให้ธนาคารมีพนักงาน 1 คนและสามารถบรรจุลูกค้าจำนวนเท่าใดก็ได้ โดยลูกค้าแต่ละรายจะเข้ามาใช้บริการในเวลาที่แตกต่างกัน ลูกค้าที่มาถึงก่อนจะได้เข้ารับบริการถ้าพนักงานว่างอยู่ ส่วนลูกค้าที่มาถึงในภายหลังและไม่สามารถเข้ารับบริการได้ในขณะนั้นจะต้องเข้าแถวคอยเพื่อรอรับบริการต่อไป ภาพที่ 2 (ก) แสดงให้เห็นว่าในแบบจำลองเหตุการณ์แบบต่อเนื่อง นาฬิกาของแบบจำลองจะเดินไปข้างหน้าด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่งแม้จะไม่มีเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นในช่วงเวลานั้นก็ตาม ส่วนภาพที่ 2 (ข) แสดงให้เห็นว่าในแบบจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง นาฬิกาของแบบจำลองจะเดินไปข้างหน้าเมื่อมีเหตุการณ์ถัดไปรออยู่ หรืออาจกล่าวได้ว่าสถานะ (state) ของแบบจำลองจะเปลี่ยนแปลงไปก็ต่อเมื่อถึงเวลาของแต่ละเหตุการณ์ (event) ที่กำหนดไว้ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการจำลองเหตุการณ์ทั้งคู่แล้วจะพบว่าการจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่องจะช่วยลดเวลาการทำงานและหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่สูญเสียไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มี

เหตุการณ์เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ในขณะที่แบบจำลองเหตุการณ์แบบต่อเนื่องจะเหมาะสำหรับการจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงเวลาที่คงที่ หรือในกรณีที่มีเหตุการณ์จำนวนมากเกิดขึ้นในช่วงเวลาอันสั้น



ภาพที่ 2 แบบจำลองเหตุการณ์แถวคอยในธนาคารแห่งหนึ่ง (ก) แบบจำลองเหตุการณ์แบบต่อเนื่อง (ข) แบบจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง

เนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมของระบบ โดยอาศัยแบบจำลองสามารถลดเวลา ค่าใช้จ่าย ตลอดจนช่วยอำนวยความสะดวกในการสร้างสถานการณ์ต่างๆ ได้โดยไม่รบกวนการทำงานตามปกติของระบบ งานวิจัยด้านเครือข่ายจำนวนมากจึงนิยมนำโปรแกรมสำหรับจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง เช่น GloMoSim (Zeng *et al.*, 1998), Omnet++ (Varga and Hornig, 2008), NS2 (Issariyakul and Hossain, 2011) และ NS3 (Henderson *et al.*, 2008) มาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของระบบเครือข่าย หรือประเมินผลงานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์อาจไม่สามารถวัดขนาดของความถูกต้องแม่นยำได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในการวัดความถูกต้องของผลลัพธ์จึงจำเป็นต้องนำเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติมาช่วยเพิ่มความเชื่อมั่น และลดความผิดพลาดในการประมาณผลลัพธ์จากการจำลอง โดยเทคนิคการประมาณค่าแบบช่วงเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์หนึ่งที่ถูกนำมาใช้วัดระดับความถูกต้องของผลลัพธ์ว่ามีความมั่นใจแค่ไหนว่าผลการจำลองที่ได้จะมีค่าอยู่ในระหว่างช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนด กล่าวคือในการจำลองเหตุการณ์ 100 ครั้ง ถ้ากำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นอยู่ในระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลอง 95 ครั้งจะอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นและมีค่าใกล้เคียงกัน และมีเพียงผลการจำลอง 5 ครั้งเท่านั้นที่มีค่านอกเหนือจากช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้ ดังนั้นถ้าช่วงความเชื่อมั่นมีลักษณะเป็นช่วงแคบๆ แสดงว่าผลการจำลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ในทางกลับกันผลการจำลองแต่ละครั้งมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน

รูปแบบการสูญเสียกำลังสัญญาณ Two-Ray Ground

รูปแบบการสูญเสียกำลังสัญญาณ Two-Ray Ground (Two-Ray Ground Propagation Loss Model) เป็นรูปแบบการสูญเสียกำลังสัญญาณที่ถูกนำไปใช้ในการวิจัยอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก โหนดในเครือข่ายที่ใช้รูปแบบการกระจายคลื่นวิทยุประเภทนี้สามารถรับคลื่นวิทยุได้ 2 ทิศทางคือ คลื่นจากทิศทางตรง และคลื่นที่สะท้อนจากพื้นผิวโลก ดังนั้นในกระบวนการรับส่งแพ็คเกจ โหนด สามารถคำนวณหาค่าความแรงสัญญาณขณะรับแพ็คเกจ (P_r) ได้จากสมการ

$$P_r = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times H_t \times H_r}{d^4} \quad (1)$$

เมื่อ G_r และ H_r แทนอัตราการขยายกำลังสัญญาณ และความสูงของเสาส่งสัญญาณของผู้รับ และ P_t , G_t และ H_t แทนความแรงสัญญาณ อัตราการขยายกำลังสัญญาณ และความสูงของเสาส่งสัญญาณของผู้ส่งตามลำดับ d แทนระยะทางระหว่างโหนดผู้ส่ง (sender) กับผู้รับ (receiver) จากสมการสามารถอนุมานระยะทางระหว่างโหนดได้จากการพิจารณาความแรงสัญญาณของผู้รับ โหนดที่อยู่ใกล้กับ sender มากกว่าจะมีความแรงสัญญาณมากกว่า ในทางกลับกันจะมีความแรงสัญญาณน้อยกว่า ค่าความแรงสัญญาณของผู้รับจึงแปรผกผันกับระยะทางระหว่างโหนด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Expanding Ring Search

Expanding Ring Search (ERS) เป็นการแก้ปัญหาค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยใช้เทคนิคควบคุมพื้นที่การกระจาย RREQ ด้วยการขยายขอบเขตการส่ง RREQ ไปทีละน้อย หากไม่พบโหนดปลายทางภายในระยะของจำนวนฮอป (ring) ที่กำหนด โดยโหนดต้นทางต้องกำหนดค่า Time To Live (TTL) เพื่อระบุจำนวนฮอปในการกระจาย RREQ และโหนดต้นทางจะเพิ่ม TTL และกระจาย RREQ ใหม่อีก ถ้าไม่ได้รับ RREP กลับมาในเวลาที่กำหนด หากการค้นหาดำเนินไปจนถึงจำนวนครั้งและค่าสูงสุดของ TTL ที่กำหนดไว้แล้วยังไม่พบโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะเริ่มต้นกระจาย RREQ ใหม่โดยไม่ใช้กลไก ERS (ไม่จำกัดจำนวนฮอป) จากการศึกษาพบว่ามิงงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพของ ERS ประกอบด้วย Blocking ERS, Enhanced Blocking ERS, Energy Efficient ERS และ Hop Prediction ERS

1.1 Blocking ERS และ Enhanced Blocking ERS

Blocking ERS (BERS) (Park *et al.*, 2006) และ Enhanced Blocking ERS (BERS*) (Pu *et al.*, 2009) ได้ปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยให้โหนดระหว่างทางที่ได้รับ RREQ สามารถเริ่มต้นกระจาย RREQ ใน ring ถัดไปได้ โดยไม่ต้องเริ่มต้นกระจาย RREQ ใหม่จากโหนดต้นทาง กระบวนการค้นหาจะหยุดการทำงานก็ต่อเมื่อพบโหนดปลายทาง หรือ TTL ถึง threshold ที่กำหนดไว้ ต่อเมื่อโหนดต้นทางได้รับ RREP โหนดเหล่านี้จะกระจายแพ็คเกจ Stop Instruction เพื่อให้โหนดอื่นที่กำลังรอกระจาย RREQ ทราบและหยุดการกระจาย RREQ

จากการศึกษา Park *et al.* (2006) พบว่า BERS ลดการใช้พลังงานโดยรวมลง แต่มีความล่าช้า (delay) ของการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ ERS ส่วนผลการทดลองของ Pu *et al.* (2009) แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ฮอปที่ 3 ขึ้นไป BERS* จะมี latency น้อยที่สุดและใช้พลังงานของโหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ ERS และ BERS แต่ BERS* จะใช้พลังงานมากกว่า ERS เมื่อจำนวนฮอปมากกว่า 7 ฮอปขึ้นไป

1.2 Energy Efficient ERS

Energy Efficient ERS (Pham and Choo, 2008) ได้ปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยให้โหนดที่ได้ยิน โหนดเพื่อนบ้านส่งต่อ RREQ ของตนเองสามารถกระจาย RREQ ไปยัง ring ถัดไปได้

จากการทดลอง Pham and Choo (2008) พบว่า AODV-Energy Efficient ERS ส่ง RREQ น้อยกว่า AODV และ AODV-ERS ประมาณ 40% และ 20% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานพบว่า AODV-Energy Efficient ERS ช่วยลดการใช้พลังงานโดยรวมของเครือข่ายลงได้ถึง 15% อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV และ AODV-ERS จะได้ว่าในกรณีที่โหนดในเครือข่ายเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง AODV-Energy Efficient ERS ทำให้โอกาสที่ RREQ จะไปถึงทุกโหนดในเครือข่ายลดลง

1.3 Hop Prediction ERS

ใน Hop Prediction ERS (HP-ERS) (Shibao and Wei, 2010) โหนดต้นทางจะเก็บข้อมูลประมาณการจำนวนฮอปที่ไปถึงโหนดปลายทางเพื่อนำมาใช้ในการกำหนดค่า TTL threshold เมื่อต้องการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนี้อีกในอนาคต ผลการทดลองโดยใช้ NS2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อโหนดภายในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ไม่มากนัก HP-ERS-AODV ให้ค่าใช้จ่ายต่ำกว่า ERS-AODV และ Flooding-AODV ประมาณ 8-16% และ 22-38% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณา delay พบว่า HP-ERS-AODV มี delay มากกว่า Flooding-AODV แต่น้อยกว่า ERS-AODV ประมาณ 41-72% จะเห็นได้ว่าในกรณีที่โหนดในเครือข่ายมีอัตราการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง หรือโหนดปลายทางอยู่ในฮอปที่ไกลจากโหนดต้นทางมากๆ วิธีการกำหนดค่า TTL threshold ของ HP-ERS อาจเกิดความคลาดเคลื่อน และไม่สะท้อนให้เห็นตำแหน่งของโหนดปลายทางที่แท้จริง

2. Probabilistic Broadcasting

Probabilistic Broadcasting เป็นเทคนิคที่กำหนดให้โหนดระหว่างทางเลือกส่งต่อ RREQ ด้วยค่าความน่าจะเป็น (probability) ที่น้อยกว่า 1 ซึ่งแบ่งได้เป็น Fixed Probabilistic Broadcasting และ Dynamic Probabilistic Broadcasting

Fixed Probabilistic Broadcasting เป็นเทคนิคที่กำหนดให้ทุกโหนดส่งต่อ RREQ ด้วยค่า probability ที่คงที่ค่าหนึ่ง การทดลองโดย Zhang and Agrawal (2003) ได้แสดงให้เห็นว่าการนำเทคนิค Fixed Probabilistic Broadcasting มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV จะสามารถลดจำนวนของ RREQ ที่ถูกส่งต่อใน AODV ได้ประมาณ 30% และการศึกษาโดย Ni *et al.* (1999) ได้กล่าวไว้ว่า 0.65 เป็นค่า probability ที่ดีที่สุดสำหรับเทคนิค Fixed Probabilistic Broadcasting แต่ในความเป็นจริงแล้วโหนดในพื้นที่เครือข่ายที่มีลักษณะต่างกันควรมีค่า probability แตกต่างกันเช่น ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นน้อย (sparse network) ควรมีค่า probability สูงเพื่อให้การส่งต่อแพ็คเก็ตมีโอกาสไปถึงทุกโหนด ในทางกลับกัน ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นมาก (dense network) ควรมีค่า probability ต่ำ เพื่อให้ค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก ดังนั้น Dynamic Probabilistic Broadcasting (Zhang and Agrawal, 2003; Siddique *et al.*, 2007; Kanakaris *et al.*, 2009) จึงได้นำแนวคิดนี้มาปรับปรุงให้โหนดสามารถเปลี่ยนแปลงค่า probability ได้แบบไดนามิก

DP-AODV (Zhang and Agrawal, 2003) ได้นำจำนวนแพ็คเก็ตที่โหนดได้รับมาใช้ประมาณค่าความหนาแน่นของโหนดเพื่อนบ้าน ถ้าโหนดได้รับแพ็คเก็ตซ้ำกันจำนวนมากสามารถอนุมานได้ว่าโหนดดังกล่าวอยู่ในเครือข่ายที่มีโหนดหนาแน่นสูง ผลการทดลองโดยใช้ NS2 ใน DP-AODV แสดงให้เห็นว่า DP-AODV สามารถลดจำนวน RREQ ที่ถูกส่งต่อในเครือข่ายได้ประมาณ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับ AODV ที่ใช้เทคนิค fixed probabilistic broadcasting ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง

AODV_EXT (Kanakaris *et al.*, 2009) และ DF-AODV (Siddique *et al.*, 2007) ได้นำข้อมูลจากตารางข้อมูลโหนดเพื่อนบ้าน (neighbor table) มาใช้ในการปรับปรุค่า probability โดย DF-AODV กำหนดให้ทุกโหนดมีค่า probability เริ่มต้นเท่ากับ 1 และสามารถลดค่า probability ลงได้ตามจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง สำหรับ AODV_EXT จะไม่มีการกำหนดค่า probability เริ่มต้นให้กับโหนด แต่จะกำหนดให้โหนดที่มีจำนวนโหนดเพื่อนบ้านไม่เกิน 5 สามารถส่ง RREQ ได้ทันทีโดยไม่ต้องพิจารณาค่า probability ผลการทดลองโดยใช้ NS2 ใน AODV_EXT และ GloMoSim ใน DF-AODV แสดงให้เห็นว่าเทคนิคเหล่านี้ช่วยลดจำนวนของ RREQ เพิ่มโอกาสที่ RREQ จะไปถึงทุกโหนด และลดการใช้พลังงานของโหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย AODV_EXT จะช่วยลดจำนวนแพ็คเก็ตที่ไม่ถูกส่งต่อ (dropped packet) ประมาณ 69.5% และเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูล (throughput) ประมาณ 19.5% เมื่อเทียบกับ AODV ที่ใช้เทคนิค flooding สำหรับผลการทดลองของ DF-AODV แสดงให้เห็นว่าในเครือข่ายที่มีค้ำค้ำค้ำของข้อมูลสูง การลดค่าใช้จ่าย และลดการชนกันของแพ็คเก็ตใน DF-AODV จะทำให้ RREQ ถูกกระจายไปครอบคลุมโหนดในเครือข่ายประมาณ 95% ซึ่งจะใกล้เคียงกับอัตราการได้รับ RREQ ของโหนดใน AODV ที่ใช้เทคนิค flooding อย่างไรก็ตามการกำหนดค่า probability เริ่มต้นให้โหนดใน DP-AODV กับ DF-AODV และการกำหนดค่า control factor ใน AODV_EXT ยังคงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเครือข่าย เนื่องจากถ้ากำหนดค่าเหล่านี้มากเกินไปอาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในเครือข่ายสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันหากกำหนดน้อยเกินไปอาจส่งผลให้โอกาสที่ RREQ จะไปถึงทุกโหนดลดลง

Distance based Dynamically Adjusted Probabilistic Forwarding (DDAPF) (Khan *et al.*, 2008) ได้นำข้อมูลระยะทางของโหนดจาก Global Positional System (GPS) หรือ propagation model มาใช้ในการปรับปรุค่า probability และ delay ในการส่ง RREQ ของโหนดแบบไดนามิก ด้วยการกำหนดให้โหนดที่อยู่ไกลจากโหนดต้นทางของ RREQ มีค่า probability มากกว่า และ delay น้อยกว่าโหนดที่อยู่ใกล้ นอกจากนั้นยังกำหนดให้โหนดสามารถลด probability ของตนเองได้ถ้าได้รับ RREQ ซ้ำอีกด้วย ผลการทดลองโดยใช้ GloMoSim แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้เครือข่ายมีความ

หนาแน่นของโหนดสูงมากและทุกโหนดไม่มีการเคลื่อนที่ DDAPF จะให้โอกาสที่ RREQ จะไปถึงทุกโหนดในเครือข่ายใกล้เคียงกับเทคนิคการส่งแพ็คเก็ตแบบกระจาย และในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่ DDAPF จะมีจำนวน โหนดที่ส่งต่อ RREQ น้อยกว่าเทคนิคการส่งแพ็คเก็ตแบบกระจายประมาณ 47% ซึ่งเหนือกว่า Fixed Probabilistic Broadcasting ที่กำหนดค่า probability เท่ากับ 0.7 ที่จะมีจำนวน โหนดที่ส่ง RREQ ลดลงประมาณ 30% เท่านั้น

3. การแก้ปัญหาการขาดช่วงของเส้นทาง

เทคนิคที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับ AODV อีกกลุ่มหนึ่งคือ เทคนิคการซ่อมแซมเส้นทางที่ขาดในระหว่างการส่งข้อมูลซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

3.1 AODV Backup Routing

AODV Backup Routing (AODV-BR) (Lee and Gerla, 2000) ได้กำหนดให้โหนดที่ไม่ได้อยู่บนเส้นทางหลัก (primary path) คอยดักฟังแพ็คเก็ต RREQ จากโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง และเก็บข้อมูลแรกที่ได้รับไว้ในตารางข้อมูลเส้นทางเพื่อเลือก (alternate routing table) เพื่อใช้เป็น next hop ไปยังโหนดปลายทางหากเกิด link break โดยเมื่อโหนดใดพบ link break จะส่ง RERR ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่ และกระจายแพ็คเก็ตข้อมูลที่ได้รับในส่วนหัวของแพ็คเก็ตว่า link break ให้กับโหนดเพื่อนบ้านในระยะหนึ่งฮอป โดยโหนดเหล่านี้จะส่งแพ็คเก็ตข้อมูลต่อไปก็ต่อเมื่อไม่ได้รับแพ็คเก็ตมาจากโหนดถัดไป หรือไม่เคยได้รับแพ็คเก็ตนี้มาก่อน และตนเองมีเส้นทางของโหนดปลายทางอยู่ในตารางข้อมูลเส้นทางเพื่อเลือกเท่านั้น ผลการทดลองโดยใช้ GloMoSim แสดงให้เห็นว่า AODV-BR มี packet delivery ratio และ end-to-end delay สูงกว่า AODV เนื่องจาก AODV-BR จะสามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้มากกว่า แต่เส้นทางที่ใช้ อาจไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV

3.2 AODV Reliable Delivery

AODV Reliable Delivery (AODV-RD) (Liu and Li, 2009) ได้ปรับปรุงกระบวนการทำงานของ AODV-BR ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ด้วยการเพิ่มกลไกให้โหนดบนเส้นทางหลักสามารถตรวจสอบได้ว่าสัญญาณระหว่างที่โหนดได้รับแพ็คเก็ตมีค่าน้อยกว่า threshold หรือไม่ หากใช่โหนดเหล่านี้จะเลือกเส้นทางในตารางเส้นทางเพื่อเลือกที่มีค่า communication ability มากที่สุด และ

ค่าดังกล่าวต้องไม่น้อยกว่าค่า threshold มาใช้แทนเส้นทางเดิมที่ตรวจพบความเสี่ยงในการเกิด link break หากมีโหนดตรวจพบ link break บนเส้นทางหลัก โหนดเหล่านี้จะส่ง RERR ไปยังโหนดต้นทางและกระจาย RREQ ไปในระยะ 1 ฮอป เพื่อสอบถามโหนดเพื่อนบ้านว่ามีเส้นทางเพื่อเลือกไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการหรือไม่ ถ้าโหนดเพื่อนบ้านมีเส้นทางเพื่อเลือก โหนดเหล่านี้จะส่ง RREP และค่า communication ability กลับมายังโหนดที่ร้องขอเส้นทาง เพื่อให้โหนดเหล่านี้สามารถเลือกเส้นทางที่มีค่า communication ability สูงสุดมาใช้งานได้ ถ้าไม่มีเส้นทางใดให้ค่า communication ability มากกว่าค่า threshold แล้ว โหนดจะไม่เลือกเส้นทางใด แต่จะรอให้กระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่เริ่มต้นขึ้น จากผลการทดลองโดยใช้ NS2 แสดงให้เห็นว่า AODV-RD มี end-to-end delay ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV-BR แต่ยังคงมากกว่า AODV และมี packet delivery ratio สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง AODV และ AODV-BR อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของ AODV-RD ต้องแลกมาด้วยค่าใช้จ่ายจากแพ็คเกจควบคุมที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่โหนดในเครือข่ายมีการเคลื่อนที่สูง

3.3 AODV Path Accumulator

AODV Path Accumulator (AODV-PA) (Gwalani *et al.*, 2003) ได้นำเทคนิคการสะสมข้อมูลเส้นทาง (path accumulation) มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ด้วยการกำหนดให้โหนดสามารถใส่หมายเลข address ของตนเองลงใน RREQ หรือ RREP ก่อนส่งไปยังโหนดเพื่อนบ้านได้ ด้วยเหตุนี้เส้นทางที่ถูกเก็บในตารางข้อมูลเส้นทางของ AODV-PA จึงมีความเป็นปัจจุบัน และโหนดสามารถนำเส้นทางเพื่อเลือกเหล่านี้มาใช้งานได้ในกรณีที่เกิด link break ผลการทดลองโดยใช้ NS2 แสดงให้เห็นว่า AODV-PA มี packet delivery ratio เพิ่มขึ้น end-to-end delay ลดลง และ normalized routing load น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV แต่ในกรณีที่เครือข่ายมีขนาดใหญ่ หรือโหนดปลายทางอยู่ไกลขึ้น กระบวนการค้นหาเส้นทางที่ได้นำข้อมูลของโหนดใส่ลงในส่วนหัวของ RREQ แบบ AODV-PA นั้น จะก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV และค่าใช้จ่ายของ AODV-PA ยังสูงกว่า DSR ประมาณ 2.5 เท่า และ 1.25 เท่าในกรณีมีจำนวนโหนดในเครือข่าย 50 และ 100 โหนดตามลำดับ

3.4 Reverse AODV Routing Protocol

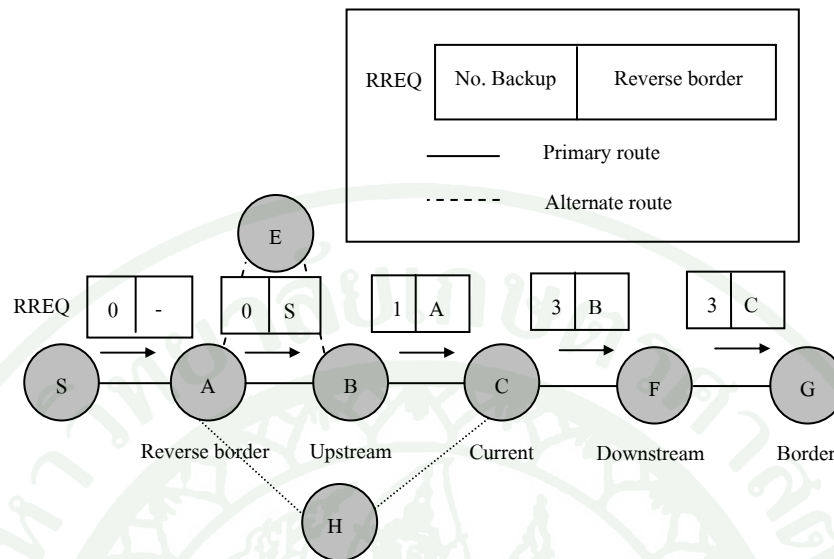
Reverse AODV Routing Protocol (R-AODV) (Kim *et al.*, 2006) ได้ปรับปรุงกระบวนการตอบกลับ RREP ของ AODV ด้วยการกำหนดให้โหนดปลายทางกระจาย RREP ที่เรียกว่า R-RREQ (Reverse RREQ) ไปยังโหนดต้นทาง และให้โหนดต้นทางเก็บแพ็คเก็ต R-RREQ ที่มาถึงในภายหลังไว้เป็นเส้นทางเพื่อเลือก เพื่อใช้ในกรณีที่เส้นทางสำหรับส่งแพ็คเก็ตข้อมูลในปัจจุบันไม่สามารถใช้ส่งแพ็คเก็ตข้อมูลได้ ระหว่างกระบวนการส่งแพ็คเก็ตข้อมูล หากมีโหนดบนเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลแจ้งไปยังโหนด upstream ว่า ตนเองไม่สามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนด downstream ได้ โหนดที่ได้รับการแจ้งเตือนจะพิจารณาว่าตนเองอยู่ใกล้กับโหนดปลายทางมากกว่าโหนดต้นทางหรือไม่ ถ้าใช่โหนดเหล่านี้จะเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่ด้วยตนเอง แต่ถ้าไม่ใช่จะส่ง RERR ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อเลือกเส้นทางเพื่อเลือกอื่นมาใช้งานแทนเส้นทางเดิม หรือเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่ถ้าไม่มีเส้นทางเพื่อเลือกเก็บอยู่ ผลการทดลองโดยใช้ NS2 แสดงให้เห็นว่า R-AODV มี packet delivery ratio สูงขึ้น delay ลดลง และโหนดมีพลังงานคงเหลือมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV แต่ในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดมากขึ้น R-AODV จะมีค่าใช้จ่ายจากแพ็คเก็ตควบคุมสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากใช้การส่ง R-RREQ แบบกระจาย

3.5 AODV Based Backup Routing Scheme

ใน AODV Based Backup Routing Scheme (AODV-BBS) (Huang *et al.*, 2010) โหนดที่ได้รับ RREQ สามารถนำข้อมูลโหนดเพื่อนบ้านในระยะ 2 ฮอปมาคำนวณหาจำนวนเส้นทางเพื่อเลือกได้ โดยโหนดเหล่านี้จะเพิ่มค่าจำนวนเส้นทางเพื่อเลือกในแพ็คเก็ตด้วย 2 หรือ 1 ถ้ามีเส้นทางเพื่อเลือกเชื่อมต่ออยู่กับ reverse border หรือ upstream ตามลำดับดังภาพที่ 3 จากนั้นเมื่อโหนดระหว่างทางได้รับ RREP โหนดเหล่านี้จะเก็บข้อมูลโหนด border ลงในตารางข้อมูลเส้นทาง แทนที่ข้อมูลโหนด border ด้วยโหนด downstream ของตนเอง และส่ง RREP ต่อไป

ในกระบวนการ route repair โหนดที่พบ link break จะนำข้อมูลจาก neighbor table มาตรวจสอบว่าตนเองมีเส้นทางเพื่อเลือกที่สามารถเชื่อมต่อกับโหนด border หรือ downstream ของตนเองหรือไม่ ในกรณีที่ไม่มีเส้นทางเพื่อเลือกไว้ใช้งาน โหนดเหล่านี้จะส่ง RERR ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่ จากผลการทดลองโดยใช้ NS2 แสดงให้เห็นว่า AODV-BBS มีค่าใช้จ่ายและ end-to-end delay โดยเฉลี่ยลดลง มี packet delivery ratio สูงขึ้น แต่มีค่าใช้จ่าย

จากแพ็คเกจควบคุมในกระบวนการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ AODV



ภาพที่ 3 การส่ง RREQ ใน AODV-BBS (Huang *et al.*, 2010)

3.6 AODV Break Avoidance

AODV Break Avoidance (AODV-BA) (Tauchi *et al.*, 2005) ได้นำข้อมูลเกี่ยวกับสัญญาณที่โหนดได้รับ (received radio) การใช้เส้นทางในการส่งข้อมูล (overlap of routes) พลังงาน (battery) และความหนาแน่นของโหนด (density) มาใช้พิจารณาหาความเสี่ยงในการเกิด link break ถ้าโหนดที่ได้รับการแจ้งเตือนอยู่ใกล้กับโหนดปลายทางมากกว่า โหนดเหล่านี้จะกระจาย RREQ ออกไปเพื่อค้นหาเส้นทางใหม่ (local repair) แต่ถ้าอยู่ใกล้กับโหนดต้นทางมากกว่า โหนดเหล่านี้จะส่ง RERR ที่มีการตั้งค่า W flag ให้อยู่ในสถานะ weak (W flag เป็นเขตข้อมูลหนึ่งใน RERR ที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อประโยชน์ในการระบุสถานะการจัดการ routing entry ถ้า W flag อยู่ในสถานะ weak โหนดที่ได้รับ RERR จะไม่ต้อง invalidate ข้อมูลเส้นทางใน routing entry หากเพียงแต่ไม่ส่งต่อ RREQ จากโหนดที่มีสถานะเป็น weak ในกรณีที่ได้รับ RREQ จากโหนดเหล่านี้อีกครั้งในภายหลัง) ไปยังโหนดต้นทาง เพื่อให้โหนดต้นทางเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่อีกครั้ง ผลการทดลองโดยใช้ NS2 แสดงให้เห็นว่า AODV-BA มี packet arrival ratio เพิ่มขึ้น end-to-end delay ลดลง และช่วยลดจำนวน link break ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV แต่เมื่อพิจารณาจำนวนแพ็คเกจควบคุม (control packet) พบว่า AODV-BA ใช้แพ็คเกจควบคุมมากกว่าทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV

3.7 Mobility Aware AODV

Mobility Aware AODV (MA-AODV) (Khamayseh *et al.*, 2009) เป็นกลุ่มโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่กำหนดให้โหนดสามารถคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ (mobility) ของตนเอง และสามารถเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลที่มีการเคลื่อนที่ของโหนดน้อยที่สุดได้ ประกอบด้วย Per Hop Mobility Aware AODV Protocol (PH-MA-AODV) และ Aggregate Mobility Aware AODV (Agg-AODV)

PH-MA-AODV ได้ปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV โดยให้โหนดที่ได้รับ RREQ สามารถเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตนเองกับค่า threshold และส่ง RREQ ไปยังโหนดถัดไปถ้าอัตราการเคลื่อนที่ของโหนดเหล่านี้มีค่าน้อยกว่า

Agg-AODV ได้ปรับปรุงให้โหนดต้นทางและโหนดระหว่างทางเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของตนเองลงใน RREQ ก่อนส่งไปยังโหนดถัดไป และให้โหนดปลายทางเลือกเส้นทางที่ให้อัตราการเคลื่อนที่สะสมของแพ็คเก็ตน้อยกว่ามาใช้งาน ผลการทดลองโดยใช้ GloMoSim 2.03 แสดงให้เห็นว่าทั้ง PH-MA-AODV และ Agg-AODV ให้ packet delivery ratio และ link reliability สูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณากรณีที่โหนดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงพบว่า PH-MA-AODV มีโหนดที่สามารถส่ง RREQ ไม่เพียงพอส่งผลให้โอกาสที่ RREQ จะไปถึงโหนดในเครือข่ายลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้เส้นทางที่ได้จาก Agg-AODV อาจไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุดอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ฮาร์ดแวร์

1.1 คอมพิวเตอร์พกพา หน่วยประมวลผล Intel(R) Core(TM) i5-2410M ความเร็ว 2.30 กิกะเฮิร์ต หน่วยความจำหลัก DDR3 6 กิกะไบต์ หน่วยความจำสำรอง 640 กิกะไบต์ ความเร็วรอบ 5400 รอบต่อนาที

2. ซอฟต์แวร์

2.1 ระบบปฏิบัติการ Ubuntu

2.2 คอมไพเลอร์ GCC C++ และอินเทอร์พรีเตอร์ Python

2.3 GEDIT และ VIM Editor

2.4 Oracle VM VirtualBox (Oracle Virtual Machine VirtualBox)

2.5 BASH Shell Script

2.6 โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS3 (Network Simulator 3)

2.7 โปรแกรมภาษา C++ และ Python

วิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาขั้นตอนวิธีเพื่อลดค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โพรโทคอล AODV เนื่องจากวิธีการกระจาย RREQ ใน AODV นั้นก่อให้เกิดการซ้ำและชนกันของ แพ็คเก็ตจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของ โหนด ความคับคั่งของข้อมูล และการเคลื่อนที่ของ โหนดสูง จากการศึกษพบว่า มีงานวิจัยจำนวนมากได้นำเทคนิคการพิจารณาระยะทางระหว่าง โหนดมาช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV แต่เทคนิคนี้มักถูกนำไปใช้กับการส่งต่อแพ็คเก็ตแบบกระจายด้วยความน่าจะเป็น และยังคงอาศัยการ หน่วงเวลาเพื่อตัดสินใจว่า โหนดใบบ้างที่ควรเข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทาง ส่งผลให้เกิดความ ล่าช้าในการได้เส้นทางไปยังปลายทาง และลดโอกาสที่ โหนดปลายทางจะได้รับแพ็คเก็ตข้อมูล เพื่อ แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอขั้นตอนวิธีแบบใหม่ที่ได้นำกลไกการดักฟังข้อมูลความ แรงสัญญาณของ โหนดเพื่อนบ้านมาช่วยลดค่าใช้จ่ายในเครือข่ายที่มีความถี่ของการค้นหาเส้นทาง มากกว่า 1 ครั้งและรักษาโอกาสที่แพ็คเก็ตข้อมูลจะไปถึง โหนดปลายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องอาศัยการหน่วงเวลา เรียกโพรโทคอลใหม่นี้ว่า AODV-DBF

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลอง

AODV-DBF เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่ได้นำขั้นตอนวิธี DBF มาประยุกต์ใช้ใน กระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV โดยมีการปรับปรุงโครงสร้างแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง และ เพิ่มเติมตารางข้อมูลกำลังสัญญาณดังนี้

1. แพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง

โพรโทคอล AODV-DBF ได้ปรับปรุงโครงสร้าง RREQ ของ AODV ให้สามารถจัดเก็บ ข้อมูลที่จำเป็นต่อการประเมินสถานะการเข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางของแต่ละ โหนด ซึ่ง ประกอบด้วยเขตข้อมูลหมายเลขที่อยู่ของ โหนดก่อนหน้า (previous node IP address หรือ *Prev. node ID*) และความแรงของสัญญาณที่ โหนดก่อนหน้าได้รับ (previous node received power หรือ *Rx Power*) โดยเขตข้อมูล previous node IP address จะทำหน้าที่เก็บหมายเลขที่อยู่ของ โหนดใน ฮอปที่ผ่านมา ส่วนเขตข้อมูล previous node received power จะทำหน้าที่เก็บความแรงสัญญาณ ขณะที่ โหนดก่อนหน้าได้รับ RREQ ใดๆ มีหน่วยเป็น dBm

ภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้าง RREQ ของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV (Perkins *et al.*, 2003) กับ AODV-DBF โดยภาพที่ 4 (ก) แสดงโครงสร้าง RREQ ของ AODV ส่วนภาพที่ 4 (ข) แสดงโครงสร้าง RREQ ของโพรโทคอล AODV-DBF ตามลำดับ จากภาพ จะเห็นว่าโครงสร้าง RREQ ของ AODV-DBF จะมีเขตข้อมูลที่เพิ่มเติมจาก AODV คือ เขตข้อมูล previous node IP address และ previous node received power

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP address							
Destination sequence number							
Originator IP address							
Originator sequence number							

(ก)

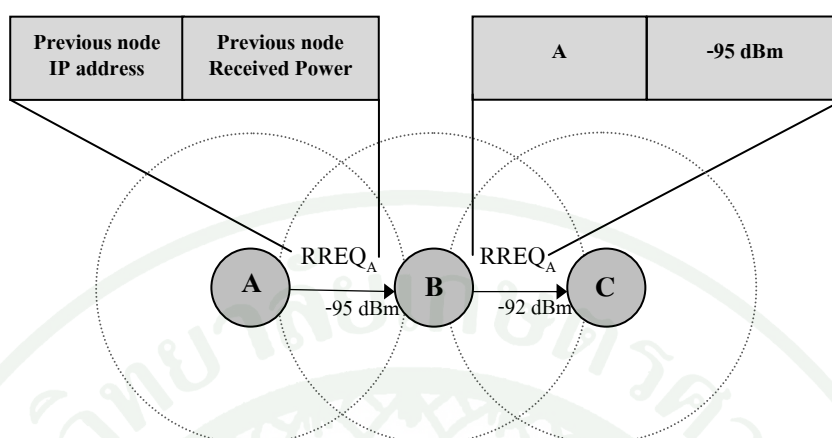
Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP address							
Destination sequence number							
Originator IP address							
Originator sequence number							
Previous node IP address							
Previous node received power							

(ข)

ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบโครงสร้าง RREQ (ก) โครงสร้าง RREQ ของ AODV (ข) โครงสร้าง RREQ ของ AODV-DBF

ภาพที่ 5 แสดงวิธีการจัดการเขตข้อมูล previous node IP address และ previous node received power ในกระบวนการรับส่ง RREQ ของโพรโทคอล AODV-DBF จากภาพเมื่อ A เริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางด้วยการกระจาย RREQ ไปยังโหนดเพื่อนบ้าน หลังจาก B ได้รับ RREQ ของ A แล้ว B จะทราบว่าตนเองมี A เป็น previous node และสามารถคำนวณหา received power ขณะรับแพ็คเก็ตได้ -95 dBm นอกจากนั้น B ยังทราบอีกว่า A ซึ่งเป็นโหนดต้นทางของกระบวนการค้นหาเส้นทางนี้ไม่มีข้อมูล previous node และ received power จากการพิจารณา RREQ ที่ไม่มี previous node IP address และมีค่า previous node received power เป็นศูนย์ตามลำดับ ต่อเมื่อ B ต้องการส่งต่อ RREQ ในกรณีนี้ B จะนำ IP address ของ A และ received power ขณะที่ตนเองได้รับ RREQ จาก A แทนที่ลงใน RREQ ก่อนกระจาย RREQ ไปยังโหนดในสอฟต์แวร์ไป เมื่อ C ได้รับ RREQ จาก B นอกจาก C จะสามารถทราบข้อมูล previous node IP address และ received power ของตนเองด้วยกลไกเดียวกับ B แล้ว C ยังสามารถทราบข้อมูลของ B จากการประมวลผล RREQ ที่

ตนเองได้รับจาก B อีกด้วย



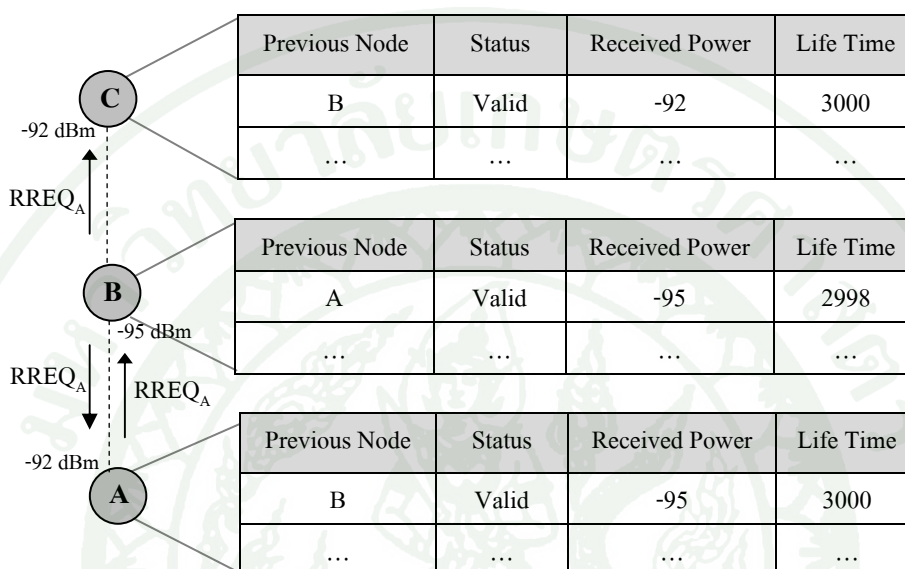
ภาพที่ 5 วิธีการจัดการเขตข้อมูล previous node IP address และ previous node received power ขณะรับ RREQ ใน AODV-DBF

2. ตารางข้อมูลกำลังสัญญาณ

ตารางข้อมูลกำลังสัญญาณ (received power table) เป็นตารางที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ โหนดในเครือข่ายที่ใช้โพรโทคอล AODV-DBF สามารถจัดเก็บข้อมูลที่จำเป็นต่อการประเมินสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านได้ โดยโครงสร้างของตารางประกอบด้วยเขตข้อมูลหมายเลขที่อยู่ของโหนดก่อนหน้า (previous node IP address หรือ *Prev. node ID*) สถานะ (status หรือ *Status*) ความแรงสัญญาณ (received power หรือ *Rx Power*) และช่วงชีวิต (life time หรือ *Life Time*) โดยเขตข้อมูล previous node IP address จะทำหน้าที่เก็บหมายเลขที่อยู่ของโหนดในสอพที่ผ่านมา เขตข้อมูล status จะทำหน้าที่เก็บสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้าน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองแนวทางคือ เข้าร่วม (valid) หรือไม่เข้าร่วม (non-valid) กระบวนการส่งต่อ RREQ เขตข้อมูล received power จะทำหน้าที่เก็บความแรงสัญญาณขณะที่โหนดได้รับ RREQ และเขตข้อมูล life time จะทำหน้าที่รับประกันความเป็นปัจจุบันของข้อมูลในแต่ละเอนทรี เพื่อประโยชน์ในการลบเอนทรีที่ life time สิ้นสุดลงออกจาก received power table ต่อไป

ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างและการจัดการ received power table จากภาพเมื่อ A เริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทาง และ B ได้รับ RREQ จาก A เป็นครั้งแรก ในกรณีนี้ B จะเพิ่มเอนทรีใหม่ลงใน received power table ด้วยการเก็บข้อมูล IP address ของ A และ received power ขณะรับ

RREQ จาก A ลงในตาราง กำหนด status การส่ง RREQ ของ A เป็น valid และกำหนด life time ให้เอนทรีของ A โดยอาศัยกลไกเดียวกับการปรับปรุงตารางข้อมูลเส้นทาง (routing table) ใน AODV จากภาพเมื่อ A และ C ได้รับ RREQ ที่ถูกส่งต่อโดย B โหนดเหล่านี้จะเก็บข้อมูลของ B ลงในตารางด้วยกลไกเดียวกัน ก่อนที่ A จะไม่ส่งต่อ RREQ และ C จะส่ง RREQ ต่อไป



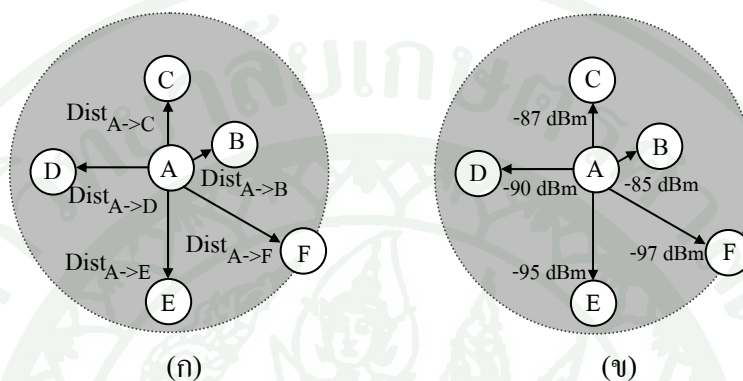
ภาพที่ 6 โครงสร้างและการจัดการตารางข้อมูลกำลังสัญญาณในโปรโตคอล AODV-DBF

3. ขั้นตอนวิธี DBF

DBF เป็นขั้นตอนวิธีที่กำหนดให้โหนดสามารถอนุมานระยะทางระหว่างตนเองกับเพื่อนบ้านได้จากความแรงสัญญาณขณะรับแพ็กเก็ต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากโมเดลการสูญเสียกำลังสัญญาณ (propagation loss model) จึงทำให้โหนดสามารถอนุมานระยะทางระหว่างตนเองกับเพื่อนบ้านได้โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ค้นหาตำแหน่ง เช่น GPS

ภาพที่ 7 แสดงการอนุมานระยะทางระหว่างโหนดโดยอาศัยการพิจารณาความแรงสัญญาณขณะรับ RREQ กำหนดให้ B, C, D, E และ F เป็นโหนดที่อยู่ภายในขอบเขตการส่งสัญญาณของ A ดังที่แรเงาไว้ในภาพ และ $Dist_{A \rightarrow B}$, $Dist_{A \rightarrow C}$, $Dist_{A \rightarrow D}$, $Dist_{A \rightarrow E}$ กับ $Dist_{A \rightarrow F}$ แทนระยะทางจาก A ไปยัง B, C, D, E และ F ตามลำดับ จากภาพเมื่อ B, C, D, E และ F ได้รับ RREQ จาก A โหนดเหล่านี้จะนำข้อมูลความแรงสัญญาณที่คำนวณได้จาก propagation loss model มาอนุมานระยะทางระหว่างตนเองกับ A จากภาพที่ 7 (ก) ถ้าเรียงลำดับระยะทางระหว่างโหนดจากมาก

ไปน้อยจะได้ว่า $Dist_{A \rightarrow F}$ มากกว่า $Dist_{A \rightarrow E}$, $Dist_{A \rightarrow D}$, $Dist_{A \rightarrow C}$ และ $Dist_{A \rightarrow B}$ ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันหากพิจารณาความแรงของสัญญาณตามภาพที่ 7 (ข) จะพบว่าโหนด F ได้รับความแรงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโหนด E, D, C และ B จึงสรุปได้ว่าค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจะแปรผกผันกับระยะทางระหว่างโหนด ดังนั้นโหนดที่อยู่ไกลจากโหนดผู้ส่งมากกว่าจะมีความแรงสัญญาณน้อยกว่า ในทางกลับกันจะมีความแรงสัญญาณมากกว่า



ภาพที่ 7 การอนุมาณระยะทางระหว่าง โหนด (ก) ระยะทางระหว่าง โหนด (ข) ความแรงสัญญาณขณะที่โหนดได้รับ RREQ

4. โพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF

AODV-DBF เป็นโพรโทคอลที่ได้นำขั้นตอนวิธี DBF มาปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ให้มีค่าใช้จ่ายน้อยลง เนื่องจากวิธีการส่ง RREQ โดยอาศัยกลไก flooding ใน AODV นั้นก่อให้เกิดความซ้ำซ้อนและการชนกันของแพ็คเก็ตจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดสูง หรือมีอัตราการเคลื่อนที่ของโหนดสูง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดความคับคั่งของข้อมูลภายในเครือข่าย และอาจกระทบต่อความสำเร็จในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอโพรโทคอล AODV-DBF ที่ได้นำกลไกการดักฟัง และจัดเก็บข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านมาช่วยลดค่าใช้จ่ายในเครือข่ายที่มีความถี่ของการค้นหาเส้นทางมากกว่า 1 ครั้งและรักษาโอกาสที่แพ็คเก็ตข้อมูลจะไปถึงทุกโหนดปลายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลักการทำงานของ AODV-DBF คือการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ในกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งที่ 2 เป็นต้นไป ด้วยการกำหนดให้โหนดที่มีระยะห่างจากโหนดก่อนหน้ามากที่สุดเท่านั้นที่สามารถส่งต่อ RREQ ได้ โดยกลไกที่ใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลไกหลักคือ กลไกการดักฟัง RREQ จากโหนดเพื่อนบ้าน และกลไกการจัดเก็บข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประเมินสถานะการส่ง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านลงใน received power table

โหนดที่ทำงานในโปรโตคอล AODV-DBF จะคอยประเมินสถานะการส่งต่อ RREQ ในรอบถัดไปจากโหนดเพื่อนบ้าน โดยใช้การดักฟัง RREQ ซึ่งสถานะของโหนดเพื่อนบ้านอาจถูกประเมินให้อยู่ในสถานะ valid หรือ non-valid ขึ้นอยู่กับว่าโหนดที่ได้รับ RREQ ควรมีส่วนร่วมในกระบวนการส่งต่อเพื่อเกิดให้กับโหนดก่อนหน้า หรือโหนดเพื่อนบ้านของตัวเองหรือไม่ ถ้าโหนดได้รับ RREQ จากเพื่อนบ้านที่มีสถานะ valid โหนดจะส่งต่อ RREQ ให้ แต่ถ้าโหนดได้รับ RREQ จากเพื่อนบ้านที่มีสถานะเป็น non-valid โหนดก็จะไม่ส่งต่อ RREQ ให้ แต่จะยังคงประเมินสถานะการรับส่ง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้าน และบำรุงรักษาสถานะปัจจุบันของเพื่อนบ้านด้วยการดักฟังอยู่ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งแต่ละโหนดในเครือข่ายอาจสามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ให้กับเพื่อนบ้านได้หลายโหนด โดยโหนดอาจเปลี่ยนสถานะของโหนดเพื่อนบ้านไปมาระหว่าง valid และ non-valid ได้เมื่อสภาพการจัดเรียงตัวของโหนดในเครือข่ายเปลี่ยนแปลงไป หรือได้ยิน RREQ จากโหนดอื่นในเครือข่ายที่เหมาะสมในการส่งต่อ RREQ ให้กับโหนดเพื่อนบ้านมากกว่าตนเอง

RREQ ใน AODV-DBF จะมีข้อมูลเพิ่มเติมจาก RREQ ของโปรโตคอล AODV คือหมายเลขของโหนดก่อนหน้า (previous node IP address หรือ *Prev. node ID*) และความแรงของสัญญาณที่โหนดก่อนหน้าได้รับ (previous node received power หรือ *Rx Power*) แต่ละโหนดใน AODV-DBF เมื่อได้ยิน RREQ จากเพื่อนบ้านจะจัดเก็บข้อมูลเหล่านี้ไว้ใน received power table เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงข้อมูลสถานะของโหนดเพื่อนบ้านต่อไป

ภาพที่ 8 แสดงขั้นตอนวิธีของโปรโตคอล AODV-DBF สมมติให้ i แทนโหนดใดๆ ที่ได้รับ RREQ จากภาพเมื่อ i ได้รับ RREQ แล้ว i จะตรวจสอบ received power table ของตนเองว่ามีเอนทรีของ previous node (โหนดในฮอปที่ผ่านมา) อยู่หรือไม่ ถ้ามีจะปรับปรุงข้อมูล *Rx Power* และ *Life Time* ในทางกลับกันจะเพิ่มเอนทรีใหม่ลงในตาราง และกำหนด *Status* การส่งต่อ RREQ ให้มีค่าเป็น valid จากนั้น i จะนำข้อมูล *Prev. node ID* จาก RREQ มาเปรียบเทียบกับข้อมูล

Prev. node ID ใน received power table ของตนเอง หาก *i* มีข้อมูลของ *Prev. node ID* เดียวกันกับใน RREQ อยู่ภายใน received power table แล้ว *i* จะนำ *Rx Power* จาก RREQ มาเปรียบเทียบกับ *Rx Power* ของเอนทรีที่เพิ่งค้นพบ ถ้า *Rx Power* จาก RREQ มีค่าน้อยกว่า และ *Status* ของเอนทรีมีค่าเป็น valid แล้ว *i* จะเปลี่ยนสถานะการส่งต่อ RREQ ของเอนทรีที่เพิ่งค้นพบให้เป็น non-valid เพื่อหยุดการส่งต่อ RREQ ให้กับ *Prev. node ID* ที่มี *Status* เป็น non-valid ในกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งถัดไป เนื่องจาก *i* พบว่ามีโหนดเพื่อนบ้านอื่นที่มีระยะทางห่างจาก *Prev. node ID* ดังกล่าวมากกว่า และเหมาะสมในการส่งต่อ RREQ มากกว่าตนเอง แต่ในทางกลับกันถ้า *Rx Power* จาก RREQ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าใน received power table และ *Status* ของเอนทรีมีค่าเป็น non-valid แล้ว *i* จะเปลี่ยน *Status* การส่งต่อ RREQ ของเอนทรีที่เพิ่งค้นพบให้มีค่าเป็น valid เนื่องจาก *i* มีระยะทางห่างจาก *Prev. node ID* ดังกล่าวไม่น้อยกว่าโหนดเพื่อนบ้านจึงควรมีโอกาสในการส่ง RREQ เช่นกัน หลังจากกระบวนการจัดการข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับการประเมินสถานะ

AODV-DBF algorithm

```

if ( i received RREQ packet ) {
  if previous node is not in received power table {
    insert new entry and Status ← valid }
  else {
    update Rx Power and Life Time in received power table }
  if Prev. node ID from RREQ is in received power table {
    if ( Rx Power from RREQ < Rx Power from received power table ) && ( Status == valid ) {
      Status ← non-valid }
    else if ( Rx Power from RREQ >= Rx Power from received power table ) && ( Status == non-valid ) {
      Status ← valid } }
  if ( i received new RREQ ) && ( Status == valid ) {
    update Prev. node ID and Rx Power in RREQ
    rebroadcast RREQ }
  else {
    drop RREQ } }
else {
  if ( i received HELLO or RREP ) {
    if Prev. node ID is in received power table {
      update Rx Power and Life Time in received power table } } }

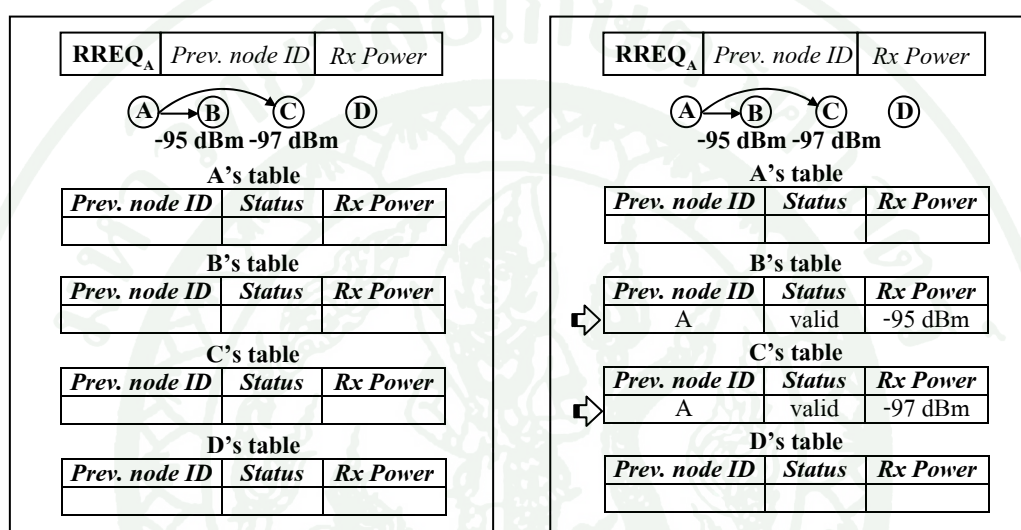
```

ภาพที่ 8 ขั้นตอนวิธีของโปรโตคอล AODV-DBF

การส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านสิ้นสุดลง โหนด i ที่ได้รับ RREQ ใหม่ (i ไม่เคยได้รับ RREQ ที่มี ID นี้มาก่อน) และมี Status การส่ง RREQ ของโหนดในฮอปที่ผ่านมาเป็น valid จะแทนที่ข้อมูลใน RREQ ด้วยข้อมูลของตนเองก่อนส่งต่อไปยังโหนดในฮอปถัดไป ในโพรโทคอล AODV-DBF นอกจาก i จะสามารถปรับปรุงข้อมูลใน received power table จากการได้ยิน RREQ แล้ว ในกรณีที่ i ได้ยินข้อความทักทาย (hello message) หรือ RREP โหนด i ยังสามารถปรับปรุงข้อมูล Rx Power และ Life Time เพื่อประโยชน์ในการสะท้อนความเป็นปัจจุบันของข้อมูลใน received power table ได้อีกด้วย

รูปที่ 9 แสดงกลไกการดักฟัง RREQ ใน AODV-DBF จากรูปกำหนดให้ A แทนโหนดต้นทาง และ B, C กับ D แทนโหนดระหว่างทาง จากรูปที่ 9 (ก) เมื่อ A เริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางด้วยการกระจาย RREQ ไปยังโหนดเพื่อนบ้าน และ B กับ C ซึ่งอยู่ภายในรัศมีการแพร่สัญญาณของ A ได้รับ RREQ จาก A เป็นครั้งแรก ในรูปที่ 9 (ข) B และ C จะเก็บ ID ของ A และ received power ขณะรับ RREQ จาก A ลงในตาราง กำหนด Status การส่งต่อ RREQ ของ A ให้เป็น valid และนำข้อมูลจาก RREQ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางของตนเอง แต่เนื่องจาก A เป็นโหนดแรกของกระบวนการส่งต่อ RREQ ในแฟล็กเก็ตของ RREQ จึงไม่มีข้อมูล Prev. node ID และ Rx Power ที่ B และ C จะนำมาเปรียบเทียบกับตารางของตนเองได้ B และ C จึงแทนที่ข้อมูลใน RREQ ด้วย ID ของ A และ received power ของการรับ RREQ จาก A และกระจาย RREQ ต่อไป จากรูปที่ 9 (ค) เมื่อ A, C และ D ได้ยิน RREQ ที่ถูกส่งต่อโดย B แล้ว A กับ C จะไม่ส่งต่อ RREQ ที่ได้รับ แต่ทุกโหนดจะจัดเก็บข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับการประเมินสถานะ และนำข้อมูลใน RREQ ที่เพิ่งได้รับ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางของตนเอง ดังที่เรเงาในรูป เมื่อ C เคยได้ยิน RREQ จาก Prev. node ID เดียวกับ B (C พบเอนทรีของ A ซึ่งตรงกับ Prev. node ID จาก RREQ ของ B) และ Status ของ A เป็น valid แล้ว C จะนำข้อมูล Rx Power จาก RREQ ของ B มาเปรียบเทียบกับ Rx Power ในเอนทรีของ A หลังการเปรียบเทียบ เมื่อ C พบว่าตนเองได้รับ RREQ จาก A ด้วย Rx Power น้อยกว่าที่ B ได้รับ นั่นคือ C อยู่ห่างจาก A มากกว่า B ในกรณีนี้ C จะไม่เปลี่ยน Status การส่งต่อ RREQ ในเอนทรีของ A ในรูปที่ 9 (ง) เมื่อ C ส่งต่อ RREQ (ที่ได้รับจาก A) ไปถึง A, B และ D หลังจากทุกโหนดจัดเก็บข้อมูลที่เป็นต่อการประเมินสถานะ และเปรียบเทียบข้อมูลใน RREQ กับตารางของตนเองเรียบร้อยแล้ว B ซึ่งเคยได้ยิน RREQ จาก Prev. node ID เดียวกับ C (B มีเอนทรีของ A ซึ่งตรงกับ Prev. node ID จาก RREQ ของ C) จะนำข้อมูล Rx Power ขณะที่ C และตนเอง ได้รับ RREQ จาก A มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เรเงาในรูป จากรูปที่ 9 (จ) เมื่อ B พบว่าตนเองได้รับ RREQ จาก A ด้วย Rx Power มากกว่าที่ C ได้รับจาก A นั่นคือ B อยู่ห่างจาก A น้อยกว่า C ดังนั้น B จึงเปลี่ยนสถานะการส่งต่อ RREQ ในเอนทรีของ A ให้เป็น non-valid ในรูปที่ 9 (ฉ) และ (ช) เมื่อ D

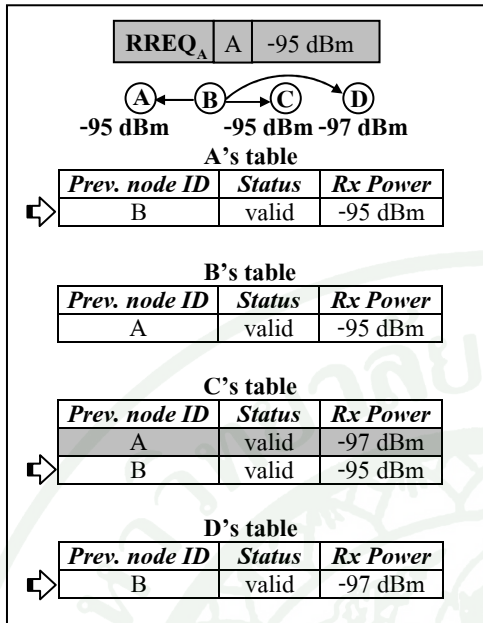
ส่งต่อ RREQ ที่ได้รับจาก B ทุกโหนดที่ได้ยิน RREQ จาก D จะจัดเก็บ และเปรียบเทียบข้อมูลที่จำเป็นต่อการประเมินสถานะด้วยกลไกเดียวกัน ในรูปที่ 9 (ข) หลังจากกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งแรกสิ้นสุดลง และ A ต้องการส่ง RREQ ใหม่อีกครั้ง จะมีเพียง C และ D เท่านั้นที่เลือกจะส่งต่อ RREQ ของ A สำหรับ B จะเลือกไม่ส่งต่อ RREQ ของ A เพราะตนเองมี Status การส่ง RREQ ต่อจาก A เป็น non-valid แต่ B จะยังคงดักฟัง RREQ จากโหนดเพื่อนบ้าน เพื่อประโยชน์ในการประเมิน Status ต่อไป



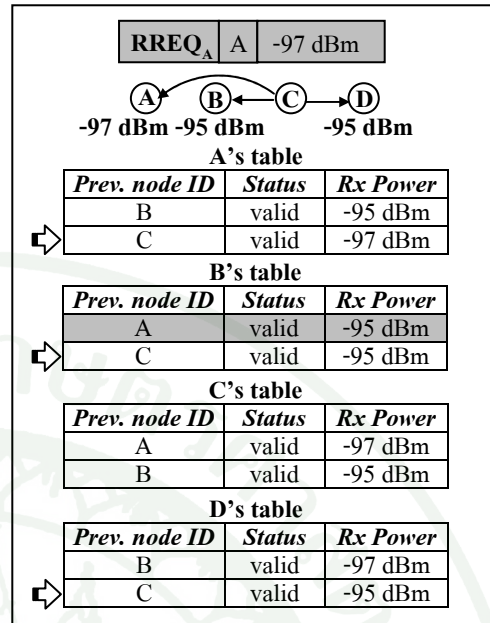
(ก) A กระจาย RREQ

(ข) B และ C ได้รับ RREQ

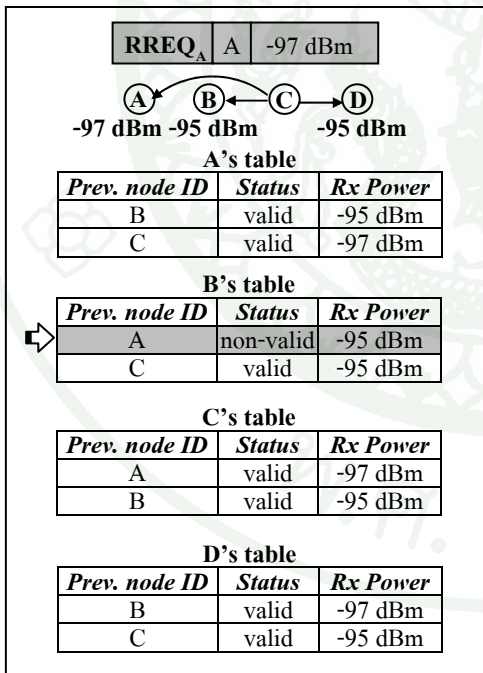
ภาพที่ 9 กลไกการดักฟัง RREQ ใน AODV-DBF โดย ← หมายถึง การส่ง RREQ, ⇨ หมายถึง เอนทรีที่เพิ่งถูกปรับปรุง และ □ หมายถึง ข้อมูลที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ



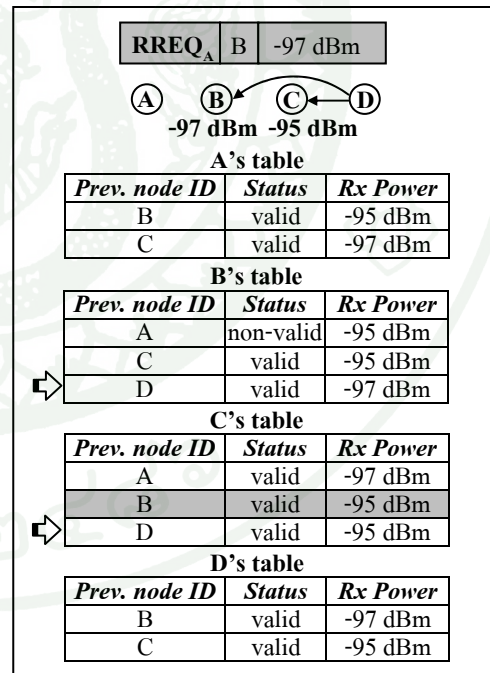
(ค) B สังกัด RREQ ของ A



(ง) C สังกัด RREQ ของ A

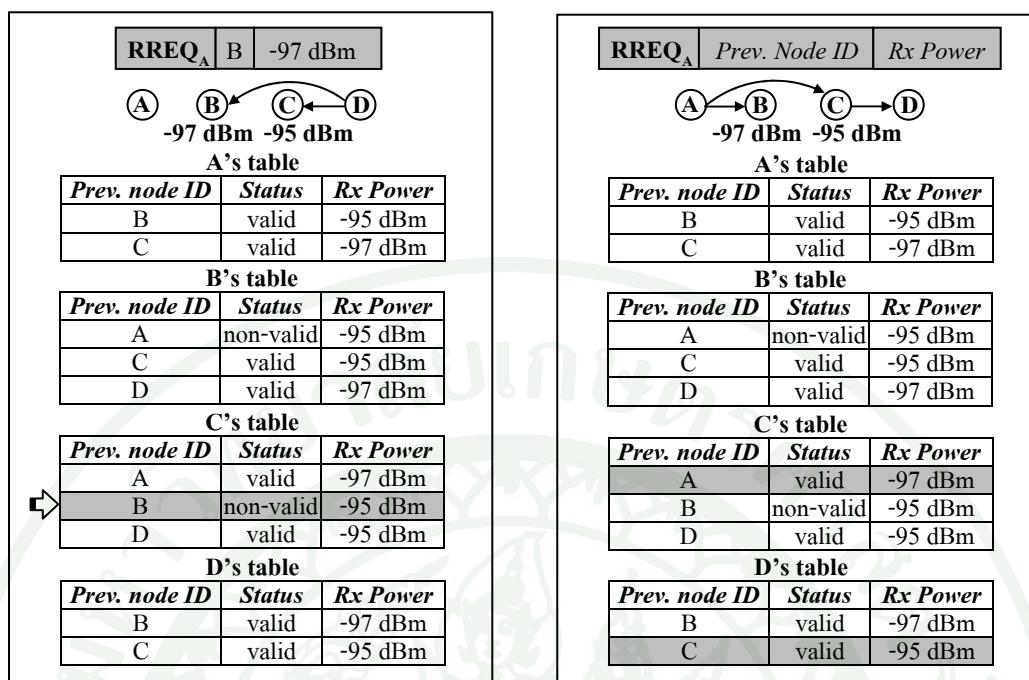


(จ) B ปรับปรุง status ของ A



(ฉ) D สังกัด RREQ ของ B

ภาพที่ 9 (ต่อ)



(ข) C ปรับปรุง status ของ B

(ง) การค้นหาเส้นทางของ A ครั้งถัดไป

ภาพที่ 9 (ต่อ)

การวางแผนการทดลอง

1. เครื่องมือจำลองเครือข่าย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS3 เพื่อจำลองเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจและทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ศึกษา โดย NS3 เป็นโปรแกรมจำลองเครือข่ายแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete event network simulator) ที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 (Ikeda *et al.*, 2011) และถูกนำไปใช้ในการศึกษาและวิจัยอย่างกว้างขวาง เนื่องจากโปรแกรม NS3 ได้รับการพัฒนาพื้นฐานการทำงานของเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจไว้อย่างครบถ้วนและสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่มีเสียดำค่าใช้จ่าย ในปัจจุบันยังคงมีกลุ่มของนักวิจัยที่พัฒนา เผยแพร่และใช้งานโปรแกรม NS3 อย่างต่อเนื่อง NS3 จึงเป็นโปรแกรมจำลองเครือข่ายทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ความสะดวก และให้อิสระกับผู้ใช้งานในการเขียนโปรแกรมจำลองด้วยโปรแกรมภาษา C++ หรือ Python นอกจากนั้น NS3 ยังมีรูปแบบของผลลัพธ์ที่สามารถใช้ในการติดตามพฤติกรรมของเครือข่ายหลายรูปแบบ เช่น รูปแบบไฟล์ pcap ที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า tcpdump หรือ wireshark เป็นต้น ปัจจุบันมี

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางจำนวนมากที่ได้ถูกพัฒนาไว้บน NS3 เช่น ใน ค.ศ. 2007, Carneiro ได้พัฒนาโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง OLSR ใน ค.ศ. 2010, Narra and Cheng ได้พัฒนาโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง DSDV และใน ค.ศ. 2009, Buchatskaia และ Boyko ได้พัฒนาโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV ที่ไม่มีกลไก ERS บนพื้นฐานของ RFC 3561 (Perkins *et al.*, 2003) ด้วยโปรแกรมภาษา C++ โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนากลไก ERS เพิ่มในกระบวนการทำงานของ AODV และเป็นโปรแกรมส่วนหนึ่งที่จะถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ด้วย

2. การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ AODV ที่ใช้เทคนิค flooding ของ RREQ (AODV-Flood) และที่ใช้เทคนิค ERS (AODV-ERS) กับ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค flooding (AODV-DBF-Flood) และที่ใช้เทคนิค ERS (AODV-DBF-ERS) ซึ่งมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

2.1 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF

AODV-DBF เป็นโพรโทคอลที่ได้นำขั้นตอนวิธี DBF มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการกระจาย RREQ ของ AODV เพื่อแสดงประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล AODV และ AODV-DBF ในด้านต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 โพรโทคอลที่ใช้ในการทดลอง

ก. AODV (Ad hoc On demand Distance Vector Routing Protocol)

ข. AODV-DBF (AODV-Distance Based Flooding)

2.1.2 เทคนิคการส่งแพ็คเก็ตที่ใช้ในการทดลอง

ก. Flooding

ข. ERS (Expanding Ring Search)

2.1.3 ค่าคงที่ ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลองสามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่สำหรับการทดลองโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF

ค่าคงที่	ค่า
ขอบเขตของเครือข่าย	1000 × 1000 เมตร ²
รัศมีของการส่งสัญญาณ	250 เมตร
รูปแบบการส่งข้อมูล	Constant Bit Rate (UDP)
ขนาดของแพ็คเก็ตข้อมูล	512 ไบต์
อัตราการส่งข้อมูล	4 แพ็คเก็ตต่อวินาที
รูปแบบตำแหน่งของโหนด	Random
รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนด	Random Waypoint
รูปแบบการสูญเสียกำลังสัญญาณ	Two-Ray Ground
ความเร็วต่ำสุดของโหนด	0 เมตรต่อวินาที
ความเร็วสูงสุดของโหนด	5 เมตรต่อวินาที
เวลาในการจำลองเครือข่าย	300 วินาที
จำนวนครั้งของการทดลอง	5 ครั้ง

2.1.4 ค่าตัวแปร มีค่าพื้นฐานในการทดลองอยู่ที่จำนวนโหนด 50 โหนด จำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต 5 โหนด และโหนดไม่เคลื่อนที่ (0 เมตรต่อวินาที)

ก. จำนวนโหนดในเครือข่าย

1) 30 โหนด

2) 40 โหนด

3) 50 โหนด

ข. จำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต

1) 1 โหนด

2) 2 โหนด

3) 3 โหนด

4) 4 โหนด

5) 5 โหนด

ค. เวลาหยุดเคลื่อนที่ (pause time)

1) 0 วินาที

2) 50 วินาที

3) 150 วินาที

4) 200 วินาที

5) 250 วินาที

6) 300 วินาที

2.1.5 รูปแบบการทดลอง

ก. การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโพรโทคอล AODV และ AODV-DBF ในเครือข่ายที่โหนดต้นทางมีการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเดียวตลอดระยะเวลาการจำลอง ดังนั้นในกรณีที่ไม่เกิดการขาดของลิงก์จากการเคลื่อนที่ของโหนด หรือไม่เกิดการ invalidate เส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากการที่โหนดบนเส้นทางหลัก (active route) ไม่สามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ โหนดต้นทางจะใช้เส้นทางแรกที่ค้นพบจากกระบวนการค้นหาเส้นทางในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเดิมตลอดการทดลอง

ข. การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางมีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโพรโทคอล AODV และ AODV-DBF ในเครือข่ายที่กำหนดให้โหนดต้นทางส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางใหม่ในทุกๆ 100 วินาที นั่นหมายความว่าในแต่ละการทดลองโหนดต้นทางจะมีความถี่ในการค้นหาเส้นทางมากกว่า 1 ครั้ง แม้ในการทดลองนั้นจะไม่เกิดการขาดของลิงก์จากการเคลื่อนที่ของโหนด หรือไม่เกิดการ invalidate เส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากการที่โหนดบนเส้นทางหลักไม่สามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้

3. การวัดประสิทธิภาพ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV และ AODV-DBF ในสภาพเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การวัดประสิทธิภาพมีความครอบคลุมและชัดเจนจึงใช้มาตรวัดประสิทธิภาพดังนี้

3.1 Packet delivery ratio คือ อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจข้อมูลของโหนดปลายทาง ซึ่งสามารถวัดได้จากจำนวนแพ็คเกจทั้งหมดที่โหนดปลายทางได้รับเทียบกับจำนวนแพ็คเกจที่ส่ง โดยโหนดต้นทางทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Packet delivery ratio} = \frac{\text{จำนวนแพ็คเกจทั้งหมดที่โหนดปลายทางได้รับ}}{\text{จำนวนแพ็คเกจที่ส่งโดยโหนดต้นทาง}} \quad (2)$$

3.2 Routing overhead คือ ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งสามารถวัดได้จากขนาดของแพ็คเกจควบคุมทั้งหมดเทียบกับขนาดแพ็คเกจข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Routing overhead} = \frac{\text{ขนาดของแพ็คเกจควบคุมทั้งหมด}}{\text{ขนาดของแพ็คเกจข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับ}} \quad (3)$$

3.3 Routing delay คือ เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โดยเวลานี้เกิดจากความล่าช้าตั้งแต่เริ่มต้นส่งแพ็คเกจร้องขอเส้นทางจนกระทั่งโหนดต้นทางได้รับแพ็คเกจตอบกลับเส้นทางแรก

3.4 Average end-to-end data delay คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

ผลและวิจารณ์

ผล

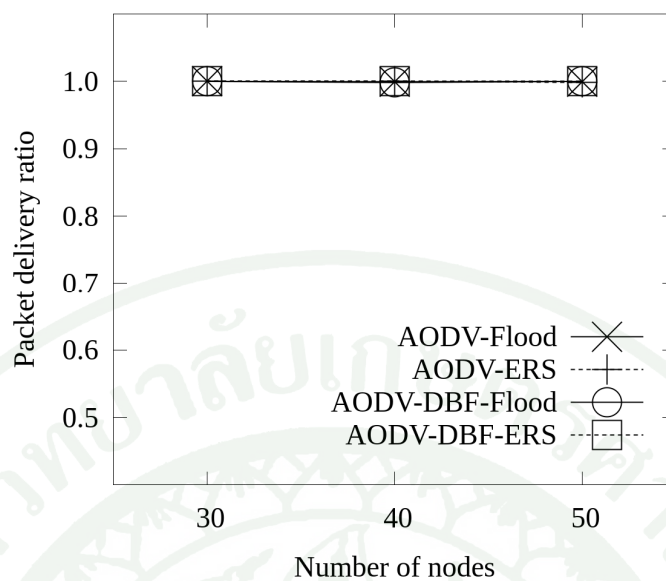
1. การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย

การทดลองแรกเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โพรโทคอลในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดในช่วง 30, 40 และ 50 โหนด มีโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต 5 โหนด และทุกโหนดไม่เคลื่อนที่

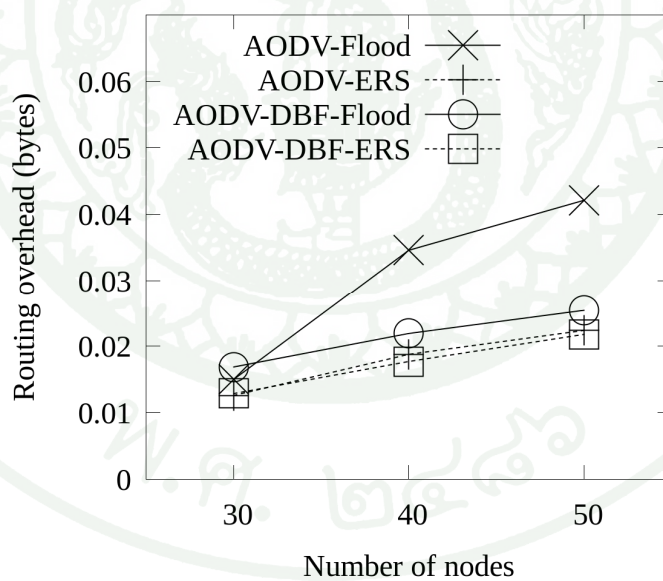
1.1 การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง

ภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าโหนดต้นทางของ AODV และ AODV-DBF ที่ใช้กลไก flooding และ ERS สามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปถึงโหนดปลายทางได้อย่างครบถ้วน จึงทำให้โพรโทคอลทั้งคู่มีอัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลไม่แตกต่างกัน แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายให้เพิ่มขึ้นก็ตาม สาเหตุที่ AODV-DBF ไม่มีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลที่มากกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากไม่เกิดการขาดของลิงค์ระหว่างการจำลอง จึงทำให้ตลอดการทดลองมีการค้นหาเส้นทางเพียงครั้งเดียว ความหนาแน่นของโหนดจึงไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูล ในกรณีที่ทุกโหนดไม่มีการเคลื่อนที่ และมีจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต 5 โหนด

ภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางจะสะท้อนให้เห็นถึงจำนวนโหนดที่เข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทาง จากภาพในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดสูง AODV ที่ใช้เทคนิค flooding จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางสูงกว่า AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค flooding อย่างชัดเจน เนื่องจากกลไก flooding ที่นำมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ทำให้มีโหนดจำนวนมากที่เข้าร่วมการส่งต่อ RREQ ซึ่งแตกต่างจาก AODV-DBF ที่ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อ RREQ น้อยกว่า จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับกรณี ERS โพรโทคอลทั้งคู่จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางไม่แตกต่างกันมากนัก สาเหตุเนื่องมาจากกลไกการทำงานของ ERS ที่จะขยายขอบเขตการส่ง RREQ ออกไปที่ละน้อย เมื่อไม่พบโหนดปลายทางภายใน ring ที่กำหนด



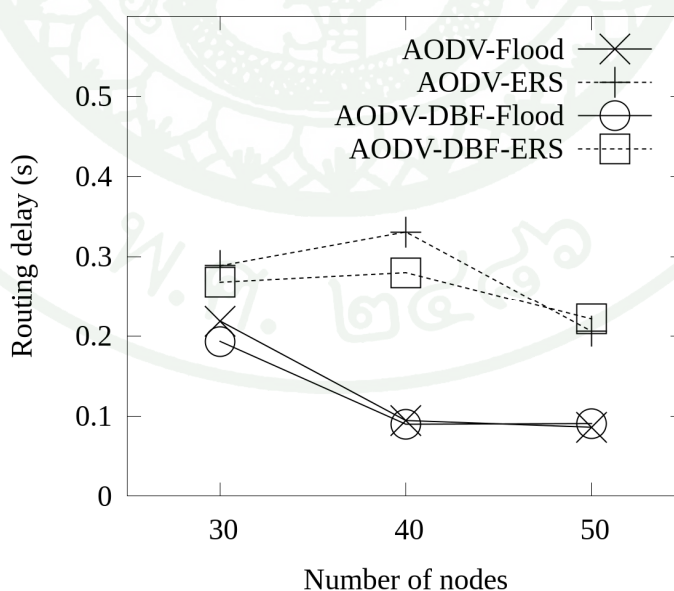
ภาพที่ 10 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด



ภาพที่ 11 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

ภาพที่ 12 แสดงให้เห็นถึงเวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โดยเวลานี้จะสะท้อนความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย นั่นคือถ้าเครือข่ายมีแพ็คเก็ตที่ถูกกระจายเป็นจำนวนมาก จะทำให้แพ็คเก็ตมีโอกาสชนกันมากขึ้น การตอบรับเส้นทางจึงทำได้ช้าลง ดังนั้นหากโหนดในเครือข่ายเข้าร่วมกระบวนการส่งต่อ RREQ น้อยลง จะลดความคับคั่งของข้อมูล และลดโอกาสเกิดการชนกันของ RREQ ได้ ทำให้โหนดปลายทางมีโอกาสได้รับ RREQ และตอบกลับ RREP ไปยังโหนดต้นทางได้รวดเร็วขึ้นด้วย จากภาพจะพบว่าโปรโตคอลที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากกลไกการขยายขอบเขต ring ของ ERS ที่โหนดต้นทางจะขยายขอบเขตการส่ง RREQ ออกไปที่ละน้อยหากไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในเวลาที่กำหนด ทำให้โหนดต้นทางใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางมากขึ้นดังที่แสดงไว้ในภาพ

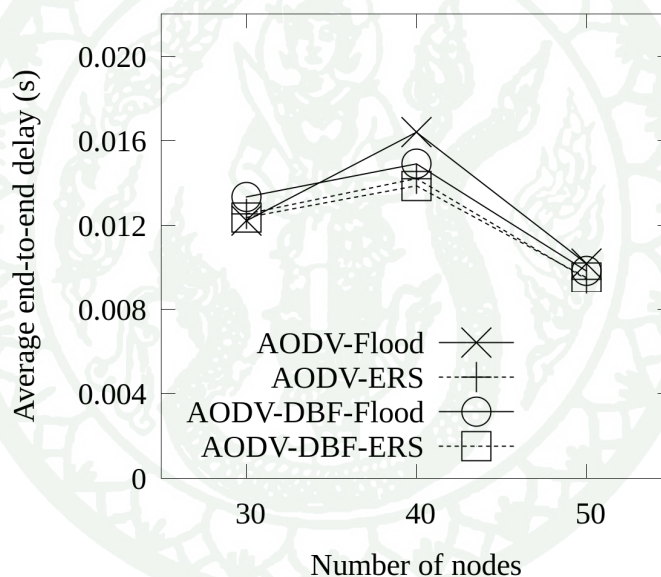
ในกรณี flooding โปรโตคอล AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV อย่างชัดเจนเมื่อความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะทำให้จำนวนของแพ็คเก็ตเกิดในเครือข่าย และการชนกันของ RREQ ลดลง ส่งผลให้การตอบรับเส้นทางมีโอกาสทำได้เร็วขึ้น สำหรับกรณี ERS โปรโตคอล AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV ดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่า กลไกการขยายขอบเขตการกระจาย RREQ ของ ERS ที่จะขยายจำนวนฮอปในการค้นหาเส้นทาง



ภาพที่ 12 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

ไปที่ละน้อย เมื่อไม่พบโหนดปลายทางหรือไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในระยะเวลาที่กำหนด ในกระบวนการนี้โหนดต้นทางจึงใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางเพิ่มขึ้น การนำเทคนิคการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาช่วยลดจำนวนโหนดที่เข้าร่วมในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF จึงช่วยลดความซ้ำซ้อนของ RREQ และช่วยเพิ่มโอกาสให้โหนดที่อยู่ใกล้ขอบ ring สามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ได้ เวลาในการค้นหาเส้นทางโดยเฉลี่ยของ AODV-DBF จึงมีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จาก AODV อย่างไรก็ตามเนื่องจากโหนดในการทดลองถูกวางอย่างสุ่ม AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS จึงอาจมีโอกาใช้เวลาในการค้นหาเพิ่มขึ้นจาก AODV ที่ใช้เทคนิค ERS เล็กน้อย ในกรณีที่โหนดในเครือข่ายมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดการ partition ของโหนดในเครือข่าย ซึ่งจะทำให้โหนดที่ถูกเลือกให้ทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ สามารถกระจาย RREQ ให้ครอบคลุมทุกโหนดภายใน ring ของ ERS ได้ช้ากว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV ที่ทุกโหนดใน ring จะสามารถส่งต่อ RREQ ได้ โดยการกระจายตัวของโหนดจะมีโอกาสส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ AODV-DBF น้อยลง หากมีการสุ่มตัวอย่างในการจำลองเพิ่มมากขึ้น

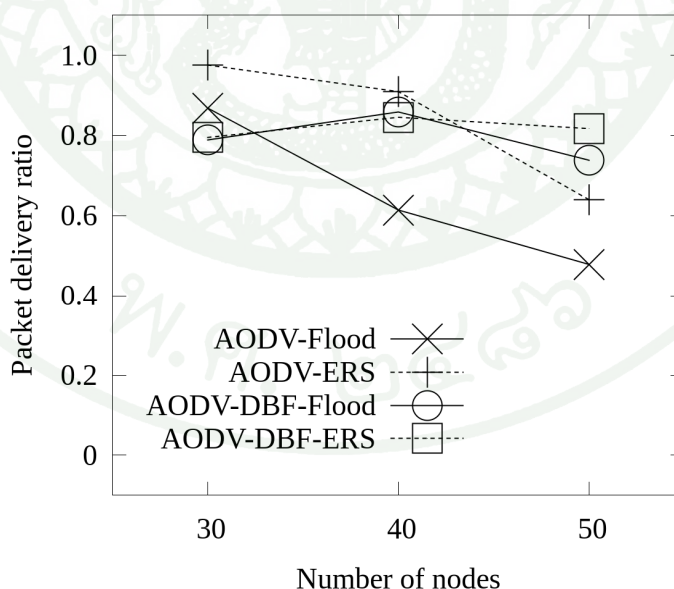
ภาพที่ 13 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง โดยเวลานี้จะสะท้อนคุณภาพเส้นทางในการส่งข้อมูลที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทาง และสะท้อนให้เห็นถึงความคับคั่งในการใช้ช่องสัญญาณของแต่ละโหนดด้วย จากภาพเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดมากขึ้น AODV-DBF จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย จึงช่วยให้แต่ละโหนดสามารถส่งแพ็คเก็ตได้สะดวกมากขึ้น และเส้นทางที่ได้จาก AODV-DBF จะเป็นเส้นทางที่มีจำนวนฮอปโดยเฉลี่ยน้อยกว่าที่ได้จาก AODV จึงส่งผลให้แพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสไปถึงโหนดปลายทางได้เร็วขึ้น นอกจากนี้โหนดต้นทางของ AODV-DBF ยังใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางที่น้อยกว่า ทำให้โหนดต้นทางมีโอกาสเริ่มต้นกระบวนการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลได้เร็วกว่าด้วย



ภาพที่ 13 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

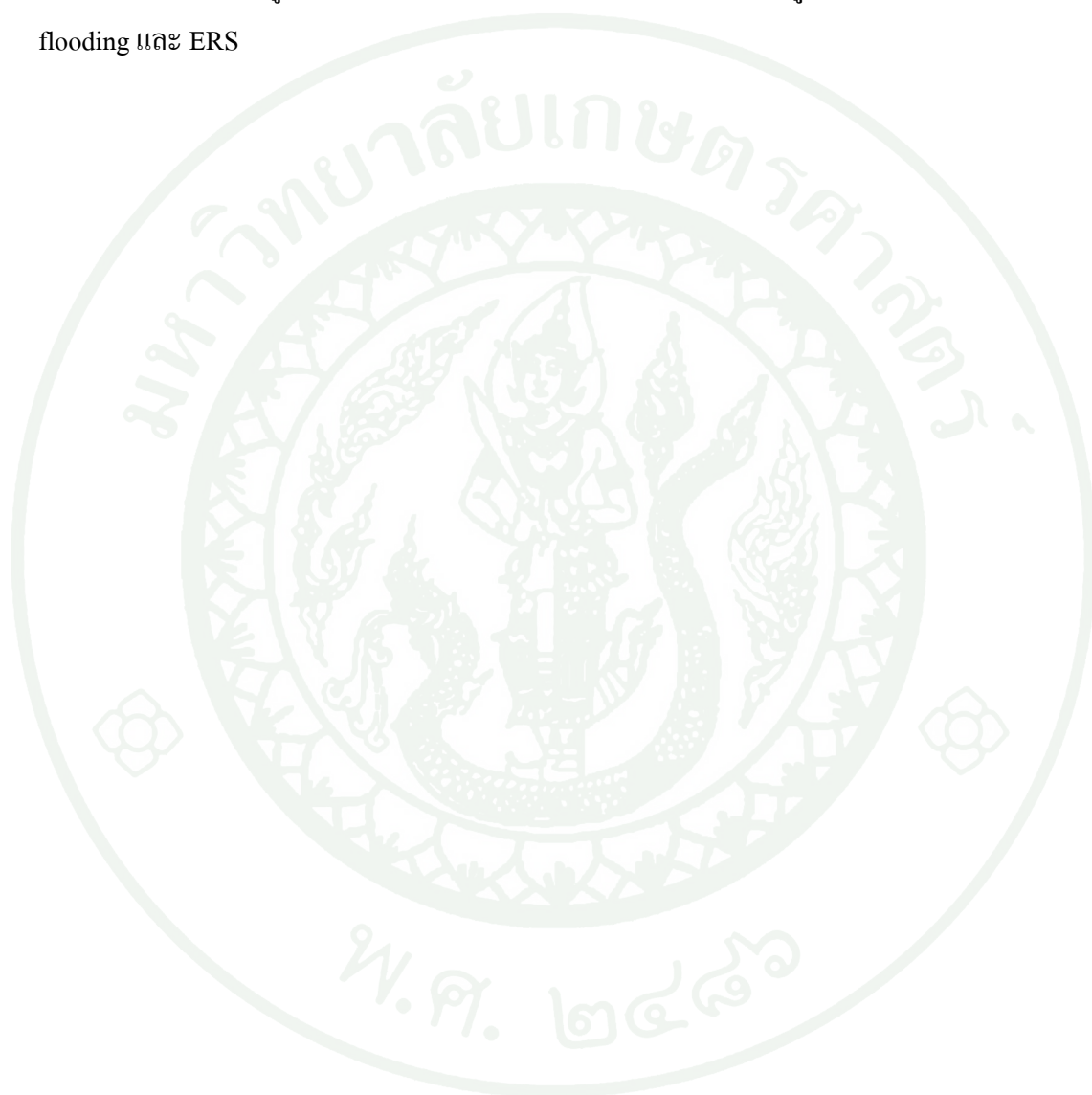
1.2 การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางมีการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง

ภาพที่ 14 แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่กำหนดให้โหนดต้นทางสามารถเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางได้ระหว่างการจำลอง จะทำให้มีจำนวนครั้งของการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้น ในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดน้อย AODV-DBF จะมีอัตราการได้รับแพ็คเกจข้อมูลน้อยกว่า AODV เนื่องจากลักษณะการวางโหนดอย่างสุ่ม อาจส่งผลให้การกระจายตัวของโหนดในเครือข่ายไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดการ partition ของโหนดในเครือข่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดน้อย นอกจากนั้นกระบวนการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะทำให้โหนดที่สามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ได้ในรอบถัดไปมีจำนวนไม่เพียงพอ หากโหนดที่มีสถานะการส่ง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านเป็น valid ได้รับ RERR และต้อง invalidate เส้นทางที่ไม่สามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ ในขณะที่เอนทรีของโหนดเพื่อนบ้านอื่นที่ไม่ได้ถูก invalidate เส้นทางไม่สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจส่ง RREQ ได้เพราะเอนทรีของโหนดเพื่อนบ้านเหล่านี้ยังมีสถานะการส่ง RREQ เป็น non-valid และ life time ในเอนทรียังไม่สิ้นสุดลง เมื่อโหนดต้นทางไม่สามารถค้นหาเส้นทางอื่นเพื่อส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังปลายทางได้ อัตราการได้รับแพ็คเกจข้อมูลของโหนดปลายทางใน AODV-DBF จึงลดลงดังแสดงในภาพ ต่อเมื่อความ

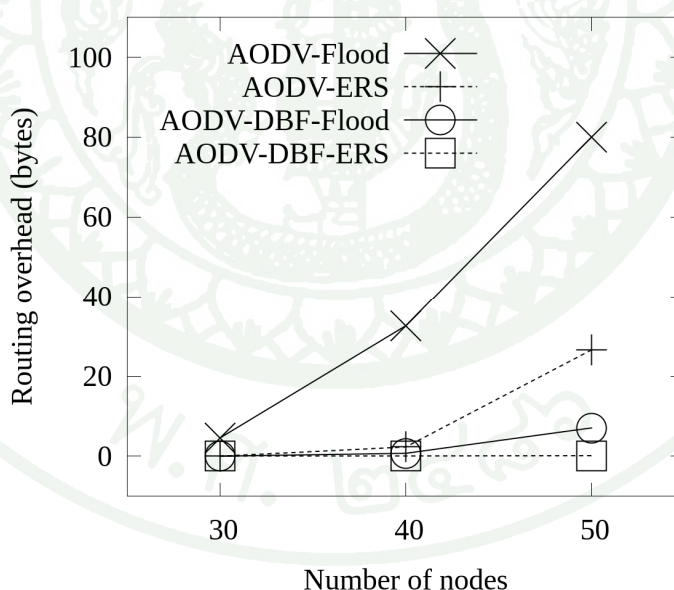


ภาพที่ 14 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเกจข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่าย ตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

หนาแน่นของโหนดในเครือข่ายเพิ่มขึ้น แต่ละโหนดในเครือข่ายจะมีความหลากหลายของโหนดเพื่อนบ้านมากขึ้น AODV-DBF จะแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV อย่างชัดเจน เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย ลดการแย่งใช้ช่องสัญญาณ และลดโอกาสเกิดการชนกันของแพ็คเก็ต ส่งผลให้ AODV-DBF มีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดสูงกว่า AODV ทั้งในกรณี flooding และ ERS

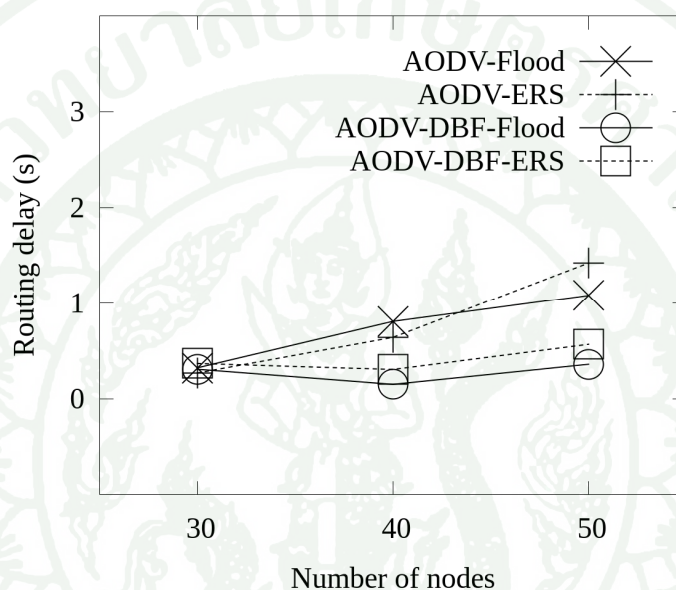


ภาพที่ 15 แสดงให้เห็นถึงค่าใช้จ่ายที่แต่ละโพรโทคอลใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง โดยค่าใช้จ่ายนี้สะท้อนให้เห็นถึงจำนวนโหนดที่เข้าร่วมกระบวนการส่งต่อ RREQ จากภาพในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดสูงขึ้น AODV จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางสูงกว่า AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS อย่างชัดเจน เนื่องจากกลไก flooding ที่นำมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ทำให้มีโหนดจำนวนมากที่เข้าร่วมการส่งต่อ RREQ ซึ่งแตกต่างจาก AODV-DBF ที่ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อ RREQ น้อยกว่า จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ ERS ในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดสูง กลไกการขยายขอบเขต ring ของ ERS ที่มีโหนดต้นทางเป็นจุดเริ่มต้นในการกระจาย RREQ ทุกครั้งเมื่อไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในเวลาที่กำหนดนั้น จะทำให้เกิดความซ้ำซ้อนกันของ RREQ ที่ถูกกระจายไปยังเครือข่ายซึ่งแตกต่างกับ AODV-DBF ที่ได้นำเทคนิคการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ทำให้ในการขยายขอบเขตของ ring แต่ละครั้งนั้น มีโอกาสมากขึ้นที่โหนดที่ส่ง RREQ จะอยู่ใกล้กับขอบ ring ของ ERS โพรโทคอล AODV-DBF จึงสามารถขยายขอบเขต ring โดยอาศัยจำนวนโหนดที่ส่ง RREQ น้อยกว่า จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางลดลงตามไปด้วย



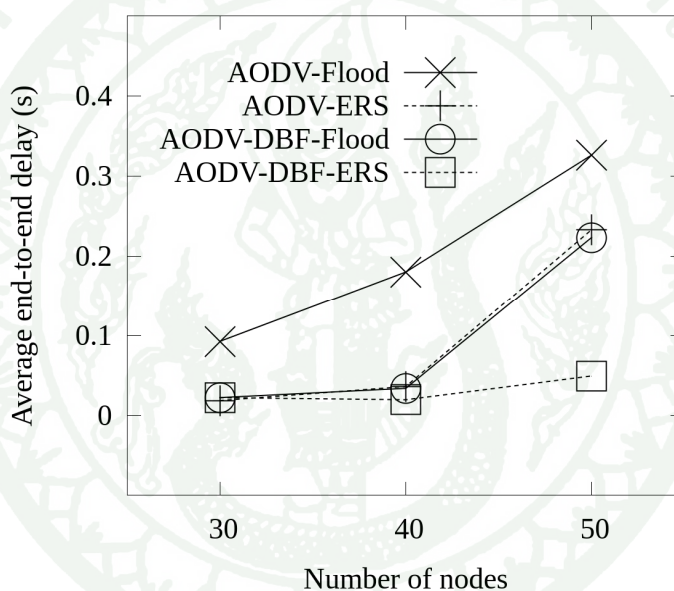
ภาพที่ 15 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดในเครือข่ายตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

ภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดเพิ่มขึ้น AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV ทั้งในกรณี flooding และ ERS อย่างชัดเจน เนื่องจากกลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลด RREQ ที่ถูกกระจายไปยังเครือข่ายโดยไม่จำเป็น ส่งผลให้ความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย และการแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนดลดลง เมื่อโอกาสเกิดการชนกันของแพ็คเก็ตลดลง การรับส่งแพ็คเก็ตในเครือข่ายจึงดำเนินไปได้อย่างสะดวกขึ้น การตอบรับเส้นทางจึงมีโอกาสทำได้เร็วขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 16 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

ภาพที่ 17 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง จากภาพจะพบว่าโหนดต้นทางที่ใช้โปรโตคอล AODV-DBF จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล และลดการแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนดในเครือข่าย ทำให้โหนดที่ต้องการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสมากขึ้นที่จะได้เข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งแพ็คเก็ต นอกจากนี้การนำเทคนิคการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง จะทำให้เส้นทางที่ได้จาก AODV-DBF มีโอกาสมากขึ้นที่จะเป็นเส้นทางที่มีจำนวนฮอปโดยเฉลี่ยน้อยกว่าที่ได้จาก AODV จึงส่งผลให้แพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสไปถึงโหนดปลายทางได้เร็วขึ้นด้วย



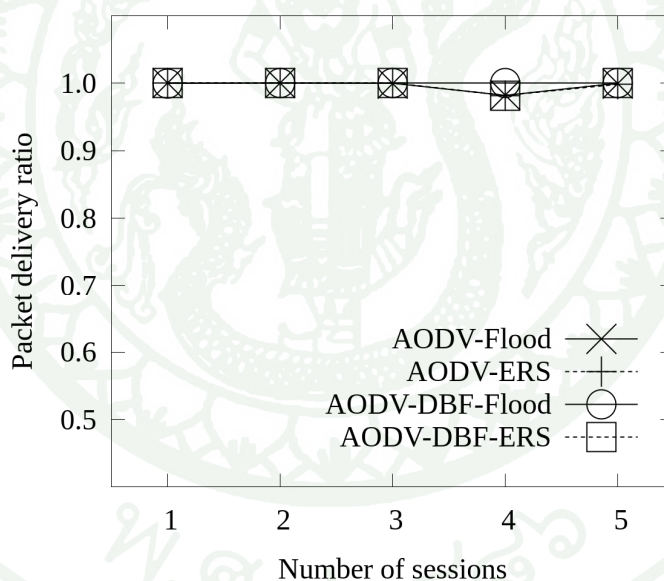
ภาพที่ 17 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโหนดตั้งแต่ 30 ถึง 50 โหนด

2. การเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโปรโตคอลในเครือข่ายที่มีโหนดที่ไม่เคลื่อนที่ 50 โหนด แต่มีจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต 1, 2, 3, 4 และ 5 โหนด

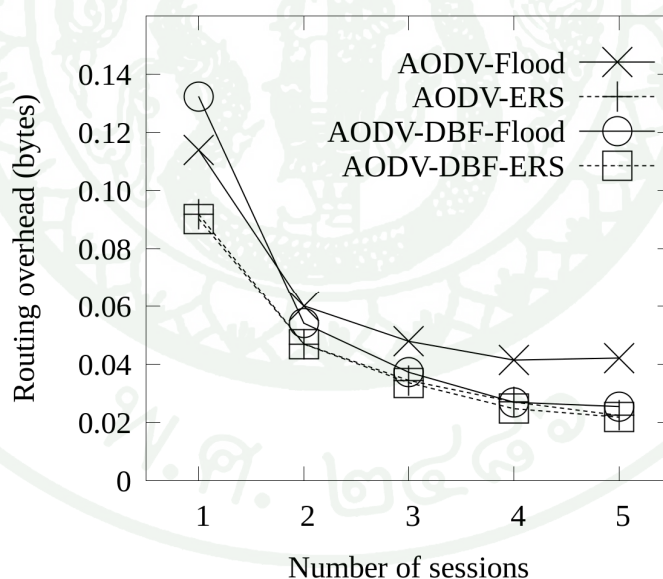
2.1 การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางไม่มีการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง

ภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่า AODV-DBF ที่ใช้กลไก flooding จะมีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลโดยเฉลี่ยมากกว่า AODV ที่ใช้เทคนิค flooding เล็กน้อย และสำหรับกรณี ERS โพรโทคอลทั้งคู่จะมีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตเกิดข้อมูลโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทางในเครือข่ายให้มากขึ้นก็ตาม แต่เนื่องจากสถานการณ์ในแบบจำลองถูกสร้างขึ้นแบบสุ่ม ในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดต้นทาง 4 โหนดนั้นเกิดการชนกันของแพ็คเก็ตเกิดขึ้นมากผิดปกติ เมื่อแพ็คเก็ตสูญหายโหนดที่ได้รับ RERR จากโหนดเพื่อนบ้านจะ invalidate เส้นทางไปยังเพื่อนบ้าน และต้องเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่จากโหนดต้นทาง แพ็คเก็ตข้อมูลจึงเกิดการสูญหายระหว่างกระบวนการดังกล่าว ส่งผลให้อัตราการได้รับแพ็คเก็ตเกิดข้อมูลของ AODV ที่ใช้เทคนิค flooding, AODV ที่ใช้เทคนิค ERS และ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS ลดลงเป็นอย่างมาก



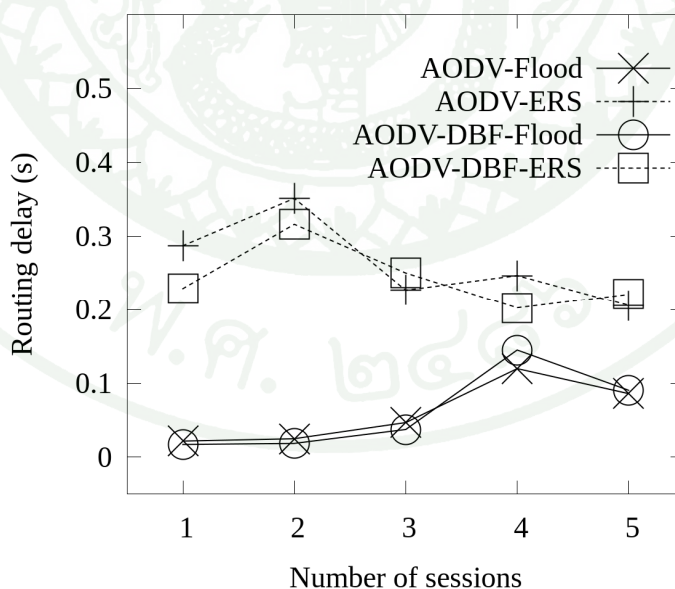
ภาพที่ 18 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

ภาพที่ 19 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดต้นทางมากขึ้น AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค flooding จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV ที่ใช้เทคนิค flooding อย่างชัดเจน เนื่องจากจำนวนโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ น้อยลง ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค flooding จึงลดลงตามไปด้วย สำหรับกรณี ERS โพรโทคอล AODV-DBF จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV เล็กน้อย เนื่องจากเทคนิค DBF ที่นำมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางสามารถลดจำนวนโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ในกลไก ERS ที่มีจำนวนฮอปการค้นหามากกว่า 1 ฮอปได้ (ค่า TTL ตั้งแต่ 3 เป็นต้นไป) จึงทำให้ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS สามารถขยายขอบเขตการส่ง RREQ โดยอาศัยจำนวนฮอปที่น้อยกว่าเล็กน้อย สาเหตุที่ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS ไม่มีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ที่ใช้เทคนิค ERS อย่างชัดเจน เนื่องจากการทดลองนี้กำหนดให้แต่ละโหนดมีขอบเขตการส่งสัญญาณ 250 เมตร และถูกวางอย่างสุ่มภายในพื้นที่ขนาด 1000×1000 ตารางเมตร จึงทำให้จำนวนฮอประหว่างโหนดต้นทาง และโหนดปลายทางมีความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 2 ถึง 4 ฮอป โดย AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS จะมีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ที่ใช้เทคนิค ERS อย่างชัดเจนในกรณีที่ TTL มีค่ามากกว่า 5 ขึ้นไป



ภาพที่ 19 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

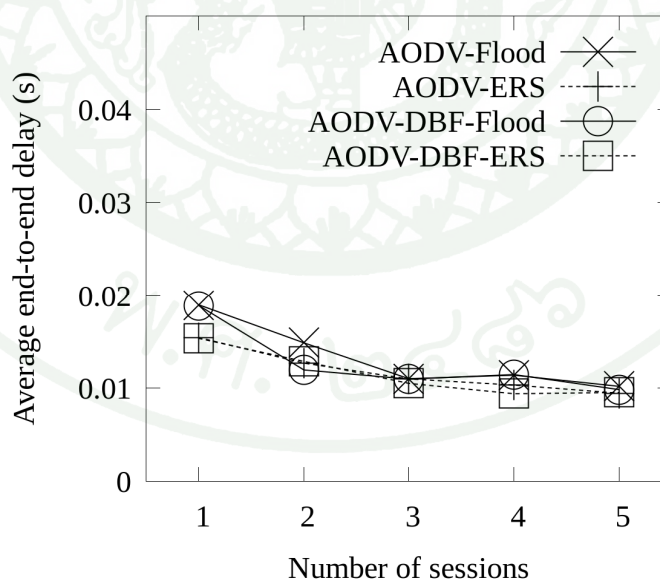
ภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่าโหนดต้นทางของโพรโทคอลที่อาศัยกลไก flooding และ ERS จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากกลไกของ ERS ที่โหนดต้นทางจะขยายขอบเขตของ ring ออกไปที่ละน้อย หากไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้โพรโทคอลที่ใช้กลไก ERS จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางสูงกว่าโพรโทคอลที่ใช้เทคนิค flooding โดยโพรโทคอลที่ใช้กลไก flooding จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากขึ้น จากภาพในกรณี flooding โพรโทคอล AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากขึ้น เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะทำให้จำนวนแพ็คเก็ตในเครือข่าย และการชนกันของ RREQ ลดลง ส่งผลให้การตอบรับเส้นทางมีโอกาสทำได้เร็วขึ้นด้วย สำหรับกรณี ERS โพรโทคอล AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV ดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่ากลไกการขยายขอบเขตการกระจาย RREQ ของ ERS ที่จะขยายจำนวนฮอปในการค้นหาเส้นทางไปที่ละน้อยเมื่อโหนดต้นทางไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในระยะเวลาที่กำหนด จะทำให้โหนดต้นทางใช้เวลารอในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางเพิ่มขึ้น การนำเทคนิคการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาช่วยลดจำนวนโหนดที่เข้าร่วมในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF จึงช่วยลดความซ้ำซ้อนของ RREQ และช่วยเพิ่มโอกาสให้โหนดที่อยู่ใกล้ขอบ ring สามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ได้ เวลาในการค้นหาเส้นทาง



ภาพที่ 20 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

โดยเฉลี่ยของ AODV-DBF จึงมีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จาก AODV อย่างไรก็ตามเนื่องมาจาก โหนดในการทดลองถูกวางอย่างสุ่ม AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS จึงอาจมีโอกาที่จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นจาก AODV ที่ใช้ ERS เล็กน้อย หากโหนดในเครือข่ายมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้โหนดที่ถูกเลือกให้ทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ สามารถกระจาย RREQ ให้ครอบคลุมทุกโหนดภายใน ring ของ ERS ได้ช้ากว่า AODV โดยการกระจายตัวของโหนดจะมีโอกาสส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ AODV-DBF น้อยลง หากจำนวนครั้งของการจำลองเพิ่มมากขึ้น

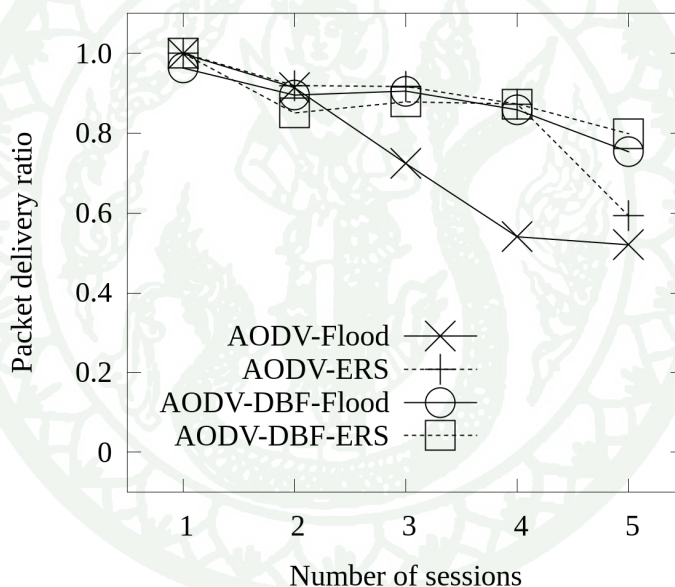
ภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าโหนดต้นทางของ AODV-DBF จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูล โดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV เนื่องจากเส้นทางที่ได้จาก AODV-DBF เป็นเส้นทางที่มีจำนวนฮอปโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV อีกทั้งการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF ยังช่วยลดความคับคั่งของข้อมูลที่ส่งผลโดยตรงต่อจำนวนโหนดที่เข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งแพ็คเก็ต ทำให้โหนดในเครือข่ายมีโอกาสที่จะส่งแพ็คเก็ตข้อมูลได้สะดวกขึ้น ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการลำเลียงแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังปลายทางจึงมีโอกาสลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ AODV-DBF ยังมีความสำเร็จในการค้นหาเส้นทางที่รวดเร็วกว่า ทำให้โหนดต้นทางเริ่มต้นกระบวนการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลได้เร็วขึ้นด้วย



ภาพที่ 21 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

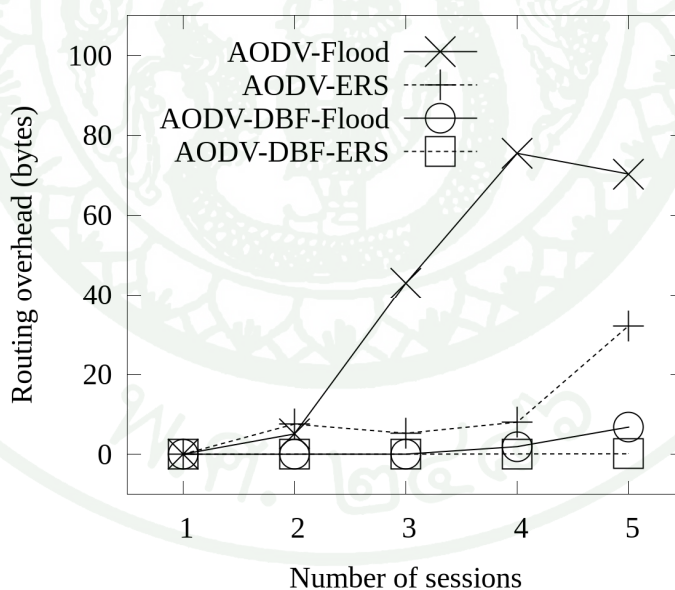
2.2 การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางมีการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง

ภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตมากขึ้น นั่นคือจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น AODV-DBF จะแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV อย่างชัดเจน เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่เข้าร่วมการส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล และลดการแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนด ทำให้โอกาสเกิดการชนกันของ RREQ ลดลง ความสำเร็จในกระบวนการค้นหาเส้นทางจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ AODV-DBF มีความทนทานต่อความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่ายได้ดีกว่า อัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทางจึงสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV



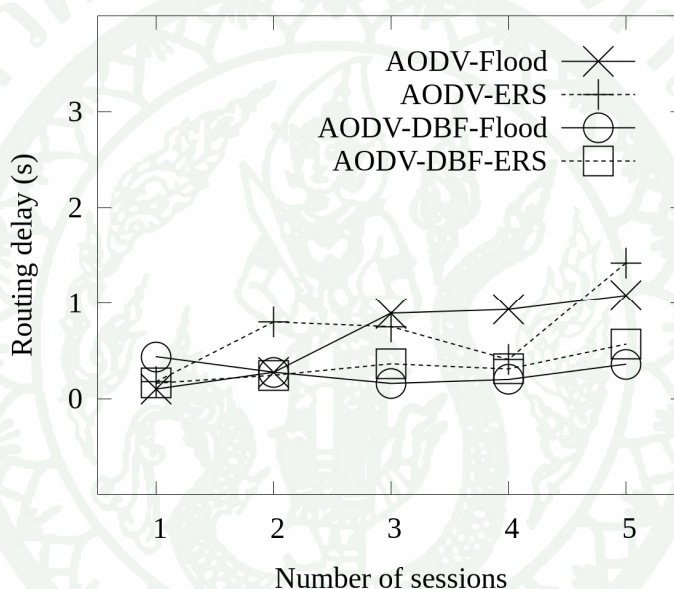
ภาพที่ 22 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

ภาพที่ 23 แสดงให้เห็นว่าในกรณี flooding เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโหนดต้นทางมากขึ้น AODV-DBF จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV อย่างชัดเจน เนื่องจากจำนวนโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ น้อยลง ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF จึงลดลงตามไปด้วย สำหรับกรณี ERS เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโหนดต้นทางมากขึ้น AODV-DBF ยังคงมีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV เนื่องจากกลไกการขยายขอบเขต ring ใน ERS ที่โหนดต้นทางจะขยายขอบเขตการกระจาย RREQ ไปทีละน้อยหากไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยกระบวนการขยายขอบเขต ring นี้จะเริ่มตั้งแต่โหนดต้นทางทุกครั้ง ดังนั้นหากโหนดปลายทางอยู่ในฮอปที่ห่างไกลจากโหนดต้นทางมากๆ กระบวนการขยายขอบเขตจากโหนดต้นทางนี้จะต้องถูกดำเนินการซ้ำกันหลายๆ ครั้ง ทำให้ RREQ ที่ถูกกระจายไปยังเครือข่ายมีความซ้ำซ้อน และมีโอกาสเกิดการชนกันมากขึ้น ซึ่งแตกต่างกับ AODV-DBF ที่นำระยะทางระหว่างโหนดมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจส่งต่อ RREQ จึงทำให้การขยายขอบเขต ring ของ ERS แต่ละครั้ง มีโอกาสมากขึ้นที่โหนดที่จะทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ จะเป็นโหนดที่อยู่ใกล้ขอบของแต่ละ ring ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS จึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV ที่ใช้เทคนิคเดียวกัน



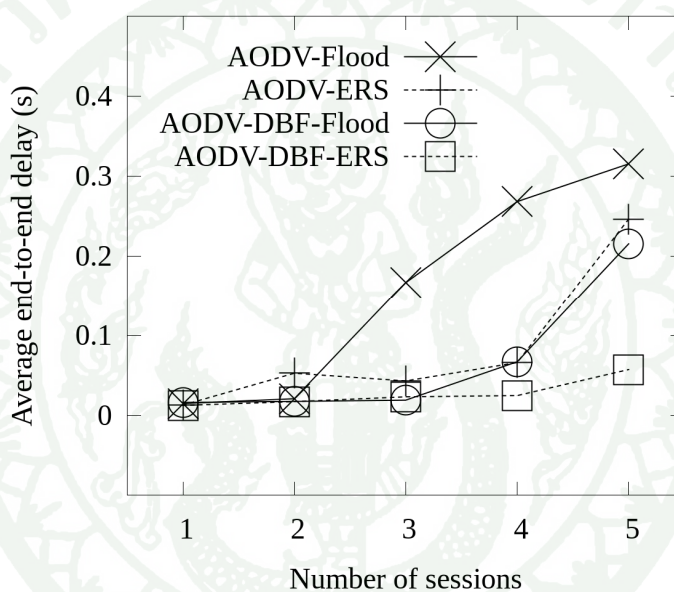
ภาพที่ 23 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

ภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV ทั้งในกรณี flooding และ ERS เนื่องจากกลไก flooding ที่นำมาใช้ใน AODV จะทำให้ทุกโหนดในเครือข่ายเข้าร่วมกระบวนการส่งต่อ RREQ เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น จำนวน RREQ ที่ถูกกระจายไปในเครือข่ายโดยไม่จำเป็นจึงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแตกต่างกับ AODV-DBF ที่นำกลไกการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาช่วยลดจำนวนโหนดที่เข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทาง ส่งผลให้ความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย การชนกันของแพ็คเก็ต และการแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนดในเครือข่ายลดลง การตอบรับเส้นทางจึงสามารถทำได้รวดเร็วขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 24 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

ภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น AODV-DBF จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางโดยเฉลี่ยน้อยกว่า AODV เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล ลดการแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนด และลดการชนกันของแพ็คเก็ตในเครือข่าย ทำให้โหนดที่ต้องการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสมากขึ้นที่จะได้เข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งแพ็คเก็ต นอกจากนี้การนำเทคนิคการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง จะทำให้เส้นทางที่ได้จาก AODV-DBF มีโอกาสมากขึ้นที่จะเป็นเส้นทางที่มีจำนวนฮอปโดยเฉลี่ยน้อยกว่าที่ได้จาก AODV จึงส่งผลให้แพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสไปถึงโหนดปลายทางได้เร็วขึ้นด้วย



ภาพที่ 25 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ตตั้งแต่ 1 ถึง 5 โหนด

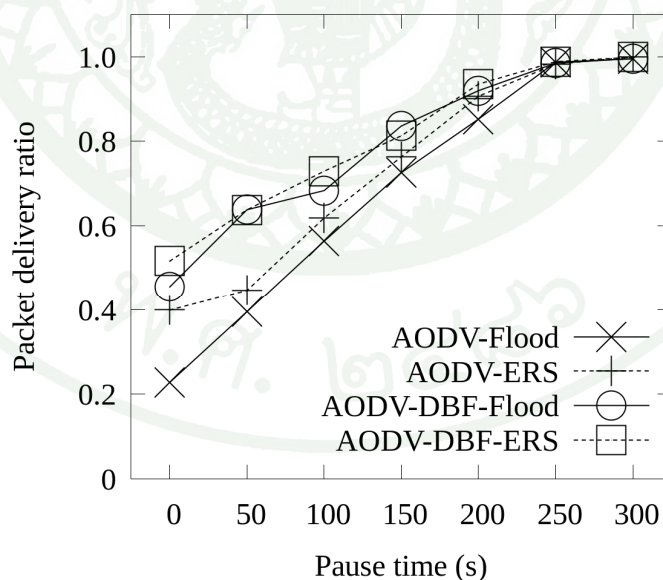
3. การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของโหนด

การทดลองสุดท้าย เป็นการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลในเครือข่ายที่มีอัตรา การเคลื่อนที่ของโหนด 50 โหนดแตกต่างกัน โดยมีจำนวนโหนดที่ส่งแพ็คเก็ต 5 โหนด และเวลาหยุดเคลื่อนที่ตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที เพิ่มขึ้นช่วงละ 50 วินาที

3.1 การวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางไม่มีการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง

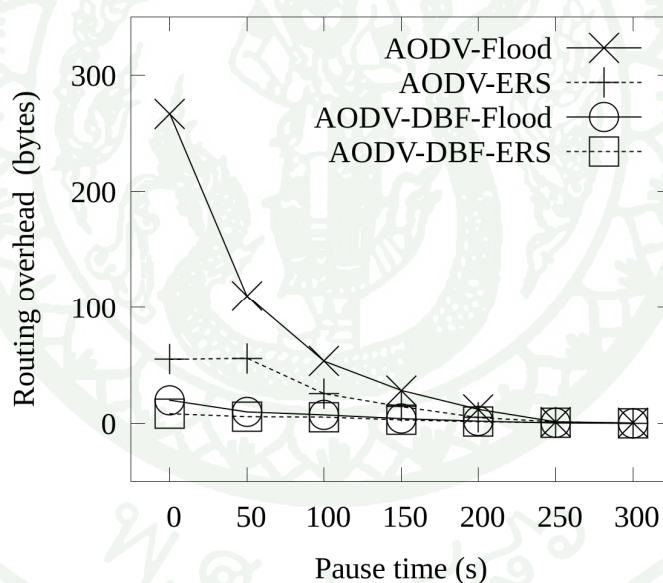
ภาพที่ 26 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น (pause time ลดลง) AODV-DBF จะมีความสำเร็จในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลสูงกว่า AODV ทั้งในกรณีที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยให้แพ็คเก็ตที่ถูกกระจายไปในเครือข่ายโดยไม่จำเป็นลดลง โหนดต้นทางจึงมีโอกาสดังจะได้รับ RREP จากโหนดปลายทางมากขึ้น เมื่อความสำเร็จในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF เพิ่มขึ้น ความสำเร็จในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังปลายทางจึงมากขึ้นตามไปด้วย

จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อโหนดมีอัตราการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการขาดของลิงก์มากขึ้น อัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทางจึงค่อยๆ ลดลงตามอัตราการเคลื่อนที่ของโหนดดังที่แสดงไว้ในภาพ จากภาพในกรณีที่โหนดเคลื่อนที่ตลอดเวลา (pause time = 0s) AODV-DBF จะมียุทธการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลสูงกว่า AODV ประมาณ 1.99 เท่า และ 1.29 เท่า สำหรับกรณี flooding และ ERS ตามลำดับ แต่ในกรณีที่โหนดไม่เคลื่อนที่ (pause time = 300s) โพรโทคอลทั้งคู่จะมีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลไม่แตกต่างกันทั้งในกรณี flooding และ ERS



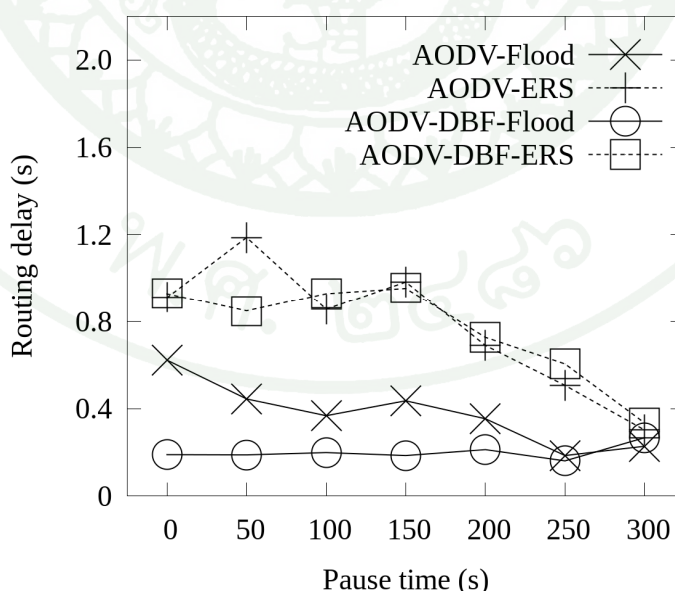
ภาพที่ 26 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

ภาพที่ 27 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่น้อย (pause time มาก) โพรโทคอลที่ใช้กลไก ERS จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเทคนิคการกระจาย RREQ ของ ERS ที่จะขยายขอบเขตการค้นหาไปที่ละน้อย ทำให้ RREQ ไม่ถูกกระจายไปทั่วเครือข่าย แต่ในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่มากขึ้น AODV-DBF ที่ใช้กลไก ERS จะมีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ที่ใช้กลไก ERS เนื่องจากกระบวนการทำงานของ ERS ที่จะกระจาย RREQ ไปยังทุกโหนดในเครือข่าย หากไม่พบปลายทางภายในขอบเขตการค้นหาสูงสุดที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ AODV ที่ใช้กลไก ERS มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับ AODV-DBF ที่ใช้กลไกเดียวกัน สำหรับกลไก flooding เมื่อโหนดมีอัตราการเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้เกิดการขาดของลิงค์มากขึ้น ใน AODV ที่ใช้กลไก flooding โหนดต้นทางจะต้องเริ่มต้นกระจาย RREQ ใหม่ทุกครั้งที่ไม่สามารถส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังปลายทางได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV-DBF ที่ใช้กลไก flooding ซึ่งจะใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อ RREQ น้อยกว่า



ภาพที่ 27 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

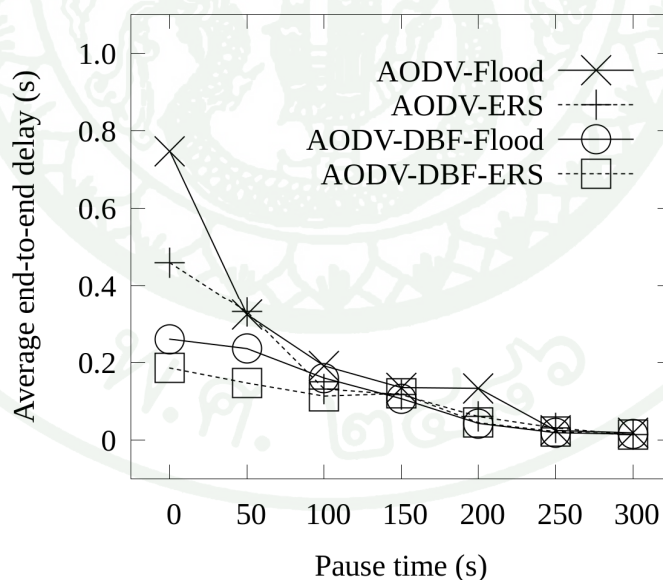
ภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่าโหนดต้นทางของโพรโทคอลที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากกลไกของ ERS ที่โหนดต้นทางจะขยายขอบเขตการส่ง RREQ ออกไปที่ละน้อย หากไม่ได้รับ RREP กลับมาภายในระยะเวลาที่กำหนดทำให้โหนดต้นทางของโพรโทคอลที่ใช้เทคนิค ERS จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่ใช้เทคนิค flooding ดังแสดงไว้ในภาพจากภาพในกรณีที่มีโหนดในเครือข่ายมีอัตราการเคลื่อนที่น้อย AODV-DBF และ AODV ที่ใช้กลไก ERS จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่ออัตราการเคลื่อนที่ของโหนดเพิ่มขึ้น AODV-DBF จะแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ที่ใช้เทคนิค ERS เนื่องจากกลไกการขยายขอบเขต ring ของ ERS ที่โหนดต้นทางจะขยายขอบเขตการส่ง RREQ แบบไม่จำกัดจำนวนฮอป ในกรณีที่กระบวนการขยายขอบเขต ring ดำเนินไปจนถึงจำนวนครั้งและค่าสูงสุดที่กำหนดไว้แล้วยังไม่พบโหนดปลายทาง ซึ่งกลไกดังกล่าวจะทำให้เกิดความซ้ำซ้อนของ RREQ และส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการตอบรับเส้นทางเป็นอย่างมาก ซึ่งแตกต่างจาก AODV-DBF ที่ได้นำกลไกการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ทำให้โหนดต้นทางสามารถขยายขอบเขตของ ring โดยอาศัยโหนดที่ส่งต่อ RREQ น้อยกว่า ความคับคั่งและการชนกันของแพ็กเก็ตในเครือข่ายจึงลดลง ส่งผลให้การตอบรับเส้นทางมีโอกาสดำเนินการได้เร็วขึ้นด้วยสำหรับกรณี flooding โพรโทคอล AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV อย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่โหนดมีอัตราการเคลื่อนที่สูง เนื่องจากการลดจำนวนโหนด



ภาพที่ 28 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

ที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดจำนวนแพ็คเก็ตที่ถูกกระจายไปในเครือข่ายโดยไม่จำเป็น ส่งผลให้โอกาสเกิดการชนกันของแพ็คเก็ตลดลง การตอบรับเส้นทางจึงทำได้เร็วขึ้นตามไปด้วย

ภาพที่ 29 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จะเกิดการขาดของลิงค์มากขึ้น โหนดต้นทางอาจต้องเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่หลายครั้งหากเส้นทางเดิมที่เคยใช้ส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางมีการจัดเรียงตัวของโหนดที่เปลี่ยนแปลงไป และไม่สามารถใช้ในการลำเลียงแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ สำหรับกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ทุกโหนดในเครือข่ายสามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ได้ เมื่อแพ็คเก็ตถูกกระจายไปยังเครือข่ายมากขึ้น ทำให้โอกาสในการชนกันของแพ็คเก็ตเพิ่มขึ้น เวลารอที่โหนดต้นทางจะได้เส้นทางไปยังโหนดปลายทาง และเวลารอที่แต่ละโหนดจะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจึงมีโอกาสมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแตกต่างกับ AODV-DBF ที่ใช้จำนวนโหนดในการส่งต่อ RREQ น้อยกว่า แพ็คเก็ตที่ถูกกระจายไปในเครือข่ายโดยไม่จำเป็นจึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเวลาที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางลดลง เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจึงลดลงตามลำดับ

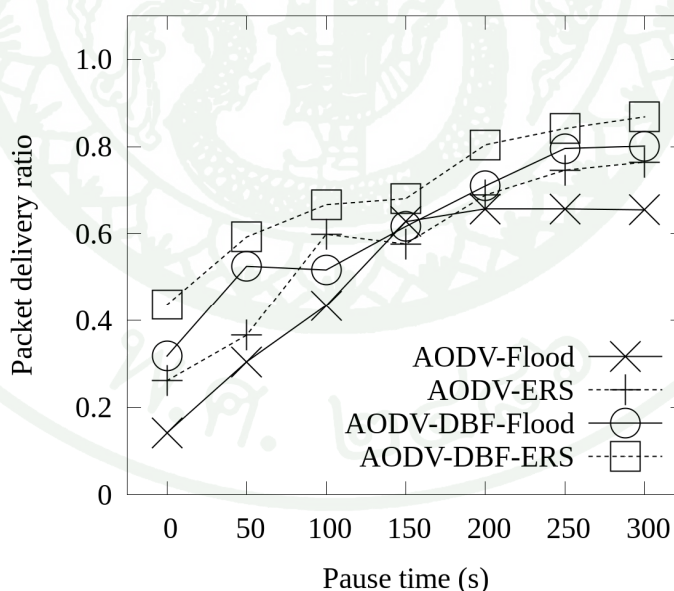


ภาพที่ 29 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

จากผลการทดลองจะพบว่าในกรณีที่โหนดเคลื่อนที่ตลอดเวลา AODV-DBF จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางน้อยกว่า AODV ประมาณ 0.66 เท่าและ 0.97 เท่าสำหรับกรณี flooding และ ERS ตามลำดับ แต่ในกรณีที่โหนดไม่เคลื่อนที่โปรโตคอลทั้งคู่จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางไม่แตกต่างกันทั้งกรณี flooding และ ERS

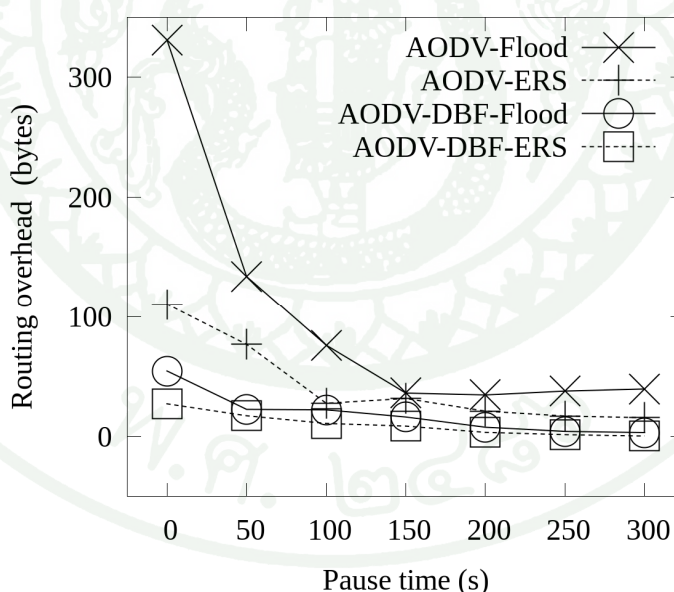
3.2 การวัดประสิทธิภาพของโปรโตคอลในเครือข่ายที่โหนดต้นทางมีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง

ภาพที่ 30 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จะเกิดการขาดของลิงก์มากขึ้น AODV-DBF จะมีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลสูงกว่า AODV ทั้งในกรณีที่ใช้ flooding และ ERS เนื่องจากกลไกการพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดที่นำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการค้นหาเส้นทาง จะช่วยให้ AODV-DBF สามารถส่งต่อ RREQ โดยอาศัยจำนวนโหนดที่น้อยกว่า ความคับคั่งของข้อมูล การแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนดเพื่อส่งแพ็คเก็ต และการชนกันของแพ็คเก็ตในเครือข่ายจึงน้อยลง ความสำเร็จในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ



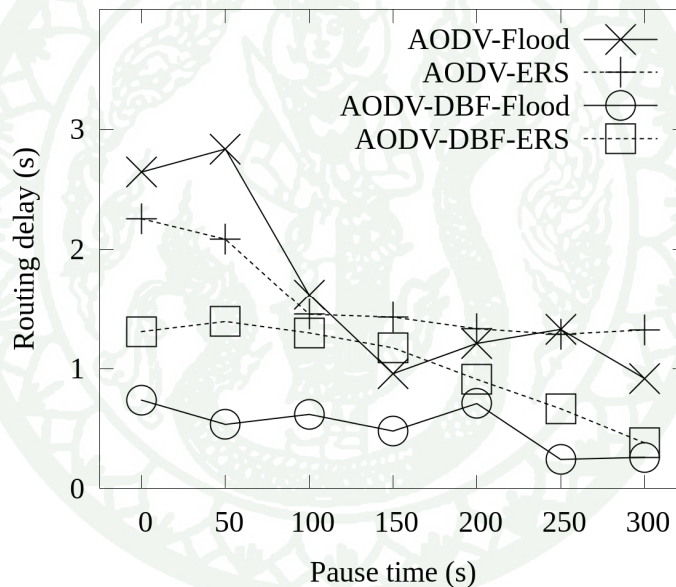
ภาพที่ 30 อัตราส่วนการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

ภาพที่ 31 แสดงให้เห็นว่าในกรณี flooding เมื่อโหนดในเครือข่ายมีอัตราการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น AODV-DBF จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV เนื่องจากกลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดจำนวน RREQ ที่ถูกกระจายไปในเครือข่ายโดยไม่จำเป็นได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแตกต่างกับ AODV ที่ทุกโหนดในเครือข่ายสามารถกระจาย RREQ ได้ ทำให้ในกรณีที่โหนดมีอัตราการเคลื่อนที่สูง และเกิดการขาดของลิงค์เพิ่มขึ้นทุกโหนดในเครือข่ายจะร่วมกันกระจาย RREQ ให้กับกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งใหม่ ทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV สูงกว่า AODV-DBF เป็นอย่างมาก สำหรับกรณี ERS ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF ยังคงน้อยกว่า AODV เนื่องจากกลไกการขยายขอบเขตของ ERS ที่จะขยายขอบเขตการส่ง RREQ ออกไปที่ละน้อยหากไม่ได้รับ RREP กลับมาในเวลาที่กำหนด และเมื่อการค้นหาดำเนินไปจนถึงจำนวนครั้ง และค่าสูงสุดที่กำหนดไว้แต่ยังไม่พบโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่โดยไม่ใช้ ERS นั้น จะทำให้มี RREQ ที่ซ้ำกันจำนวนมากถูกกระจายไปในเครือข่าย ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV สูงกว่า AODV-DBF ในกรณีที่ใช้เทคนิค ERS ดังแสดงไว้ในภาพ



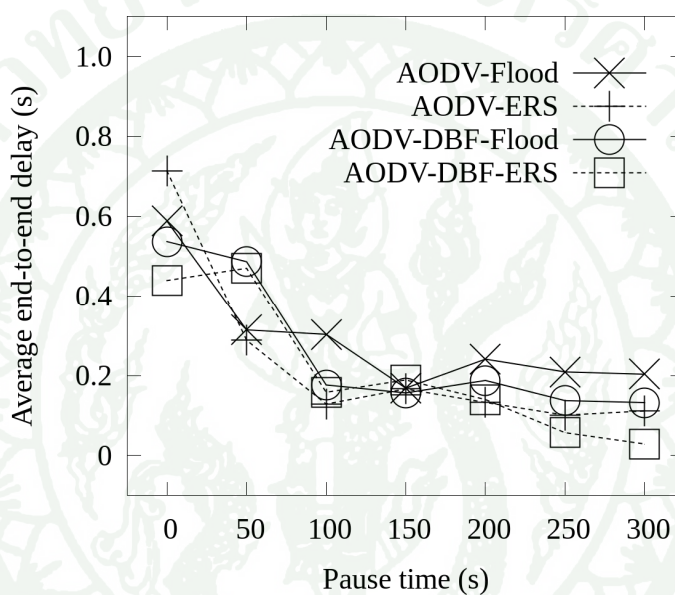
ภาพที่ 31 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

ภาพที่ 32 แสดงให้เห็นว่าโหนดต้นทางของ AODV-DBF จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางน้อยกว่า AODV ทั้งในกรณี flooding และ ERS เนื่องจากการเทคนิค flooding ที่นำมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV จะก่อให้เกิดความคับคั่งของแพ็คเก็ตในเครือข่ายสูงมาก หากโหนดมีอัตราการเคลื่อนที่สูง และเกิดการขาดของลิงค์บ่อยครั้ง ด้วยเหตุนี้การลดจำนวนโหนดที่ส่ง RREQ ใน AODV-DBF จะทำให้กระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งต่อไปหลังจากเกิดการขาดของลิงค์นั้นมีค่าใช้จ่ายที่ลดลง เมื่อโหนดต้นทางสามารถเริ่มต้นกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยอาศัยจำนวนโหนดที่เข้าร่วมการส่งต่อ RREQ น้อยลง ความซ้ำซ้อนของ RREQ และการชนกันของ RREQ จึงน้อยลงตามไปด้วย เมื่อความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่ายน้อยลง การรับส่งแพ็คเก็ตในเครือข่ายจึงทำได้สะดวกขึ้น การตอบรับเส้นทางใน AODV-DBF จึงมีโอกาสทำได้รวดเร็วขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 32 เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

ภาพที่ 33 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่โหนดในเครือข่ายมีอัตราการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น โหนดต้นทางของ AODV-DBF จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางโดยเฉลี่ย น้อยกว่า AODV ทั้งในกรณี flooding และ ERS เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ของ AODV-DBF จะทำให้ความคับคั่งของข้อมูล และการแย่งใช้ช่องสัญญาณของโหนดในเครือข่าย ลดลง ส่งผลให้แพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสที่จะถูกลำเลียงไปยังโหนดปลายทางได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ เส้นทางที่ได้จากระบบการค้นหาเส้นทางของ AODV-DBF เป็นเส้นทางที่มีจำนวนฮอปโดยเฉลี่ย สั้นกว่า ทำให้แพ็คเก็ตข้อมูลมีโอกาสที่จะไปถึงโหนดปลายทางได้รวดเร็วกว่า AODV ด้วย



ภาพที่ 33 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และเปลี่ยนแปลงเวลาหยุดเคลื่อนที่ของโหนดตั้งแต่ 0 ถึง 300 วินาที

วิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF ที่ได้นำกลไกการคัดกรองความแรงสัญญาณจาก RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านมาช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV เพื่อนำเสนอประสิทธิภาพของโพรโทคอลใหม่ งานวิจัยนี้ได้จำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอล AODV-DBF กับ AODV ที่ใช้เทคนิค flooding และ ERS ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งรูปแบบการทดลองออกเป็น 2 การทดลองหลักคือ การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดค้นหาไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง และการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดค้นหา มีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อความเร็วในการค้นหาเส้นทาง และรักษาโอกาสที่โหนดปลายทางจะได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายที่โหนดค้นหาไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง เป็นการทดลองที่กำหนดให้โหนดค้นหาส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียวตลอดระยะเวลาการจำลอง ดังนั้นหากไม่เกิดการขาดของลิงก์จากการเคลื่อนที่ของโหนด หรือไม่เกิดการ invalidate เส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลหลังจากได้รับ RERR โหนดค้นหาจะใช้เส้นทางแรกที่ค้นพบจากกระบวนการค้นหาเส้นทางในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางตลอดระยะเวลาการจำลอง โดยการทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้น เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโพรโทคอลที่นำเสนอ และยืนยันว่ากลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ให้ดีขึ้นได้ จากผลการทดลองจะพบว่า กลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะทำให้แพ็คเก็ตที่ถูกส่งไปในเครือข่ายโดยไม่จำเป็นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ลดความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย ลดการแย่งใช้ช่องสัญญาณ และลดโอกาสในการชนกันของแพ็คเก็ต AODV-DBF จึงมีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ทั้งในด้านอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เวลาที่โหนดค้นหาใช้ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง และเวลาโดยเฉลี่ยที่โหนดค้นหาใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ทั้งในกรณี flooding และ ERS ตามลำดับ อย่างไรก็ตามโหนดค้นหาของโพรโทคอล AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS อาจใช้เวลา

ในการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นจาก AODV ที่ใช้เทคนิค ERS เล็กน้อย หากเครือข่ายมีการกระจายตัวของโหนดไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดการ partition ของโหนดในเครือข่าย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้กลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะกระจาย RREQ ครอบคลุมโหนดภายในขอบเขต ring ของ ERS ได้ช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV ที่ทุกโหนดใน ring สามารถส่งต่อ RREQ ได้

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของโปรโตคอลในเครือข่ายที่โหนดค้นหาเส้นทางมีการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง เป็นการทดลองที่กำหนดให้โหนดค้นหาเส้นทางสามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่แตกต่างกันเมื่อเวลาของการจำลองเครือข่ายเปลี่ยนแปลงไป การทดลองนี้จึงเป็นการทดลองที่เป็นประโยชน์ต่อการวัดประสิทธิภาพของโปรโตคอลในเครือข่ายที่มีความถี่ของการค้นหาเส้นทางมากกว่า 1 ครั้ง จากผลการทดลองจะพบว่าในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และมีอัตราการเคลื่อนที่ของโหนดสูง AODV-DBF จะแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV อย่างชัดเจน เนื่องจากกลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ของ AODV จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล และลดโอกาสเกิดการชนกันของแพ็คเกจ ทำให้แต่ละโหนดมีโอกาสเข้าใช้ช่องสัญญาณในการส่งแพ็คเกจเพิ่มขึ้น AODV-DBF จึงมีประสิทธิภาพในด้านอัตราการได้รับแพ็คเกจข้อมูล ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางเวลาที่โหนดค้นหาเส้นทาง และเวลาโดยเฉลี่ยที่โหนดค้นหาเส้นทางใช้ในการส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเหนือกว่า AODV อย่างไรก็ตาม โหนดปลายทางของ AODV-DBF อาจมีอัตราการได้รับแพ็คเกจข้อมูลน้อยกว่า AODV ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดน้อย และเกิดการ invalidate เส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจข้อมูลจากการได้รับ RERR เนื่องจากกลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF อาจทำให้โหนดที่เข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งถัดไปมีจำนวนไม่เพียงพอ หากโหนดที่มีสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านเป็น valid ได้รับ RERR และไม่สามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ได้ ในขณะที่โหนดอื่นในเครือข่ายที่ไม่ได้รับ RERR ยังคงมีสถานะการส่ง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านเป็น invalid และ life time ของเอนทรียังไม่สิ้นสุดลงจึงไม่สามารถเข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางหลังจากการ invalidate เส้นทางได้ แต่ในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ AODV-DBF ในเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนดน้อย และเกิดการ invalidate เส้นทางหลังจากได้รับ RERR ได้ ด้วยการกำหนดให้แต่ละโหนดลบเอนทรีใน received power table ทั้งหมด และเริ่มต้นกระบวนการประเมินสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านใหม่หลังจากได้รับ RERR

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า AODV-DBF เป็นโพรโทคอลที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และมีอัตราการเคลื่อนที่ของโหนดที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเครือข่ายที่มีลักษณะดังกล่าวจะช่วยให้ AODV-DBF มีข้อมูลเพียงพอที่จะใช้ประกอบการตัดสินใจ นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของโหนดในเครือข่ายที่เปลี่ยนแปลงไปยังช่วยให้ AODV-DBF สามารถปรับปรุงข้อมูลใน received power table ให้สะท้อนถึงลักษณะของเครือข่ายในปัจจุบัน ซึ่งจะเข้าประโชชน์กับการประเมินสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านได้เป็นอย่างดีอีกด้วย



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV-DBF ที่ได้นำกลไกการดักฟังความแรงสัญญาณจาก RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านมาช่วยลดจำนวนโหนดที่เข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายที่มีความถี่ของการค้นหาเส้นทางมากกว่า 1 ครั้งขึ้นไป เนื่องจากกลไกการกระจาย RREQ โดยใช้เทคนิค flooding ใน AODV นั้น จะก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และมีอัตราการเคลื่อนที่ของโหนดสูง มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเทคนิคการกระจายแพ็คเกจแบบอาศัยระยะทางมาใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง แต่เทคนิคนี้มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการส่งต่อแพ็คเกจด้วยความน่าจะเป็น ซึ่งยังคงต้องอาศัยการหน่วงเวลาเพื่อตัดสินใจว่าโหนดใดบ้างที่เหมาะสมและควรเข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางต่อไป งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีการตัดสินใจแบบใหม่ที่ไม่ต้องอาศัยการหน่วงเวลา และนำขั้นตอนวิธีที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับ AODV จากการทดลองพบว่า AODV-DBF ช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย AODV-DBF จะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้มากยิ่งขึ้นเมื่อโหนดในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ และเกิดการขาดของลิงค์บ่อยครั้ง อย่างไรก็ตามโหนดใน AODV-DBF อาจต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากการคอยดักฟัง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้าน โดย AODV-DBF เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายที่มีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และมีอัตราการเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากลักษณะเครือข่ายเหล่านี้จะทำให้แต่ละโหนดใน AODV-DBF มีข้อมูลเพียงพอต่อการประเมินสถานะการส่ง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้าน และการเคลื่อนที่ของโหนดจะทำให้ข้อมูลการประเมินสถานะมีการเปลี่ยนแปลง และสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะของเครือข่ายในปัจจุบันได้มากยิ่งขึ้นด้วย

จากการสังเกตผลการทดลองในเครือข่ายที่โหนดค้นหาไม่มีการเปลี่ยนแปลง โหนดปลายทางระหว่างการจำลอง จะพบว่าในกรณีที่โหนดไม่เคลื่อนที่ โพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง AODV และ AODV-DBF จะมีอัตราการได้รับแพ็คเกจข้อมูลไม่แตกต่างกัน เนื่องจากไม่เกิดการขาดของลิงค์ จึงทำให้ตลอดการจำลองโหนดค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางเพียงครั้งเดียวเท่านั้น แต่เมื่อเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ของโหนดมากขึ้น ทำให้เกิดการขาดของลิงค์มากขึ้น เทคนิคการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย ทำให้ AODV-DBF มีอัตราการได้รับแพ็คเกจข้อมูลสูงกว่า AODV ทั้งในกรณีที่ใช้เทคนิค

flooding และ ERS จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าโพรโทคอล AODV-DBF ช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทางของ AODV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ AODV-DBF มีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ทั้งในด้านค่าใช้จ่าย ความสำเร็จในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูล และ ความสำเร็จในการค้นหาเส้นทาง ด้วยเหตุที่ AODV-DBF มีจำนวนโหนดที่กระจาย RREQ น้อยกว่า AODV ทำให้แพ็คเก็ตที่ถูกส่งต่อในเครือข่ายโดยไม่จำเป็นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ลดการชนกัน และการสูญหายของแพ็คเก็ตลง ความสำเร็จในการค้นหาเส้นทางจึงเพิ่มมากขึ้น การค้นหาเส้นทาง และการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจึงทำได้รวดเร็วขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม โหนดต้นทางของโพรโทคอล AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS อาจใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางเพิ่มขึ้นจาก AODV ที่ใช้เทคนิค ERS เล็กน้อย หากเครือข่ายมีการกระจายตัวของโหนดไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดการ partition ของโหนดในเครือข่าย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้กลไกการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะกระจาย RREQ ครอบคลุมโหนดภายในขอบเขต ring ของ ERS ได้ช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV ที่ทุกโหนดใน ring สามารถส่งต่อ RREQ ได้

จากการสังเกตผลการทดลองในเครือข่ายที่โหนดต้นทางมีการเปลี่ยนแปลงโหนดปลายทางระหว่างการจำลอง จะพบว่าเมื่อเครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนด ความคับคั่งของข้อมูล และ อัตราการเคลื่อนที่ของโหนดที่เพิ่มสูงขึ้น AODV-DBF จะแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV อย่างชัดเจนทั้งในกรณี flooding และ ERS เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF จะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล และลดการชนกันของแพ็คเก็ตในเครือข่าย ส่งผลให้ AODV-DBF มีประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV ทั้งในด้านค่าใช้จ่ายจากกระบวนการค้นหาเส้นทาง อัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลของโหนดปลายทาง เวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการค้นหาเส้นทาง และเวลาที่โหนดต้นทางใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง แม้ว่า RREQ ที่ใช้ใน AODV-DBF จะมีการเก็บข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประเมินสถานะของโหนดเพื่อนบ้านเพิ่มขึ้นจาก AODV อย่างไรก็ตาม โหนดปลายทางของ AODV-DBF อาจมีอัตราการได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลน้อยกว่า AODV หากเครือข่ายมีความหนาแน่นของโหนดน้อย และเกิดการ invalidate เส้นทางที่ใช้ในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจากการได้รับ RERR เนื่องจากการลดจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ใน AODV-DBF อาจทำให้โหนดที่เข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งถัดไปมีจำนวนไม่เพียงพอ หากโหนดที่มีสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านเป็น valid ได้รับ RERR และไม่สามารถทำหน้าที่ส่งต่อ RREQ ได้ ในขณะที่โหนดอื่นในเครือข่ายที่ไม่ได้รับ RERR ยังคงมีสถานะการส่ง RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านเป็น invalid และ life time ของเอนทรียังไม่สิ้นสุดลงจึงไม่สามารถเข้าร่วมกระบวนการค้นหาเส้นทางหลังจากการ invalidate เส้นทางได้

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพของ AODV และ AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS อาจไม่แตกต่างกันมากนัก สาเหตุเนื่องมาจากการกำหนดรัศมีการแพร่สัญญาณของโหนด และการกำหนดพื้นที่ของเครือข่ายที่ใช้ในการจำลอง ทำให้จำนวนสอระหว่างโหนดต้นทาง และโหนดปลายทางมีความเป็นไปได้ที่จะมีระยะห่างประมาณ 2 ถึง 4 สอพ โดย AODV-DBF ที่ใช้เทคนิค ERS จะแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่า AODV อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น หากกำหนดรูปแบบของเครือข่ายในการจำลองให้โหนดต้นทางมีจำนวนสอพห่างจากโหนดปลายทางโดยเฉลี่ยประมาณ 5 ถึง 7 สอพขึ้นไป จากปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีที่โหนดในเครือข่ายมีความหนาแน่นน้อย และเกิดการ invalidate เส้นทางจากการได้รับ RERR ซึ่งส่งผลให้ AODV-DBF มีจำนวนโหนดที่ส่งต่อ RREQ ในกระบวนการค้นหาเส้นทางครั้งถัดไปไม่เพียงพอ นั้น ในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ AODV-DBF ได้ ด้วยการกำหนดให้โหนดลบทุกเอนทรีใน received power table และเริ่มต้นกระบวนการประเมินสถานะการส่งต่อ RREQ ของโหนดเพื่อนบ้านใหม่หลังจากได้รับ RERR และ แม้ว่า AODV-DBF จะมีค่าใช้จ่ายจากการจัดเก็บข้อมูลเพื่อนบ้านเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ AODV แต่ในทางปฏิบัติสามารถลดค่าใช้จ่ายจาก received power table ใน AODV-DBF ให้น้อยที่สุดได้ ด้วยการใช้โครงสร้างข้อมูลร่วมกับ routing table

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Gwalani, S., E.M. Belding-Royer and C.E. Perkins. 2003. AODV-PA: AODV with Path Accumulation, pp. 527-531. *In IEEE International Conference on Communications (ICC)*.
- 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/pdf/draft-ietf-manet-zone-zrp-04.pdf>, March 12, 2013.
- Henderson, T. R., M. Lacage and G.F. Riley. 2008. Network simulations with the ns-3 simulator. *In SIGCOMM'08 demonstration*.
- Huang, T.C., S.Y. Huang and L. Tang. 2010. AODV-Based Backup Routing Scheme in Mobile Ad Hoc Networks, pp. 254-258. *In International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC)*.
- Ikeda, M., M. Hiyama, E. Kulla, L. Barolli and M. Takizawa. 2011. Multi-hop Wireless Networks Performance Evaluation via NS-3 Simulator, pp. 243-249. *In International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*.
- Issariyakul, T. and E. Hossain. 2011. **Introduction to network simulator NS2**. Springer.
- Johnson, D.B. and D.A. Maltz. 1996. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks, pp. 153-181. **Mobile Computing**. Kluwer Academic Publishers.
- Kanakaris, V., D. Ndzi and K. Ovaliadis. 2009. Improving AODV Performance using Dynamic Density Driven Route Request Forwarding. **International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)** 3: 407-415.

- Khamayseh, Y., O.M. Darwish and S.A. Wedian. 2009. MA-AODV: Mobility Aware Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks, pp. 25-29. *In **Fourth International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC)***.
- Khan, I., A. Javaid and H.L. Qian. 2008. Distance-Based Dynamically Adjusted Probabilistic Forwarding for Wireless Mobile Ad Hoc Networks, pp. 1-6. *In **5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN '08)***.
- Kim, C., E. Talipov and B. Ahn. 2006. A Reverse AODV Routing Protocol in Ad Hoc Mobile Networks, pp. 522-531. **Emerging Directions in Embedded and Ubiquitous Computing**. Vol. 4097. Springer Berlin, Heidelberg.
- Lee, S.J. and M. Gerla. 2000. AODV-BR: Backup Routing in Ad Hoc Networks, pp. 1311-1316. *In **IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)***.
- Liu, C. and J. Kaiser. 2005. A Survey of Mobile Ad Hoc network Routing Protocol. **Univ. of Ulm Tech. Rep. Ser. No. 2003-08**.
- Liu, J. and F.M. Li. 2009. An Improvement of AODV Protocol Based on Reliable Delivery in Mobile Ad Hoc Networks, pp. 507-510. *In **Fifth International Conference on Information Assurance and Security (IAS)***.
- Ni, S.J., Y.C. Tseng, Y.S. Chen and J.P. Sheu. 1999. The broadcast storm problem in mobile ad hoc network, pp. 151-162. *In **Proceeding of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking***.
- Park, I., J. Kim and I. Pu. 2006. Blocking Expanding Ring Search Algorithm for Efficient Energy Consumption in Mobile Ad Hoc Networks, pp. 191-195. *In **Third Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)***.

- Perkins, C.E. and P. Bhagwat. 1994. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers, pp. 234-244. *In Proceedings of the Annual ACM Special Interest Group on Data Communications (SIGCOMM '94).*
- _____ and E.M. Royer. 1999. Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing, pp. 90-100. *In Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99).*
- _____, _____ and S. Das. 2003. **Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing.** Available Source: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, April 2, 2013.
- Pham, N.D. and H. Choo. 2008. Energy Efficient Expanding Ring Search for Route Discovery in MANETs, pp. 3002-3006. *In IEEE International Conference on Communications (ICC).*
- Pu, I.M. and Y. Shen. 2009. Enhanced Blocking Expanding Ring Search in Mobile Ad Hoc Networks, pp. 1-5. *In Third International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS).*
- Shibao, L. and J. Wei. 2010. AODV Route Protocol Research based on Improved ERS Algorithm, pp. 102-106. *In IEEE International Conference on Wireless Communications Networking and Information Security (WCNIS).*
- Siddique, A., A.M. Hanashi, I. Awan and M. Woodward. 2007. Performance Evaluation of Dynamic Probabilistic Flooding using Local Density Information in MANETs, pp. 288-297. *In Proceedings of the 1st International Conference on Network-Based Information Systems.* Regensburg, Germany.
- Tauchi, M., T. Ideguchi and T. Okuda. 2005. Ad-Hoc Routing Protocol Avoiding Route Breaks Based on AODV, pp. 322.1. *In Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS).*

- Varga, A. and R. Hornig. 2008. An overview of the OMNeT++ simulation environment, .
In Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops (Simutools '08).
- Zeng, X., R. Bagrodia and M. Gerla. 1998. GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks, pp.154-161. ***In Proceedings of Twelfth Workshop on Parallel and Distributed Simulation Parallel and Distributed Simulation (PADS 98).***
- Zhang, Q. and D.P. Agrawal. 2003. Dynamic Probabilistic Broadcasting in Mobile Ad Hoc Networks, pp. 2860-2864. ***In Proceedings of the Vehicular Technology Conference.***

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสุกัญญา จิวสกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	17 ธันวาคม 2530
สถานที่เกิด	สมุทรสงคราม
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาการคอมพิวเตอร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์