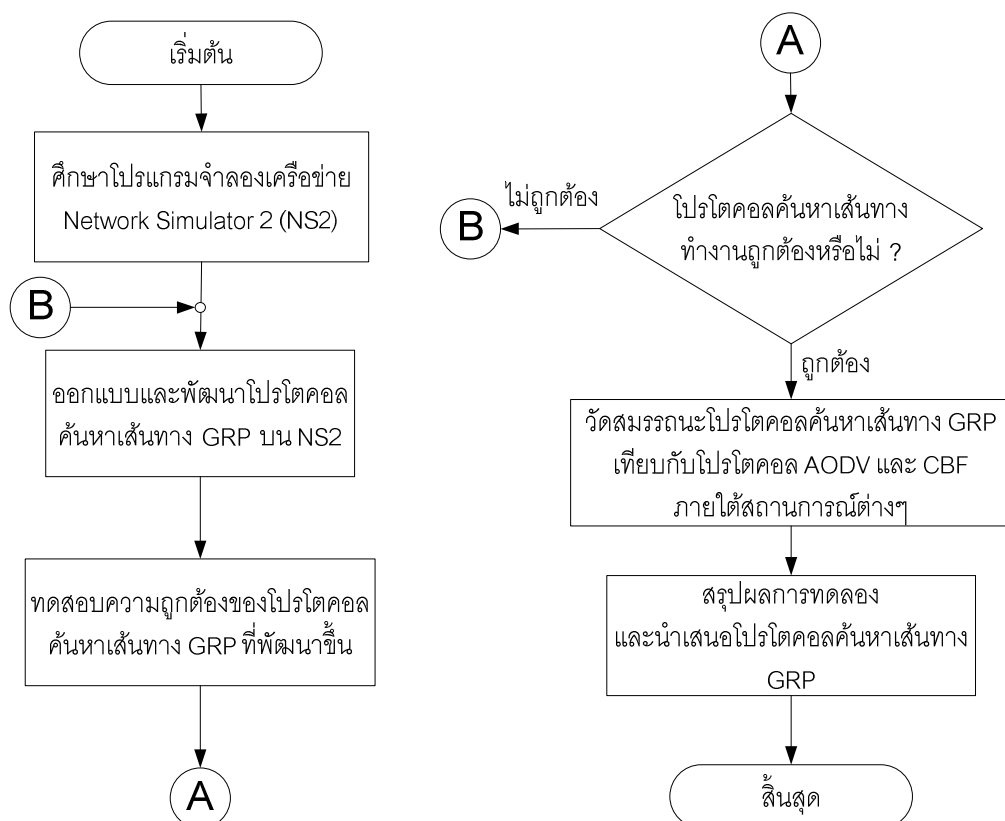


บทที่ 3

วิธีการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอโปรโตคอลค้นหาเส้นทางเชิงกิริดีสำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (Greedy Routing Protocol for Inter-vehicle Communication: GRP) ที่มีความสามารถในการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ โดยไม่อาศัยส่วนให้บริการข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งปัจจุบันของโหนดปลายทาง (location service) ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 แสดงเป็นภาพรวมได้ดังภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1
ภาพรวมของขั้นตอนและวิธีการวิจัย



3.1 ศึกษาโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทู (NS2)

โปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทู (Network Simulator 2: NS2) (NS2, 2009) เป็นตัวจำลองที่นิยมใช้ในการจำลองระบบเครือข่ายทั้งแบบใช้สาย (wired network) และแบบไร้สาย (wireless network) เพื่อศึกษาพฤติกรรมหรือลักษณะเฉพาะพลวัต (dynamic characteristics) ของโปรโตคอลข่ายงานที่ผู้ใช้สนใจ

โปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูทำงานแบบการจำลองเชิงเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete event-driven simulation) (Issariyakul & Hossain, 2009) และอำนวยความสะดวกโดยการทำให้มีตัวจำลองการทำงานของโปรโตคอลหลักที่สำคัญ โปรแกรมประยุกต์พื้นฐานซึ่งทำงานบนเครือข่าย และโปรโตคอลค้นหาเส้นทางพื้นฐานในระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ไว้สำหรับให้ผู้เรียกใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น โปรโตคอลทีซีพี (Transmission Control Protocol: TCP) โปรโตคอลไอพี (Internet Protocol: IP) โปรโตคอลยูดีพี (User Datagram Protocol: UDP) โปรแกรมประยุกต์เอฟทีพี (File Transfer Protocol: FTP) โปรแกรมประยุกต์เทลเน็ต (Telnet) โปรแกรมประยุกต์เวิลด์ไวด์เว็บ (World Wide Web: WWW) และอัลกอริทึมของดิกซ์สตรา (Dijkstra's algorithm) เป็นต้น

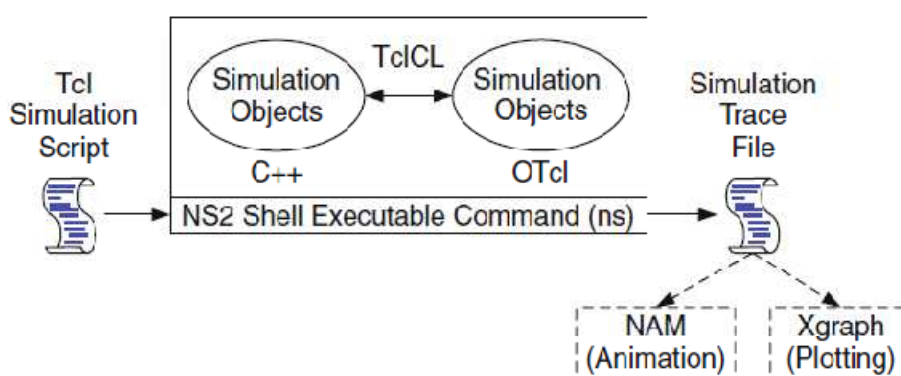
นอกจากนี้ เนื่องจากโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูเป็นซอฟต์แวร์แบบเปิดเผย โปรแกรมต้นฉบับ (open-source software) และจัดสร้างตามหลักการของการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (object-oriented programming) ผู้ใช้สามารถเพิ่มเติมโปรโตคอลที่พัฒนาขึ้นเองเข้าเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูได้อย่างสะดวกอีกด้วย

โปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่สร้างขึ้นโดยใช้ภาษาโปรแกรมซีพลัสพลัส (C++) ส่วนที่สร้างขึ้นโดยใช้ภาษาโปรแกรมโอทีซีแอล (Object-Oriented Tool Command Language: OTcl) และส่วนเชื่อมต่อทีซีแอลซีแอล (tclcl) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ส่วนของโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูซึ่งสร้างโดยภาษาโปรแกรมซีพลัสพลัสจะเป็นส่วนที่อิมพลีเมนต์การทำงานของวัตถุจำลอง (simulation object) ที่ผู้ใช้หาคำสั่งสร้างขึ้นในไฟล์สคริปต์ (Tcl simulation script) เช่น ขั้นตอนการทำงานของโปรโตคอลหรือโปรแกรมประยุกต์ที่โปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูจัดไว้สำหรับผู้ใช้งาน หรือขั้นตอนการทำงานของโปรโตคอลที่ผู้ใช้พัฒนาขึ้น นอกจากนั้น ส่วนของโปรแกรมที่สร้างโดยภาษาโปรแกรมโอทีซีแอลทำหน้าที่เป็นส่วนหน้า (frontend) ของโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทู กล่าวคือ เมื่อผู้ใช้หาคำสั่งสร้างวัตถุจำลองใหม่ในไฟล์สคริปต์ ส่วนของโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทูที่เขียนด้วยภาษาโปรแกรมโอทีซีแอลจะทำการแปลงคำสั่งสคริปต์ดังกล่าวไปเป็นคำสั่งสำหรับสร้าง

ออบเจกต์ของภาษาซีพลัสพลัสและภาษาไอทีซีแอลที่สมนัยกัน (corresponding objects) และท้ายที่สุด ออบเจกต์ที่สมนัยกันของวัตถุจำลองที่ผู้ใช้สร้างขึ้นจะทำงานร่วมกันโดยอาศัยกลไกต่าง ๆ ภายในไดเรกทอรี tclcl ผลลัพธ์ของการทำงานร่วมกันของทั้งสามส่วนหลักของโปรแกรมเอ็นเอสทู คือ เทรซไฟล์ (trace file) ซึ่งเป็นไฟล์ตามรอยที่บันทึกพฤติกรรมของวัตถุจำลอง ณ เวลาต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลากการจำลองเหตุการณ์ หรือ ผู้ใช้อาจกำหนดให้มีการบันทึกพฤติกรรมของวัตถุจำลอง ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อให้สามารถแสดงผลรูปแบบภาพเคลื่อนไหวโดยเครื่องมือแสดงผลพร้อม (Network AniMator: NAM) ก็ได้

ภาพที่ 3.2

โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทู (NS2)



ที่มา: "Introduction to Network Simulator NS2," โดย Teerawat Issariyakul & Ekram Hossain, 2009, Springer Science+Business Media, LLC. , pp. 19-21

3.2 โปรโตคอลค้นหาเส้นทางเชิงกิริติสำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

(Greedy Routing Protocol for Inter-vehicle communication: GRP)

โปรโตคอลจีอาร์พี หรือโปรโตคอลค้นหาเส้นทางเชิงกิริติสำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่พัฒนาขึ้นมานี้มีจุดประสงค์ในการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดปลายทางโดยให้ค่าอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (packet delivery ratio) ที่สูง และมีเวลาเฉลี่ยการหน่วงตลอดเส้นทาง (end-to-end delay) ในระดับต่ำ นอกจากนี้ การค้นหาเส้นทางของโปรโตคอลจีอาร์พีที่พัฒนาขึ้นนี้จะไม่อาศัยส่วนให้บริการข้อมูลตำแหน่งของโหนดปลายทาง (location service) เนื่องจากบริการข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันดังกล่าวยังมีข้อจำกัดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ยังเป็นบริการที่มีให้เฉพาะในพื้นที่จำกัดและมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ยกตัวอย่าง เช่น ฟลีทเมเนจเม้นท์โซลูชันส์ (Fleet Management Solutions) (FMS, 2010) เว็บ เทคไวร์เลส (WebTechWireless) (WTW, 2010) เน็ตเวิร์กฟลีท (Networkfleet) (Networkfleet, 2010)
- ต้องอาศัยอุปกรณ์เสริมเพื่อให้โหนดสามารถทราบตำแหน่งปัจจุบันของตนเอง และให้โหนดสามารถแจ้งข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของแต่ละโหนดกลับไปยัง ศูนย์กลางที่ให้บริการข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของแต่ละโหนดภายในเครือข่าย
- การสอบถามตำแหน่งปัจจุบันของโหนดปลายทางเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย และ ผลรวมความหน่วงตลอดเส้นทางที่แพ็คเก็ตข้อมูลต้องเผชิญ
- ตำแหน่งปัจจุบันของโหนดปลายทางที่สอบถามได้อาจจะไม่มีความถูกต้อง ใน กรณีที่โหนดปลายทางกำลังเคลื่อนที่อยู่

โปรโตคอลจีโออาร์พีค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลจาก โหนดต้นทาง (source node) ไปยังโหนดปลายทาง (destination node) โดยอาศัยข้อมูลจำนวน โหนดเพื่อนบ้านเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกโหนดส่งต่อ (forwarding node) ที่เหมาะสมจำนวนไม่ เกิน $P \geq 1$ โหนด เพื่อส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูลไปที่ละช่วง (hop) จนกระทั่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปถึงโหนด ปลายทางที่ต้องการ แม้ว่าในพื้นที่จะไม่มีบริการข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของโหนดปลายทาง (location service) อยู่ก็ตาม

โปรโตคอลจีโออาร์พีประกอบด้วยขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการ รวบรวมข้อมูล (information gathering) ขั้นตอนการคัดเลือกโหนดส่งต่อ (forwarding node) ที่ เหมาะสม และขั้นตอนการส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูล (data packet forwarding)

3.2.1 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล (Information Gathering)

ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลจะเริ่มปฏิบัติเมื่อโหนดภายในเครือข่ายมีแพ็คเก็ตข้อมูลที่ ต้องการจัดส่งไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ใน 2 กรณี กล่าวคือ เมื่อเป็นโหนดต้นทาง (source node) หรือเมื่อได้รับเลือกให้เป็นโหนดส่งต่อ (forwarding node)

โหนดจะทำการบรอดแคสต์แพ็คเก็ตร้องขอ (request packet) ออกไปเพื่อสอบถาม ข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของโหนดเพื่อนบ้านตนเอง (ภาพที่ 3.3 แสดงฟิลด์ข้อมูลต่าง ๆ ภายในแพ็คเก็ตร้องขอ) หลังจากนั้นจะตั้งเวลารอรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (request reply packet) เป็น

เวลา S_1 วินาที เมื่อเวลา S_1 วินาทีที่ตั้งไว้หมดลง โหนดจะเริ่มทำงานขั้นตอนถัดไป กล่าวคือ ขั้นตอนการคัดเลือกโหนดส่งต่อ (forwarding node) ที่เหมาะสมที่สุด

ภาพที่ 3.3

แสดงฟิลด์ข้อมูลต่าง ๆ ภายในแพ็คเก็ตร้องขอ

Source IP Address	Destination IP Address	Request ID
-------------------	------------------------	------------

โหนดเพื่อนบ้าน (neighboring node) เมื่อได้รับแพ็คเก็ตร้องขอจะทำการตรวจสอบเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เงื่อนไขที่ 1. ตรวจสอบว่า ตนเองเป็นโหนดปลายทางสำหรับแพ็คเก็ตข้อมูลที่กำลังรอจัดส่งหรือไม่?

- หากเป็นโหนดปลายทางสำหรับแพ็คเก็ตข้อมูลให้ทำการบรอดแคสต์แพ็คเก็ตตอบรับ (acknowledgement) ไปให้โหนดที่ส่งแพ็คเก็ตร้องขอ เพื่อให้โหนดดังกล่าวส่งแพ็คเก็ตข้อมูลมาให้ทันทีและนอกจากนี้ โหนดอื่น ๆ ที่ได้ยินการบรอดแคสต์แพ็คเก็ตตอบรับจากโหนดปลายทางก็จะหยุดการประมวลผลงานที่ทำอยู่ในทันที (ภาพที่ 3.4 แสดงฟิลด์ข้อมูลของแพ็คเก็ตตอบรับ)
- หากไม่ใช่โหนดปลายทางสำหรับแพ็คเก็ตข้อมูล จะตรวจสอบเงื่อนไขที่ 2. ต่อไป

เงื่อนไขที่ 2. ตรวจสอบว่า ตนเองเคยเข้าร่วมการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลนี้ในฐานะเป็นโหนดส่งต่อ (forwarding node) หรือไม่?

- หากเคยเข้าร่วมในฐานะโหนดส่งต่อ จะทิ้งแพ็คเก็ตร้องขอนี้ เพื่อป้องกันการเกิดลูบในการค้นหาเส้นทาง และลดแพ็คเก็ตที่ได้รับซ้ำที่โหนดปลายทาง
- หากไม่เคยเข้าร่วมการจัดส่งในฐานะโหนดส่งต่อมาก่อนให้ตรวจสอบก่อนว่ามีข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านซึ่งได้สืบค้นในช่วงเวลาไม่เกิน t วินาทีอยู่หรือไม่? หากมีข้อมูลดังกล่าวอยู่โหนดเพื่อนบ้านที่ได้รับแพ็คเก็ตร้องขอจะใช้ข้อมูลที่มีการจัดเก็บไว้แล้วตอบกลับแพ็คเก็ตร้องขอโดยไม่มีการสืบค้นข้อมูลใหม่ แต่ถ้าไม่มี

การสืบค้นข้อมูลจำนวนโนนดเพื่อนบ้านดังกล่าวไว้ก่อนหรือข้อมูลดังกล่าวที่มีอยู่มีอายุเกินระยะเวลา t วินาทีให้บรอดแคสต์แพ็คเก็ตสอบถามข้อมูลเพื่อนบ้าน (neighbor info inquiry packet) (ภาพที่ 3.5 แสดงฟิลด์ข้อมูลต่าง ๆ ของแพ็คเก็ตสอบถามข้อมูลเพื่อนบ้าน) และตั้งเวลารอรับแพ็คเก็ตตอบกลับข้อมูลจากเพื่อนบ้าน (neighbor info reply packet) เป็นเวลา S_2 วินาที

ภาพที่ 3.4

แสดงฟิลด์ข้อมูลของแพ็คเก็ตตอบรับ (acknowledgement)

Neighbor IP Address	Flag	Request Source IP Address	Request Destination IP Address	Request Source ID packet
---------------------	------	---------------------------	--------------------------------	--------------------------

ภาพที่ 3.5

แสดงฟิลด์ข้อมูลต่าง ๆ ของแพ็คเก็ตสอบถามข้อมูลเพื่อนบ้าน (neighbor info inquiry packet)

Source Inquiry IP Address	Source Inquiry ID packet	Request Source IP Address	Request Destination IP Address	Request Source ID packet
---------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------------	--------------------------

เมื่อโนนดใด ๆ ได้รับแพ็คเก็ตสอบถามข้อมูลเพื่อนบ้าน (neighbor info inquiry packet) ให้ทำการตรวจสอบเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เงื่อนไขที่ 1. ตรวจสอบว่า ตนเองเป็นโนนดที่เริ่มต้นส่งแพ็คเก็ตร้องขอ (request packet) หรือไม่?

- หากตนเป็นโนนดที่เริ่มต้นส่งแพ็คเก็ตร้องขอ ไม่ต้องประมวลผลแพ็คเก็ตนี้ต่อ นั่นคือจะทิ้งแพ็คเก็ตสอบถามข้อมูลเพื่อนบ้านนี้ (drop packet)
- หากไม่ใช่โนนดที่เริ่มต้นส่งแพ็คเก็ตร้องขอ จะตรวจสอบเงื่อนไขที่ 2. ต่อไป

เงื่อนไขที่ 2. ตรวจสอบว่า ตนเองเป็นโนนดปลายทางสำหรับแพ็คเก็ตข้อมูลที่กำลังรอจัดส่งหรือไม่?

- หากตนเป็นโหนดปลายทางสำหรับแพ็คเก็ตข้อมูลที่กำลังรอจัดส่งข้อมูล ให้ทำการบรอดแคสต์แพ็คเก็ตตอบรับ (acknowledgement packet) เป็นผลให้โหนดปลายทางได้รับการส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูลนั้นทันที และนอกจากนี้โหนดอื่น ๆ ที่ได้รับแพ็คเก็ตตอบรับจะหยุดส่งแพ็คเก็ตตอบกลับด้วย
- ถ้าไม่ใช่โหนดปลายทางให้ทำการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลตอบกลับเพื่อนบ้าน (neighbor info reply packet) ดังภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6

แสดงฟิลด์ของแพ็คเก็ตข้อมูลตอบกลับเพื่อนบ้าน

Source Inquiry IP Address	Source Inquiry ID packet	Neighbor IP Address
---------------------------	--------------------------	---------------------

เมื่อโหนดเพื่อนบ้านคอยจนครบตามเวลา S_2 วินาทีแล้ว ให้ทำการส่งแพ็คเก็ตตอบกลับ (request reply) ซึ่งภายในบรรจุจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเองกลับไปให้กับโหนดต้นทาง (source node) หรือโหนดส่งต่อ (forwarding node) ซึ่งเป็นโหนดที่เริ่มต้นส่งแพ็คเก็ตร้องขอ (request packet) ภาพที่ 3.7 แสดงฟิลด์ข้อมูลของแพ็คเก็ตตอบกลับ

ในขั้นตอนนี้หากมีโหนดเพื่อนบ้านใดที่ยังไม่ได้บรอดแคสต์แพ็คเก็ตตอบกลับไปยังโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อ และมีจำนวนโหนดเพื่อนบ้านน้อยกว่าที่ได้ยินจากการบรอดแคสต์แพ็คเก็ตตอบกลับจากโหนดเพื่อนบ้านอื่น ๆ ให้ยุติการทำงานในขั้นตอนนี้ทันที ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดโอเวอร์เฮดในการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอลจีอาร์พี

ภาพที่ 3.7

แสดงฟิลด์ของแพ็คเก็ตตอบกลับ

Request Source IP Address	Request Destination IP Address	Request Source ID packet	Neighbor IP Address	Number of neighbor
---------------------------	--------------------------------	--------------------------	---------------------	--------------------

3.2.2 ขั้นตอนการคัดเลือกโหนดส่งต่อ (Forwarding Node) ที่เหมาะสม

โหนดผู้ส่งแพ็คเก็ตร้องขอ (request packet) ในที่นี้หมายถึงโหนดต้นทาง (source node) หรือโหนดส่งต่อ (forwarding node) จะพิจารณาโหนดเพื่อนบ้านทุกโหนดที่ตอบกลับแพ็คเก็ตร้องขอด้วยการส่งข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเองกลับมาเป็นโหนดให้เลือก (candidate node) ในจำนวนโหนดให้เลือกเหล่านี้ โหนดผู้ส่งแพ็คเก็ตร้องขอจะคัดเลือกจำนวนไม่เกิน $P \geq 1$ โหนดที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นโหนดส่งต่อ (forwarding node) โดยโหนดที่ได้รับคัดเลือกจะรับแพ็คเก็ตข้อมูลไปเพื่อทำหน้าที่เป็นผู้ส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูลในช่วงถัดไป และเพื่อป้องกันการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลซ้ำซ้อน โหนดที่ได้รับคัดเลือกให้เป็นโหนดส่งต่อจะทำการบันทึกข้อมูลเฉพาะของแพ็คเก็ตข้อมูลเอาไว้ด้วย

โปรโตคอลจีอาร์พีอาศัยรูปแบบผสมระหว่างตัวแบบ Set Covering (Daskin, 1995, p. 92) และตัวแบบ Maximum Covering Location (Daskin, 1995, p. 110) ที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 2.3 เป็นแบบจำลองปัญหาการคัดเลือกโหนดให้เลือกที่เหมาะสมที่สุดจำนวนไม่เกิน $P \geq 1$ โหนด

เมื่อจำลองปัญหาการคัดเลือกโหนดให้เลือกที่เหมาะสมที่สุดจำนวนไม่เกิน $P \geq 1$ โหนดของโปรโตคอลจีอาร์พีด้วยรูปแบบผสมของตัวแบบ Set Covering และตัวแบบ Maximum Covering Location จะได้บทนิยามของปัญหา (Problem Definition) เป็นดังนี้

บทนิยามปัญหา : คัดเลือกโหนดให้เลือกจำนวนไม่เกิน P โหนด ซึ่งทำให้ผลรวมจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของโหนดให้เลือกที่ได้รับเลือกมีค่ามากที่สุด

ภาพที่ 3.8 แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ข้อมูลนำเข้า (inputs) ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และเงื่อนไขบังคับ (constraints) ของปัญหาการคัดเลือกโหนดให้เลือกที่เหมาะสมที่สุดจำนวนไม่เกิน P โหนดของโปรโตคอลจีอาร์พี จากภาพสมการที่ (3.8 a) แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา นั่นคือ ต้องการให้ผลรวมของจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของโหนดให้เลือกมีค่ามากที่สุด ในขณะที่สมการที่ (3.8 b) ระบุเงื่อนไขบังคับของปัญหา นั่นคือ เลือกโหนดให้เลือกไม่เกินจำนวน P โหนด และท้ายที่สุดสมการที่ (3.8 c) เป็นเงื่อนไขบังคับปริพันธ์ (integrality constraint) ซึ่งกำหนดให้ค่าของตัวแปรตัดสินใจ Z_i ต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม 0 หรือ 1 เท่านั้น

ภาพที่ 3.8

การใช้รูปแบบผสมระหว่างตัวแบบ Set Covering และตัวแบบ Maximum Covering Location เพื่อจำลองปัญหาการคัดเลือกโหนดให้เลือกที่เหมาะสมที่สุดจำนวน P โหนดของโปรโตคอลจีอาร์พี

ข้อมูลนำเข้า (inputs)

h_i = จำนวนโหนดเพื่อนบ้าน (neighboring node) ของโหนด i

P = จำนวนโหนดส่งต่อ (forwarding node) ที่มากที่สุดที่สามารถคัดเลือกได้

ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables)

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อเลือกโหนด } i \text{ เป็นโหนดส่งต่อ} \\ 0 & \text{เมื่อไม่เลือกโหนด } i \text{ เป็นโหนดส่งต่อ} \end{cases}$$

$$\text{MAXIMIZE} \quad \sum_i h_i Z_i \quad (3.8 \text{ a})$$

$$\text{SUBJECT TO:} \quad \sum_i Z_i \leq P \quad (3.8 \text{ b})$$

$$Z_i = 0, 1 \quad \forall i \quad (3.8 \text{ c})$$

ภายหลังจากที่โหนดต้นทางทำการคัดเลือกโหนดส่งต่อที่เหมาะสมจำนวน P โหนดในช่วงแรกแล้ว โหนดส่งต่อแต่ละโหนดในช่วงอื่น ๆ จะทำการคัดเลือกโหนดส่งต่อที่เหมาะสมเพียงโหนดเดียวเท่านั้น การปรับเปลี่ยนการทำงานของโปรโตคอลจีอาร์พี ดังกล่าวข้างต้น จะส่งผลให้มีแพ็คเก็ตข้อมูลเดินทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้เส้นทางที่แตกต่างกันเป็นจำนวนทั้งสิ้น P เส้นทาง

3.2.3 ขั้นตอนการส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูล (Data Packet Forwarding)

โหนดต้นทาง (source node) หรือโหนดส่งต่อ (forwarding node) ส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโหนดส่งต่อที่เหมาะสมซึ่งได้คัดเลือกไว้แล้วจากในขั้นตอนที่ผ่านมา โหนดส่งต่อที่เพิ่งจะ

ได้รับแพ็คเกจข้อมูลก็จะทำงานในฐานะโหนดผู้ส่งในช่วงถัดไป นั่นคือ จะเริ่มปฏิบัติการในขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนการคัดเลือกโหนดส่งต่อ และขั้นตอนการจัดส่งแพ็คเกจข้อมูลใหม่ จนกระทั่งแพ็คเกจข้อมูลเดินทางไปยังโหนดปลายทาง

3.3 การวัดสมรรถนะของโปรโตคอล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวทางการศึกษาลักษณะเฉพาะพลวัต (dynamic characteristic) และการวัดสมรรถนะ (performance) ของโปรโตคอลจีอาร์พีเปรียบเทียบกับโปรโตคอลหลักอื่น ๆ

ในการศึกษาลักษณะเฉพาะพลวัตของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) ผู้วิจัยจะทำการศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (tunable parameters) จำนวน 3 ตัวที่มีต่อสมรรถนะของโปรโตคอล ได้แก่ เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอรับแพ็คเกจตอบกลับ (S_1) เวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอรับแพ็คเกจตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) และอายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่แต่ละโหนดจัดเก็บไว้ (t) นอกจากนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดลองเพื่อวัดและเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พีกับสมรรถนะของโปรโตคอลเอโอดีวี (Ad hoc On-demand Distance Vector Routing: AODV) (C. E. Perkins & Royer, 1999) และโปรโตคอลซีบีเอฟ (Contention-Based Forwarding: CBF) (Füßler, et al., 2003) ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ อีกด้วย

เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะพลวัตของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) รวมถึงการวัดสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พีเปรียบเทียบกับโปรโตคอลเอโอดีวี (AODV) และซีบีเอฟ (CBF) ผู้วิจัยทำการจัดสร้างเครือข่ายไร้สายจำลองบนโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทู (NS2) และใช้ตัววัดสมรรถนะโปรโตคอล (performance metrics) ดังนี้

- ค่าอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet Delivery Ratio) หมายถึง วัดจากอัตราส่วนระหว่างแพ็คเกจข้อมูลที่สามารถจัดส่งไปยังโหนดปลายทางได้สำเร็จ และจำนวนแพ็คเกจข้อมูลทั้งหมดที่โหนดต้นทางจัดส่ง ค่าตัววัดสมรรถนะอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลนี้จะอยู่ในช่วง $[0, 1]$ หรือ $[0\%, 100\%]$ โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 หรือ 100% จะแสดงถึงอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลที่สูง ซึ่งหมายถึงโปรโตคอลที่ทำการทดสอบมีสมรรถนะสูงนั่นเอง

- ค่าเฉลี่ยการหน่วงตลอดเส้นทาง (Average End-to-end Delay) ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่แต่ละแพ็คเก็ตใช้ข้อมูลใช้ในการเดินทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง สำหรับตัววัดสมรรถนะค่าเฉลี่ยการหน่วงตลอดเส้นทางที่ต่ำแสดงว่าโปรโตคอลสามารถค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการแสดงว่าโปรโตคอลที่ทำการทดสอบมีสมรรถนะที่สูง
- โอเวอร์เฮดเฉลี่ยในการค้นหาโหนดปลายทาง (Average Routing Overhead) ได้แก่ จำนวนแพ็คเก็ตอื่น ๆ นอกเหนือจากแพ็คเก็ตข้อมูลที่ต้องการจัดส่งภายในเครือข่ายโดยเฉลี่ยเพื่อใช้ในการจัดส่งแพ็คเก็ตข้อมูลแต่ละแพ็คเก็ตไปยังโหนดปลายทาง ค่าตัววัดสมรรถนะโอเวอร์เฮดเฉลี่ยที่ต่ำแสดงถึงสมรรถนะที่สูงของโปรโตคอล
- ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็คเก็ตข้อมูลซ้ำซ้อนที่โหนดปลายทางได้รับ (Average Duplicate Packet) หมายถึง แพ็คเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับซ้ำ ตัววัดสมรรถนะค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็คเก็ตข้อมูลซ้ำซ้อนที่โหนดปลายทางได้รับที่ต่ำ แสดงถึงสมรรถนะที่สูงของโปรโตคอล

3.3.1 พารามิเตอร์ (Parameters)

เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะพลวัต (dynamic characteristics) ของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) ผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของโปรโตคอลของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (tunable parameters) จำนวน 3 ตัว ได้แก่ เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) เวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) และอายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่แต่ละโหนดจัดเก็บไว้ (t) โดยค่าพารามิเตอร์ของการทดลองที่หนึ่งเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์อายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้าน (t) เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1 และค่าพารามิเตอร์ของการทดลองที่สองเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) และเวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.2 ผู้วิจัยศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ S_1 และ S_2 ร่วมกัน เนื่องจากพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในลักษณะซึ่งเวลาที่โหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) จะต้องมีค่ามากกว่าเวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้าน

รอรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) เพื่อให้โหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อสามารถได้รับข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านสำหรับการตัดสินใจเลือกโหนดส่งต่อที่เหมาะสมได้

รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายสำหรับทั้งการทดลองที่หนึ่งและสองเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ซึ่งอ้างอิงจากตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ (Random Waypoint Model: RW) ซึ่งโหนดใด ๆ ในเครือข่ายจะเคลื่อนที่อย่างอิสระไปยังตำแหน่งปลายทางที่เกิดจากการสุ่ม

ตารางที่ 3.1

ค่าพารามิเตอร์การทดลองที่หนึ่งเพื่อศึกษาลักษณะพลวัตของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP):

ผลกระทบของพารามิเตอร์อายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้าน (t)

Parameter	Value
Routing protocols	GRP
Mobility models	Random Waypoint
Simulation area	750 X 750 m ²
Simulation time	50 second
Max. node speed	60, 80, 100, 180 km/h
Traffic source	CBR, packet 100 bytes
Number of nodes	32 nodes
Source-destination pairs	10 pairs
*GRP times for S_1 , S_2 , t	1, 0.5, 2 seconds
	1, 0.5, 3 seconds
	1, 0.5, 4 seconds

ตารางที่ 3.2

ค่าพารามิเตอร์การทดลองที่สองเพื่อศึกษาลักษณะพลวัตของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP): ผลกระทบของพารามิเตอร์เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอบรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) และเวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอบรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2)

Parameter	Value
Routing protocols	GRP
Mobility models	Random Waypoint
Simulation area	750 X 750 m ²
Simulation time	50 second
Max. node speed	60, 80, 100, 180 km/h
Traffic source	CBR, packet 100 bytes
Number of nodes	32 nodes
Source-destination pairs	10 pairs
*GRP times for S_1 , S_2 , t	0.5, 0.25, 3 seconds
	1.0, 0.5, 3 seconds
	1.5, 1.0, 3 seconds

การทดลองถัดไปเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะพลวัต (dynamic characteristics) ของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) ผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของโปรโตคอลของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (tunable parameters) จำนวน 3 ตัว ได้แก่ เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอบรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) เวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอบรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) และอายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่แต่ละโหนดจัดเก็บไว้ (t) โดยค่าพารามิเตอร์ของการทดลองที่สามเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์อายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้าน (t) เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.3 และค่าพารามิเตอร์ของการทดลองที่สี่เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอบรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) และเวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอบรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.4 ผู้วิจัยศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ S_1 และ S_2 ร่วมกัน เนื่องจากพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กันใน

ลักษณะซึ่งเวลาที่โหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) จะต้องมีความมากกว่าเวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านรอรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2) เพื่อให้โหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อสามารถได้รับข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านสำหรับการตัดสินใจเลือกโหนดส่งต่อที่เหมาะสมได้

รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายสำหรับทั้งการทดลองที่สามและสี่เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ซึ่งอ้างอิงจากตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด (Manhattan Grid Mobility Model: MG) ซึ่งโหนดใด ๆ ในเครือข่ายจะเคลื่อนที่อยู่บนถนนที่เป็นระเบียบลักษณะเป็นกริด

ตารางที่ 3.3

ค่าพารามิเตอร์การทดลองที่สามเพื่อศึกษาลักษณะพลวัตของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP):

ผลกระทบของพารามิเตอร์อายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้าน (t)

Parameter	Value
Routing protocols	GRP
Mobility models	Manhattan Grid
Simulation area	1000 X 1000 m ²
Simulation time	200 second
Max. node speed	60, 80, 100, 180 km/h
Traffic source	CBR, packet 100 bytes
Number of nodes	40 nodes
Source-destination pairs	10 pairs
*GRP times for S_1 , S_2 , t	1, 0.5, 2 seconds
	1, 0.5, 3 seconds
	1, 0.5, 4 seconds

ตารางที่ 3.4

ค่าพารามิเตอร์การทดลองที่สี่เพื่อศึกษาลักษณะพลวัตของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP): ผลกระทบของพารามิเตอร์เวลาสำหรับโหนดต้นทางหรือโหนดส่งต่อหรือรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) และเวลาสำหรับโหนดเพื่อนบ้านหรือรับแพ็คเก็ตตอบกลับเพื่อนับจำนวนโหนดเพื่อนบ้านของตนเอง (S_2)

Parameter	Value
Routing protocols	GRP
Mobility models	Manhattan Grid
Simulation area	1000 X 1000 m ²
Simulation time	200 second
Max. node speed	60, 80, 100, 180 km/h
Traffic source	CBR, packet 100 bytes
Number of nodes	40 nodes
Source-destination pairs	10 pairs
*GRP times for S_1 , S_2 , t	0.5, 0.25, 3 seconds
	1.0, 0.5, 3 seconds
	1.5, 1.0, 3 seconds

ในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) กับสมรรถนะของโปรโตคอลเอโอดีวี (AODV) และโปรโตคอลซีบีเอฟ (CBF) นั้น ผู้วิจัยทำการทดลองโดยการวัดสมรรถนะของโปรโตคอลทั้งสามเมื่อโหนดภายในเครือข่ายมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนดภายในเครือข่ายที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ (Random Waypoint Model: RW) ซึ่งโหนดใด ๆ ในเครือข่ายจะเคลื่อนที่อย่างอิสระไปยังตำแหน่งปลายทางที่เกิดจากการสุ่ม (การทดลองที่ห้า) และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด (Manhattan Grid Mobility Model: MG) ซึ่งโหนดภายในเครือข่ายจะเคลื่อนที่คล้ายกับอยู่บนถนนที่เป็นระเบียบลักษณะเป็นกริด (การทดลองที่หก)

สำหรับการทดลองที่ห้าเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) โปรโตคอลเอโอดีวี (AODV) และโปรโตคอลซีบีเอฟ (CBF) เมื่อโหนดภายในเครือข่ายเคลื่อนที่ตามตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์นั้น ผู้วิจัยจำลองเครือข่ายไร้สายบนโปรแกรมจำลอง

เครือข่ายเอ็นเอสทู (NS2) ซึ่งประกอบไปด้วยโหนดที่เคลื่อนที่ได้จำนวน 32 โหนด ครอบคลุมพื้นที่ขนาด 750 X 750 ตารางเมตร คู่ของจำนวนโหนดต้นทางและโหนดปลายทางได้มาจากการสุ่มเลือกจำนวน 10 คู่ กำหนดความเร็วของโหนดภายในเครือข่ายเท่ากับ 60 80 100 และ 180 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (tunable parameters) ของโปรโตคอลจีอาร์พี ได้แก่ เวลารอรับแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) เวลารอรับแพ็คเก็ตตอบกลับจากเพื่อนบ้าน (S_2) และอายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่จัดเก็บไว้ (t) เป็น 1 วินาที 0.5 วินาที และ 3 วินาทีตามลำดับ ตารางที่ 3.5 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ของการทดลองที่ห้าเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลทั้งสาม

ตารางที่ 3.5

ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองที่ห้าเพื่อวัดสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP)

เทียบกับโปรโตคอลเอโอดีวี (AODV) และโปรโตคอลซีบีเอฟ (CBF)

เมื่อโหนดภายในเครือข่ายเคลื่อนที่ตามตัวแบบการเคลื่อนที่แรนดอมเวย์พอยต์

Parameter	Value
Routing protocols	GRP, AODV, CBF
Mobility models	Random Waypoint
Simulation area	750 X 750 m ²
Simulation time	50 second
Max. node speed	60, 80, 100, 180 km/h
Traffic source	CBR, packet 100 bytes
Number of nodes	32 nodes
Source-destination pairs	10 pairs
*GRP time for S_1 , S_2 , t	1, 0.5, 3 second

สำหรับการทดลองที่หกเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP) โปรโตคอลเอโอดีวี (AODV) และโปรโตคอลซีบีเอฟ (CBF) เมื่อโหนดภายในเครือข่ายเคลื่อนที่ตามตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริดนั้น ผู้วิจัยจำลองเครือข่ายไร้สายบนโปรแกรมจำลองเครือข่ายเอ็นเอสทู (NS2) จำนวนโหนดที่เคลื่อนที่ได้เป็นจำนวน 40 โหนด ครอบคลุมพื้นที่ขนาด

1000 X 1000 ตารางเมตร คู่ของจำนวนโหนดต้นทางและโหนดปลายทางได้มาจากการสุ่มเลือกจำนวน 10 คู่ กำหนดความเร็วของโหนดภายในเครือข่ายเช่นเดียวกับการทดลองแรกคือ 60 80 100 และ 180 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (tunable parameters) ของโปรโตคอลจีอาร์พี ได้แก่ เวลาตอบสนองแพ็คเก็ตตอบกลับ (S_1) เวลาตอบสนองแพ็คเก็ตตอบกลับจากเพื่อนบ้าน (S_2) และอายุของข้อมูลจำนวนโหนดเพื่อนบ้านที่จัดเก็บไว้ (t) เป็น 1 วินาที 0.5 วินาที และ 3 วินาทีตามลำดับ ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ของการทดลองที่หกเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลทั้งสาม

ตารางที่ 3.6

ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองที่หกเพื่อวัดสมรรถนะของโปรโตคอลจีอาร์พี (GRP)

เทียบกับโปรโตคอลเอโอดีวี (AODV) และโปรโตคอลซีบีเอฟ (CBF)

เมื่อโหนดภายในเครือข่ายเคลื่อนที่ตามตัวแบบการเคลื่อนที่แมนฮัตตันกริด

Parameter	Value
Routing protocols	GRP, AODV, CBF
Mobility models	Manhattan Grid
Simulation area	1000 X 1000 m ²
Simulation time	200 second
Max. node speed	60, 80, 100, 180 km/h
Traffic source	CBR, packet 100 bytes
Number of nodes	40 nodes
Source-destination pairs	10 pairs
*GRP time for S_1 , S_2 , t	1, 0.5, 3 second