บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของการแพร่ข้อความจากโพรโทคอล DECA และ POCA โดยเริ่มจากการกำหนดตัววัดสมรรถนะของระบบ (Performance Metrics) ในแต่ละด้าน คือ ความเชื่อถือได้ ค่าใช้จ่าย ความเร็วของการแพร่ข้อมูล และความสำเร็จในการเลือกโหนดที่จะแพร่ข้อความต่อ กำหนดเครื่องมือ โปรแกรมจำลองที่ใช้ และสภาพแวดล้อมในการทดลอง ผลการการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะในแง่มุมต่างๆ คือ การทดสอบแบบหนึ่งข้อความ หลายข้อความพร้อมกัน และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งในการทดลองเหล่านี้จะแสดงให้เห็นความแตกต่างด้านสมรรถนะ และประสิทธิภาพระหว่างโพรโทคอลการแพร่ที่มีความเชื่อถือได้แบบ DECA และ POCA กับโพรโทคอลอื่นๆ

5.1 ตัววัดสมรรถนะของโพรโทคอล (Performance Metrics)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดสมรรถนะของโพรโทคอลใน 4 ด้าน คือ

1) ความเชื่อถือได้ (Reliability) : วัตถุประสงค์หลักในการออกแบบโพรโทคอลคือสามารถส่งผ่านข้อมูลให้กับรถยนต์ในบริเวณพื้นที่หนึ่งหนึ่งให้ได้รับข้อมูลโดยที่มีความเชื่อถือได้ ดังนั้นค่าความเชื่อถือได้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์จากจำนวนรถยนต์ที่ได้รับข้อความต่อจำนวนรถยนต์ทั้งหมดในการทดลองแต่ละครั้ง ความเชื่อถือได้ที่สูงแสดงถึงสมรรถนะที่สูงของโพรโทคอล

2) ค่าใช้จ่าย (Overhead) ในการแพร่ข้อมูลโดยที่ยังมีความเชื่อถือสูงสุดย่อมมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า ดังนั้นในการทดลองจึงมีการนับจำนวนครั้งการส่งข้อความในการแพร่ข้อความซ้ำทั้งหมดเพื่อให้รถยนต์ทั้งหมดได้รับข้อความในช่วงเวลาที่กำหนด และจำนวนของ Beacon Message ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ค่าใช้จ่ายจะแสดงเป็นปริมาณของเครือข่ายที่ถูกใช้ในการทำงานต่อการแพร่หนึ่งข้อความ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของโพรโทคอล

3) ความเร็วของการแพร่ข้อมูล (Speed of Data Dissemination) เนื่องจากการบริการที่มีอยู่ในปัจจุบันสำหรับรถยนต์ในระบบจราจรอัจฉริยะ เช่น การหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุ หรือการวางแผนการเดินทาง ซึ่งข้อมูลที่บริการเหล่านี้ใช้จำเป็นจะต้องเป็นข้อมูลที่ทันท่วงทีต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นการแพร่ข้อมูลจึงจะต้องทำได้รวดเร็วพอที่จะให้ข้อความที่แพร่ออกไปยังมีประโยชน์ต่อระบบ ดังนั้นถ้าสามารถแพร่ข้อมูลได้รวดเร็วได้เท่าใดก็ยิ่งทำให้การแพร่ข้อมูลครั้งนั้นมีโอกาสนำไปใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้น

4) ความสำเร็จในการเลือกโหนดที่จะแพร่ข้อความต่อ (Preferred Selection Success Rate) เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของโพรโทคอล DECA และ POCA ขึ้นอยู่

กับความสำเร็จในการเลือกโหนดส่งต่อ การเลือกโหนดถัดไปจะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อโหนดที่ถูกเลือกนั้นส่งต่อข้อความนั้นให้กับโหนดอื่นในระบบ ดังนั้นค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดที่จะส่งข้อความแสดงถึงความสามารถในการเลือกโหนดของโพรโทคอล

5.2 เครื่องมือในการวัดสมรรถนะของโพรโทคอล

เนื่องจากโพรโทคอลถูกออกแบบเพื่อให้ทำงานในสภาพแวดล้อมที่เป็นการจราจรของรถยนต์ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะมีการกำหนดการเคลื่อนไหวของรถยนต์บนถนน เพื่อให้ได้สภาพการทดลองในแต่ละโพรโทคอลที่เหมือนกัน นอกจากนี้การทดลองบนรถยนต์จริงยังต้องใช้งบประมาณที่สูง และไม่สามารถใช้โหนดจำนวนมากเพื่อทดลองได้ ดังนั้นในการวัดสมรรถนะของโพรโทคอลจึงใช้โปรแกรมจำลอง ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมจำลอง 2 ส่วน คือ

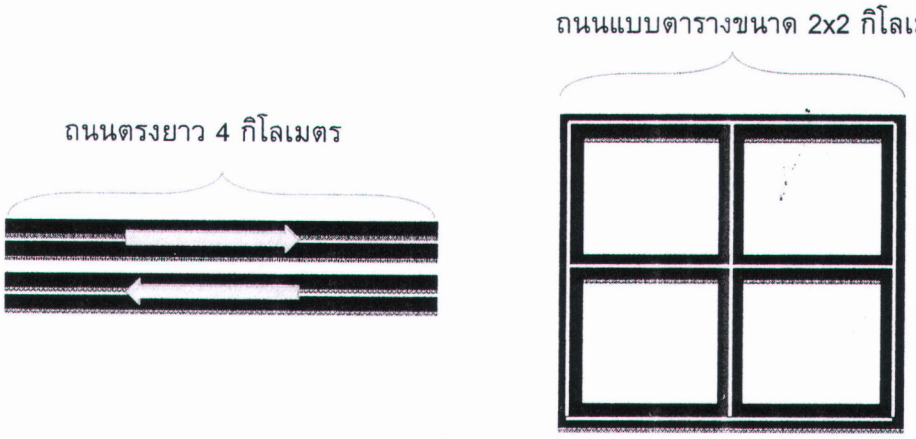
1) โปรแกรมจำลอง SUMO (Simulation of Urban Mobility) [20] ซึ่งจะจำลองพฤติกรรมเสมือนจริงของรถยนต์บนถนน สามารถกำหนดพฤติกรรมของรถยนต์ ความหนาแน่นของรถยนต์ และสามารถกำหนดลักษณะของถนนได้

2) โปรแกรมจำลอง NS-2.34 (Network Simulation) [21] เป็นโปรแกรมจำลองลักษณะการทำงานของเครือข่ายเสมือนจริง

ในการทดลองเริ่มต้นด้วยการจำลองพฤติกรรมของรถยนต์โดยใช้ SUMO สร้างพฤติกรรมการวิ่งของรถยนต์บนถนน จากนั้นจึงนำบันทึกการวิ่งของรถยนต์มาแปลงจากรูปแบบ XML เป็นรูปแบบ tcl ที่สามารถใช้ได้บนโปรแกรมจำลอง NS-2.34 โดยใช้โปรแกรม TraNS [22] ในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ

5.3 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็นลักษณะของถนนทางหลวง และถนนในเมือง ถนนทางหลวงเป็นถนนทางตรงความยาว 4 กิโลเมตร มีช่องทางจราจรขนาด 4 ช่องทาง และถนนในเมืองเป็นถนนลักษณะตารางขนาด 2x2 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วยสี่แยก 1 แยก และสามแยกจำนวน 4 แยก ทั้งหมดไม่มีไฟจราจร แต่ละแยกห่างกัน 1 กิโลเมตร มีช่องทางจราจรขนาด 2 ช่องทาง ความหนาแน่นของรถยนต์โดยเฉลี่ยถูกแบ่งออกเป็นความหนาแน่นขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 5.1 เพื่อทดสอบการทำงานของโพรโทคอล บนพฤติกรรมของรถยนต์ที่แตกต่างกัน และผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของโพรโทคอล สภาพการจราจรถูกจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลอง SUMO รุ่น 0.10.3 และบันทึกการวิ่งถูกแปลงรูปแบบโดยใช้โปรแกรม TraNS รุ่น 1.0



ก) ข)

รูปที่ 5.1 ลักษณะถนนที่ใช้ในการทดลอง ก) ถนนทางหลวง ข) ถนนในเมือง

ในการทดลองใช้ NS-2.34 แต่ละครั้งจะมีข้อความที่ถูกแพร่จำนวน 1 ข้อความ ขนาด 512 ไบต์ ใช้ข้อความที่มีการกำหนดอายุ 10 วินาที ซึ่งหากข้อความหมดอายุจะสิ้นสุดการทดสอบครั้งนั้น และเก็บข้อมูลผลการทดลองทันที ทดลองระบบสื่อสารไร้สายของโหนดทำงานตามมาตรฐาน IEEE802.11 โดยที่มีการชนกันของสัญญาณตามปกติ มีระยะการเชื่อมต่อสูงสุดที่ 250 เมตร โพรโทคอลที่ใช้ในการเปรียบเทียบมี ดังนี้

- Simple Flooding (SF): วิธีการแพร่ข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ไม่ต้องการข้อมูลในการทำงาน และสามารถแพร่ข้อมูลได้เร็วที่สุด

- Simple Flooding with Random Time of Rebroadcast (SFR) : วิธีการแพร่ข้อมูลเลียนแบบการทำงานของ SF แต่จะมีการหน่วงเวลาแบบสุ่มก่อนที่โหนดจะส่งต่อข้อมูลออกไป เพื่อจำลองลักษณะการทำงานของโพรโทคอลที่ใช้เทคนิค Store-and-Forward แบบง่ายๆ

- AckPBSM : โพรโทคอลการแพร่ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้ที่มีสมรรถนะดีที่สุดในงานวิจัยที่พบ ทำงานโดยใช้ข้อมูลจีพีเอส ใช้เทคนิค Store-and-Forward และใช้ Beacon ในการทำงาน การตั้งค่าการทำงานเป็นไปตาม [11]

- DECA : การแพร่ที่มีความเชื่อถือได้แบบรู้ข้อมูลความหนาแน่นบนเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ ทำงานโดยไม่ใช้ข้อมูลจากจีพีเอส ใช้เทคนิค Store-and-Forward และใช้ Beacon ในการทำงาน

- POCA : การแพร่ที่มีความเชื่อถือได้แบบรู้ข้อมูลตำแหน่งบนเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ ทำงานโดยใช้ข้อมูลจีพีเอส เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ใช้เทคนิค Store-and-Forward และใช้ Beacon ในการทำงาน

การทำ Beacon ของ DECA และ POCA คำนวณได้จาก LIA และ STA ตามลำดับ ซึ่งการปรับแต่งค่าเป็นไปตามความเหมาะสมของช่วงเวลาที่ได้จากผลการทดลองในโปรแกรมจำลอง ในภาคผนวก ก สำหรับ DECA และภาคผนวก ข สำหรับ POCA ซึ่งการปรับตั้งค่าข้างต้น และค่าอื่นๆที่กล่าวมาเป็นไปตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การตั้งค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง	จำนวนครั้ง : 20 ครั้ง ผลการทดลองใช้ค่าเฉลี่ย ระยะเวลาในการทดลองต่อหนึ่งข้อความ : 20 วินาที
การสื่อสารไร้สาย	มาตรฐาน : IEEE802.11 ระยะเชื่อมต่อสูงสุด : 250 เมตร
สภาพการจราจร	ความหนาแน่นของรถยนต์ : 2, 6, 10, 20, 30, 40, 60, 80 คัน/กิโลเมตร ความเร็วสูงสุด : 50, 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง
ข้อความ	อายุ : 10 วินาที ขนาด : 512 ไบต์
SFR	เวลารอสูงสุด : 2 วินาที
DECA	เวลารอสูงสุด : 0.2 วินาที ช่วงเวลาการทำบีคอน : LIA (ทุก 1.5-7 วินาที) c = 0.2, MinInv = 1.5, Maxine = 7
POCA	เวลารอสูงสุด : 0.3 วินาที ช่วงเวลาการทำบีคอน : STA (ทุก 1.5-7 วินาที) c_1 = 0.13, c_2 = 0.16, c_3 = 0.2 MinInv = 1.5, $MinInv_1$ = 2, $MinInv_2$ = 4, MaxInv = 7 x_1 = 5, x_2 = 20

5.4 ผลการทดลองค่าความเชื่อถือได้ของโพรโทคอล

- ค่าความเชื่อถือได้จากผลการทดลองบนถนนทางหลวง รูปที่ 5.2 ก)

เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นต่ำ (2-10 คัน/กิโลเมตร) DECA และ POCA สามารถแพร่ข้อมูลได้มากกว่าทุกโพรโทคอลที่นำมาเปรียบ โดยที่มีค่าความน่าเชื่อถือมากกว่าประมาณ 12.8% เนื่องจากโพรโทคอลทั้ง 2 พยายามที่จะแพร่ข้อมูลโดยไม่อาศัยการตั้งเวลารอซึ่งเพิ่มโอกาสในการแพร่ถึงรถยนต์ที่มีโอกาสพบกันเพียงแค่ครั้งเดียวในระยะเวลาสั้นๆได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ AckPBSM ที่มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่า ส่วน SF และ SFR ที่ไม่ใช้ข้อมูลในการตัดสินใจ แต่ SFR จะให้สมรรถนะในการทำงานที่ดีกว่าเนื่องจากโหนดจะมีการหน่วงเวลาไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่งทำให้เพิ่มโอกาสส่งต่อให้กับโหนดเพื่อนบ้านอื่นๆ มากกว่า SF ที่จะแพร่

ข้อความทันทีที่ได้รับข้อความทันที ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติของโพรโทคอลแบบ Store-and-Forward

พิจารณาที่ความหนาแน่นปานกลาง (10-40 คัน/กิโลเมตร) DECA, POCA และ AckPBSM ที่ได้รับการออกแบบเพื่อทำงานบนรถยนต์สามารถทำการแพร่ได้ 100% ส่วน SFR ที่มีคุณสมบัติ Store-and-Forward แบบง่ายๆ สามารถทำงานได้ดีกว่า SF ประมาณ 5% ซึ่งที่ความหนาแน่นในระดับนี้ยังมีปัญหาการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆอยู่จึงทำให้ SF และ SFR ไม่สามารถให้ความเชื่อถือได้ที่ 100% แม้ว่า SFR จะมีการหน่วงเวลาในการส่งต่อข้อความแต่ก็ยังไม่เพียงในกรณีที่มีการขาดการเชื่อมเป็นเวลานาน

กรณีความหนาแน่นสูง (40-80 คัน/กิโลเมตร) ทุกโพรโทคอลสามารถทำงานได้ที่ความเชื่อถือได้ 100% ยกเว้น SF และ SFR ที่ความหนาแน่น 40 คัน/กิโลเมตร

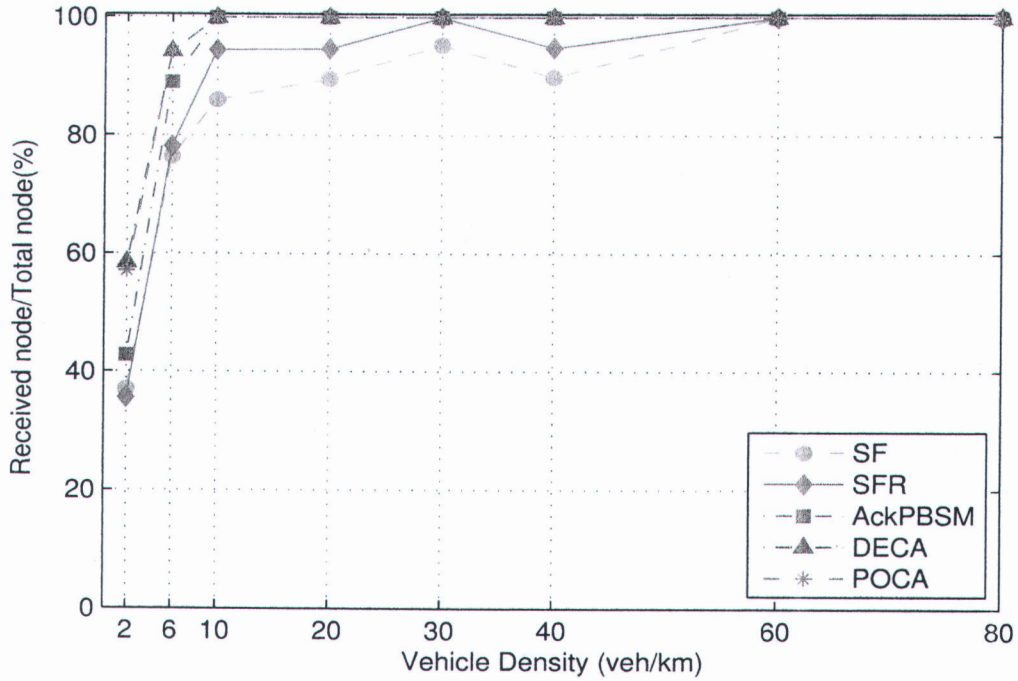
- ค่าความเชื่อถือได้จากผลการทดลองบนถนนในเมือง รูปที่ 5.2 ข)

เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นต่ำ (2-10 คัน/กิโลเมตร) เนื่องจากความซับซ้อนของถนนที่มากขึ้น ค่าความเชื่อถือได้ของทุกโพรโทคอลลดลง โดยที่ในระดับความหนาแน่นต่ำ DECA และ POCA สามารถแพร่ข้อมูลได้มากกว่าทุกโพรโทคอลเช่นเดียวกับการทดลองบนถนนทางหลวง

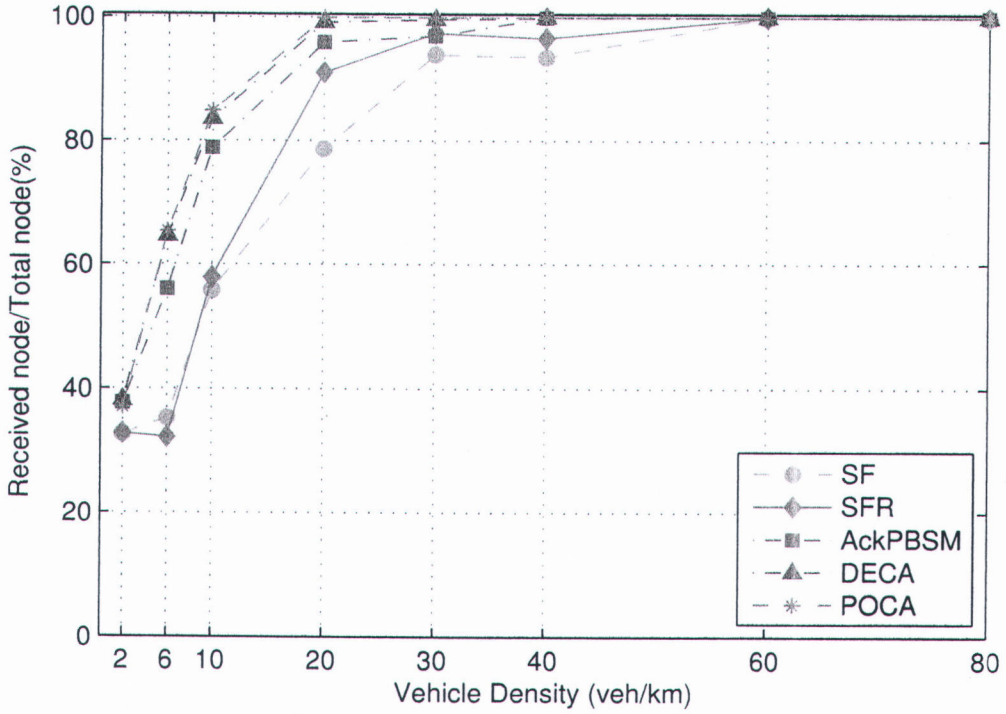
เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นปานกลาง (10-40 คัน/กิโลเมตร) DECA และ POCA เท่านั้นที่มีค่าความเชื่อถือถึง 100% AckPBSM ที่ใช้เวลารอทั้งการแพร่แบบปกติ และการแพร่เมื่อเจอเพื่อนบ้านใหม่ ซึ่งในบางกรณีโหนดที่แพร่ข้อความไม่ได้อยู่ใน CDS ทำให้การแพร่ช้าเกินไป และพลาดจากโหนดที่ต้องการส่งทำให้ค่าความเชื่อถือไม่ถึง 100% ส่วน SF และ SFR ก็มีปัญหากับการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆเช่นเดียวกับที่ความหนาแน่นต่ำ ซึ่ง SF และ SFR จะไม่ส่งต่อให้กับเพื่อนบ้านที่ยังไม่ได้รับข้อความได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับโพรโทคอลอื่นๆที่ไม่มีสถานะภาพรับข้อความจากโหนดเพื่อนบ้าน

ที่ความหนาแน่นสูง (40-80 คัน/กิโลเมตร) ทุกโพรโทคอลสามารถทำงานได้ที่ความเชื่อถือได้ 100% ยกเว้น SF และ SFR ที่ความหนาแน่น 40 คัน/กิโลเมตร

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าความเชื่อถือได้ในการแพร่ข้อมูลของ DECA และ POCA เท่าเทียมกัน แม้ว่าจะมีใช้ข้อมูลในการทำงานที่แตกต่างกัน แต่ด้วยแนวคิดในการเลือกโหนดที่จะแพร่ข้อมูลต่อโดยหลีกเลี่ยงการใช้เวลาคอม ทำให้โพรโทคอลทั้ง 2 มีความเชื่อถือได้ทั้งบนถนนทางหลวง และถนนในเมืองมากกว่าโพรโทคอลอื่นๆ



ก)



ข)

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าความเชื่อถือได้จากการทดลองบน ก) ถนนทางหลวง ข) ถนนในเมือง

5.5 ผลการทดลองค่าใช้จ่ายของโพรโทคอล

ผลค่าใช้จ่ายในการทำงานของโพรโทคอลยิ่งมีค่าน้อยยิ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของโพรโทคอล โดยผลการทดลองบนถนนทางหลวง และถนนในเมืองในรูปที่ 5.3 ก) และข) ตามลำดับ ซึ่งหากพิจารณาตามรูปกราฟจะสังเกตได้ว่าลักษณะค่าใช้จ่ายของทั้งการทดลองบนถนนทางหลวง และบนถนนในเมืองมีลักษณะสอดคล้อง สามารถนำมาพิจารณาแต่ละโพรโทคอลได้ดังนี้

โพรโทคอลที่มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นสูงที่สุด คือ AckPBSM ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า SF และ SFR ประมาณ 2 เท่าที่ทุกระดับความหนาแน่นของรถ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็นส่วนที่เกิดจากการทำ Beacon ที่มีความถี่สูงถึง 2 ครั้ง/วินาที โดยเป็นจากการออกแบบที่มีการตรวจสอบการรับข้อความของเพื่อนบ้านก่อนจะมีการส่งข้อความต่อ ทำให้ต้องการการทำ Beacon ที่มีความถี่สูงเพื่อลดความล่าช้าในการทำงาน อีกทั้งภายใน Beacon มีข้อมูลจีพีเอส และข้อความตอบรับจากโหนดเพื่อนบ้าน (Acknowledge Message) ที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ขนาดของค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำ Beacon มีขนาดประมาณ 55% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด อีกส่วนหนึ่งคือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการแพร่ข้อมูล ซึ่ง AckPBSM ใช้จำนวนโหนดเพื่อนบ้านในการคำนวณค่าเวลารอ ดังนั้นในบริเวณของถนนส่วนเดียวกัน โหนดในบริเวณนั้นก็จะมีจำนวนเพื่อนบ้านเท่ากันเช่นกัน ทำให้เกิดการแพร่ข้อมูลซ้ำในบริเวณเดียวกันเป็นจำนวนมาก แม้ว่าโหนดที่จะทำการแพร่ข้อมูลนั้นมาจากโหนดที่อยู่ใน CDS ถึง 70-80% และจากกราฟเมื่อพิจารณาเพียงแค่ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการแพร่ AckPBSM จะมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า SF และ SFR เล็กน้อยในทุกๆความหนาแน่น

SF และ SFR ที่ไม่มีการทำ Beacon ค่าใช้จ่ายจึงเกิดจากการแพร่ข้อความซ้ำ ซึ่งโหนดทุกคนที่ได้รับข้อความใหม่จะแพร่ข้อความนั้นซ้ำอีกครั้ง ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจึงสูงและจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าความเชื่อถือได้ คือ ยิ่งมีรถยนต์ได้รับข้อความมากขึ้นก็จะยิ่งมีค่าใช้จ่ายได้การทำงานของโพรโทคอลมากขึ้น

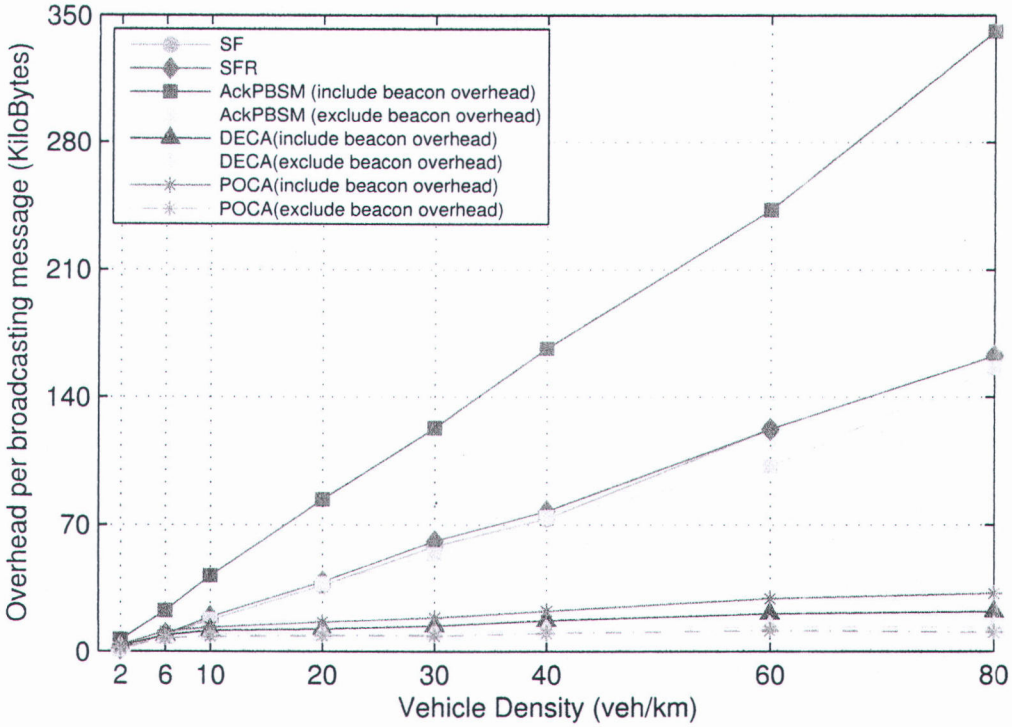
DECA และ POCA ใช้วิธีการให้โหนดต้นทางหรือโหนดก่อนหน้าเลือกโหนดถัดไปในการแพร่ข้อความต่อ ดังนั้นในบริเวณหนึ่งจะมีเพียงแค่โหนดเดียวเท่านั้นในการแพร่ข้อความจึงมีจำนวนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นน้อยและเกือบคงที่เมื่อมีค่าความหนาแน่นของรถยนต์สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาเฉพาะ DECA ที่ใช้ความแน่นเท่านั้นในการเลือกโหนดถัดไป ซึ่งโหนดจะไม่สามารถรู้ตำแหน่งของโหนดเพื่อนบ้านได้เลย แต่ใช้ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่มักจะจับตัวกันเป็นกลุ่ม เช่น บนถนนทางหลวงที่รถยนต์วิ่งเกาะกลุ่มกัน หรือบนถนนในเมืองที่รถยนต์มันจะติดอยู่บริเวณสี่แยกที่มีไฟจราจร การเลือกโหนดที่มีความสูงสุดในการแพร่ต่อจึงเป็นการรับประกันว่าในการแพร่ครั้งนั้นจะมีจำนวนโหนดที่จะได้รับข้อความมากกว่า แต่การที่

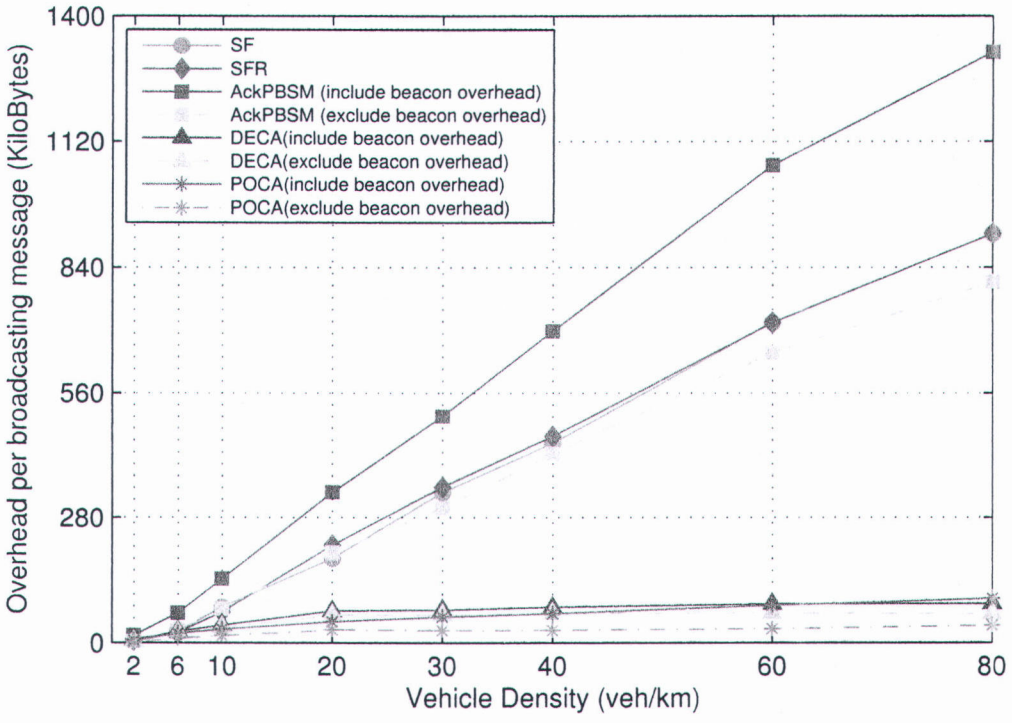
ทราบเฉพาะความหนาแน่นจะมีผลต่อการแพร่ในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนขึ้น เช่น ถนนในเมือง เนื่องจากการจับกลุ่มของรถจะหนาแน่นสูงในบริเวณหนึ่งๆ ทำให้การแพร่ซ้ำเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากขึ้น ข้อความจึงจะมีการกระจายตัวออกไป ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นมากขึ้นจะมีจำนวนการแพร่ข้อความซ้ำเพิ่มขึ้นด้วยเล็กน้อย แต่ในกรณีของถนนทางหลวงที่ไม่มีความซับซ้อนของถนน DECA จึงมีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการแพร่ข้อความซ้ำใกล้เคียงกับ POCA ที่มีข้อมูลในการทำงานมากกว่า และเนื่องจากการใช้เพียงแค่ข้อมูลความหนาแน่นทำให้ขนาดของ Beacon เล็กมาก เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมด DECA จึงเป็นโพรโทคอลที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดในการทดลองบนถนนทางหลวง อีกทั้งการที่ใช้เฉพาะข้อมูลความหนาแน่นซึ่งได้จากการนับจำนวนของเพื่อนบ้านในบริเวณ 1 hop ทำให้ DECA มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูงกว่า POCA และ AckPBSM ที่ต้องใช้ข้อมูลจากจีพีเอสในการทำงานเท่านั้น

POCA เป็นโพรโทคอลที่ออกแบบเพื่อให้มีสมรรถนะในการทำงานสูงสุด ต่อยอดโดยการใช้ขั้นตอนในทำงานเช่นเดียวกับ DECA ที่มีความยืดหยุ่นสูง โดยเปลี่ยนเป็นการใช้ข้อมูลจากจีพีเอสในการทำงาน จากการทดลองพบว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจาก POCA จะมีค่าต่ำที่สุดในทุกความหนาแน่น ทุกสภาพแวดล้อมของถนน เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการแพร่ข้อความซ้ำ เนื่องจาก POCA ใช้ตำแหน่งในการเลือกโหนดถัดไป ดังนั้นเมื่อโหนดมีความหนาแน่นสูงขึ้น โหนดที่ถูกเลือกจะมีระยะห่างจากโหนดที่เลือกใกล้เคียงกับระยะห่างที่โหนดต้องการ (Preferred Distance) มากขึ้น ค่าใช่จ่ายที่เกิดขึ้นจากการแพร่ข้อความซ้ำจึงมีค่าเกือบคงที่ แต่ด้วยขนาดของ Beacon ที่ต้องเพิ่มขึ้นจากข้อมูลจีพีเอสทำให้เมื่อรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเครือข่าย POCA มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า DECA ในการทดลองบนถนนทางหลวง แต่เมื่อจำนวนโหนดมีมาก และถนนที่ซับซ้อนขึ้นเช่นในการทดลองบนถนนในเมืองข้อมูลที่ได้จากจีพีเอสทำให้ POCA ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจนคุ้มค่ากับขนาดของ Beacon ที่เพิ่ม เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการแพร่ข้อความซ้ำได้มากกว่า DECA ที่ทราบเพียงแค่ข้อมูลความหนาแน่น และให้ผลการทดลองโดยมีค่าใช่จ่ายรวมต่ำกว่า DECA ในเกือบทุกความหนาแน่น

จากผลการทดลองสามารถสรุปค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการแพร่ข้อความซ้ำ การเลือกโหนดเพื่อแพร่ข้อความต่อของ DECA และ POCA มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าใช้การตั้งเวลารอเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นที่ความหนาแน่นสูงขึ้นเกือบคงที่ทั้งในการทดลองบนถนนทางหลวง และถนนในเมือง เนื่องจากจะมีโหนดเพียงโหนดเดียวที่จะแพร่ข้อความในบริเวณการเชื่อมต่อหนึ่งๆ และนอกจากนี้การออกแบบการทำงานที่ยืดหยุ่นสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำ Beacon ได้ โดยการใช้ช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของเครือข่าย ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้มาก เมื่อเปรียบกับ AckPBSM ที่มีการทำ Beacon แบบช่วงเวลาคงที่



ก)



ข)

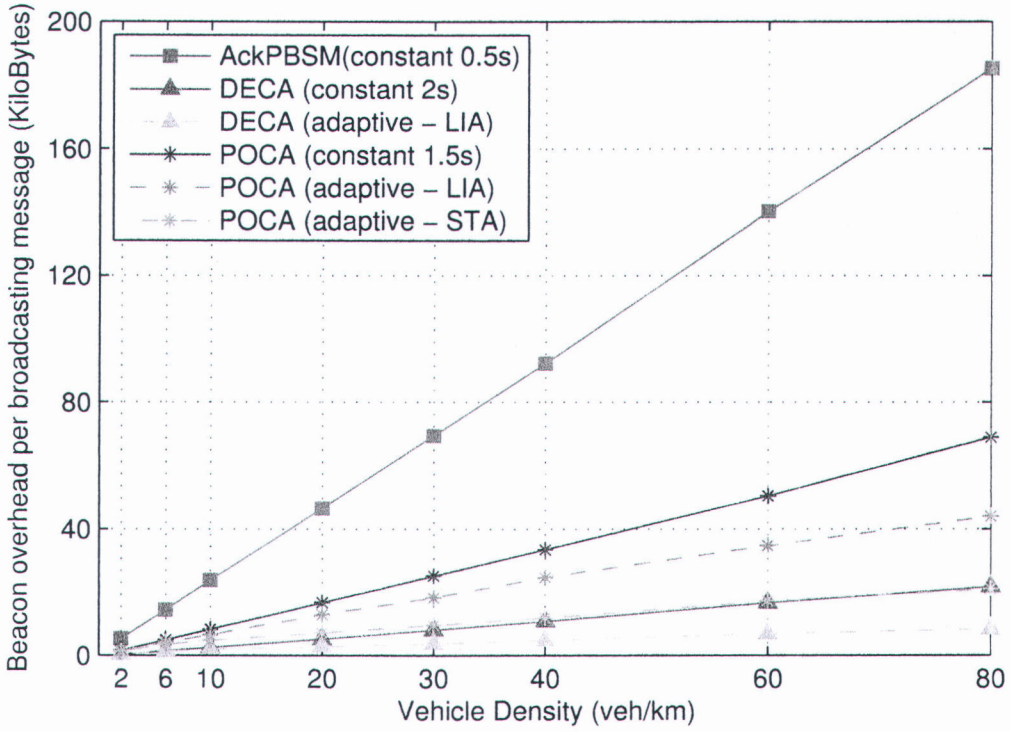
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทำงานบน ก) ถนนหลวง ข) ถนนในเมือง

เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำ Beacon เป็นค่าใช้จ่ายที่สูงเมื่อเปรียบเทียบจากค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการแพร่ข้อความซ้ำซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการแพร่ข้อมูล ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสร้างการทดลองเพื่อเปรียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำ Beacon แบบใช้ช่วงเวลาคงที่ของ DECA และ POCA โดยมีค่าความเชื่อถือ และค่าใช้จ่ายในการแพร่ซ้ำใกล้เคียงกับการช่วงเวลาแบบปรับตัว โดยมีผลของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตามกราฟในรูปที่ 5.4

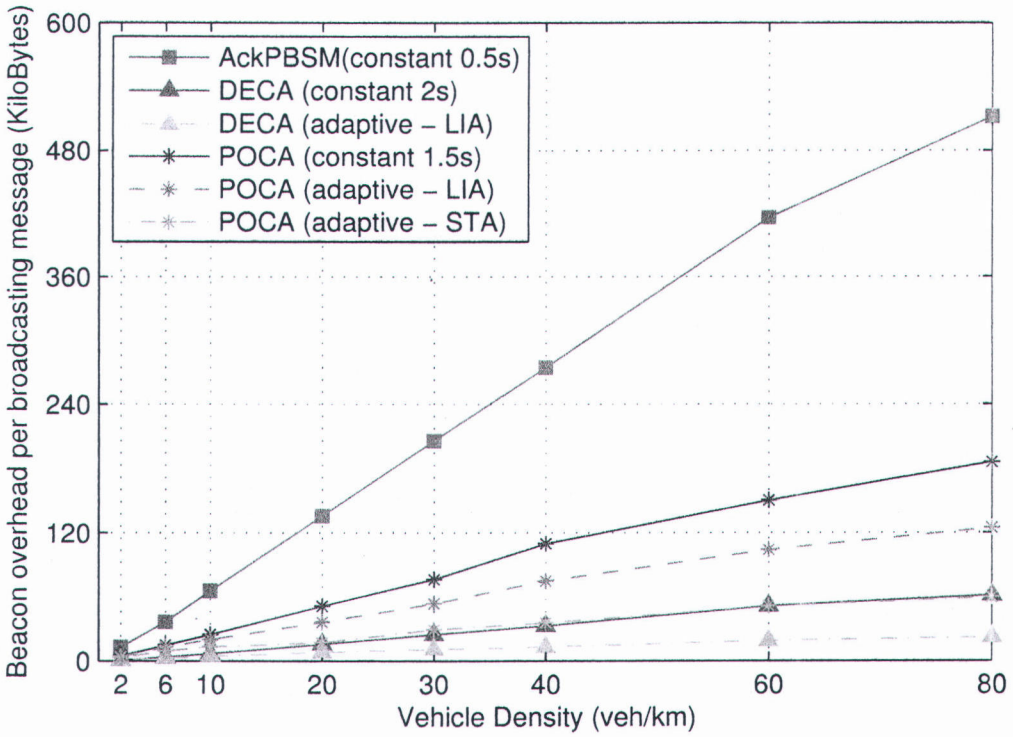
ในการทดลองนี้แสดงในเห็นว่าการใช้ช่วงเวลาการทำ Beacon ที่มีการปรับตัวได้ตามสภาพความหนาแน่นของเครือข่ายสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เป็นจำนวนมาก สำหรับ DECA ที่ใช้การคำนวณช่วงเวลาปรับแบบเชิงเส้น (LIA) ซึ่งมีช่วงการทำ Beacon ระหว่าง 1.5-7 วินาที สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำ Beacon ได้ประมาณ 57%

ส่วนค่าใช้จ่ายจาก Beacon ของ POCA ที่เดิมมีค่าสูงมากเนื่องจากการต้องการข้อมูลที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูงเนื่องจากรถยนต์มีการเปลี่ยนตำแหน่งที่รวดเร็ว และผลจากข้อมูลจากจีพีเอสที่มีขนาดใหญ่กว่าข้อมูลความหนาแน่นมาก จึงใช้วิธีการคำนวณช่วงเวลาปรับตัวแบบขั้น (STA) ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำ Beacon ได้ถึง 64% ทำให้ได้ค่าใช้จ่ายที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าใช้จ่ายของ DECA แบบช่วงเวลาคงที่

เมื่อเปรียบเทียบทั้ง DECA และ POCA กับ AckPBSM จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจาก Beacon ของ DECA และ POCA มีค่าน้อยกว่ามาก แต่เนื่องจากการทำงาน AckPBSM ที่ขึ้นอยู่กับข้อความตอบรับจากเพื่อนบ้าน ดังนั้นการเปลี่ยนช่วงเวลาตามสภาพความหนาแน่นของเครือข่ายไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะจะส่งผลกระทบต่อการเวลารอของโหนดที่จะแพร่ข้อความต่อไป แต่โดยดัดแปลงการทำงานของ AckPBSM เพื่อให้สามารถใช้งาน Beacon ที่มีช่วงเวลาแบบปรับตัวได้ จากการทดลองโดยที่ให้ AckPBSM ยังมีค่าความน่าเชื่อถือ และค่าใช่จ่ายจากการแพร่คงเดิมเช่นเดียวกับการทำ Beacon แบบช่วงเวลาคงที่ การใช้ Beacon แบบช่วงเวลาปรับตัวได้นั้นสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เพียง 24% เท่านั้น เนื่องจากความไม่ยืดหยุ่นในการทำงานของโพรโทคอล



ก)



ข)

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าใช้จ่ายจากการส่ง Beacon จากการทดลองบน ก) ถนนหลวง ข) ถนนในเมือง

5.6 ผลการทดลองความเร็วในการแพร่ข้อมูล

ผลการทดลองความเร็วในการแพร่ข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันโพรโทคอลที่มีค่าความเชื่อถือสูงกว่า แสดงถึงความเร็วในการแพร่ที่เร็วกว่า ผลแบ่งออกเป็น 2 รูป คือ รูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงความเร็วในการแพร่ข้อมูลจากการทดลองบนถนนทางหลวง และบนถนนในเมืองตามลำดับ โดยผลการทดลองจะแสดงตัวแทนของความหนาแน่นในแต่ละช่วงดังนี้ ความหนาแน่นที่ 6 คัน/กิโลเมตรเป็นความหนาแน่นต่ำ ความหนาแน่นที่ 30 คัน/กิโลเมตรเป็นความหนาแน่นปานกลาง และความหนาแน่นที่ 60 คัน/กิโลเมตรเป็นความหนาแน่นสูง

ในทุกการทดลองและความหนาแน่น SF จะเป็นโพรโทคอลที่มีความเร็วสูงที่สุดเสมอ เนื่องจากโหนดจะแพร่ข้อความทันทีที่ได้รับข้อความใหม่ แต่เนื่องจากไม่สามารถทำงานในสภาพที่มีการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆได้จึงมีความหนาแน่นต่ำ และ SFR จะเป็นโพรโทคอลที่มีการทำงานช้าที่สุดเสมอเนื่องจากใช้การสุ่มเวลาหน่วงในก่อนจะมีการแพร่ข้อความต่อไปให้โหนดอื่นจึงเป็นโพรโทคอลที่มีความเร็วในการแพร่ข้อความช้าที่สุดในการทดลอง

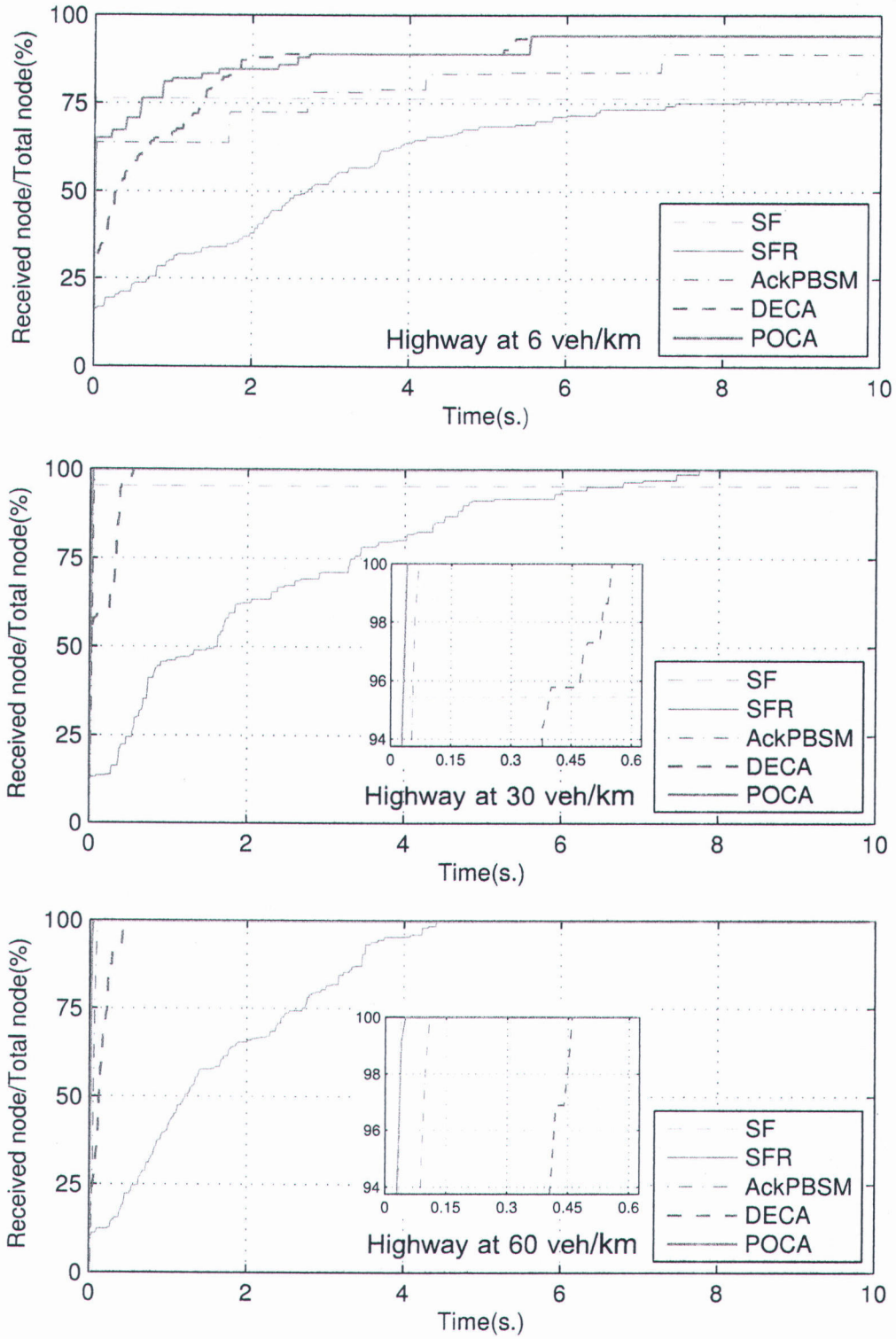
ความเร็วในการแพร่ข้อความของ DECA จะมีความเร็วช้ากว่า POCA เนื่องจากการเลือกโหนดจะมีโอกาสที่เลือกโหนดซ้ำเดิม และทำให้ต้องใช้การตั้งเวลารอเพื่อทำงานต่อ อีกทั้งในการแพร่ข้อมูลนั้น DECA จะไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่งของโหนดถัดไปที่เลือกทำให้ต้องมีการแพร่หลายครั้งเพื่อให้กระจายตัวไปยังบริเวณอื่นๆที่โหนดยังไม่ได้รับข้อความนั้น ทำให้ความเร็วในการแพร่ข้อความของ DECA ช้ากว่า AckPBSM และ POCA

AckPBSM สามารถแพร่ข้อมูลได้อย่างมีความเร็วสูงโดยช้ากว่าเพียงแค่ POCA เท่านั้น แต่เนื่องด้วยการที่มีค่าใช้จากการแพร่ซ้ำเป็นจำนวนมาก ดังนั้นความเร็วในการแพร่ข้อมูลจึงมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับ SF ที่มีความเร็วในการแพร่ช่วงเริ่มต้นสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะช้าลง เนื่องจากกระบวนการตั้งเวลารอของโพรโทคอล แต่อย่างไรก็ตามการที่มีการแพร่ซ้ำเป็นจำนวนมากย่อมจะส่งผลในการทำงานที่มีความหนาแน่นของเครือข่ายสูงมากได้

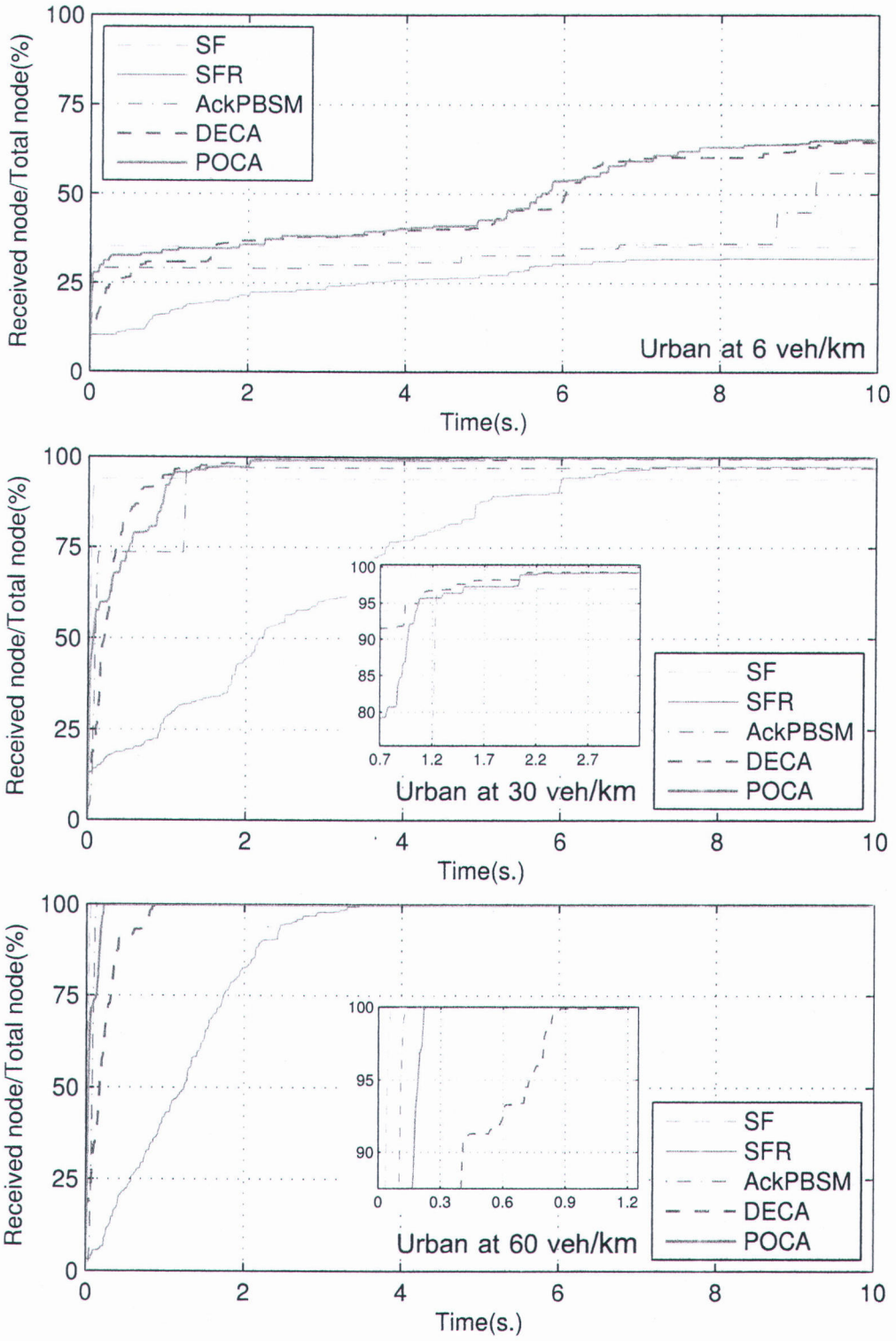
POCA สามารถทำงานได้เร็วที่สุดในการทดลองบนถนนทางหลวง เนื่องจากสอดคล้องกับพฤติกรรมการเลือกโหนดโดยใช้ระยะทางระหว่างโหนดซึ่งส่งผลให้ความเร็วในการทำงานบนถนนทางหลวงมีความเร็วสูงสุดเทียบเท่ากับความเร็วในการแพร่ของ SF แต่เมื่อถนนมีความซับซ้อนมากขึ้นในสภาพการทดลองบนถนนในเมืองจะยังคงมีความเร็วช้ากว่า SF หรือ AckPBSM ในบางกรณี เนื่องจากจำนวนครั้งในการแพร่ซ้ำที่มีจำนวนน้อยกว่ามากจึงทำให้โอกาสในการแพร่มีน้อยกว่า

การออกแบบให้ DECA และ POCA ทำงานโดยหลีกเลี่ยงการใช้เวลารอนั้นสามารถทำให้การแพร่ข้อมูลมีความเร็วสูงได้โดยที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่ามาก โดย POCA ที่ถูกออกแบบให้มีสมรรถนะสูงสุด สามารถแพร่ได้ที่ความเร็วเทียบเท่า SF ซึ่งมีความเร็วสูงที่สุด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความเร็วในการแพร่ข้อมูลบนถนนหลวงที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความเร็วในการแพร่ข้อมูลบนถนนในเมืองที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน

5.7 ผลการทดลองค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดแพร่ข้อความต่อ

เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของ DECA และ POCA ขึ้นอยู่กับความสำเร็จในการเลือกโหนดที่จะแพร่ข้อความถัดไปซึ่งจะทำให้การทำงานของโพรโทคอลทั้งสองไม่ต้องพึ่งการตั้งเวลารอในกรณีที่การเลือกโหนดไม่สำเร็จ

ผลการทดลองค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดของ DECA ในตารางที่ 5.2 สามารถประมาณค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดบนถนนทางหลวงโดยเฉลี่ยได้ 74% และบนถนนในเมืองได้ 66% ซึ่งค่าความสำเร็จในการเลือกของ DECA มีค่าไม่สูง เนื่องจาก DECA ไม่ทราบตำแหน่งของเพื่อนบ้าน และเลือกโหนดที่ความหนาแน่นสูงสุด โดยที่การเลือกที่ไม่สำเร็จแบ่งออกได้จาก 2 สาเหตุ คือ การเลือกโหลดที่ได้รับข้อความนั้นแล้วซึ่งคิดเป็น 84.5% ของความผิดพลาดทั้งหมด และความผิดพลาด 16.5% เกิดจากการเลือกโหนดที่ไม่อยู่ในระยะของการเชื่อมต่อแล้ว สำหรับ POCA ในตารางที่ 5.3 สามารถประมาณค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดบนถนนทางหลวงโดยเฉลี่ยได้ 94.4% และบนถนนในเมืองได้ 94.1% มีความผิดพลาดในการเลือกน้อยกว่า DECA มาก เพราะ POCA ทราบตำแหน่งของโหนดเพื่อนบ้าน และมีการปรับปรุงตำแหน่งของโหนดเพื่อนบ้านก่อนเลือกโหนด แต่ความผิดพลาดประมาณ 97.8% เกิดจากการเลือกโหนดที่ไม่อยู่ในระยะการเชื่อมต่อ เพราะข้อมูลจาก Beacon ไม่ทันสมัยพอ และ POCA เลือกเฉพาะโหนดที่มีตำแหน่งด้านหน้าของทิศการเคลื่อนที่ของข้อความ ดังนั้นจึงมีโอกาสน้อยมากที่จะเลือกโหนดที่เคยได้รับข้อความนั้นแล้ว

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดแพร่ข้อความต่อของ DECA (%)

ความหนาแน่น (คัน/กม.) / ถนน	2	6	10	20	30	40	60	80
ทางหลวง	71.4	54.5	80.7	76	82.6	75	63.3	88.9
ในเมือง	75	72.2	64.3	64.4	54.8	57.1	64.7	75.9

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าความสำเร็จในการเลือกโหนดแพร่ข้อความต่อของ POCA (%)

ความหนาแน่น (คัน/กม.) / ถนน	2	6	10	20	30	40	60	80
ทางหลวง	99.9	100	96.4	95.4	93.3	95.2	92.9	81.9
ในเมือง	95.1	89.4	93.2	97.4	96.1	95.2	92.8	93.4

5.8 การทดลองการแพร่ข้อความที่มีความหนาแน่นสูง

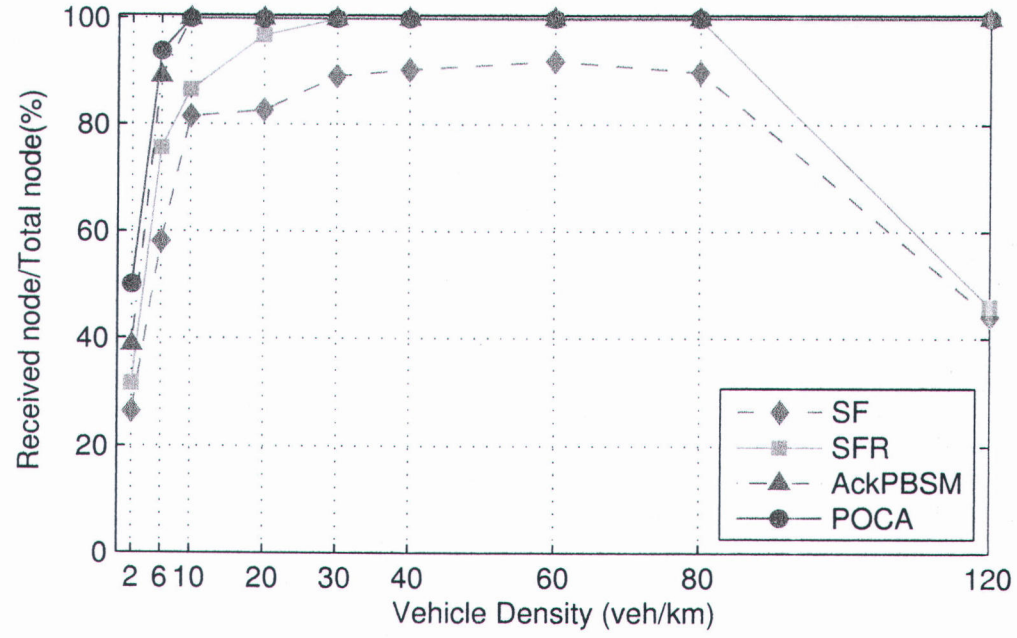
การทดลองในส่วนที่ผ่านมาทั้งหมดจะใช้ข้อความในการส่งเพียงข้อความเดียวเท่านั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโพรโทคอล แต่ในการทดลองนี้จะทดลองในสภาพที่มีความหนาแน่นสูงเพื่อทดสอบความสามารถของโพรโทคอลเมื่อถูกนำไปใช้งานจริงซึ่งมีจำนวนข้อความที่ถูกแพร่ในระบบมากกว่าหนึ่งข้อความที่เวลาพร้อมกัน ในการทดลองใช้ 5 ข้อความ และทดลองในสภาพแวดล้อมที่มีรถยนต์ความหนาแน่นสูงสุด 120 คัน/กิโลเมตร ผลที่ได้เป็นการเฉลี่ยจากทดลอง 20 ครั้ง ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อนำไปปรับปรุงและแก้ไขการทำงานของโพรโทคอลให้มีสมรรถนะ และประสิทธิภาพสูงที่สุดจึงเลือกเฉพาะ POCA มาทดลองเปรียบเทียบกับโพรโทคอลอื่นๆเท่านั้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานสูงที่สุดในการทดลองที่ผ่านมา

*ค่าความเชื่อถือได้*ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองเพียงหนึ่งข้อความ POCA ให้ความเชื่อถือได้สูงที่สุดในทุกการทดลอง ส่วน AckPBSM สามารถทำงานได้ดีและให้ความเชื่อถือได้ที่ 100% ที่ความหนาแน่น 10 คัน/กิโลเมตร สำหรับถนนทางหลวง และ 60 คัน/กิโลเมตร บนถนนในเมือง SFR สามารถทำงานได้ดีและมีความเชื่อถือได้ 100% ที่ความหนาแน่น 30-80 คัน/กิโลเมตร สำหรับถนนทางหลวง ในกรณีอื่นๆ SFR มีปัญหาจากการเชื่องต่อเป็นช่วงๆ และปัญหาการชนที่สูงจึงไม่ค่าความเชื่อถือไม่ถึง 100% ส่วน SF ก็มีปัญหาจากการเชื่องต่อเป็นช่วงๆ ที่ความหนาแน่นต่ำ และปัญหาการชนกันจากการแพร่ที่ความหนาแน่นสูงจึงไม่มีค่าความเชื่อถือถึง 100% ในทุกการทดลอง

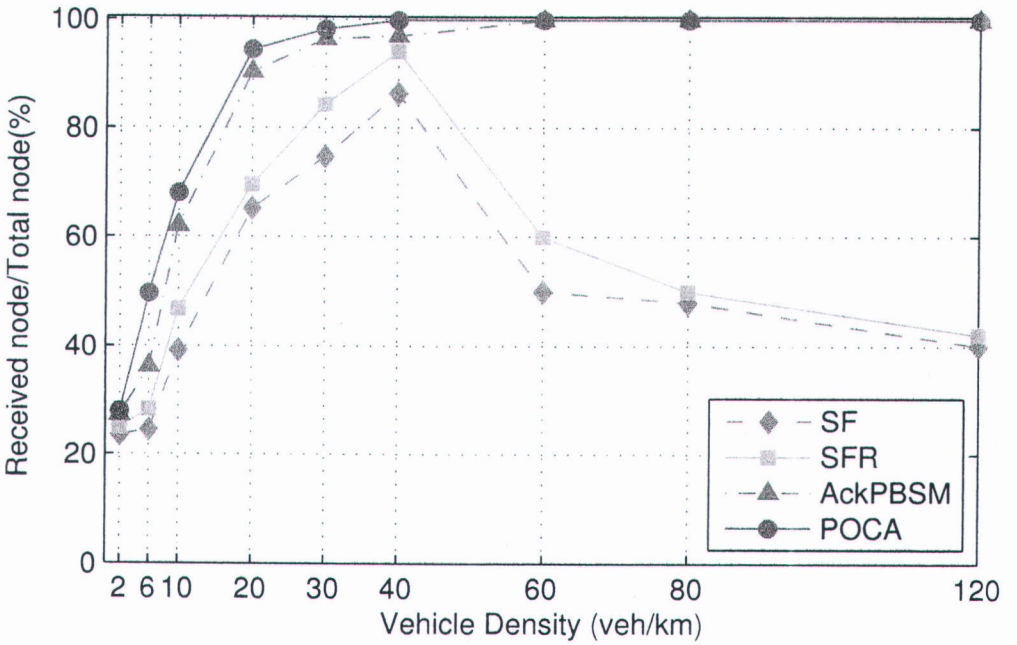
*ค่าใช้จ่าย*ที่เกิดขึ้นก็มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา แต่สัดส่วนค่าใช้จ่าย Beacon จาก AckPBSM น้อยลง เนื่องจากจำนวนข้อความที่ส่งในเวลาเดียวกันมีมากขึ้น แต่การทำ Beacon ยังคงเท่า จึงทำให้ค่าใช้จ่าย Beacon ต่อหนึ่งข้อความมีค่าลดลง สำหรับ POCA จะมีสัดส่วนที่ลดลงมากกว่า เนื่องจากในการคำนวณช่วงเวลาของ Beacon ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเครือข่ายซึ่งมีจำนวนของข้อความในระบบในการคำนวณด้วย จึงทำให้ค่าใช้จ่ายจาก Beacon มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่มีการแพร่เพียงข้อความเดียว

ความเร็วในการแพร่ข้อมูล จะผลที่เปลี่ยนแปลงจากเดิมเล็กน้อย เนื่องจากการที่มีการแพร่จำนวนมากเกิดขึ้นในเครือข่ายทำให้การทำงานของ SF และ AckPBSM มีความเร็วลดลง เนื่องจากการชนกันของข้อมูล และจัดการของชั้น MAC ทำให้การทำงานของ POCA มีความเร็วสูงกว่า SF ในกรณีที่มีความหนาแน่นสูง และเร็วกว่า AckPBSM ในทุกค่าความหนาแน่น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนการทำงานของ POCA นั้นสามารถรองรับการทำงานที่มีความหนาแน่นสูงได้เป็นอย่างดี และยังแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่แตกต่างจากโพรโทคอลอื่นๆได้เด่นชัดขึ้น สามารถนำไปปรับปรุงการทำงานของ DECA ได้

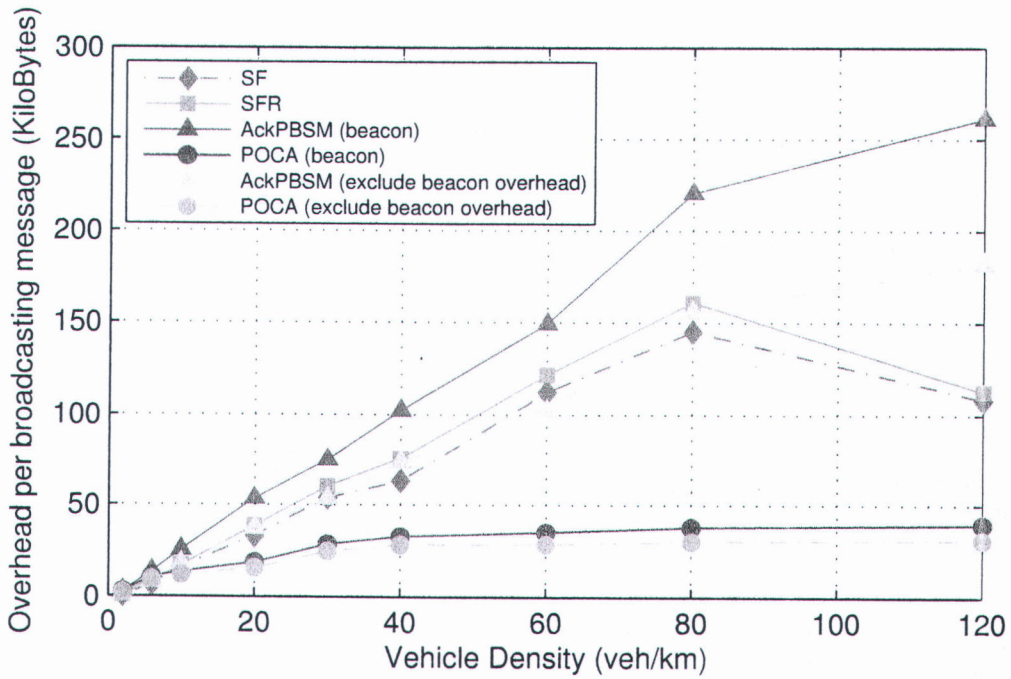


ก)

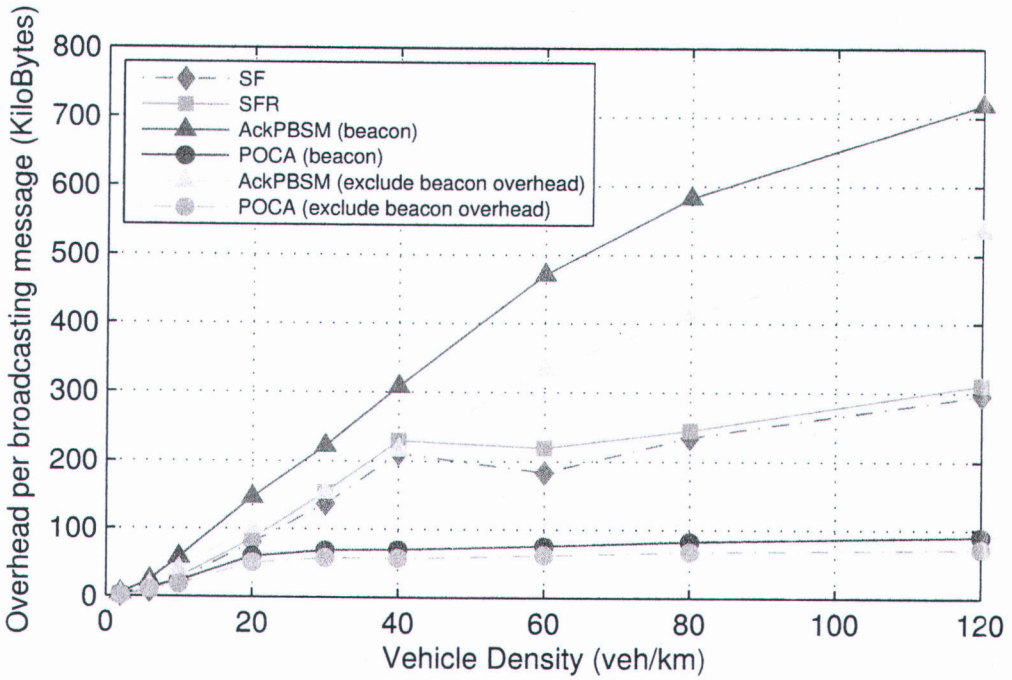


ข)

รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความน่าเชื่อถือในการแพร่ข้อมูลบน ก) ถนนทางหลวง ข) ถนนในเมือง

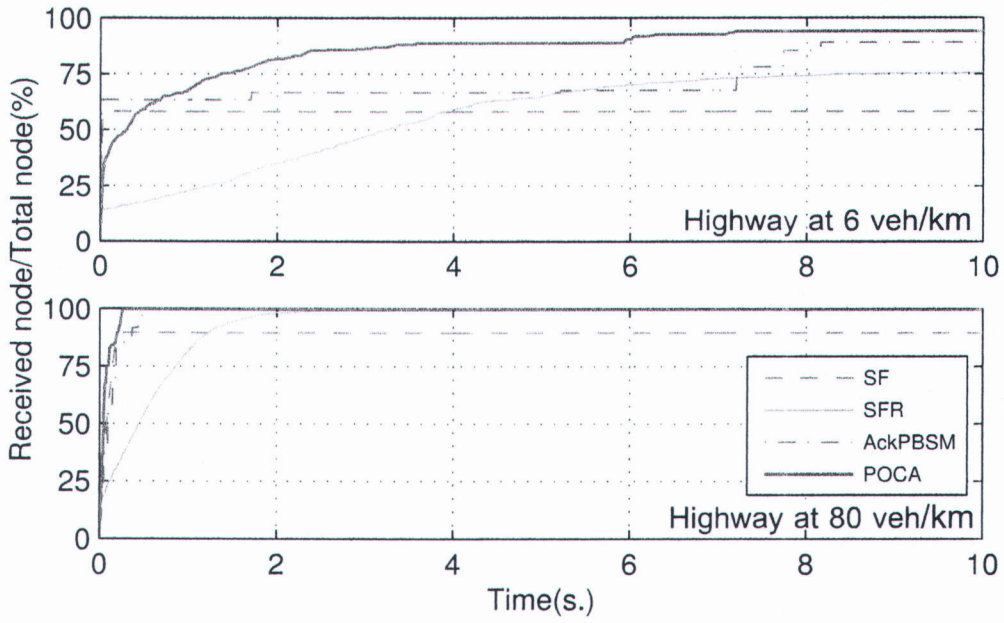


ก)

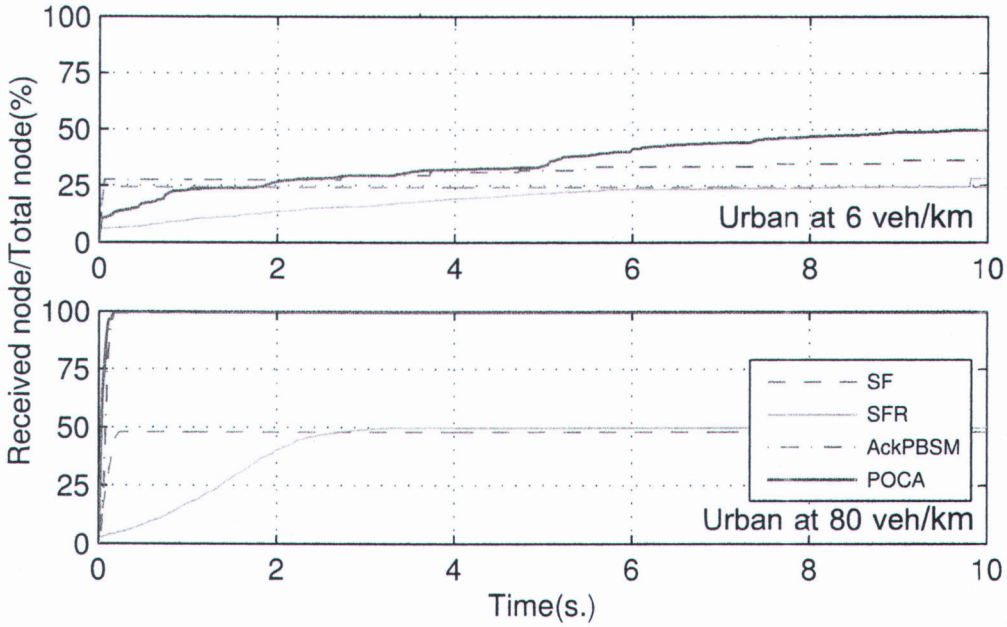


ข)

รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าใช้จ่ายในการแพร่ข้อมูลบน ก)ถนนทางหลวง ข)ถนนในเมือง



ก)



ข)

รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความเร็วในการแพร่ข้อมูลบน ก)ถนนทางหลวง ข)ถนนในเมือง

5.9 การวิเคราะห์การทำงานของโพรโทคอลทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากการทดสอบการทำงานของโพรโทคอลโดยใช้โปรแกรมจำลองไม่สามารถคาดเดาพฤติกรรมของโพรโทคอลได้อย่างละเอียด ดังนั้นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สามารถช่วยอธิบายการทำงานของโพรโทคอลที่เกิดขึ้นและสามารถบอกสิ่งที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อมในการทำงานได้ละเอียดยิ่งขึ้น

ในวิทยานิพนธ์นี้มีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นโดยสนใจค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการแพร่ข้อความซ้ำซึ่งสามารถบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอลได้ จากการใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จะสามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายน้อยสุด (Lower Bound) และค่าใช้จ่ายมากที่สุด (Upper Bound)

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการทำงานของ DECA และ POCA มีหลักการทำงานที่สำคัญเหมือนกัน คือ การเลือกโหนดที่จะทำการแพร่ถัดไป ดังนั้นโหนดที่จะได้รับข้อความใหม่ในแต่ละครั้งของการแพร่ข้อความสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

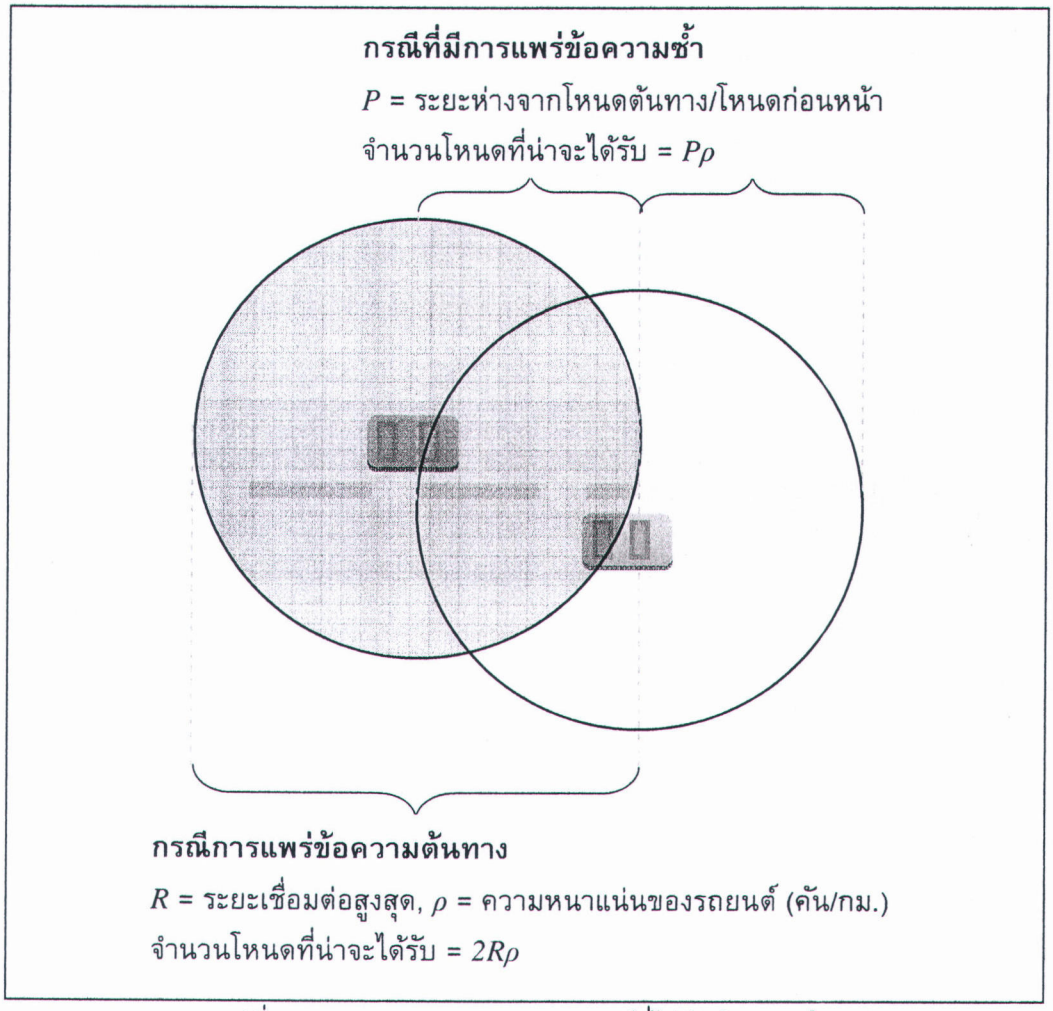
- การแพร่ข้อความครั้งแรก โหนดที่จะได้รับข้อความใหม่จะมีจำนวนขึ้นอยู่กับระยะการเชื่อมต่อสูงสุดและความหนาแน่นของโหนด โหนดที่ได้รับคือพื้นที่แรงเงาจากรูปที่ 5.10
- การแพร่ข้อความซ้ำ โหนดที่จะได้รับข้อความใหม่จะมีจำนวนขึ้นอยู่กับระยะการห่างจากโหนดที่แพร่ข้อความก่อนหน้าและความหนาแน่นของโหนด โหนดที่ได้รับคือพื้นที่ภายในวงกลมที่ไม่ได้อยู่ในพื้นที่แรงเงาจากรูปที่ 5.10

ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆ โหนดจำเป็นจะต้องมีการแพร่ซ้ำ 1 ครั้งทุกครั้งที่เจอโหนดเพื่อนบ้านใหม่ที่ยังไม่ได้รับข้อความนั้น ดังนั้นจำนวนครั้งในการแพร่ข้อความซ้ำเพื่อให้โหนดในบริเวณทั้งหมดได้รับข้อความ สามารถคำนวณได้จาก 2 กรณีคือเมื่อมีการเชื่อมต่อแบบปกติ และเมื่อมีการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆ เมื่อให้รถยนต์มีการกระจายตัวแบบพัวซอง (Poisson Distribution) สามารถคำนวณจำนวนครั้งที่มีการแพร่ทั้งหมดได้ตามสมการ (4) เมื่อ RR คือ จำนวนครั้งในการส่งข้อความซ้ำ R คือ ระยะการเชื่อมต่อสูงสุด ρ คือ ความหนาแน่นของรถยนต์ (คัน/กิโลเมตร) n คือจำนวนรถยนต์ทั้งหมดในระบบ P เป็นระยะห่างระหว่างโหนดที่ถูกเลือกและโหนดต้นทางหรือโหนดก่อนหน้า ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อจำนวนการแพร่

$$RR = (1 - e^{-R\rho})\left(\frac{n - (2R\rho)}{P\rho}\right) + (e^{-R\rho})(n) \qquad (4)$$

การคำนวณขอบเขตของค่าใช้จ่ายน้อยสุด หรือจำนวนการแพร่ซ้ำน้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อการแพร่แต่ละครั้งเกิดขึ้นบริเวณระยะการเชื่อมต่อสูงสุด (ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อสูงสุด 250 m จะได้ P = 250) กรณีที่มีการยกเว้นคือ ระยะเฉลี่ยระหว่างรถยนต์มีค่าน้อยกว่าระยะการเชื่อมต่อสูงสุด ($\frac{1}{\rho} < R$) ขอบเขตของค่าใช้จ่ายน้อยสุดจะมีค่าเท่ากับ n เนื่องจากจะมีการแพร่ซ้ำเมื่อมีการเจอโหนดเพื่อนบ้านใหม่เท่านั้น

การคำนวณขอบเขตของค่าใช้จ่ายมากที่สุด หรือจำนวนการแพร่ซ้ำมากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อโหนดที่ถูกเลือกมีระยะห่างกับโหนดที่ส่งต่อสั้นที่สุดหรือมีระยะประมาณ $P = \frac{1}{\rho}$ แต่



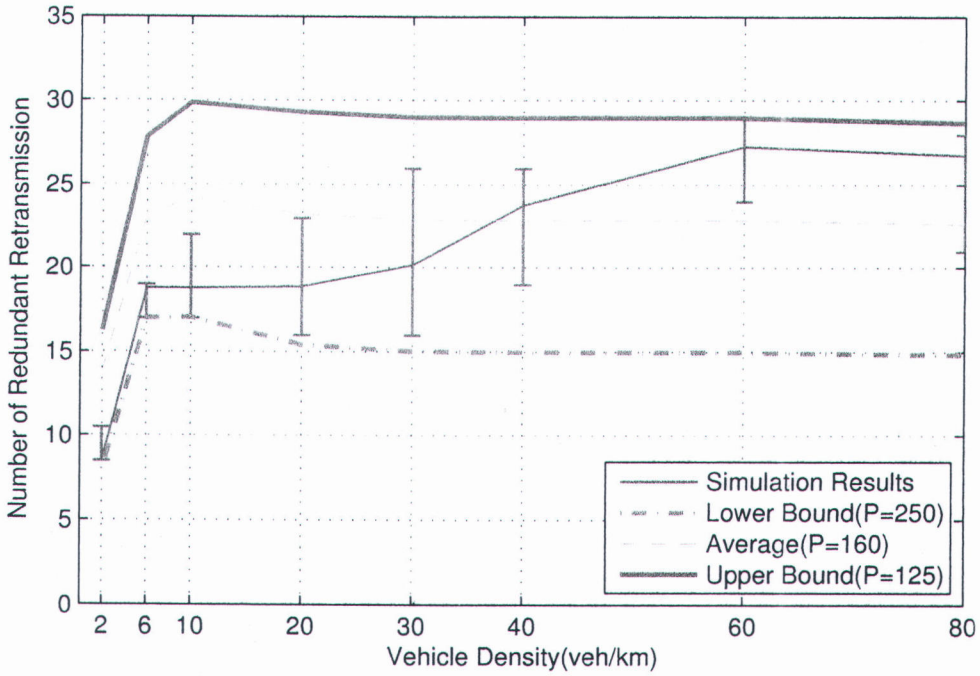
รูปที่ 5.10 การคำนวณจำนวนรถยนต์ที่ได้รับข้อความใหม่

จากการทำงานของโพรโทคอลโหนดที่จะทำการแพร่ซ้ำจะต้องไม่เคยได้รับข้อความนั้นมาก่อน ดังนั้นในครั้งที่สองโหนดจะไม่อยู่ในบริเวณของระยะการเชื่อมต่อสูงสุดก่อนหน้า จะได้โหนดที่มีระยะห่างสั้นที่สุดเป็น $P = R - \frac{1}{\rho}$ ซึ่งระยะห่างขอโหนดครั้งถัดไปในการแพร่จะเกิดเหตุการณ์ซ้ำเดิม สามารถเฉลี่ยระยะในการแพร่ข้อความซ้ำในกรณีที่มีค่าใช้จ่ายมากที่สุดได้ $P = \frac{R}{2}$ (ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อสูงสุด 250 m จะได้ P = 125)

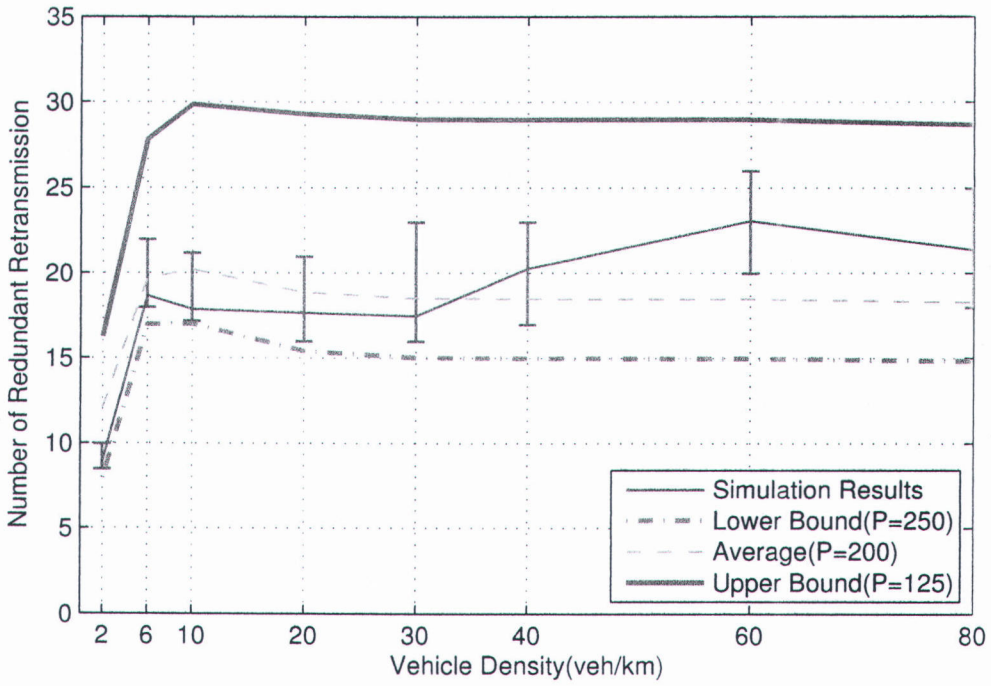
การคำนวณขอบเขตของค่าใช้จ่ายเฉลี่ย หรือจำนวนการแพร่ซ้ำที่แสดงถึงพฤติกรรมของโพรโทคอล ในกรณีของ DECA เนื่องจากโหนดจะเลือกโหนดถัดไปโดยการใช้ความหนาแน่น ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลจากการทดลองในโปรแกรมจำลองจะได้ระยะห่างของโหนดถัดไปเฉลี่ย 160 เมตร ดังนั้นจะได้ P = 160 ส่วนกรณีของ POCA ที่ใช้ตำแหน่งของโหนดในการเลือกซึ่งจะมีระยะที่โหนดต้องการ (Preferred Distance) ที่ 80% ของระยะการเชื่อมต่อสูงสุดดังนั้น P = 200 ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อสูงสุด 200 เมตร

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากโปรแกรมจำลองในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ มีค่าใกล้เคียงจากผลการทดลอง และค่าใช้จ่ายจากการทดลองจากโปรแกรมจำลองมีค่าอยู่ภายในขอบเขตของค่าใช้มากที่สุด และน้อยที่สุดจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ จากรูปที่ 5.11 และ 5.12 จำนวนของค่าใช้จ่ายมากที่สุดและน้อยที่สุดจากโปรแกรมจำลองแสดงโดยเส้นกราฟในแนวตั้งสีน้ำเงิน ดังนั้นการวิเคราะห์พฤติกรรมโพรโทคอลทางคณิตศาสตร์จากสมการ (4) สามารถคาดเดาพฤติกรรมของ DECA และ POCA โดยคร่าวๆ ได้

เนื่องจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ในเบื้องต้นนั้นไม่ได้นำค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการชนกันของข้อมูล หรือความผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกโหนดมาพิจารณา ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จึงไม่สามารถให้ค่าใช้จ่ายที่แม่นยำสูงเมื่อเปรียบกับค่าใช้จ่ายจากการทดลองในโปรแกรมจำลอง



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ DECA



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ POCA