กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ ประจำปี ๒๕๕๗

โครงการทดสอบแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะบนความถี่ 5.8 GHz

The Study of Vehicle Communication Platform on 5.8 GHz

ศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุต
(ที่ปรึกษาโครงการ)
ดร.ภาสกร ประถมบุตร
(หัวหน้าโครงการ)
ผศ.ดร.มงคล เอกปัญญาพงศ์
ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กีรติวินทกร
รศ.ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

โครงการทดสอบแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะบนความถี่ 5.8 GHz

The Study of Vehicle Communication Platform on 5.8 GHz.

ประจำปี ๒๕๕๗ สัญญารับทุนเลขที่ T ๒-๑-๐๐๐๓/๕๗

หัวหน้าโครงการ

ดร.ภาสกร ประถมบุตร

ผู้ร่วมโครงการ

ผศ.ดร.มงคล เอกปัญญาพงศ์

ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กีรติวินทกร

รศ.ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

หน่วยงาน สมาคมระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะไทย

ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

สารบัญ

หน้าที่

คำนำ..... 6

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป..... 7

1.1 สาระสำคัญของโครงการ (Project Highlight)..... 7

1.2 วัตถุประสงค์..... 11

1.3 ขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงาน..... 11

1.4 ทฤษฎี..... 12

ส่วนที่ 2 แนวทางการดำเนินโครงการ..... 15

2.1 แนวทางและการวิเคราะห์ข้อมูล..... 15

2.2 แผนปฏิบัติการโครงการ..... 15

ส่วนที่ 3 รายงานการทดสอบในเขตเมือง..... 17

3.1 ผลการทดสอบทางกายภาพ..... 19

3.1.1 รูปแบบการทดสอบ..... 19

3.1.2 ผลการทดสอบการทำ Hand-off ระหว่างสองสถานีฐาน..... 21

3.1.3 ผลการวัดค่าสัญญาณ RSSI ตามระยะทาง..... 25

3.1.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ..... 28

3.1.5 การเปรียบเทียบค่า RSSI กับค่า Packet Loss..... 36

3.2 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP-Based..... 40

3.2.1 รูปแบบการทดสอบ..... 40

3.2.2 ผลการทดสอบ ICMP..... 42

3.2.3 การทดสอบความเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput)..... 48

หน้าที่

3.3 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short Message..... 54

3.3.1 รูปแบบการทดสอบ..... 54

3.3.2 ผลการทดสอบบริเวณรอบนอกจุฬาฯ..... 56

3.3.3 ผลการทดสอบบริเวณภายในจุฬาฯ..... 61

ส่วนที่ 4 รายงานการทดสอบนอกเขตเมือง..... 64

4.1 ผลการทดสอบทางกายภาพ..... 65

4.1.1 รูปแบบการทดสอบ..... 65

4.1.2 ผลการทดสอบเบื้องต้น..... 69

4.1.3 ผลการทดสอบระดับแรงดันของสัญญาณ..... 71

4.1.4 ผลการทดสอบ Packet Loss..... 71

4.2 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP-Based..... 73

4.2.1 รูปแบบการทดสอบ..... 73

4.2.2 ผลการทดสอบ Scenario 1 รถวิ่งตามกัน..... 75

4.2.3 ผลการทดสอบ Scenario 2 รถวิ่งสวนทาง..... 83

4.3 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short Message..... 85

4.3.1 รูปแบบการทดสอบ..... 85

4.3.2 ผลการทดสอบ Scenario 1 รถวิ่งตามกัน..... 87

4.3.3 ผลการทดสอบ Scenario 2 รถวิ่งสวนทาง..... 90

4.3.4 ผลการทดสอบ Scenario 3 รถวิ่งอิสระและเพิ่ม RSU..... 92

ส่วนที่ 5 การทดสอบร่วมกับรถโดยสารขสมก. 93

5.1 จุดประสงค์การทดสอบ..... 93

5.2 สิ่งแวดล้อมในการทดสอบ..... 93

5.3 กระบวนการทดสอบ..... 97

5.4 ผลการทดสอบ..... 98

5.5 อุปสรรคและปัญหาในการทดสอบ..... 104

5.6 สรุปผลการทดสอบ..... 105

ส่วนที่ 6 งานสัมมนาและอบรมแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ 106

6.1 รายละเอียดการจัดงาน..... 106

6.2 สรุปผลการจัดงาน..... 112

ส่วนที่ 7 บทสรุป..... 113

บรรณานุกรม..... 118

คำนำ

การสื่อสารระหว่างยานพาหนะด้วยกันและระหว่างยานพาหนะกับโครงสร้างพื้นฐานหรืออุปกรณ์สื่อสารต่างๆกำลังเป็นแนวโน้มของดิจิทัลเทคโนโลยีที่เข้ามาใช้ในการจราจรและขนส่ง อาทิ รถยนต์ไร้คนขับ การส่งสัญญาณขอทางของรถฉุกเฉินไปยังไฟสัญญาณจราจรเพื่อให้เปิดไฟเขียว หรือการเตือนการเบรคกระทันหันของรถที่วิ่งตามกันมา เหล่านี้จะเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ คล้ายกับ WiFi และอาจจะเรียกได้ว่ารถก็เป็น IoT ส่วนหนึ่งได้เช่นกัน

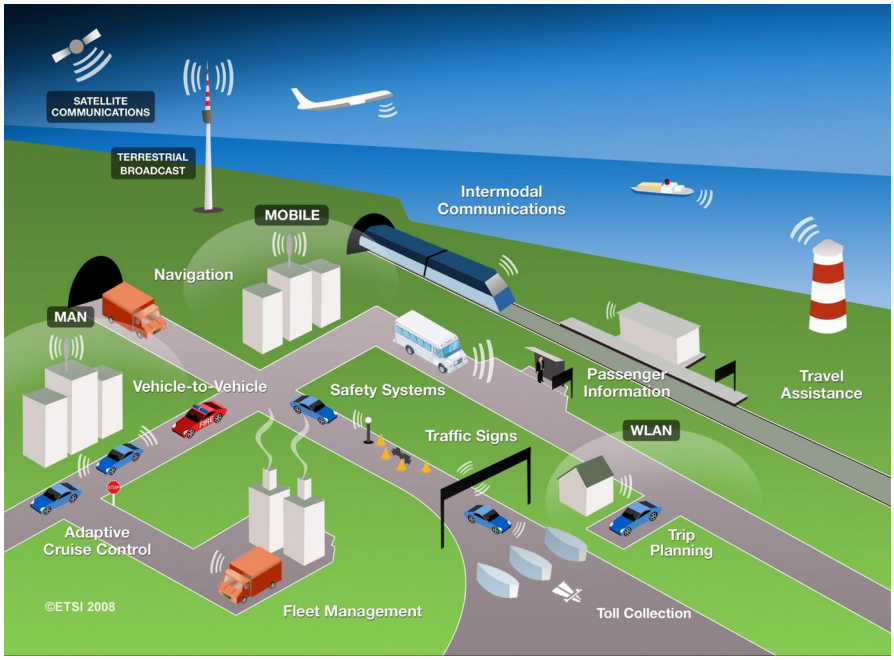
สมาคมระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะไทยได้ร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเซีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและบริษัทเดนโซ่ ได้ร่วมกันพัฒนาแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในแบบ Vehicle AdHoc Network และในการทำการทดสอบในแบบ Network Simulation เรียบร้อยแล้ว โครงการครั้งนี้จะเป็นการทดสอบจริงในภาคสนามโดยใช้ความถี่ 5.8 GHz ในเขตเมืองและนอกเมือง เพื่อนำเสนอผลการทดสอบแก่ กสทช.เป็นข้อมูลประกอบในการพิจารณส่งเสริมอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกันการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และข้อมูลในการจัดสรรคลื่นความถี่ที่เหมาะสม ต่อไป

รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ ๓ เป็นการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP-Based, Short Message และการทดสอบกายภาพ โดยในการทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบยานพาหนะที่วิ่งนอกเขตเมือง (ยกเว้นการทดสอบกายภาพ ที่ทำการทดสอบในเขตเมือง)

ส่วนที่ 1
ข้อมูลทั่วไป

1.1 สาระสำคัญของโครงการ (Project Highlight)

ในอนาคตอันใกล้การเดินทางจะเปลี่ยนโฉมไปเนื่องจากการสื่อสารที่เข้ามาถึงในรถ จากแนวคิดของ Internet of Things มาสู่ยุคที่ Things นั้นหมายถึงยานพาหนะ ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเดินทาง เพิ่มความปลอดภัย และประหยัดพลังงานดังแสดงในรูปที่ 1-1



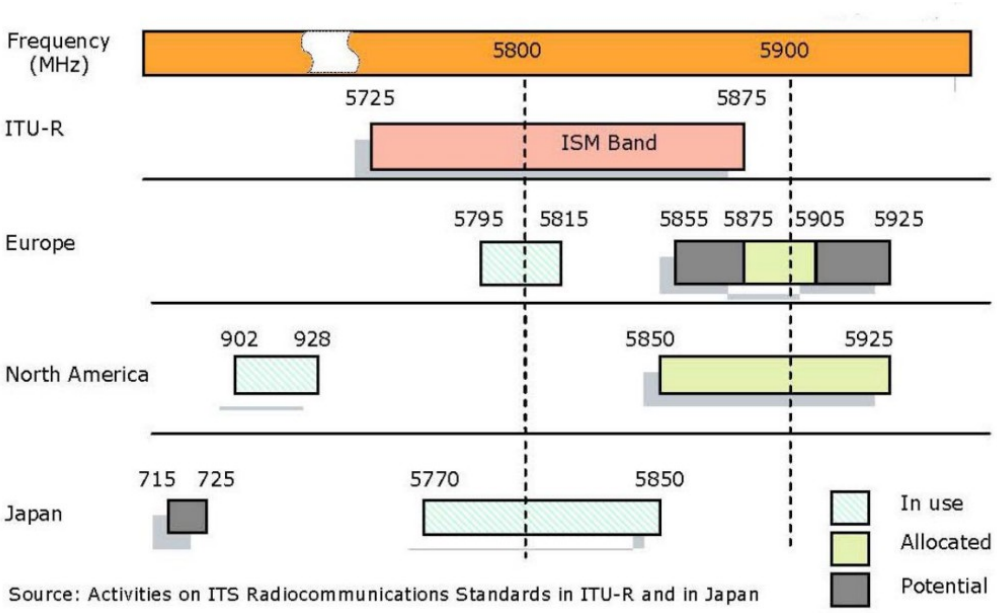
รูปที่ 1-1 การสื่อสารของยานพาหนะ

(https://mubbisherahmed.files.wordpress.com/2011/11/etsi-its.jpg)

ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในประเทศคือ Easy Pass ซึ่งเราใช้มาตรฐานเดียวกับยุโรปที่ความถี่ 5.8 GHz DSRC (Dedicated Short Range Communication) เป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ข้างถนน (Roadside Unit) กับอุปกรณ์ในรถ ซึ่งนั่นเป็นเพียงจุดเริ่มต้น อุตสาหกรรมที่กำลังเกิดขึ้นคือ Automated Vehicle กับ Connected

Vehicle ตัวอย่างเช่น การเตือนการเบรคกระทันหันของรถคันหน้าด้วย Electronic Brake Light ซึ่งเสริมจากไฟเบรคด้วยการส่งสัญญาณเบรคผ่านคลื่นวิทยุมายังกลุ่มของรถคนหลังที่ขับตามมา หรือการสื่อสารเพื่อหลบหลีกเมื่อรถสองคันเชื่อมทางแยก หรือการสื่อสารเพื่อให้รถรักษาระยะในการวิ่งตามกัน เป็นต้น

ประเทศสหรัฐฯ ญี่ปุ่นและกลุ่มประเทศยุโรปได้กำหนดมาตรฐานการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ซึ่งทั้งสามกลุ่มยังอิงมาตรฐานที่ต่างกันดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1-2 แสดงคลื่นความถี่วิทยุในการสื่อสารของยานพาหนะ

สำหรับประเทศไทยและในอาเซียนซึ่งจะต้องเดินทางขนส่งถึงกัน จำเป็นต้องเร่งกำหนดมาตรฐานการสื่อสารระหว่างยานพาหนะและกำหนดความถี่วิทยุที่เหมาะสมกับภูมิภาค และเพื่อเป็นการส่งเสริมและสร้างอุตสาหกรรมใหม่ด้านการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ เพื่อให้ประเทศไทยแข่งขันและพึ่งพาตนเองได้ จำเป็นต้องเร่งศึกษาการจัดสรรความถี่วิทยุที่เหมาะสม และแนวทางการส่งเสริมอุตสาหกรรม ซึ่งจะเกี่ยวพันกันอุตสาหกรรมโทรคมนาคมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ปัจจุบันสมาคมระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะไทยได้ร่วมมือกับสถาบันวิจัยและหน่วยงานการศึกษาเพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะแบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่

กลุ่มที่ 1 (กลุ่ม IP Based) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแหงเอเซีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี ได้ร่วมกันจัดทำโครงการ Car-Talk เมื่อเดือนตุลาคม 2552 ซึ่งเป็นการสื่อสารระหว่างยานพาหนะด้วยกัน และยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางโดยอาศัยโปรโตคอล Optimized Link State Routing (OLSR) [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานแบบ de-facto กำหนดโดย Internet Engineering Task Force (IETF) หมายเลขอ้างอิงคือ RFC 3626 สำหรับการสร้างเครือข่ายสื่อสาร Vehicular Ad hoc Networks (VANET) คุณลักษณะเด่นทางเทคนิคประการหนึ่งของ OLSR คือสามารถเชื่อมต่อและเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งเป็นโปรโตคอลที่อิงกับมาตรฐานเครือข่ายอินเตอร์เน็ต (Standard IP Networks) ทำให้สามารถต่อเชื่อมอุปกรณ์ใช้งานเครือข่ายต่างๆ เช่น Laptop, Smart Phone, Tablet PC เข้ากับเครือข่ายที่จะสร้างขึ้นได้โดยง่าย

ความยากของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะคือ การเคลื่อนที่ย้ายตำแหน่งของยานพาหนะทำให้การสื่อสารโดยใช้สัญญาณวิทยุมีข้อจำกัดเชิงกายภาพ เช่น ระยะทางที่สัญญาณครอบคลุมไปถึง หรือ การเกิดจุดอับสัญญาณ เป็นต้น ฉะนั้นในการออกแบบการสื่อสารกับยานพาหนะจะต้องอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอาจเกิดการขาดหลุดของสัญญาณ หรือต้องรอเพื่อให้มีโอกาสติดต่อสื่อสารกันได้อีกครั้งหนึ่ง หรือไม่สามารถเชื่อมต่อไม่ได้ในบางขณะ โปรโตคอลการสื่อสารจะต้องสามารถรองรับความล่าช้าและการขาดหลุดของการสื่อสารโดยอาศัยหลักการของ Delay / Disruption Tolerance Networking (DTN) [2] ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

โครงการ Car-Talk ได้ออกแบบและพัฒนา routing protocol สำหรับ V-2-V โดยใช้ประโยชน์จาก control packets ของ OLSR ในการส่งข้อมูลระหว่างรถยนต์และออกแบบ DTN (Delay Tolerant Network) บน OLSR เพื่อให้เครือข่ายระหว่างรถยนต์ไม่ขาดช่วงแม้ในเวลาที่ความหนาแน่นของรถยนต์บนถนนต่ำ และได้สาธิตการสื่อสารโดยส่ง video streaming ระหว่างยานพาหนะโดยลงโปรโตคอลที่พัฒนาขึ้นใน Mobile Router ที่ติดตั้งในยานพาหนะและอาศัย WiFi ที่ความถี่ 2.4 GHz ในการทดสอบและพบว่าสามารถสื่อสารได้ดี

ในโครงการนี้จะขอเรียกกลุ่มนี้ว่ากลุ่ม IP-Based

กลุ่มที่ 2 (กลุ่ม short message) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้พัฒนา VANET (Vehicular ad-hoc Network) protocol ชื่อ DECA (Density Aware Reliable Broadcasting Protocol) [3] ซึ่งเป็นการสื่อสารระหว่างยานพาหนะเช่นกัน แต่ต่างจากกลุ่มที่ 1 ตรงที่เป็นการสื่อสารแบบ Short Message ใช้การ broadcast ไปยังทุกโหนด(ทุกคัน) แต่ในสภาพยานพาหนะบนถนนจะมียานพาหนะที่อยู่กระจัดกระจายและเคลื่อนที่ตลอดเวลา ผู้ส่งต้องอาศัยโหนดอื่นในการส่งข้อความต่อๆกันไปในลักษณะ Multi-Hop โดยใน DECA จะมีวิธีในการ

ตรวจสอบสถานะรอบๆตัวว่ามีโหนดใดอยู่ในรัศมีที่สื่อสารกันได้ และในการส่งข้อความจะเลือกตัวแทนในการส่งต่อ(Forwarder node) โดยพิจารณาเลือกโหนดที่มี neighbor มากที่สุด ข้อความจะถูกส่งต่อเป็นทอดๆไปยังทุกโหนดจนสิ้นสุดอายุของข้อความ

DECA ได้ถูกทดสอบทั้งบน Simulation tool และบน Notebook และ Android device ในยานพาหนะโดยอาศัย WiFi ที่ความถี่ 2.4 GHz เช่นกัน ในโครงการนี้จะขอเรียกกลุ่มนี้ว่ากลุ่ม Short Message

ในโครงการนี้จะเป็นการทดสอบแพลตฟอร์มของทั้งสองกลุ่มบนการสื่อสารในสภาวะจริงด้วยโปรโตคอลที่ใช้จริงในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (Wireless Access in Vehicular Environments หรือ WAVE protocol [4]) โดยสมาคมระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะไทยได้ร่วมมือกับบริษัทเดนโซ่เพื่อนำเข้าอุปกรณ์ DENSO WSU model 5001 (WSU-5001) ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 1-3 โดยจะทำการ port โปรโตคอลของทั้งสองกลุ่มลงในกล่องเพื่อทำการทดสอบการสื่อสารผ่าน WAVE protocol ที่ความถี่ 5.8 GHz

อนึ่ง เนื่องจาก OLSR ไม่สามารถลงในกล่องดังกล่าวได้ด้วยปัญหาด้านสิทธิในการเปลี่ยน low-level module ทำให้กลุ่มที่ 1 ต้องเปลี่ยนไปใช้ Mobile Router ในการทดสอบแทน

รูปที่ 1-3 DENSO WSU-5001

ผลจากโครงการนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญสำหรับการศึกษาผลการสื่อสารของยานพาหนะในสภาวะจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการกำหนดและกำกับดูแลนโยบายและมาตรฐาน รวมถึงหน่วยงานวิจัยด้านเทคโนโลยีจราจรอัจฉริยะและรถอัจฉริยะจะได้ทราบข้อจำกัดต่างๆเพื่อนำมาปรับปรุงงานของตน อย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายประเด็นที่ยังไม่ได้ทดสอบในครั้งนี้คือความมั่นคงปลอดภัยของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ประเด็นการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคล ความน่าเชื่อถือและความเสถียรของระบบ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารข้อมูลทางกายภาพของ WAVE protocol (IEEE 802.11p) และทดสอบแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะบนความถี่ 5.8 GHz ในแบบการสื่อสารแบบ IP Based และแบบ short message บนสภาพแวดล้อมจริงเพื่อวิเคราะห์ปัญหาและข้อเสนอแนะต่อการพัฒนาไปสู่การใช้งานและการกำกับดูแล

2) เพื่อนำเสนอแพลตฟอร์มในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะให้อุตสาหกรรมนำไปต่อยอดได้

1.3 ขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงาน

1) การทดสอบภาคสนามการสื่อสารระหว่างยานพาหนะของรถจำนวน 7 คันในเขตเมืองและนอกเขตเมือง โดยการศึกษาประสิทธิภาพการสื่อสารประกอบด้วย PER (Packet Error Rate), RSSI (Received Signal Strength Indicator), Throughput และการวัดคุณภาพของสัญญาณเพื่อตรวจสอบการรบกวนของคลื่น เช่น การตรวจวัดค่า Spectrum และ ค่า Noise Emission โดยมีปัจจัยหรือตัวแปรที่ทดสอบได้แก่ กำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศ ลักษณะการแผ่คลื่นของสายอากาศ ระยะทาง ความเร็วในการเคลื่อนที่ สภาพแวดล้อม (เขตเมืองที่มีตึกสูง ชานเมือง เส้นทางระหว่างเมือง และทางด่วน) สภาวะต่างๆระหว่างวัน ส่วนการทดสอบแฟลต์ฟอร์มเป็นการวัดประสิทธิภาพการใช้งานตามลักษณะการนำไปใช้งานบนรถส่วนบุคคลและรถขนส่งมวลชน

2) การจัดสัมมนาเพื่อนำเสนอผลงานและรับฟังความคิดเห็น 1 ครั้ง กลุ่มเป้าหมายคือผู้ที่เกี่ยวของในอุตสาหกรรมการสื่อสาร รวมทั้งก.คมนาคมและกรุงเทพมหานคร

3) การจัดอบรมแพลตฟอร์มที่นำเสนอในโครงการ 1 ครั้ง กลุ่มเป้าหมายคือนักพัฒนาโปรแกรมและผู้ประกอบการที่ต้องการพัฒนาบริการบนแพลตฟอร์มดังกล่าว

กลุ่มเป้าหมายคืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถโดยสารสาธารณะ รถบรรทุก และรถจักรยานยนต์) ได้แก่อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ ประกันภัย ขนส่งโลจิสติกส์ การจราจร โทรคมนาคม ซอฟต์แวร์ ระบบนำทาง ฯลฯ เป็นต้น

กลุ่มเป้าหมายคือผู้ควบคุมสั่งการจราจร เช่น กองบังคับการตำรวจจราจร (บก.จร) ตำรวจทางหลวง และผู้ดูแลรักษาโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจราจร เช่น สำนักการจราจรและขนส่ง (สจส.) กรุงเทพมหานคร (กทม.) สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท ที่ต้องสร้างโครงสร้างพื้นฐานเพื่อการ

สื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางได้แก่ ป้ายจราจร สัญญาณไฟจราจร อุปกรณ์ตรวจวัด และ access point ข้างทาง เป็นต้น

1.4 ทฤษฎี

การสื่อสารระหว่างยานพาหนะจำเป็นต้องการความถี่คลื่นวิทยุและโปรโตคอลที่เหมาะสมกับสภาพการสื่อสารบนถนนซึ่งโหนดมีการเคลื่อนที่ไปมาอย่างรวดเร็ว ต่างจากการใช้งานในระบบ WiFi โดยมีมาตรฐานที่ทั่วโลกใช้กันเรียกว่า Dedicated Short Range Communication (DSRC) และ V2X (Vehicle to Anything communication) หรือ WAVE (Wireless Ad hoc for Vehicle Environment) ซึ่งมาตรฐานในระดับ Data link และ Physical layer คือ IEEE 802.11p บนความถี่ที่ 5.8 GHz ในโครงการนี้จะใช้มาตรฐานดังกล่าวควบคู่กับ WiFi ในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่ความถี่ 5.8 GHz โดยได้แบ่งการทดสอบเป็นสองกลุ่มได้แก่ กลุมประเภท IP based และกลุ่มประเภท short message

<u>กลุ่ม IP based</u>

ที่ผ่านมามีการวิจัยพัฒนาระบบการกระจายข้อมูลซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ร่วมกับ สวทช. ซึ่งทำงานในลักษณะการแพร่กระจายข้อมูล (Epidemic) และทั้งแบบ Opportunistic บน OLSR Mobile Ad hoc Network โดยในแบบ Epidemic จะทำงานในลักษณะการส่งข้อมูล แฝงไปใน Control Package ของ Optimized Link State Routing (OLSR) Protocol ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแพร่กระจายไปใน OLSR MANET ตามกลไกการ Routing ของ OLSR โดยอัตโนมัติ ข้อดีของวิธีนี้คือยังคงความเข้ากันได้ (Compatibility) กับ Node อื่นๆที่ใช้ OLSR ปกติ การวิจัยในส่วนนี้มุ่งไปที่การทดลองการเปลี่ยนแปลงค่า Sequence Number ที่ปรากฏใน OLSR Control Packet เพื่อเป็นการแจ้งเตือนถึงเหตุการณ์หรืออุบัติเหตุ หากเลข Sequence Number ที่ปรากฏใน Control Packet ของผู้ส่งใดๆเพิ่มขึ้นมากกว่า 500 (ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นในสถานการณ์ปกติ) ให้ตีความได้ว่าเกิดสถานการณ์อุบัติเหตุ ทั้งนี้เมื่อผู้รับได้รับ Control Packet ที่มีค่า Sequence Number เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะดังกล่าวก็จะสามารถรับรู้การแจ้งเตือนได้ การกำหนดขอบเขต การแพร่กระจาย (ไม่ให้เกินระยะทางตาม Hop สูงสุดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า) สามารถทำ ได้โดยกำหนดค่า Time to Live (TTL) ของ Control Packet ที่ส่งไป

ส่วนการแพร่กระจายข้อมูลแบบ Opportunistic นั้นอาศัยทั้งการทำ Broadcast หรือ Unicast ข้อมูลไปยังกลุ่มของ Node ยานพาหนะที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน โดยอาศัยข้อมูล Topology Information ที่ OLSR ได้เรียนรู้มาและแสดงผลไว้ในขณะนั้น

ที่ผ่านมา โครงการ Car-Talk ได้พัฒนา

1) บริการแจ้งเตือนข้อมูลในลักษณะฉับพลันเฉพาะถิ่น (Localized Rapid Information Dissemination Service) เพื่อการแจ้งเตือนอุบัติเหตุ หรือ สภาพการจราจรผิดปกติ อันเกิดขึ้นเฉพาะ หน้า และ

2) บริการสื่อสารเครือข่ายสังคมในกลุ่มยานพาหนะขณะเดินทาง (Localized Social Network Service for Groups of Vehicles) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการสื่อสาร ในกลุ่มของยาน พาหนะที่เดินทางร่วมกัน โดยจะสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลทั่วไป เช่น ข้อมูลการเดินทาง แนะนำสถานที่ท่องเที่ยว สถานะของการจราจรในบริเวณใกล้เคียง แต่ยังอาศัย WiFi ที่ 2.4 GHz ในการสื่อสาร

เครือข่ายสื่อสารระหว่างยานพาหนะ มีคุณลักษณะที่แตกต่างไปจากเครือข่ายสื่อสารปกติ คือ จะมีการขาดหลุดของการสื่อสาร (Disruptions) เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ทั้งจากการเคลื่อนที่ (Mobility) ของยานพาหนะ และจากสิ่งกีดขวางหรืออุปสรรคสัญญาณ เช่น ตึก ต้นไม้ และยานพาหนะด้วย กันเอง

การวิจัยพัฒนาต่อยอดในกลุ่ม IP-Based จะมีประโยชน์ต่อการพัฒนา Vehicular Network Applications ที่ต้องอาศัยการถ่ายโอนข้อมูลผ่าน Internet Protocol ซึ่งมีความยืดหยุ่น และใช้งานได้ในหลากหลายลักษณะ

<u>กลุ่ม Short Message</u>

การแลกเปลี่ยนข้อมูลขนาดเล็กหรือ Short Message เป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับแอพพลิเคชั่นบนระบบจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Transport System: ITS) โดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลขนาดเล็กนี้ต้องมีการออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานได้ในสถาพแวดล้อมของรถยนต์ ซึ่งต้องสามารถรองรับการเชื่อมต่อแบบเป็นช่วงๆ (Intermittent Connectivity) ได้โดยการใช้เทคนิค Store-and-Forward และหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาการชนของข้อมูล (Broadcasting Storm Problem) เนื่องจากการแลกข้อมูลขนาดเล็กเป็นปัจจัยสำคัญในความประสบความสำเร็จของระบบจราจรอัจฉริยะ ดังนั้นจึงมากงานวิจัยจำนวนที่เสนอขึ้นมาเพื่อปรับปรุงความเร็วในการทำงาน ความเชื่อถือได้ของระบบ และการทนต่อการทำงานในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ EAEP (Edge-Aware Epidemic Protocol), AckPBSM (Acknowledge Parameterless Broadcast Protocol in Static to

Highly Mobile Ad-hoc Networks) และ DECA (Density-Aware Broadcasting Protocol on Vehicular Ad Hoc Networks)

การทำงานของ EAEP ใช้ข้อมูลของจีพีเอสมาช่วยในการทำงาน โดยหลักการทำงานของโพรโทคอลจะให้โหนดมีเวลารอช่วงระยะหนึ่งหลังจากได้รับข้อความจากโหนดอื่นจากนั้นจึงนับจำนวนครั้งที่โหนดข้างเคียงส่งข้อความมาคิดเป็นค่าของความน่าจะเป็นที่โหนดนั้นๆ จะส่งต่อข้อความนั้น ซึ่งโหนดที่อยูบริเวณขอบของการส่งข้อมูลจะมีค่าความน่าจะเป็นสูงกว่าโหนดบริเวณอื่นๆ ส่วน AckPBSM ถูกพัฒนาขึ้นจาก PBSM เป็นโพรโทคอลสำหรับการแพร่ข้อมูลบน MANET การทำงานของ AckPBSM จะใช้ข้อมูลจีพีเอส เพื่อทราบตำแหนงของโหนดเพื่อนบ้าน โดยอาศัยการทำงานของ Beacon Message ซึ่ง AckPBSM จะนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณเพื่อสร้าง Connected Dominating Sets (CDS) เมื่อมีการแพร่ข้อความเกิดขึ้น โหนดที่ได้รับข้อความจะตั้งเวลาช่วงหนึ่ง โดยที่โหนดที่เป็น CDS จะมีเวลาในการคอยสั้นกว่าก่อนการส่งต่อข้อความอีกครั้ง ในกรณีเกิดปัญหาการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆ AckPBSM จะแนบการตอบรับข้อความ (Acknowledgment) เข้าไปกับ Beacon Message เพื่อให้โหนดส่งข้อความให้กับโหนดเพื่อนบ้านกรณีที่มีข้อความไม่ครบ

DECA เป็นโพรโทคอลที่ออกแบบขึ้นมาภายในห้องปฏิบัติการของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆของโพรโทคอลอื่น โดย DECA จะใช้เพียงข้อมูลความหนาแน่นของยานพาหนะในพื้นที่นั้นในการเลือกโหนดที่จะส่งต่อข้อความ และภายใน Beacon Message ก็จะมีการตรวจสอบข้อความที่เคยได้รับเพื่อใช้ในการส่งข้อความที่โหนดนั้นๆขาดหายไป ดังนั้นการทำงานของ DECA จึงมีความยืดหยุ่นมากที่สุดเมื่อเปรียบกับโพรโทคอลอื่นๆ จากการทดลอง DECA ยังสามารถทำงานได้รวดเร็วโดยมีค่าใช้จ่ายในการทำงานที่ต่ำ และมีความคงทนต่อข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนมากกว่าโพรโทคอลที่ใช้จีพีเอสในการทำงาน

ส่วนที่ 2
แนวทางการดำเนินโครงการ

2.1 แนวทางและการวิเคราะห์ข้อมูล

เนื่องจาก V2X มีมาตรฐานระดับหนึ่ง ทีมวิจัยเองมีผลงานการศึกษามาแล้วเช่นกัน (แต่ใช WiFi เป็นหลัก) แนวทางจึงเป็นการนำผลการศึกษาเดิมมาใส่ลงในอุปกรณ์ V2X ตามมาตรฐาน WAVE แล้วทำการทดสอบจริงด้วยสภาพถนน 3 รูปแบบ เพื่อวัดประสิทธิภาพการใช้งานตามระยะทาง ความเร็วรถ สภาพสิ่งแวดล้อม ทิศทางการเคลื่อนที่ นำขอมูลที่ได้มาวิเคราะห์และปรับจูนพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อเสนอแนะและข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง

2.2 แผนปฏิบัติการโครงการ

ลำดับ	กิจกรรม	ระยะเวลาการดำเนินกิจกรรม				
		Q1	Q2	Q3	Q4	น้ำหนัก (%)
1	นำเข้าอุปกรณ์ DENSO WSU model 5001 (WSU-5001)	x				5%
2	port แพลต์ฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะลง Mobile Router และกล่อง WSU-5001	x				5%
3	ทดสอบเบื้องต้นการใช้งานแพลตฟอร์มในห้องปฏิบัติการ	x				5%
4	ทดสอบทางกายภาพ (physical layer) ในเขตเมือง		x			12%
5	ทดสอบแพลตฟอร์ม IP-Based และ Short message ในเขตเมือง		x			13%

6	ทดสอบทางกายภาพ (physical layer) นอกเขตเมือง		x			12%
7	ทดสอบแพลตฟอร์ม IP-Based และ Short message นอกเขตเมือง		x			13%
8	ทำการทดสอบร่วมกับรถโดยสารขสมก.			x		12%
9	จัดงานสัมมนานำเสนอผลงานและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และงานอบรมนักพัฒนาโปรแกรมเพื่อต่อยอดการใช้แพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ			x		13%
10	จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์				x	10%
รวม						100%

ส่วนที่ 3
รายงานการทดสอบในเขตเมือง

สำหรับการทดสอบในครั้งนี้แบ่งเป็น 3 การทดสอบคือ 1. การทดสอบทางกายภาพ 2. การทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP Based และ 3. การทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short Message สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในเขตเมือง

การทดสอบทางกายภาพจะใช้ Denso WSU5001 ซึ่งเป็น WAVE protocol ที่เป็นมาตรฐานสากลในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ เพื่อให้ได้ข้อมูลทางกายภาพสำหรับการตัดสินใจใช้ WAVE ในประเทศไทย และการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short message เป็นการนำอุปกรณ์ตัวเดียวกันกับข้อ 1 มาเขียน VANET (Vehicle Adhoc Network) เพื่อให้สามารถส่งข้อความสั้นๆ ระหว่างกลุ่มของยานพาหนะได้จริง แล้ววัดประสิทธิภาพในสิ่งแวดล้อมจริง ส่วนการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP Based กลุ่มนี้ถือเป็นตัวแทนของการนำ WiFi มาใช้แทน WAVE โดยการดัดแปลง Mobile Router ยี่ห้อ TP-Link ให้สามารถทำ OLSR ได้ ทำให้สามารถสื่อสารแบบ VANET ได้ แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพ สรุปการทดสอบทั้งสามกลุ่มได้ดังนี้

ประเภทการทดสอบ	สถานที่	อุปกรณ์	จำนวนอุปกรณ์	ค่าที่ใช้ทดสอบ	วัตถุประสงค์
1. กายภาพ	ถนนประชาราษฎร์ 1 และถนนวงศ์สว่าง	WSU5001	3 ชุด	Hand-off ระหว่างสองสถานีฐาน, RSSI, Packet Loss	เป็นการวัดความสามารถของอุปกรณ์ที่สื่อสารในระดับ Physical Layer ของ WAVE protocol ในเขตเมืองโดยจำลองสถานีฐาน 2 สถานีและอุปกรณ์ติดรถ 1 คัน ทดสองค่า Hand-off และวัดค่า RSSI, Packet Loss ที่ระยะทาง, Transmission rate, ขนาด Packet , EDCA และ Channel ที่ต่างๆกัน
2. IP Based	ม.ธรรมศาสตร์	TP-Link	3 ชุด	PDR, RTT, Throughput	เป็นการทดสอบการสื่อสาร IP network ที่นำ OLSR มาใช้ใน Routing protocol บน Mobile router โดยใช้ Wi-Fi GHz ที่ 1000mW โดย OLSR จะทำ multi-hop

					กรณีที่โหนดอยู่ห่างเกินระยะส่งใน 1 hop ให้อัตโนมัติ การทดสอบนี้เพื่อดูผลการส่งตามการวิ่งรถตามกันในเมือง
3. Short Message	จุฬาฯ (รอบจุฬาฯ และภายในจุฬาฯ)	WSU5001	7 ชุด	PDR, Transmission delay, Success Ratio	เป็นการทดสอบการสื่อสาร short message ผ่าน DECA ซึ่งเป็น VANET protocol โดยใช้อุปกรณ์ WSU5001 เช่นเดียวกับข้อ 1 เพื่อทำการวัดประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ multi-hop

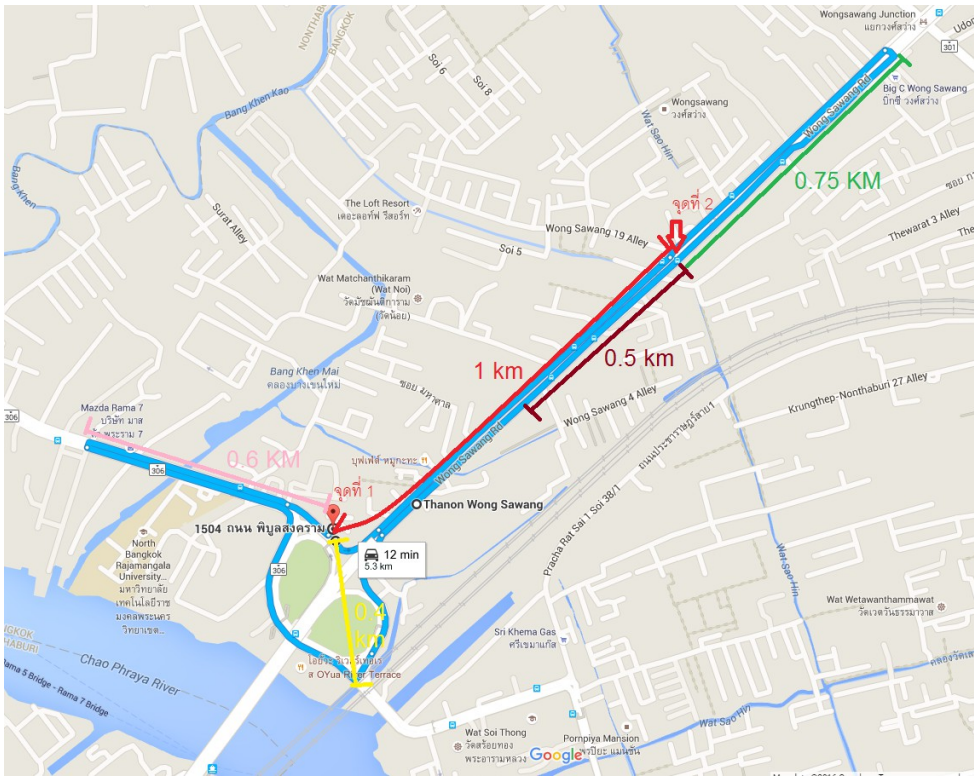
3.1 ผลการทดสอบทางกายภาพ

3.1.1 รูปแบบการทดสอบในเขตเมือง

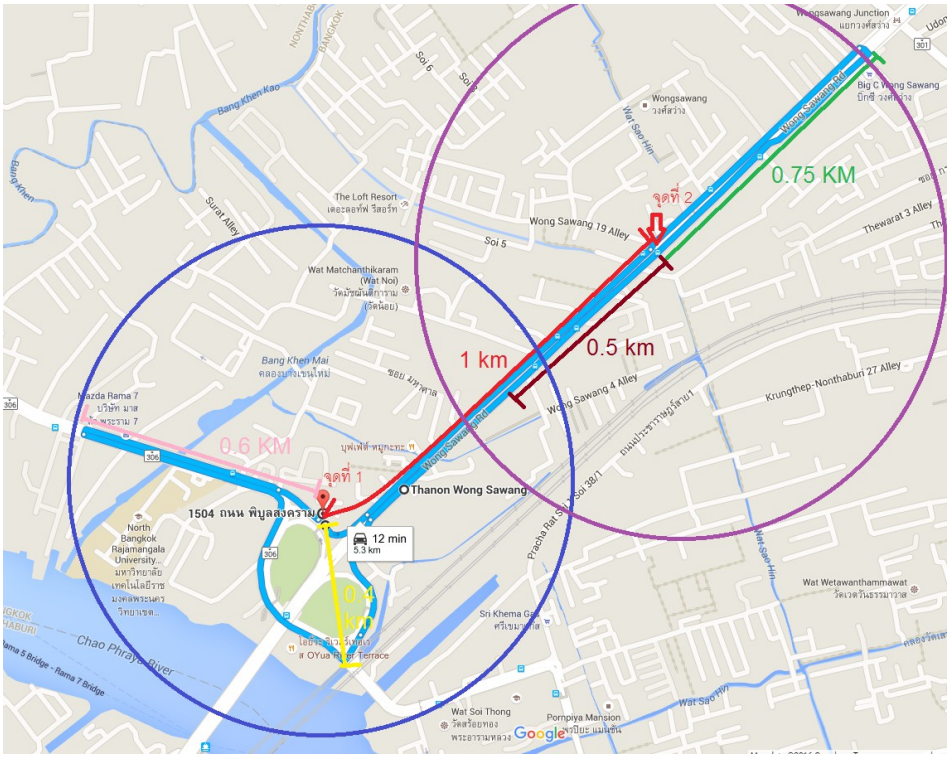
การวิ่งทดสอบทดสอบในครั้งนี้เป็นการทดสอบการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในเขตเมืองในบริเวณที่มีอาคารพาณิชย์โดยทดสอบการส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานจำนวน 2 สถานี และรถยนต์ซึ่งติดตั้ง OBU จำนวน 1 เครื่อง รูปที่ 3-1 แสดงจุดติดตั้งสถานีฐานที่จุดที่ 1 และ จุดที่ 2 ระยะห่างประมาณ 1 กิโลเมตร โดยจุดที่ 1 เป็นจุดที่ติดตั้งบริเวณทางโค้งระหว่างถนนประชาราษฎร์ 1 และถนนวงศ์สว่าง

รถยนต์ที่ใช้ทดสอบเริ่มเคลื่อนที่ตั้งแต่บริเวณหน้าโชว์รูมรถยนต์มาสด้าพระราม 7 บนถนนประชาราษฎร์ 1 ห่างจากจุดที่ 1 ประมาณ 600 เมตร เมื่อวิ่งไปถึงทางโค้งบริเวณที่ติดตั้งสถานีที่ 1 แล้วจึงเลี้ยวซ้ายบนถนนวงศ์สว่างและขับต่อไปอีก 1.750 เมตร แล้วจึงกลับรถใต้สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง จากนั้นขับวนกลับมาบนถนนวงศ์สว่าง และขับวนใต้สะพานพระราม 7 บริเวณที่ติดตั้งสถานีที่ 1 ซึ่งมีระยะไกลสุดจากสถานีที่ 1 ประมาณ 400 เมตร จากนั้นขับรถไปตามถนนประชาราษฎร์ 1 และกลับรถบริเวณโชว์รูมรถยนต์มาสด้าพระราม 7 รวมระยะทางทดสอบการเคลื่อนที่ 1 รอบประมาณ 3,000 เมตร โดยระหว่างการทดสอบโปรแกรมทำการเก็บข้อมูลไปเรื่อยๆ โดยข้อมูลประกอบด้วย ตำแหน่งละติจูด/ลองกิจูด ความแรงสัญญาณ (RSSI) จำนวน Packet ที่ส่งและที่รับได้ (Sent and Received Packet)

รูปที่ 3-2 แสดงรัศมีการส่งสัญญาณโดยประมาณของสถานีที่ 1 และ 2 ซึ่งระยะการส่งประมาณ 600-800 เมตร แม้ว่าสถานีสามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่า 800 เมตรแต่อัตราการสูญเสีย (Packet Loss) มีค่าสูง เราจึงทดสอบที่ระยะการส่งไม่เกิน 800 เมตร จากรูปจะเห็นว่ามีพื้นที่คาบเกี่ยว (Overlap Area) ระหว่างสถานีส่งทั้งสองเพื่อทดสอบความต่อเนื่องของการส่งสัญญาณระหว่างรถยนต์ไปยังสถานีที่ 1 และต่อเนื่องไปยังสถานีที่ 2



รูปที่ 3-1 แผนที่แสดงตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานและระยะทางการทดสอบ



รูปที่ 3-2 แผนที่แสดงรัศมีการส่งสัญญาณของสถานี 1 และ 2

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบโดยเราเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบครั้งก่อนที่ให้ผลการรับ-ส่งสัญญาณดีที่สุดคือ การส่งที่ Channel 153 และตั้งค่า EDCA = 2 และค่า Transmission Power สูงสุดที่ 20 dBm โดยเลือกส่งที่ Transmission Interval = 100 ms และ Packet Size 250 Byte ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการส่งข้อมูลประเภท Streaming Data เช่น Voice หรือ Video

ตารางที่ 3-1 ค่า Parameter สำหรับการทดสอบ

Channel	Data Rate (Mbps)	Tx Power (dBm)	EDCA	Tx Interval (ms)	Packet Size (byte)
153	12	20	2	100	250

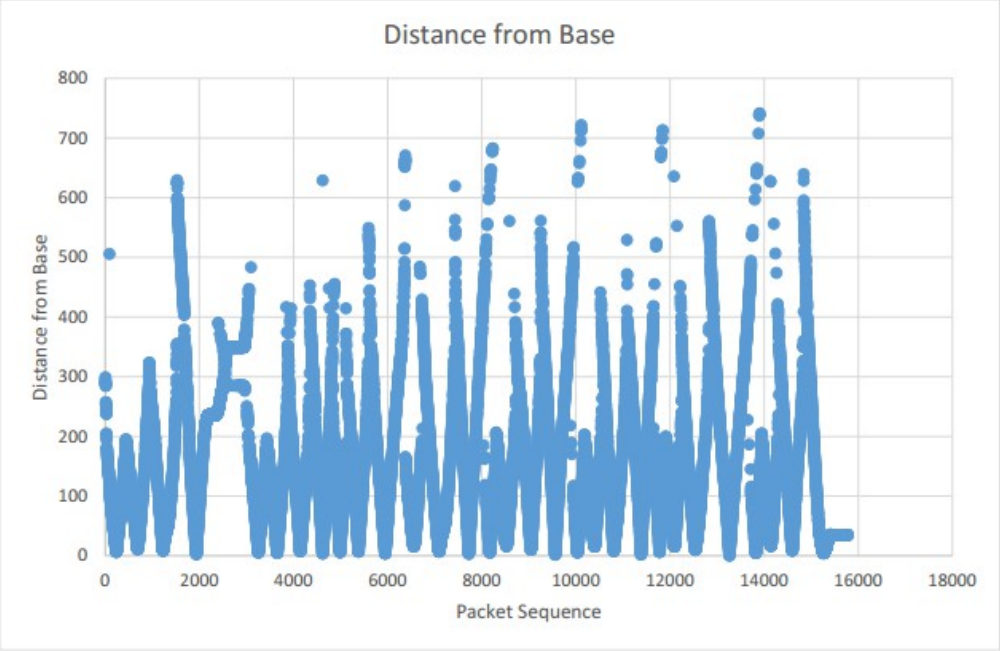
3.1.2 ผลการทดสอบการทำ Hand-off ระหว่างสองสถานีฐาน

การทดสอบในส่วนนี้เป็นการทดสอบการส่งข้อมูลจากสถานีเคลื่อนที่ หรือ OBE ไปยังสถานีฐาน โดยในกรณีนี้จะมีสถานีเคลื่อนที่จำนวน 1 สถานี และสถานีฐานจำนวน 2 สถานีที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งแสดงในแผนที่ที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 โดยการทดสอบเริ่มจากสถานีเคลื่อนที่ส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานที่อยู่ใกล้เคียงและส่งข้อมูลไปเรื่อยๆ ในลักษณะ Streaming Data และให้รถยนต์เคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ตามถนนด้วยความเร็วปกติตามสภาพจราจร และเราทำการเก็บค่าพิกัดตำแหน่งของการส่งข้อมูล เมื่อสถานีฐานได้รับข้อมูลก็จะส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีเคลื่อนที่ หรือ OBE จากนั้น OBE ทำการบันทึกค่าข้อมูลลงในไฟล์

รูปที่ 3-3 แสดงระยะทางการทดสอบรถยนต์กับลำดับการส่งข้อมูล ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ที่เริ่มจากระยะที่ห่างจากสถานีและเข้าใกล้สถานีและห่างจากสถานีสลับกันไปมาระหว่างการวิ่งทดสอบ จากรูปกราฟเราจะเห็นว่ามีการย้ายสถานีฐานจากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 โดยการสังเกตได้จากระยะทางการรับ-ส่งข้อมูลที่เปลี่ยนจากที่ระยะประมาณ 350 เมตร เป็น 650 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระยะกึ่งกลางระหว่างทั้งสองสถานี ซึ่งเป็นช่วงที่วิ่งจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 และเมื่อเริ่มเข้าเขตรัศมีการส่งของสถานี 2 แล้ว ระยะทางรับ-ส่งก็จะลดลงและเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 500 เมตร ซึ่งเป็นจุดกลับรถ

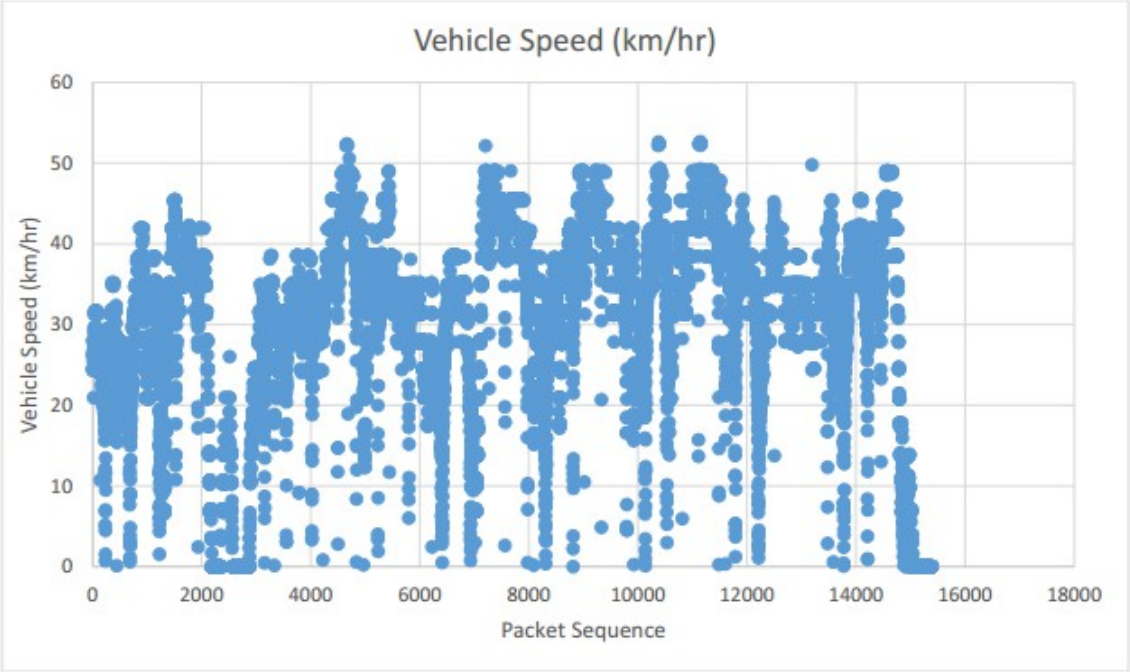
ใต้สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ซึ่งในบริเวณนี้อาจมีบางช่วงที่สัญญาณขาดหาย และเมื่อกลับรถแล้วระยะทางการรับ-ส่งก็จะลดลง

ในช่วงการทดสอบวิ่งบนถนนวงศ์สว่างในบางครั้งอาจมีการสลับการรับ-ส่งสัญญาณระหว่างสองสถานีได้ อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณจากรถยนต์ไปยังสถานีฐานขึ้นอยู่กับการเลือกส่งของ OBE ซึ่งจะเลือกส่งไปยังสถานีที่มีสัญญาณแรงที่สุดในกรณีที่มีสถานีอื่นๆ ในเขตพื้นที่เดียวกัน ดังนั้นการทดสองในลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ OBE สามารถส่งสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องและมีการทำ Hand-off ระหว่างการส่งไปยังสถานีฐานที่เป็นผู้รับ อย่างไรก็ตาม การทำ Hand-off ที่สมบูรณ์นั้นจะต้องให้สถานีฐานทั้งสองสถานีมีการ Synchronization ระหว่างกันเพื่อให้การรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง OBE กับเครื่องแม่ข่ายให้บริการ (Server) ข้อมูลมีความต่อเนื่องในกรณีที่เป็น Streaming Data

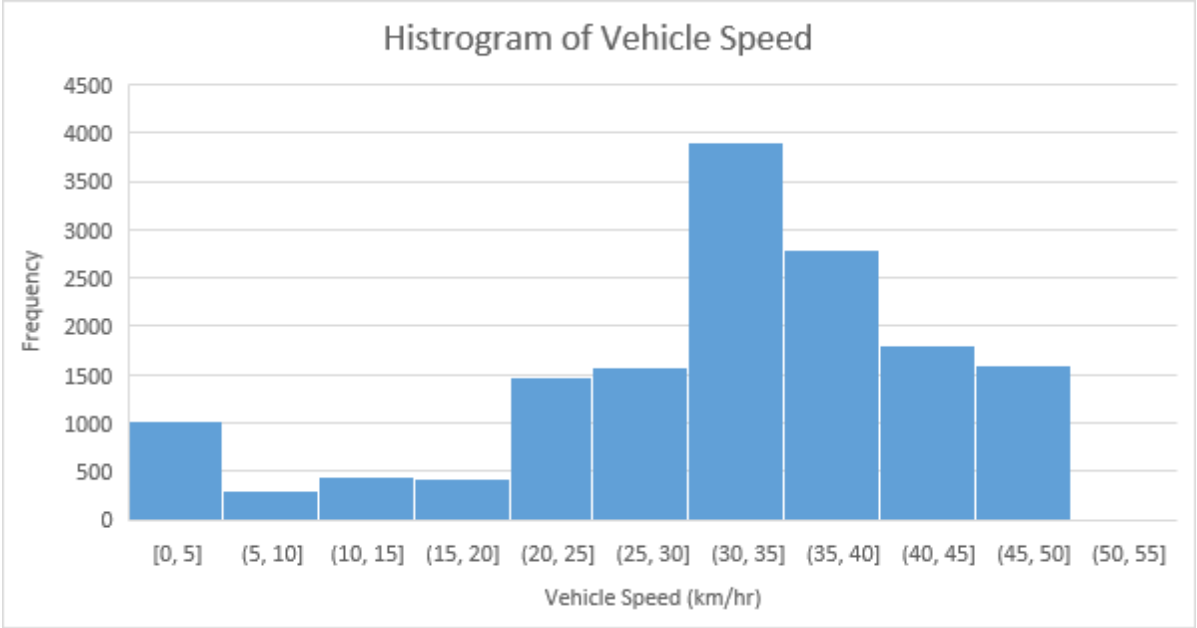


รูปที่ 3-3 ระยะทางการส่งสัญญาณข้อมูล

รูปที่ 3-4 แสดงความเร็วของเคลื่อนที่ของรถยนต์ ซึ่งอยู่ระหว่าง 0 ถึง 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อนำมาแสดงในรูปกราฟฮิสโตรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3-5 จะเห็นว่ารถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วส่วนใหญ่ที่ 30-35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



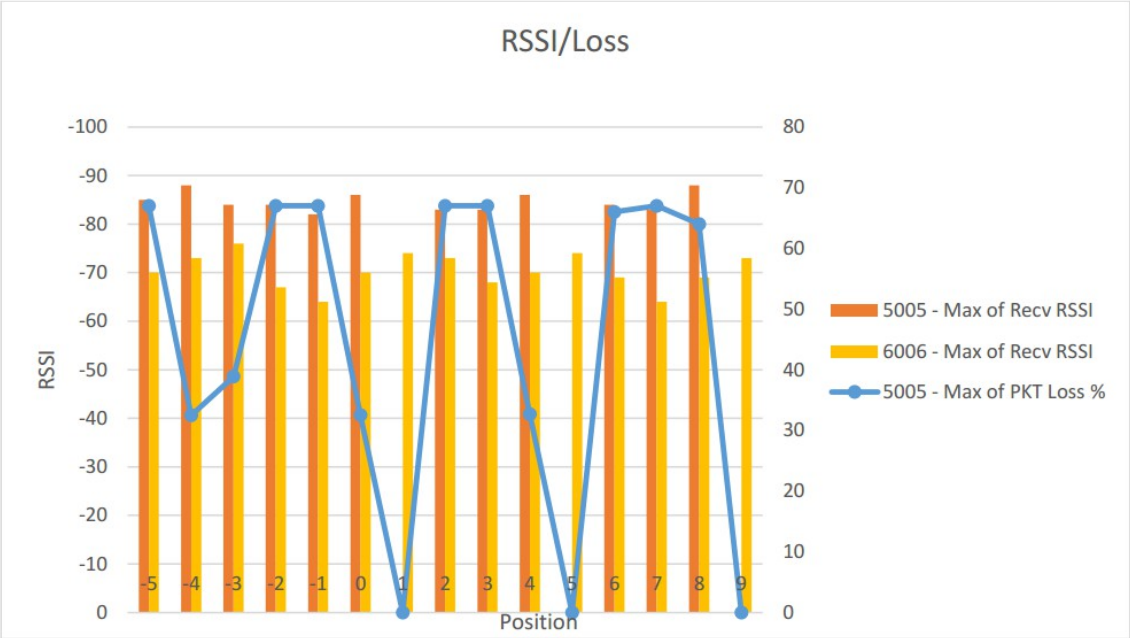
รูปที่ 3-4 ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถยนต์ระหว่างการวิ่งทดสอบ



รูปที่ 3-5 ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถยนต์ระหว่างการทดสอบ

จากวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อหาจำนวนครั้งของการ Handoff และค่าการสูญเสียข้อมูล (Loss) ขณะ Handoff สามารถแสดงในรูป 3-6 ซึ่งจำนวนครั้งในการ Handoff สามารถคำนวณได้จาก

การรับข้อมูลของสถานีที่จุดที่ 1 (5005) กับสถานีที่จุดที่ 2 (6006) โดย Handoff จะเกิดเมื่อความแรงของสัญญาณ (RSSI) ของสถานีใดมีค่ามากกว่าอีกสถานีหนึ่ง โดยเป็นการเคลื่อนที่ระหว่างสองสถานี



รูปที่ 3-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสัญญาณและค่าการสูญเสียข้อมูล

จากการวิ่งทดสอบตามเส้นทางในแผนที่และวิ่งเป็นวงรอบตามเส้นทางโอกาสที่จะเกิด Handoff มีได้ 3 ช่วง ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่เกิด Handoff ใน 3 ช่วงคือ ช่วงแรกที่ตำแหน่ง -5 ถึง 1 มีการ Handoff จำนวน 6 ครั้ง ช่วงที่สองที่ตำแหน่ง 1 ถึง 5 มีการ Handoff จำนวน 3 ครั้ง และช่วงที่สามที่ตำแหน่ง 5 ถึง 9 มีการ Handoff จำนวน 3 ครั้ง

ในช่วงของการ Handoff กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเป็นกราฟเส้น จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง 1, 5, และ 9 มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงการ Handoff สำเร็จมีการเปลี่ยนการรับส่งจากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง โดยช่วงแรกอยู่ระหว่างการเปลี่ยนจากสถานี 5005 ไปยังสถานี 6006 ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนจากสถานี 6006 เป็นสถานี 5005 และ ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนจากสถานี 5005 เป็น 6006 ซึ่งระหว่างการ Handoff จะมีค่าการสูญเสียประมาณ 30% -70%

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมสามารถแสดงจำนวนครั้งของการ Handoff กับระหว่างการเคลื่อนที่จากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีโดยแสดงค่าการสูญเสีย (Loss) เพื่อเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่ ซึ่งในกรณีนี้เป็นการทดสอบเพื่อให้เห็นว่าการทำ Handoff สามารถทำได้ในขณะการเคลื่อนที่ที่

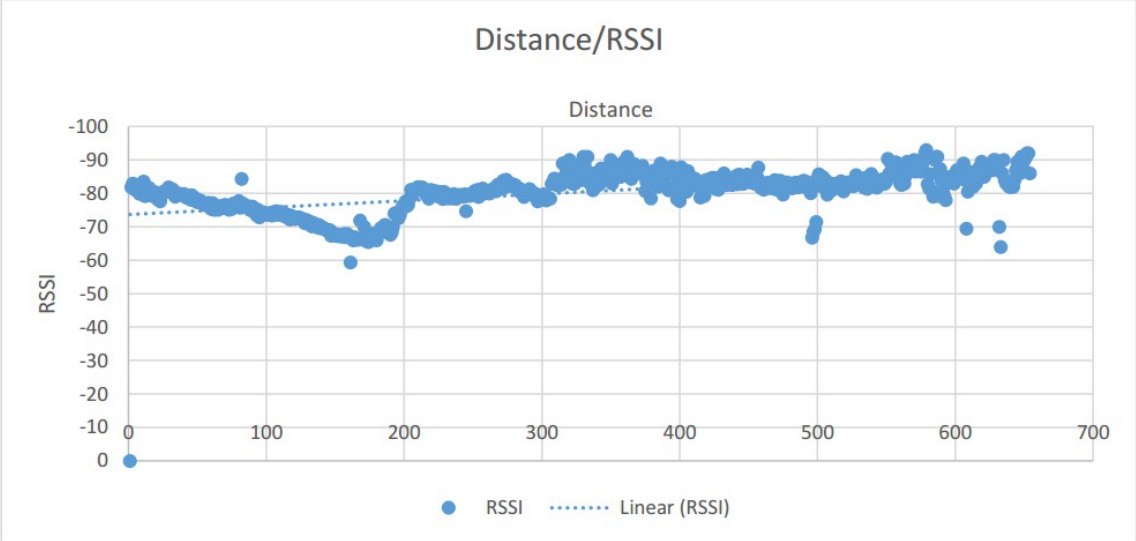
ความเร็วสูง ซึ่งปกติการทำ Handoff จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณ แต่เมื่อมีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ที่สูงกว่าการเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า (Pedestrian) จะทำให้เกิดปัญหา Doppler Effect ที่จะทำให้สัญญาณลดทอนหรือไม่มีเสถียรภาพ จึงอาจทำให้การ Handoff มีจำนวนครั้งมากเกินไปหากการทำ Handoff ใช้ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) เป็นค่าในการตัดสินใจทำ Handoff จากรูปที่ 3-7 จะเห็นได้ว่าในช่วงขณะที่มีการเคลื่อนที่ที่ความเร็วสูงจะมีจำนวนครั้งของการ Handoff มากกว่าในช่วงขณะที่เคลื่อนที่ช้าซึ่งอาจมีผลมาจากค่า RSSI ที่ผันผวนจึงทำให้การ Handoff เกิดขึ้นได้ง่ายหรือมากกว่าความจำเป็น

รูปที่ 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเคลื่อนที่และและค่าการสูญเสียข้อมูล

3.1.3 ผลการวัดค่าสัญญาณ RSSI ตามระยะทาง

ในการทดสอบนี้เราได้ทำการทดสอบผลของระยะทางระหว่างรถยนต์และสถานีส่งทั้งสองสถานีกับความแรงสัญญาณที่ได้รับ (RSSI) และ อัตราการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss) ระหว่างการวิ่งทดสอบระหว่างสองสถานี โดยเราทำการเก็บข้อมูลการสูญเสียข้อมูล หรือ Packet Loss และค่าความแรงสัญญาณ (ค่า 0 – 100 โดยค่าน้อยหมายถึงสัญญาณแรงและค่ามากหมายถึงสัญญาณอ่อน)

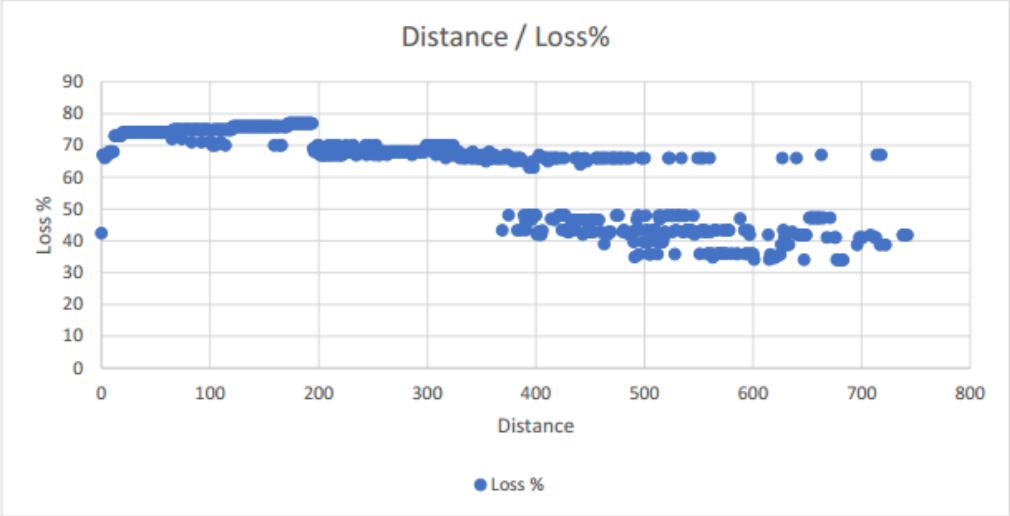
รูปที่ 3-8 แสดงค่า RSSI เทียบกับระยะทางของการรับ-ส่งข้อมูลขณะรถยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางทดสอบ จากรูปแสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณ RSSI อยู่ในระดับปกติในช่วง -60 – -90 เมื่ออยู่ในระยะทางเพิ่มขึ้น ระดับ RSSI มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระหว่างการทดสอบ สถานีฐานทั้งสองสถานีสามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ทดสอบได้และการสูญเสียมีน้อย ทั้งนี้จากการทดสอบในครั้งก่อนการสูญเสียข้อมูลส่วนใหญ่จะเกิดจากช่วงระยะการส่ง (Transmission Interval Time) ที่น้อยเกินไป หรือ อัตราการส่งข้อมูล (Transmission Rate) ที่มากจนเกินไปจนทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ทัน หรือในกรณีที่เราส่งข้อมูลที่มีขนาดข้อมูล (Packet Size) ที่ยาวมากซึ่งจะทำให้โอกาสเกิดความผิดพลาดของข้อมูลระหว่างการรับ-ส่งสูงขึ้นจนทำให้เกิดข้อมูลผิดพลาดและอุปกรณ์ก็ทำการ Discard ข้อมูลชุดนั้นจึงทำให้ข้อมูลสูญหาย ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ เราตั้งค่า Transmission Interval Time เท่ากับ 100 ms และค่าความยาวข้อมูล (Packet Length) เท่ากับ 250 bytes ซึ่งเป็นค่าการรับ-ส่งที่ดีที่สุดจากการทดสอบในครั้งก่อน



รูปที่ 3-8 ระดับสัญญาณ RSSI เทียบกับระยะทาง

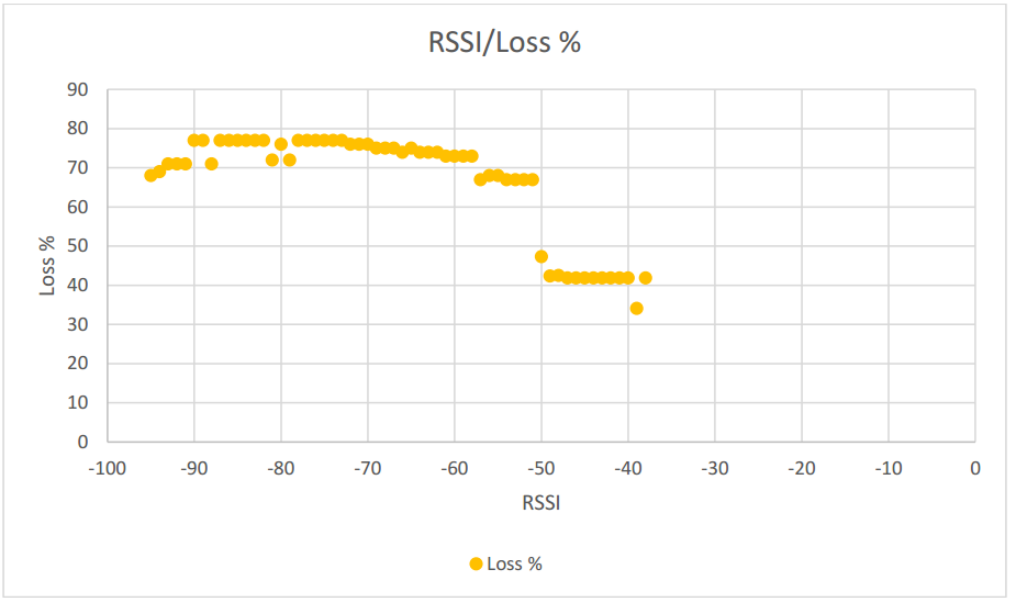
รูปที่ 3-9 แสดงผลการวัดค่าอัตราการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss Ratio) กับระยะห่างจากสถานี ซึ่งมีค่าการสูญเสียที่ประมาณ 40 - 80% ที่ระยะการส่งประมาณไม่เกิน 400 เมตรส่วนใหญ่เป็นการส่งจากสถานี 1 ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่หัวมุม และมีการบังสัญญาณจากต้นไม้และสะพานพระราม 7 จึงทำให้มีการลดทอนของสัญญาณมากและทำให้ค่า Packet Loss มีค่าสูง ส่วนที่ระยะการส่งที่อยู่

ระหว่าง 400 – 800 เมตร เป็นการส่งจากสถานี 2 ซึ่งไม่มีการบดบังหรือลดทอนสัญญาณ จึงทำให้ค่า Packet Loss มีค่าต่ำกว่าที่ประมาณ 40% - 50% ซึ่งเป็นค่าปกติที่ได้จากการทดสอบในครั้งก่อน



รูปที่ 3-9 อัตราการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss) กับระยะทาง

รูปที่ 3-10 แสดงค่าความแรงสัญญาณ (RSSI) กับค่าการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss) จากการวิ่งทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ความแรงสัญญาณมีค่าต่ำ ก็จะทำให้มีการสูญเสียข้อมูลเพิ่มมากขึ้น แต่ในกรณีที่ค่า RSSI มากกว่า -50 dBm ก็จะทำให้ค่า Packet Loss มีค่าต่ำกว่า ซึ่งมีค่าประมาณ 40% - 50% ซึ่งเป็นค่าปรกติของการรับ-ส่งข้อมูลจากการทดสอบในครั้งก่อน



รูปที่ 3-10 อัตราการสูญเสียกับค่าความแรงสัญญาณ

3.1.4 การทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

จากการทดสอบในครั้งก่อนเราได้ทำการทดสอบโดยละเอียดอีกครั้งเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบการสื่อสาร V2X ในกรณีต่างๆ ซึ่งเราได้ทำการทดสอบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลและวัดค่า RSSI และ ระยะทางการรับ-ส่ง (Distance)

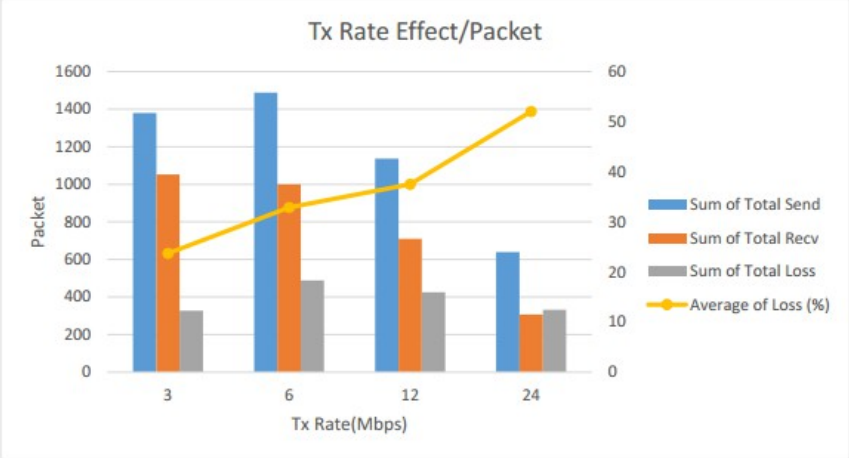
การทดสอบ Transmission Rate

ในการทดสอบนี้เราจะทำการทดลองส่งข้อมูลที่ความเร็วในการส่งข้อมูลต่างๆ กันที่ 3, 6, 12, และ 24 Mbps โดยในการทดสอบนี้ เราตั้งค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ดังตารางต่อไปนี้

Channel	153
Tx Power Level	20
Tx EDCA	2
Speed (km/h)	80
Tx Interval (ms)	20
PKT Size(byte)	250

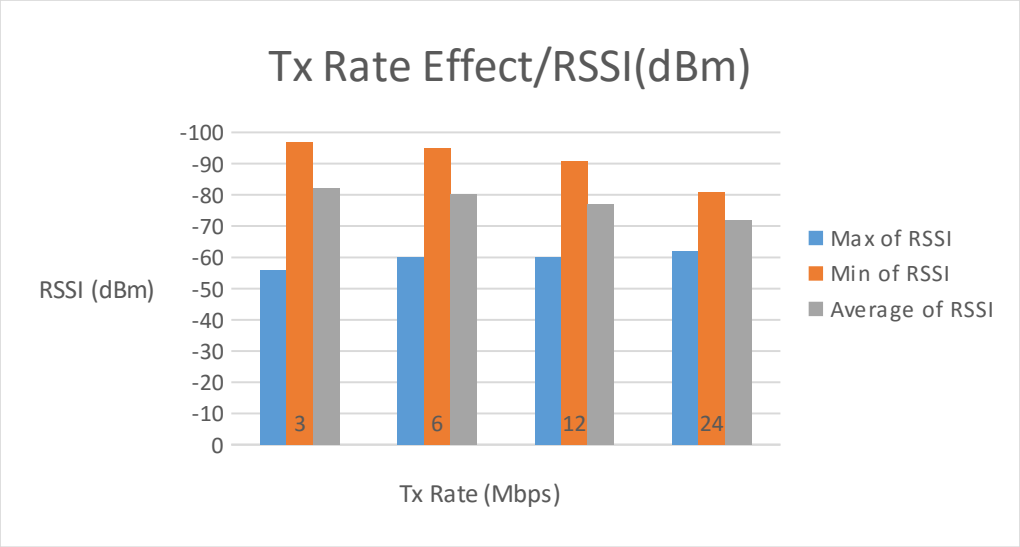
ผลการทดสอบการวัดค่าปริมาณ Packet, ค่า RSSI และ ค่า Distance แสดงในกราฟต่อไปนี้

รูปที่ 3-11 แสดงค่า Packet ที่ส่งและรับได้ เพื่อนำไปคำนวณค่า Packet ที่สูญหายแสดงในกราฟต่อไปนี้ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อส่งข้อมูลที่ความเร็วสูง ที่ 24 Mbps จะทำให้ค่าการสูญเสียข้อมูลเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 50% ซึ่งสาเหตุมาจากเครื่องรับไม่สามารถจัดการข้อมูลได้ทันทำให้เกิดข้อมูลสูญหายที่เกิดจาก Packet Drop จำนวนมาก



รูปที่ 3-11 แสดงค่า Packet ที่ส่งและรับได้ที่ Transmission Rate ต่างๆ

จากรูปที่ 3-12 แสดงค่า RSSI ที่ค่า Transmission Rate ที่ต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่า RSSI กับค่า Transmission Rate ไม่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งค่าเฉลี่ย RSSI อยู่ในช่วง -70 ถึง -80 ซึ่งเป็นค่าปกติในการทำงานขณะรับส่งข้อมูล

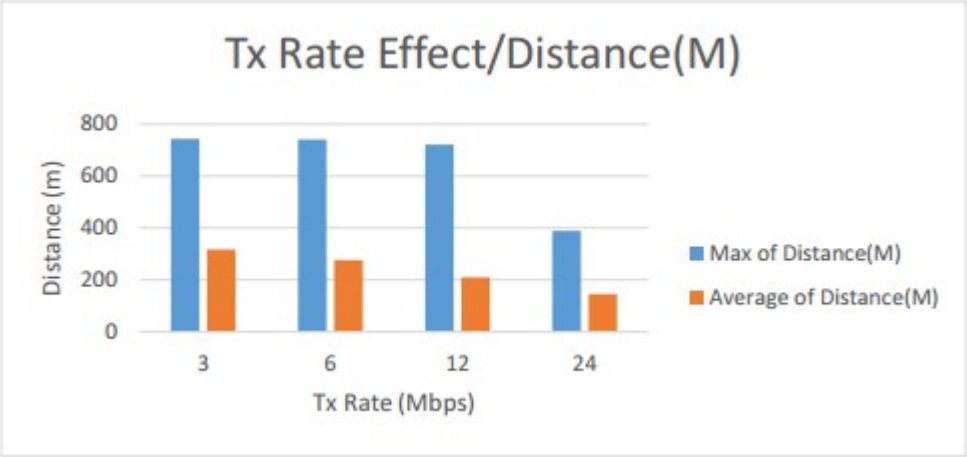


รูปที่ 3-12 แสดงค่า RSSI ที่ค่า Transmission Rate ต่างๆ

จากรูปที่ 3-13 แสดงค่าระยะทางการรับ-ส่งกับค่า Transmission Rate ที่ค่าต่างๆ ดังแสดงในกราฟต่อไปนี้ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเราส่งค่า Transmission Rate ที่มีค่าสูง จะทำให้ระยะทางในการส่งข้อมูลสั้นลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการส่งที่ความเร็วสูงอาจทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลในระหว่างการส่งและด้วยระยะทางการส่งที่ไกลจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลเพิ่มขึ้นได้ง่าย จึงทำให้ข้อมูลที่สามารถรับส่งได้ที่ระยะไกลและที่ความเร็วสูงมีจำนวนน้อยจึงสรุปได้ว่าการส่งที่ความเร็วสูงจะทำได้ในกรณีที่ส่งในระยะใกล้หรือในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่

การส่งที่ความเร็วสูง หรือค่า Transmission Rate ที่มีค่ามาก อาจทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลในการส่งได้ง่าย ซึ่งมีสาเหตุได้ 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 เกิดในระบบ Link Layer ที่อุปกรณ์รับ (Receiver) จะต้องมีหน่วยความจำ (Buffer) ที่เพียงพอในการเก็บข้อมูลชั่วคราวเพื่อรอการ Acknowledgment ในกรณีเกิดการสูญหายของ Packet ระหว่างการรับส่ง และอุปกรณ์ยังต้องมีหน่วยประมวลผลที่เร็วเพื่อลด Delay ที่เกิดจากการประมวลผลด้วย กรณีที่ 2 เป็นกรณีที่อยู่ในระดับ Physical Layer ที่เกิดจากความต้องการค่า min RSSI ที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากต้องการสัญญาณที่มีคุณภาพสูงเพื่อเพิ่มค่า SNR ที่จะทำให้

โอกาสในการส่งข้อมูลสำเร็จมากกว่าเมื่อค่า SNR มีค่าต่ำ ดังนั้นการส่งข้อมูลที่ความเร็วสูง หรือค่า Transmission Rate ที่มีค่ามากจำเป็นต้องมีหน่วยความจำ (Buffer) มากและมีการประมวลผลเร็วในระดับ Link Layer และอุปกรณ์ต้องมีค่า SNR ของ Receiver ที่สูงเพื่อให้ได้คุณภาพสัญญาณในระดับสูงในระดับ Physical Layer



รูปที่ 3-13 แสดงค่าระยะทางการรับ-ส่งที่ Transmission Rate ต่างๆ

การทดสอบค่า ECDA

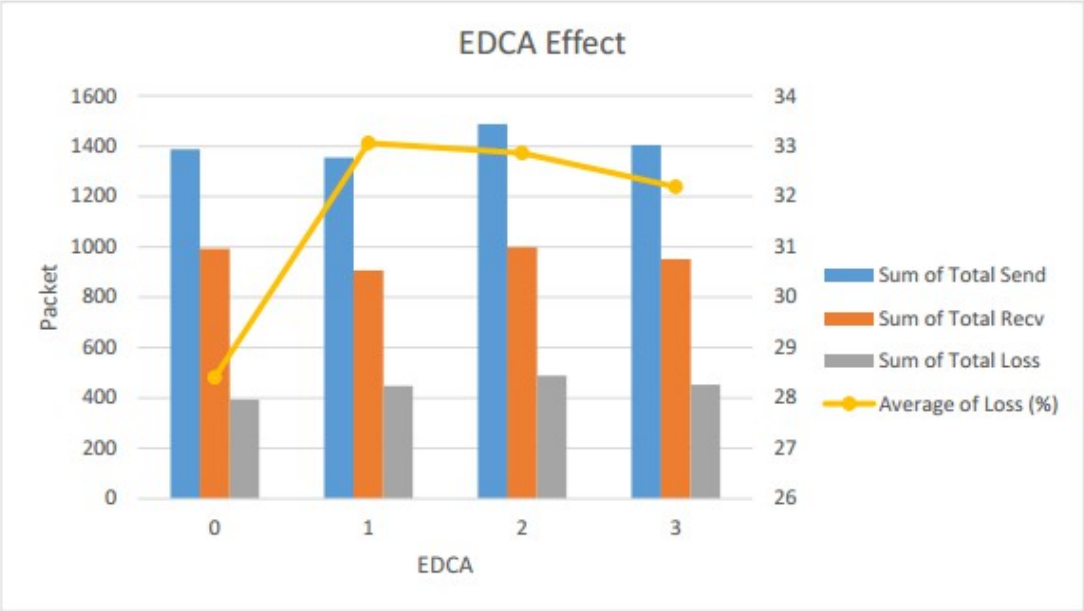
ค่า Enhanced Distributed Channel Access (ECDA) เป็นค่าที่ใช้สำหรับกำหนดลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูลโดยการปรับเปลี่ยนค่าการเข้าถึงช่องสัญญาณค่าต่างๆ ให้มีค่าต่างกันดังแสดงในตารางต่อไปนี้ เพื่อรองรับการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูล ซึ่งผู้ส่งสามารถเลือกค่า ECDA ได้ตามลำดับความสำคัญของข้อมูล

ECDA	CWmin	CWmax	AIFSN
0	15	1023	9
1	7	15	6
2	3	7	3
3	3	7	2

ในการทดลองนี้เราจะปรับค่า ECDA ที่ค่าต่างกันและวัดผลค่า Packet Loss, ค่า RSSI และ ค่า Distance เพื่อหาผลความแตกต่างของการตั้งค่า ECDA กับการนำไปใช้งาน โดยเราตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหลือดังตารางต่อไปนี้

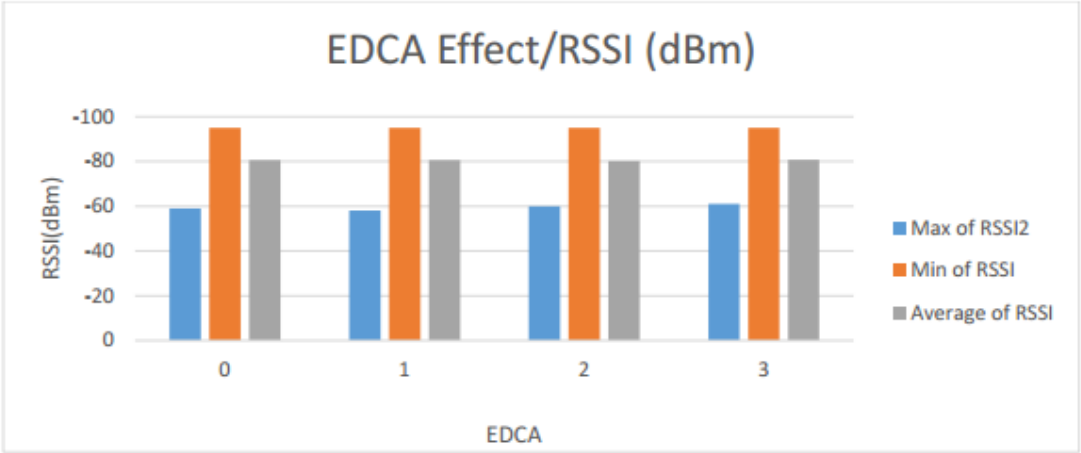
Channel	153
Tx Data Rate	6
Tx Power Level	20
Speed (km/h)	80
Tx Interval (ms)	20
PKT Size(byte)	250

รูปที่ 3-14 แสดงผลของการตั้งค่า EDCA กับค่าการสูญเสีย Packet ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อค่า EDCA มีค่าเท่ากับ 0 จะมีค่าการสูญเสียน้อยกว่าที่ประมาณ 28% ในขณะที่เมื่อตั้งค่า EDCA เท่ากับ 1, 2 และ 3 จะมีค่าการสูญเสียที่ประมาณ 32% - 33% ทั้งนี้เนื่องจากค่า EDCA = 0 เหมาะสำหรับการส่งข้อมูลที่ไม่ต้องการเร่งรีบหรือมีค่า Priority ต่ำ ซึ่งทำให้โอกาสที่ข้อมูลจะถูกส่งได้สำเร็จมีมากกว่าแต่อย่างไรก็ตามจะทำให้ข้อมูลมีค่า Delay มากกว่าเนื่องจาก Packet จะถูกตั้งค่า AIFSN = 9 แสดงว่า Packet มีโอกาสได้ส่งน้อยกว่าหรือมีโอกาสชนกัน (Collision) ได้น้อยกว่า และค่า CWmax = 1023 แสดงว่าเมื่อชนกันแล้วก็จะมีโอกาสส่งได้อีกโดยการตั้งค่า Backoff Time เพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 1023 ซึ่งจะทำให้โอกาสในการส่งสำเร็จมีค่าสูงจึงมีค่า Packet Loss ต่ำ เมื่อเทียบกับการตั้งค่า EDCA ค่าอื่นๆ ซึ่งมีค่า CWmax ระหว่าง 7 กับ 15 ซึ่งจะทำให้โอกาสที่จะส่งสำเร็จมีน้อยกว่า และค่า AIFSN ระหว่าง 2-6 ก็ทำให้มีโอกาสเข้าถึงได้ช่องสัญญาณได้มากกว่าแต่มีโอกาสชนกันได้มากกว่า อย่างไรก็ตามแม้ว่าในการทดสอบนี้จะมีเครื่องส่งและเครื่องรับเพียงอย่างละเครื่อง ซึ่งในทางทฤษฎีจะไม่มีการชนกันของการส่งสัญญาณแต่ในการทดลองอาจเกิดการสูญเสียข้อมูลเนื่องจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ ซึ่งเมื่อเกิดการสูญเสียข้อมูล เครื่องส่งจะทำการส่งข้อมูลใหม่ ดังนั้นค่า CWmax จึงมีผลมากต่อการทดสอบในครั้งนี้ เพราะเมื่อค่า CWmax มีค่าต่ำ จะทำให้จำนวนการส่งซ้ำมีจำนวนน้อยลงเนื่องจากค่า Backoff Time มีค่ามากกว่าค่า CWmax จึงทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลมากกว่า



รูปที่ 3-14 แสดงค่าการสูญเสีย Packet ที่ EDCA ต่างๆ

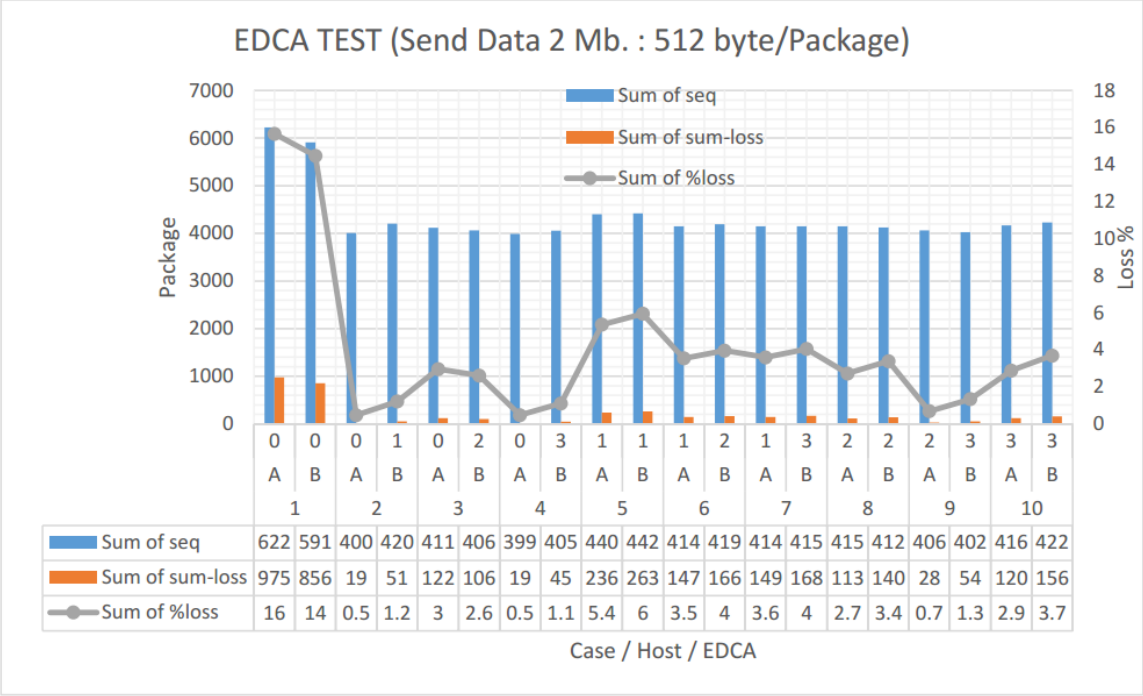
รูปที่ 3-15 เป็นการทดสอบผลกระทบของการตั้งค่า EDCA กับค่าความแรงของสัญญาณ จากกราฟพบว่าค่า EDCA ไม่มีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI)



รูปที่ 3-15 แสดงค่า RSSI ที่ EDCA ต่างๆ

การทดสอบการตั้งค่า EDCA กับค่า RSSI เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าผลของระดับความแรงสัญญาณ (RSSI) ไม่มีผลต่อค่า EDCA ซึ่งค่า EDCA เป็นการกำหนด Priority สำหรับการเข้าถึงช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน โดยสถานีที่ค่า EDCA มีค่ามากหมายถึงโอกาสที่สถานีจะสามารถส่งข้อมูลได้เร็ว

กว่าสถานีที่ตั้งค่า EDCA ซึ่งเป็นการทำงานของโปรโตคอลในระดับ Link Layer แต่ความแรงของสัญญาณเป็นค่าที่วัดได้ในระดับ Physical Layer ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าฮาร์ดแวร์นี้สามารถทำงานได้ตามมาตรฐานที่ไม่ได้นำเอาค่า RSSI มาใช้ในการกำหนด Priority ของช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตามจากการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับสถานี A และ B ที่มีค่า EDCA ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3-16



Case	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
Host	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Sum of seq	622	591	400	420	411	406	399	405	440	442	414	419	414	415	415	412	406	402	416	422
Sum of sum-loss	975	856	19	51	122	106	19	45	236	263	147	166	149	168	113	140	28	54	120	156
Sum of %loss	16	14	0.5	1.2	3	2.6	0.5	1.1	5.4	6	3.5	4	3.6	4	2.7	3.4	0.7	1.3	2.9	3.7

รูปที่ 3-16 การทดสอบการส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานที่ค่า EDCA แตกต่างกัน

จากกราฟในรูปที่ 3-16 จะเห็นได้ว่าค่า EDCA ไม่ค่อยมีผลต่อการสูญเสีย Packet ในขณะรับส่งมากนัก โดยสถานีที่มีค่า EDCA มาก หมายถึง สถานีจะพยายามส่ง Packet ให้เร็วที่สุดโดยการเข้าถึงช่องสัญญาณให้เร็ว (AIFSN มีค่าน้อย) และจะ Backoff ด้วยค่าที่น้อยกว่า (Cmax มีค่าน้อย) เพื่อให้สามารถส่งได้ก่อนหรือสามารถส่งซ้ำ (Re-transmission) ได้เร็วในกรณีที่เกิด Collision แต่ถ้าไม่สามารถส่งได้ในเฟรมหรือภายในจำนวนครั้งของการส่งซ้ำ Packet ก็จะถูก Drop ทำให้เกิดการสูญเสีย Packet ได้ง่ายกว่ากรณีที่ค่า EDCA มีค่าต่ำ ซึ่งค่า EDCA สูงจะเหมาะสำหรับการส่งข้อมูลเสียงหรือภาพวีดีโอเนื่องจากข้อมูลเสียงหรือภาพวีดีโอต้องการการส่งที่มี Delay และ Jitter น้อยเพื่อให้คุณภาพของข้อมูลอยู่ในระดับสูงและการสูญหายของข้อมูลบางส่วนไม่มีผลต่อการรับส่งข้อมูลเพราะเป็นข้อมูลประเภทเสียงและภาพ

วีดีโอที่มีการ Encoding และ Compression เพื่อแก้ปัญหาข้อมูลสูญหายอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า สถานี B ที่มีค่า EDCA สูงกว่าสถานี A จะมีค่าเฉลี่ยของ Packet Loss สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกัน

การทดสอบค่าช่องสัญญาณ (Channel)

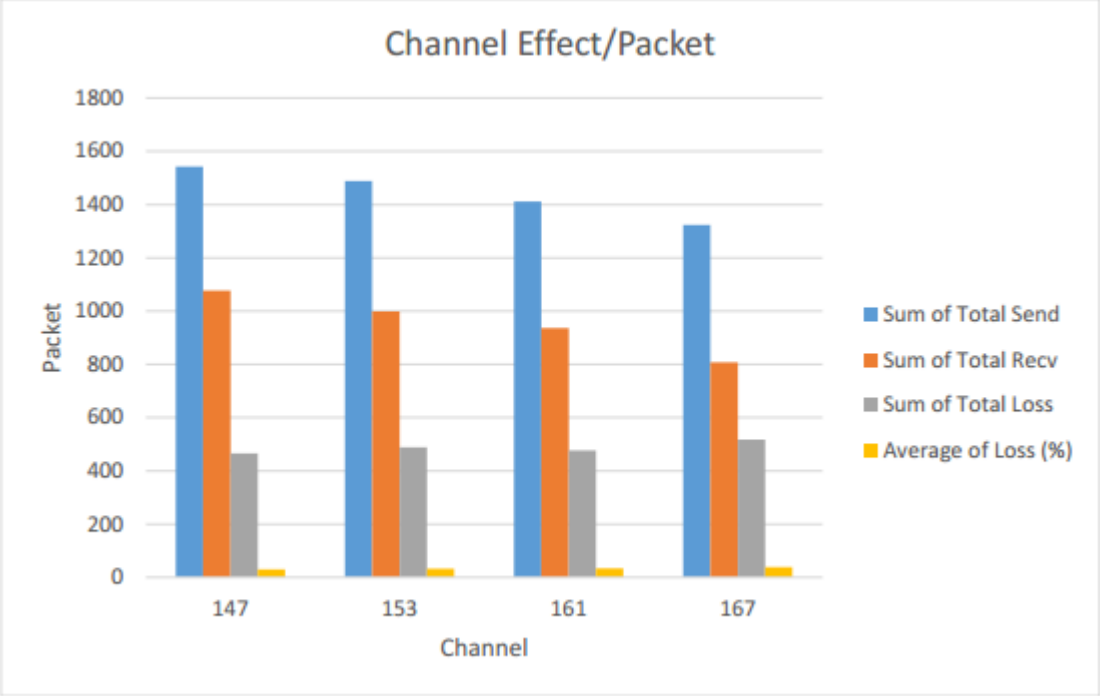
ลำดับช่องสัญญาณตามมาตรฐาน IEEE 802.11p มีความสำคัญสำหรับการรับส่งข้อมูลตารางต่อไปนี้แสดงตารางช่องสัญญาณตามมาตรฐาน FCC U-NII-3

Channel	Center Frequency (MHz)	Frequency Range (MHz)	Bandwidth (MHz)	FCC U-NII Band(s)
153	5765	5755-5775	20	U-NII-3
161	5805	5795-5815	20	U-NII-3

ซึ่งในการทดสอบนี้เราตั้งค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ดังต่อไปนี้

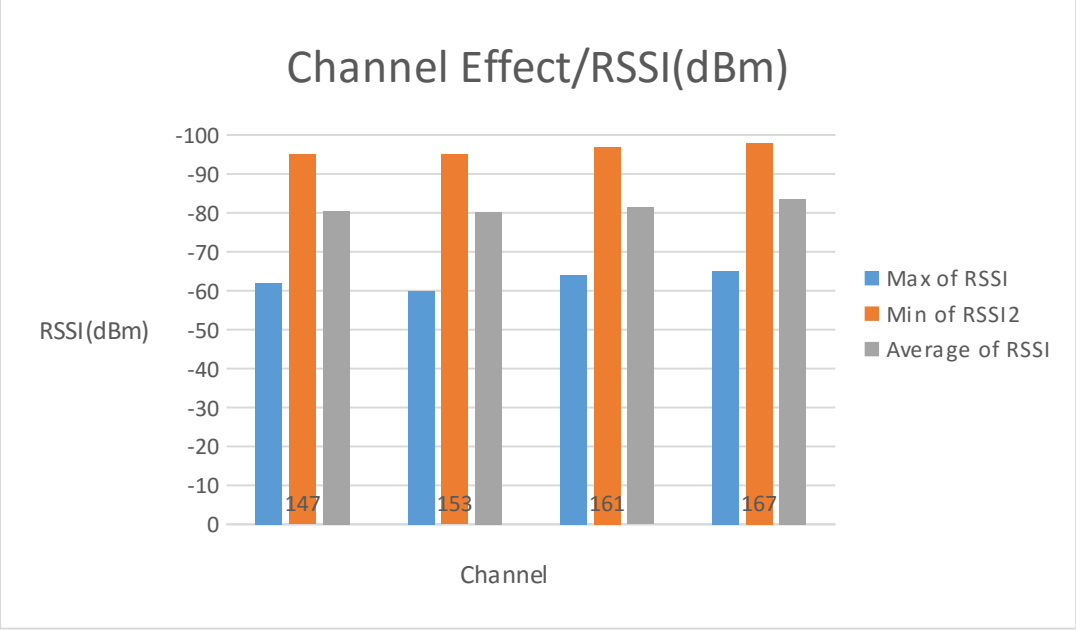
Tx Data Rate	6
Tx Power Level	20
Tx EDCA	2
Speed (km/h)	80
Tx Interval (ms)	20
PKT Size(byte)	250

รูปที่ 3-17 แสดงผลการทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลที่ช่องสัญญาณต่างๆ ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าการใช้ช่องสัญญาณต่างๆ ไม่มีผลต่อการสูญเสีย Packet Loss



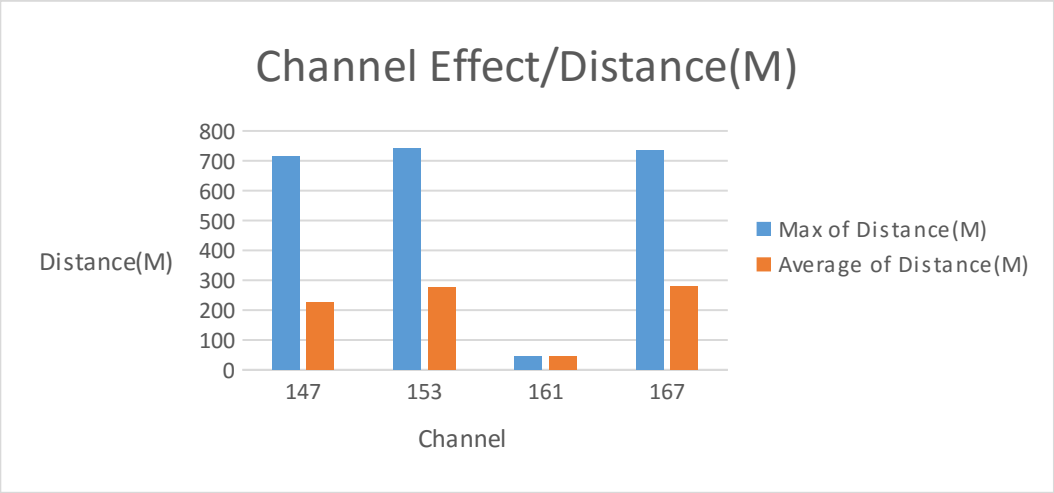
รูปที่ 3-17 แสดงค่าการสูญเสีย Packet ที่ Channel ต่างๆ

รูปที่ 3-18 แสดงผลการวัดค่า RSSI และช่องสัญญาณ ซึ่งพบว่าช่องสัญญาณที่ใช้ไม่มีผลต่อค่า RSSI



รูปที่ 3-18 แสดงค่า RSSI ที่ Channel ต่างๆ

รูปที่ 3-19 แสดงผลการวัดค่าระยะทางการรับ-ส่งกับช่องสัญญาณที่ใช้ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ช่องสัญญาณ 161 จะไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากสามารถส่งสัญญาณได้เฉพาะในระยะใกล้เท่านั้น ซึ่งทีมวิจัยจะหารือกับผู้ผลิตอุปกรณ์เพื่อหาสาเหตุที่ช่องสัญญาณ 161 ไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป



รูปที่ 3-19 แสดงค่าระยะทางการรับส่งที่ Channel ต่างๆ

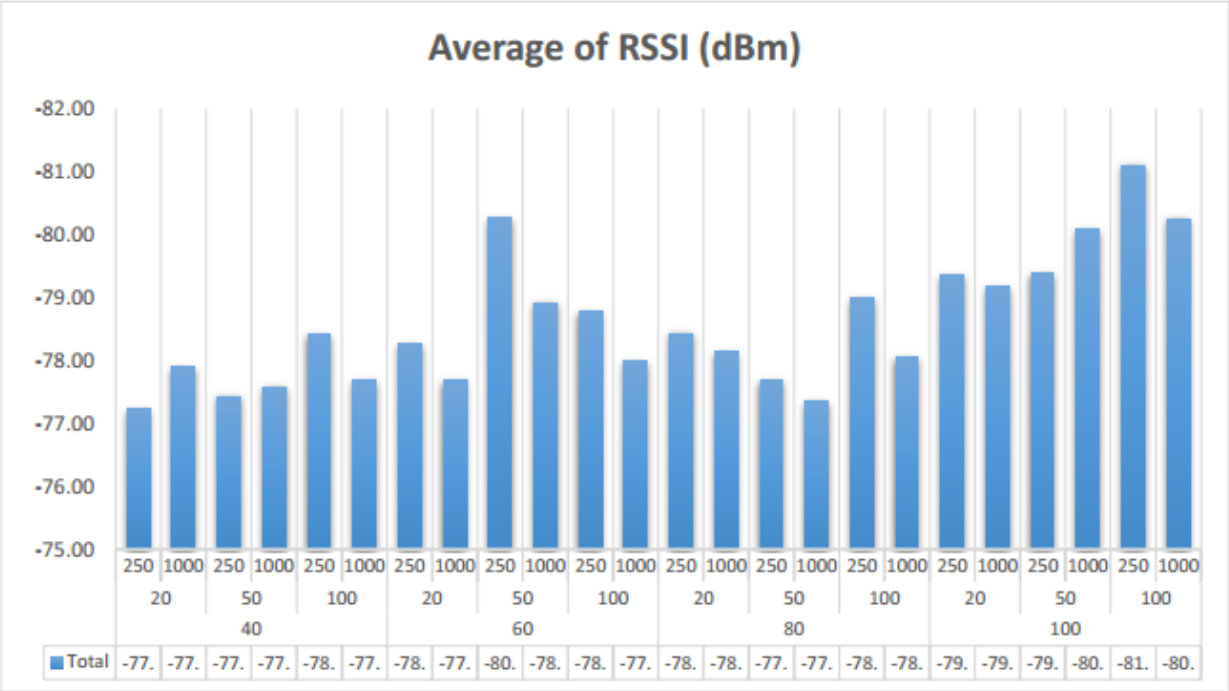
การทดสอบ Channel เป็นการทดสอบในพื้นที่เปิด ซึ่งอาจมีคลื่นอื่นๆ ในย่าน 5.8 GHz มากวนได้ แต่จากการทดสอบการรบกวนของคลื่นมีไม่มากเนื่องจากเครือข่าย Wi-Fi ในบริเวณดังกล่าวส่วนมากใช้ความถี่ย่าน 2.4 GHz มากกว่าย่าน 5.8 GHz อย่างไรก็ตาม การทดสอบช่องสัญญาณต่าง ๆ นั้นเป็นการทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11p ซึ่งมีการกำหนด Priority ของช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน บางช่องจะใช้สำหรับการสื่อสารเพื่อสาธารณะ (Safety Channel) สำหรับกรณีฉุกเฉิน เช่น Emergency Rescue ที่จะกำหนดให้เฉพาะรถยนต์ของเจ้าหน้าที่มีสิทธิใช้เท่านั้น [5] เนื่องจากช่องสัญญาณที่เป็น Safety Channel จะมีความแรงของ Subcarrier ใน OFDM ที่สูงกว่าช่องสัญญาณอื่นๆ

3.1.5 การเปรียบเทียบค่า RSSI กับค่า Packet Loss

จากการทดสอบครั้งก่อนเราได้ทำการศึกษาและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อผลการทดสอบจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าช่วงเวลาการส่ง (Transmission Interval) ค่าขนาดข้อมูล (Packet Size) โดยทำการทดสอบด้วยการวิ่งรถที่ความเร็วต่างๆ กันคือที่ความเร็ว 40, 60, 80 และ 100 km/hr ซึ่งเราได้แสดงผลการวัดค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ (Average RSSI) และ ค่าเฉลี่ยการสูญเสีย (Average Loss) ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

Speed (km/h)	Tx Interval (ms)	PKT Size (byte)	Average RSSI	Average Loss (%)
40	20	250	-77.23	14.1238
		1000	-77.90	29.9878
	50	250	-77.43	15.9363
		1000	-77.58	22.8659
	100	250	-78.41	16.5660
		1000	-77.68	32.1413
60	20	250	-78.27	20.2777
		1000	-77.69	29.4322
	50	250	-80.27	26.6075
		1000	-78.91	21.6704
	100	250	-78.78	18.2870
		1000	-77.99	28.6751
80	20	250	-78.43	28.7753
		1000	-78.13	27.4573
	50	250	-77.69	20.3488
		1000	-77.35	27.7897
	100	250	-78.98	23.3306
		1000	-78.06	27.6947
100	20	250	-79.36	25.0381
		1000	-79.16	38.2575
	50	250	-79.39	24.2534
		1000	-80.08	38.0246
	100	250	-81.09	32.3089
		1000	-80.25	34.4224924

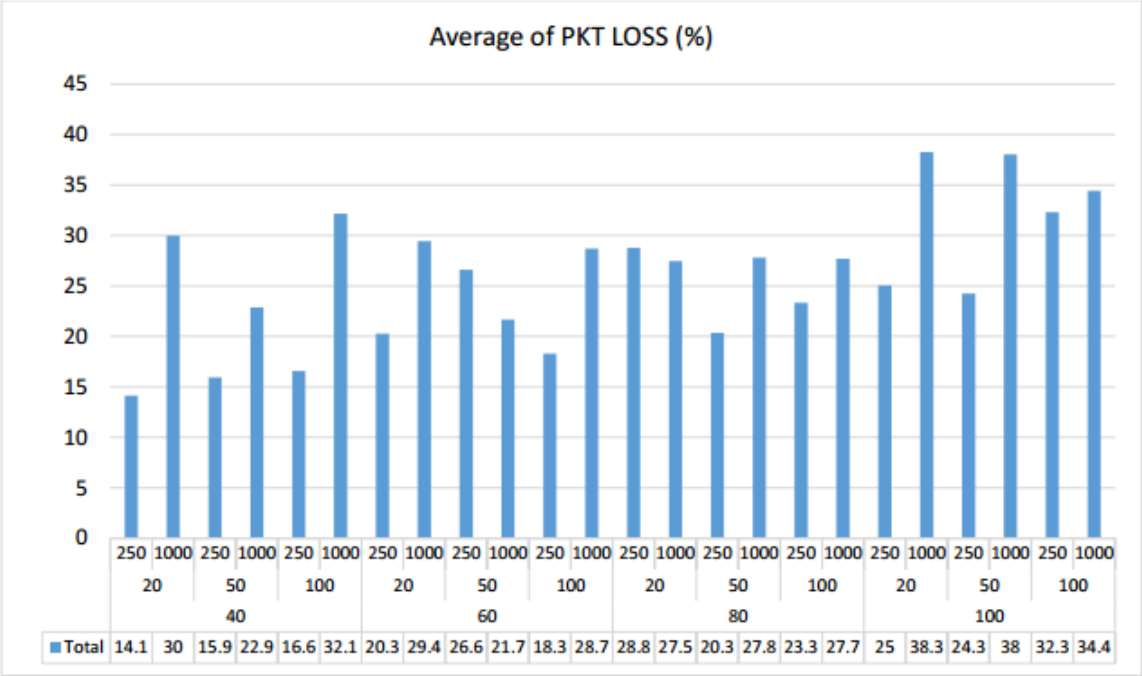
รูปที่ 3-20 แสดงผลการวัดค่า RSSI จากการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วสูงค่า RSSI จะมีค่าลดลง (ติดลบมากขึ้น) เนื่องมาจากผลของ Doppler Effect ค่าของขนาดข้อมูล (Packet Size) และค่า Transmission Interval Time ไม่มีผลต่อค่า RSSI ของการรับ-ส่งข้อมูล



รูปที่ 3-20 แสดงค่า RSSI ที่ความเร็วรถต่างๆ

รูปที่ 3-21 แสดงค่าเฉลี่ยการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss) เมื่อเปรียบเทียบการตั้งค่าขนาดข้อมูล (Packet Size) ที่ 250 byte และที่ 1000 byte จะเห็นได้ว่าที่ค่า Packet Size = 250 byte จะมีผลทำให้ค่า Packet Loss มีค่าต่ำว่าที่ค่า Packet Size = 1000 byte

การทดสอบที่ความเร็วสูงมีผลทำให้ค่า Packet Loss เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากสาเหตุการสูญเสียจากค่า RSSI ที่มีค่าต่ำจึงทำให้การสูญเสียข้อมูลเกิดขึ้นได้ง่าย ส่วนการทดสอบค่า Transmission Interval Time พบว่าไม่มีผลต่อค่า Packet Loss มากนัก



รูปที่ 3-21 แสดงค่า Packet Loss ที่ packet size 250byte และ 1000bytes ที่ความเร็วต่างๆ

ค่า RSSI ที่แสดงเป็นค่า RSSI ที่เก็บค่าที่เครื่องรับโดยเครื่องรับเป็นเครื่องที่ติดตั้งในรถยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ กัน จึงทำให้ผลของ Dropper Effect ที่เกิดจากการเคลื่อนที่มีผลต่อการรับสัญญาณของเครื่องรับที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยเฉพาะที่ความเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะสามารถสังเกตให้เห็นว่าระดับสัญญาณ RSSI มีค่าต่ำลงโดยเฉลี่ย และเมื่อความแรงของสัญญาณมีค่าลดลงก็จะมีผลทำให้โอกาสในการรับข้อมูลไม่ได้หรือข้อมูลเสียหายระหว่างส่งเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย

3.2 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP-Based

3.2.1 รูปแบบการทดสอบ

กลุ่มนี้ได้ทำการทดสอบในบริเวณพื้นที่ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ซึ่งเป็นพื้นที่ใกล้เคียงสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดยพื้นที่ทดสอบมีลักษณะของการจราจรคล้ายกับในเขตเมืองที่มี รถยนต์ หรือยานพาหนะอื่น ๆ สัญจรไปมาอย่างพลุกพล่าน รวมทั้งต้นไม้ ตึก อาคารเรียนต่าง ๆ ซึ่งจะมีสภาพแวดล้อมเช่นเดียวกันในเขตเมือง ที่อาจจะสามารถเป็นอุปสรรคต่อระบบสัญญาณได้

การทดสอบครั้งนี้ เป็นการทดสอบรถการขับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 3 คันวิ่งตามกันในภายในบริเวณทดสอบ ซึ่งใช้ความเร็ว 20-30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีระยะห่างต่อคันรถแตกต่างกันออกไปในแต่ละการทดสอบ ซึ่งทางคณะวิจัยได้ทำการทดสอบในขั้นต้น เป็นการทดสอบการสื่อสาร จากรถคันแรกไปยังคันที่สอง และสามที่วิ่งตามกันมา โดยมีการใช้เครื่องมือในการทดสอบ 2 ชนิดคือ 1. ICMP (ping) test เพื่อตรวจสอบว่าเกิดขึ้นเครือข่ายขึ้นหรือไม่ รวมถึงข้อมูล Round Trip Delay ของแต่ละ packet และเครื่องมือชนิดที่ 2. คือ Iperf เพื่อวัดความเร็ว Throughput ของระบบการสื่อสาร ผ่านโปรโตคอล TCP/IP ระหว่างยานพาหนะคันแรกและคันสุดท้าย โดยได้มีการบันทึกตำแหน่ง GPS ของรถแต่ละคันระหว่างการทดสอบเพื่อดูระยะห่างที่เกิดขึ้นจริงในการทดสอบ

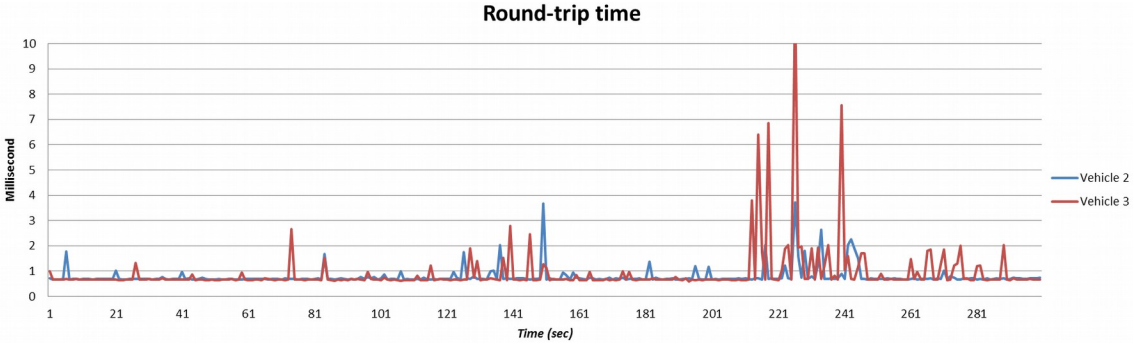
รูปภาพที่แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ TP-Link Archer C7 5.8 GHz ที่ได้มีการปรับปรุงแก้ไข Firmware เพื่อใช้ในการทำงานสื่อสารแบบ Vehicular Ad hoc Network โดยใช้ Internet protocol กับรถยนต์นั่ง 3 คัน เพื่อทำการทดสอบในเขตเมือง

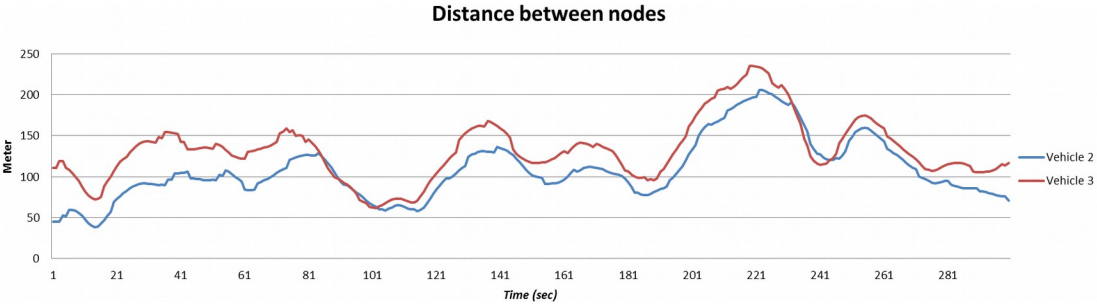
รูปภาพที่แสดงเส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ ในบริเวณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต โดยรถทั้งสามคันจะวิ่งตามกัน แต่มีระยะห่างระหว่างคันรถ ที่แตกต่างกันไปในการทดสอบ

3.2.2 ผลการทดสอบ ICMP

ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบ ICMP (ping) test เพื่อดู Round-trip time เป็นการดู delay ของการส่ง ICMP packet ในหน่วย millisecond (ms) จากรถคันที่ 1 ไปยัง รถคันที่ 2 และ 3 จำนวน 5 รอบ โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

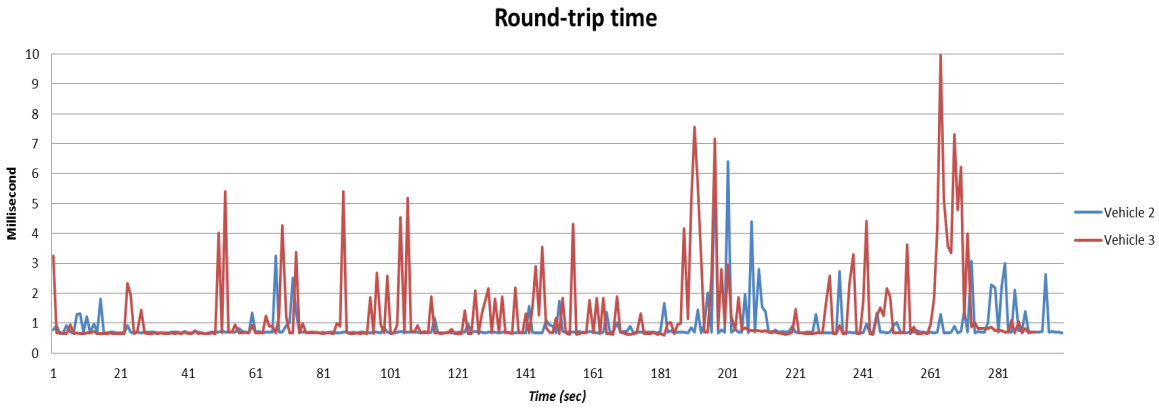
การทดสอบ #1

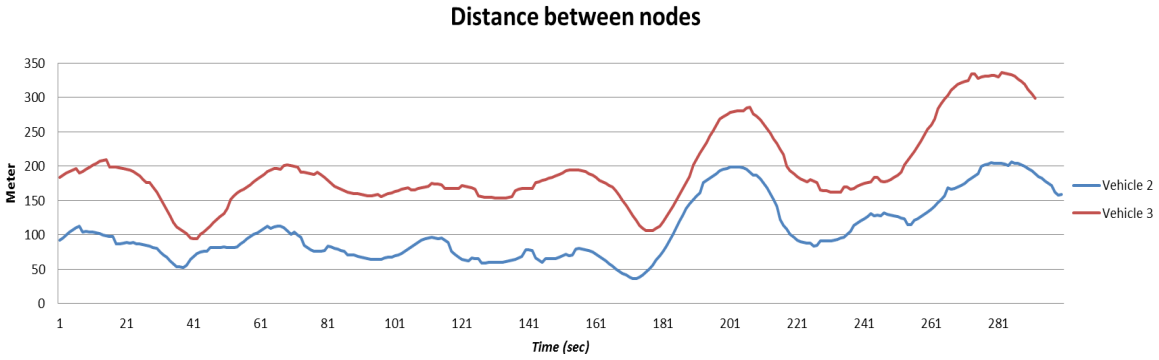




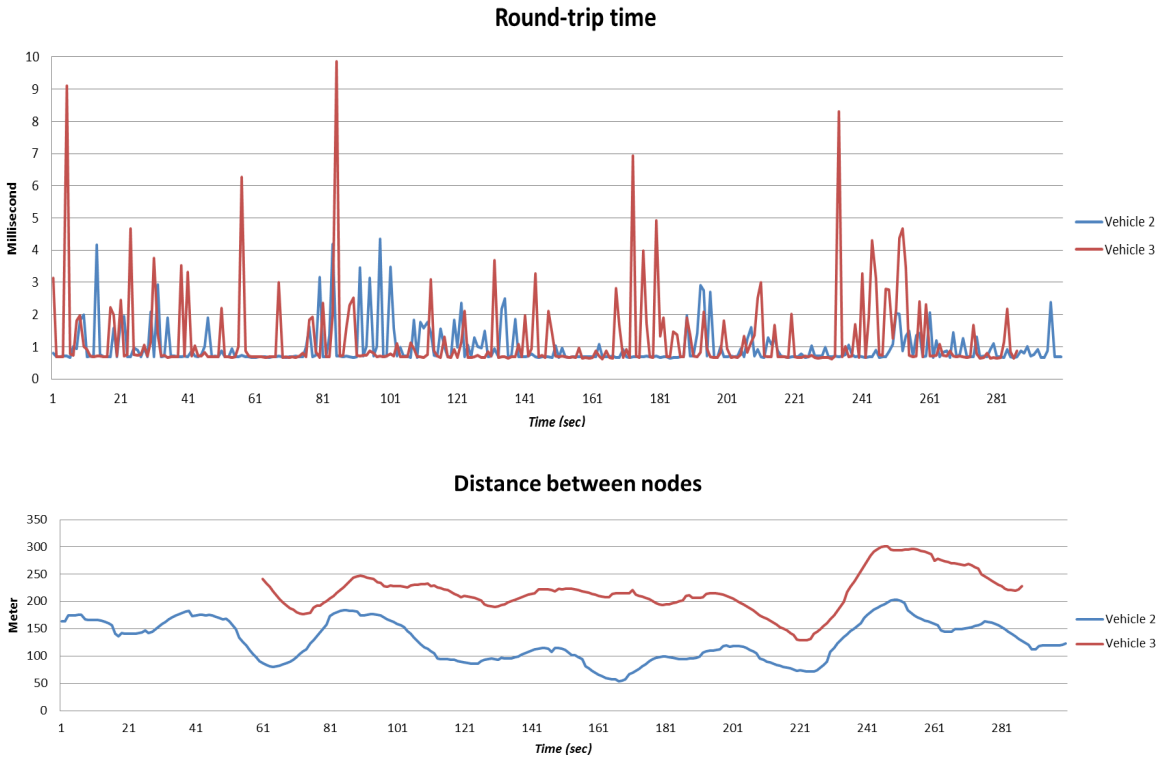
การทดสอบครั้งที่ 1: รถยนต์ 3 คัน ขับตามกันภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ตามเส้นทางการทดสอบ โดยใช้ความเร็วเฉลี่ย 20-30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะห่างระหว่างแต่ละคันรถประมาณ 50 – 100 เมตร ซึ่งได้ค่า Average RTT ไปยัง vehicle 2 = 0.785 และ vehicle 3 = 0.908 ms โดยมี Loss rate = 0% ทั้งสองคัน

การทดสอบ #2





การทดสอบ #3

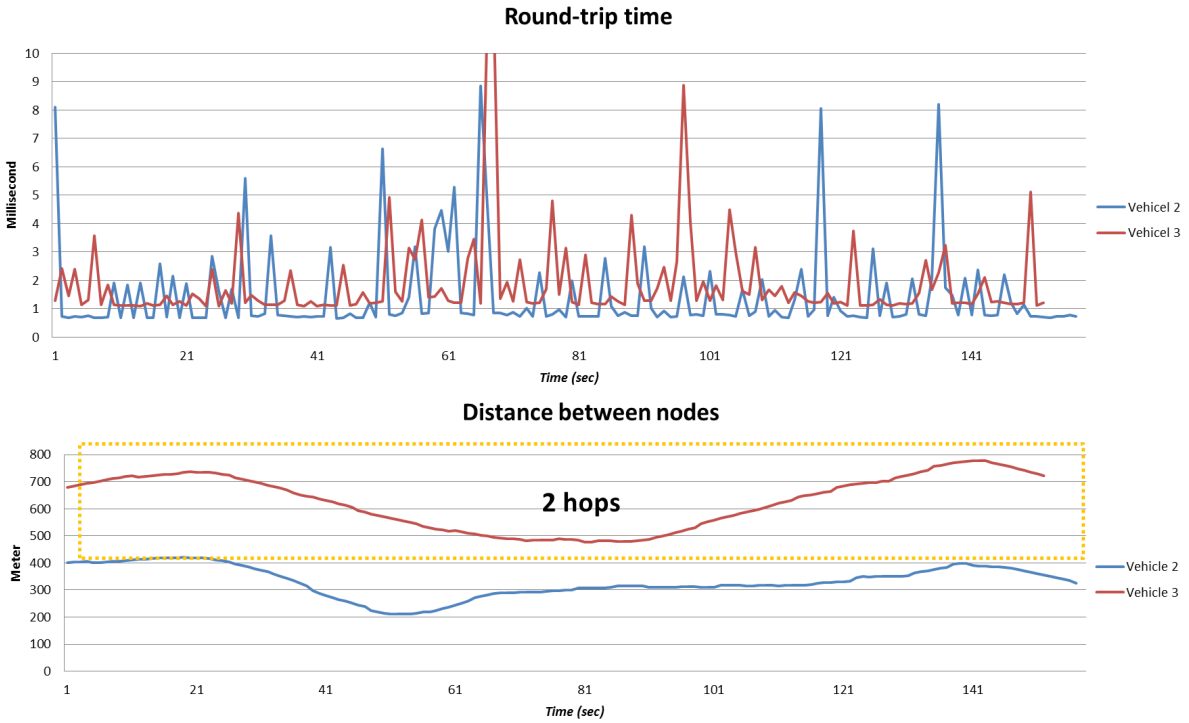


การทดสอบครั้งที่ 2 และ 3: รถยนต์ 3 คัน ขับตามกัน โดยใช้ความเร็วเฉลี่ย 20-30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะห่างระหว่างแต่ละคันประมาณ 100 – 150 เมตร ซึ่งการทดสอบครั้งที่ 2 และ 3 ได้ผลการทดสอบดังนี้

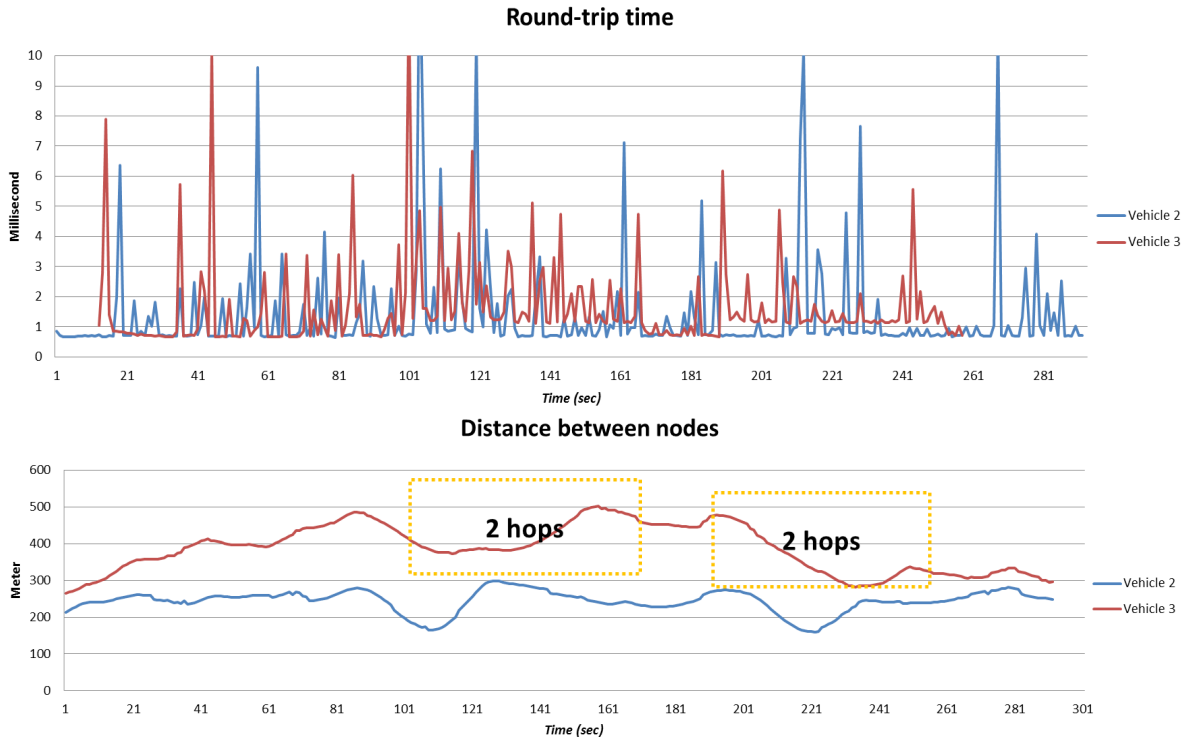
Average RTT (ms)			Loss rate (%)	
Test #	Vehicle 2	Vehicle 3	Vehicle 2	Vehicle 3
2	0.888	1.284	0	2
3	0.971	1.235	0	4

จากการทดสอบ ในรอบที่ 1 – 3 การสื่อสารระหว่างรถคันที่ 1 ไปยังคันที่ 2 และ 3 ยังเป็นการสื่อสาร ในระยะ 1 hop เพราะเนื่องจากระยะการรับส่งข้อมูล ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมีระยะการสื่อสารค่อนข้างไกล

การทดสอบ #4



การทดสอบ #5



การทดสอบครั้งที่ 4 และ 5: รถยนต์ 3 คัน ขับตามกัน โดยใช้ความเร็วเฉลี่ย 20-30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะห่างระหว่างแต่ละคันประมาณ 200 – 400 เมตร ได้ผลการทดสอบดังนี้

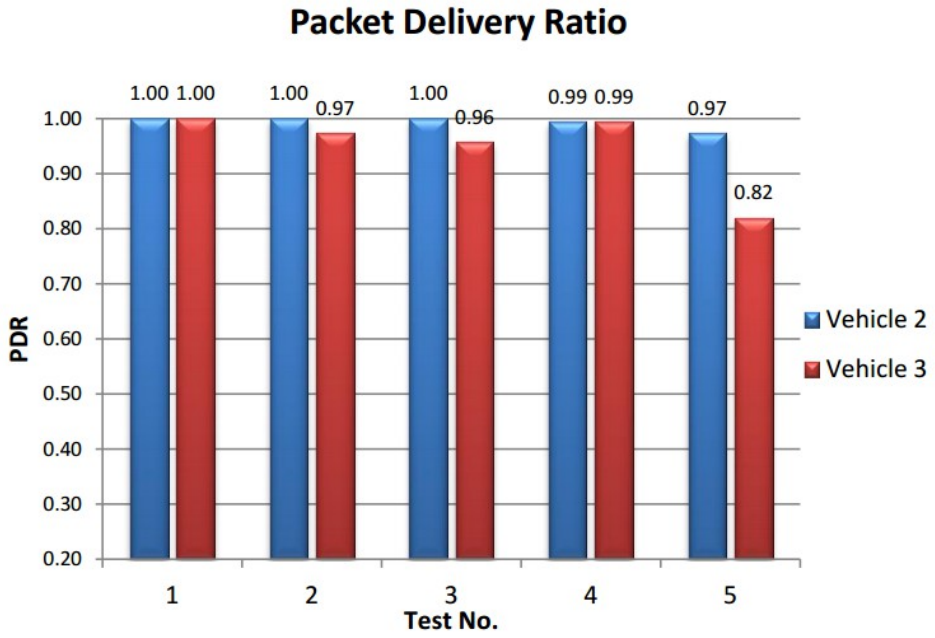
	Average RTT (ms)		Loss rate (%)	
Test #	Vehicle 2	Vehicle 3	Vehicle 2	Vehicle 3
4	1.445	1.887	1	1
5	1.375	1.602	2	18

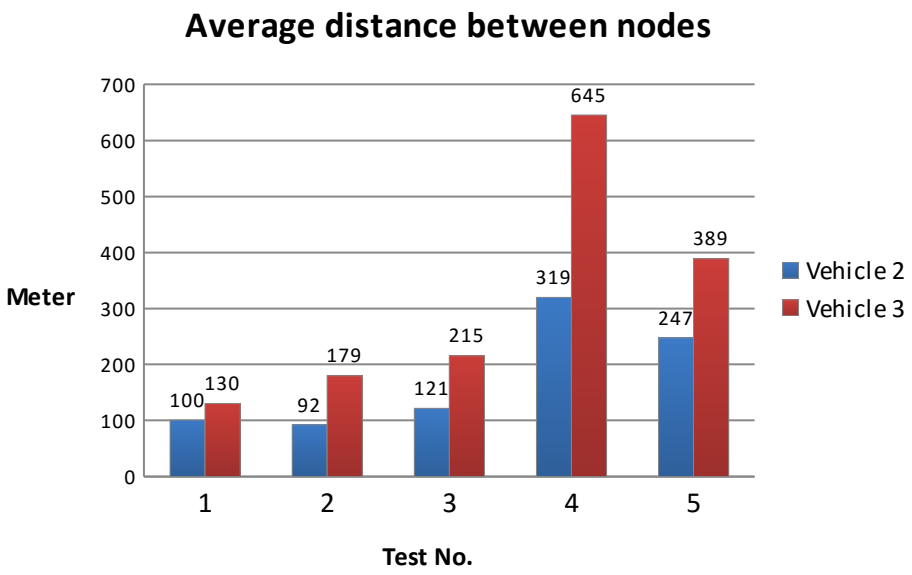
จากการทดสอบ ในรอบที่ 4 - 5 การสื่อสารระหว่างรถคันที่ 1 ไปยังคันที่ 2 เป็นการสื่อสารในระยะ 1 hop ส่วนการทดสอบรอบที่ 4 การสื่อสารระหว่างคันที่ 1 ถึงคันที่ 3 เป็น 2 hops ตลอดการทดสอบ รวมไปถึงบางช่วงของการทดสอบที่ 5 ที่มีการสื่อสาร 2 hops เนื่องจากระยะห่างระหว่างคันที่ 1 และ 3 ไกลกัน จึงต้องผ่านรถคันที่ 2 ซึ่งเป็นโหนดที่ทำการ forward packet ไปยังคันที่ 3 ที่ยังอยู่ในระยะทำการสื่อสารกันได้

สรุปผลการทดสอบ ICMP (ping) Test

โดยการวัดประสิทธิภาพจาก

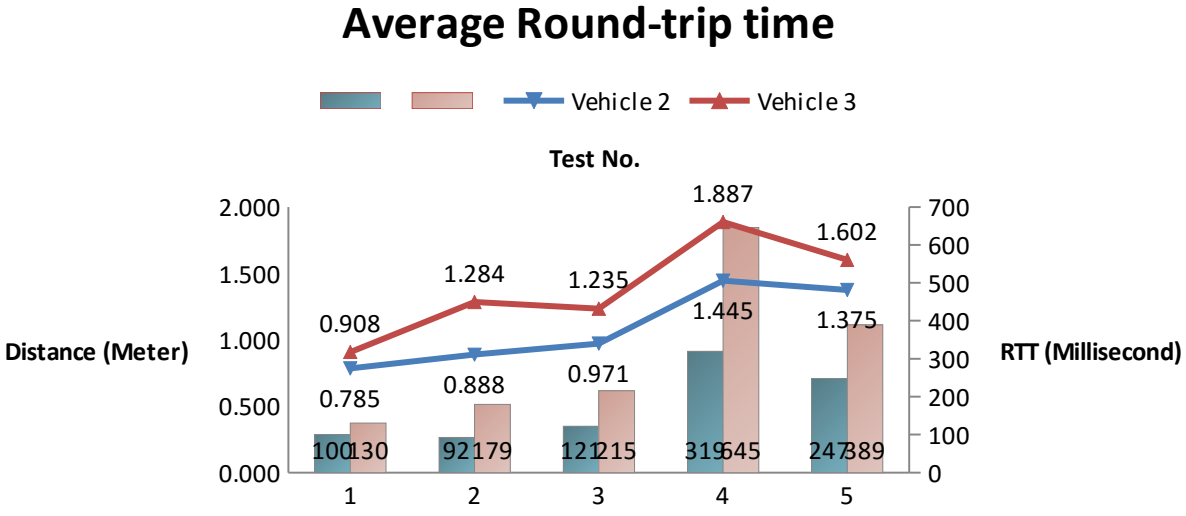
1. อัตราส่วนการส่งขอมูลสำเร็จ (Packet Delivery Ratio) คืออัตราส่วนของ packet ข้อมูลที่ถูกส่งไปยังปลายทางได้สำเร็จ กับจำนวน packet ข้อมูลที่ถูกส่งออกไป ซึ่งค่า PDR จะวัดได้อยู่ในช่วง [0,1] โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 จะแสดงถึงอัตราความสำเร็จสูงสุดในการส่งข้อมูล





จากกราฟแสดงผล Packet Delivery Ratio จะสังเกตได้ว่าค่า PDR จะมีอัตราส่วนสูง หากระยะของรถยนต์แต่ละคัน อยู่ในระยะการสื่อสารประมาณ 300 เมตร ในสภาพเขตเมือง และจะมีอัตราส่วนลดลงมา หากระยะรถยนต์แต่ละคันห่างกันมากขึ้น

2. ค่าเฉลี่ยความล่าช้าในการส่งรับข้อมูล (Average Round-trip time) เป็นค่าเฉลี่ยของเวลาในการรับส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง

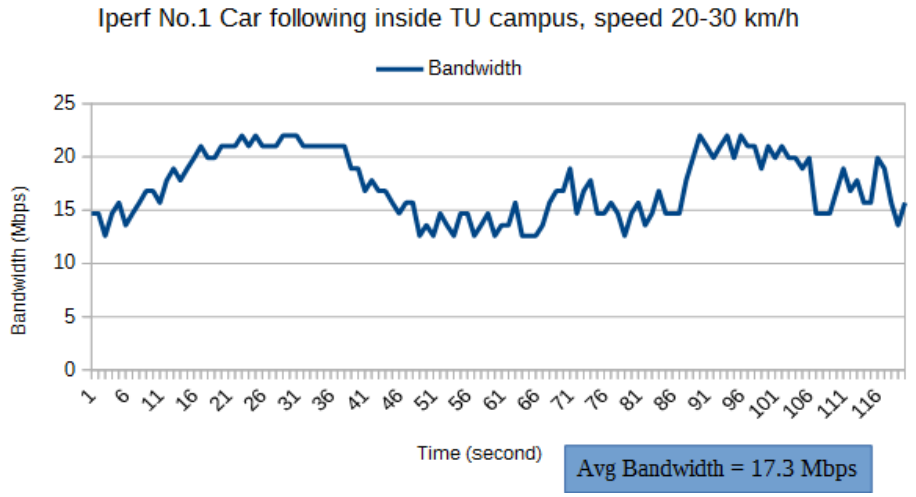


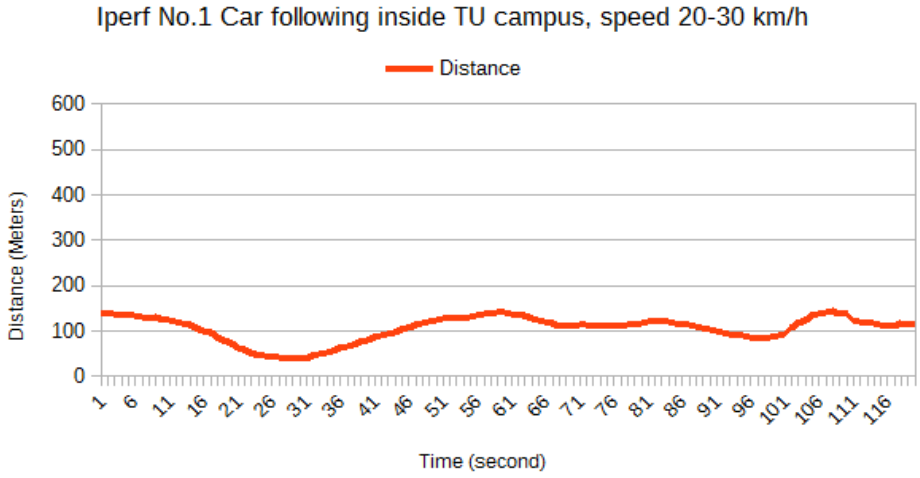
รูปกราฟแสดงผล Average Round-trip time แสดงค่าเฉลี่ยความล่าช้าที่เกิดขึ้นระหว่างการรับส่งข้อมูลจากรถยนต์คันที่ 1 ไปยังรถยนต์คันที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าค่า Average RTT แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง delay กับระยะห่างของรถแต่ละคัน ซึ่ง RTT จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อระยะห่างของรถแต่ละคันมากขึ้น

3.2.3 การทดสอบความเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput)

ทำการทดสอบโดยใช้ Iperf เป็นเครื่องมือในการวัดความเร็วของการสื่อสารระหว่างรถคันแรก (คันที่ 1) และรถคันสุดท้าย (คันที่ 3) โดยยังคงมีรถคันที่ 2 ขับอยู่ตรงกลางระหว่างกันแรกและคันสุดท้าย ซึ่งการขับรถเหมือนกันการทดสอบที่ผ่านมา โดยใช้ความเร็วที่ 20-30 กิโลเมตรต่อชั่งโมง ภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต โดยมีระยะห่างของรถแต่ละคันแตกต่างกันออกไปตามแผนการทดลอง ทางทีมงานวิจัยได้ทำการทดสอบ Iperf 4 ครั้ง แสดงผลความเร็วในหน่วยของ Megabits per second (Mbps) ตามผลการทดสอบดังต่อไปนี้

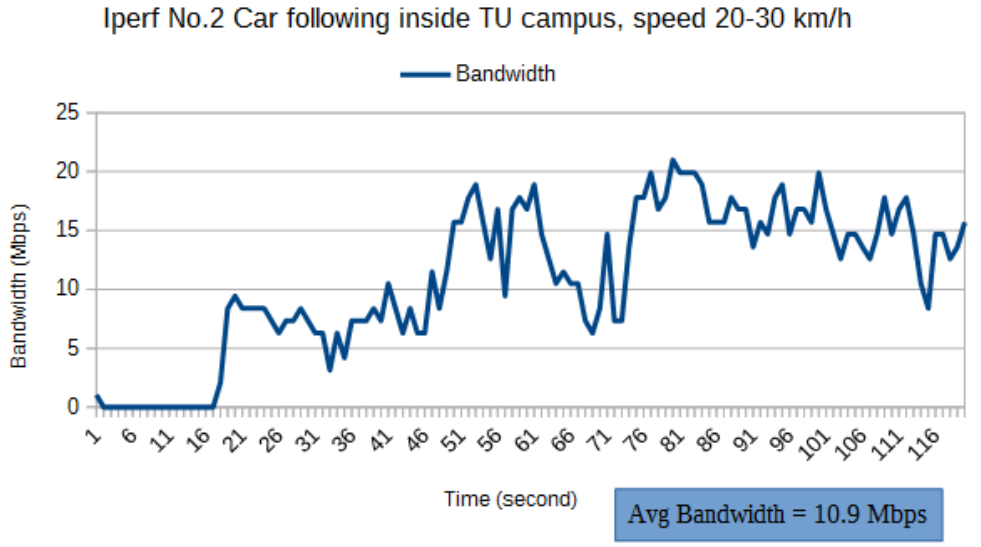
การทดสอบ Iperf#1

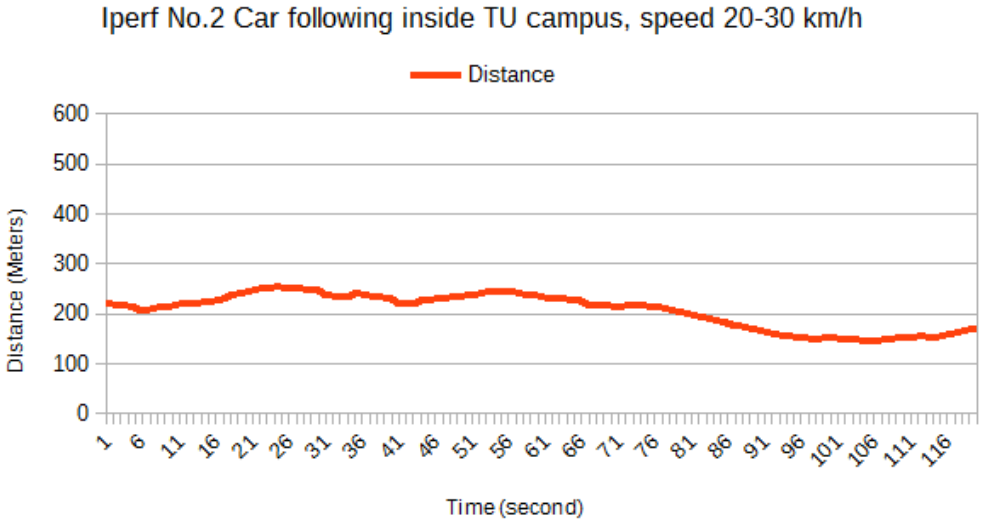




รูป Iperf No.1 แสดงผลการทดสอบการสื่อสาร TCP/IP ผ่าน Iperf โดยการขับรถระยะห่างประมาณ 40-60 เมตร ระหว่างคัน

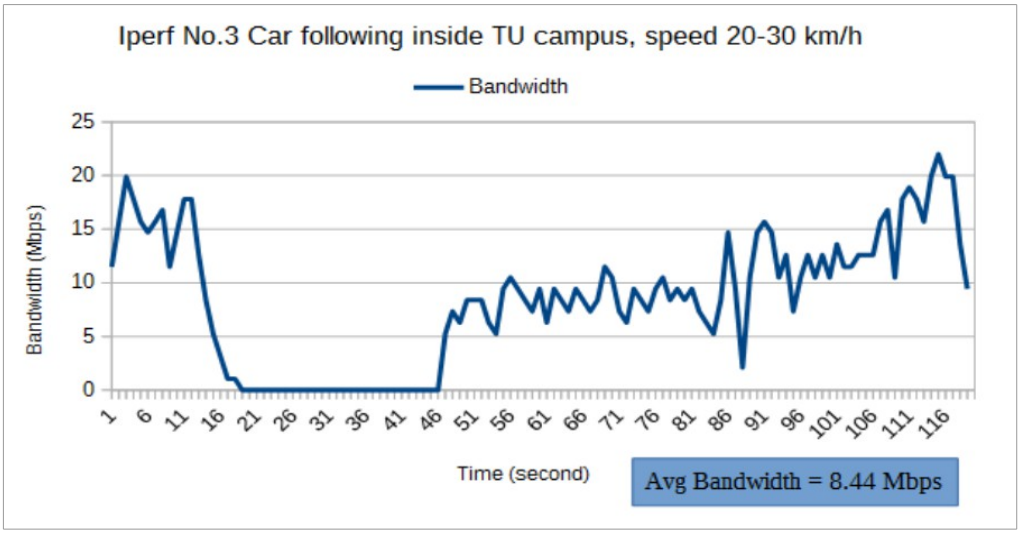
การทดสอบ Iperf#2

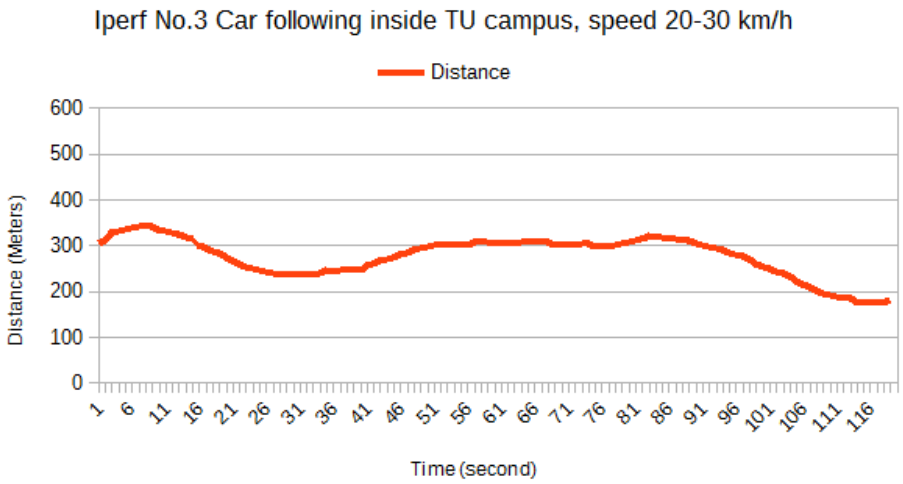




รูป Iperf No.2 แสดงผลการทดสอบการสื่อสาร TCP/IP ผ่าน Iperf โดยการขับรถระยะห่างประมาณ 100 เมตร ระหว่างคัน

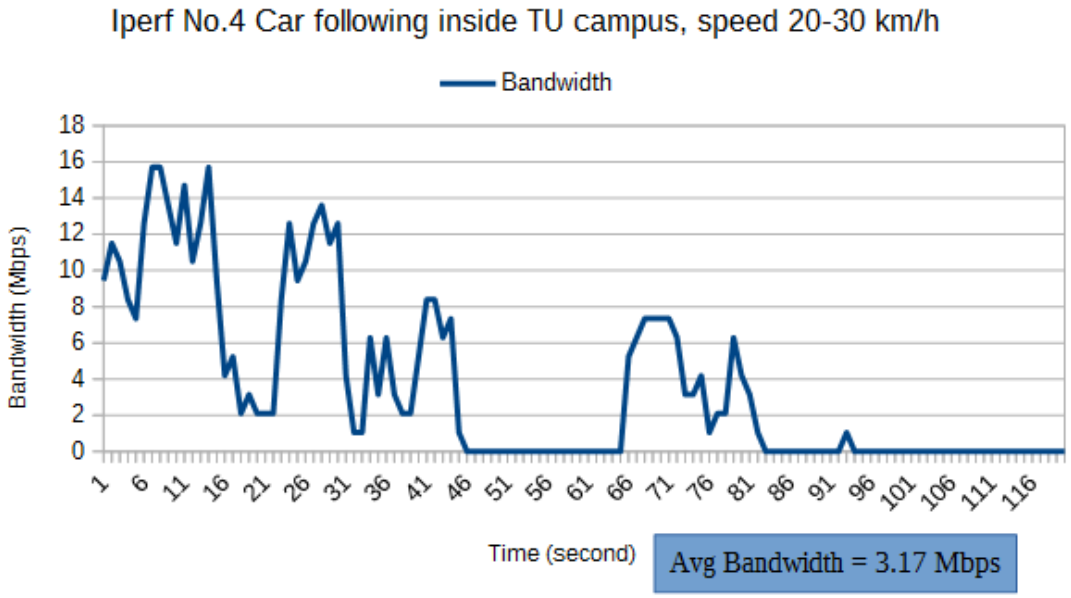
การทดสอบ Iperf#3

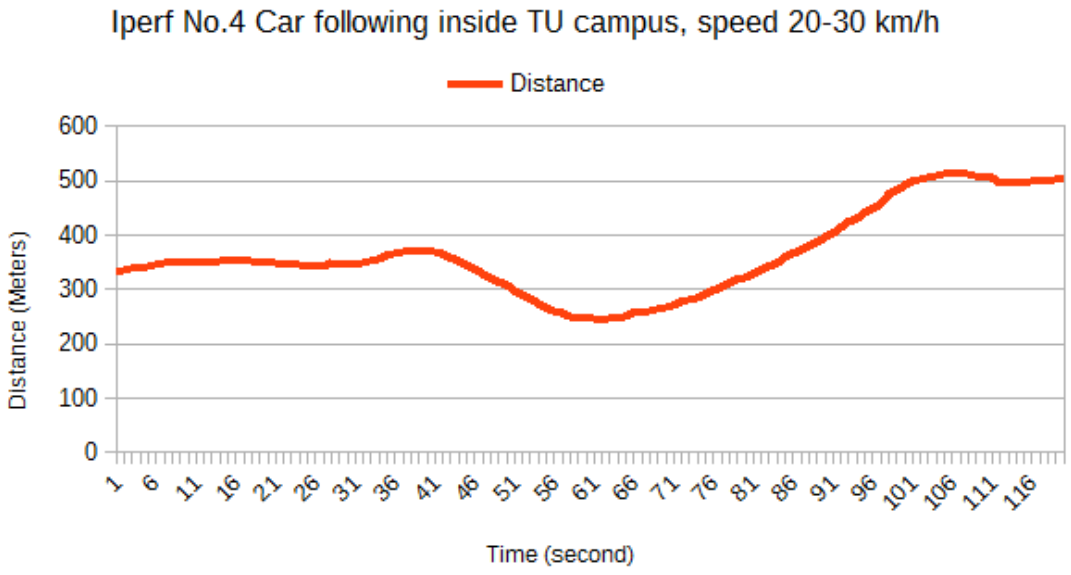




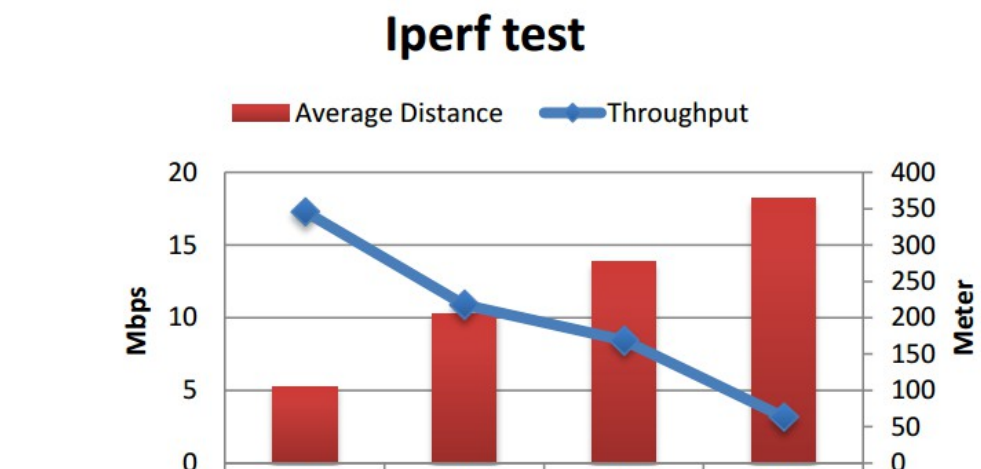
รูป Iperf No.3 แสดงผลการทดสอบการสื่อสาร TCP/IP ผ่าน Iperf โดยการขับรถระยะห่างประมาณ 150 เมตร ระหว่างคัน

การทดสอบ Iperf#4





รูป Iperf No.4 แสดงผลการทดสอบการสื่อสาร TCP/IP ผ่าน Iperf โดยการขับรถระยะห่างประมาณ 200 เมตร ระหว่างคัน



	1	2	3	4
Average Distance	105	206	276	364
Throughput	17.3	10.9	8.44	3.17

สรุปผลการทดสอบ Iperf

จากภาพสรุปการทดสอบ Iperf จะเห็นได้ว่าความเร็ว (Throughput) ของการสื่อสารระหว่างรถยนต์คันแรกไปยังรถยนต์คันสุดท้ายมี throughput สูงในตอนเริ่มต้นการทดสอบที่ระยะห่างแต่ละคัน ยังไม่ไกลกันมากนัก เมื่อเพิ่มระยะห่างของรถแต่ละคันในการทดสอบ จะเห็นได้ว่าความเร็ว throughput นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3.3 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short Message

3.3.1 รูปแบบการทดสอบ

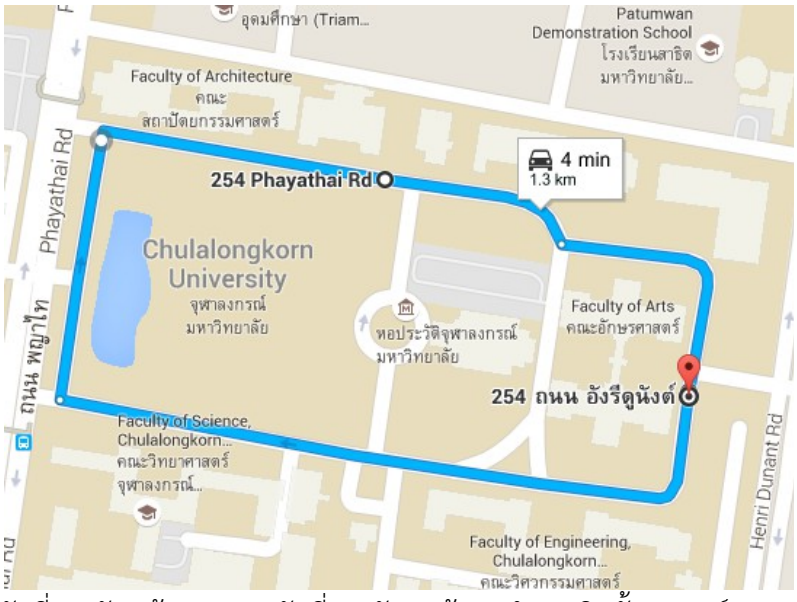
การทดสอบในเขตเมืองได้ทำการทดสอบ 2 พื้นที่ได้แก่

1) พื้นที่บริเวณรอบนอกจุฬาฯ ซึ่งมีการจราจรที่แออัด ทำให้การเคลื่อนตัวของรถยนต์นั้นทำได้ไม่เร็วมากนักเมื่อเทียบกับนอกตัวเมือง การเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเป็นไปแบบเกาะกลุ่มกันไป ดังนั้นในการทดสอบจึงทำการปล่อยรถให้วิ่งให้ใกล้เคียงลักษณะนี้มากที่สุด ซึ่งกำหนดดังนี้

- รถคันที่ 1 (คันหน้าสุด) และคันที่ 4 (คันสุดท้าย) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 1 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้นหลังคาด้านหน้าของตัวรถ
- รถคันที่ 2 และ 3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 2 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้บนหลังคาด้านหน้าและด้านหลังของตัวรถอย่างละชุด
- รถแต่ละคันวิ่งห่างกัน 200 เมตร ซึ่งระยะห่างนี้ ได้มาจากการปล่อยรถให้ห่างกันตามที่กำหนด

- กำหนดความเร็วรถไว้ที่ช่วง 40 ถึง 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งความเร็วรถขึ้นอยู่กับสภาพจราจรขณะนั้น
- กำหนดให้รถยนต์วิ่งอยู่ที่เลนส์ซ้ายสุด
- ทำการทดสอบโดยการวิ่งรอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีระยะประมาณ 4 กิโลเมตรต่อ 1 รอบ ทำการทดลองทั้งหมด 10 รอบ แบ่งเป็น
  a. วิ่งโดยไม่มีการใช้ Roadside Unit (RSU) 5 รอบ
  b. วิ่งโดยใช้ RSU 5 รอบ
- ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ต้นแบบที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการส่งข้อความสั้นๆบนรถยนต์ โดยตัวโปรแกรมจะทำการส่งข้อมูลทุกๆ 15 วินาที เฉพาะรถยนต์คันที่ 1 ด้วยขนาดข้อความอยู่ที่ 512 bytes

2) พื้นที่ภายในจุฬาฯ การทดสอบนี้ถึงแม้จะเป็นสถานที่ที่รถไม่แออัด แต่เป็นสถานที่ที่สามารถใช้ความเร็วได้จำกัด การเคลื่อนตัวของรถยนต์เป็นแบบเกาะกลุ่ม ซึ่งได้ทำการกำหนดวิธีทดลองดังนี้



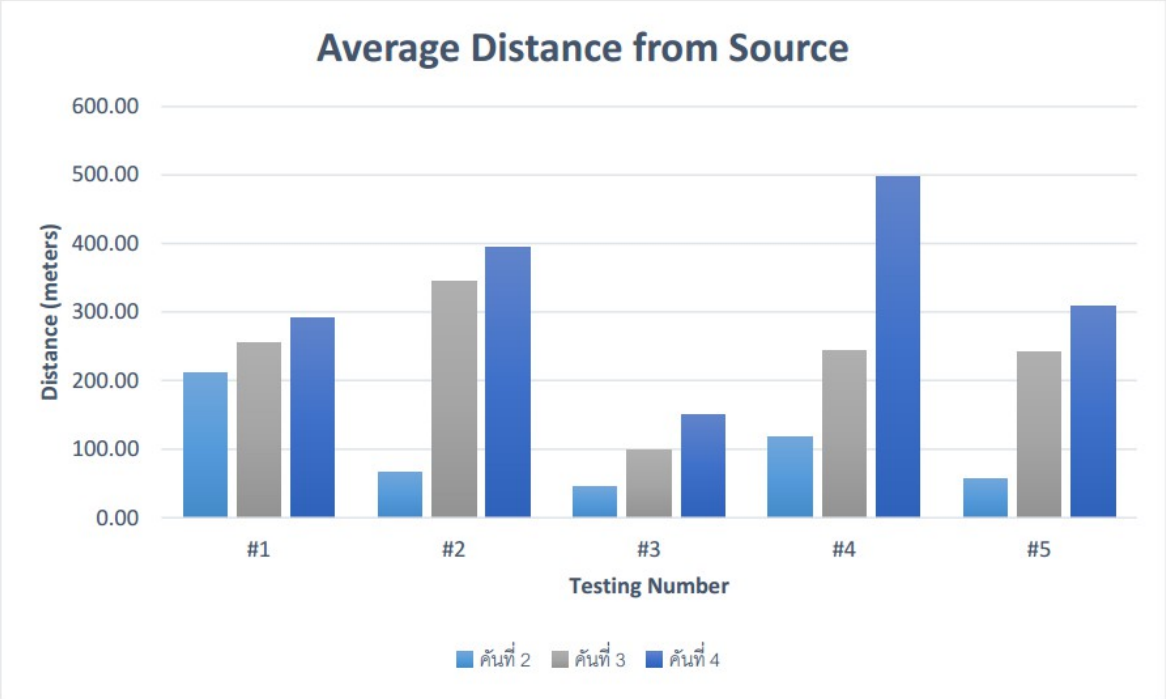
- รถคันที่ 1 (คันหน้าสุด) และคันที่ 4 (คันสุดท้าย) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 1 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้นหลังคาด้านหน้าของตัวรถ
- รถคันที่ 2 และ 3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 2 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้บนหลังคาด้านหน้าและด้านหลังของตัวรถอย่างละชุด
- ความเร็วรถยนต์ขึ้นอยู่กับสภาพการจราจร ณ ขณะนั้น
- ระยะห่างรถยนต์ ให้ทำการวิ่งเกาะกลุ่มกันไป

- ทำการทดสอบโดยการวิ่งรอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีระยะประมาณ 1.3 กิโลเมตรต่อ 1 รอบ ทำการทดลองทั้งหมด 20 รอบ

ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ต้นแบบที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการส่งข้อความสั้นๆบนรถยนต์ โดยตัวโปรแกรมจะทำการส่งข้อมูลทุกๆ 15 วินาที เฉพาะรถยนต์คันที่ 1 ด้วยขนาดข้อความอยู่ที่ 512 bytes

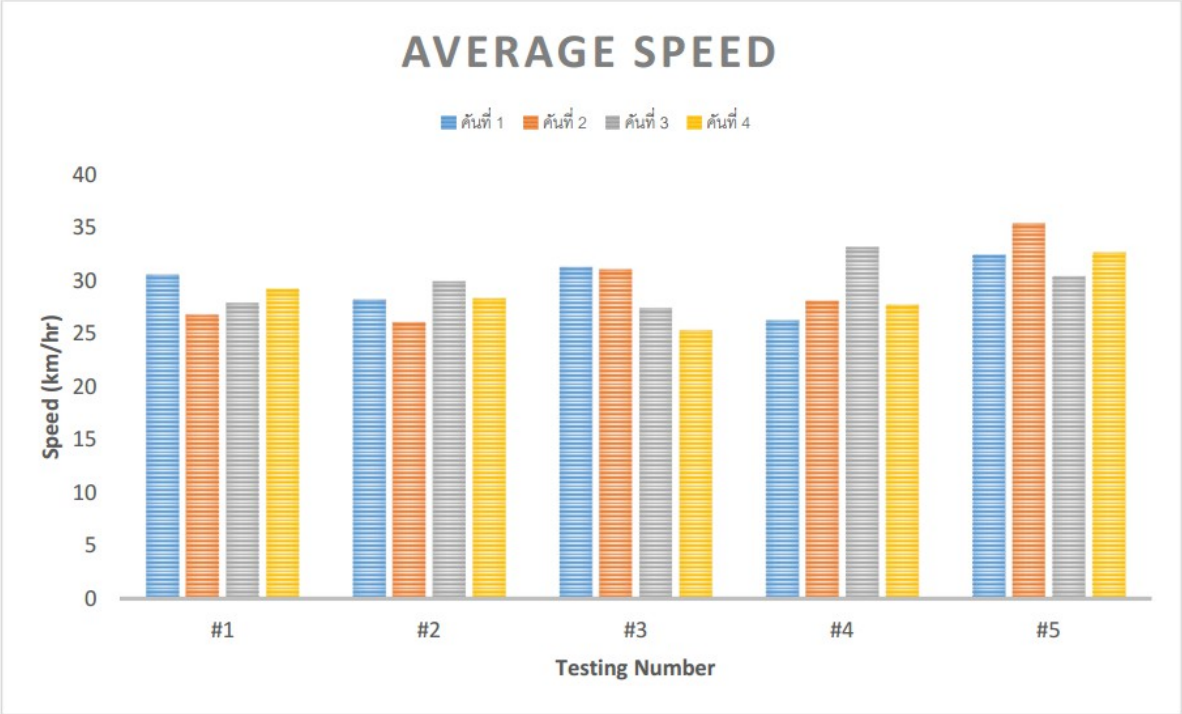
3.3.2 ผลการทดสอบบริเวณรอบนอกจุฬาฯ

ผลการทดสอบโดยไม่ใช้ RSU

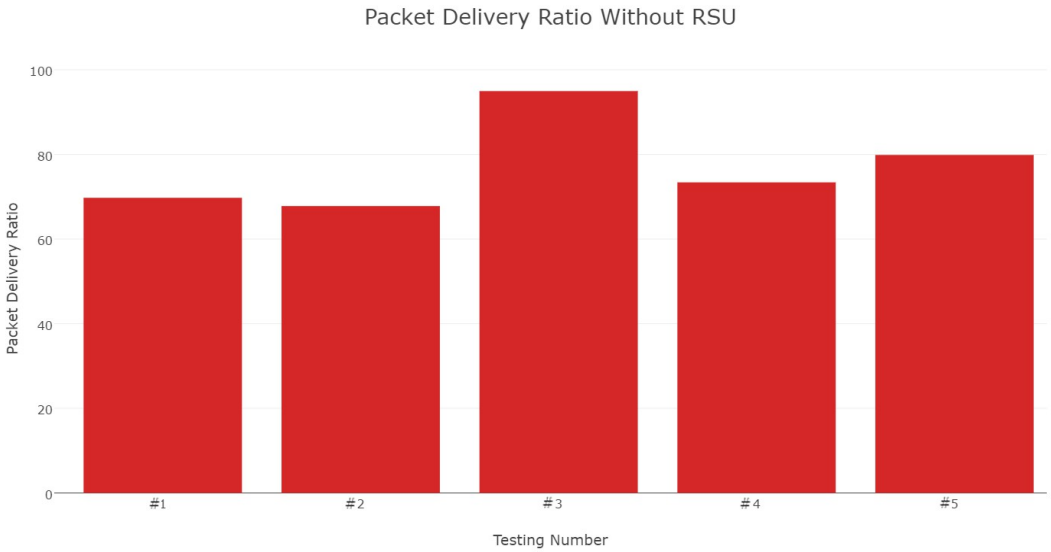


รูปแสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างของอุปกรณ์ของรถยนต์แต่ละคัน โดยอ้างอิงระยะห่างจากรถคันที่ 1 จากการทดสอบขับรถยนต์รอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทั้งหมด 5 รอบ โดยไม่ได้ติดตั้ง RSU ได้ระยะห่างเฉลี่ยรวมทุกคันอยู่ที่ประมาณ 200 เมตร

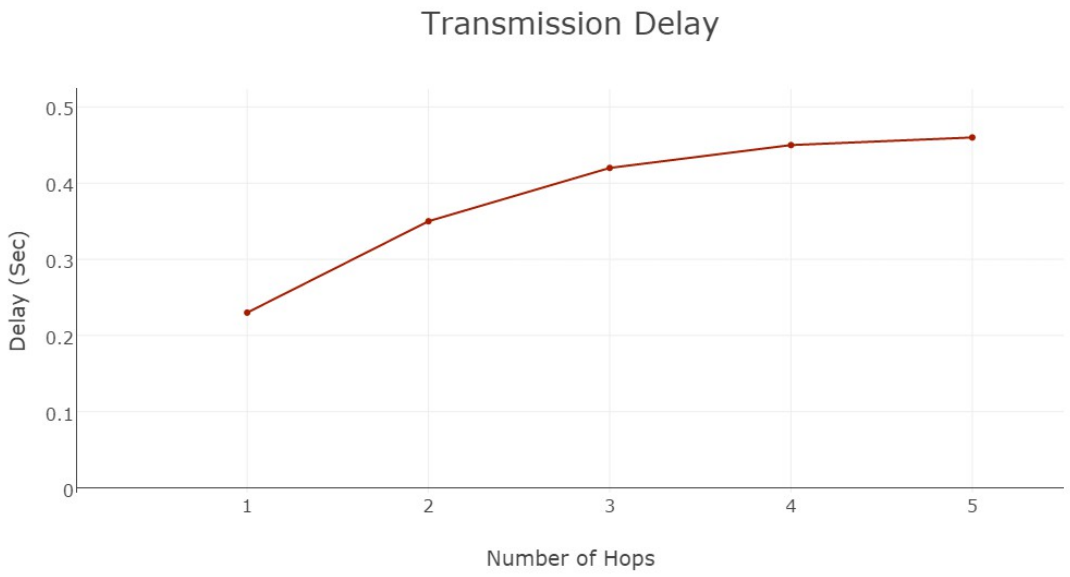
จากตารางค่าเฉลี่ยระยะห่างของอุปกรณ์ ซึ่งคำนวณมาจากระยะของ GPS จากรถยนต์คันแรก จะเห็นว่าในรอบการทดสอบที่หนึ่งนั้น รถยนต์ทดสอบขับห่างจากรถยนต์คันที่หนึ่งอยู่ที่ระยะประมาณ 200 ถึง 300 เมตร แต่ขับในลักษณะเกาะกลุ่มกัน



รูปแสดงความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ทดสอบในแต่ละรอบทดสอบโดยไม่ใช้ RSU มีความเร็วเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 29.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ผลทดสอบโดยไม่ใช้ RSU โดยผลสรุปนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละรอบการทดลอง เฉลี่ยอยู่ที่ 77.16%

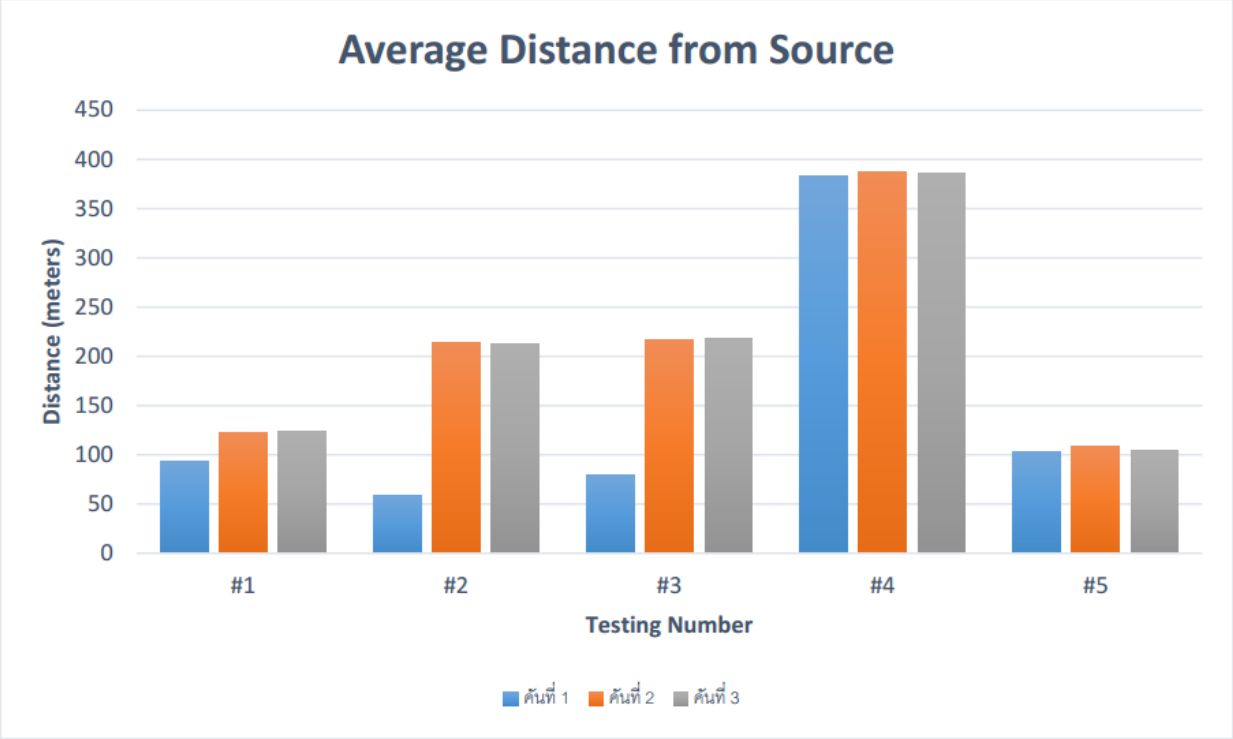


รูปแสดงผลการทดสอบในมุมของระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปจนถึงรถคันต่อๆไป

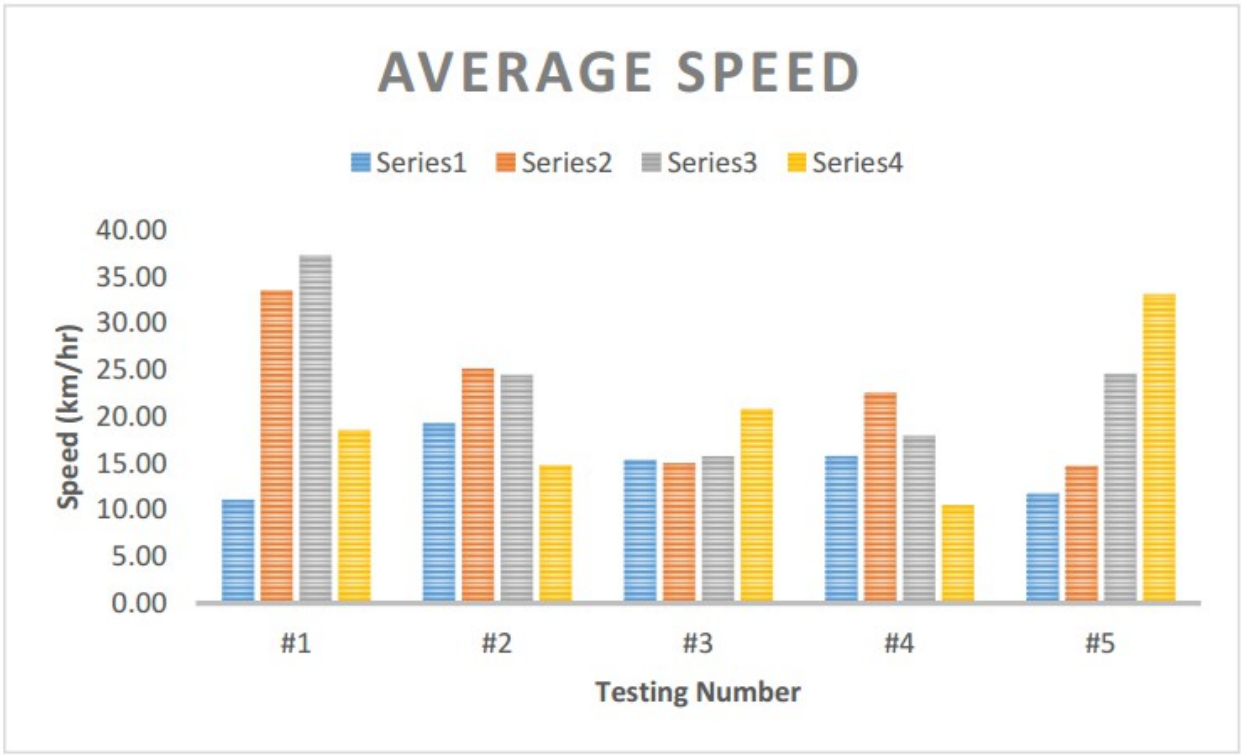
รูปแสดงถึงอัตราการสำเร็จในการส่งต่อข้อมูล ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า #2 นั้นมีการลดลงขออัตรการส่งเป็นอย่างมาก สาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นมากจากเสาที่วางไว้บนหลังคารถยนต์คันเดียวกัน วางไว้ที่ระยะห่างไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการรบกวนขึ้น และเป็นผลให้เกิดอัตราการรับส่งข้อมูลที่ทำได้ไม่ดี

หมายเหตุ Hop ภายในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดง หมายถึง อุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในรถยนต์คันเดียวกัน

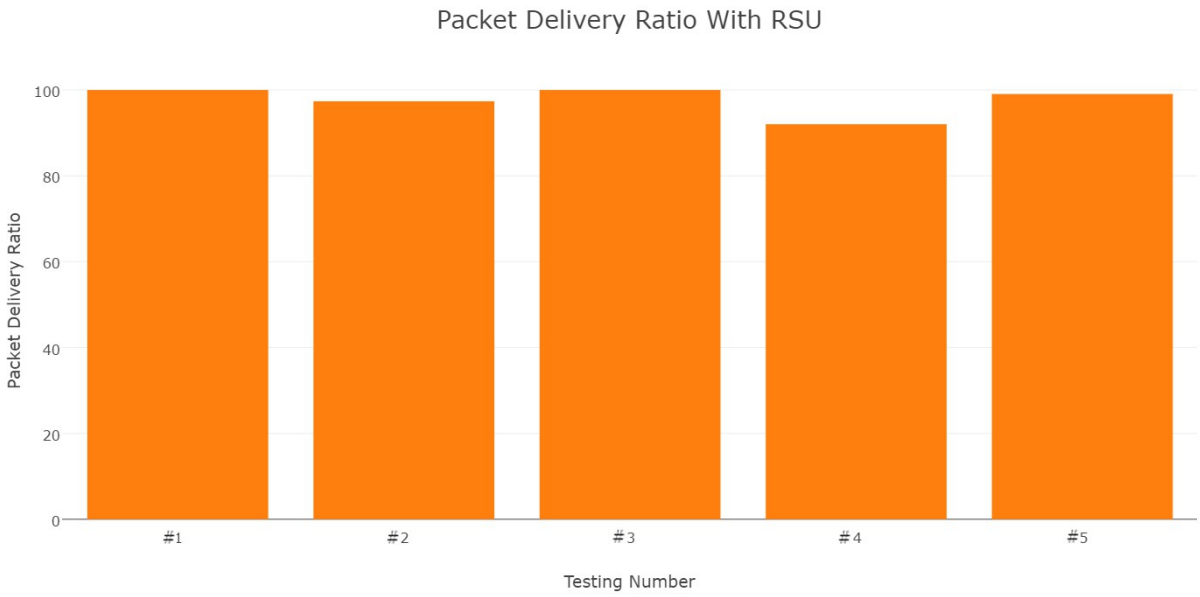
ผลการทดสอบโดยใช้ RSU



รูปแสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างของอุปกรณ์ของรถยนต์แต่ละคัน โดยอ้างอิงระยะห่างจากรถคันที่ 1 จากการทดสอบขับรถยนต์รอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทั้งหมด 5 รอบ ระยะทาเฉลี่ยอยู่ที่ 188 เมตร

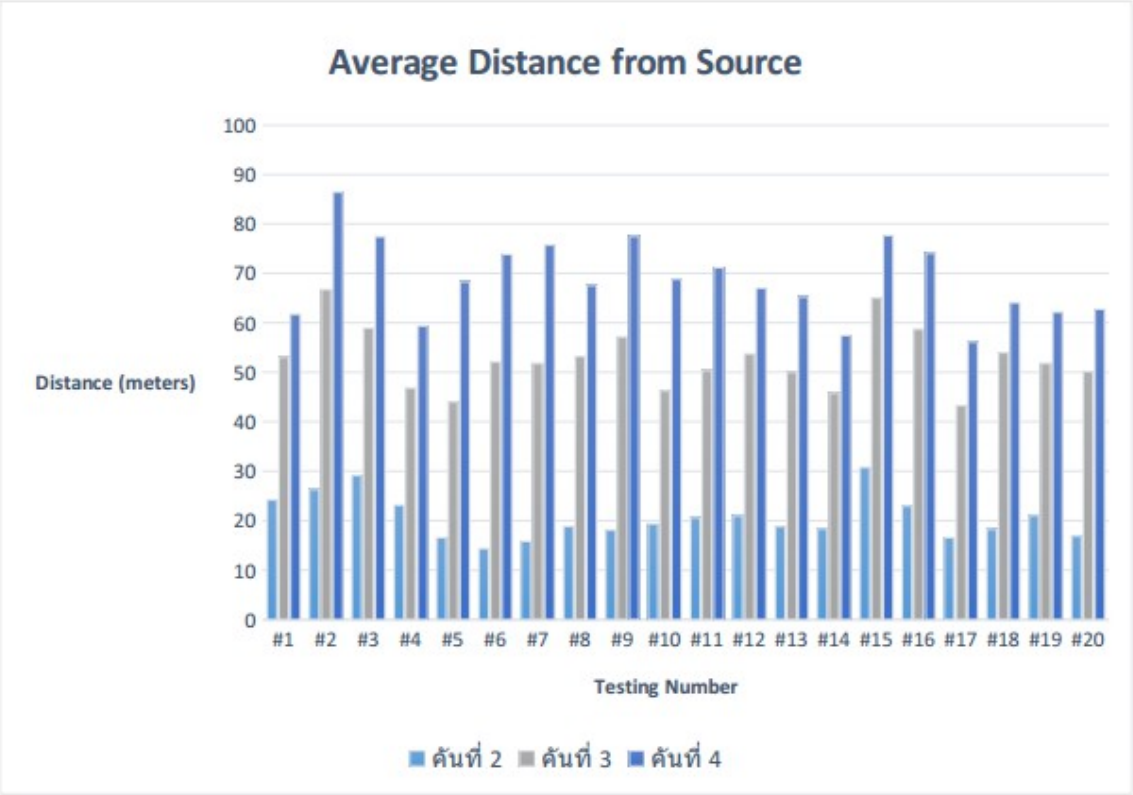


รูปแสดงความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ทดสอบในแต่ละรอบทดสอบโดยไม่ใช้ RSU มีความเร็วเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

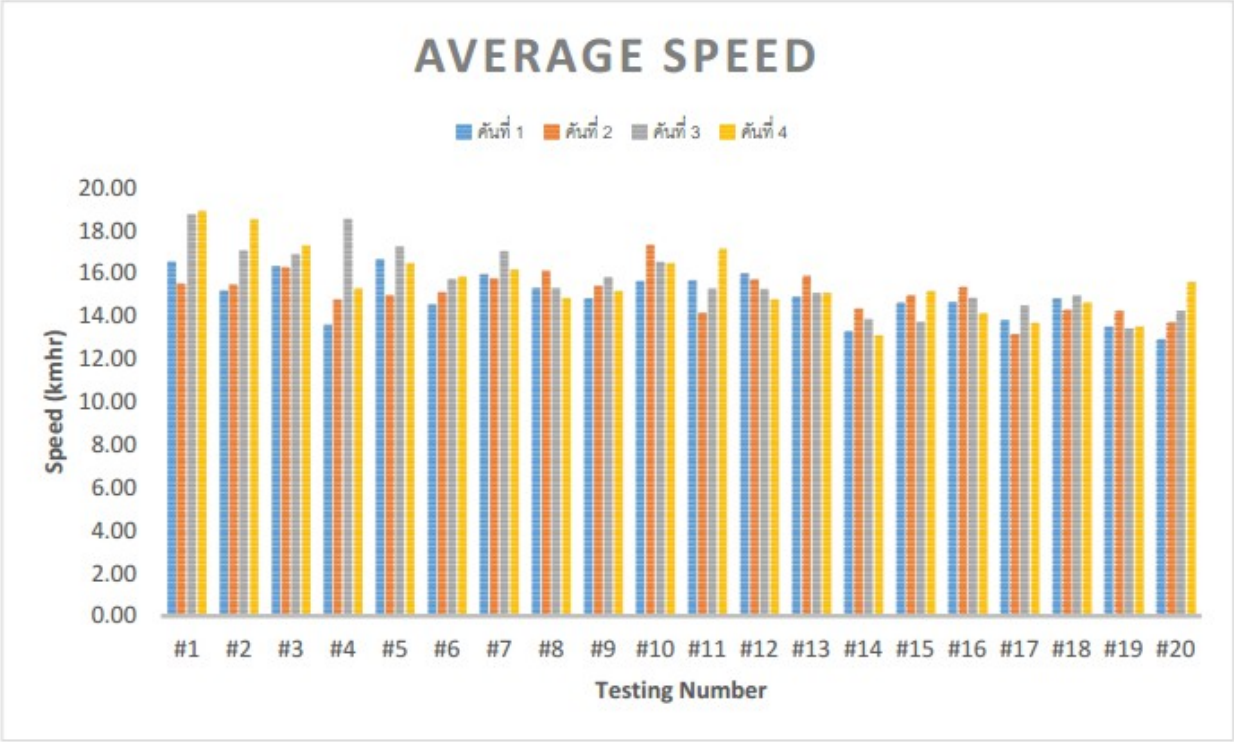


ผลทดสอบโดยมีการติดตั้ง RSU โดยผลสรุปนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละรอบการทดลอง เฉลี่ยอยู่ที่ 97.69%

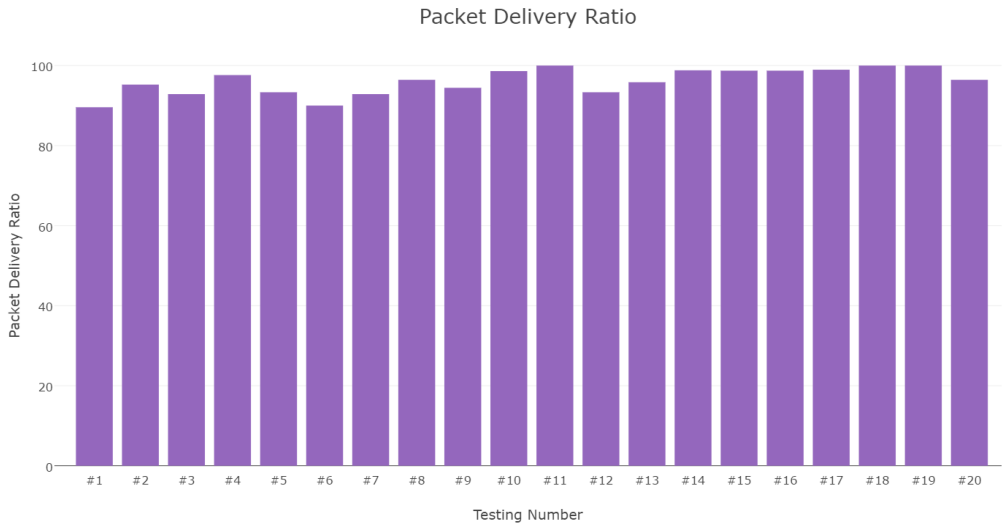
3.3.3 ผลการทดสอบบริเวณภายในจุฬาฯ



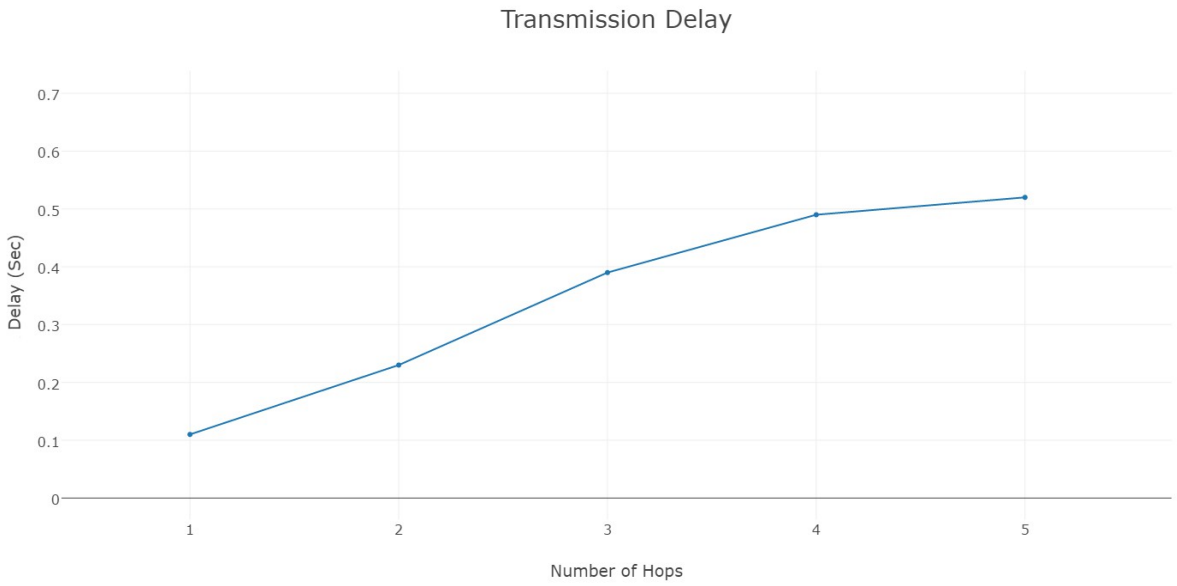
รูปแสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างของอุปกรณ์ของรถยนต์แต่ละคัน โดยอ้างอิงระยะห่างจากรถคันที่ 1 จากการทดสอบขับรถยนต์ภายจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทั้งหมด 20 รอบ ได้ระยะห่างเฉลี่ยรวมทุกคันอยู่ที่ประมาณ 43 เมตร



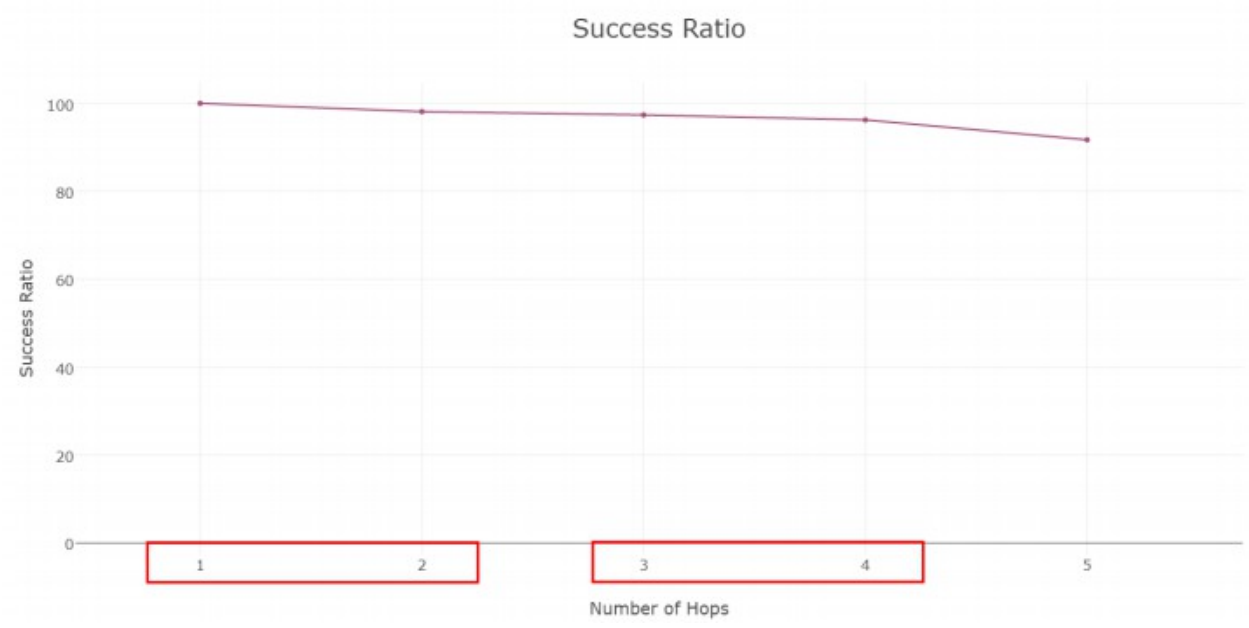
รูปแสดงความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์จากการทดสอบวิ่งรถภายในจุฬาลกรณ์มหาวิทยาลัย มีความเร็วเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 15.33 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ผลทดสอบการวิ่งรถยนต์ภายในรั้วจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยผลสรุปนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละรอบการทดลอง เฉลี่ยอยู่ที่ 96.09%



รูปแสดงผลการทดสอบในเชิงเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปจนถึงรถคันต่อๆไป ของรถยนต์ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปแสดงถึงอัตราการสำเร็จในการส่งต่อข้อมูล

หมายเหตุ Hop ภายในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดง หมายถึง อุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในรถยนต์คันเดียวกัน

ส่วนที่ 4

รายงานการทดสอบนอกเขตเมือง

สำหรับการทดสอบในครั้งนี้แบ่งเป็น 3 การทดสอบคือ 1. การทดสอบทางกายภาพ 2. การทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP Based และ 3. การทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short Message สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในเขตเมือง

สรุปการทดสอบทั้งสามกลุ่มได้ดังนี้

ประเภทการทดสอบ	สถานที่	อุปกรณ์	จำนวนอุปกรณ์	ค่าที่ใช้ทดสอบ	วัตถุประสงค์
1. กายภาพ	ถนนมัครลิน	WSU5001	2 ชุด	RSSI, Packet Loss	เป็นการวัดความสามารถของอุปกรณ์ที่สื่อสารในระดับ Physical Layer ของ WAVE protocol จึงต้องการอุปกรณ์เพียง 1 คู่ ทดสอบที่ระยะทาง สภาพแวดล้อมและความเร็วต่างกันเพื่อดูความแรงของสัญญาณ และความสำเร็จในการส่ง packet
2. IP Based	ทางหลวงหมายเลข 347	TP-Link	3 ชุด	PDR, RTT, Throughput	เป็นการทดสอบการสื่อสาร IP network ที่นำ OLSR มาใช้ใน Routing protocol บน Mobile router โดยใช้ Wi-Fi GHz ที่ 1000mW โดย OLSR จะทำ multi-hop กรณีที่โหนดอยู่ห่างเกินระยะส่งใน 1 hop ให้อัตโนมัติ การทดสอบนี้เพื่อดูผลการรับส่งข้อมูล แบบรถวิ่งตามกันและวิ่งสวนกันที่ความเร็วและระยะทางต่างๆกัน
3. Short Message	ทางหลวงหมายเลข 347	WSU5001	7 ชุด	PDR, Transmission delay,	เป็นการทดสอบการสื่อสาร short message ผ่าน DECA ซึ่งเป็น VANET protocol โดยใช้อุปกรณ์ WSU5001 เช่น

				Success Ratio	เดียวกับข้อ 1 เพื่อทำการวัดประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ multi-hop ของรูปแบบรถวิ่งต่างกัน รถวิ่งสวนกัน และรถวิ่งอิสระแต่ติด RSU เพิ่มเติม

4.1 ผลการทดสอบทางกายภาพ

4.1.1 รูปแบบการทดสอบ

ทีมงานวิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสาร Denso WSU-5001 กับรถยนต์เพื่อทดสอบการรับส่งข้อมูลขณะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลของ WAVE Protocol โดยทีมวิจัยได้เลือกใช้การทดสอบที่ช่องสัญญาณ 153 ที่มีคุณสมบัติดังนี้

Channel	153
Center Frequency (MHz)	5765
Frequency Range (MHz)	5755-5775
Bandwidth (MHz)	20
FCC U-NII Bands	U-NII-3

ซึ่งเป็นช่วงความถี่ย่าน U-NII-3 หรืออยู่ในช่วง 5725 – 5850 MHz หรือย่าน 5.8 GHz ที่เรารู้จักกันดีสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบ Wi-Fi ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a และ IEEE 802.11n

ช่วงความถี่ดังกล่าวสำหรับประเทศไทยยังไม่ได้รับการอนุญาตให้ใช้สำหรับการสื่อสารสำหรับรถยนต์ แต่ได้มีการอนุญาตให้ทำ มี ใช้ นำเข้า นำออก และค้าซึ่งเครื่องวิทยุโทรคมนาคมหรือตั้งสถานีวิทยุโทรคมนาคมแล้วแต่กรณี สำหรับอุปกรณ์สื่อสารระยะสั้น (Short Range Device หรือ SRD) โดยไม่ได้รับสิทธิคุ้มครองการรบกวน และหากก่อให้เกิดการรบกวนระดับรุนแรงต่อการใช้ความถี่วิทยุของข่ายสื่อสารวิทยุคมนาคมอื่น ผู้ใช้ความถี่วิทยุต้องระงับการใช้ความถี่ดังกล่าวทันที ตามประกาศของ คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช) เรื่อง การใช้ความถี่วิทยุสำหรับอุปกรณ์สื่อสารระยะสั้น (Short Range Devices) ย่านความถี่วิทยุ 5 GHz ดังมีราย

ละเอียดตามแผนความถี่วิทยุเลขที่ กทช.ผว. 101-2550 ซึ่งได้กำหนดความถี่สำหรับการสื่อสารสำหรับ SRD ในช่วง 5 GHz ไว้ 3 ย่าน และกำลังส่ง e.i.r.p. ดังนี้

ความถี่วิทยุ (MHz)	**กำลังส่ง e.i.r.p. (W)**	**เงื่อนไข**
5150 – 5350	0.2	ได้รับยกเว้นใบอนุญาตวิทยุโทรคมนาคม
5470 – 5725	1	ได้รับยกเว้นใบอนุญาตวิทยุโทรคมนาคม
5725 – 5850	1	ได้รับยกเว้นใบอนุญาตวิทยุโทรคมนาคม

จากตารางกำลังส่งที่ได้รับอนุญาตที่ไม่เกิน 1 W e.i.r.p. หรือ 30 dBm แต่ในการทดสอบทีมวิจัยได้ตั้งค่ากำลังส่งของเครื่องส่งที่ 20 dBm ซึ่งไม่เกินเกณฑ์การอนุญาตที่กำหนดโดย กทช.
โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบมีดังต่อไปนี้

Channel	153
Transmission Rate	6 Mbps
Transmission Power	20 dBm
Transmission EDCA	VI
Transmission Interval (ms)	50 และ 100
Packet Size (bytes)	250 และ 1000
Vehicle Speed (km/h)	20, 80 และ 100

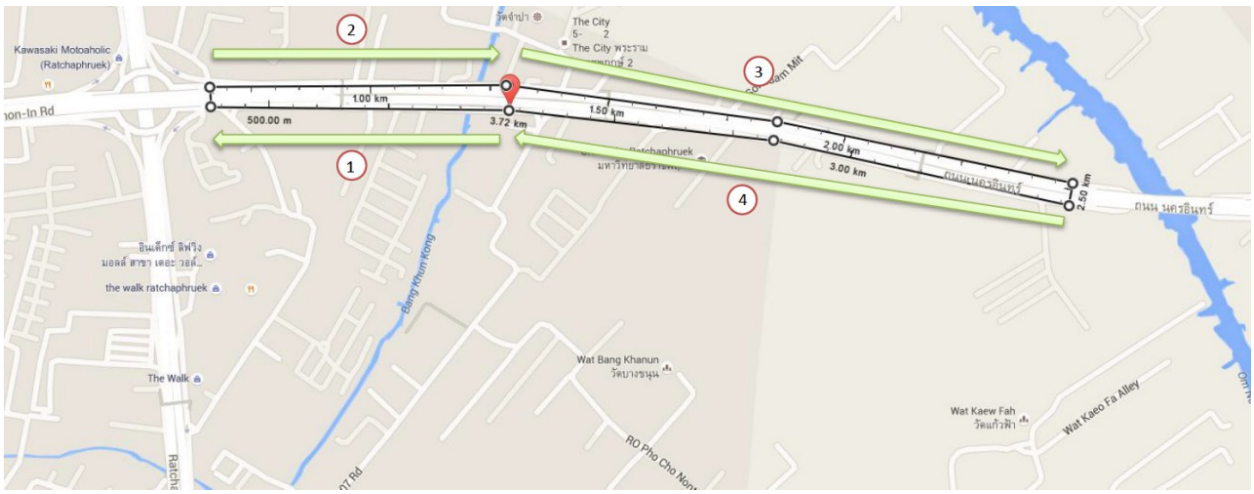
รูปภาพต่อไปนี้เป็นการประกอบอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งบริเวณถนนและบนสะพานลอยเพื่อทดสอบการส่งสัญญาณ

โดยทีมวิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์บนรถยนต์โดยการติดตั้งเสาอากาศบนหลังคารถดังแสดงในรูปต่อไปนี้ และทำการทดสอบโดยการขับรถที่ความเร็วตามที่กำหนด

ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบบนพื้นที่ถนนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง บนถนนมัครลิน (ถนนสะพานพระราม ๕) ช่วงระหว่างวงเวียนตัดกับถนนราชพฤกษ์ กับสะพานข้ามคลองอ้อมนนท์ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้

ทีมวิจัยได้ตั้งอุปกรณ์เครื่องส่งที่บริเวณสะพานลอยที่ปักหมุดสีแดงดังแสดงในภาพด้านบน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างจุดที่ติดตั้งเครื่องส่ง กับวงเวียนราชพฤกษ์ ประมาณ 1 กิโลเมตร และมีระยะหว่าง ระหว่างจุดติดตั้งเครื่องส่ง กับสะพานข้ามคลองอ้อมนนท์ ประมาณ 3 กิโมเมตร

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 4 ช่วงถนนของการทดสอบดังแสดงในรูปต่อไปนี้ โดยการทดสอบเป็นการขับรถจากจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องส่งไปตามช่วงถนนหมายเลข 1 และ กลับรถมาตามช่วงถนนหมายเลข 2 และ 3 และกลับรถเพื่อวิ่งทดสอบบนช่วงถนนหมายเลข 4 ซึ่งการทดสอบจะมีทั้งที่เป็นช่วงถนนยาว 1 กิโลเมตร และ ช่วงถนนยาว 3 กิโลเมตรเพื่อทดสอบระยะการส่งและเพื่อให้รถยนต์สามารถทำความเร็วได้ตามที่ต้องการทดสอบ

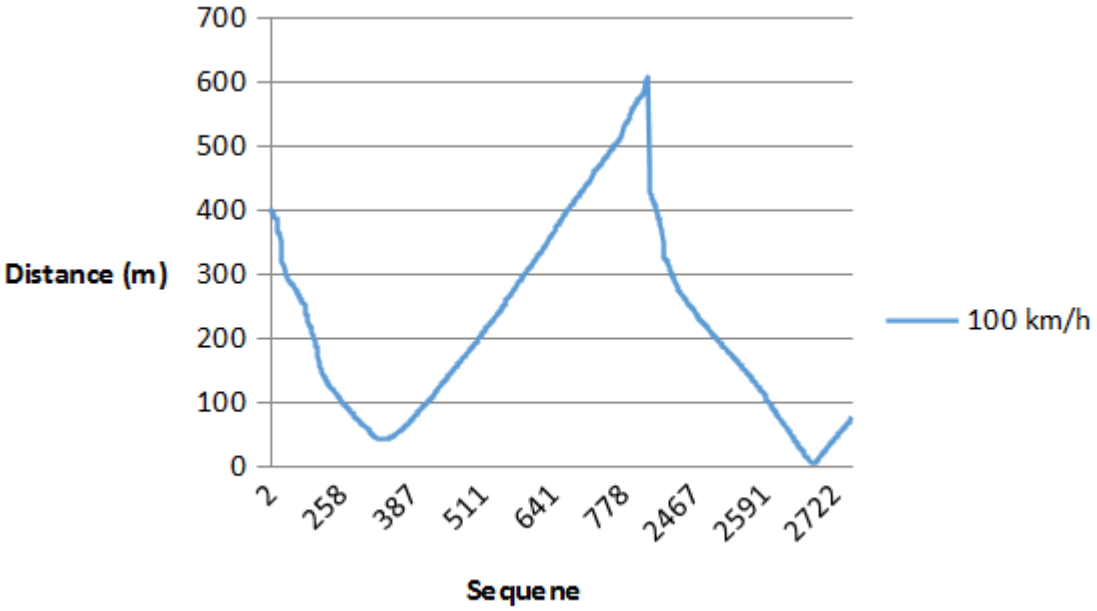


4.1.2 ผลการทดสอบเบื้องต้น

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เครื่องส่งและเครื่องรับเพื่อหาระยะการรับส่งสูงสุดที่อุปกรณ์สามารถสื่อสารกันได้ในลักษณะการส่งที่เป็นเส้นตรงหรือแบบ Line-of-Sight และระดับสัญญาณ RSSI ของอุปกรณ์เครื่องรับที่สามารถรับสัญญาณจากเครื่องส่งได้

การทดสอบระยะทาง

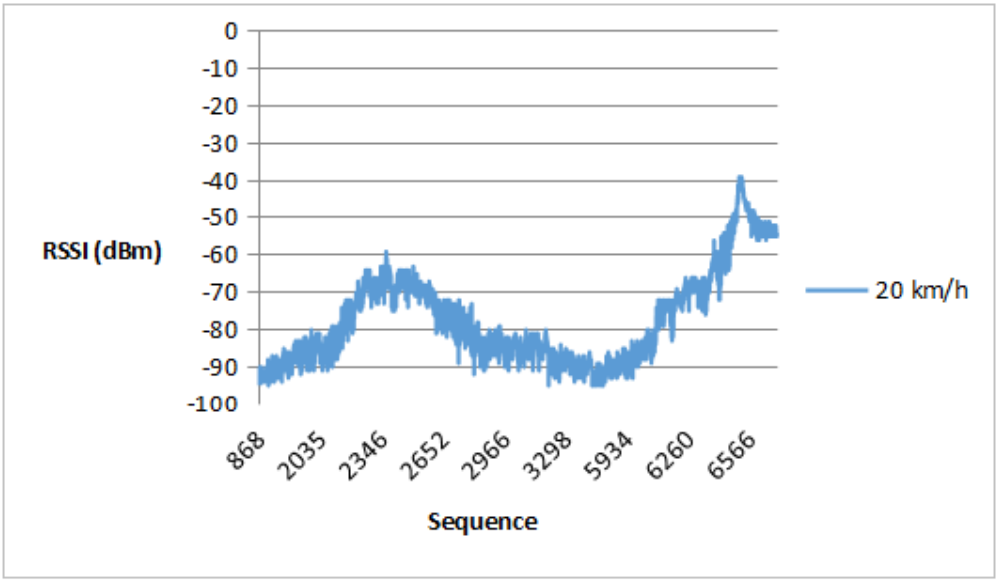
ผลการทดสอบเบื้องต้นสามารถแสดงผลการทดสอบระยะทางการรับส่งที่ความเร็วของรถยนต์ที่ต่างกัน ได้ดังกราฟต่อไปนี้



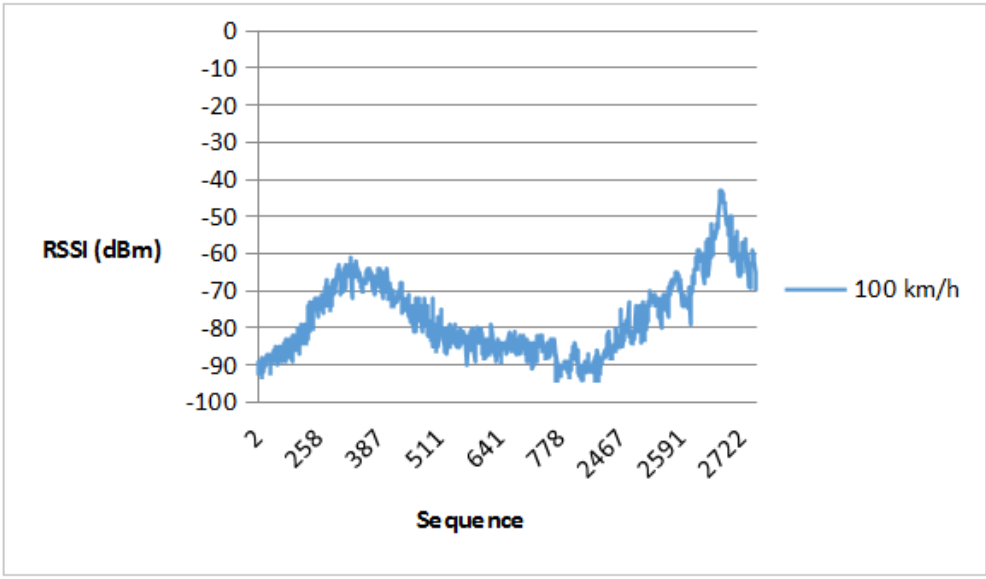
โดยการทดสอบเราขับรถด้วยความเร็ว 20, 80, หรือ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยขับไปตามถนนช่วงที่ 1 ซึ่งเป็นช่วงการ Warm-up และเราจะเริ่มเก็บข้อมูลในการวิ่งไปตามถนนช่วงที่ 2, 3, และ 4 ตามลำดับ

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สามารถสื่อสารได้ที่ระยะทางสูงสุดคือประมาณ 400 เมตร สำหรับการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกหรือทางวงเวียนราชพฤกษ์ และประมาณ 600 เมตร สำหรับการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกหรือทางสะพานคลองอ้อมนนท์ ระยะทางการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุทั้งสองทิศทางไม่เท่ากันเป็นเพราะลักษณะของถนนที่โค้งจึงทำให้ระยะทางที่เป็น Line-of-Sight สำหรับรับส่งสัญญาณไม่เท่ากัน

การทดสอบระดับสัญญาณ RSSI



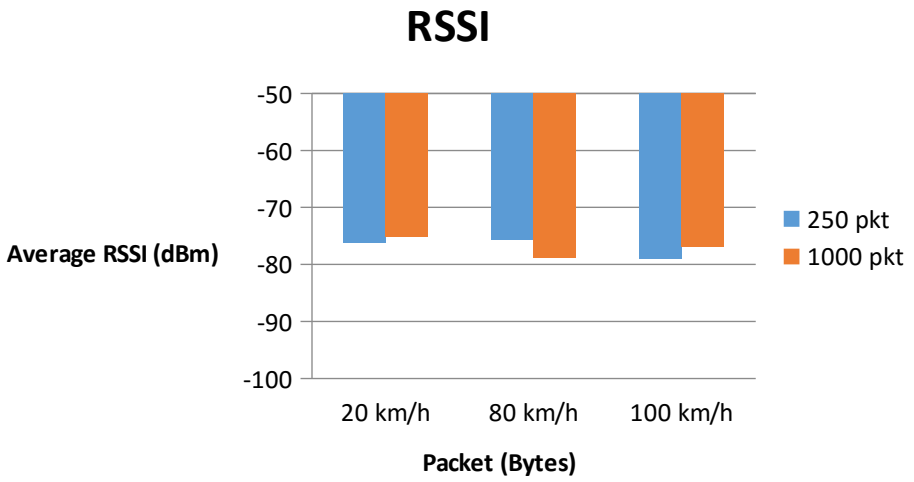
ผลการทดสอบเบื้องต้นสามารถแสดงระดับสัญญาณ RSSI ที่การเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างกันดังกราฟต่อไปนี้



จากผลการทดสอบค่าระดับสัญญาณต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถรับได้อยู่ที่ประมาณ -95 dBm ที่ระยะที่ไกลที่สุด และสามารถรับสัญญาณได้สูงสุดที่ประมาณ -50 dBm

4.1.3 ผลการทดสอบระดับแรงดันของสัญญาณ

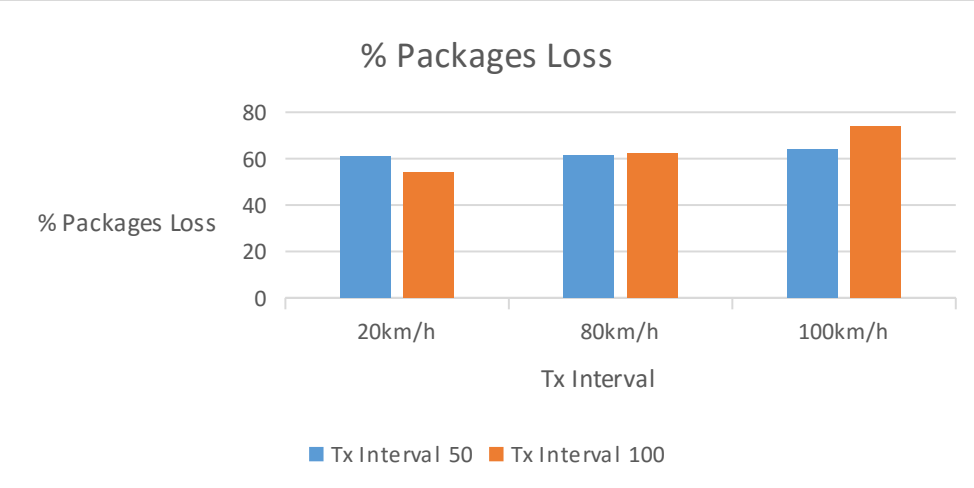
จากผลการทดสอบเบื้องต้นทีมวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดระดับความแรงของสัญญาณที่เครื่องรับได้รับเปรียบเทียบกับการส่ง packet ที่ขนาดที่ต่างกันที่ความเร็วต่างกัน ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



ผลการวิเคราะห์การส่งข้อมูลที่ขนาดของ Packet ที่ต่างกันไม่ได้มีผลต่อระดับสัญญาณของการรับส่ง และความเร็วสำหรับการเคลื่อนที่ของรถยนต์มีผลเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากมาจากผลของ Doppler Effect อย่างไรก็ตามมีผลน้อยมาก ซึ่งระดับความเร็วของสัญญาณจะมากหรือน้อยมีผลขึ้นกับสภาพแวดล้อม สิ่งกีดขวาง และระยะทาง เป็นตัวแปรสำคัญมากกว่าผลของ Doppler Effect

4.1.4 ผลการทดสอบ Packet Loss

จากผลการทดสอบเบื้องต้นทีมวิจัยได้ทำการทดสอบหาค่าการสูญเสียแพ็กเกต หรือ Packet Loss สำหรับการรับส่งข้อมูลที่การเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างกันและที่อัตราการส่งข้อมูลที่มีค่า Transmission Interval ที่ต่างกัน ผลการทดสอบแสดงดังกราฟต่อไปนี้



จากกราฟผลการทดสอบจะพบว่าที่ความเร็วสูง หรือ 100 km/h จะมีค่า Packet Loss ประมาณ 70% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วต่ำกว่าที่ 80 km/h และ 20 km/h จะมีค่า Packet Loss ที่ค่าประมาณ 60% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งความเร็วมีผลต่อการสูญเสีย Packet

เมื่อเปรียบเทียบการส่ง packet ที่ช่วงการส่ง (Tx Interval) ที่ 50 ms และ 100 ms พบว่าอัตราการสูญเสีย packet มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอัตราความเร็วในการส่ง packet มีผลน้อยหรืออาจไม่มีผลต่อค่าสูญเสีย packet อย่างไรก็ตามทีมวิจัยจะทำการทดสอบต่อไปเพื่อหาค่า Tx Interval ที่เหมาะสมสำหรับการรับส่งข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าสูญเสีย Packet มีค่าต่ำ

4.2 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม IP-Based

4.2.1 รูปแบบการทดสอบ

การทดสอบระดับนอกเขตเมือง จะเป็นการขับรถความเร็วค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับ การขับรถในระดับเขตเมือง ซึ่งทางทีมงานได้ทำการทดสอบระบบโดยใช้เส้นทางหลวงหมายเลข 347 ในเขตจังหวัดปทุมธานีดังแสดงในรูปที่ 3-19 โดยมีเส้นทางที่เป็นแนวตรงและมีความยาวพอประมาณ ซึ่งเหมาะสมกับการทดสอบในการขับรถด้วยความเร็วในระดับหนึ่ง

รูปที่ 3-19 แสดงเส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล 3 คัน ที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ router ไว้บนหลังคารถ และทำการทดสอบโดยมีรูปแบบและเงื่อนไขดังนี้

1. ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยผู้ขับขี่จะรักษาความเร็วนี้ตลอดการทดสอบ
2. ระยะห่างระหว่างรถแต่ละคัน จะขึ้นอยู่กับความเร็วและ ระยะที่ต้องการทดสอบ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างคันโดยประมาณเท่ากับ 100, 200 และ 300 เมตร

รูปแบบการทดสอบจะมี 2 เหตุการณ์หลัก ๆ คือ

Scenario 1: การขับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 3 คันวิ่งตามกันบนทางหลวง 347 ซึ่งใช้ความเร็ว ตามที่กำหนดข้างต้น โดยจะทดสอบการสื่อสาร จากรถคันแรกไปยังคันที่สอง และสามที่วิ่งตามกันมา โดยการ ICMP (ping) test เพื่อตรวจสอบ Delay และ Iperf เพื่อวัดความเร็ว Throughput ของระบบการสื่อสารระหว่างรถคันแรกและคันสุดท้าย

Scenario 2: การขับรถยนต์สวนทางกัน โดยมี คันที่ 1 ขับรถสวนกับคันที่ 2 และ 3 ที่ขับตามกันมาจากทิศทางตรงกันข้าม โดยมีระยะห่างจำนวนหนึ่ง เพื่อทดสอบว่ามีการสร้างเครือข่าย เกิดขึ้นหรือไม่จากการขับรถสวนทางกัน โดยใช้ความเร็วในการขับรถจริงบนทางหลวงนอกเขตเมือง

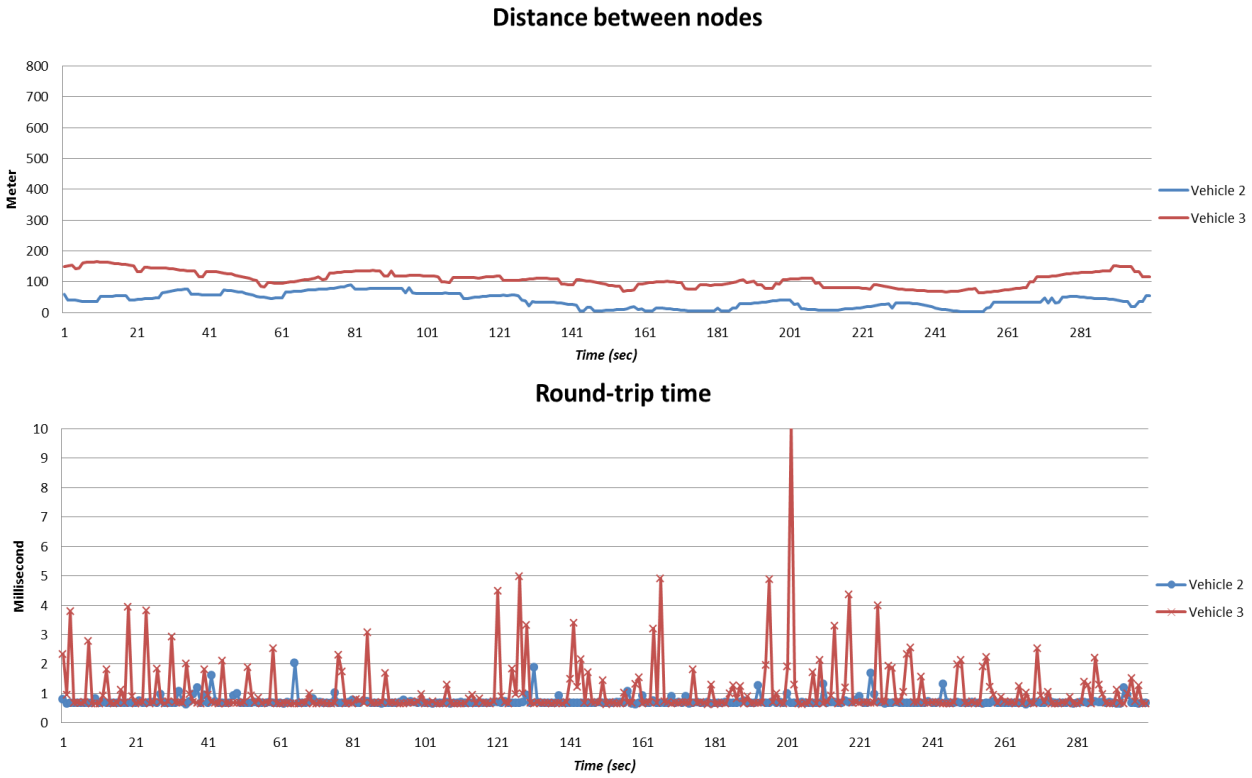
การทดสอบทั้งหมดได้มีการบันทึกตำแหน่ง GPS ของรถแต่ละคันระหว่างการทดสอบเพื่อดูระยะห่างที่เกิดขึ้นจริงในการทดสอบ

4.2.2 ผลการทดสอบ Scenario 1 รถวิ่งตามกัน

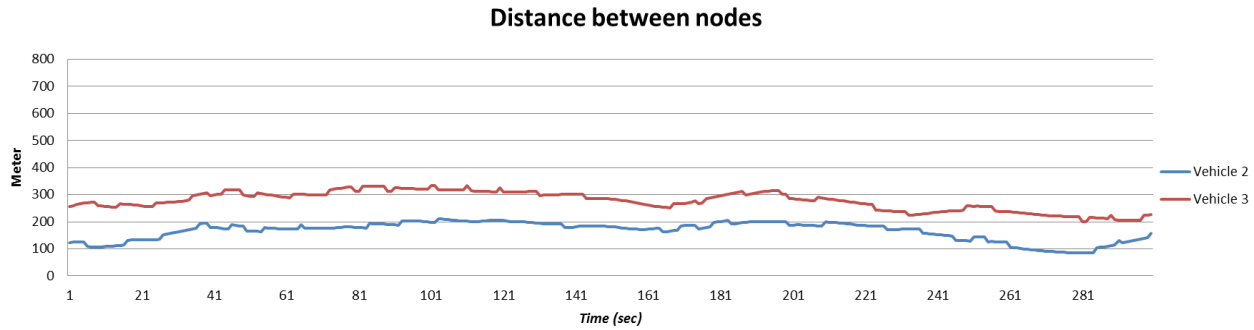
เป็นการทดสอบ ICMP (ping) test เพื่อดู Round-trip time เป็นการดู delay ของการส่ง ICMP packet ในหน่วย millisecond (ms) จากรถคันที่ 1 ไปยัง รถคันที่ 2 และ 3

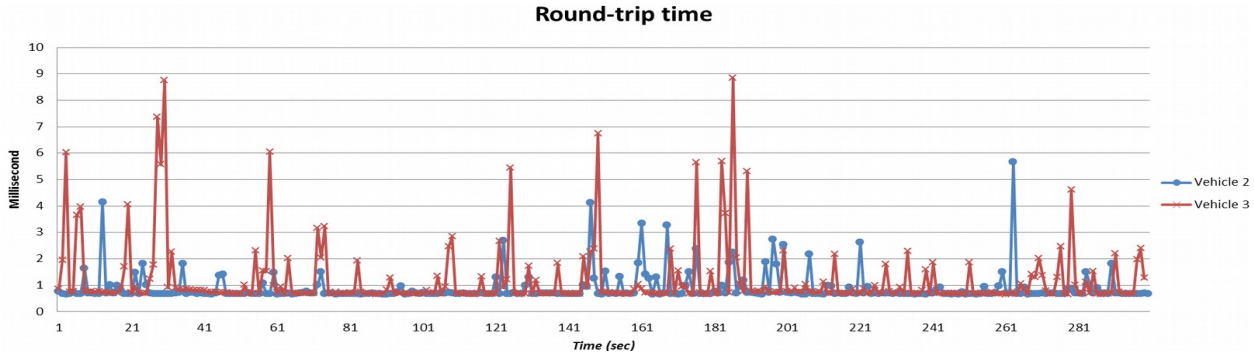
การทดสอบ ICMP

ผลการทดสอบ Test #1

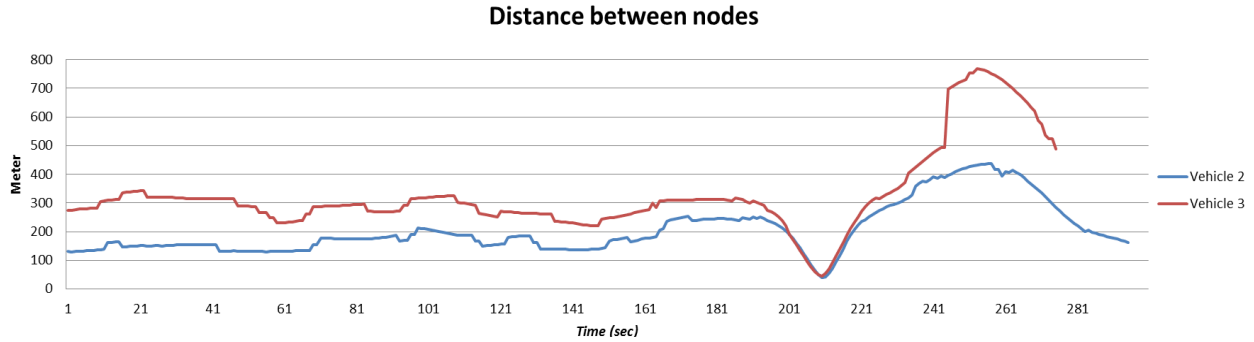


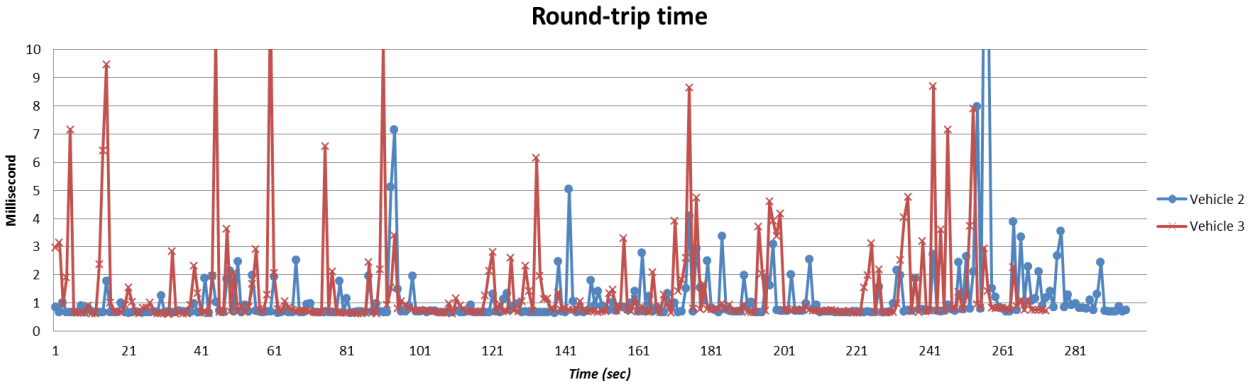
ผลการทดสอบ Test #2





ผลการทดสอบ Test #3



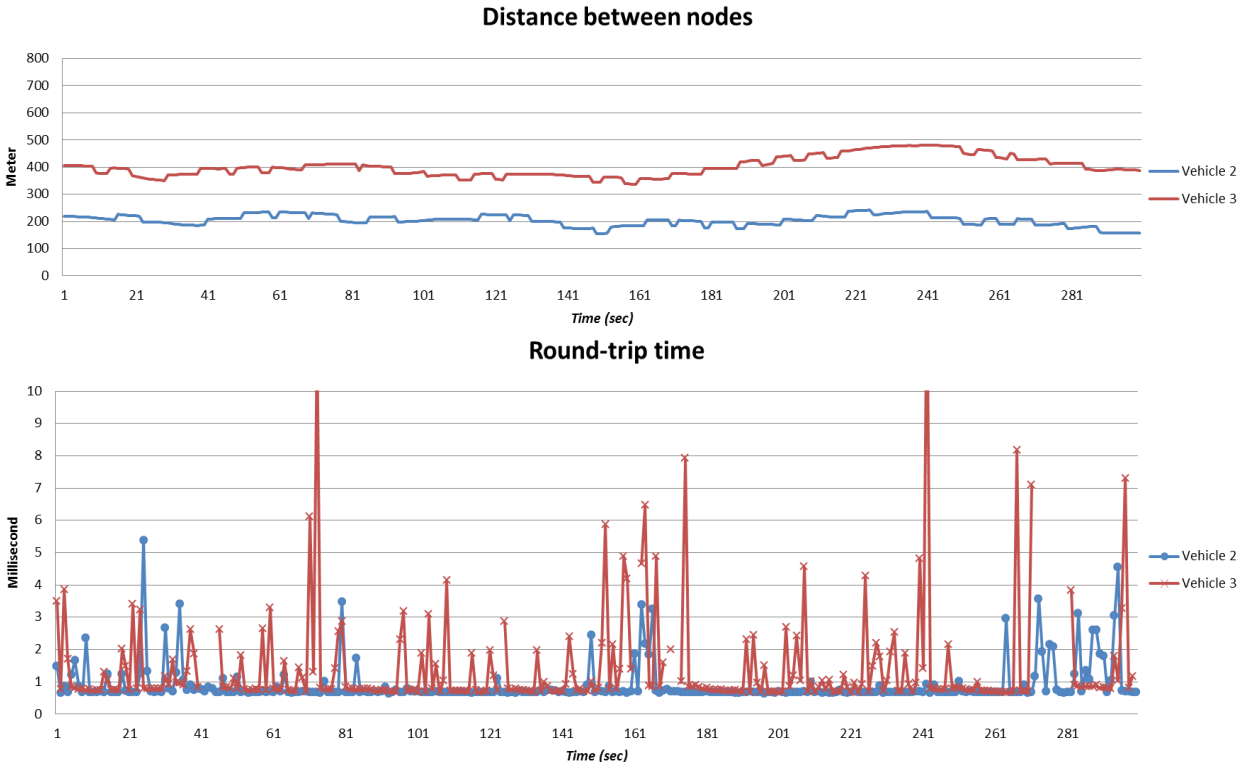


การทดสอบ ครั้งที่ 1, 2 และ 3 ใช้ความเร็วประมาณ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยระยะห่างแต่ละคัน จะห่างประมาณ 50-150 เมตร ได้ผลการทดสอบดังนี้

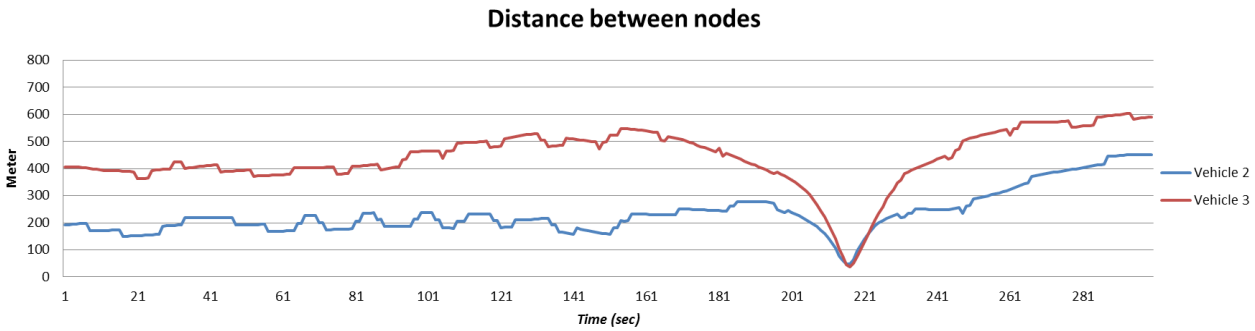
Average RTT (ms)			Loss rate (%)	
Test #	Vehicle 2	Vehicle 3	Vehicle 2	Vehicle 3
1	0.725	1.080	0	0
2	0.876	1.172	0	0
3	1.172	1.477	1	9

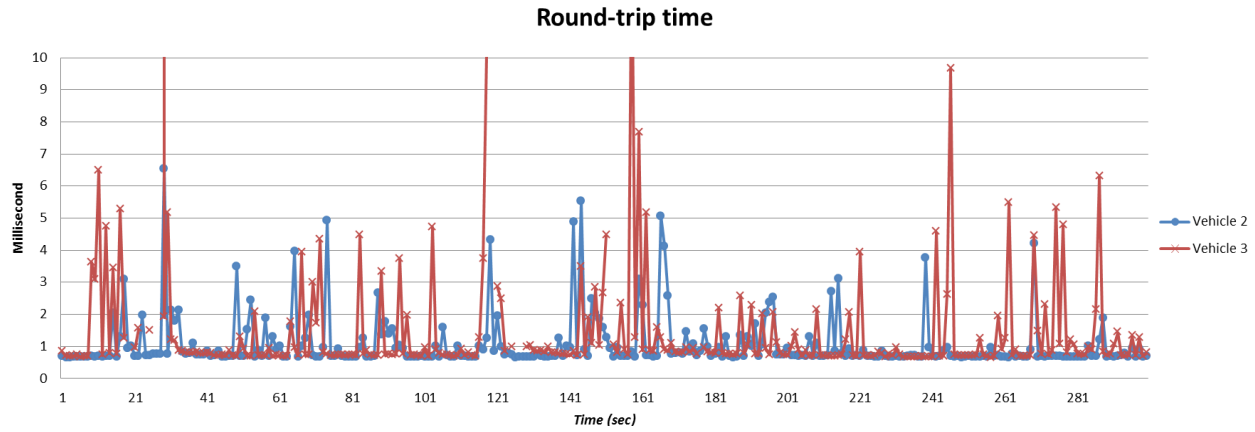
จากการทดสอบวิ่งด้วยความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และระยะห่างต่อคันประมาณ 100 เมตร แทบจะไม่มีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณข้อมูล

ผลการทดสอบ Test #4

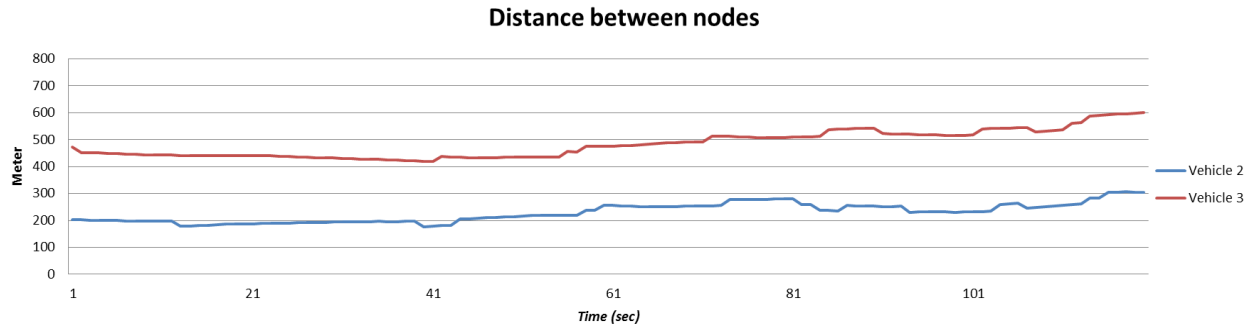


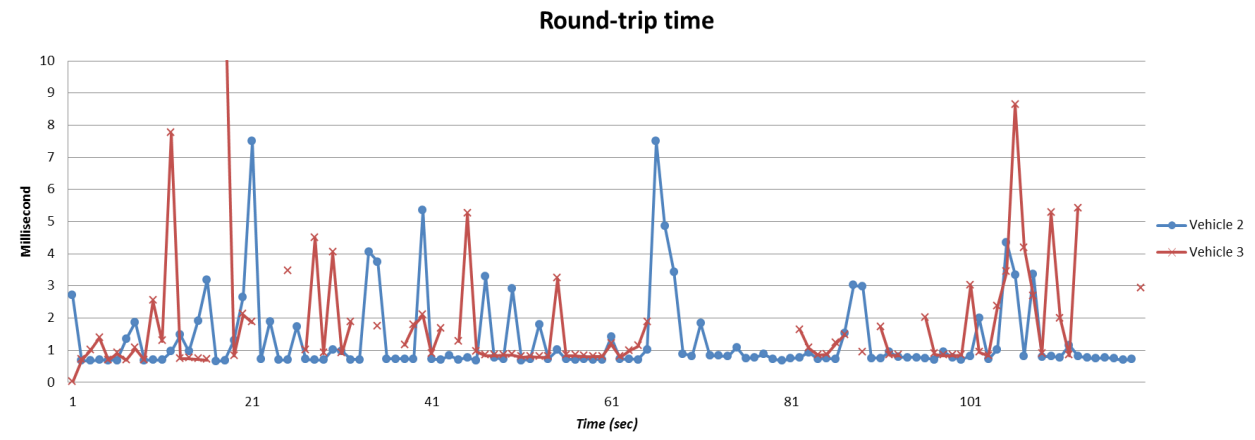
ผลการทดสอบ Test #5





ผลการทดสอบ Test #6



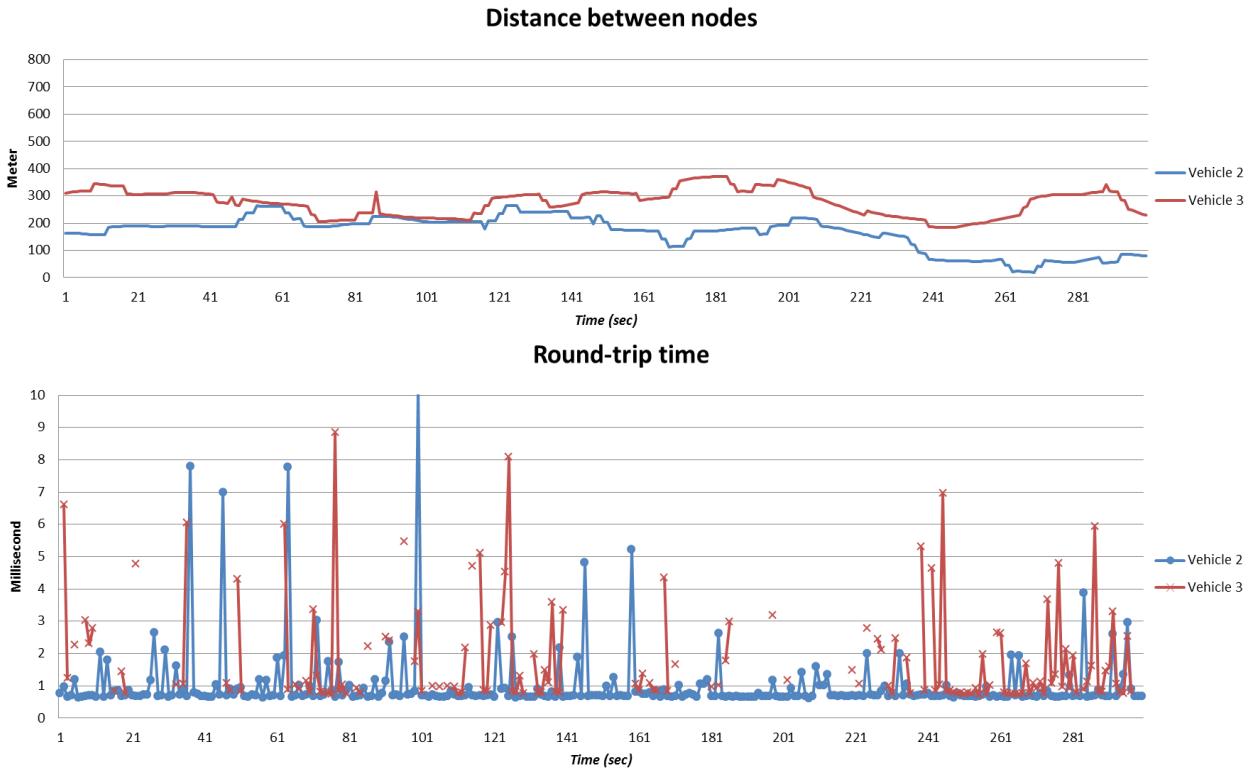


การทดสอบ ครั้งที่ 4, 5 และ 6 ใช้ความเร็วประมาณ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยระยะห่างแต่ละคัน จะห่างประมาณ 200-250 เมตร ได้ผลการทดสอบดังนี้

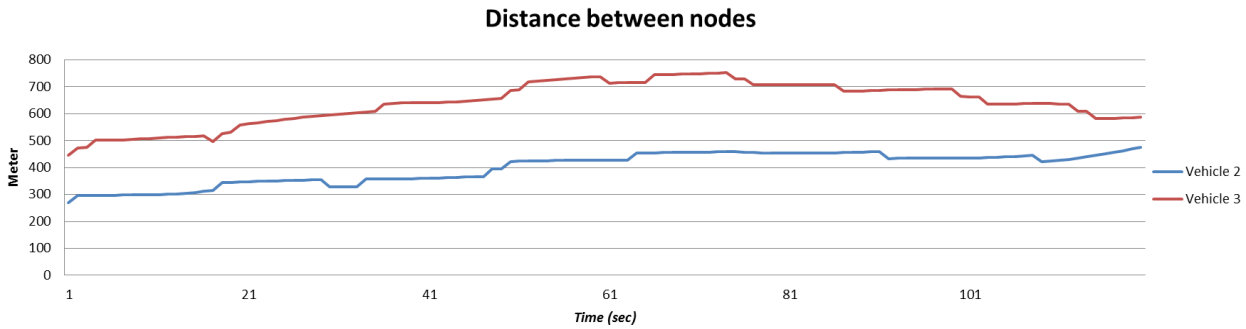
Average RTT (ms)			Loss rate (%)	
Test #	Vehicle 2	Vehicle 3	Vehicle 2	Vehicle 3
4	0.893	1.397	0	7
5	1.060	1.385	0	4
6	1.325	1.819	0	30

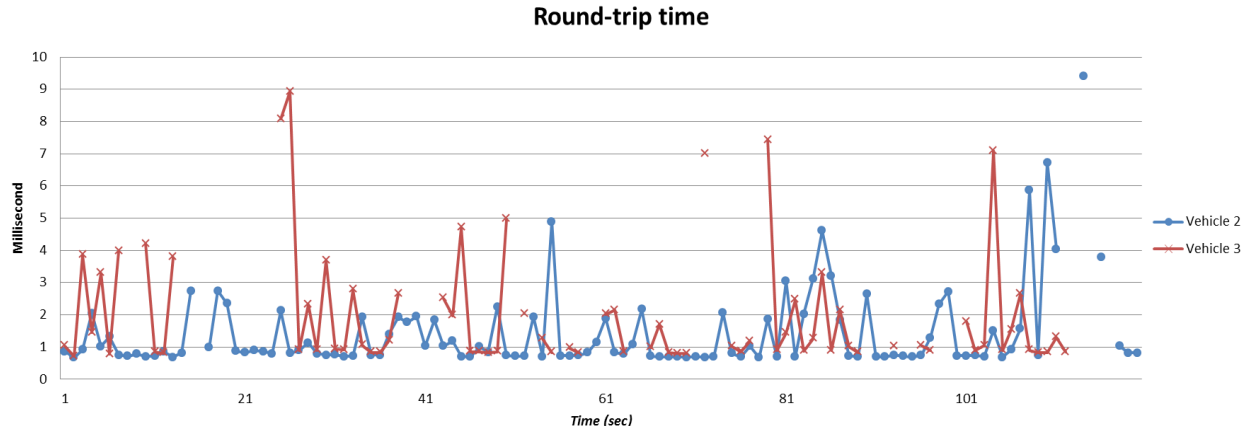
ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และระยะห่างต่อคันประมาณ 200 เมตร ผลทดสอบไปยังคันที่ 3 เริ่มได้รับผลกระทบจากการสูญหายของข้อมูลบ้าง เนื่องจากระยะทางจากคันแรกเริ่มห่างออกไป รวมไปถึงอาจจะมีสิ่งกีดขวางสัญญาณร่วมด้วย

ผลการทดสอบ Test #7



ผลการทดสอบ Test #8





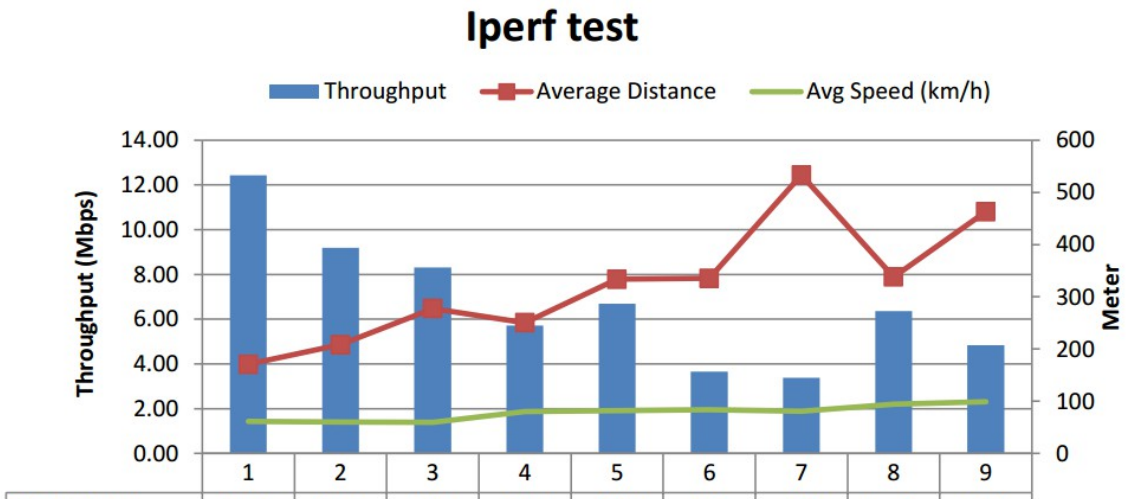
การทดสอบ ครั้งที่ 7 และ 8 ใช้ความเร็วประมาณ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยระยะห่างแต่ละคัน จะห่างประมาณ 250-300 เมตร ได้ผลการทดสอบดังนี้

Average RTT (ms)			**Loss rate (%)**	
Test #	Vehicle 2	Vehicle 3	Vehicle 2	Vehicle 3
7	1.001	1.873	0	49
8	1.422	1.973	4	36

การทดสอบที่ความเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และระยะห่างระหว่างคันประมาณ 300 เมตร จะมีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณทำให้เกิด loss ระหว่างคันที่ 1 และ 3 ค่อนข้างมาก เนื่องจากระยะห่าง, ความเร็ว และสิ่งกีดขวางบนท้องถนน

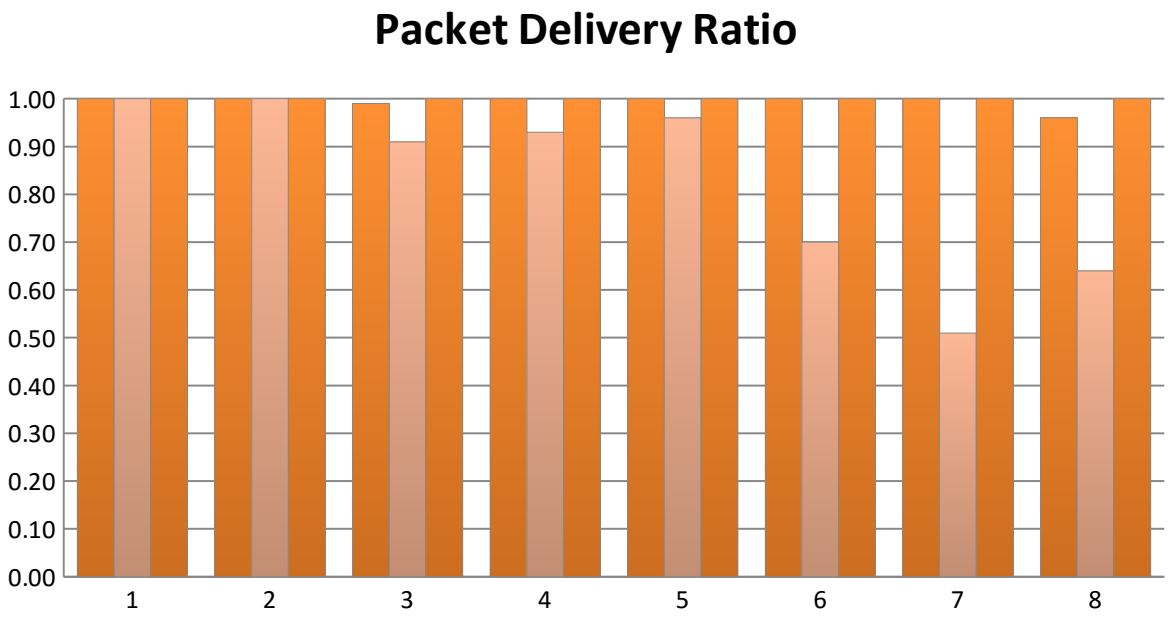
การทดสอบ Iperf

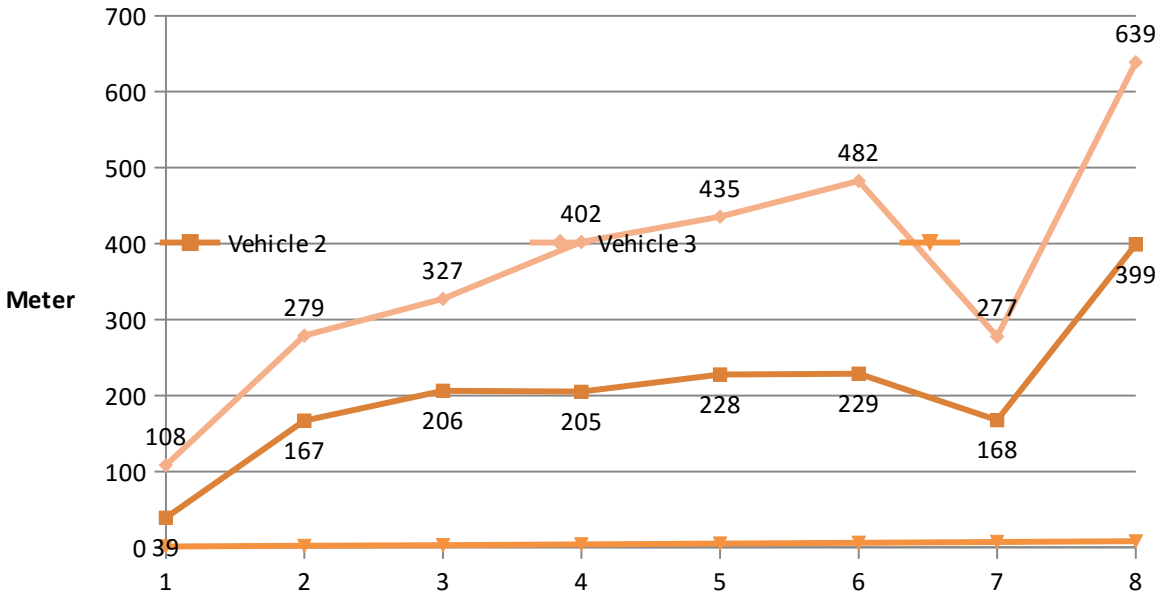
การทดสอบ Iperf เพื่อวัด throughput ของระบบ ระหว่างการขับรถในระดับความเร็วต่าง ๆ โดยเป็นการทดสอบระหว่างคันที่ 1 และ 3 เพื่อดูความเร็วในการรับส่งข้อมูลของระบบ โดยทดสอบผ่าน Transmission Control Protocol (TCP)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Throughput	12.43	9.19	8.31	5.72	6.70	3.65	3.38	6.36	4.83
Average Distance	171	208	278	250	334	336	533	338	463
Avg Speed (km/h)	61	60	60	80	82	83	81	94	99

ผลการทดสอบแสดง ถึงผลกระทบของความเร็วและระยะห่างของรถ จะส่งผลถึง throughput ที่ทดสอบออกมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเร็วของการรับส่งข้อมูลจะลดลง เมื่อระยะห่างและความเร็วรถเพิ่มขึ้น



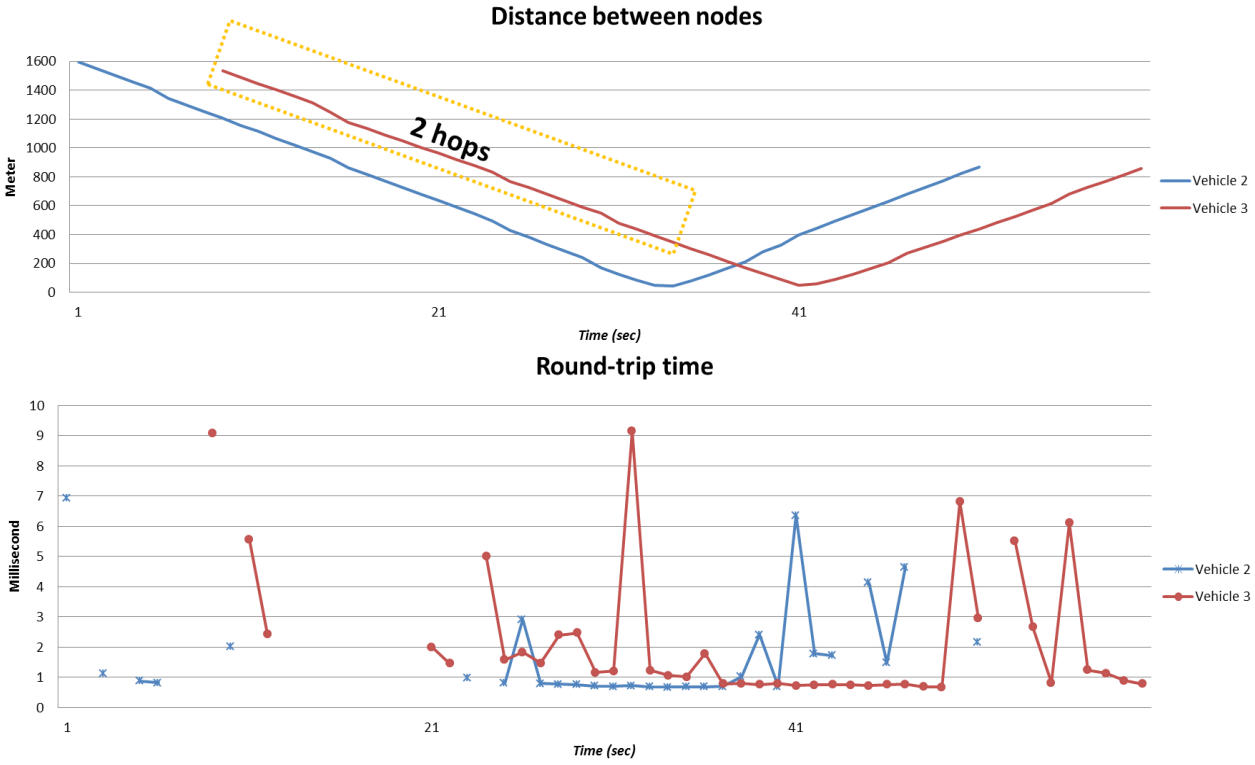


ผลการทดสอบแสดงถึงอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล จากการทดสอบ ICMP (Ping) เมื่อเทียบกับความเร็วและระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีอัตราความสำเร็จน้อยลงตามลำดับ

4.2.3 ผลการทดสอบ Scenario 2 รถวิ่งสวนทาง

เป็นการทดสอบ ICMP (ping) จากรถคันที่ 1 ไปยัง รถคันที่ 2 และ 3 โดยเป็นการขับรถวิ่งสวนทางกัน เพื่อทดสอบการเกิดของเครือข่าย และเวลาที่เครือข่ายนั้นเกิดขึ้น โดยใช้ความเร็วประมาณ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในการทดสอบวิ่งสวนทางกัน

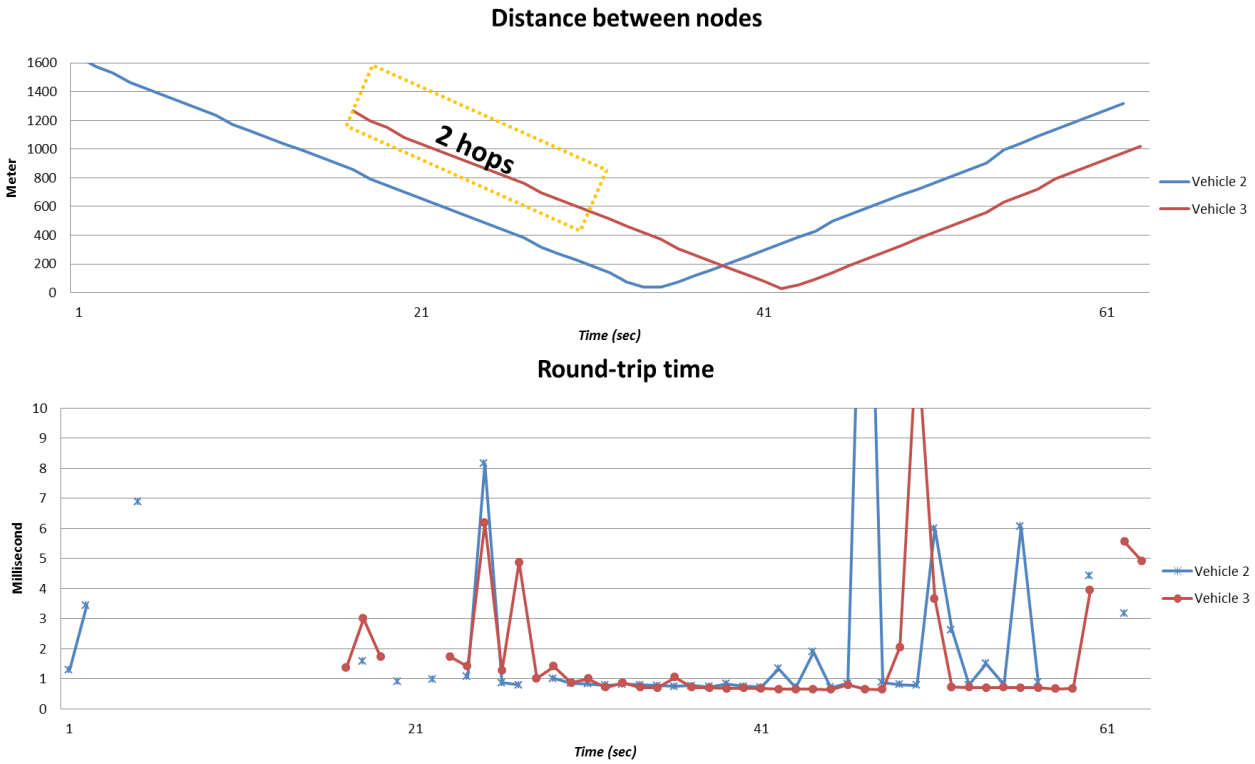
ผลการทดสอบวิ่งสวนทาง Test#1



การทดสอบรถวิ่งสวนทางกัน ครั้งที่ 1: จากกราฟจะเห็นว่าระบบมีการรับส่งข้อมูลได้ช่วงแรกที่ระยะห่างประมาณ 1600 เมตร แต่มี packet loss มากจนถึงช่วงระยะห่างที่ 600 เมตร การรับส่งข้อมูลจะดีขึ้นในช่วงระยะห่างที่ต่ำกว่า 600 เมตร แล้วหลังจากที่รถวิ่งสวนผ่านกันไป ในระยะห่างมากกว่า 600 เมตร ก็จะเกิด packet loss และ delay มากขึ้นจนไม่สามารถรับส่งข้อมูลกันได้

มีข้อสังเกตคือ รถคันที่ 1 จะเจอกับรถคันที่ 2 ก่อนคันที่ 3 ซึ่งในช่วงเวลาก่อนหน้านั้น คันที่ 2 มีการเชื่อมต่อกับคันที่ 3 อยู่แล้ว เมื่อคันที่ 2 สามารถรับส่งข้อมูลไปยังคันที่ 1 ได้ ข้อมูลจะถูกส่งผ่านไปยังคันที่ 3 โดยผ่าน 2 hop แล้วเมื่อรถคันที่ 3 วิ่งเข้ามาในระยะที่สามารถรับส่งข้อมูลกับคันที่ 1 ได้โดยตรงก็จะกลายเป็น 1 hop ด้วยตัวเอง

ผลการทดสอบวิ่งสวนทาง Test#2



การทดสอบรถวิ่งสวนทางกัน ครั้งที่ 2: จะมีรูปแบบคล้ายกับการเกิดขึ้นของเครือข่ายเหมือนกับการทดสอบรถวิ่งสวนทางครั้งที่ 1 คือมีการรับส่งข้อมูลครั้งแรก ในระยะห่างประมาณ 1600 เมตร แต่เกิด packet loss สูงไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้ หลังจากนั้นจะมีการรับส่งข้อมูลกันอีกครั้งในระยะต่ำกว่า 600 เมตร แล้วเกิด 2 hop ไปยังคันที่ 3 ที่วิ่งตามกันมา จนถึงระยะห่างที่มากกว่า 600 เมตร การสื่อสารก็จะขาดหายไป

ผลสรุปของการทดสอบรถวิ่งสวนทางกัน จะเกิดเครือข่ายที่รับส่งข้อมูลได้จริงเมื่อ ระยะห่างของแต่ละคันต่ำกว่า 600 เมตร และเกิด contact time ประมาณ 40 – 60 วินาที ในการขับรถสวนกันที่ความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบนถนนหลวง 347 ที่สภาพการจราจรไม่หนาแน่น

4.3 ผลการทดสอบแพลตฟอร์มกลุ่ม Short Message

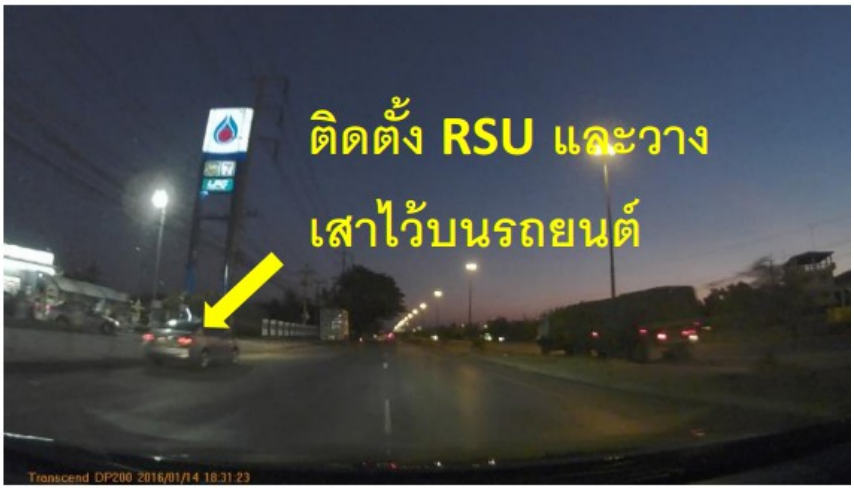
4.3.1 รูปแบบการทดสอบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบบนถนนหลวงหมายเลข 347 ซึ่งเป็นถนนนอกตัวเมือง มีลักษณะการวิ่งรถที่มีอัตราเร็วค่อนข้างสูง มีความคล่องตัวมาก ดังนั้นในการทดสอบนี้ จึงทำการทดสอบโดยอ้างอิงถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของรถยนต์บนถนนนี้ โดยกำหนดดังนี้

- รถคันที่ 1 (คันหน้าสุด) และคันที่ 4 (คันสุดท้าย) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 1 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้นหลังคาด้านหน้าของตัวรถ
- รถคันที่ 2 และ 3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 2 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้บนหลังคาด้านหน้าและด้านหลังของตัวรถอย่างละชุด
- ทำการทดสอบบนถนนหลวงหมายเลข 347 ระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตรต่อ 1 รอบ แบ่งเป็น
    - Scenario 1 - ทำการทดสอบโดยให้รถวิ่งตามกันด้วยอัตราเร็วคงที่ 60, 80, 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำการทดสอบแต่ละอัตราเร็วเป็นจำนวน 3 ถึง 5 รอบ ให้รถวิ่งห่างกัน 200 เมตร โดยวิ่งให้วิ่งที่เลนซ้ายสุด, เลนกลางและเลนขวาสุดตามลำดับ ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ต้นแบบที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการส่งข้อความสั้นๆบนรถยนต์ โดยตัวโปรแกรมจะทำการส่งข้อมูลทุกๆ 15 วินาที เฉพาะรถยนต์คันที่ 1 ด้วยขนาดข้อความอยู่ที่ 512 bytes
    - Scenario 2 - ทำการทดสอบโดยให้รถวิ่งสวนกันด้วยอัตราเร็วคงที่ 60, 80, 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำการทดสอบแต่ละอัตราเร็วเป็นจำนวน 3 ถึง 5 รอบ โดยวิ่งให้วิ่งที่เลนซ้ายสุด, เลนกลางและเลนขวาสุดตามลำดับ ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ต้นแบบที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการส่งข้อความสั้นๆบนรถยนต์ โดยตัวโปรแกรมจะทำการส่งข้อมูลทุกๆ 15 วินาที เฉพาะรถยนต์คันที่ 1 ด้วยขนาดข้อความอยู่ที่ 512 bytes
    - Scenario 3 - ทำการทดสอบโดยให้รถวิ่งกันแบบสุ่ม โดยทำการติดตั้ง Road Side Unit (RSU) นั่นก็คือ ให้รถวิ่งอยู่บนถนนด้วยระยะเวลาหนึ่งโดยไม่กำหนดสถานที่และอัตราเร็ว หลังจากนั้นให้เริ่มทดสอบโดยกำหนดอัตราเร็วรถยนต์ไว้ที่ 80 ถึง 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และทำการทดสอบโดยการให้รถวิ่งผ่าน RSU เป็นจำนวน 3 รอบด้วยกัน ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ต้นแบบที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการส่งข้อความสั้นๆบนรถยนต์ ด้วยโหมดพิเศษที่สามารถทำการ Recovery

ข้อมูลจาก RSU ได้ โดยตัวโปรแกรมจะทำการส่งข้อมูลทุกๆ 1 นาที ด้วยขนาดข้อความอยู่ที่ 512 bytes

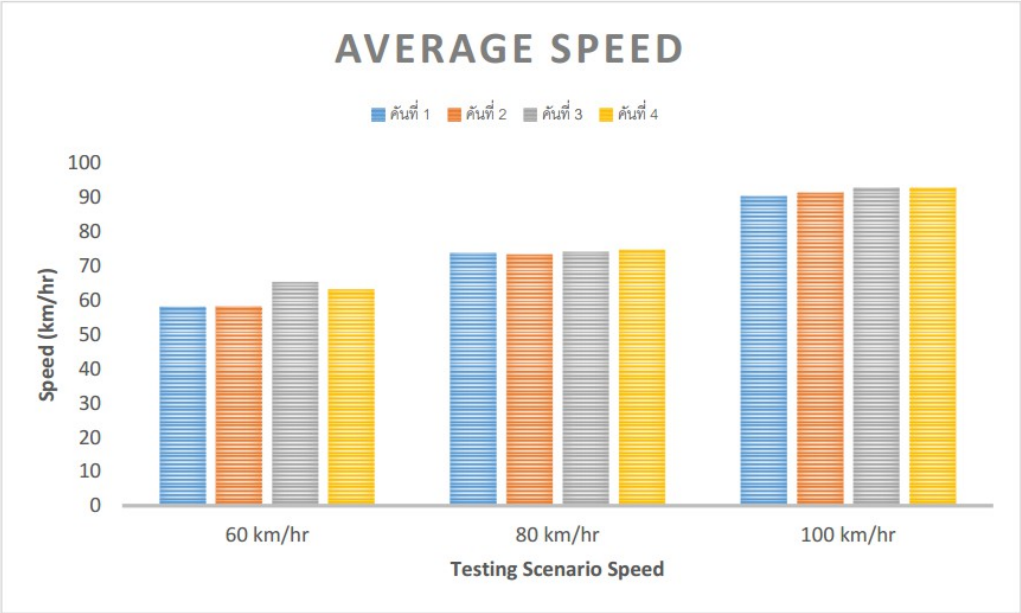
รูปที่ 3-20 แสดงแผนที่เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ทดสอบ



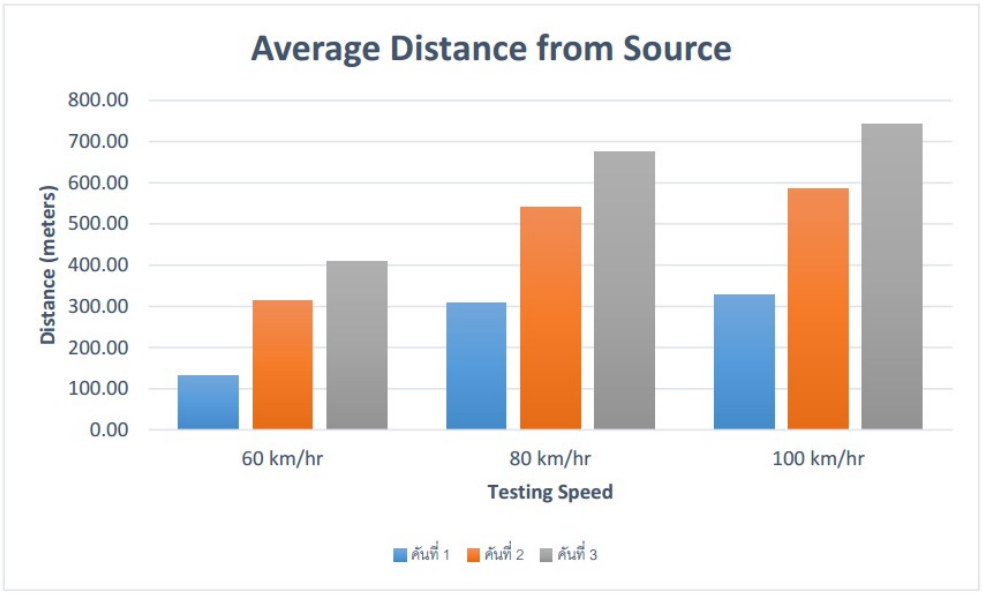
รูปที่ 3-21 แสดง RSU ถูกติดตั้งไว้บนรถยนต์ด้านหน้าปั๊มน้ำมัน ปตท

4.3.2 ผลการทดสอบ Scenario 1 รถวิ่งตามกัน

Scenario 1 รถวิ่งตามกันด้วยอัตราเร็วต่างๆ



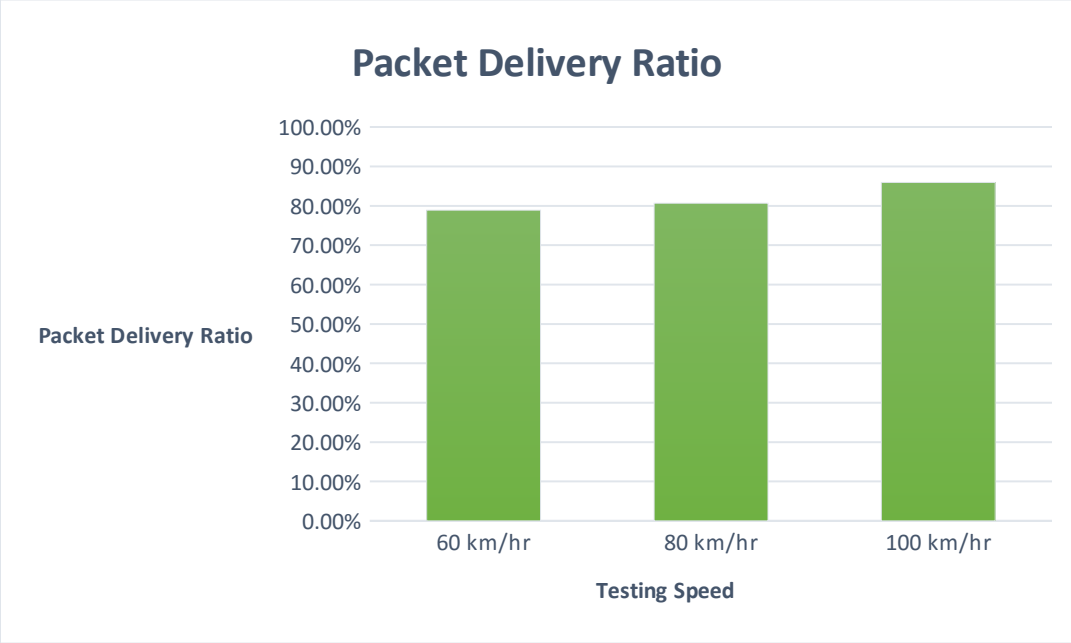
รูปแสดงอัตราเร็วเฉลี่ยที่วัดได้จาก GPS ในการทดลองให้รถวิ่งตามกันโดยกำหนดอัตราเร็วไว้ในช่วง 60, 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 61, 74 และ 92 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ



รูปแสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างของรถแต่ละคันโดยอ้างอิงจากรถคันที่ 1

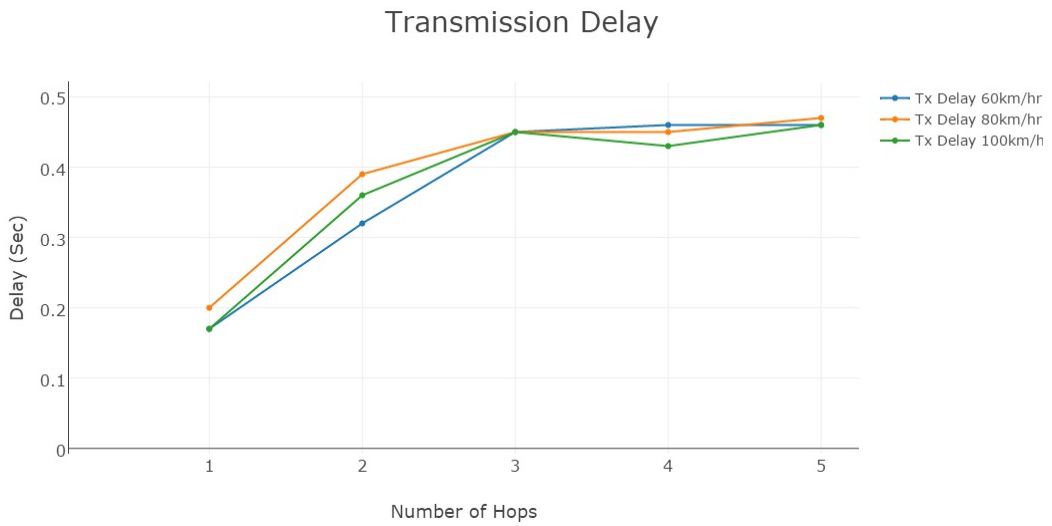
Packet Delivery Ration (PDR)

ผลทดสอบการวิ่งรถยนต์ตามกันนอกเมืองบนถนนหลวงหมายเลข 347 โดยผลสรุปนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละการทดลอง โดยการเพิ่มอัตราเร็วของรถยนต์ทดสอบ ซึ่งได้ PDR เฉลี่ยอยู่ที่ 78.85% ที่อัตราเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง, 80.61% ที่อัตราเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 85.93% ที่อัตราเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



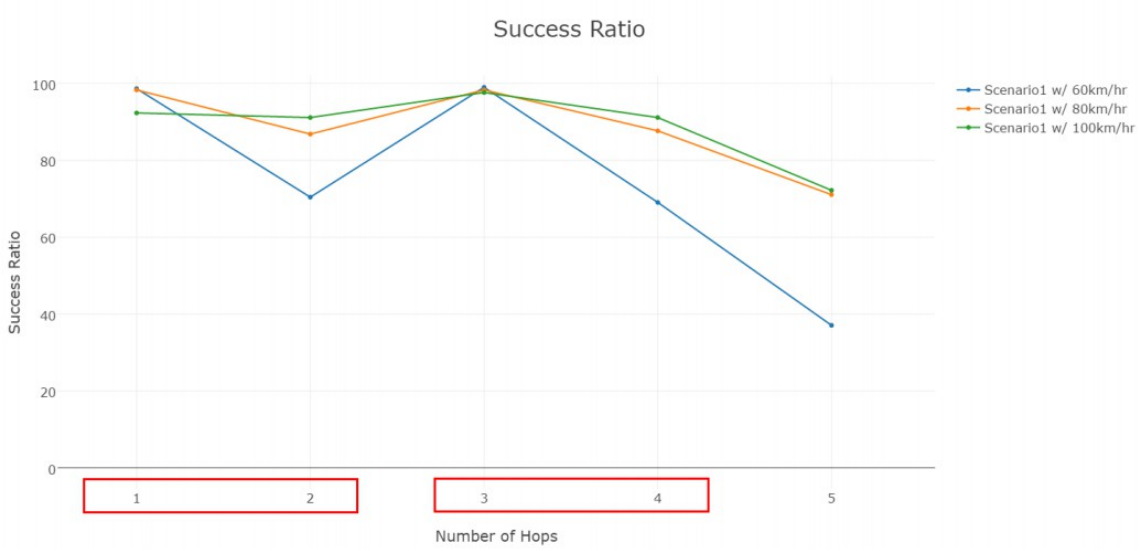
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของรถไม่ส่งผลต่อ PDR มากนัก แต่มีข้อสังเกตว่าขณะที่ขับรถด้วยอัตราเร็วต่ำ จำเป็นต้องขับชิดเลนซ้ายมือซึ่งมีรถบรรทุกเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณ และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การส่งข้อมูลทำได้ไม่ดี

Transmission Delay



รูปแสดงผลการทดสอบของรถยนต์วิ่งตามกัน ในมุมของเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปจนถึงรถคันต่อๆไป โดยแบ่งตามแต่ละอัตราเร็ว

Success Ratio

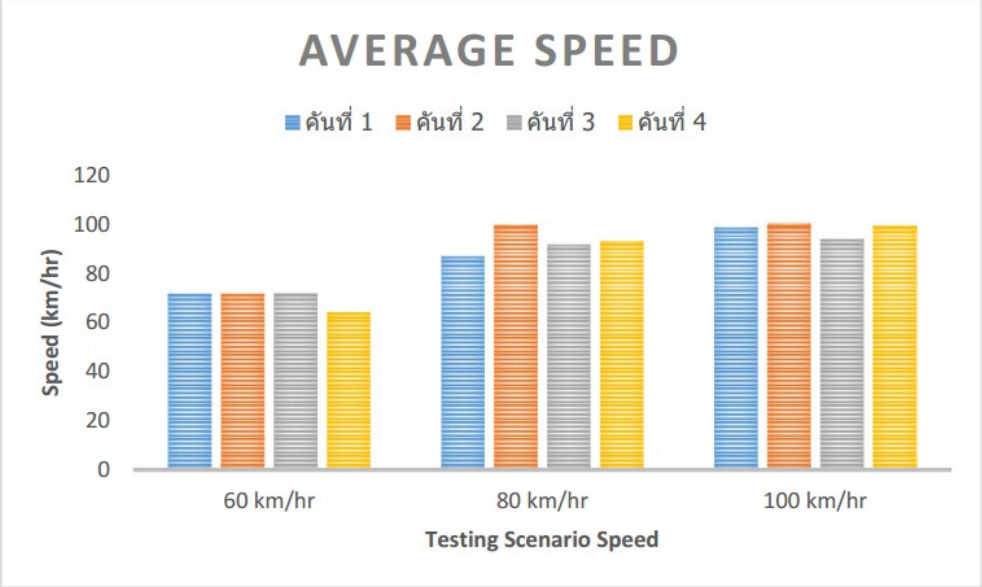


รูปแสดงถึงอัตราการสำเร็จในการส่งต่อข้อมูลในการทดสอบรถวิ่งตามกันในแต่ละอัตราเร็ว ซึ่งจากรูปจะเห็นว่ารถ #2 นั้นมีการลดลงของอัตราการส่งเป็นอย่างมาก สาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นมากจากเสาที่วางไว้บนหลังคารถยนต์คันเดียวกัน วางไว้ที่ระยะห่างไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการรบกวนขึ้น และส่งผลให้อัตราการรับส่งข้อมูลทำได้ไม่ดี

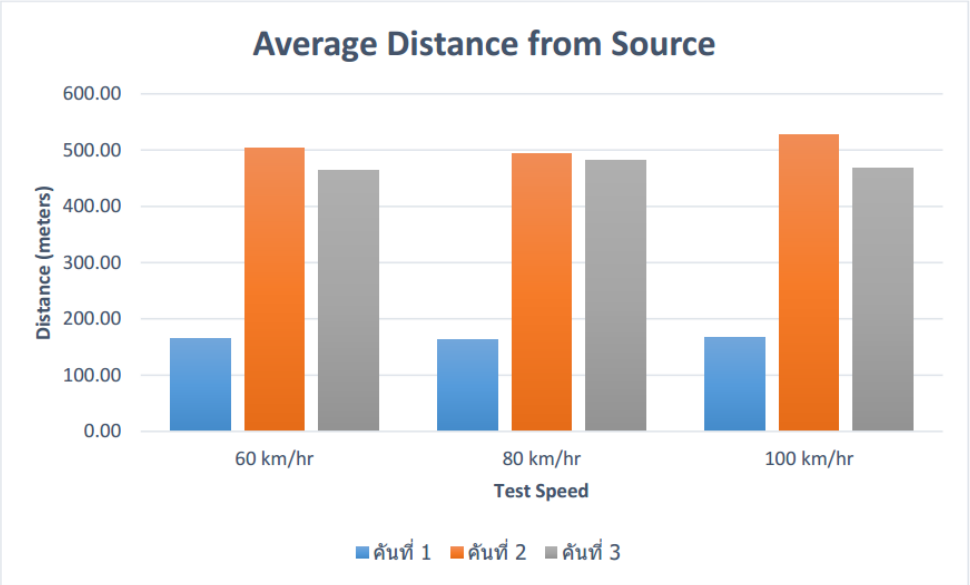
หมายเหตุ Hop ภายในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดง หมายถึง อุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในรถยนต์คันเดียวกัน

4.3.3 ผลการทดสอบ Scenario 2 รถวิ่งสวนทาง

Scenario 2 รถวิ่งสวนกันด้วยอัตราเร็วต่างๆ

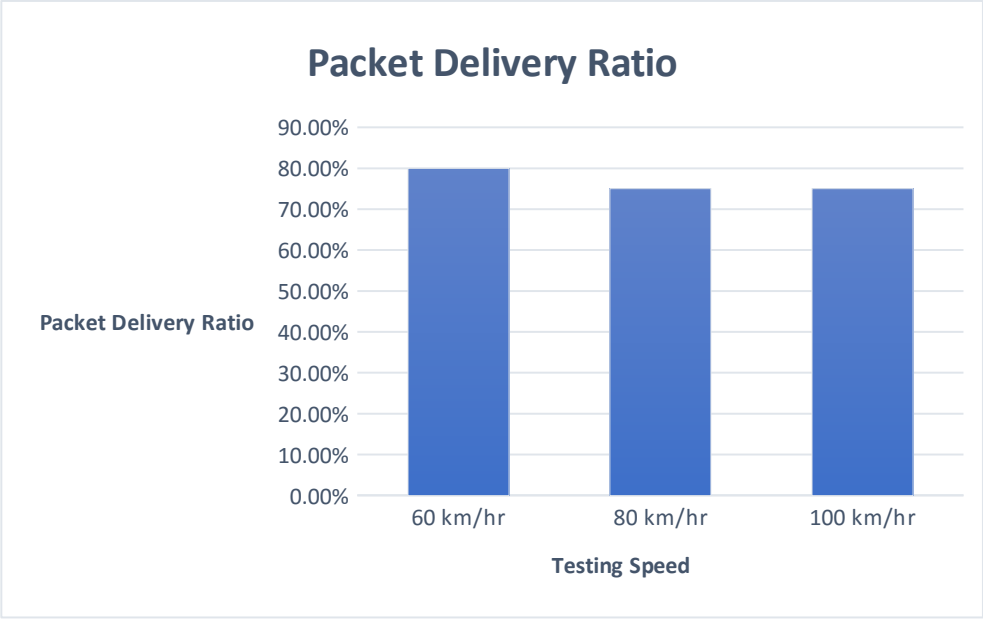


รูปแสดงอัตราเร็วเฉลี่ยที่วัดได้จาก GPS ในการทดลองให้รถวิ่งสวนกัน โดยกำหนดอัตราเร็วไว้ในช่วง 60, 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 70, 93 และ 98 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ



รูปแสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างของรถแต่ละคันในการทดสอบวิ่งรถสวนกัน โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วของรถยนต์ทดสอบ อ้างอิงจากตำแหน่งของรถคันที่ 1

Packet Delivery Ratio

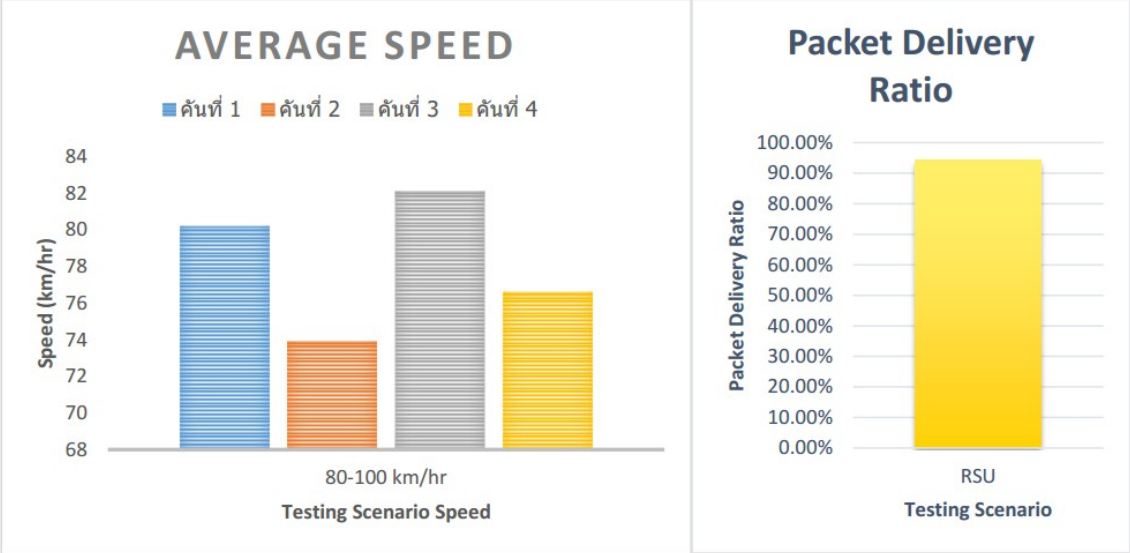


ผลทดสอบการวิ่งรถยนต์สวนกันนอกเมืองบนถนนหลวงหมายเลข 347 โดยผลสรุปนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละการทดลอง

โดยการเพิ่มอัตราเร็วของรถยนต์ทดสอบ ซึ่งได้ PDR เฉลี่ยอยู่ที่ 78.85% ที่อัตราเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง, 80.61% ที่อัตราเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 85.93% ที่อัตราเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

4.3.4 ผลการทดสอบ Scenario 3 รถวิ่งอิสระ และเพิ่ม RSU

Scenario 3 โดยให้รถวิ่งอิสระ และมีการติดตั้ง RSU เพิ่มเติม 1 จุด



รูปซ้ายแสดงอัตราเร็วเฉลี่ยที่วัดได้จาก GPS ในการทดลองให้รถวิ่งด้วยอัตราเร็วอิสระและไม่กำหนดการจัดเรียงตำแหน่ง ซึ่งเปรียบเสมือนการวิ่งรถทั่วๆไปที่ไม่มีแบบแผน โดยได้ทำการติดตั้ง RSU ไว้ที่บริเวณกึ่งกลางเส้นทางที่วิ่ง ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยอัตราเร็วที่วัดได้อยู่ที่ 78 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปขวาแสดงผลทดสอบการวิ่งรถยนต์สวนกันนอกเมืองบนถนนหลวงหมายเลข 347 โดยผลสรุปนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในการทดลองให้รถยนต์ทดสอบวิ่งด้วยอัตราเร็วระหว่าง 80-100 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและไม่กำหนดลำดับการวิ่งและทำการติดตั้ง RSU เพื่อช่วยในการ Recovery ข้อมูลร่วมด้วย ซึ่งได้ผลเฉลี่ยอยู่ที่ 94.44%

ส่วนที่ 5
การทดสอบร่วมกับรถโดยสารขสมก.

5.1 จุดประสงค์การทดสอบ

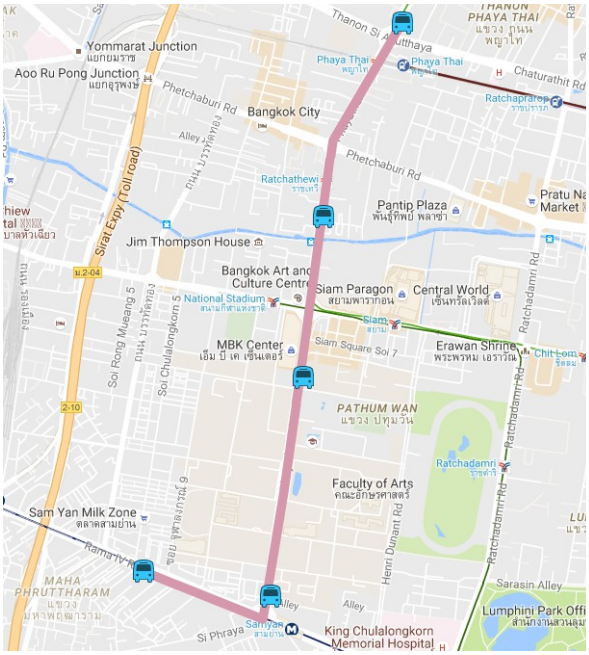
การทดสอบทำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายสื่อสารบนยานพาหนะสำหรับระบบขนส่งสาธารณะสำหรับการแพร่กระจายข้อมูล โดยใช้ความสามารถในการส่งต่อข้อมูลผ่านตัวกลางเป็นยานพาหนะ และไม่มีการพึ่งพาการทำงานของโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของการสื่อสารบนมาตรฐาน IEEE802.11p ที่จะเป็นมาตรฐานบนยานพาหนะทุกประเภทในอนาคต การสื่อสารนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายรูปแบบตั้งแต่ความปลอดภัยจนถึงความสะดวกสบาย แต่การทดสอบนี้เน้นการทดสอบประสิทธิภาพเพื่อแอพพลิเคชั่นสำหรับระบบขนส่งสาธารณะ ได้แก่ การปรับปรุงประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งรถโดยสารประจำทาง การติดตามสภาพจราจร หรือการแพร่กระจายข่าวหรือข้อมูลที่มีความจำเป็นในการเดินทางผ่านระบบขนส่งสาธารณะ ดังนั้นข้อมูลจากการทดสอบนี้สามารถเป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบระบบสื่อสารบนยานพาหนะสำหรับระบบขนส่งสาธารณะในอนาคตและการออกแบบแอพพลิเคชั่นสำหรับระบบจราจรอัจฉริยะ

5.2 สิ่งแวดล้อมในการทดสอบ

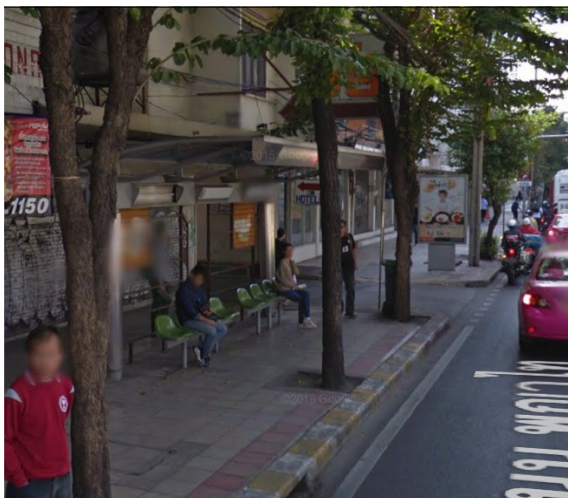
องค์ประกอบที่สำคัญในกระบวนการทดสอบมีสองส่วน คือ รถโดยสารประจำทาง และป้ายรถโดยสารประจำทาง ซึ่งอุปกรณ์สื่อสารจะถูกติดตั้งบนทั้งรถโดยสารประจำทาง และป้ายรถโดยสารประจำทาง อุปกรณ์การสื่อสารระหว่างป้ายรถโดยสารประจำทางไม่สามารถสื่อสารกันได้โดยตรง จำเป็นต้องพึ่งพาการส่งต่อข้อมูลผ่านรถโดยสารประจำทางที่เดินทางมายังบริเวณการสื่อสารของป้ายรถโดยสารประจำทาง ตำแหน่งของป้ายรถโดยสารประจำทางที่ใช้ในการทดสอบอยู่ฝั่งถนนเดียวกัน ซึ่งเป็นฝั่งของถนนที่มีในทิศการเดินทางจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิไปยังสถานีรถไฟหัวลำโพง ตำแหน่งของป้ายรถโดยสารประจำทางที่ใช้ในการทดสอบ มีดังนี้

1) ป้ายรถโดยสารประจำทางบริเวณสี่แยกพญาไท
2) ป้ายรถโดยสารประจำทางบริเวณสถานีราชเทวี
3) ป้ายรถโดยสารประจำทางบริเวณคณะเภสัชศาสตร์
4) ป้ายรถโดยสารประจำทางบริเวณคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี
5) ป้ายรถโดยสารประจำทางบริเวณคริสตจักรสะพานเหลือง

ตำแหน่งบนแผนที่และระยะห่างระหว่างป้ายรถโดยสารประจำทางสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5-1 ซึ่งมีระยะทางรวมในเส้นทางการทดสอบรวมประมาณ 3.65 กิโลเมตร และรูปที่ 5-2 ถึง 5-6 แสดงสภาพสิ่งแวดล้อมและการติดตั้งอุปกรณ์ในบริเวณป้ายโดยสารรถประจำทางทั้ง 5 ป้าย



รูปที่ 5-1 ตำแหน่งและระยะห่างระหว่างป้ายรถโดยสารสาธารณะที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5-2 การติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารและสิ่งแวดล้อมบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางแยกพญาไท

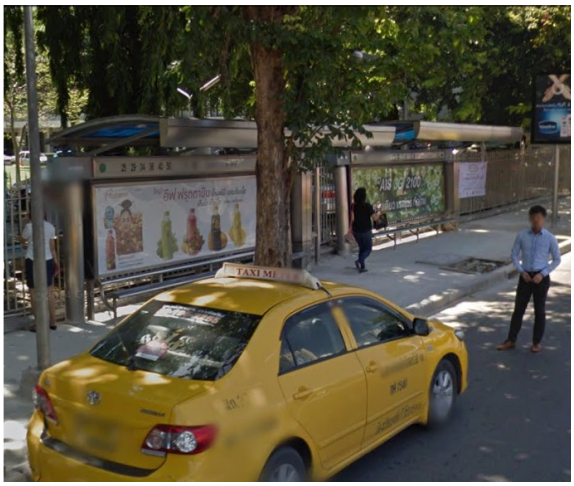
Bus Stop 2 Ratchathewi Station

รูปที่ 5-3 การติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารและสิ่งแวดล้อมบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางสถานีรถไฟฟ้าราชเทวี

Bus Stop 3 Faculty of Pharmacy

รูปที่ 5-4 การติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารและสิ่งแวดล้อมบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางคณะเภสัชศาสตร์

Bus Stop 4 Faculty of Commerce and Accountancy



รูปที่ 5-5 การติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารและสิ่งแวดล้อมบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี

Bus Stop 5 Sapan Luang Chinese Church

รูปที่ 5-6 การติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารและสิ่งแวดล้อมบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางคริสตจักรสะพานเหลือง

5.3 กระบวนการทดสอบ

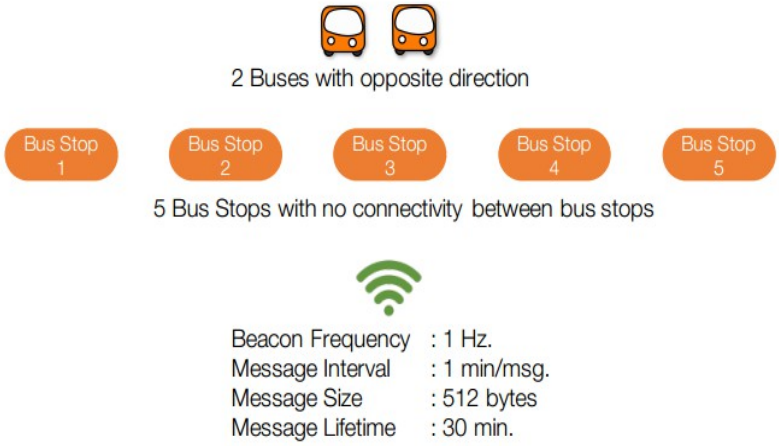
กระบวนการทดสอบมีขั้นตอนและรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1) อุปกรณ์สื่อสารบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางสร้างข้อมูลขึ้นทุก ๆ 1 นาทีและข้อมูลจะมีอายุ 30 นาที อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้รับข้อมูลแล้วจะต้องเก็บข้อมูลและส่งต่อข้อมูลจนกว่าข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นนั้นหมดอายุ
2) ผู้ทดสอบจะมีสองกลุ่ม ซึ่งจะนำอุปกรณ์สื่อสารเดินทางไปกับรถโดยสารประจำทาง ดังรูปที่ 5-7 กลุ่มแรกจะมีจุดเริ่มต้นที่อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิถึงสถานีรถไฟหัวลำโพง ขณะที่กลุ่มที่สองจะเดินทางในทิศตรงกันข้าม เพื่อทดสอบการส่งข้อมูลระหว่างรถโดยสารประจำทางที่มีทิศตรงข้ามกัน ทั้งสองกลุ่มจะเดินทางโดยรถโดยสารประจำทางแบบไม่รู้หมายเลขสาย แต่จะเริ่มต้นเดินทางที่เวลาใกล้เคียงกัน
3) ในขณะที่รถโดยสารประจำทางเดินทางผ่านบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางจะได้รับข้อมูล และเก็บข้อมูลนั้นไว้เพื่อส่งต่อให้กับรถโดยสารประจำทางอีกคันที่พบระหว่างทาง และป้ายรถโดยสารประจำทางถัดไปที่ผ่าน โดยกระบวนการทำงานพึ่งพาโพรโทคอลการแพร่ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้โดยใช้ข้อมูลความหนาแน่นบนเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ (DECA:Density-Aware Reliable Broadcasting Protocol on Vehicular Ad Hoc Network)
4) การทดสอบจะจบลงเมื่อรถโดยสารประจำทางเดินทางถึงปลายทาง คือ อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิหรือสถานีรถไฟหัวลำโพง

รูปที่ 5-7 การเดินทางและควบคุมอุปกรณ์ทดสอบบนรถโดยสารประจำทาง

สิ่งแวดล้อมในการทดสอบและการตั้งค่าการทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5-8 ประกอบด้วยรถโดยสารประจำทางจำนวน 2 คันที่เดินทางในทิศตรงกันข้ามกัน ป้ายรถโดยสารประจำทางจำนวน 5 ป้าย ในกระบวนการมีการส่งบีคอน 1 ครั้งต่อ

วินาที มีการสร้างข้อความสำหรับการส่งต่อทุกๆ 1 นาที ข้อความมีขนาด 512 ไบต์และมีอายุ 30 นาทีที่อุปกรณ์สื่อสารต้องเก็บไว้จนกว่าข้อความจะหมดอายุลง ใช้โพรโทคอล DECA ในการสื่อสารและใช้ DENSO Wireless Safety Unit (WSU-5001) เป็นอุปกรณ์สื่อสารมาตรฐาน IEEE802.11p



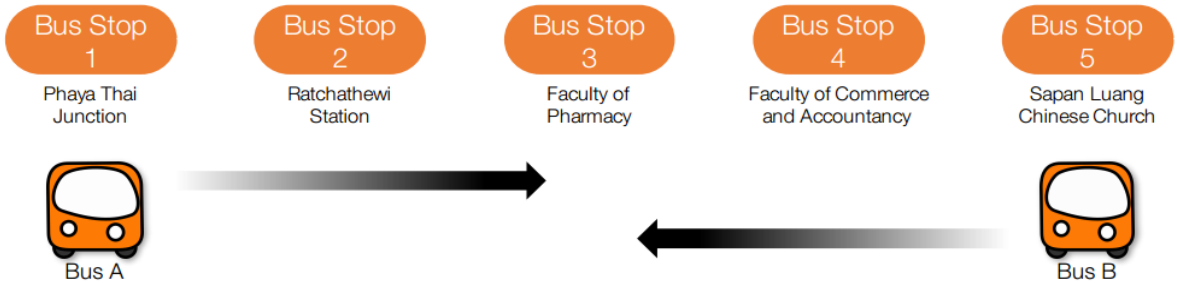
รูปที่ 5-8 สิ่งแวดล้อมในการทดสอบและการตั้งค่าการทดสอบ

5.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการสื่อสารแบ่งออกเป็นส่วนที่สำคัญคือ ลักษณะพฤติกรรมการสื่อสาร และประสิทธิภาพในการสื่อสาร การพิจารณาลักษณะพฤติกรรมการสื่อสารจะสังเกตจากระยะเวลาในการทดสอบ ระยะเวลาที่สามารถสื่อสารได้ และระดับสัญญาณในการสื่อสาร ส่วนประสิทธิภาพในการสื่อสารสังเกตได้จากอัตราส่วนของข้อความที่ได้รับต่อข้อความทั้งหมด และอัตราส่วนของอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนรถโดยสารประจำทางและป้ายรถโดยสารประจำที่ส่งข้อมูลให้แก่ระบบ

ระยะเวลาในการทดสอบ

ระยะเวลาในการทดสอบเริ่มตั้งแต่เมื่อผู้ทดสอบขึ้นรถโดยสารประจำทางและจบลงเมื่อผู้ทดสอบลงจากรถโดยสารประจำทาง จากผลการทดสองดังรูปที่ 5-9 เวลาเฉลี่ยในการทดสอบประมาณ 20 นาที โดยเวลาที่แตกต่างเกิดจากสภาพการจราจร และปัจจัยหลักคือสัญญาณไฟจราจรที่ส่งผลให้รถโดยสารประจำทางใช้เวลาบริเวณสี่แยกนานกว่ากรณีปรกติ นอกจากนี้การขึ้นลงของผู้โดยสารก็มีผลต่อระยะเวลาในการเดินทางซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาในการทดสอบด้วย ซึ่งระยะเวลาเหล่านี้ส่งผลต่อระยะเวลาที่สามารถสื่อสารได้ของอุปกรณ์สื่อสารบนรถโดยสารประจำทางและอุปกรณ์สื่อสารบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทาง



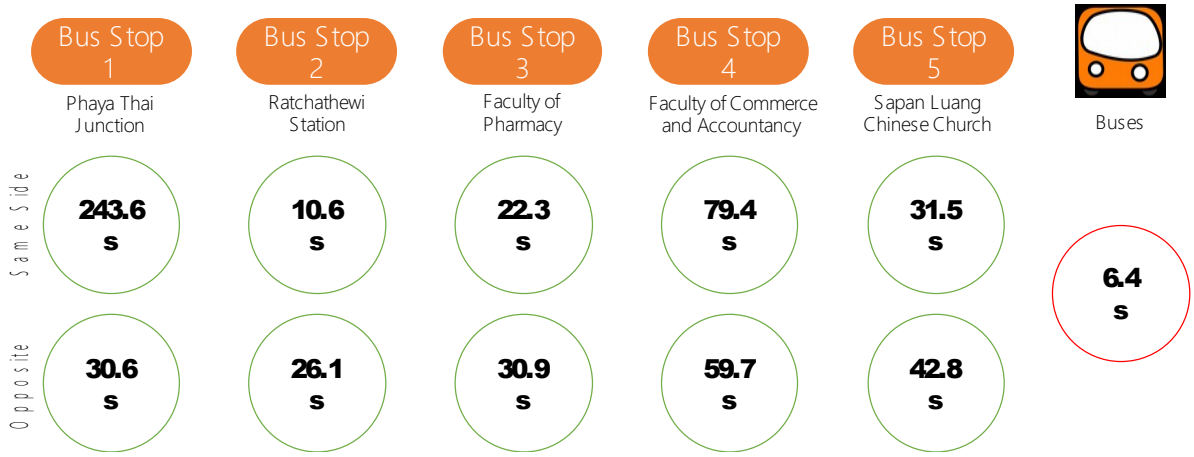
	BUS A				BUS B		
22/05/2016	Start time	Stop time	Interval (min)		Start Time	Stop Time	Interval (min)
Test 1	10:43:17	11:06:39	23:22		10:43:44	11:06:32	22:48
Test 2	11:16:43	11:38:09	21:26		11:14:57	11:47:23	32:26
Test 3	11:53:13	12:12:42	19:29		11:53:18	12:18:01	24:43
Test 4	12:50:22	13:23:16	32:54		12:51:11	13:08:31	17:20
Test 5	13:44:02	14:13:13	29:11		13:45:58	14:13:22	27:24
		Average	**21:26.0**			**Average**	**24:56.2**

รูปที่ 5-9 ระยะเวลาในการเดินทางของรถโดยสารประจำทางในการทดสอบแต่ละครั้ง

ระยะเวลาที่สามารถสื่อสารได้

ระยะเวลาที่สามารถสื่อสารได้เป็นระยะเวลานับตั้งแต่ที่อุปกรณ์สื่อสารได้รับข้อมูลแรกจากการเชื่อมต่อจนถึงระยะเวลาที่ได้รับข้อมูลสุดท้ายจากการเชื่อมต่อนั้น ระยะเวลาในการสื่อสารแสดงให้เห็นถึงโอกาสในการส่งข้อมูลเมื่อมีการส่งข้อมูลเกิดขึ้น ผลของระยะเวลาที่สามารถสื่อสารได้แสดงในรูปที่ 5-10 ซึ่งระยะเวลาในสื่อสารโดยเฉลี่ยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1) สภาพการจราจร หากสภาพการจรากจรมีความติดขัดหรือติดสัญญาณไฟจราจร ส่งผลให้ความเฉลี่ยของรถโดยสารประจำทางต่ำ ซึ่งมีผลให้การเชื่อมในนานมากกว่าบริเวณที่มีการใช้ความเร็วสูงกว่า ดังเช่นบริเวณแยกพญาไทระยะเวลาเชื่อมต่อประมาณ 243.6 วินาที
2) ตำแหน่งของป้ายรถโดยสารประจำทาง หากตำแหน่งที่ตั้งของป้ายรถโดยสารประจำทางมีผู้โดยสารขึ้นลงเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้รถโดยสารประจำทางจอดอยู่ในบริเวณนั้นนานกว่าปกติ หรือเดินทางผ่านโดยไม่หยุดจอด ซึ่งมีผลให้การเชื่อมในนานมากกว่าบริเวณที่มีผู้โดยสารน้อยกว่า
3) ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ เนื่องจากในการทดสอบนี้ทดสอบโดยไม่มีการดัดแปลงรถโดยสารประจำทางเดิม แต่ใช้การนำอุปกรณ์ติดตัวไปกับผู้ทดสอบ ดังนั้นอุปกรณ์จึงอยู่ภายในตัวรถโดยสารประจำทาง ส่งผลให้การเชื่อมต่อระหว่างรถโดยสารประจำทางสองคันที่วิ่งกันในคนละทิศทางมีระยะการเชื่อมต่อสั้นมาก ส่งผลถึงระยะเวลาในการสื่อสารสั้นเพียง 6.4 วินาที ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ภายนอกของตัวรถโดยสารประจำทาง

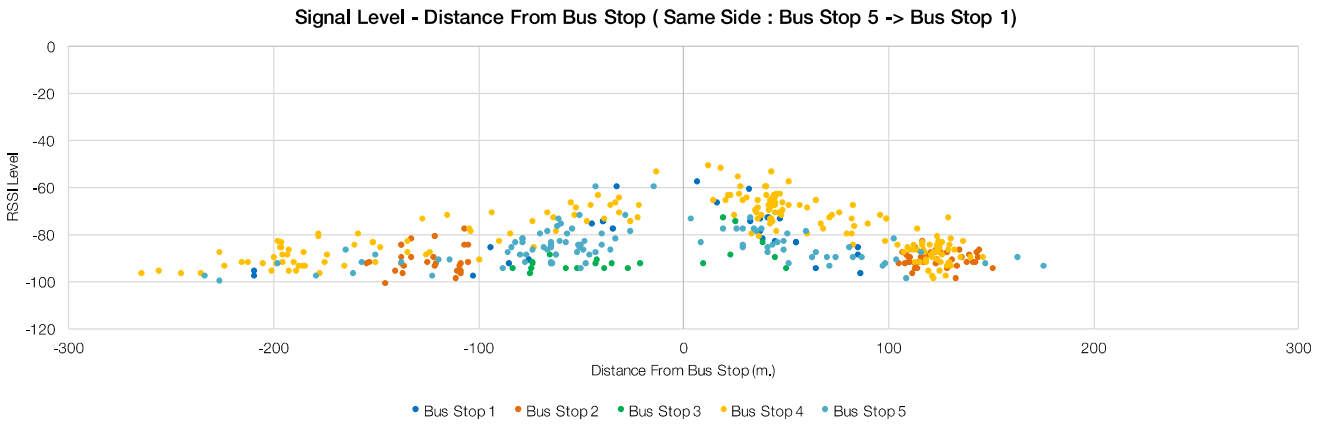


รูปที่ 5-10 ระยะเวลาในการสื่อสารเฉลี่ยระหว่างป้ายรถโดยสารประจำทางและรถโดยสารประจำทาง

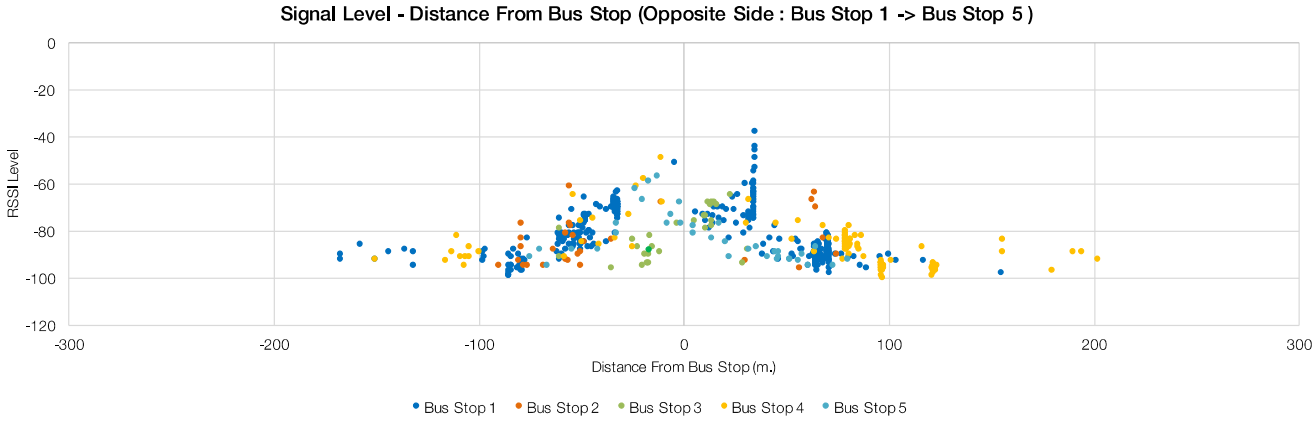
ระดับสัญญาณในการสื่อสาร

ระดับสัญญาณในการสื่อสาร (RSSI Level) วัดจากความแรงของสัญญาณเมื่ออุปกรณ์สื่อสารได้รับข้อมูลจากอุปกรณ์สื่อสารอื่นๆ รูปที่ 5-11 ก และรูปที่ 5-11 ข แสดงระดับสัญญาณที่อุปกรณ์สื่อสารบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทางรับได้จากอุปกรณ์สื่อสารจากรถประจำทาง ซึ่งระดับสัญญาณขึ้นกันสิ่งแวดล้มรอบๆเสาสัญญาณที่ติดตั้งอยู่บริเวณป้ายรถโดยสารประจำทาง ในกรณีตัวอย่างป้ายรถโดยสารประจำทางที่ 3 หรือป้ายบริเวณคณะเภสัชศาสตร์มีการกั้นกำแพงก่อสร้างซึ่งจะส่งผลให้การระดับสัญญาณต่ำกว่าป้ายอื่นๆที่ระยะทางเดียวกัน ในทางกลับกันป้ายรถโดยสารประจำทางที่ 4 ซึ่งอยู่บริเวณหน้าคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชีเป็นพื้นที่เปิดโล่งจึงสามารถรับที่ระดับสัญญาณสูงกว่า และระยะในการสื่อสารไกลกว่าป้ายรถโดยสารประจำทางอื่นๆ

กรณีที่พิจารณาระดับสัญญาณในการสื่อสารระหว่างรถโดยสารประจำทางสองคันมีผลดังรูปที่ 5-12 เนื่องจากอุปกรณ์สื่อสารและเสาสัญญาณอยู่ภายในตัวรถ ระดับสัญญาณที่ได้รับจึงต่ำและมีระยะการสื่อสารที่สั้นกว่าการสื่อสารกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งบริเวณป้ายรถโดยสารประจำทาง จากผลการทดสอบทั้งสองแบบสังเกตได้ว่าอุปกรณ์จะไม่สามารถรับข้อมูลได้หากมีระดับของสัญญาณที่ต่ำกว่า 100 dBm

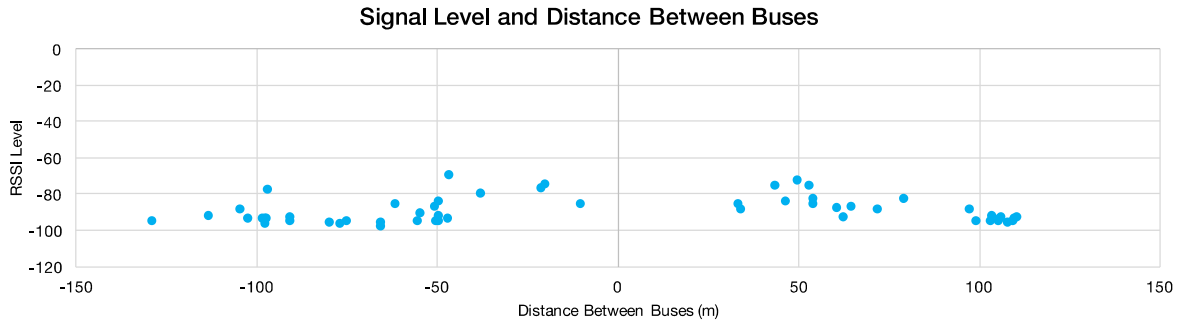


ก) รถโดยสารประจำทางเดินทางด้านเดียวกันกับป้ายรถโดยสารประจำทาง



ข) รถโดยสารประจำทางเดินทางด้านตรงข้ามกับป้ายรถโดยสารประจำทาง

รูปที่ 5-11 กราฟแสดงระดับสัญญาณในการสื่อสารและระยะทางระหว่างรถโดยสารประจำทางและป้ายรถโดยสารประจำทาง

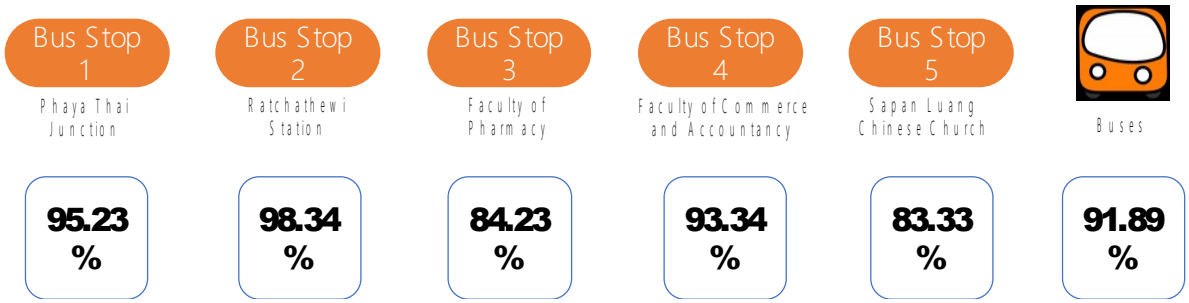


รูปที่ 5-12 กราฟแสดงระดับสัญญาณในการสื่อสารและระยะทางระหว่างรถโดยสารประจำทางในทิศตรงกันข้าม

อัตราการได้รับข้อความต่อข้อความทั้งหมดในระบบ

อัตราการได้รับข้อความคำนวณจากจำนวนข้อความที่อุปกรณ์ต่างๆได้รับต่อจำนวนข้อความทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้นในระบบ ตัวอย่างในการคำนวณมีดังนี้ ในกรณีที่อุปกรณ์ที่ป้ายรถสร้างข้อความทั้งหมด 10 ข้อความก่อนที่รถโดยสารประจำทางจะวิ่งผ่าน จากนั้นรถโดนสารประจำทางได้ส่งข้อมูลนี้ให้แก่ป้ายรถโดยสารประจำทางถัดไปได้เพียงแค่ 8 ข้อความ ดังนั้นอัตราการส่งข้อมูลที่สำเร็จจะมีค่าเท่ากับ 80% ข้อสังเกตคืออุปกรณ์บนรถโดยสารอาจจะมีการส่งข้อความเดิมมากกว่าหนึ่งครั้งหากทราบว่าอุปกรณ์ที่ป้ายรถโดยสารประจำทางยังไม่ได้รับข้อความนั้น ซึ่งเป็นกระบวนการแก้ไขการสูญหายของข้อมูลของโพรโทคอล DECA ดังนั้นผลการทดสอบจึงเป็นอัตราส่วนของข้อความที่ได้รับต่อข้อความทั้งหมดที่มีในระบบไม่ใช่อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งซึ่งเป็นการทดสอบในระดับ physical layer ของเครือข่าย

ผลการทดสอบอัตราการส่งข้อมูลที่สำเร็จแสดงดังรูปที่ 5-13 โดยผลการทดสอบเป็นผลเฉลี่ยจากการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของข้อความที่แต่ละป้ายรถโดยสารประจำทางได้รับต่อจำนวนข้อความที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระยะเวลาที่รถโดยสารสามารถรับและส่งต่อได้ จากผลการทดสอบค่อนข้างสอดคล้องกับระยะเวลาในการสื่อสาร นั่นคือป้ายรถโดยสารประจำทางที่สามารถสื่อสารได้ยาวนานกว่าก็จะมีอัตราการได้รับข้อความมากกว่าป้ายรถโดยสารประจำทางที่มีระยะเวลาการสื่อสารสั้นกว่า ส่วนผลการทดสอบของรถโดยสารประจำทางคำนวณจากจำนวนข้อความที่รถโดยสารประจำทางได้รับต่อจำนวนข้อความทั้งหมดที่มีในระบบซึ่งรถโดยสารประจำทางทั้งสองคันจะมีข้อความที่ได้รับแตกต่างกันเนื่องจากทิศในการเดินทางที่แตกต่างกันและเวลาที่ผ่านป้ายรถโดยสารประจำทางที่แตกต่างกัน ดังนั้นป้ายรถโดยสารประจำทางจึงได้รับข้อความที่ต่างกันจากรถโดยสารทั้งสองคันส่งผลให้อัตราการได้รับข้อความจึงสูงกว่ารถโดยสารประจำทาง



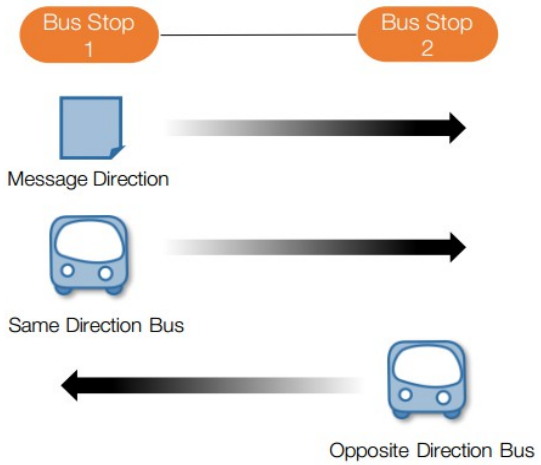
รูปที่ 5-13 ผลการทดสอบอัตราการได้รับข้อความต่อข้อความทั้งหมดในระบบ

อัตราส่วนของรถโดยสารประจำทางที่ส่งข้อความให้แก่ป้ายรถโดยสารประจำทาง

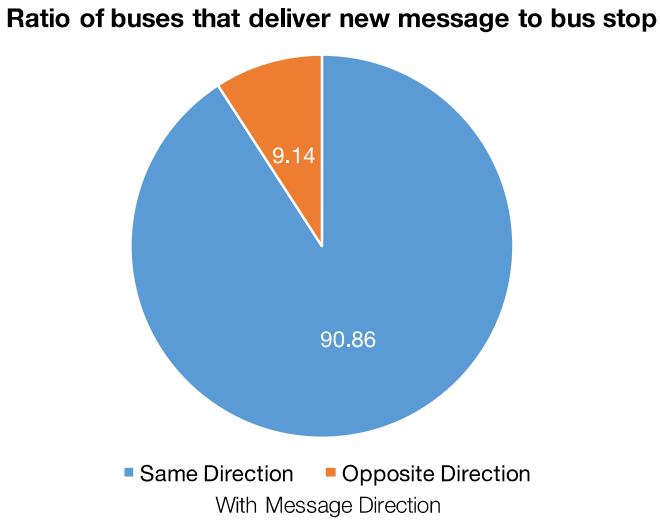
อัตราส่วนของรถโดยสารประจำทางที่ส่งข้อความให้แก่ป้ายรถโดยสารประจำทางสามารถจำแนกรถโดยสารประจำทางได้เป็น 2 ประเภท คือ รถโดยสารประจำทางที่มีทิศการเดินทางเดียวกับทิศการเดินทางของข้อความ และรถโดยสารประจำทางที่มีทิศการเดินทางตรงข้ามกับทิศการเดินทางของข้อความ กรณีตัวอย่างดังรูปที่ 5-14 ข้อความที่ถูกสร้างขึ้นจากป้ายรถโดยสารประจำทางที่ 1 มีทิศของการส่งข้อความไปยังป้ายรถโดยสารประจำทางที่ 2 ดังนั้นจะมีทิศการเดินทางของรถโดยสารประจำทางดังรูป

และหากป้ายรถโดยสารประจำทางที่ 2 ส่งข้อความไปยังป้ายรถโดยสารประจำทางที่ 1 ทิศทางของรถประจำทางก็จะตรงกันข้ามกับกรณีแรก

ผลการทดสอบดังรูปที่ 5-15 พบว่า 90.86% เป็นการส่งข้อมูลที่เกิดจากรถโดยสารประจำทางที่มีทิศการเดินเดียวกับทิศของการส่งข้อความ เนื่องจากรถโดยสารประจำทางจะได้รับข้อความเหล่านี้จากป้ายรถโดยสารประจำทางจากนั้นจึงเก็บข้อความเหล่านี้และส่งให้กับป้ายรถโดยสารประจำทางถัดไป ส่วนในกรณีที่เป็นรถโดยสารประจำทางในทิศตรงกันข้ามเกิดขึ้นในกรณีที่รถโดยสารประจำทางมีการแลกเปลี่ยนข้อความที่ได้รับจากป้ายรถโดยสารประจำทางที่แต่ละคันผ่าน จากนั้นจึงส่งข้อความเหล่าต่อให้กับป้ายรถโดยสารประจำทาง ซึ่งมีอัตราส่วนที่ 9.14%



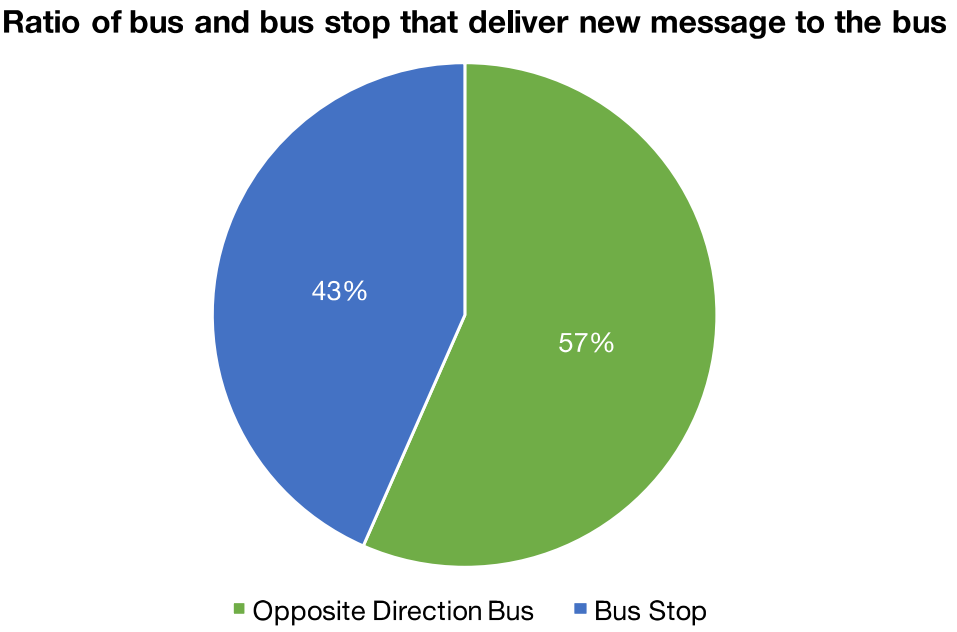
รูปที่ 5-14 ตัวอย่างของทิศการส่งข้อความและทิศการเดินทางของรถโดยสารประจำทาง



รูปที่ 5-15 อัตราส่วนของรถโดยสารประจำทางที่ส่งข้อความให้แก่ป้ายรถโดยสารประจำทางโดยพิจารณาทิศของการส่งข้อความและทิศการเดินทางของรถโดยสารประจำทาง

อัตราส่วนข้อความที่รถโดยสารประจำทางได้รับจากรถโดยสารประจำทางหรือป้ายรถโดยสารประจำทาง

เนื่องจากในระหว่างการเดินทางรถโดยสารประจำทางจะได้รับข้อความใหม่จากป้ายรถโดยสารประจำทางที่ผ่าน แต่รถโดยสารประจำทางทั้งสองมีทิศการเดินทางที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เมื่อรถโดยสารประจำทางทั้งสองสามารถสื่อสารกันได้จะมีการแลกเปลี่ยนข้อความที่ตนเองได้รับก่อนที่รถโดยสารประจำทางนั้นจะพบกับป้ายรถโดยสารประจำทางที่สร้างข้อมูลนั้นขึ้น ดังนั้นผลการทดสอบจึงให้อัตราส่วนของข้อความที่ได้รับจากรถโดยสารประจำทางและป้ายรถโดยสารประจำทางเป็น 57% และ 43% ตามลำดับ ดังรูปที่ 5-16



รูปที่ 5-16 อัตราส่วนข้อความที่รถโดยสารประจำทางได้รับจากรถโดยสารประจำทางหรือป้ายรถโดยสารประจำทาง

5.5 อุปสรรคและปัญหาในการทดสอบ

ในการทดสอบจำนวน 5 ครั้งพบปัญหาที่สำคัญ คือ ความไม่เสถียรจากการใช้พลังงานผ่านแบตเตอรี่ และความผิดพลาดในการทดงานของหน่วยความจำ SD-Card ซึ่งปัญหาที่พบในแต่ละการทดสอบนั้นแสดงดังตารางที่ 5-1

ความไม่เสถียรจากการใช้พลังงานผ่านแบตเตอรี่เกิดจากแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถจ่ายไฟได้เพียงพอเมื่ออุปกรณ์ต้องการใช้พลังงานสูงขึ้น ซึ่งในกรณีปกติที่อุปกรณ์สื่อสารต่อผ่านแหล่งจ่ายไฟจากรถยนต์ หรือแหล่งไฟฟ้าผ่านสายจะทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีของความผิดพลาดที่เกิดจากหน่วยความจำจำเป็นจะต้องมีการแก้ไขเพื่อให้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทนทานต่อความผิดพลาดของหน่วยความจำภายนอกได้

ตารางที่ 5-1 ปัญหาของอุปกรณ์ในระหว่างการทดสอบ

	Bus Stop 1	Bus Stop 2	Bus Stop 3	Bus Stop 4	Bus Stop 5
Test 1					Battery
Test 2					Battery
Test 3	SD-Card				
Test 4	SD-Card				
Test 5			Battery		

5.6 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการสื่อสารผ่านเครือข่ายของยานพาหนะบนมาตรฐาน IEEE802.11p ซึ่งเป็นมาตรฐานที่จะถูกติดตั้งบนยานพาหนะในอนาคต ผลจากการทดสอบอุปกรณ์สื่อสารไร้สายบนมาตรฐาน IEEE802.11p สามารถทำงานร่วมกับโพรโทคอล DECA เพื่อรับและส่งต่อข้อความที่ถูกสร้างขึ้นในระบบ โดยอุปกรณ์สื่อสารที่ติดตั้งบนป้ายรถโดยสารประจำทางไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรง ต้องพึ่งพาการส่งข้อมูลรถโดยสารประจำทางเท่านั้นซึ่งจากการทดสอบพบว่าระบบสามารถส่งต่อข้อความได้อย่างน้อย 83% ของข้อความทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้การทดสอบยังแสดงถึงลักษณะของการสื่อสารที่เกิดขึ้นได้แก่ ระดับของสัญญาณ ระยะเวลาที่สามารถสื่อสารได้ อัตราส่วนของรถโดยสายที่ส่งต่อข้อความ และอัตราส่วนของผู้ส่งต่อข้อความให้แก่รถโดยสาร ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์ในการออกแบบระบบที่รองรับกับสื่อสารบนมาตรฐาน IEEE802.11p ต่อไปในอนาคต

ส่วนที่ 6
งานสัมมนาและอบรมแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

เพื่อให้ผลการทดสอบเป็นประโยชน์แก่ภาคอุตสาหกรรมและนักพัฒนาโปรแกรม รวมถึงประชาชนทั่วไปที่สนใจ ทีมวิจัยจึงได้จัดงานสัมมนาหัวข้อ Connected Car กับความพร้อมของไทย ขึ้นในวันที่ 1 กันยายน 2559 ณ ห้องประชุม 117 อาคาร 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีที่มา วัตถุประสงค์ และกลุ่มเป้าหมายของการจัดงานสัมมนาฯ ดังนี้

6.1 รายละเอียดการจัดงาน

ที่มา

จากวันที่บริษัทแผนที่นำรถไร้คนขับมาวิ่งทำแผนที่ ถึงวันนี้เราเริ่มเห็นรถไร้คนขับออกสู่ตลาด รถที่ถอยจอดเองได้ หรือขับเข้าออกโรงรถโดยอัตโนมัติ ในขณะเดียวกันเราได้ยินคำว่า Internet of Things หรือ IoT ในหลากหลายวงการมากขึ้น จนกระทั่งมาถึงในวงการคมนาคมก็มีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และ Things ต่างๆ รายรอบเส้นทาง อาจจะเรียกได้ว่า Internet of Vehicle (IoV) หรือ V2X (Vehicle to Anything Communication) เมื่อทุกสรรพสิ่งเชื่อมโยงถึงกัน ยานยนต์ไร้คนขับ Automated Connected Vehicle และ Disruptive Technology ด้านคมนาคมจะเกิดตามกันมาอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ฝั่งของวงการสื่อสารก็มีการแข่งขันกันสูงทั้ง LTE และ DSRC ที่จะวางโครงสร้างพื้นฐานบนถนนให้รองรับบริการใหม่ๆ รวมไปถึง Mobile device ที่จะเชื่อมเข้ามาในรถก็เริ่มมีการแข่งขันกันสูงเช่นกัน เพื่อแสวงหาโอกาสของนวัตกรรมใหม่ของชาติ รวมทั้งรักษาฐานการผลิตในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนเอาไว้ เราต้องเตรียมตัวอย่างไร ทั้งงานวิจัย การเตรียมโครงสร้างพื้นฐาน ความถี่วิทยุ กำลังคน และการปรับตัวของภาคอุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ในฐานะผู้ที่กำกับดูแลการสื่อสารของประเทศ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ ในฐานะผู้วางนโยบายนวัตกรรมของชาติ และสมาคมระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะไทย จึงได้จัดงานสัมมนา “Connected Car กับความพร้อมของไทย” เพื่อเป็นก้าวแรกในการให้ความรู้ ความเข้าใจ ทิศทางในอนาคตและเวทีเสวนาเพื่อแลกเปลี่ยนความคิดเห็นในด้านความพร้อมของประเทศในการขับเคลื่อน Connected Car ในทุกภาคส่วนของ eco-system

วัตถุประสงค์การจัดสัมมนาฯ

1) ให้ความรู้ความเข้าใจในเทคโนโลยีด้านการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ทั้งด้าน V2X, IoV และ Connected Vehicle
2) แลกเปลี่ยนความคิดเห็นในการเตรียมความพร้อมของประเทศ และหาโอกาสในการขับเคลื่อนในภาคอุตสาหกรรม
3) นำเสนองานวิจัยและโครงสร้างพื้นฐานที่ต้องรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

กลุ่มเป้าหมาย

1) เอกชน ได้แก่ภาคอุตสาหกรรมในอุตสาหกรรมยานยนต์ อินเทอร์เน็ต สื่อสาร เป็นต้น
2) บุคลากรในองค์กรภาครัฐที่เกี่ยวข้อง
3) อาจารย์ และนักศึกษา
4) บุคคลทั่วไปที่สนใจ

กำหนดการ

8:30 - 9:00 ลงทะเบียน

9:00 - 9:15 นายกสมาคมระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะไทย กล่าวรายงาน

9:15 - 9:45 ดร.สุรชัย สถิตคุณารัตน์ ผู้อำนวยการอาวุโส ศูนย์ข้อมูลและการคาดการณ์เทคโนโลยี กล่าวต้อนรับ

9:45 - 11:00 งานวิจัยในด้านการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

บททดสอบจริงบนถนนในเมืองไทย ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กีรติวินทกร

Data on Wheel กับรถโดยสาร รศ.ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

Car Talk as a Service โดย รศ.ดร.มงคล เอกปัญญาพงศ์

บทสรุปภาพรวมแพลตฟอร์มการสื่อสารระหว่างรถ โดยดร.ภาสกร ประถมบุตร

11:00 - 12:15 เสวนาหัวข้อ “การสื่อสารในยานยนต์และความพร้อมของไทย”

ผู้ร่วมเสวนา

คุณกฤษฎา อุตตโมทย์ ผู้อำนวยการ ฝ่ายสื่อสารกิจการองค์กร BMW

คุณธัชชา โตเจริญ เจ้าหน้าที่บริหาร บริษัทดิจิตอล มีเดีย เอเชีย แปซิฟิค จำกัด

ดร.เจษฎา ศิวรักษ์ เลขานุการประจำรองประธาน กสทช

รศ.ดร.สรวิศ นฤปิติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดำเนินรายการโดย คุณสามารถ ดวงวิจิตรกุล

12:15 - 13:15 พักรับประทานอาหารกลางวัน

13:15 - 15:00 การอบรม V2X Workshop

DECA แพลตฟอร์มการกระจายข้อมูลใน VANET โดย ดร.กุลิสร์ ณ นคร

Car talk ‘OLSR based’ แพลตฟอร์มบน Open WRT โดย ดร.อภินันท์ กับนันทพันธ์

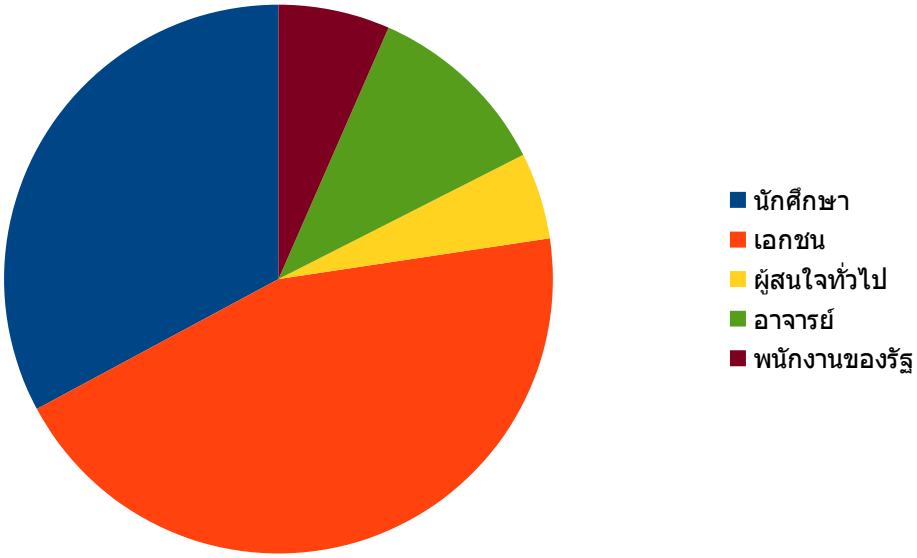
และ คุณนันทพันธ์ เวชสุวรรณรักษ์

ผู้สนับสนุนหลักในการการจัดงานได้แก่

- สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ
- กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ และ
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวนผู้เข้าร่วมงานสัมมนาฯและการอบรม รวมทั้งสิ้น 137 คน แยกตามประเภทได้ดังนี้

ประเภทของผู้ร่วมงาน	จำนวน (คน)
เอกชน	61
นักศึกษา	45
อาจารย์	15
พนักงานของรัฐ	9
ผู้สนใจทั่วไป	7



รูปที่ 6.1 แสดงสัดส่วนผู้เข้าร่วมงานสัมมนาฯ

รูปที่ 6.2 แสดงโปรสเตอร์งานสัมมนา (เดิมใช้ห้องประชุมของสวทน.)

ประมวลภาพในการจัดงาน

6.2 สรุปผลการจัดงาน

ในการจัดงานนี้เอกชนได้ให้ความสนใจเป็นจำนวนมากทั้งจากผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่และจากค่ายรถ เนื่องจากต้องการมองหาทิศทางในการเตรียมรับเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และมองหาความร่วมมือกับทีมวิจัยเพื่อนำผลงานไปต่อยอด นอกจากนี้ยังมีอาจารย์และนักศึกษาจากมหาวิทยาลัยต่างๆ อาทิ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ให้ความสนใจร่วมงานเพื่อเรียนรู้เทคโนโลยีและช่องทางในการทำวิจัย ซึ่งในการบรรยายได้นำเสนอผลการทดสอบและตัวอย่างการนำข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ติดในรถไปวิเคราะห์แบบ Big data เช่นข้อมูลมลภาวะบนถนน และการนำแพลตฟอร์มมาใช้กับรถโดยสารขสมก. เพื่อบอกข้อมูลตำแหน่งรถ ส่วนในช่วงการเสวนาหัวข้อ “การสื่อสารในยานยนต์และความพร้อมของไทย” มีผู้ทรงคุณวุฒิจากอุตสาหกรรมยานยนต์นำเสนอทิศทางในอนาคต และผู้แทนกสทช.นำเสนอแนวทางการกำกับดูแลที่จะเข้ามาหนุนให้เกิดการใช้งาน และนักวิชาการที่นำเสนอแนวทางด้านนโยบายและปัญหาที่จะตามมา ซึ่งเอกชนพร้อมแล้วแต่ว่ารัฐยังปรับตัวไม่ทัน ยังขาดมาตรฐานและ roadmap ที่จะดำเนินการในระดับชาติ

สำหรับภาคบ่ายเป็นการอบรม V2X Workshop นำเสนอ DECA แพลตฟอร์มการกระจายข้อมูลใน VANET โดย ดร.กุลิสร์ ณ นคร ที่ได้นำอุปกรณ์มาสาธิตบนเวทีและนำเสนอตัวอย่างในการเขียนโปรแกรมและเรียกใช้ API (Application Program Interface) เช่นเดียวกันกับแพลตฟอร์ม Car talk ‘OLSR based’ บน Open WRT ที่นำเสนอโดยดร.อภินันท์ กับนันทพันธ์ และ คุณนันทพันธ์ เวชสุวรรณรักษ์ มีการนำอุปกรณ์มาแสดงการเชื่อมต่อบนเวทีและเปิดให้ผู้ร่วมอบรมซักถาม

โดยภาพรวมแล้วประเทศไทยยังขาดความพร้อมในการนำ Connected Car มาใช้ เป็นเพราะการขาดนโยบายสนับสนุนและยังไม่มี Roadmap หรือทิศทางจากภาครัฐที่ชัดเจน อีกทั้งระเบียบของภาครัฐยังไม่เอื้อต่อการนำนวัตกรรมมาใช้งานจริง ส่วนภาคเอกชนต่างประเทศมีความพร้อมสูงขณะที่ภาคเอกชนไทยยังไม่เข้าใจเทคโนโลยีด้านนี้ ส่วนผู้ประกอบการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ให้ความสนใจ แต่จะเน้นที่ LTE มากกว่า WAVE และสำหรับความถี่วิทยุกลางในการสื่อสาร ไม่เป็นประเด็นปัญหาสำหรับเอกชนเพราะหาก ITU-T และ กสทช.กำหนดคลื่นใดมาก็สามารถปรับจูนให้รองรับได้ แต่ก็ควรจะรีบกำหนดคลื่นความถี่โดยเร็วเพื่อการเตรียมตลาด

ส่วนที่ 7

บทสรุป

ด้านกายภาพในเขตเมือง

การวิ่งทดสอบเป็นการทดสอบการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในเขตเมืองในบริเวณที่มีอาคารพาณิชย์โดยทดสอบการส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานจำนวน 2 สถานีโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆที่พบว่าเหมาะสมที่สุดจากการทดสอบที่ผ่านมา ตามตารางด้านล่าง

Channel	Data Rate (Mbps)	Tx Power (dBm)	EDCA	Tx Interval (ms)	Packet Size (byte)
153	12	20	2	100	250

สำหรับการทดสอบการ Hand-off พบว่าในบางครั้งอาจมีการสลับการรับ-ส่งสัญญาณระหว่างสองสถานีได้ อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณจากรถยนต์ไปยังสถานีฐานขึ้นอยู่กับการเลือกส่งของ OBE ซึ่งจะเลือกส่งไปยังสถานีที่มีสัญญาณแรงที่สุดในกรณีที่มีสถานีอื่นๆ ในเขตพื้นที่เดียวกัน โดยเฉลี่ยระดับสัญญาณ RSSI อยู่ในระดับปกติในช่วง -60 – -90 เมื่ออยู่ในระยะทางเพิ่มขึ้น ระดับ RSSI มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สรุปได้ว่าในรัศมีของสถานีและพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยเสนอแนะสำหรับการสื่อสารในระดับกายภาพในเขตเมืองนี้อุปกรณ์ OBE สามารถส่งสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องและมีการทำ Hand-off ระหว่างการส่งไปยังสถานีฐานที่เป็นผู้รับ อย่างไรก็ตามปกติการทำ Handoff จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณ แต่สำหรับรถยนต์มีการเคลื่อนที่เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า จึงเกิด Doppler Effect ที่จะทำให้สัญญาณลดทอนหรือไม่มีเสถียรภาพ มีผลทำให้การ Handoff เกิดบ่อยครั้งจนเกินความจำเป็น ฉะนั้นการทำ Handoff ในกรณีของรถยนต์อาจต้องพิจารณาพารามิเตอร์อื่นควบคู่ไปกับระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI)

สำหรับการทดสอบส่งข้อมูลที่ความเร็ว(Transmission Rate) ต่างกันพบว่าเมื่อส่งข้อมูลที่ความเร็วสูง (ที่ 24 Mbps) จะทำให้ค่าการสูญเสียข้อมูลเพิ่มขึ้น (ถึงประมาณ 50%) ซึ่งสาเหตุมาจากเครื่องรับไม่สามารถจัดการข้อมูลได้ทันทำให้เกิดข้อมูลสูญหายที่เกิดจาก Packet Drop จำนวนมาก แต่ค่า RSSI ซึ่งเฉลี่ยอยู่ในช่วง -70 ถึง -80 ถือเป็นค่าปกติในการทำงานขณะรับส่งข้อมูลจึงไม่มีผลกับความเร็วต่างๆในการรับส่งข้อมูล ค่า Transmission Rate ที่มีค่าสูง จะใช้ได้กับระยะทางในการส่งข้อมูลที่สั้นลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการส่งที่ความเร็วสูงอาจทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลในระหว่างการส่งและด้วยระยะทางการส่งที่ไกลจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลเพิ่มขึ้นได้ง่าย จึงทำให้ข้อมูลที่สามารถรับส่งได้ที่ระยะไกลและที่ความเร็วสูงมีจำนวนน้อยจึงสรุปได้ว่าการส่งที่ความเร็วสูงจะทำได้ดีในกรณีที่ส่งในระยะใกล้หรือในกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ช้าหรือหยุดนิ่งเท่านั้น อนึ่งอุปกรณ์จำเป็นต้องมีหน่วยความจำ (Buffer) มากเพียงพอและมีการประมวลผลเร็วในระดับ Link Layer และต้องมีค่า SNR ของ Receiver ที่สูงด้วยเพื่อให้ได้คุณภาพสัญญาณที่ดีใน Physical Layer

สำหรับ EDCA ซึ่งค่า EDCA มาก หมายถึง สถานีจะพยายามส่ง Packet ให้เร็วที่สุดโดยการเข้าถึงช่องสัญญาณให้เร็ว (AIFSN มีค่าน้อย) และจะ Backoff ด้วยค่าที่น้อยกว่า (Cmax มีค่าน้อย) เพื่อให้สามารถส่งได้ก่อนหรือสามารถส่งซ้ำ (Re-transmission) ได้เร็วในกรณีที่เกิด Collision แต่ถ้าไม่สามารถส่งได้ในเฟรมหรือภายในจำนวนครั้งของการส่งซ้ำ Packet ก็จะถูก Drop ทำให้เกิดการสูญเสีย Packet ได้ง่ายกว่ากรณีที่ค่า EDCA มีค่าต่ำ ในการทดสอบพบว่าค่า EDCA มีค่าเท่ากับ 0 จะมีค่าการสูญเสียน้อยกว่าที่ประมาณ 28% ในขณะที่เมื่อตั้งค่า EDCA เท่ากับ 1, 2 และ 3 จะมีค่าการสูญเสียที่ประมาณ 32% - 33% สรุปว่าค่า EDCA ไม่มีผลต่อการสูญเสีย Packet ในขณะรับส่งมากนัก อย่างไรก็ตามแม้ว่าในการทดสอบนี้จะมีเครื่องส่งและเครื่องรับเพียงอย่างละเครื่องซึ่งในทางทฤษฎีจะไม่มีการชนกันของการส่งสัญญาณแต่ในการทดลองอาจเกิดการสูญเสียข้อมูลเนื่องจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ ซึ่งเมื่อเกิดการสูญเสียข้อมูล เครื่องส่งจะทำการส่งข้อมูลใหม่ ดังนั้นค่า CWmax จึงมีผลมากต่อการทดสอบในครั้งนี้ เพราะเมื่อค่า CWmax มีค่าต่ำ จะทำให้จำนวนการส่งซ้ำมีจำนวนน้อยลงเนื่องจากค่า Backoff Time มีค่ามากกว่าค่า CWmax จึงทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลมากกว่า

สำหรับช่องสัญญาณตามมาตรฐาน FCC U-NII-3 (147, 153, 161 และ 167) จากการทดสอบพบว่าช่องสัญญาณไม่มีผลกับ Packet Loss และ RSSI

สำหรับการทดสอบที่ความเร็วรถต่างๆ (40, 60, 80 และ 100 กม./ชม.) พบว่าที่ความเร็วสูงค่า RSSI จะมีค่าลดลง (ติดลบมากขึ้น) เนื่องมาจากผลของ Doppler Effect ในขณะที่ค่าของขนาดข้อมูล (Packet Size) และค่า Transmission Interval Time ไม่มีผลต่อค่า RSSI ของการรับ-ส่งข้อมูล

ด้านกายภาพนอกเขตเมือง

ผลการทดสอบพบว่าที่ความเร็วของรถยต์ 20-100 Km/hr ไม่ได้มีผลต่อการรับส่งสัญญาณ ในขณะที่ระยะห่างที่รับส่งสัญญาณได้สูงสุดอยู่ที่ 600 เมตร ระดับสัญญาณต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถรับได้อยู่ที่ประมาณ -95 dBm ที่ระยะที่ไกลที่สุด และสามารถรับสัญญาณได้สูงสุดที่ประมาณ -50 dBm

ผลการวิเคราะห์การส่งข้อมูลที่ขนาดต่างกันของ Packet ไม่ได้มีผลต่อระดับสัญญาณของการรับส่ง และความเร็วสำหรับการเคลื่อนที่ของรถยนต์มีผลเล็กน้อย อย่างไรก็ตามระดับความเร็วของสัญญาณจะมากหรือน้อยขึ้นกับสภาพแวดล้อม สิ่งกีดขวาง และระยะทาง เป็นตัวแปรสำคัญมากกว่าผลของ Doppler Effect

สำหรับ Packet Loss ที่ความเร็วสูงคือ 100 km/h จะมีค่า Packet Loss ประมาณ 70% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วต่ำกว่าที่ 80 km/h และ 20 km/h จะมีค่า Packet Loss ที่ค่าประมาณ 60% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งความเร็วมีผลต่อการสูญเสีย Packet

เมื่อเปรียบเทียบการส่ง packet ที่ช่วงการส่ง (Tx Interval) ที่ 50 ms และ 100 ms พบว่าอัตราการสูญเสีย packet มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอัตราความเร็วในการส่ง packet มีผลน้อยหรืออาจไม่มีผลต่อค่าสูญเสีย packet อย่างไรก็ตามทีมวิจัยจะทำการทดสอบต่อไปเพื่อหาค่า Tx Interval ที่เหมาะสมสำหรับการรับส่งข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าสูญเสีย Packet มีค่าต่ำ

IP Based ในเขตเมือง

เป็นการทดสอบรถสามคันวิ่งตามกันที่ความเร็ว 20-30 km/h และส่งข้อมูลกันเป็นทอดๆ ในลักษณะ multi-hop จากคันแรกไปคันสุดท้าย โดยการใช้ OLSR protocol บน OpenWRT ผ่าน Wi-Fi ที่ 5.8 GHz

ผลการทดสอบพบว่า Packet Delivery Ratio จะมีอัตราส่วนสูง หากระยะของรถยนต์แต่ละคันอยู่ในระยะการสื่อสารประมาณ 300 เมตรในสภาพเขตเมือง และจะมีอัตราส่วนลดลงมา หากระยะรถยนต์แต่ละคันห่าง

กันมากขึ้น และค่าเฉลี่ย RTT ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง delay กับระยะห่างของรถแต่ละคัน ซึ่งค่า RTT จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อระยะห่างของรถแต่ละคันมากขึ้น และพบว่าเฉลี่ย RTT จะไม่เกิน 2 millisecond

ผลการทดสอบ Throughput ของการสื่อสารระหว่างรถยนต์คันแรกไปยังรถยนต์คันสุดท้ายพบว่าค่า Throughput ลดลงเมื่อระยะห่างของรถเพิ่มขึ้น และระยะห่างที่เหมาะสมคือ 100 – 300 เมตร โดยมีค่า Throughput เฉลี่ยประมาณ 10 Mpbs

IP Based นอกเขตเมือง

การทดสอบ IP Based นอกเขตเมืองในกรณีที่รถวิ่งตามกันผลการทดสอบพบว่าที่ความเร็ว 60 กม./ชม. และระยะห่างต่อคันประมาณ 100 เมตร จะไม่มีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณข้อมูล แต่ที่ความเร็ว 80 กม./ชม. ระยะห่างต่อคันประมาณ 200 เมตร ผลทดสอบไปยังคันที่ 3 เริ่มได้รับผลกระทบจากการสูญหายของข้อมูลบ้าง เนื่องจากระยะทางจากคันแรกเริ่มห่างออกไป รวมไปถึงอาจจะมีสิ่งกีดขวางสัญญาณร่วมด้วย และที่ความเร็ว 100 กม./ชม.ระยะห่างระหว่างคันประมาณ 300 เมตร จะมีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณทำให้เกิด loss ระหว่างคันที่ 1 และ 3 ค่อนข้างมาก นอกจากนี้ Throughput จะลดน้อยลงที่ความเร็วรถที่เพิ่มขึ้นและระยะทางที่ห่างขึ้น ความเร็ว Throughput เฉลี่ยอยู่ที่ 6.73 Mbps ที่ระยะห่างรถเฉลี่ย 324 เมตรต่อคัน และรถสามารถทำการสื่อสารมากกว่า multi-hop ได้โดยอัตโนมัติ หากระยะห่างระหว่างคันเกินกว่าระยะ 400 เมตร ค่าเฉลี่ย RTT จะไม่เกิน 2 millisecond เช่นเดียวกับการทดสอบในเขตเมือง

ในกรณีที่รถวิ่งสวนทางกัน โดยมี คันที่ 1 ขับรถสวนกับคันที่ 2 และ 3 ที่ขับตามกันมาจากทิศทางตรงกันข้าม พบว่ารถคันที่ 1 สามารถสื่อสารกับรถคันที่ 2 ได้เมื่อเข้าหากันในรัศมี 600 เมตร อนึ่งรถคันที่ 1 จะเจอกับรถคันที่ 2 ก่อนรถคันที่ 3 ซึ่งในช่วงเวลาก่อนหน้านั้น รถคันที่ 2 มีการเชื่อมต่อกับรถคันที่ 3 อยู่แล้ว เมื่อรถคันที่ 2 สามารถรับส่งข้อมูลไปยังรถคันที่ 1 ได้ ข้อมูลจะถูกส่งผ่านไปยังรถคันที่ 3 โดยผ่าน 2 hops แล้วเมื่อรถคันที่ 3 วิ่งเข้ามาในระยะที่สามารถรับส่งข้อมูลกับคันที่ 1 ได้โดยตรงก็จะกลายเป็น 1 hop ด้วยตัวเอง เป็นไปตามแพลตฟอร์มที่ออกแบบไว้

Short Message ในเขตเมือง

เป็นการทดสอบ WAVE protocol บนอุปกรณ์ WSU5001 เพื่อดูการกระจายข้อมูล Short Message ระหว่างรถที่เคลื่อนที่ในเขตเมืองโดยวัด PDR และ delay พบว่าอุปกรณ์ WSU5001 ทั้ง 7 กล่องในรถแต่ละคันสามารถส่งข้อมูลหากันได้โดยมี PDR อยู่ที่ 77.16% และ delay ก็เพิ่มขึ้นตามจำนวน hop ที่เพิ่มขึ้น

หากติดตั้ง WSU5001 บริเวณข้างถนนที่เรียกว่า Road side unit (RSU) เพิ่มเติม จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการสื่อสารเพิ่มขึ้น โดยจากการทดสอบพบว่ามีค่า PDR เพิ่มขึ้นจาก 77.16% เป็น 97.69%

ในการทดสอบนี้ได้มีการทดลองติดตั้ง WSU5001 ในรถคันเดียวกัน พบว่าทำให้อัตราความสำเร็จในการส่งลดลงต่ำมาก สาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นมากจากเสาที่วางไว้บนหลังคารถยนต์คันเดียวกัน วางไว้ที่ระยะห่างไม่เพียงพอทำให้เกิดการรบกวนกันเอง ฉะนั้นการออกแบบสายอากาศและกำลังส่งต้องสัมพันธ์กับขนาดและระยะห่างระหว่างยานพาหนะ

Short Message นอกเขตเมือง

การทดสอบ Short Message นี้ทำการทดสอบบนถนนหลวงหมายเลข 347 ที่เดียวกับการทดสอบ IP Based มีการทดสอบโดยอ้างอิงถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของรถยนต์โดยรถคันที่ 1 (คันหน้าสุด) และคันที่ 4 (คันสุดท้าย) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 1 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้บนหลังคาด้านหน้าของตัวรถ ส่วนรถคันที่ 2 และ 3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคันละ 2 ชุด โดยทำการวางเสาสัญญาณไว้บนหลังคาด้านหน้าและด้านหลังของตัวรถอย่างละชุด

กรณีที่รถวิ่งตามกันด้วยอัตราเร็วคงที่ 60, 80, 100 กม./ชม. ผลการทดสอบบ่งชี้ถึงความสามารถของแพลตฟอร์มว่าสามารถกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ไปสู่อุปกรณ์อื่นๆได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละการทดลอง โดยการเพิ่มอัตราเร็วของรถยนต์ทดสอบ ซึ่งได้ PDR เฉลี่ยอยู่ที่ 78.85% ที่อัตราเร็ว 60 กม./ชม. PDR 80.61% ที่อัตราเร็ว 80 กม./ชม. และ PDR 85.93% ที่อัตราเร็ว 100 กม./ชม. จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของรถไม่ส่งผลต่อ PDR มากนัก

กรณีที่รถวิ่งสวนทางกันด้วยอัตราเร็วคงที่ 60, 80, 100 กม./ชม. ค่า PDR เฉลี่ยอยู่ที่ 78.85% ที่อัตราเร็ว 60 กม./ชม. PDR 80.61% ที่อัตราเร็ว 80 กม./ชม. และ PDR 85.93% ที่อัตราเร็ว 100 กม./ชม.

กรณีที่ให้รถวิ่งกันแบบสุ่ม โดยทำการติดตั้ง Road Side Unit (RSU) ร่วมด้วย ได้ผลเฉลี่ย PDR อยู่ที่ 94.44% แสดงให้เห็นว่า RSU สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารได้ดีขึ้นมาก

บรรณานุกรม

[1] “Optimized Link State Routing Protocol”, home page, http://www.olsr.org/, retrieved September 2010.

[2] “Delay Tolerant Networking Research Group (DTNRG)”, home page, http://www.dtnrg.org/wiki/Home, retrieved September 2010.

[3] Na Nakorn, K., Rojviboonchai, K. “DECA-bewa: Density-aware reliable broadcasting protocol in VANETs,” (2013) IEICE Transactions on Communications, E96-B (5), pp. 1112-1121.

[4] IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-channel Operation," IEEE Std 1609.4-2010 (Revision of IEEE Std 1609.4-2006), vol., no., pp.1, 89, Feb. 7 2011.

[5] Abdeldime M.S. Abdelgader, Wu Lenan, “The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges”, http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp691-698.pdf