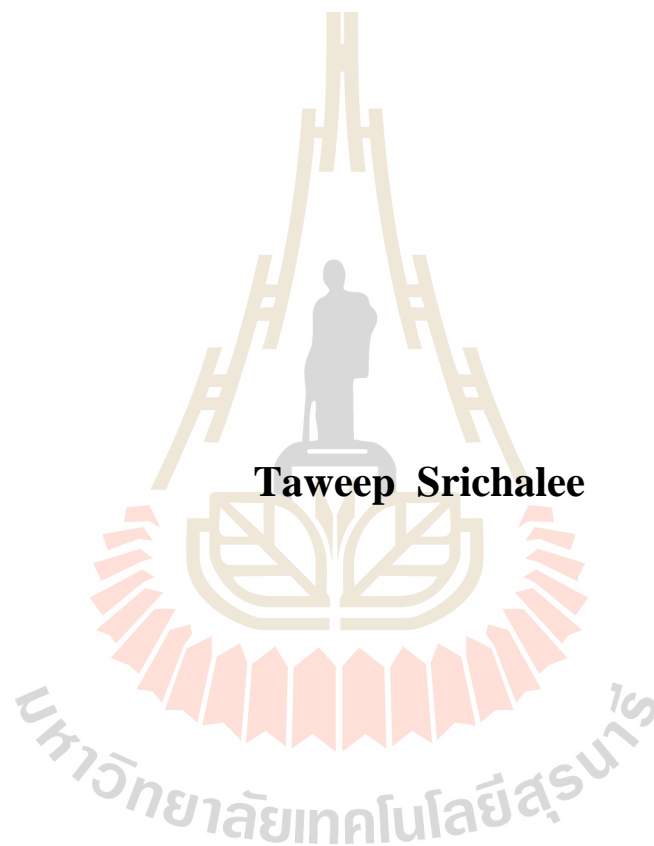


การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างรถ
ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างรถในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**COMPARISON OF APPROPRIATE VEHICULAR
COMMUNICATION TECHNOLOGY
FOR V2X IN THAILAND**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in
Telecommunication and Computer Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2020**

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างรถที่เหมาะสม
สำหรับการสื่อสารระหว่างรถในประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผศ. ร.อ. ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

ประธานกรรมการ


(ผศ. ดร. เศรษฐวิทย์ ภูฉายา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(ผศ. ดร. ชิตพงศ์ เวชไชสงค์)

กรรมการ


(ผศ. ดร. พิชญญา ชัยปัญญา)

กรรมการ


(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล


(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายทวีป ศรีชาติ : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างรถ
ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างรถในประเทศไทย (COMPARISON OF
APPROPRIATE VEHICULAR COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR V2X IN
THAILAND) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐวิทย์ ภูญาษา, 76 หน้า

ทุกวันนี้เทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะเป็นเทคโนโลยีที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ยานพาหนะและช่วยทำให้การเดินทางบนถนนมีความปลอดภัยมากขึ้น มาตรฐานเทคโนโลยี IEEE802.11p และ LTE-V ถูกนำเสนอโดยนักวิจัยเพื่อเป็นเครื่องมือหนึ่งสำหรับการเพิ่มความปลอดภัยของการใช้ยานพาหนะ ซึ่งประสิทธิภาพของการสื่อสารของเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีค่าความแฝงเวลามาก 3GPP ได้นำเสนอเทคโนโลยีรุ่นใหม่ (5G NR V2X) สำหรับการบริการรูปแบบใหม่เพื่อรองรับการใช้งานยานพาหนะอัจฉริยะ ซึ่งเทคโนโลยีนี้จะช่วยทำให้ค่าความแฝงเวลามีค่าต่ำ มีการสื่อสารที่น่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามในประเทศไทยยังไม่มี ความชัดเจนว่าเทคโนโลยีใดเหมาะสม

งานวิจัยนี้จึงสนใจและนำเสนอการเปรียบเทียบของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะของ 3 เทคโนโลยี ได้แก่ IEEE 802.11p, LTE-V และ 5G NR โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างยานพาหนะโดยใช้ค่าประสิทธิภาพของการสื่อสาร ได้แก่ PER กับ SNR , PER กับระยะทาง และ BER กับ SNR สำหรับทั้ง 3 เทคโนโลยี โดยจำแนกตามเทคโนโลยีและสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยจำลองแบบตามค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ Gain, Delay และ Doppler และใช้คลื่นความถี่ตามการประมูลของ กสทช. ในประเทศไทย เพื่อหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี 5G NR เป็นเทคโนโลยีที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่า PER กับ SNR แต่เมื่อพิจารณาจาก PER กับระยะห่างระหว่างยานพาหนะ เทคโนโลยี LTE-V มีระยะการสื่อสารที่ไกลกว่า 5G NR อย่างไรก็ตาม เมื่ออ้างอิงตาม Basic safety message (BSM) หรือการส่งข้อมูลความปลอดภัย เทคโนโลยี 5G NR ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเนื่องจากมี latency ต่ำที่สุด และมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ดังนั้น 5G NR จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดในการสื่อสารระหว่างรถในประเทศไทย

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา Jap
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 10E

TAWEEP SRICHALEE : COMPARISON OF APPROPRIATE VEHICULAR
COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR V2X IN THAILAND. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. SETTAWIT POOCHAYA, Ph.D., 76 PP.

VEHICULAR COMMUNICATION TECHNOLOGY / 5GNRV2X

Today, the technology of vehicular communication is a famous technology. This technology increases vehicle efficiency and road safety. IEEE 802.11p and LTE-V are introduced for more vehicle safety. IEEE802.11p and LTE-V standards were presented by researchers as a tool for enhancing the safety of the vehicle on the road. 3GPP introduces a new technology (5G NR V2X) for new services supporting for autonomous vehicle. This technology allows for low latency values and more reliability. However, in Thailand is not clear which technology is suitable.

This research focus on the comparison of vehicular communication in differences of three technologies IEEE 802.11p, LTE-V and 5G NR. The vehicular communication performance was compared with Packet Error Rate and SNR, Packet Error Rate with distance and Bit Error Rate and SNR for all three technologies. Simulation processes are created according to communication environment such as Gain, Delay and Doppler according to standard guideline and NBTC frequency spectrum.

Simulation results show that 5G NR technology is the best technology considering by Packet Error Rate and SNR, but considering Packet Error Rate and distance. LTE-V has a longer communication distance than 5G NR because 5G NR has a frequency higher than LTE-V according to the NBTC auction in Thailand. However, according to the Basic safety message (BSM) 5G NR still has the best performance due

to the lowest latency and the most reliable. Finally, 5G NR is the most suitable technology for vehicular communication in Thailand.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตพงศ์ เวชไชยวงศ์ คณะกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางและช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ ชัยปัญญา กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุน

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องบัณฑิตศึกษาทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ และขอบคุณคุณวีรินทร์ อาจหาญ เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและจัดการด้านเอกสารตลอดระยะเวลาการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ทวีป ศรีชาติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์	3
2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1 เทคโนโลยีการสื่อสาร IEEE 802.11p.....	6
2.2.2 เทคโนโลยีการสื่อสาร LTE-V	10
2.2.3 เทคโนโลยีการสื่อสาร 5GNR V2X	11
2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.3.1 Bit Error Rate (BER) และ Packet Error Rate (PER)	13
2.3.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	Signal to Noise Ratio (SNR)	16
2.3.4	Noise Figure	16
2.3.5	V2V Channel model.....	17
2.3.6	Doppler Spectra.....	19
2.3.7	อัตราขยายของสายอากาศ	20
2.3.8	RSSI	21
2.3.9	free-space path loss (FSPL).....	21
2.3.10	Latency	21
2.3.11	Basic Safety Message (BSM).....	22
2.4	โมดูลอุปกรณ์ Arada system LocoMate	23
2.4.1	คุณสมบัติของ อุปกรณ์ Arada system LocoMate	24
2.5	กล่าวสรุป	25
3	การออกแบบและจำลองผล	26
3.1	บทนำ.....	26
3.2	Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS)	26
3.3	Simulator structure	27
3.4	Channel coding	28
3.5	Modulation.....	28
3.6	Feedback	30
3.7	การทดสอบวัดผลด้วยอุปกรณ์ Arada System Locomate	31
3.7.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	31
3.7.2	เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.7.3	การตั้งค่าอุปกรณ์	33

สารบัญ (ต่อ)

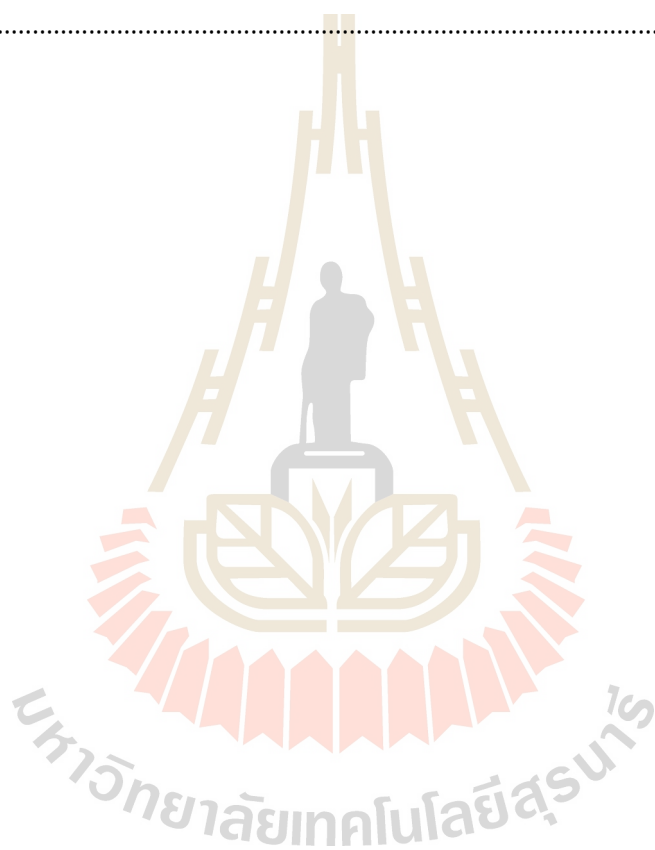
หน้า

4 ผลการจำลองแบบ.....	34
4.1 บทนำ.....	34
4.2 การจำลองระบบในสภาพแวดล้อมชนบท.....	34
4.2.1 เทคโนโลยี IEEE 802.11p ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท.....	35
4.2.2 เทคโนโลยี LTE-V ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท.....	37
4.2.3 เทคโนโลยี 5G NR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท.....	39
4.3 การจำลองระบบในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง.....	41
4.3.1 เทคโนโลยี IEEE 802.11p ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง.....	42
4.3.2 เทคโนโลยี LTE-V ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง.....	44
4.3.3 เทคโนโลยี 5G NR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง.....	46
4.4 การจำลองระบบในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน.....	48
4.4.1 เทคโนโลยี IEEE 802.11p ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน.....	49
4.4.2 เทคโนโลยี LTE-V ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน.....	51
4.4.3 เทคโนโลยี 5G NR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน.....	53
4.5 การทดสอบวัดผลด้วยอุปกรณ์ Arada Locamate.....	55
4.5.1 เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ.....	55
4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับอุปกรณ์ Arada Locamate.....	58
4.7 การเปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 เทคโนโลยี.....	59
4.8 กล่าวสรุป.....	60
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	63
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	76



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	MCS Schemes 8
2.2	เปรียบเทียบระหว่าง IEEE 802.11a กับ IEEE 802.11p..... 9
2.3	การเปรียบเทียบในแต่ละเทคโนโลยี 12
2.4	Power Delay Doppler ของสภาพแวดล้อมแบบชนบท 18
2.5	Power Delay Doppler ของสภาพแวดล้อมแบบในเมือง 19
2.6	Power Delay Doppler ของสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน 19
4.1	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท 34
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง 41
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน 48
4.4	ผลจากการวัด Arada Locomate..... 55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การพัฒนาของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ 5
2.2	IEEE 802.11p channels 7
2.3	IEEE 802.11p framework..... 8
2.4	Packet Structure IEEE 802.11p 8
2.5	การรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสาร IEEE 802.11p..... 9
2.6	การเชื่อมต่อของการสื่อสาร C-V2X 10
2.7	การรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสาร C-V2X..... 11
2.8	การพัฒนาของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ 13
2.9	โครงสร้างของ OFDM..... 14
2.10	โครงสร้าง CP-OFDM 14
2.11	ความแตกต่างระหว่าง OFDM กับ OFDMA 15
2.12	ความแตกต่างระหว่าง OFDMA กับ SC-FDMA 16
2.13	สภาพแวดล้อมการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ..... 18
2.14	สเปกตรัม Doppler 20
2.15	ความต้องการความแฝงเวลาในแต่ละการใช้งาน 22
2.16	Radiation Pattern ของการติดตั้งเสาอากาศบนยานพาหนะ..... 23
2.17	โมดูลอุปกรณ์ Arada LocoMate..... 24
2.18	แผนภาพของ LocoMate พร้อมการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ 24
3.1	รูปแบบการทำงานของเครื่องจำลองเบื้องต้น 27
3.2	กระบวนการของการส่งสัญญาณ 29
3.3	กระบวนการของการรับสัญญาณ 30
3.4	รูปแบบการทำงานของ Feedback 31
3.5	อุปกรณ์ภาคส่ง 32
3.6	อุปกรณ์ภาครับ 32
3.7	เส้นทางและแผนที่ในการทดสอบ Arada Locomate..... 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	35
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	35
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	36
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	37
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	37
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	38
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	39
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	39
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท	40
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	42
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	42
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	44
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	44
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	45
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	46
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	46
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง	47
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	49
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	49
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	50
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	51
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	51
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	53
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	53
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน	54
4.28 เส้นทางและแผนที่ใช้ในการทดสอบ Arada Locomate.....	55
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ PER กับ ระยะทาง.....	56
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ BER กับ ระยะทาง	56
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ RSSI กับ ระยะทาง	57
4.32 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองผล PER กับ ระยะทาง ในสภาพแวดล้อมชนบทเทียบกับอุปกรณ์ Arada Locomate.....	58
4.33 เปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 เทคโนโลยี	59

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็น การอธิบายถึงความเป็นมา และเหตุจูงใจ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ แนวทางการดำเนินวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้อุบัติเหตุบนถนนเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นอยู่เสมอ ในขณะที่การรายงานขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ได้ทำการสำรวจ พบว่ามีผู้คนที่ถึง 1.35 ล้านคนต่อปี ที่มีการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนถนนและตัวเลขของผู้เสียชีวิตยังคงเพิ่มขึ้น ในปี พ.ศ.2562 ประเทศไทยมีประชากรที่ได้รับผลกระทบจากอุบัติเหตุทางรถยนต์ 360,000 ครั้ง 25,000 คนที่เสียชีวิต ประเทศไทยนั้นมีผู้เสียชีวิตสูงที่สุดเป็นอันดับหนึ่งในเอเชียและเป็นอันดับที่ 9 ของโลก [1,2] เทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะสามารถช่วยทำให้สถิติของอุบัติเหตุ และผู้เสียชีวิตที่กล่าวมานั้นลดลงได้ [3]

เทคโนโลยี IEEE 802.11p ถูกนำเสนอในปี พ.ศ. 2553 และมีรูปแบบคลื่นเป็นแบบ OFDM ต่อมาในปี พ.ศ. 2559 ทาง 3GPP ได้นำเสนอ LTE-V2X Rel.14 และในปี พ.ศ. 2562 นั้นได้นำเสนอ 5G NR V2X ออกมาในส่วนของ LTE-V2X และ 5G NR นั้น ได้ถูกพัฒนามาจากเครือข่ายเซลลูลาร์ C-V2X (Cellular-Vehicle to Everything) ถูกแบ่งเป็นแบบที่ใช้งานกับแอปพลิเคชันสำหรับความปลอดภัย และแอปพลิเคชันอำนวยความสะดวก นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอ 2 เทคโนโลยี ได้แก่ DSRC และ LTE-V ซึ่งสองเทคโนโลยีนี้ต้องการค่าความแฝงเวลา (Latency) 100 มิลลิวินาที [4] 5G NR ถูกพัฒนาขึ้น โดย 3GPP ได้นำเสนอ NR (New Radio) ว่ามีค่าความแฝงเวลาแค่ 1 มิลลิวินาที สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ มีชื่อว่า 5G NR V2X Rel.16 โดยพัฒนามาจาก 3GPP Rel.14 [5] คาดว่า 5G NR V2X จะมีการสนับสนุนการใช้งานในระดับที่สูงขึ้นและมีค่าแฝงเวลาที่น้อยมาก 5G of New Radio (NR) V2X Rel. 16 ได้ถูกนำเสนอเป็นดังนี้คือ The Enhanced of Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low Latency (URLLC) และ Massive Machine Type Communications (mMTC)

จากปัญหาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้สนใจที่จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของ 3 เทคโนโลยีได้แก่ IEEE 802.11p, LTE-V และ 5G NR โดยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างยานพาหนะโดยใช้ค่าระหว่าง SNR กับ PER, ระยะทางกับ PER และ SNR กับ BER สำหรับทั้ง 3 เทคโนโลยี และ 3 สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อหาเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างรถ โดยเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารที่แตกต่างกัน 3 เทคโนโลยี

1.2.2 เพื่อนำเสนอเทคโนโลยีการสื่อสารที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างรถในประเทศไทย

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 เทคโนโลยี 5G NR V2X คาดว่าจะมีประสิทธิภาพการสื่อสารที่ดีที่สุด

1.3.2 ในประเทศไทยเทคโนโลยี 5G NR V2X เหมาะสมที่สุดของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จำลองผล Packet error rate / SNR ของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ IEEE 802.11p, LTE-V และ 5G NR โดยแบ่งสภาพแวดล้อม Rural, Urban, Highway ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.2 ประสิทธิภาพที่ใช้ในการพิจารณาจากค่า PER : Packet Error Rate / SNR, Packet Error Rate / ระยะทาง และ BER : Bit Error Rate / SNR

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

1.5.1.1 สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.5.1.2 ศึกษาการออกแบบการส่งข้อมูลของแต่ละเทคโนโลยี

1.5.1.3 จำลองผลการส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะ

1.5.1.4 วิเคราะห์ผลการจำลองผล

1.5.1.5 สรุปผล

1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.5.3.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.5.3.2 โปรแกรม MATLAB

1.5.3.3 Arada system Locomate

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพื่อได้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการสื่อสารระหว่างรถในประเทศไทย

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผล ซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บทด้วยกัน

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมุติฐานของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และตามด้วยพารามิเตอร์ต่างที่จะใช้วัดผล

บทที่ 3 กล่าวถึงการอธิบายเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ในระดับขั้นพื้นฐานบน Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS) จาก Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria ผ่านโปรแกรม MATLAB

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง ประสิทธิภาพต่าง ๆ ของแต่ละเทคโนโลยี โดยทดลองเปรียบเทียบ 3 เทคโนโลยี และ 3 สภาพแวดล้อม

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะ อีกทั้งแนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบการทำงานวิจัย ปริทัศน์วรรณกรรม และหลักการที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะประกอบไปด้วย Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Vehicle-to-Pedestrian (V2P) และ Vehicle-to-Network (V2N) โดยเรียกทั้งหมดนี้ว่า Vehicle-to-Everything (V2X) เทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะนั้นมีการพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากเทคโนโลยี DSRC หรือ IEEE 802.11p เทคโนโลยีนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายแต่ยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ต่อมา 3GPP ได้พัฒนาฟังก์ชันการทำงานของ D2D (Device-to-Device) เพื่อให้สามารถสื่อสารระหว่างพาหนะได้โดยตรง โดยเริ่มใน Release 12 อย่างไรก็ตาม 3GPP ได้ประยุกต์ C-V2X (Cellular-V2X) เป็นการเชื่อมต่อแบบเซลลูลาร์และเป็นการปรับปรุงสำหรับการสื่อสาร V2X LTE-V เพื่อให้มีการสื่อสารที่ไกลขึ้น และมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบันเราอยู่ในช่วงของการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 5 (5G) เพื่อให้การสื่อสารระหว่างยานพาหนะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น มีความเร็วการส่งข้อมูลเร็วขึ้น และที่สำคัญคือมีค่าหน่วงเวลา (Latency) ที่น้อยมาก ดังรูปที่ 2.1 ในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะของ 5G นั้นใช้ชื่อว่า 5GNR V2X เทคโนโลยี 5GNR V2X นั้นเป็นเทคโนโลยีที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพแต่ละเทคโนโลยีเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ



รูปที่ 2.1 การพัฒนาของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

(Qualcomm "Accelerating C-V2X commercialization", 2019)

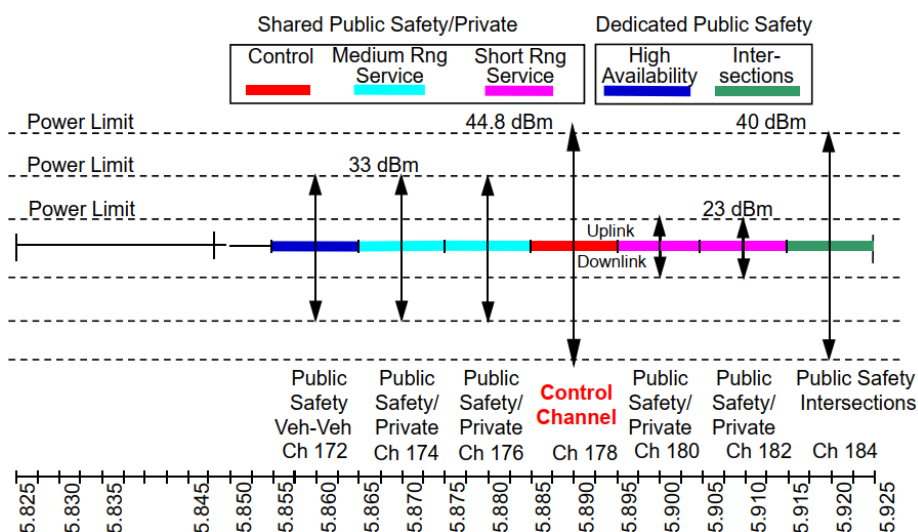
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีเกี่ยวกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และสามารถนำความรู้นี้ไปพัฒนาต่อได้ จึงได้มีการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสังเขป ดังนี้

2.2.1 เทคโนโลยีการสื่อสาร IEEE 802.11p

มาตรฐานของคลื่น IEEE 802.11p ได้ถูกนำเสนอในปี พ.ศ.2553 มีชื่อว่า DSRC ซึ่งคลื่นในช่วงนี้ได้ถูกจัดสรรขึ้นโดยสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2542 โดย FCC (U.S. Federal Communication Commission) ได้จัดสรรช่วงความถี่ย่าน 5.9 GHz คือ 5.850 ถึง 5.925 GHz [6] มีความกว้างสัญญาณอยู่ที่ 75 MHz สำหรับการใช้นางานด้าน ITS (Intelligent Transportation System) โดยถูกแบ่งเป็น 7 ช่องสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.2 มาตรฐานชั้นกายภาพนั้นถูกพัฒนาขึ้นโดย ASTM (American Society for Testing and Material) ที่รู้จักกันในชื่อมาตรฐาน ASTM E2213 ในระยะแรกนั้นคณะทำงาน ASTM 2313 มีหน้าที่กำหนดหลักเกณฑ์การใช้งานคลื่นความถี่ DSRC ต่อมาในปี พ.ศ. 2547 หลักการทำงานของ DSRC ได้เริ่มถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มมาตรฐาน IEEE 802.11 เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับ IEEE 802.11a ซึ่งการเปลี่ยนแปลงครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เป็นความเป็นสากล DSRC ยังใช้ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) โดยมี MCS Schemes ดังตารางที่ 2.1 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายซึ่งมีประสิทธิภาพทนต่อการรบกวน ซึ่งในชั้นของ Media Access Control Layer (MAC layer) มีการจัดการเป็นแบบ CSMA/CA ข้อแตกต่างของ IEEE 802.11p และ IEEE 802.11a คือ IEEE 802.11p ทำงานในโหมดครึ่งนาฬิกา (Half-Clocked) โดยลดระยะห่างช่องสัญญาณ 20 MHz เป็น 10 MHz และเพิ่มเวลาสัญญาณเป็นสองเท่า [7] ดังตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลให้ลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายในสภาพแวดล้อมของยานพาหนะเนื่องจากสามารถรับมือกับสัญญาณรบกวนระหว่างผู้ให้บริการจากการแพร่กระจายของ Doppler เนื่องจากยานพาหนะที่เคลื่อนที่เร็วได้ดีขึ้นเมื่อนำมาเทียบกับ IEEE 802.11a โดยอาศัยการข้ามขั้นตอนการเข้าร่วม Basic Service Set (BSS) นอกจากนี้โปรโตคอลระดับบนสุดโดย ASTM กำลังถูกพัฒนาและมีกลุ่มผู้วิจัย IEEE 1609 working group ออกมาตรฐาน IEEE 1609.1, 1609.2, 1609.3 และ 1609.4 เพื่อการจัดการช่องสัญญาณและการรับส่ง

U.S. FCC allocated 75 MHz band in 1999 for ITS



รูปที่ 2.2 IEEE 802.11p channels (Based on B. Cash, 2008. North American 5.9 GHz DSRC Operational Concept / Band Plan)

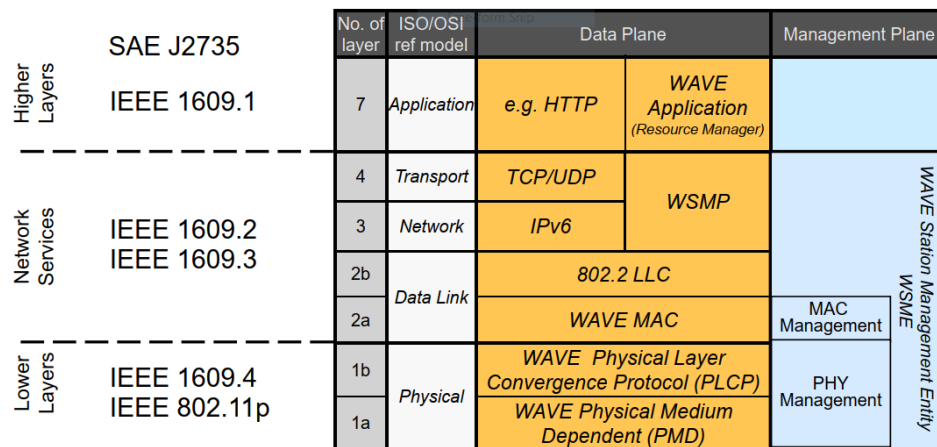
ข้อมูลนั้นจะถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEEE 1609 เพื่อใช้งานกับ DSRC โดยเป็นการกำหนดชั้นการทำงานระดับสูง (Higher layer) และใช้งาน IEEE 802.11p เป็นชั้นการทำงานระดับล่าง (Lower layer) โดยมาตรฐานทั้ง 4 นั้นแบ่งออกเป็น

1. IEEE 1609.4 (Multi-channel operation) คือมีหน้าที่กำหนดการสับเปลี่ยนของช่องสัญญาณระหว่าง Control Channel (CCH) เพื่อรับส่งข้อมูลขนาดสั้น (Wave Short Message WSM) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นข้อมูลเกี่ยวกับความปลอดภัย และ Service Channel (SCH) เพื่อรับส่งข้อมูลทั่วไประหว่างอุปกรณ์สื่อสาร

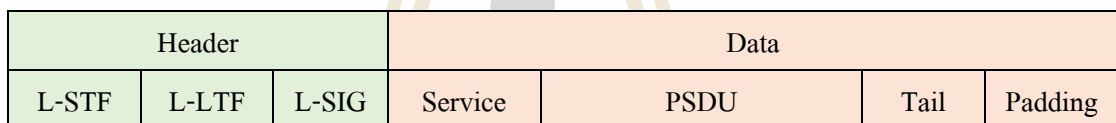
2. IEEE 1609.3 (Networking Services) มีหน้าที่ในการส่งข้อมูลขนาดสั้นนั้น หรือ Wave Short Message Protocol (WSMP)

3. IEEE 1609.2 (Security Services) มีหน้าที่ในการจัดการของความปลอดภัย

4. IEEE 1609.1 (Resource Manager) มีหน้าที่ในส่วนการจัดการข้อมูล [8] ดังรูปที่ 2.3 เทคโนโลยีการสื่อสาร IEEE 802.11p มีโครงสร้างของข้อมูลดังรูป 2.4 และมีแผนภาพการรับส่งข้อมูลในชั้นกายภาพ (PHY layer) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 IEEE 802.11p framework (Thomas Strang, Dipl. Matthias Röck, Vehicle Networks V2X communication protocols)



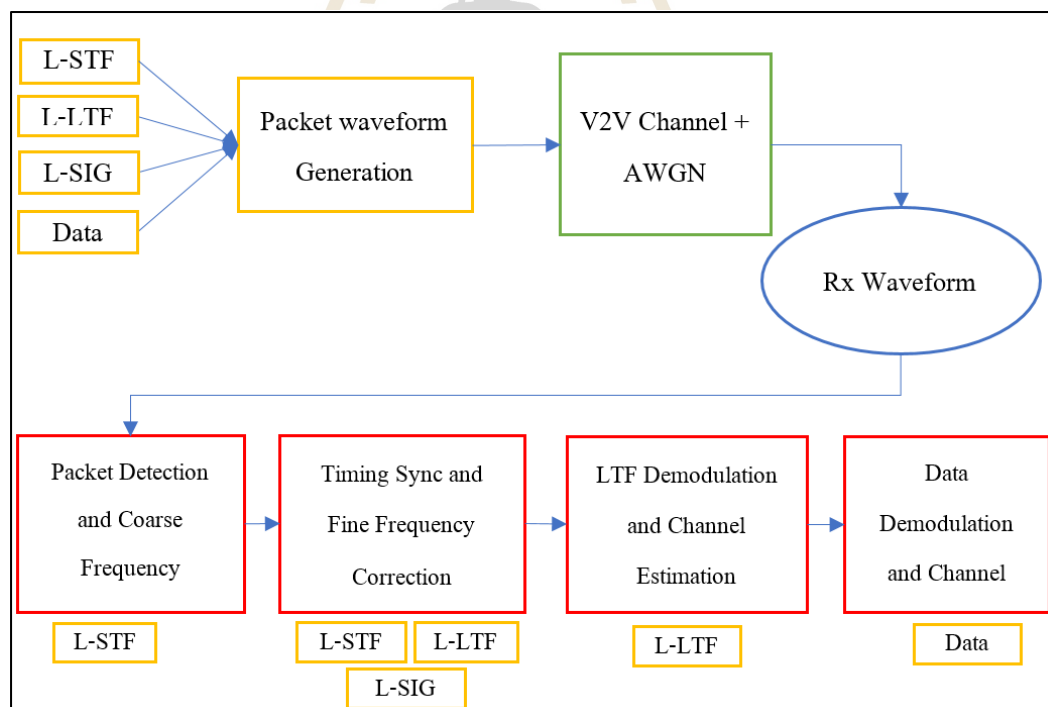
รูปที่ 2.4 Packet Structure IEEE 802.11p

ตารางที่ 2.1 MCS Schemes

MCS	Modulation scheme	Coding Rate	Data bits per OFDM Symbol	Coded bits per OFDM Symbol	Data Rate (Mbps)
0	BPSK	1/2	24	48	3
1	BPSK	3/4	36	48	4.5
2	QPSK	1/2	48	96	6
3	QPSK	3/4	72	96	9
4	16QAM	1/2	96	192	12
5	16QAM	3/4	144	192	18
6	64QAM	2/3	192	288	24
7	64QAM	3/4	216	299	27

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบระหว่าง IEEE 802.11a กับ IEEE 802.11p

Feature	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p
Data rate	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Mbps
Modulation	BPSK , QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK , QPSK, 16QAM, 64QAM
Frequency	5 GHz band	5.850 – 5.925 GHz
Number of subcarriers	52	52
Coding Rate	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4
Symbol Duration	4.0 μs	8.0 μs
Guard Period	0.8 μs	1.6 μs
Preamble Duration	16 μs	32 μs
Subcarrier spacing	312.5 kHz	156.25 kHz



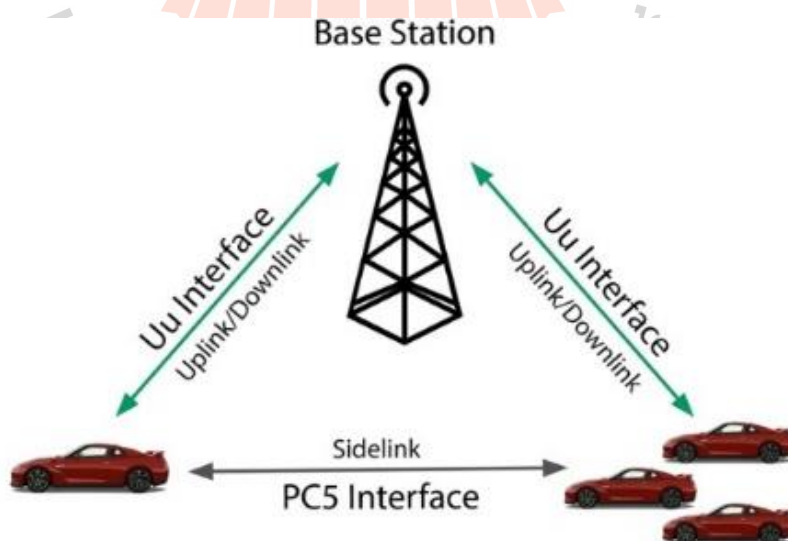
รูปที่ 2.5 การรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสาร IEEE 802.11p [9]

2.2.2 เทคโนโลยีการสื่อสาร LTE-V

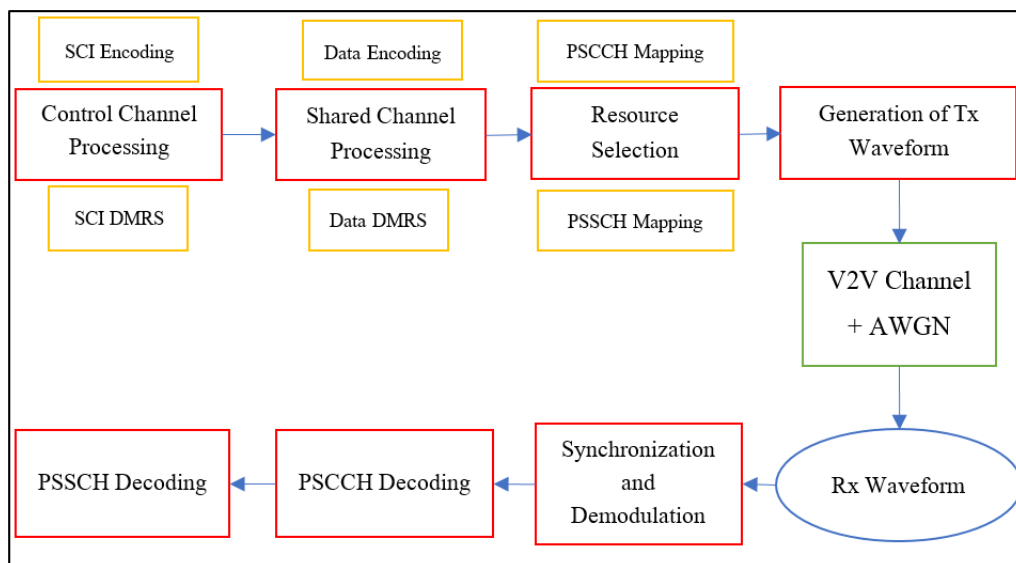
3GPP ได้พัฒนาฟังก์ชันการทำงานของ D2D (device-to-device) เพื่อให้สามารถสื่อสารระหว่างพาหนะได้โดยตรงใน Release 12 อย่างไรก็ตาม 3GPP ได้ประยุกต์ C-V2X (Cellular-V2X) เป็นการเชื่อมต่อแบบเซลลูลาร์อีกทั้งยังเป็นการปรับปรุงสำหรับการสื่อสาร V2X โดย C-V2X จะแบ่งการสื่อสารออกเป็นสองแบบ คือ

1. การสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับเครือข่าย (V2N) ซึ่งยานพาหนะจะเชื่อมต่อกับสถานีฐานเครือข่ายโทรศัพท์จะเรียกการสื่อสารนี้ว่า Uu

2. การสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ ซึ่งการสื่อสารนี้ไม่ต้องใช้สถานีฐานเครือข่ายโทรศัพท์โดยจะเชื่อมต่อกันโดยตรงได้ ทำให้มีค่าเวลาแฝงที่น้อย และมีความน่าเชื่อถือมาก เรียกการสื่อสารนี้ว่า PC5 [10] ดังรูปที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่าง 802.11p และ LTE-V คือ SC-OFDM โดย Symbol Duration ของ 802.11p นั้นมีค่าน้อยกว่าเป็น 10 เท่า Symbol Duration ของ LTE-V และการเข้ารหัสของ LTE-V จะเป็นแบบ Turbo ซึ่งจำนวนของ RBs (Resource Block) จะขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูลและการเลือก MCS (Modulation and Coding Schemes) [11] ใน 1 Sub-Frame จะประกอบไปด้วย 14 OFDM Symbol รองรับการกล้าสัญญาณ ตั้งแต่ QPSK ถึง 64 QAM ที่ช่องสัญญาณ 10 หรือ 20 MHz จะมีอัตราเร็วสูงสุด 41.472 Mbps [12] นอกจากนี้ LTE-V ยังมีการใช้ Demodulation reference signal (DMRS) ในการควบคุมการส่งข้อมูล มีการรับส่งข้อมูล ดังรูปที่ 2.7 ทำให้ผู้รับสามารถประมาณการการตอบสนองของช่องอย่างเหมาะสมใน 1 Sub-Frame ของ LTE-V PC5 จะมี DMRS อยู่ 4 สัญลักษณ์ [13,14]



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อของการสื่อสาร C-V2X



รูปที่ 2.7 การรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสาร C-V2X [14]

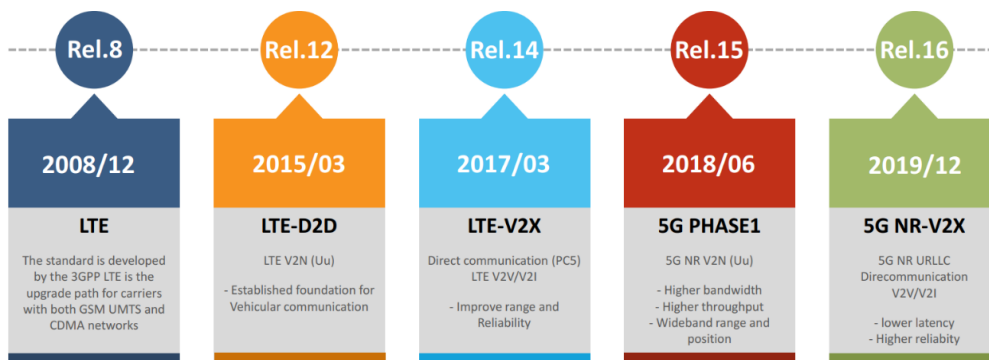
2.2.3 เทคโนโลยีการสื่อสาร 5G NR V2X

3GPP ได้เสนอครั้งแรกใน Rel.15 และได้ทำการพัฒนาเพิ่มการใช้งานใน Rel. 16 ดังรูปที่ 2.8 เพื่อให้การสื่อสารของยานพาหนะนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น 5G NR จะมีนำเชื่อถือที่มากกว่า ความเร็วของการรับส่งข้อมูลที่เร็วกว่า รองรับจำนวนการใช้งานที่มากกว่า และที่สำคัญมีค่าแฝงเวลาเพียง 1 มิลลิวินาที 5G NR รองรับคลื่นแบบ OFDM เพื่อการใช้งานที่จำนวนข้อมูลสูง และ DFT-s-OFDM สำหรับการเชื่อมต่อที่ไม่ต้องการข้อมูลสูง Release 16 ได้นำเสนอการเพิ่มเทคนิคใหม่ ๆ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการที่ทำให้ค่าเวลาแฝงนั้นมีค่าที่ต่ำมาก 5G NR สามารถรองรับการใช้เทคโนโลยี MIMO antenna เพื่อเพิ่มความจุและมีความครอบคลุม 5G NR ประกอบด้วย 2 ช่วงความถี่ก็คือ Sub 6 GHz (FR1: 450 MHz - 7.125 GHz) และ Millimeter wave (FR2: 24.25 GHz - 52.6 GHz) [16] ชั้นกายภาพถูกออกแบบเพื่อให้มีการสื่อสารที่น่าเชื่อถือมากขึ้น โดยเฉพาะในค่าเวลาแฝงที่ต่ำ เพียง 1 มิลลิวินาที ในรูปที่ 2.8 จะแสดงถึงความต้องการความแฝงเวลาของยานหนะอัจฉริยะ โดย 5G NR เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับยานพาหนะที่ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ยังรองรับการเข้ารหัสขั้นสูงอย่าง LDPC สำหรับช่องสัญญาณข้อมูล และการตรวจสอบความผิดพลาดแบบวนซ้ำ (CRC) โดยใช้การช่วย Polar code ในการควบคุมช่องสัญญาณ Framework ของ 5G NR มีความยืดหยุ่นและสามารถรองรับการให้บริการผู้ใช้งานได้มาก สิ่งสำคัญของการออกแบบเทคโนโลยี 5G NR คือมี Subframe เป็นของตัวเอง การปรับปรุงที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือโครงสร้างเฟรมใน 5G NR นั้น จะประกอบด้วย 14 OFDM ต่อหนึ่งสล็อต เพื่อลด

ความหน่วง 5G NR นั้นมี Mini-Slot เพื่อส่งข้อมูลโดยใช้สัญลักษณ์ OFDM เพียง 2, 4 หรือ 7 [17] ในรูปที่ 2.8 แสดงถึงการพัฒนาของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และตารางที่ 2.3 แสดงถึงการเปรียบเทียบในแต่ละเทคโนโลยี

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบในแต่ละเทคโนโลยี

Feature	802.11p	LTE-V Rel-14	5G NR Rel-16
Published	2010	2016	2019
Channel size	10,20 MHz	10,20 MHz	10,20,40,60,80, 100 MHz
channel coding	Convolutional	Turbo	LDPC
Waveform	OFDM	CP-OFDM	SC-FDMA and OFDMA
Latency	100 ms	50 ms	1 ms
bitrate	3-27 Mbps	~ 41 Mbps	PC5 ~60 Mbps
Coverage distance @ 90% error	< 1 Kilometer	~1 กิโลเมตร direct mode และกว้างมาก ด้วยเซลล์ลูตาร์	~2 กิโลเมตร direct mode และกว้างมาก ด้วยเซลล์ลูตาร์
MIMO support	No	รองรับสายอากาศ 2Rx , 2Tx	รองรับสายอากาศ 8Rx , 8Tx
Modulation support	Up to 64 QAM	Up to 64 QAM	Up to 256 QAM
High mobility support	<=500 Km/h ด้วยการติดตั้งขั้นสูง	<=500 Km/h ด้วยการติดตั้งขั้นสูง	<=500 Km/h ด้วยการติดตั้งขั้นสูง



รูปที่ 2.8 การพัฒนาของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 Bit Error Rate (BER) และ Packet Error Rate (PER)

เพื่อที่จะวัดผลให้มีความถูกต้อง BER จะถูกนำมาใช้และเป็นพื้นฐานสำหรับการประเมินผล [18] อย่างไรก็ตาม การสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุจะมีความเป็นสากลในด้านการประเมินผล ค่า PER จึงถูกนำมาใช้ในการวัดผลด้วย มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$PER = \frac{Packet_{tx} - Packet_{rx}}{Packet_{tx}} \times 100\% \tag{2.1}$$

$$BER = 1 - (1 - PER)^{\frac{1}{8L}} \tag{2.2}$$

เมื่อ L คือ ขนาดของข้อมูล

BER คือ อัตราของจำนวนบิตที่ภาครับความผิดพลาดต่อจำนวนบิตที่ถูกส่งมาทั้งหมด

PER คือ อัตราของจำนวนแพ็คเกจที่ภาครับ ความผิดพลาดต่อจำนวนแพ็คเกจที่ถูกส่งมาทั้งหมด

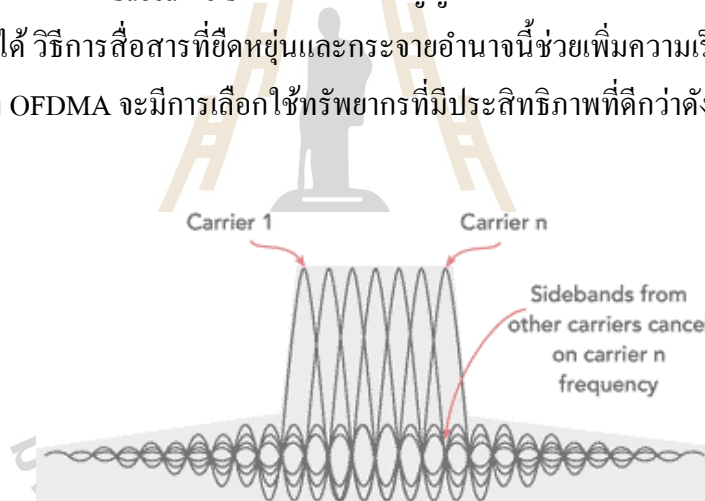
2.3.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

จากผลงานเขียนของ (Terry, John, and Juha Heiskala. OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide. Sams publishing, 2002) ได้ระบุว่า Orthogonal Frequency Division Multiplex เป็นรูปแบบของ Multiple Carrier Modulation สมัยใหม่ที่มีการเพิ่มความหนาแน่นของ

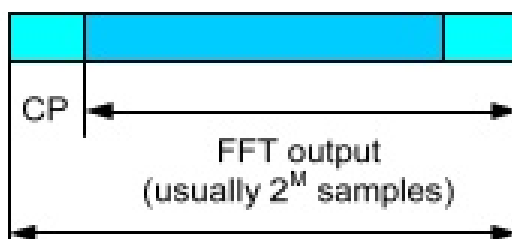
สัญญาณพาหะย่อยและการซ้อนทับสัญญาณพาหะที่อยู่ติดกัน OFDM เป็นเทคโนโลยีการเข้ารหัสในชั้นกายภาพ ซึ่งจะทำให้สามารถรองรับความจุได้มากกว่าคลื่นวิทยุในความถี่เดียวกัน ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว OFDM ถูกใช้อยู่ในคลื่นความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นคลื่นความถี่มาตรฐานสำหรับมาตรฐาน เครือข่าย IEEE 802.11

CP-OFDM การทำงานของมันคล้ายกับ OFDM จะมี Cyclic Prefix นำหน้า แต่ CP-OFDM มีการเว้นระยะห่างของ Subcarrier ตัวแปรที่เรียกว่า Numerology ในกรณีที่ LTE ใช้การแยกช่องแคบรีซิ่งที่ 15 kHz CP-OFDM สามารถใช้ 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz และ 120 kHz เป็นต้น CP-OFDM จะทำให้สามารถทนต่อการรบกวนของ Interference และ Multipath ได้ดี มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.10

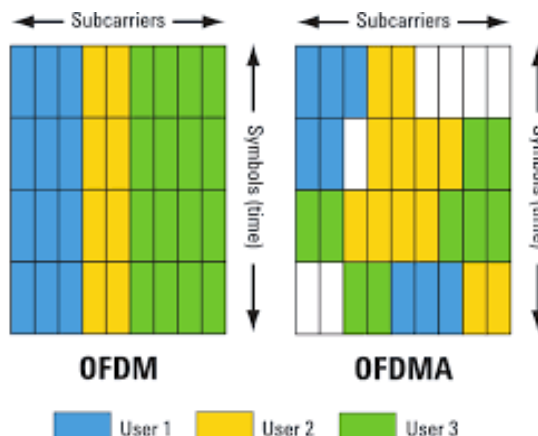
OFDM และ OFDMA จะแยกข้อมูลที่ส่งออกเป็นแพ็คเกจขนาดเล็กละหลายชุด เพื่อย้ายข้อมูลขนาดเล็กลงด้วยวิธีง่าย ๆ นอกจากนี้ OFDMA ยังแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นการจัดสรรความถี่ขนาดเล็กที่เรียกว่า subcarriers การแบ่งช่องสัญญาณย่อยจะทำให้แพ็คเกจขนาดเล็ก สามารถจัดการเวลาแฝงได้ วิธีการสื่อสารที่ยืดหยุ่นและกระจายอำนาจนี้ช่วยเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพของเครือข่าย ซึ่ง OFDMA จะมีการเลือกใช้ทรัพยากรที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าดังรูป 2.11



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ OFDM

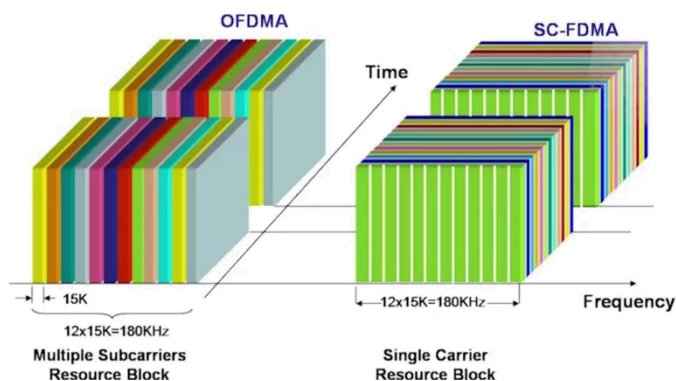


รูปที่ 2.10 โครงสร้าง CP-OFDM



รูปที่ 2.11 ความแตกต่างระหว่าง OFDM กับ OFDMA

ในหนังสือเรื่อง (Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission, H.G. Myung et.al IEEE Vehicular Technology Magazine, September 2006, pp.30-38) SC FDMA ย่อมาจาก Single-Carrier Frequency Division Multiple Access ทาง 3GPP ซึ่งเป็นหน่วยงานดูแลเรื่องมาตรฐานของระบบ วางแผนให้ OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) นั้นเป็นตัวเลือกกระบวนการ Multiple Access OFDM ส่งข้อมูลในหลาย Carrier ไปพร้อม ๆ กัน แต่ละ Carrier โดยไม่กวนกัน เพราะวิธีการเลือก Carrier ที่เรียกว่า Orthogonal ทำให้เกิดความทนทานต่อความไม่สมบูรณ์ของช่องทางการสื่อสาร ที่แต่ละย่านความถี่มีผลตอบสนองไม่เท่าเทียมกัน OFDMA ก็มีข้อเสียที่สำคัญมาก ๆ ตรงที่การที่ขอบ (Envelope) ของสัญญาณส่งนั้น มีการกระเพื่อมมากเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของกำลังที่ส่งไป นั่นคือ OFDMA ให้ Peak to Average Power Ratio (PAPR) ที่สูง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบ Power Amplifier เพราะ PAPR สูง หมายถึงการที่ต้องหา Power Amplifier ที่มาก ๆ เพื่อป้องกันการเกิดความเพี้ยนที่เรียกว่า Intermodulation Distortion ทาง 3GPP ได้นำเสนอ OFDMA อีกเวอร์ชันหนึ่ง ซึ่งจะตัดปัญหาของ PAPR คือ วิธีการเรียกใช้ multicarrier ให้กลายเป็น OFDMA ที่เป็นแบบ Single-Carrier โดยให้ชื่อว่า Single-Carrier FDMA หรือ SC-FDMA แต่อย่าเข้าใจผิดว่า ระบบ SC-FDMA นั้นเป็นแบบ Single-carrier จริง ๆ เพราะแท้จริงแล้วมันก็เป็น Multi-Carrier ในรูปแบบหนึ่ง SC-FDMA มีหลักการที่แตกต่างจาก OFDMA เพียงแค่ว่า แทนที่จะส่งข้อมูลที่อยู่ในหลาย Carrier ไปพร้อม ๆ กัน แบบขนาน (Parallel) เหมือน OFDMA ก็เปลี่ยนเป็นส่งข้อมูลในหลาย Carrier นี้ เป็นทางอนุกรม (Serial) แทน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความต่างแตกต่างระหว่าง OFDMA กับ SC-FDMA

2.3.3 Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) เป็นหน่วยวัดที่ถูกนำมาใช้ในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ที่เปรียบเทียบระดับของสัญญาณที่ต้องการกับระดับของสัญญาณรบกวนเบื้องหลัง (background noise) [20] SNR ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อรบกวนเบื้องหลัง (background noise) ดังสมการที่ 2.3 ซึ่งมักแสดงเป็นเดซิเบล โดยรวมแล้วความจุของช่องสัญญาณแบนด์วิธและอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนล้วนมีผลต่อความจุสูงสุดของช่องสื่อสาร ยิ่งไปกว่านั้นการค้นพบนี้เป็นของ Claude Shannon และเขาสร้างความสัมพันธ์นี้ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง ในสาขาอิเล็กทรอนิกส์และวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ต่างเรียกมันว่า กฎของแซนนอนหรือทฤษฎีบทของแซนนอน – ฮาร์ทลีย์

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_{signal} คือ กำลังของสัญญาณ

P_{noise} คือ กำลังของสัญญาณรบกวนที่จุดเดียวกัน

2.3.4 Noise Figure

Noise Figure (F) คือ การลดทอนคุณภาพของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) จากผลของสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ สมการเขียนได้ดังนี้

$$F = \frac{\text{SNR}_{\text{in}}}{\text{SNR}_{\text{out}}} \quad (2.4)$$

SNR_{in} คือ กำลังของสัญญาณขาเข้าต่อกำลังสัญญาณรบกวนขาเข้า

SNR_{out} คือ กำลังของสัญญาณขาออกต่อกำลังสัญญาณรบกวนขาออก

2.3.5 V2V Channel model

ในงานวิจัยเรื่อง [21] Intelligent Transport Systems (ITS) “ITS-G5 Access Layer Specification for Intelligent Transport Systems Operating in The 5 GHz Frequency Band v1.3.0”, 2019 ได้ศึกษา Channel Model สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ การศึกษาทั้งหมดเกี่ยวกับ RMS Doppler และ Delay Spread และได้สร้างตารางที่มีสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ตาม RMS Delay และ Doppler Spread จากนั้นกำหนด Multipath Taps แบบต่าง ๆ ที่แสดงสถิติเหล่านั้น ซึ่งได้มีสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13 ประกอบไปด้วย

พื้นที่ชนบท LOS

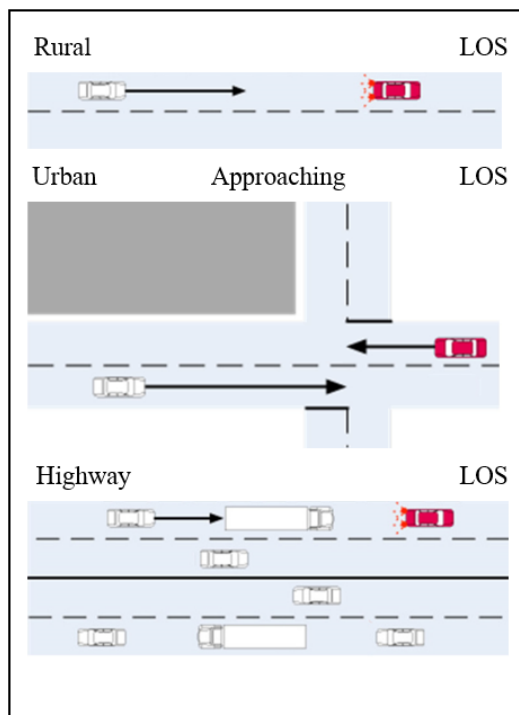
กรณีนี้เป็นสภาพแวดล้อมของยานพาหนะ 2 คัน ที่มีพื้นที่เปิดโล่งกว้าง ไม่มีสิ่งก่อสร้างหรือสิ่งกีดขวาง ได้ผล V2V Channel Model ในตารางที่ 2.4

พื้นที่ในเมือง LOS

กรณีบนถนนในเมืองเป็นสภาพแวดล้อมที่มียานพาหนะ 2 คัน เคลื่อนที่เข้าหากัน เนื่องจากเป็นสภาพแวดล้อมที่มีพื้นที่เล็กจึงจำลองให้ยานพาหนะ 2 คัน เคลื่อนที่เข้าหากัน เป็นสภาพแวดล้อมที่มีการสะท้อนและ Multipath Fading เนื่องจากมีสิ่งก่อสร้าง ไฟจราจร และยานพาหนะที่แออัดมากกว่าพื้นที่ชนบท ได้ผล V2V Channel Model ในตารางที่ 2.5

พื้นที่บนทางด่วน LOS

ในกรณีนี้เป็นการสื่อสารของยานพาหนะ 2 คัน ที่เคลื่อนที่ตามกันบนถนนที่มีมากกว่า 2 ช่อง มีความเร็วสูง ทำให้ doppler shift มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ 2 กรณีข้างต้น ได้ผล V2V Channel Model ในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.13 สภาพแวดล้อมการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

ในตารางที่ 2.4, 2.5 และ 2.6 เป็นตารางที่บอกถึง Power Delay Doppler ในแต่ละสภาพแวดล้อม และในแต่ละ Tab จะมีชุดของ Power Delay Doppler เพื่อบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยสภาพแวดล้อมไหนที่มีการกีดกันมาก เช่น ตึก สภาพแวดล้อมนั้นมี Delay ที่มาก และสภาพแวดล้อมไหนที่มีความเร็วของยานพาหนะมาก จะมีค่า Doppler มากขึ้นตามลำดับ เป็นไปตามสภาพแวดล้อมมาตรฐานของ Intelligent Transport Systems (ITS)

ตารางที่ 2.4 Power Delay Doppler ของสภาพแวดล้อมแบบชนบท

	Tap1	Tap2	Tap3	Units
Power	0	-14	-17	dB
Delay	0	83	183	ns
Doppler	0	492	-295	Hz
Profile	Static	HalfBT	HalfBT	

ตารางที่ 2.5 Power Delay Doppler ของสภาพแวดล้อมแบบในเมือง

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-8	-10	-15	dB
Delay	0	117	183	333	ns
Doppler	0	236	-157	492	Hz
Profile	Static	HalfBT	HalfBT	HalfBT	

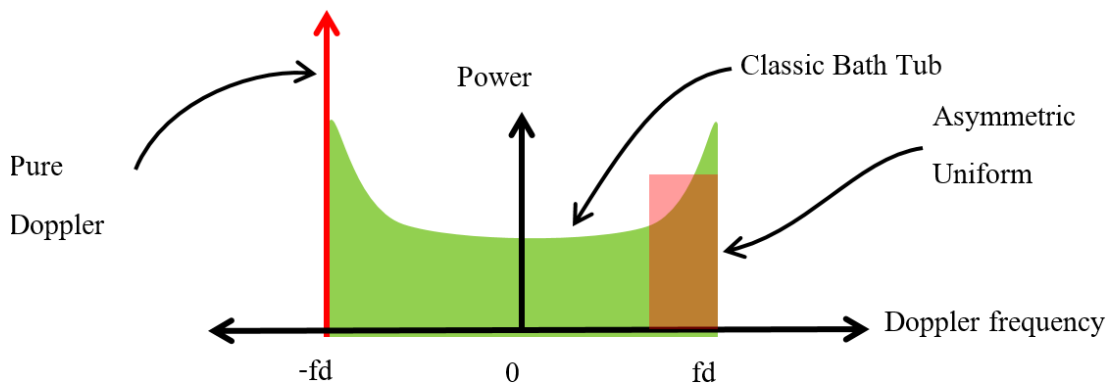
ตารางที่ 2.6 Power Delay Doppler ของสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-10	-15	-20	dB
Delay	0	100	167	500	ns
Doppler	0	689	-492	886	Hz
Profile	Static	HalfBT	HalfBT	HalfBT	

2.3.6 Doppler Spectra

ในงานวิจัยของ [22] M. Kahn. เรื่อง “V2V Radio Channel Models,” IEEE 802.11-14/0259r0, Feb. 2014 ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ความล่าช้า (Delay) และกำลังเฉลี่ยของแท็ป สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสภาพแวดล้อม ในขณะที่ Doppler Frequencies สามารถปรับขนาดตามความเร็วที่กำหนดเป็นส่วนหนึ่งของสภาพแวดล้อม [22] เราต้องการสเปกตรัมแบบอสมมาตร ดังนั้น Doppler Spectra จึงถูกระบุเป็น Half-Bath Tub ตัวเลือกอื่น ๆ จึงเป็นแบบ Classic Bathtub ดังรูปที่ 2.14

คุณลักษณะที่สำคัญของ Doppler Spectra เหล่านี้คือทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อ Doppler อย่างทันที สอดคล้องกับความเร็วของในแต่ละสภาพแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น รถสองคันที่เข้าใกล้ทางแยกที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ข้าง ๆ มักจะบีบอัดสัญญาณไปในทางตรง แต่สัญญาณจะสะท้อนไปในรถบรรทุกคันต่อไป



รูปที่ 2.14 สเปกตรัม Doppler

2.3.7 อัตราขยายของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์และการจำลองผล สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis Transmission Equation) เป็นสมการถูกใช้ในการจำลองผลของอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) [23] โดยจะใช้ค่าจากผลการวัดทดสอบระยะทางที่ส่งได้ ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \tag{2.5}$$

เมื่อทำการแปลงหน่วย dB จะได้ตามดังสมการที่ 2.6

$$P_{r\text{dB}} = P_{t\text{dB}} + G_{r\text{dB}} + G_{t\text{dB}} + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) \tag{2.6}$$

- โดยที่ P_r คือ กำลังงานจากสายอากาศภาคส่ง (วัตต์)
- P_t คือ กำลังงานจากสายอากาศภาครับ (วัตต์)
- G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
- G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
- R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)
- λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

2.3.8 RSSI

RSSI หรือ Receive Signal Strength Indicator คือค่าที่บ่งบอกถึงความแรงสัญญาณของสัญญาณวิทยุที่ได้รับ [24] โดยระดับความแรงของสัญญาณ มีหน่วยเป็น dBm (Decibel Milliwatts) อ้างอิงที่ 0 dBm จะมีค่าเท่ากับ 1 Milliwatt โดยค่า RSSI จะแปรผันกับความแรงสัญญาณ ค่า RSSI มีค่ามากแสดงว่าภาครับอยู่ใกล้กับภาคส่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$x = 10 \log \left(\frac{P}{1 \text{mW}} \right) \quad (2.7)$$

$$P = 1 \text{mW} \times 10^{\frac{x}{10}} \quad (2.8)$$

โดยที่ x คือ ระดับของ RSSI (dBm)

P คือ กำลัง (วัตต์)

2.3.9 free-space path loss (FSPL)

จากบทความของ (C.A. Balanis, "Antenna Theory", 2003, John Wiley and Sons Inc.) อธิบาย FSPL ไว้ว่าคือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ โดยในที่นี้หมายถึงการเดินทางของคลื่นในลักษณะเส้นสายตา (Line-of-sight) ปราศจากสิ่งกีดขวางผ่านพื้นที่ว่าง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความถี่ LTE-V ในย่าน 700 MHz 5GNR ในย่าน 2600 Mhz และ IEEE802.11p 5.9 GHz ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$FSPL(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.9)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (m)

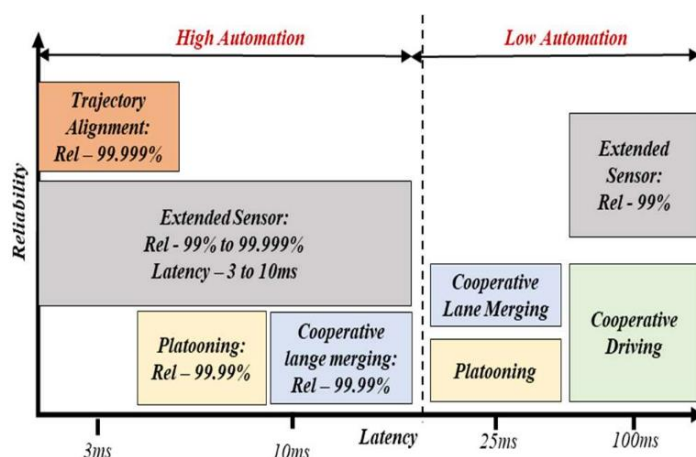
f คือ ความถี่ของคลื่น (Hz)

c คือ ค่าคงที่ของความเร็วแสง (2.998×10^8 m/s)

2.3.10 Latency

ค่าเวลาแฝง หรือ Latency คือ เวลาในการตอบสนองระหว่างภาคส่งกับภาครับ การวัดเวลาแฝงที่ใช้งานทั่วไปเรียกว่า Round-Trip-Time (RTT) ซึ่งกำหนดเป็นเวลาที่แพ็คเก็ตข้อมูลที่จะ

เดินทางจากผู้ส่งไปยังผู้รับและย้อนกลับมาอีกครั้ง [26] โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็นมิลลิวินาที (Millisecond) ผลกระทบที่สำคัญต่อเวลาแฝง ได้แก่ ความเชื่อมต่อของเครือข่าย ระยะทาง และความแออัดของแบนด์วิดท์ เป็นต้น และในงานวิจัยของ (Lee, Kwonjong, et al. "Latency of Cellular-Based V2X: Perspectives on TTI-Proportional Latency and TTI-Independent Latency." IEEE Access 5 (2017) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความต้องการเวลาแฝงของยานพาหนะในรูปแบบการใช้งานต่าง ๆ ดังรูป 2.15



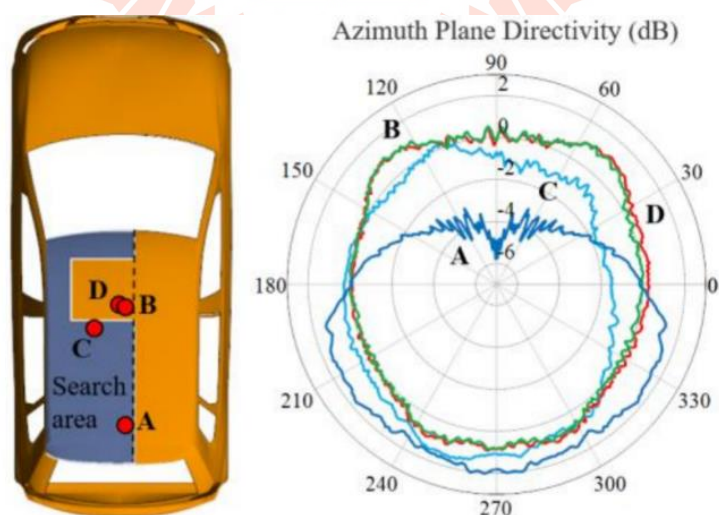
รูปที่ 2.15 ความต้องการความแฝงเวลาในแต่ละการใช้งาน

2.3.11 Basic Safety Message (BSM)

สำหรับงานวิจัยของ [26] Svenson, Alrik L., Gordon Peredo, and Luca Delgrossi. "Development of a Basic Safety Message for Tractor-Trailers for Vehicle-to-Vehicle Communications." 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Gothenburg, Sweden. 2015. ได้ศึกษาเกี่ยวกับ รูปแบบการส่งข้อความของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ โดยได้แบ่งการทำงานเป็น 2 ประเภท คือ แบบปลอดภัยและแบบไม่ปลอดภัย แบบปลอดภัยคือ ข้อความที่จำเป็นสำหรับการขับขี่ เพื่อให้ทำให้ผู้ขับขี่นั้นมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ประกอบไปด้วย Message ID, Time, Latitude, Longitude, Heading, Elevation, Speed, Steering Wheel Angle, Brake System Status and Vehicle Size ข้อมูลเหล่านี้มีขนาดประมาณ 200 ไบต์ ไม่ต้องการความเร็วในการส่งที่สูงมากแต่ต้องการความน่าเชื่อถือในการส่งและเวลาแฝงเวลาที่น้อย ส่วนแบบไม่ปลอดภัยเป็นการใช้งานที่อำนวยความสะดวกบนยานพาหนะ เป็นสื่อสารที่ต้องการความเร็วที่สูง เช่น การดูหนัง ฟังเพลง เป็นต้น

2.4 โมดูลอุปกรณ์ Arada system LocoMate

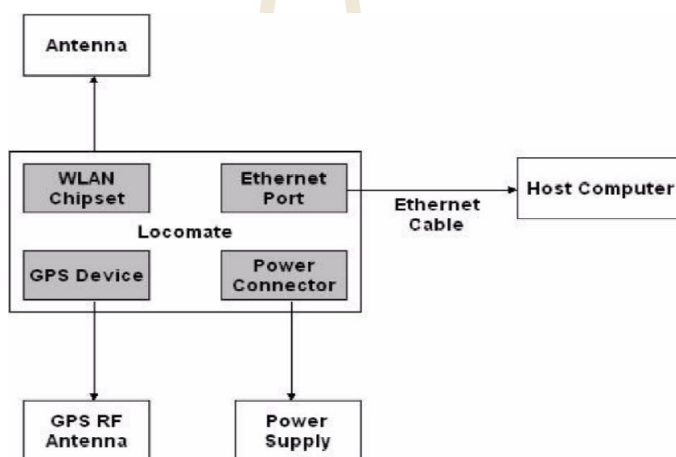
สำหรับงานวิจัยต่อไปนี (Sassi, Aymen, Yassin Elhillali, and Faiza Charfi. "Evaluating Experimental Measurements of The IEEE 802.11 p Communication Using ARADA LocoMate OBU Device Compared to The Theoretical Simulation Results." *Wireless Personal Communications* 97.3 (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ Arada Locomate ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่รับรองมาตรฐานจาก U.S. Department of Transportation (US DOT) และมีการวิจัยมากมายที่เลือกใช้ อุปกรณ์นี้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ Arada Locomate เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณระหว่างยานพาหนะ มาใช้ในการวิจัยเพื่อวัดประสิทธิภาพของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ Arada LocoMate เป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบไร้สายบนเทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่างยานพาหนะกับระหว่างยานพาหนะ จะช่วยบริการด้านความปลอดภัยและข้อมูลแก่ผู้ใช้งานยานพาหนะ อุปกรณ์ GPS ในตัว ซึ่งสามารถใช้เป็นอุปกรณ์นำทางสำหรับยานพาหนะได้ [26] ตามค่าเริ่มต้นอุปกรณ์จะส่งข้อมูลตำแหน่งอย่างต่อเนื่อง ความถี่ 5.85 - 5.925 GHz เข้ารหัสตามรูปแบบ Basic Safety Message และในบทความของ (Whalen, Eamon, et al. "Antenna placement optimization for Vehicle-to-Vehicle communications." 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. IEEE, 2018.) ได้ศึกษาดำเนินการติดตั้งสายอากาศบนยานพาหนะ และได้ผล Radiation Pattern การติดตั้งสายอากาศบนยานพาหนะในแต่ละตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Radiation Pattern ของการติดตั้งสายอากาศบนยานพาหนะ



รูปที่ 2.17 โมดูลอุปกรณ์ Arada LocoMate



รูปที่ 2.18 แผนภาพของ Locomate พร้อมการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

2.4.1 คุณสมบัติของ อุปกรณ์ Arada system LocoMate

- MIPS processor running at 680MHz
- Flash – 16MB
- SDRAM – 64MB
- Gigabit Ethernet Interface
- Atheros AR5414 based WLAN Mini PCI
- Output power @ 23dBm
- Integrated GPS device, with external RF antenna

2.5 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ จะเห็นว่าการสื่อสารระหว่างยานพาหนะนั้นมีหลายเทคโนโลยีด้วยกัน โดยในการส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะนั้นต้องการการสื่อสารที่มีความแฝงเวลาที่ต่ำและความน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพในแต่ละเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ เพื่อทำการเปรียบเทียบในการวัดค่าในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย ในการเตรียมความพร้อมสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ 5G V2X ในอนาคต



บทที่ 3

การออกแบบและจำลองผล

3.1 บทนำ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ผ่านมา พบว่าในแต่ละเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ จะมี Carrier, Duration Symbol และ Cyclic Prefix ที่แตกต่างกันในแต่ละเทคโนโลยี โดยการจำลองผลจะกำหนด Ptx, Gtx, Grx, Payload และ Modulation ให้เท่ากันในแต่ละเทคโนโลยี โดยได้นำ Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS) จากสถาบัน Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria ผ่านโปรแกรม MATLAB ในการจำลอง โดยในการจำลองจะมุ่งเน้นไปที่ชั้นกายภาพ

3.2 Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS)

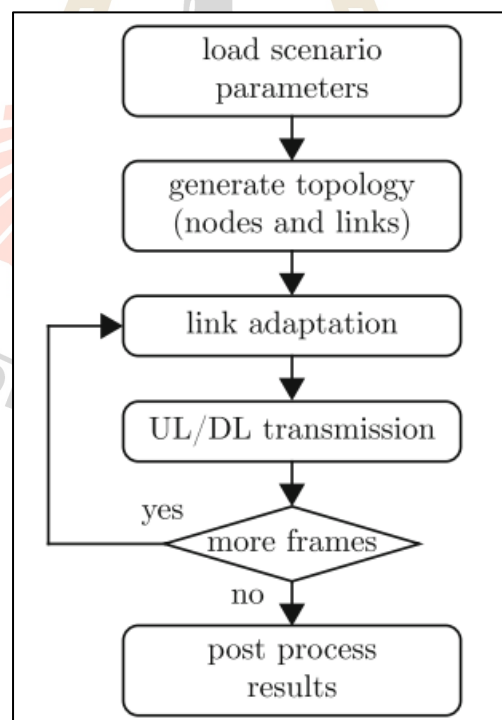
VCCS ถูกพัฒนาขึ้น โดยกลุ่มนักวิจัยการสื่อสารไร้สายจากสถาบันโทรคมนาคม TU Wien มีประวัติอันยาวนานและประสบความสำเร็จในการพัฒนา แบ่งปันเครื่องจำลองการสื่อสารเซลล์ลูลาร์ที่เป็นไปตามมาตรฐานภายใต้ใบอนุญาตการใช้งานทางวิชาการ การใช้งาน Vienna Simulators [27] เริ่มต้นในปี 2009 ต่อมาถูกพัฒนามาเรื่อย ๆ จนถึง 5G โปรแกรมจำลองช่วยให้สามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ ที่เป็นไปตามมาตรฐานต่าง ๆ ซึ่งรวมถึง LTE และ 5G นอกจากนี้ยังกำหนดค่าพารามิเตอร์ระบบไร้สายที่ใช้ orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) เช่น WiMAX, IEEE 802.11a/p หรืออื่น ๆ ที่คล้ายกัน

โปรแกรมจำลองมุ่งเน้นไปที่การจำลองในชั้นกายภาพ ในรายละเอียดระดับสูง จะพิจารณาการส่งสัญญาณเวลาที่แท้จริงผ่านช่องสัญญาณไร้สายที่จำลองในรายละเอียดของแต่ละตัวอย่าง สิ่งนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์รายละเอียดของโครงสร้างของชั้นกายภาพ ของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ และการตรวจสอบผลกระทบของความล่าช้าของช่องสัญญาณและการแพร่กระจายของ Doppler บนรูปคลื่นของชั้นกายภาพ จากที่กล่าวไว้ในข้างต้น โปรแกรมจำลองสามารถรองรับการจำลองตามมาตรฐานของช่องสัญญาณ physical downlink shared channel (PDSCH) และ physical uplink shared channel (PUSCH) ของ LTE และ 5G โดยใช้เครือข่ายการประมวลผลสัญญาณที่ได้อธิบายไว้ใน [28, 29] อย่างไรก็ตามการจำลองยังสามารถปรับการเข้ารหัส modulation and coding schemes (MCS)

การนำเสนอของ 3GPP แนวคิดของเครือข่าย 5G นั้นมีความยืดหยุ่นของเวลาและความถี่ของ Resource Element ซึ่งมีความหมายคือการที่ Subcarrier Spacing และ Symbol Duration ของ Multicarrier Waveform ปรับเปลี่ยนได้เพื่อรองรับการใช้งานบริการที่หลากหลาย เช่น Latency, Coverage และ Throughput นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยน Channel Condition เช่น Delay, Doppler Spread พารามิเตอร์เหล่านี้ สามารถปรับได้อย่างอิสระ สรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองสามารถเปรียบเทียบของรูปแบบคลื่นต่าง ๆ ร่วมกับการเข้ารหัสช่องสัญญาณต่าง ๆ ภายใต้เงื่อนไข Power, Delay และ Doppler Spread

3.3 Simulator structure

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างทั่วไปของโปรแกรมจำลอง การจำลองผลเราจะกำหนดค่า Signal to Noise Ratio (SNR) สำหรับการสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับ จากนั้นจะทำการเพิ่มค่า SNR ไปเรื่อย ๆ เป้าหมายของการจำลอง คือเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในแง่ของประสิทธิภาพของชั้นกายภาพ เช่น Packet Error Rate หรือ Bit Error Rate



รูปที่ 3.1 รูปแบบการทำงานของกรจำลองเบื้องต้น

รูปที่ 3.1 แสดงถึงรูปแบบการทำงานของการทำงานของการจำลองผล ขึ้นตอนเริ่มต้นคือการระบุและหาไฟล์สภาพแวดล้อมจำลองให้กับตัวจำลอง (Power, Delay และ Doppler) รวมถึงการกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้น (Ptx, Gtx, Grx, , Payload และ MCS) จากนั้นจะสร้างเครือข่ายคือการกำหนดโหนดและการเชื่อมต่อที่เกี่ยวข้องในเครือข่าย โหนดมีบทบาทเป็น Base Station (BS) หรือผู้ใช้งาน ในที่นี้คือยานพาหนะกับยานพาหนะ การเชื่อมต่อสามารถทำหน้าที่เป็น Downlink (DL) หรือ Uplink (UL) หรือ Sidelink (SL) และในการจำลองผล จะมีการเข้ารหัสที่แตกต่างกันในแต่ละเทคโนโลยี

3.4 Channel coding

ในการสร้างบล็อกการส่งคือ channel coding โปรแกรมจำลองรองรับการเข้ารหัสหลายแบบ เช่น Convolution, Turbo, LDPC และ Polar การเข้ารหัสแบบนี้รองรับเทคโนโลยีครอบคลุมทั้ง 3 เทคโนโลยี IEEE 802.11p, LTE-V และ 5G NR V2X ดังในตารางที่ 2.3 โดยที่ IEEE 802.11p ใช้ Convolution , LTE-V ใช้ Turbo และ 5G NR ใช้ LDPC กับ Polar Code และโปรแกรมยังรองรับ Cyclic Redundary Check (CRC) เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

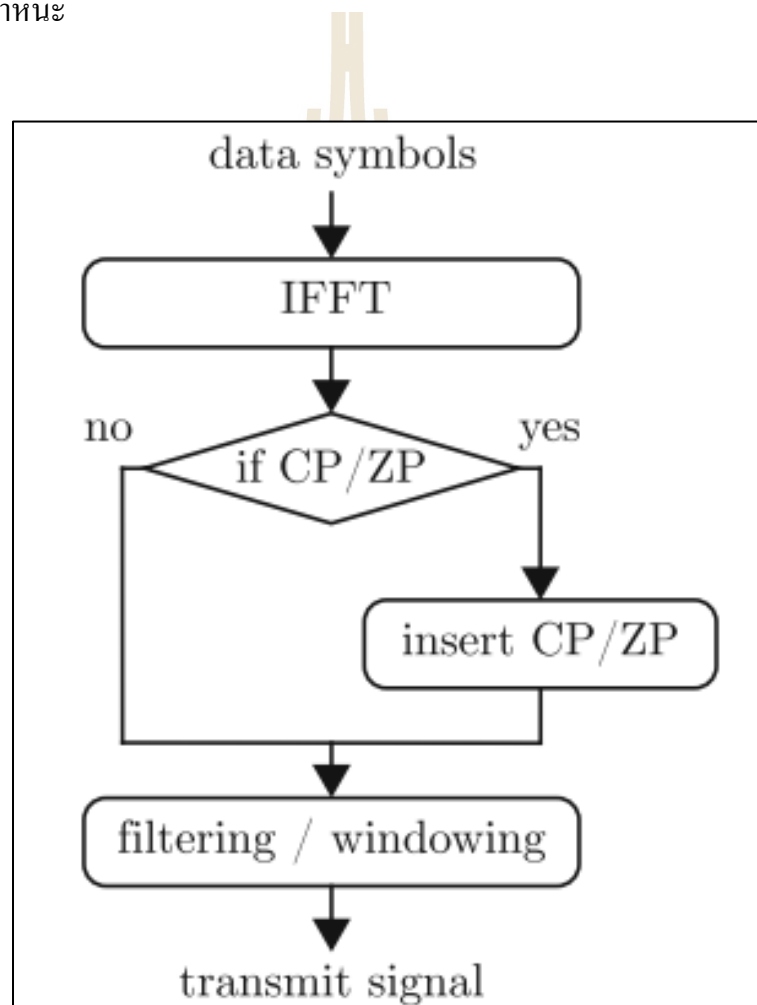
บล็อกการประมวลผลแรกในสายส่งคือการเข้ารหัสช่องสัญญาณซึ่งมีการแก้ไขข้อผิดพลาดและความสามารถในการตรวจจับให้กับสัญญาณที่ส่ง โปรแกรมจำลองรองรับรูปแบบการเข้ารหัสได้แก่ Convolutional, Turbo, LDPC และ Polar Code การเข้ารหัสพวกนี้ถูกนำเสนอโดย 3GPP ตารางที่ 2 สรุปรูปแบบการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่รองรับและอัลกอริทึมการถอดรหัสที่เกี่ยวข้อง รหัสเทอร์โบและ Convolutional เป็นไปตามมาตรฐาน LTE [30] รหัส LDPC เป็นไปตามข้อกำหนด 5G NR [31] และ รหัสการตรวจสอบความซ้ำซ้อนแบบวนซ้ำ (CRC) ซึ่งรวมถึงการสร้างรหัสและทั้งหมดตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน

3.5 Modulation

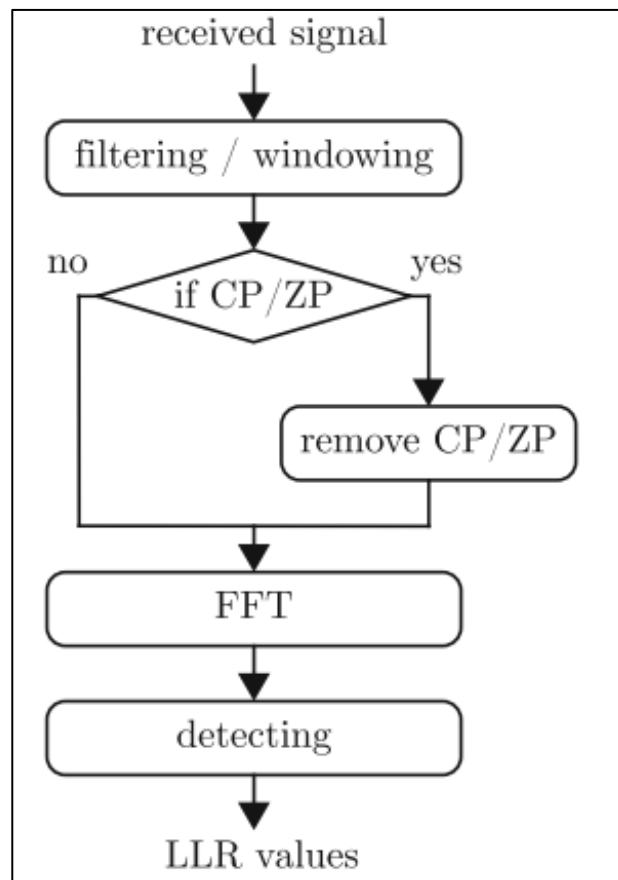
ตามข้อกำหนดของ 3GPP ในการออกแบบเกี่ยวกับ NR PHY ผู้ผลิตอุปกรณ์เลือกใช้รูปแบบคลื่นแบบ OFDM-base ใน multicarrier wave form และ Cyclic prefix OFDM (CP-OFDM) จะเป็นโครงสร้างการส่งพื้นฐานใน 5G อย่างไรก็ตาม โปรแกรมรองรับรูปแบบคลื่นอีกมากมาย เช่น CP-OFDM, WOLA, UFMC และ f-OFDM แล้วยังรองรับ FBMC ที่มีแนวโน้มจะมีการนำมาใช้นอกเหนือจาก 5G [32] โดย Flowcharts พื้นฐานที่ใช้สำหรับการสร้างสัญญาณส่ง และการรับสัญญาณในการส่งข้อมูล แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

โดยทั่วไป Filter และ Windowing Operation จะทำใน Time Domain หลังจาก Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) ขึ้นอยู่กับรูปแบบการเลือก Modulation Scheme (MCS) โดยที่โครงสร้างบางอย่างจะใช้ Cyclic Prefix นำหน้า เช่น CP-OFDM, WOLA หรือ Zero Prefix เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนที่เกิดจากช่องสัญญาณหลายทาง

ในการ Modulation ผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบ $\frac{1}{2}$ QPSK เพื่อใช้งานในแอปพลิเคชันแบบความปลอดภัย โดย IEEE 802.11p ใช้ MCS 2 LTE-V และ 5G NR ใช้ MCS 7 เพื่อให้ได้ Code Rate ที่เท่ากันทั้ง 3 เทคโนโลยี และเลือกใช้ข้อมูลในการส่งขนาด 200 ไบต์ ทั้ง 3 เทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ



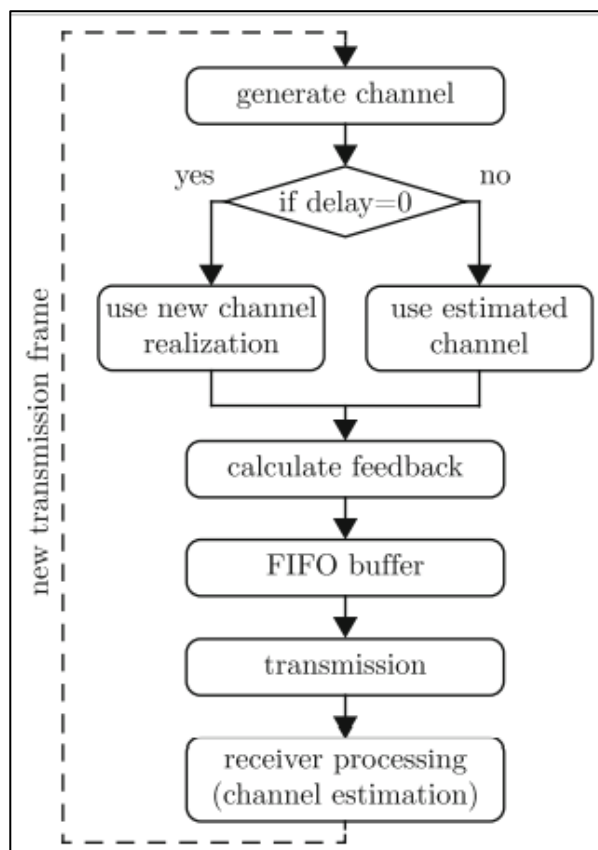
รูปที่ 3.2 กระบวนการของการส่งสัญญาณ



รูปที่ 3.3 กระบวนการของการรับสัญญาณ

3.6 Feedback

ในการปรับพารามิเตอร์การส่งให้เข้ากับเงื่อนไขของสัญญาณ จำเป็นต้องมี Channel State Information (CSI) [33] ที่เครื่องส่งสัญญาณ เนื่องจากการใช้งาน Uplink และ Downlink ในโหมด Frequency-Division Duplex (FDD) การแบ่งความถี่การใช้งานคนละความถี่ดังนั้นต้องมีการจัดความถี่ที่ถูกต้อง รูปที่ 3.4 แสดงถึงรูปแบบการคำนวณ Feedback โดยแต่ละ Feedback จะถูกตั้งค่าในไฟล์สภาพแวดล้อม



รูปที่ 3.4 รูปแบบการทำงาน Feedback

3.7 การทดสอบวัดผลด้วยอุปกรณ์ Arada System Locomate

3.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์สื่อสารไร้สายของ Arada System Locomate สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ 2 อุปกรณ์ Vehicle-to-Vehicle (V2V)
2. คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง ระบบปฏิบัติการ Window 10 พร้อมโปรแกรม Putty
3. ยานพาหนะ 2 คัน



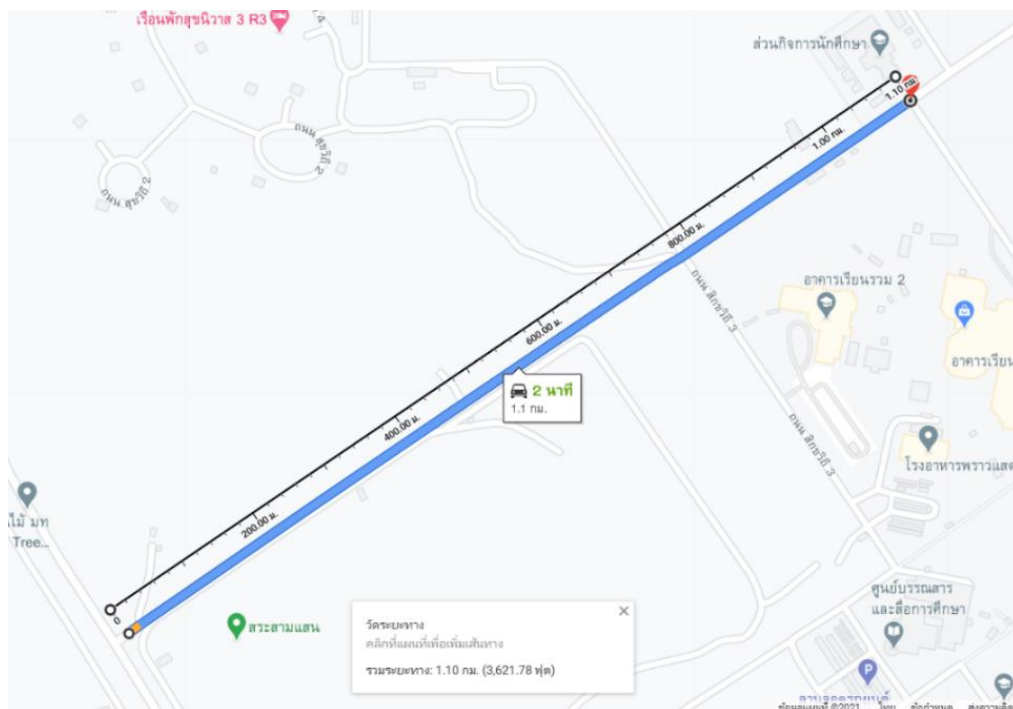
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ภาคส่ง



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ภาครับ

3.7.2 เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับการทดสอบผู้ศึกษาได้เพิ่มระยะสื่อสารระหว่างยานพาหนะเพิ่มขึ้นทีละ 100 เมตร และได้ใช้ถนนที่มีระนาบเดียวกันในการทดสอบ ในการทดสอบจะทดสอบแบบ Static คือ จอดรถไว้หนึ่ง ๆ แล้วทำการทดสอบเพิ่มขึ้นทีละ 100 เมตร



รูปที่ 3.7 เส้นทางและแผนที่ในการทดสอบ Arada Locomate

3.7.3 การตั้งค่าอุปกรณ์

1. ทำการ Telnet ไปยัง IP Address 192.168.0.40 โดยใช้โปรแกรม Putty
2. Login เข้าอุปกรณ์ Username: Root Password: Password
3. เปิดดูการตั้งค่าที่อุปกรณ์ตั้งค่าไว้ โดยใช้คำสั่ง ls หากต้องการลบใช้คำสั่ง Kill
4. ที่ภาคส่งตั้งค่าโดยใช้คำสั่ง Getwbsstxrncdec -t BSM -o NORX -s 172
5. ที่ภาครับการตั้งค่าโดยใช้คำสั่ง Getwbsstxrncdec -t BSM -o NOTX -s 172
6. ใช้คำสั่งหยุด Ctrl+z โดยกดหยุดพร้อมกันทั้งภาครับและภาคส่ง ภาคส่งจะแสดง packet ที่ส่งทั้งหมด และภาครับจะแสดง packet ที่รับได้ทั้งหมด

บทที่ 4

ผลการจำลองแบบ

4.1 บทนำ

บทที่ 4 นี้กล่าวถึงการจำลองระบบสื่อสารระหว่างยานพาหนะในแต่ละเทคโนโลยีการสื่อสาร โดยจำลองทั้ง 3 เทคโนโลยีในแต่ละสภาพแวดล้อมต่าง ๆ 3 สภาพแวดล้อม และวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้

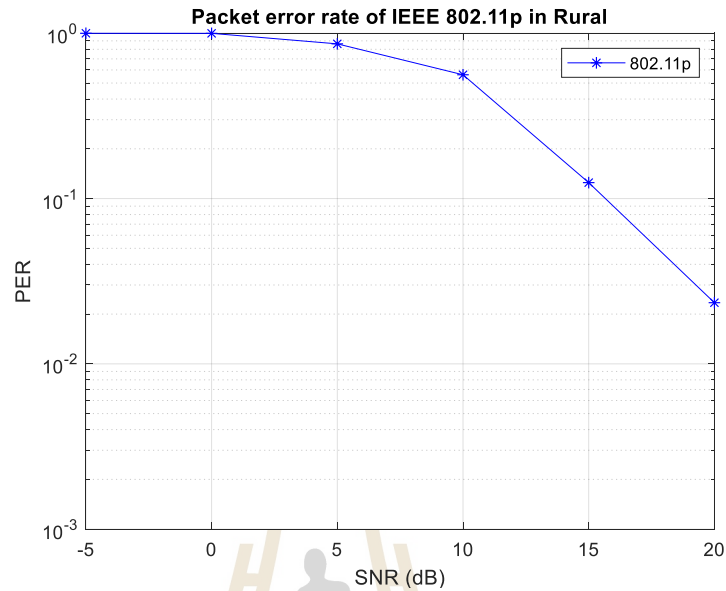
4.2 การจำลองระบบในสภาพแวดล้อมชนบท

การจำลองระบบในส่วนนี้จะเป็นการจำลองระบบเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่า PER กับ SNR และค่า PER กับระยะทาง และค่า BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท โดยที่ค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

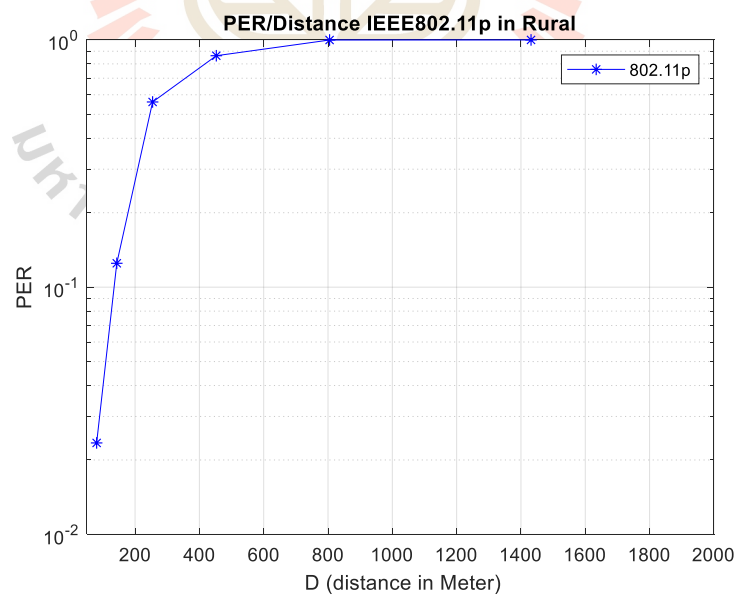
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในสภาพแวดล้อมแบบชนบท

Parameter	802.11P	LTE-V	5GNRV2X
Carrier	156.25 kHz	15 kHz	60 kHz
Symbol duration	8 μ s	66.7 μ s	16.7 μ s
Cyclic prefix	1.6 μ s	4.69 μ s	1.17 μ s
P_{tx}		23 dBm	
G_{rx}		3 dB	
G_{tx}		3 dB	
Noise Figure		9 dB	
Payload size		200 bytes	
Modulation		QPSK	
Path Delays (ns)		[0, 83, 183]	
Path Gains (dB)		[0, -14, -17]	
Doppler Shift (Hz)		[0, 492, -295]	

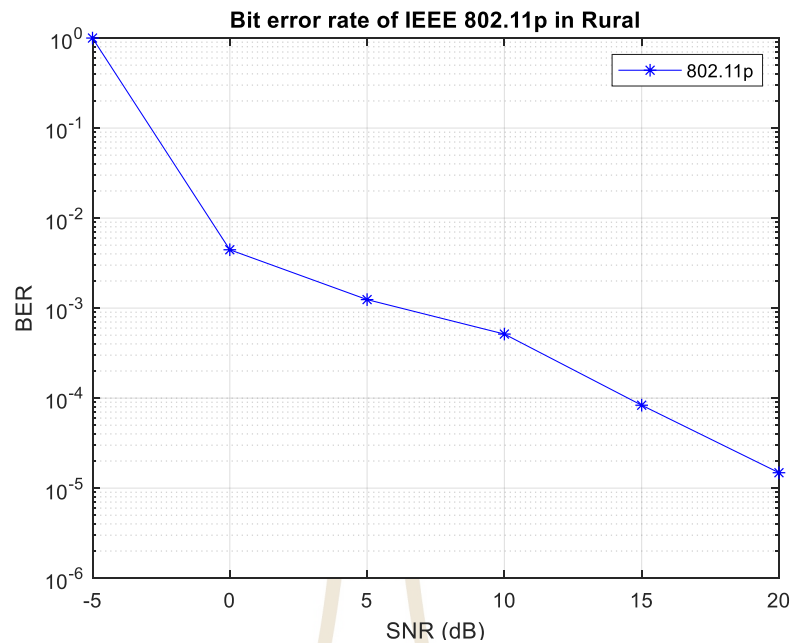
4.2.1 เทคโนโลยี IEEE 802.11p ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



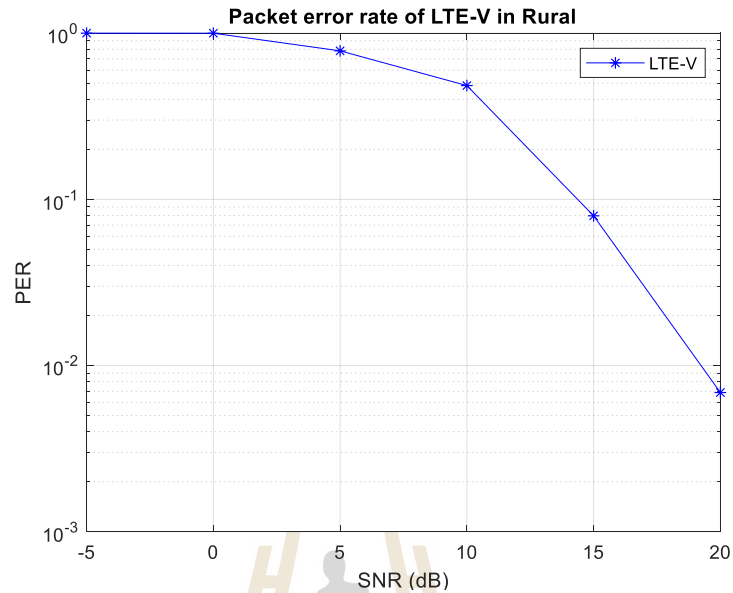
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.1 ของเทคโนโลยี IEEE 802.11p จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.1249

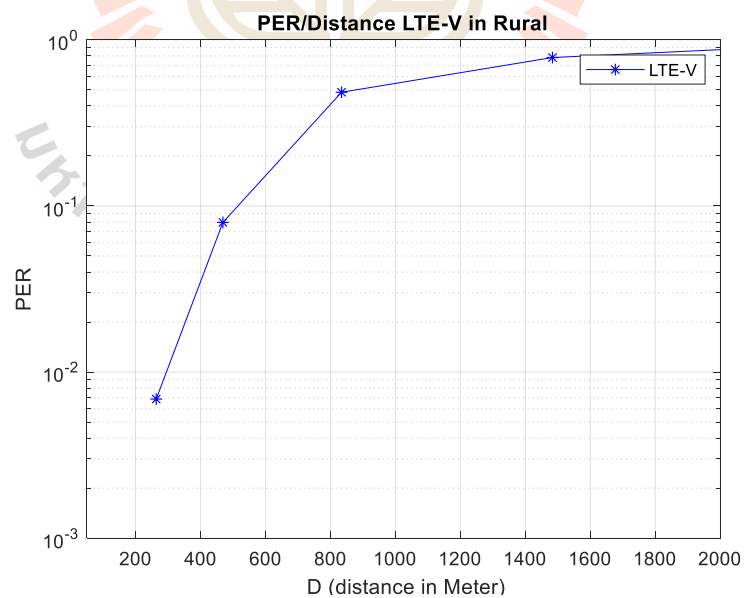
จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 800 เมตร เทคโนโลยี IEEE 802.11p เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 1

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 8.338×10^{-5}

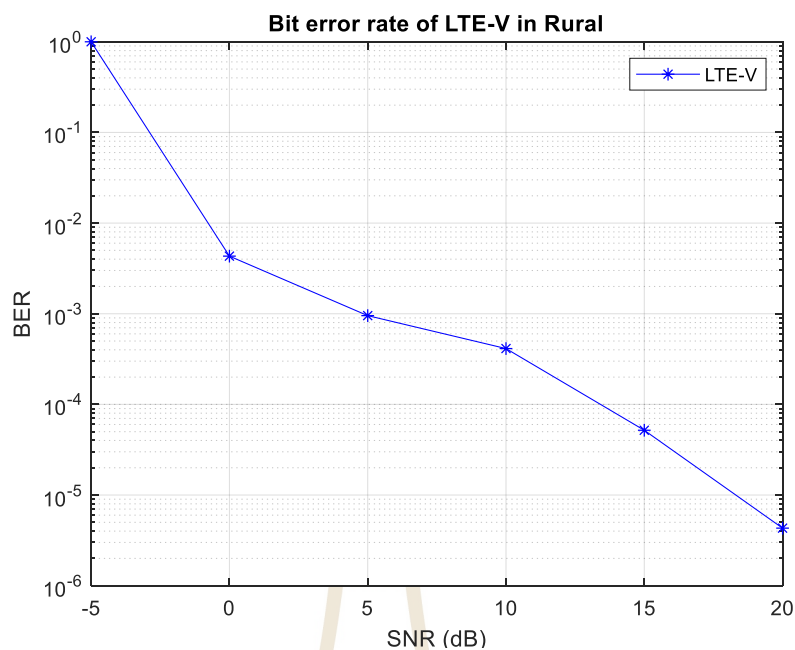
4.2.2 เทคโนโลยี LTE-V ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



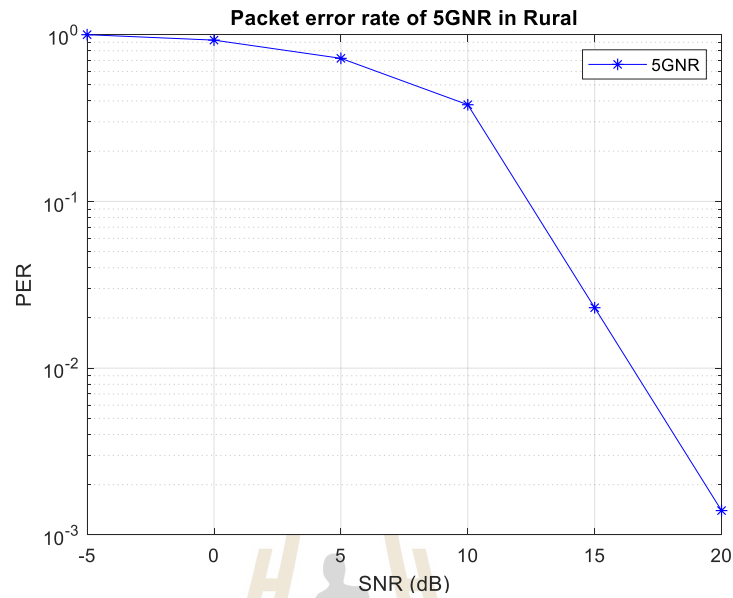
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.1 ของเทคโนโลยี LTE-V จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.079

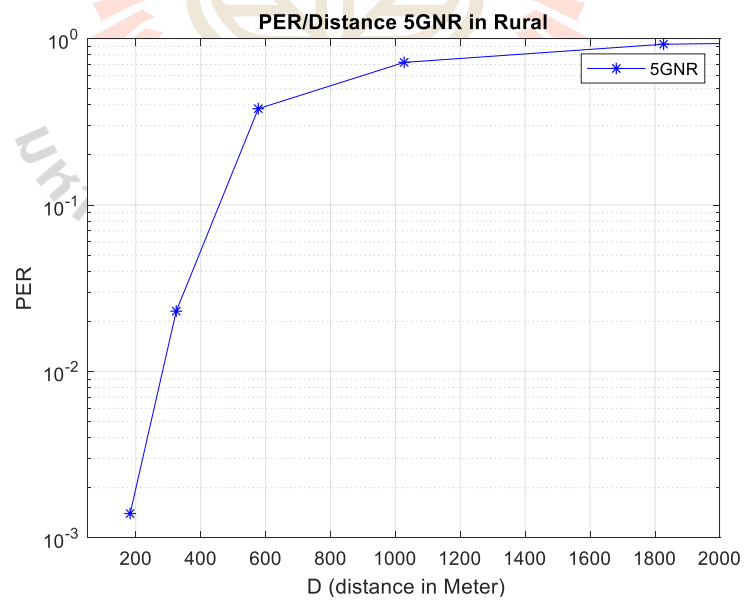
จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 1,800 เมตร เทคโนโลยี LTE-V เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตร มี PER เท่ากับ 0.55

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 5.14×10^{-5}

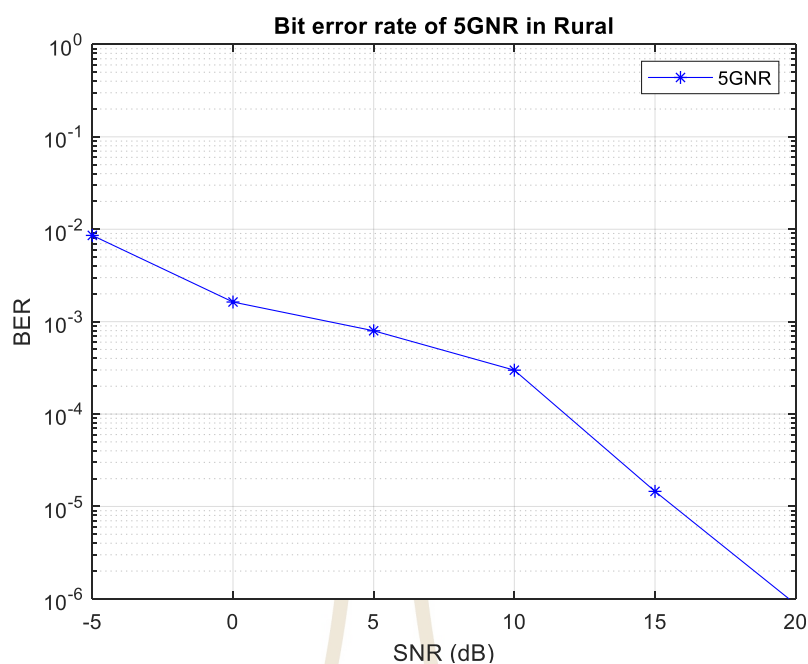
4.2.3 เทคโนโลยี 5GNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.1 ของเทคโนโลยี 5GNR จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.023

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 1,600 เมตร เทคโนโลยี 5GNR เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 0.71

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 1.45×10^{-5}

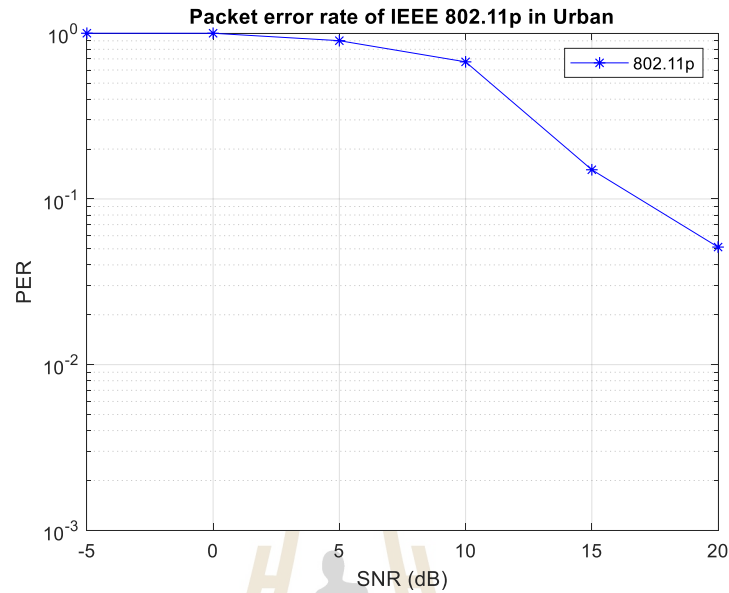
4.3 การจำลองระบบในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง

การจำลองระบบในส่วนนี้จะเป็นการจำลองระบบเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่า PER กับ SNR, ค่า PER กับระยะทาง และค่า BER กับ SNR ในแต่ละเทคโนโลยีในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง โดยที่ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

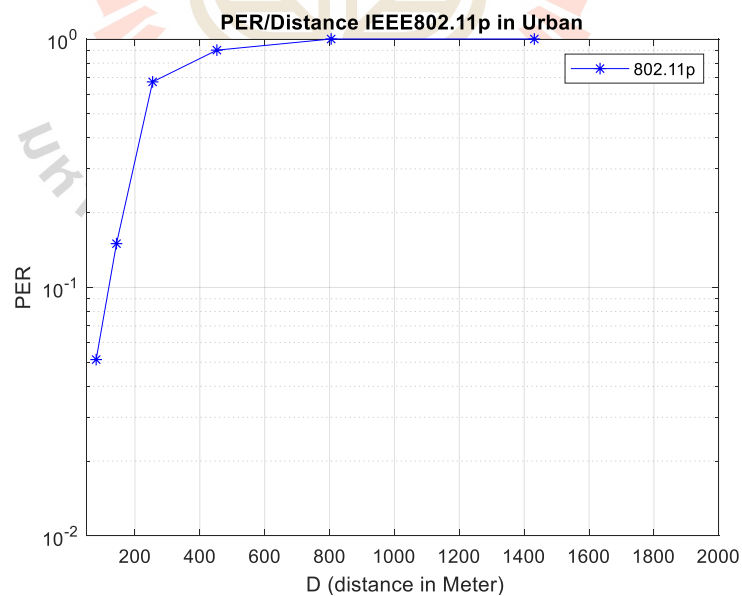
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง

Parameter	802.11P	LTE-V	5GNRV2X
Carrier	156.25 kHz	15 kHz	60 kHz
Symbol duration	8 μs	66.7 μs	16.7 μs
Cyclic prefix	1.6 μs	4.69 μs	1.17 μs
Ptx	23 dBm		
Grx	3 dB		
Gtx	3 dB		
Noise Figure	9 dB		
Payload size	200 bytes		
Modulation	QPSK		
Path Delays (ns)	[0, 117, 183, 333]		
Path Gains (dB)	[0, -8, -10, -15]		
Doppler Shift (Hz)	[0, 236, -157, 492]		

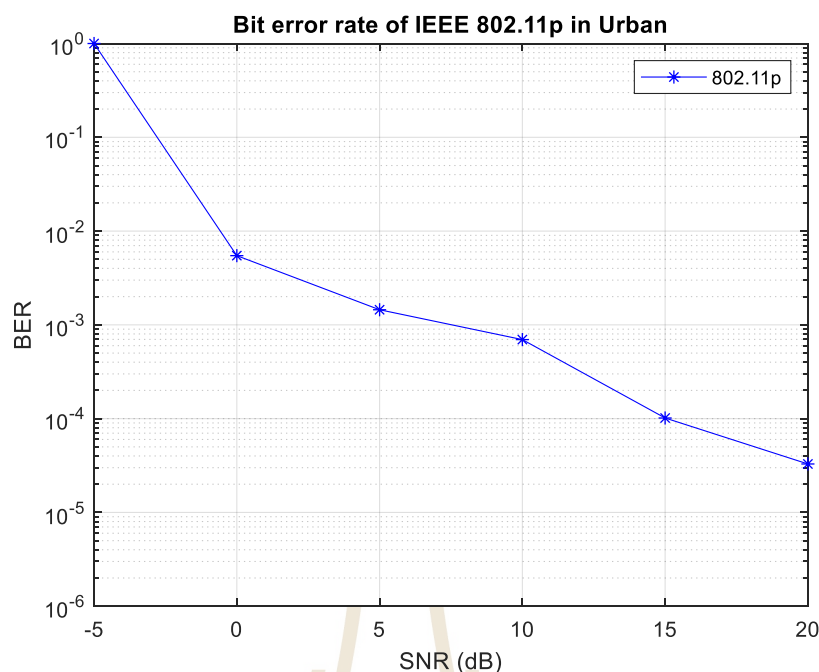
4.3.1 เทคโนโลยี IEEE 802.11p ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



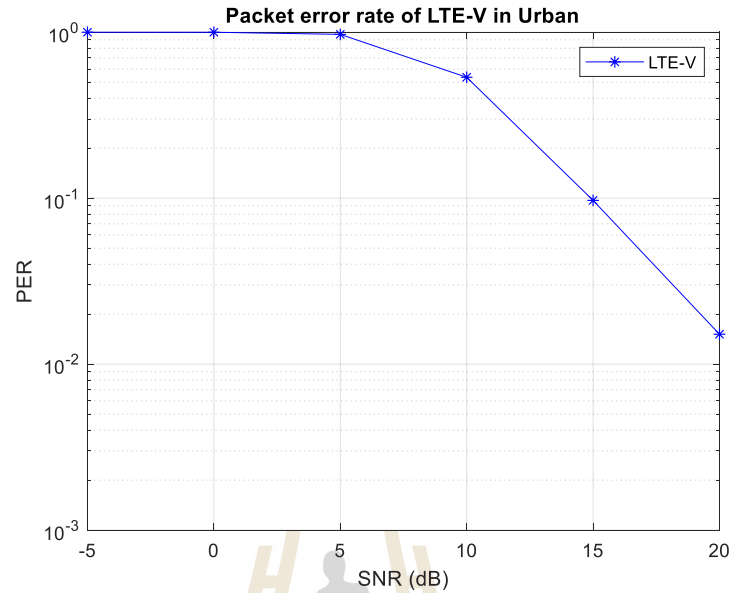
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.15

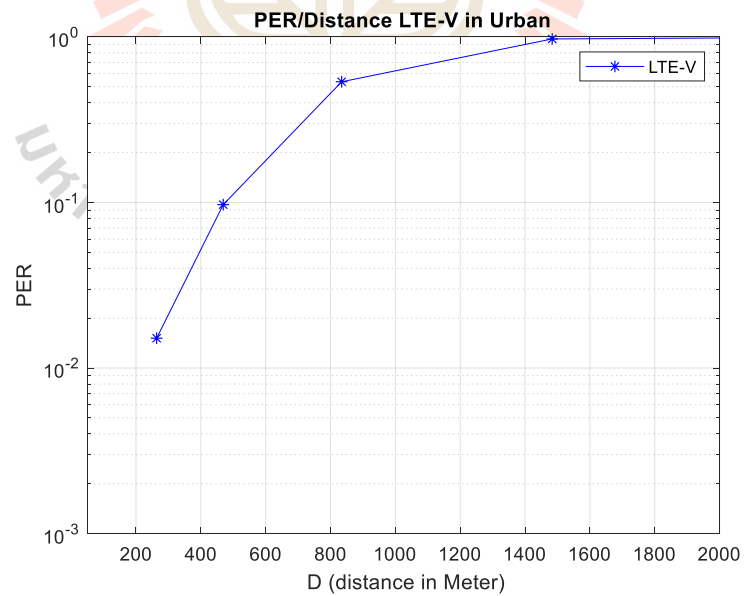
จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 700 เมตร เทคโนโลยี IEEE 802.11p เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 1

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 0.000157

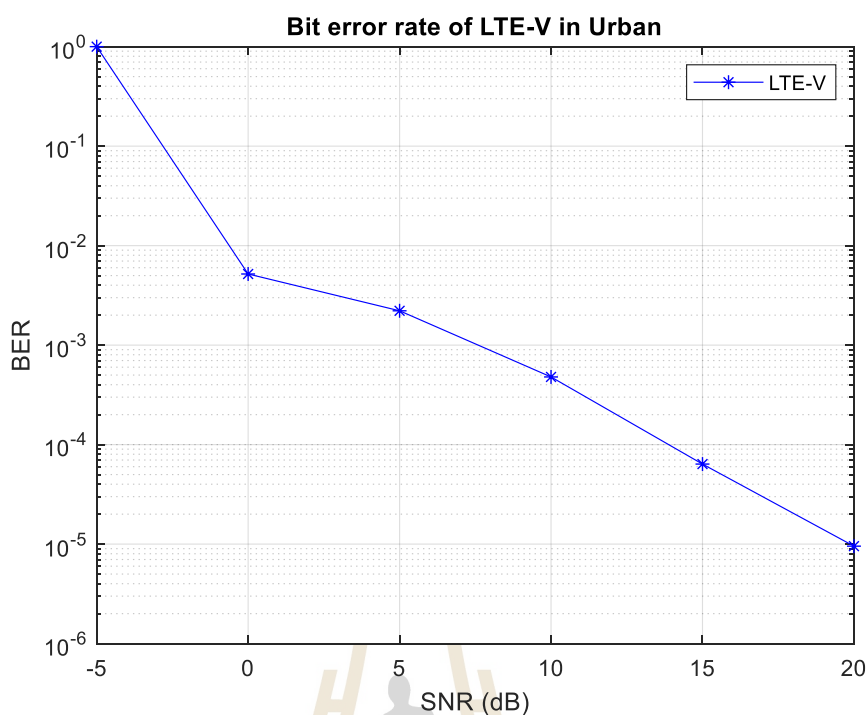
4.3.2 เทคโนโลยี LTE-V ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



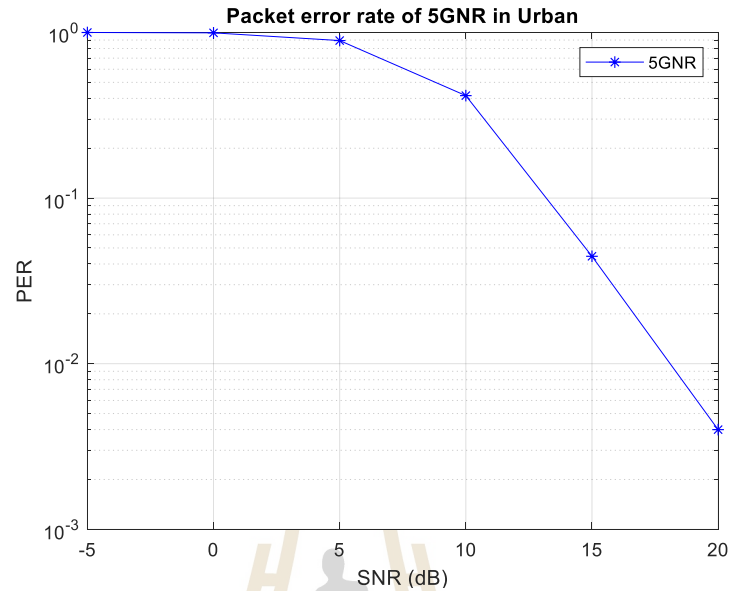
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง

จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.2 ของเทคโนโลยี LTE-V จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.096

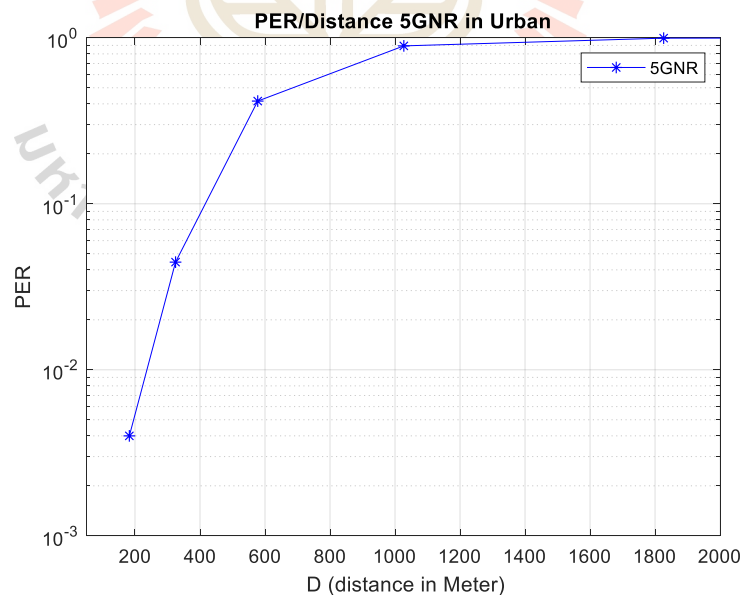
จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 1,500 เมตร เทคโนโลยี LTE-V เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 0.62

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 6.37×10^{-5}

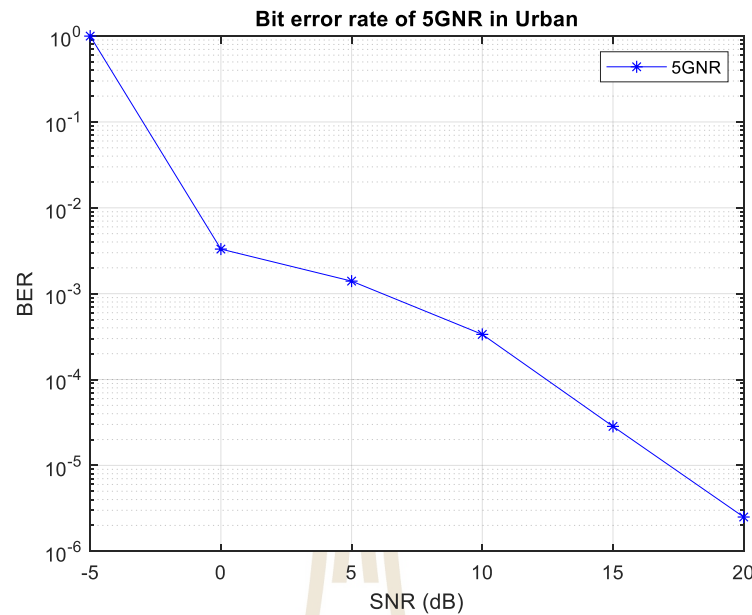
4.3.3 เทคโนโลยี 5GNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง

จากรูปที่ 4.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.2 ของเทคโนโลยี 5GNR จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.044

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 1,200 เมตร เทคโนโลยี 5GNR เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 0.84

จากรูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 2.81×10^{-5}

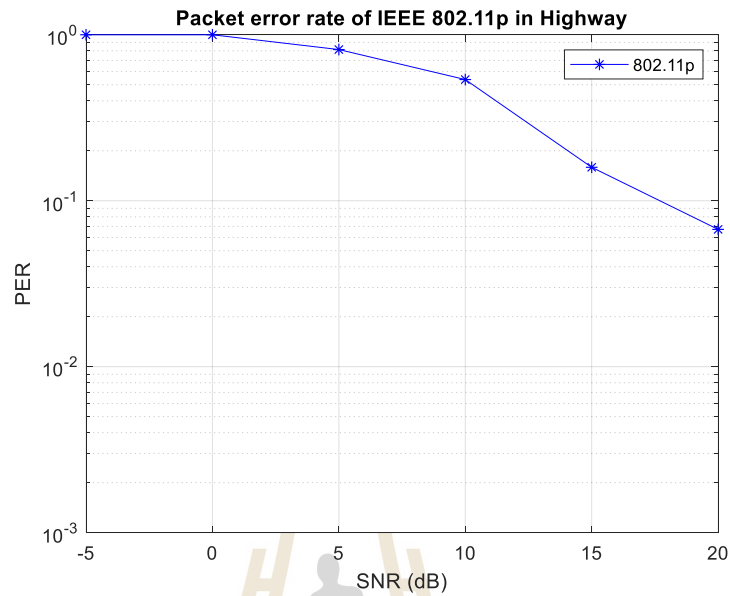
4.4 การจำลองระบบในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน

การจำลองระบบในส่วนนี้จะเป็นการจำลองระบบเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่า PER กับ SNR, ค่า PER กับระยะทาง และค่า BER กับ SNR ในแต่ละเทคโนโลยีในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน โดยที่ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

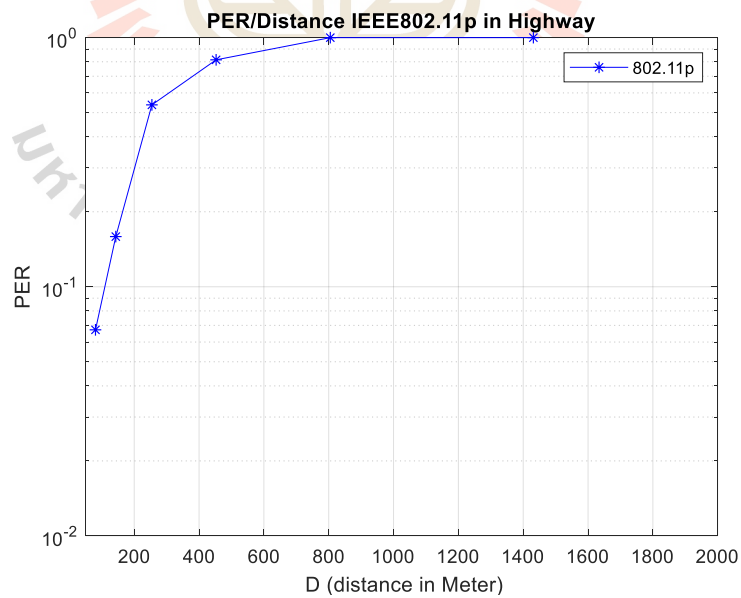
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน

Parameter	802.11P	LTE-V	5GNRV2X
Carrier	156.25 kHz	15 kHz	60 kHz
Symbol duration	8 μs	66.7 μs	16.7 μs
Cyclic prefix	1.6 μs	4.69 μs	1.17 μs
P_{tx}	23 dBm		
G_{rx}	3 dB		
G_{tx}	3 dB		
Noise Figure	9 dB		
Payload size	200 bytes		
Modulation	QPSK		
Path Delays (ns)	[0, 100, 167, 500]		
Path Gains (dB)	[0, -10, -15, -20]		
Doppler Shift (Hz)	[0, 689, -492, 886]		

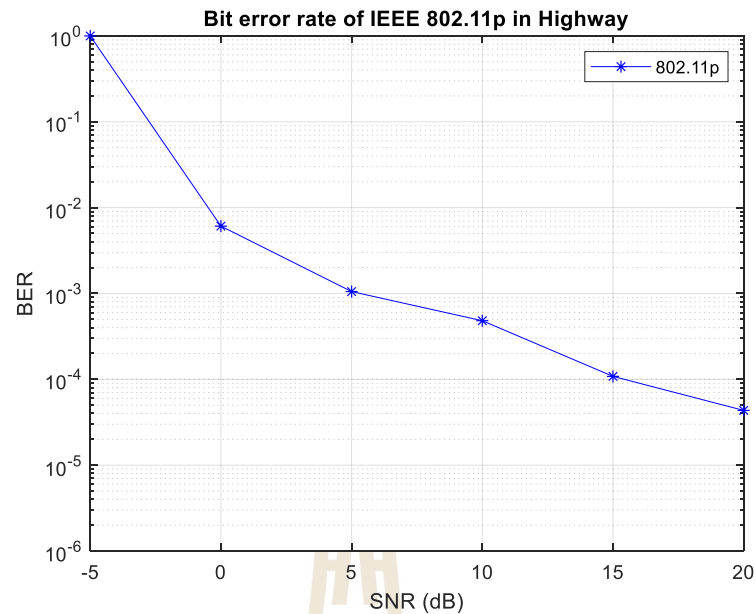
4.4.1 เทคโนโลยี IEEE 802.11p ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5G NR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



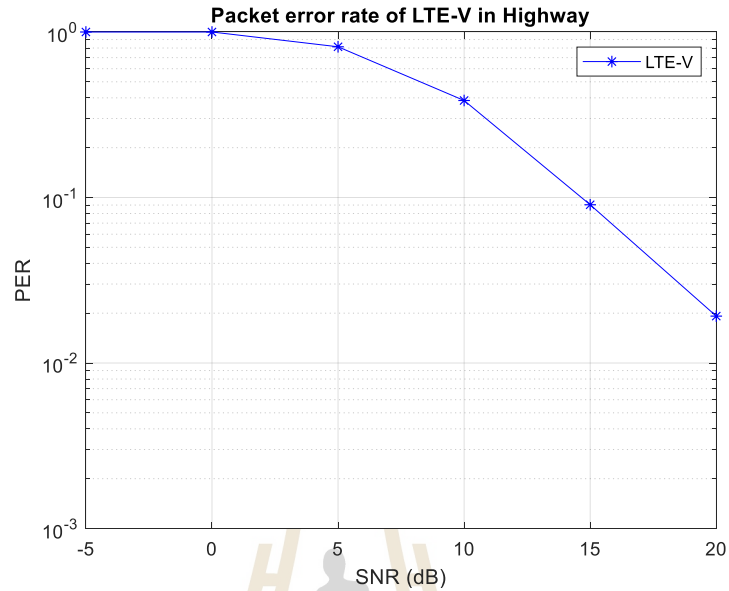
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน

จากรูปที่ 4.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วนซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.159

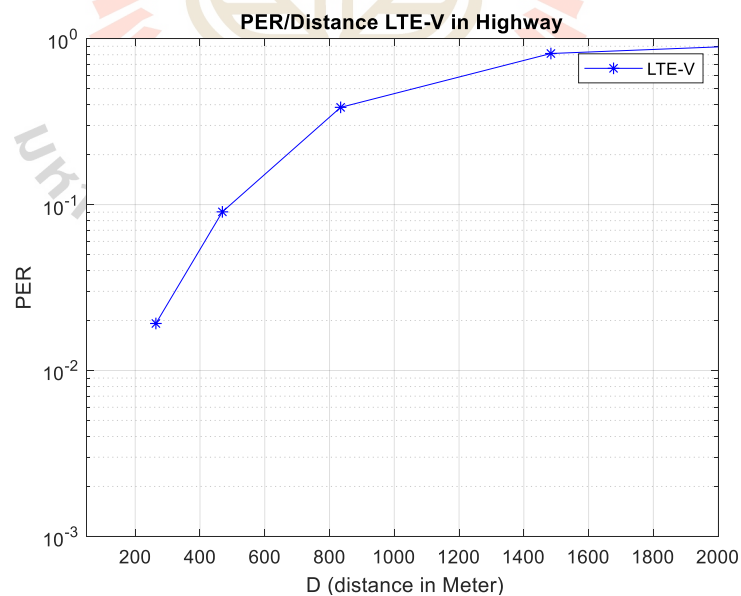
จากรูปที่ 4.20 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสารในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 600 เมตร เทคโนโลยี IEEE 802.11p เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 1

จากรูปที่ 4.21 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี IEEE 802.11p ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 0.00010822

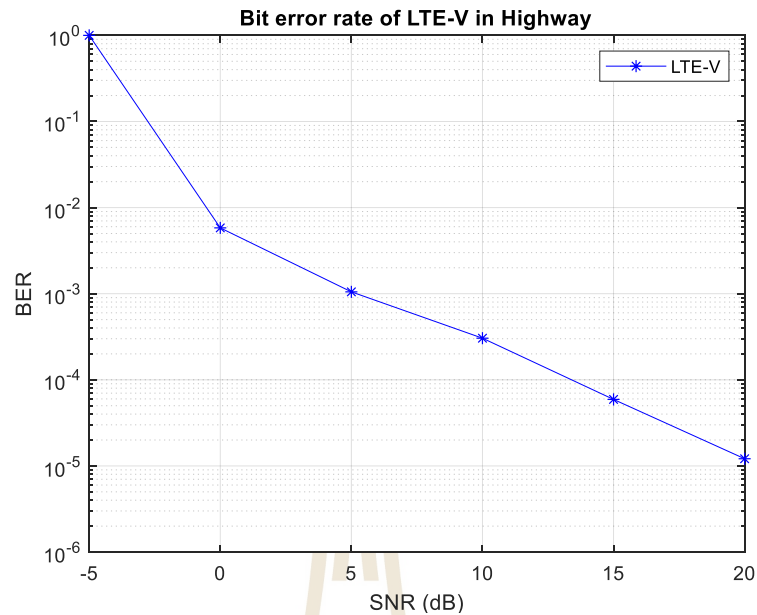
4.4.2 เทคโนโลยี LTE-V ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



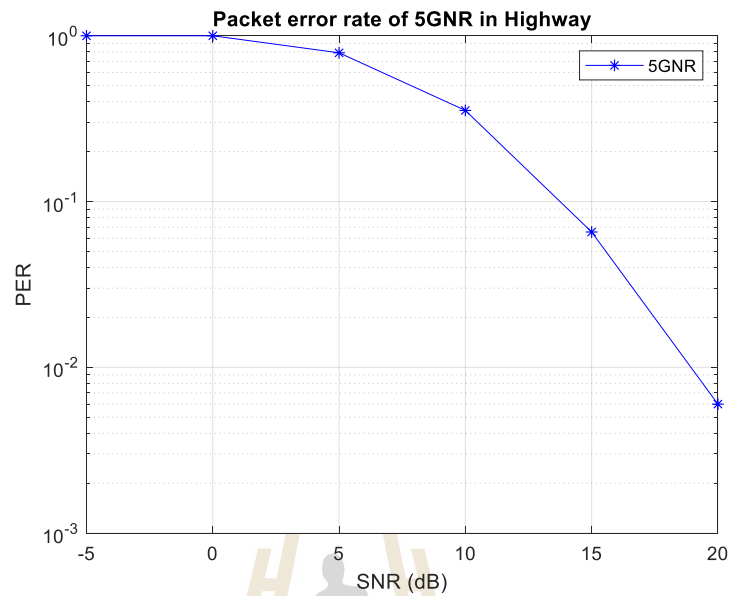
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน

จากรูปที่ 4.22 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.3 ของเทคโนโลยี LTE-V จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.0904

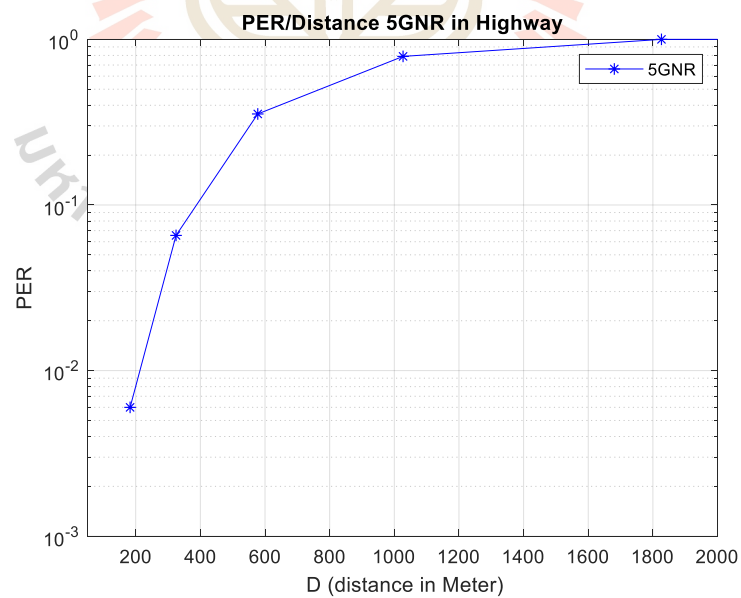
จากรูปที่ 4.23 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 1,700 เมตร เทคโนโลยี LTE-V เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 0.47

จากรูปที่ 4.24 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี LTE-V ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 5.92×10^{-5}

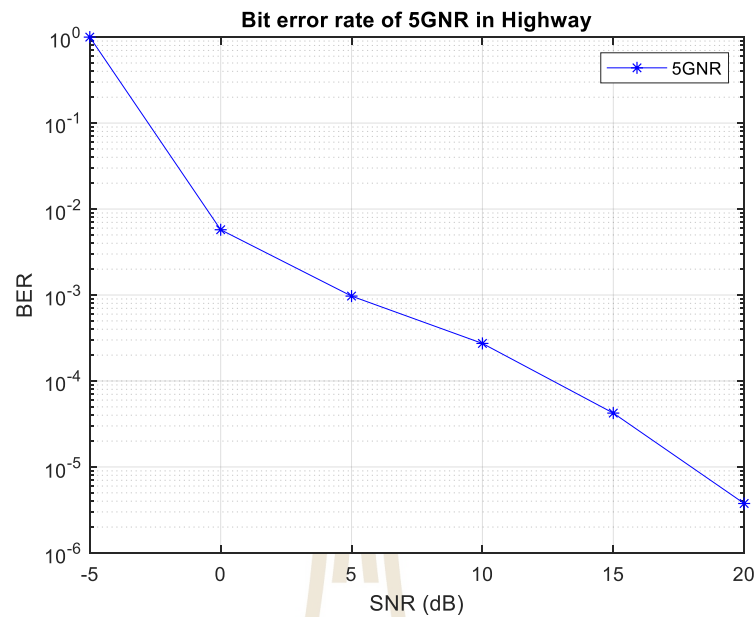
4.4.3 เทคโนโลยี 5GNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง PER กับระยะทาง ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน

จากรูปที่ 4.25 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.3 ของเทคโนโลยี 5GNR จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า PER อยู่ที่ 0.065

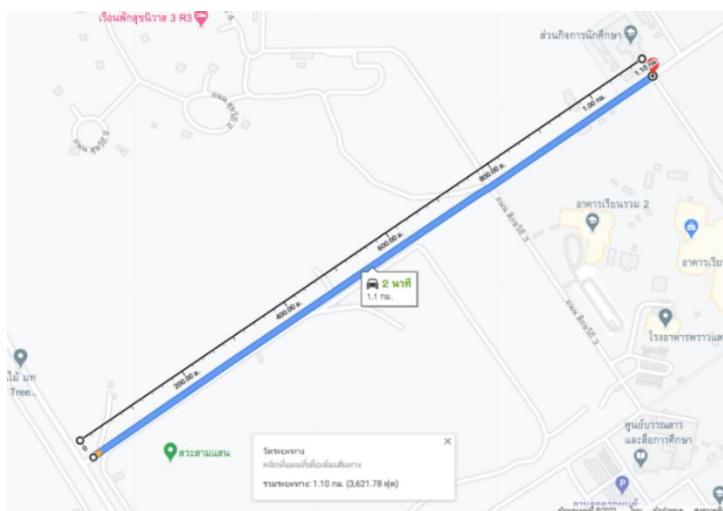
จากรูปที่ 4.26 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสาร ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางมากกว่า 1,500 เมตร เทคโนโลยี 5GNR เริ่มไม่สามารถสื่อสารกันได้ โดยที่ 1,000 เมตรมี PER เท่ากับ 0.73 แพคเกจ

จากรูปที่ 4.27 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์เทคโนโลยี 5GNR ระหว่าง BER กับ SNR ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน จะเห็นได้ว่า ที่ 15 dB มีค่า BER อยู่ที่ 4.2×10^{-5}

4.5 การทดสอบวัดผลด้วยอุปกรณ์ Arada Locomate

4.5.1 เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ

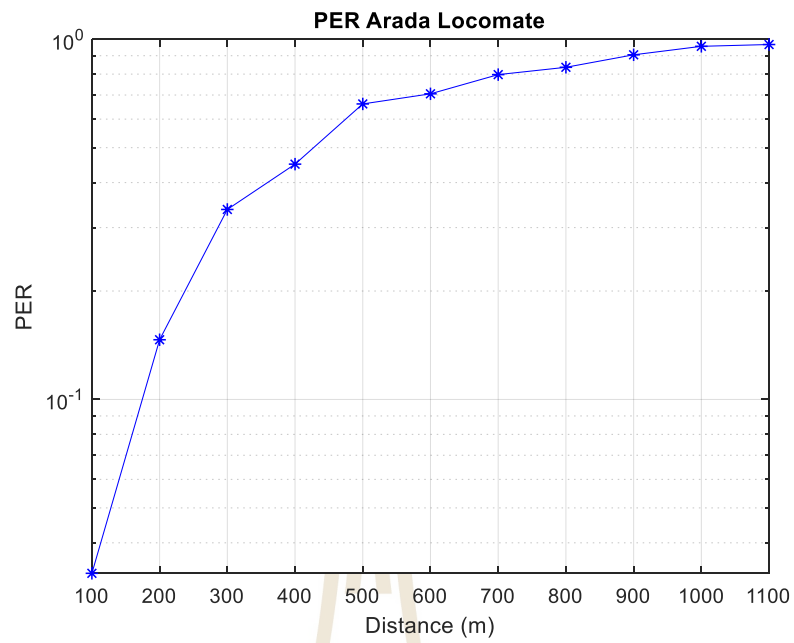
ในการทดสอบได้เพิ่มระยะสื่อสารระหว่างยานพาหนะเพิ่มขึ้นทีละ 100 เมตร และ
ได้ใช้ถนนที่มีระยะยาวเดียวกันในการทดสอบ ในการทดสอบจะจอดรถไว้หนึ่ง ๆ แล้วทำการ
ทดสอบโดยจะเพิ่มขึ้นทีละ 100 เมตร



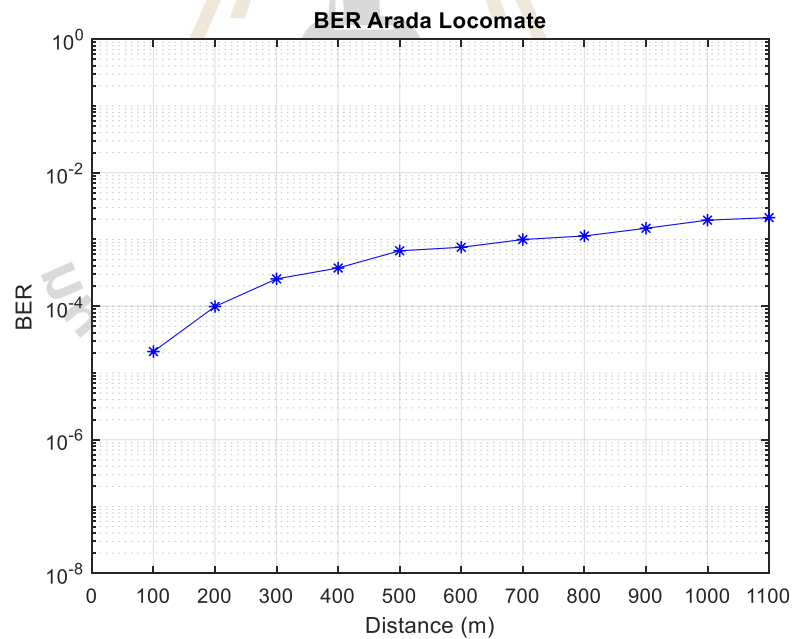
รูปที่ 4.28 เส้นทางและแผนที่ในการทดสอบ Arada Locomate

ตารางที่ 4.4 ผลจากการวัด Arada Locomate

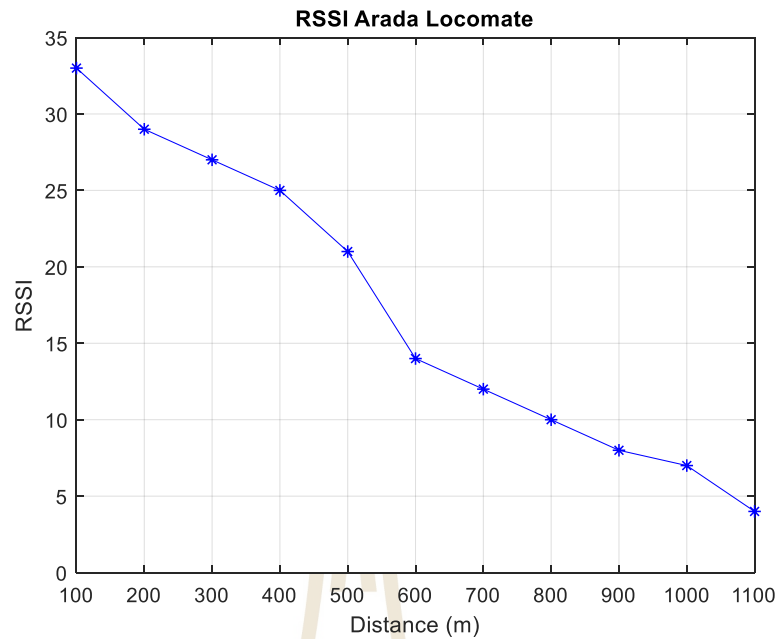
ระยะทาง	RSSI	จำนวนข้อมูลที่ส่ง	จำนวนข้อมูลที่รับ	PER	BER
100	33	638	617	0.032915	2.09181E-05
200	29	594	507	0.146465	9.89753E-05
300	27	570	378	0.336842	0.000256681
400	25	580	319	0.45	0.000373578
500	21	611	207	0.661211	0.000676258
600	14	628	185	0.705414	0.000763574
700	12	627	127	0.797448	0.000997477
800	10	615	101	0.835772	0.001128426
900	8	622	59	0.905145	0.001471044
1000	7	631	28	0.955626	0.001945044
1100	4	570	19	0.966667	0.002123491



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ PER กับ ระยะทาง



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ BER กับ ระยะทาง



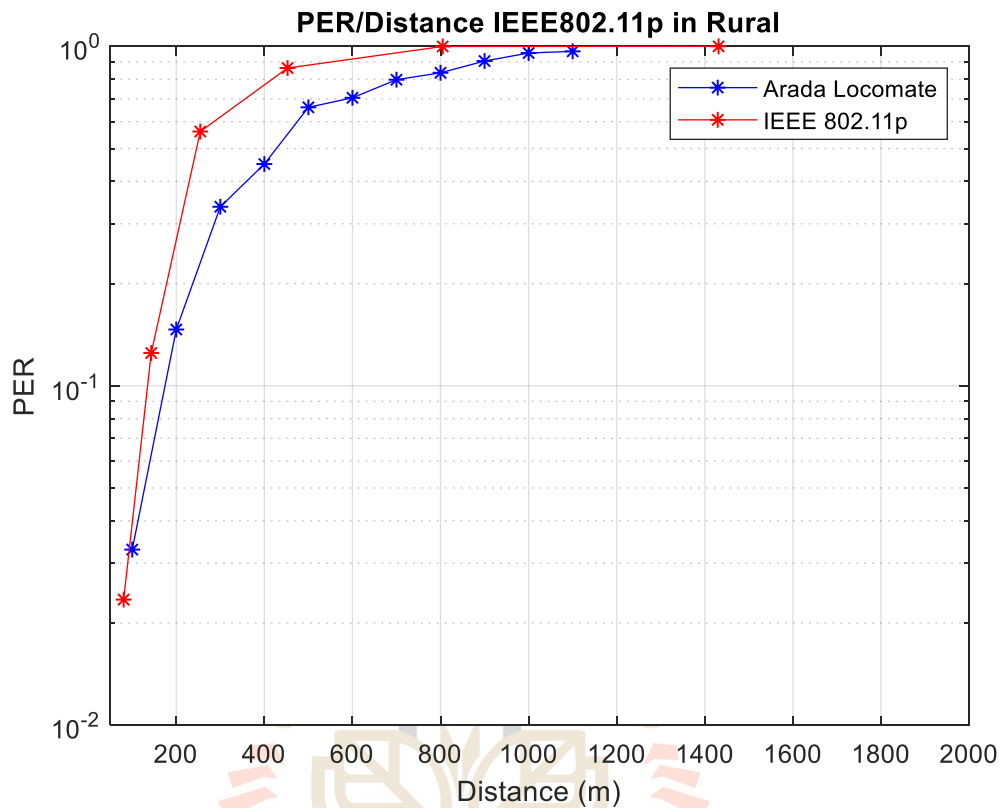
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ RSSI กับ ระยะทาง

จากรูปที่ 4.29 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PER กับระยะทางการสื่อสารระหว่างยานพาหนะของ Arada Locomate จากการทดสอบจะเห็นว่าที่ระยะ 1,000 เมตรไม่สามารถสื่อสารกันได้ และผลการทดสอบสอดคล้องกับการจำลองในเบื้องต้น

จากรูปที่ 4.30 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางการสื่อสารระหว่างยานพาหนะของ Arada Locomate จากการทดสอบ พบว่าเมื่อการใช้แบบ Vehicles platooning BER เท่ากับ 10^{-3} จะสามารถใช้งานได้ในระยะ 700 เมตร

จากรูปที่ 4.31 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RSSI กับระยะทางการสื่อสารระหว่างยานพาหนะของ Arada Locomate จากการทดสอบ พบว่าเมื่อมีระยะทางที่มากขึ้นค่า RSSI จะยิ่งน้อยลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีสมมุติฐาน

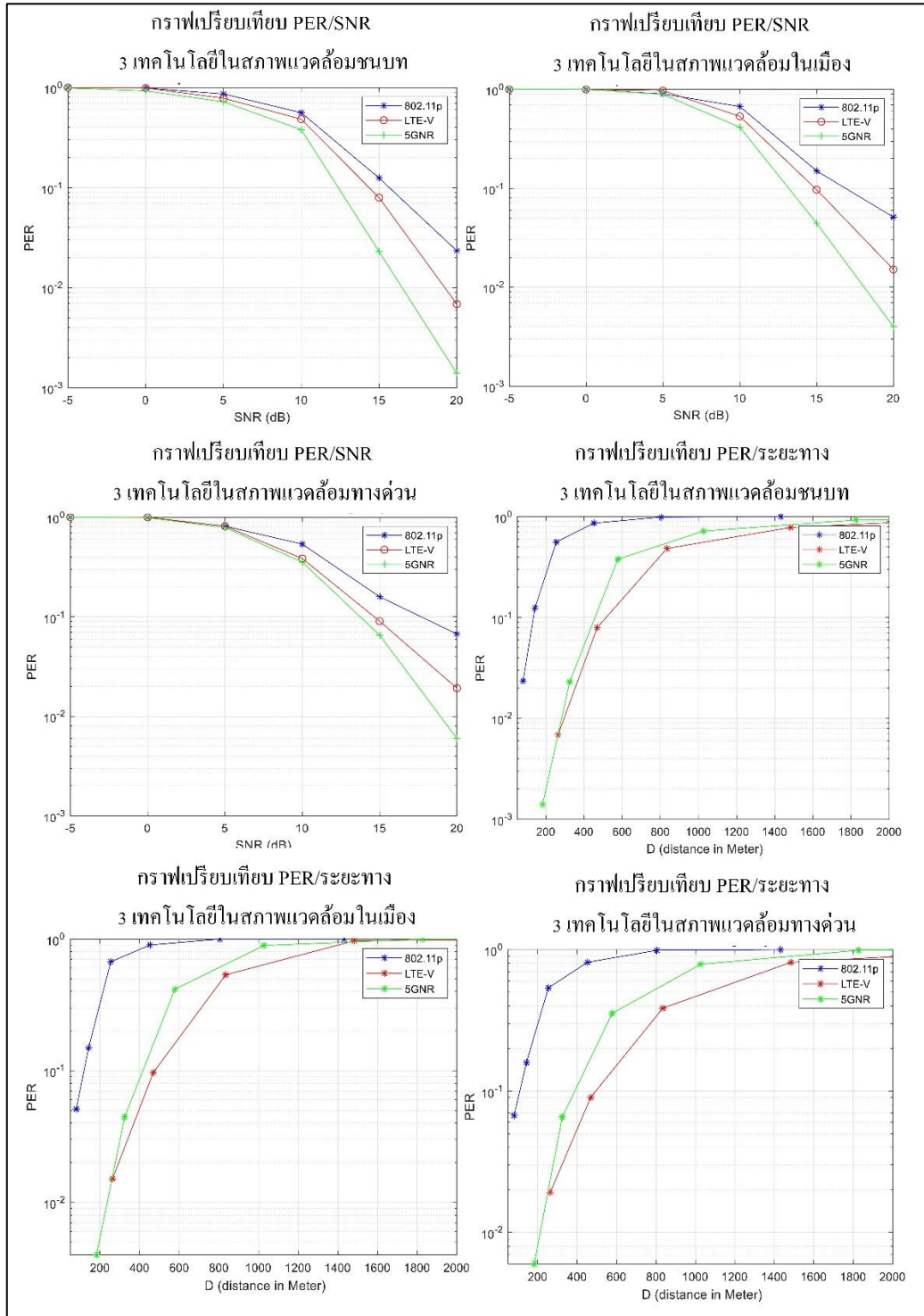
4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับอุปกรณ์ Arada Locomate



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองผล PER กับ ระยะทาง
ในสภาพแวดล้อมชนบทเทียบกับอุปกรณ์ Arada Locomate

จากรูปที่ 4.32 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองผล PER กับ ระยะทางในสภาพแวดล้อม
ชนบท เทียบกับอุปกรณ์ Arada Locomate จากการเปรียบเทียบ พบว่าค่า PER มีแนวโน้มเดียวกัน
เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ

4.7 การเปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 เทคโนโลยี



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 เทคโนโลยี

4.8 กล่าวสรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้ทำการจำลองระบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และทดสอบอุปกรณ์ Arada Locomate จากผลการจำลองพบว่า เทคโนโลยี 5G NR มีผล Packet Error Rate (PER) ต่ำที่สุด รองลงมาคือ LTE-V และ IEEE 802.11p มีค่า PER มากที่สุด ในทุกสภาพแวดล้อม และในสภาพแวดล้อมแบบชนบทมีผล PER น้อยที่สุด รองลงมาคือสภาพแวดล้อมแบบในเมือง และสภาพแวดล้อมแบบทางด่วนมีค่า PER มากที่สุด ใน SNR -5 ถึง 5 dB แต่ละเทคโนโลยีมีค่า PER ที่สูงมาก ที่ SNR = 15dB ในสภาพแวดล้อมแบบชนบท 5G NR มีค่า PER ดีกว่า LTE-V อยู่ 45.30% และดีกว่า IEEE 802.11p อยู่ 81.56% ในสภาพแวดล้อมแบบในเมือง 5G NR มีค่า PER ที่ดีกว่า LTE-V อยู่ 34.69% และดีกว่า IEEE 802.11p อยู่ 70.33% ในสภาพแวดล้อมแบบทางด่วน 5G NR มีค่า PER ดีกว่า LTE-V อยู่ 15.67% และดีกว่า IEEE 802.11p อยู่ 58.81% ดังนั้น 5G NR นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่า PER และเมื่อพิจารณาจากระยะทางของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ เทคโนโลยี LTE-V นั้นมีระยะการสื่อสารที่ไกลที่สุด รองลงมาคือ 5G NR เนื่องจาก 5G NR มีความถี่ที่สูงกว่าตามการประมวลผลของ กสทช. อย่างไรก็ตาม 5G NR ยังคงเป็นเทคโนโลยีที่ดึกว่า เมื่อพิจารณาจากการส่งแบบ Basic safety message (BSM) เพราะมีความแฝงเวลาที่ต่ำกว่าและมีความเชื่อถือที่มากกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองระบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของมาตรฐานการสื่อสารระหว่าง 3 มาตรฐาน กับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน 3 สภาพแวดล้อม โดยใช้ค่า PER กับ SNR, BER กับ SNR และ PER กับ ระยะทางการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ในการวิเคราะห์และจำลองผล ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทยที่สอดคล้องกับการประมวล 5G คือ 5GNR เนื่องจากมี Packet error rate (PER) ที่ต่ำที่สุดในทุกสภาพแวดล้อม ด้วยเหตุผลดังกล่าว การส่งข้อความแจ้งเตือนระหว่างยานพาหนะมีความถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้การสื่อสารมีความน่าเชื่อถือสูง รองลงมาคือเทคโนโลยี LTE-V และสุดท้ายคือ IEEE 802.11P ตามลำดับ แม้ว่าเทคโนโลยี LTE-V จะเป็นเทคโนโลยีที่มีระยะการสื่อสารไกลที่สุด อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี 5GNR ยังคงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าแฝงเวลาต่ำ และมีความน่าเชื่อถือสูงสุด ส่งผลทำให้เพิ่มความปลอดภัยของยานพาหนะเนื่องจากการเตือนอย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องในการส่งข้อมูลของข้อความเตือนภัย (Basic Safety Message) สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ อย่างไรก็ตาม 5GNR เป็นเครื่องมือสำคัญในการพัฒนาอัจฉริยะที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไร้คนขับ แต่ยังคงติดอุปสรรคในการใช้งานในถนนของประเทศไทย เนื่องจากความไม่ชัดเจนในการระบุรับผิดชอบทางกฎหมายกรณีเกิดอุบัติเหตุกับรถอัจฉริยะและสภาพความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน อาทิเช่น สัญญาณจราจรบนท้องถนนและการพัฒนาสถานีฐาน 5G งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอความเหมาะสมของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย ตามการประมวลคลื่นความถี่ของ กสทช. ดังนั้น เทคโนโลยี 5GNR เป็นเทคโนโลยีที่น่าจับตามองที่สุด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพที่สอดคล้องตามผลการจำลองแบบ

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

การทำงานจำลองระบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ โดยใช้พื้นฐานจากโปรแกรม Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS) ผ่าน โปรแกรม Matlab ด้วยการจำลองในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ยังไม่ได้มีการทดลองจากอุปกรณ์ 5G จริง เนื่องด้วยในตอนนี้ยังไม่มีอุปกรณ์ที่รองรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมดังกล่าวมาข้างต้น

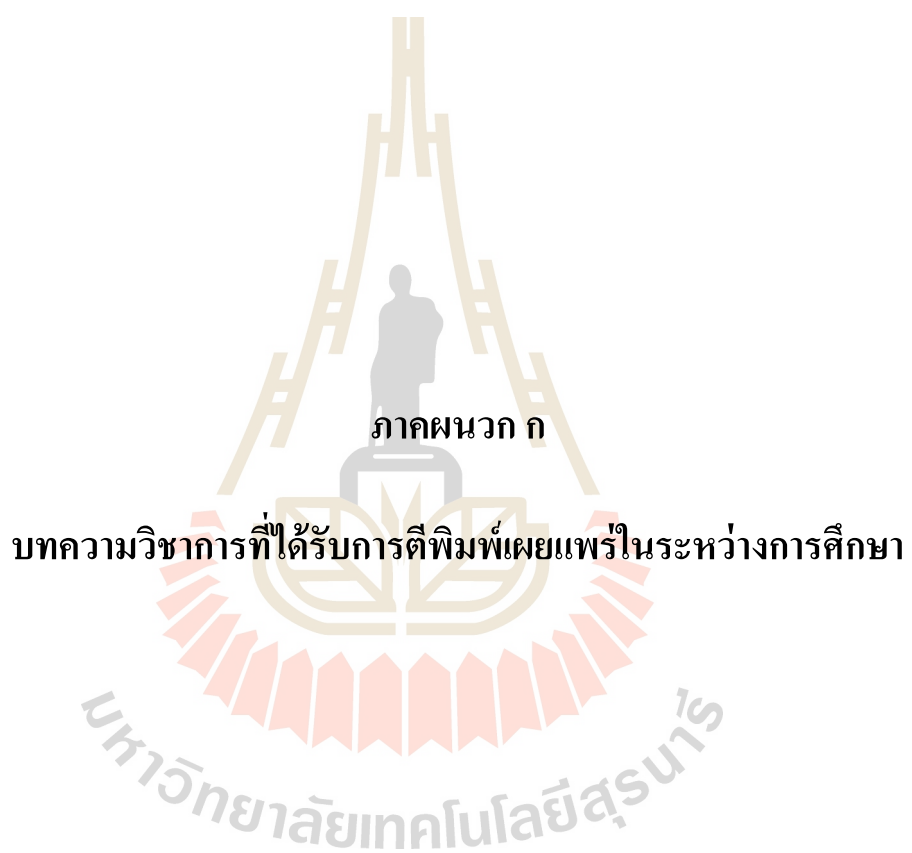


รายการอ้างอิง

- [1] กรมขนส่งทางบก “รายงานจำนวนรถที่จดทะเบียนสะสม” กันยายน 2563
- [2] World Health Organization. “Global status report on road safety 2018: Summary (No. WHO/NMH/NVI/18.20)” World Health Organization. (2018)
- [3] The Office of Transport and Traffic Policy and planning, Thailand. “Road accident situation analysis report Of the Ministry of Transport” (2019)
- [4] Cecchini, Giammarco, et al. “Performance comparison between IEEE 802.11 p and LTE-V2V in-coverage and out-of-coverage for cooperative awareness.” 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). IEEE, 2017.
- [5] Naik, Gaurang, Biplav Choudhury, and Jung-Min Park. “IEEE 802.11 bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications.” IEEE Access 7 (2019): 70169-70184.
- [6] 3GPP. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (v14.3.0, Release 14)”, (2017)
- [7] Ji, Hyoungju, et al. “Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects.” IEEE Wireless Communications 25.3 (2018): 124-130.
- [8] Jiang, Daniel, and Luca Delgrossi. “IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments.” VTC Spring 2008-IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 2008.
- [9] Jafari, A., Samir Al-Khayatt, and Aboagela Dogman. “Performance evaluation of IEEE 802.11 p for vehicular communication networks.” 2012 8th international symposium on communication systems, networks & digital signal processing (CSNDSP). IEEE, 2012.
- [10] IEEE Std 802.11p-2010: “IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical

- [11] Layer (PHY) Specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments” IEEE, New York, NY, USA, 2010.
- [12] Ahmadi, Sassan. “5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards.” Academic Press, 2019.
- [13] Bazzi, Alessandro, et al. “On the performance of IEEE 802.11 p and LTE-V2V for the cooperative awareness of connected vehicles.” IEEE Transactions on Vehicular Technology 66.11 (2017): 10419-10432.
- [14] International Telecommunication Union (ITU). “Intelligent transport systems (ITS) Report ITU-R M.2445-0”. 2018
- [15] Masini, Barbara M., Alessandro Bazzi, and Enrico Natalizio. "Radio access for future 5G vehicular networks." 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2017.
- [16] 3GPP. “TR 38.801-2. V16.0.0 Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 16)” (2019, June)
- [17] Ganesan, Karthikeyan, et al. "NR Sidelink Design Overview for Advanced V2X Service." IEEE Internet of Things Magazine 3.1 (2020): 26-30.
- [18] Lien, Shao-Yu, et al. "5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access." IEEE communications magazine 55.6 (2017): 64-71.
- [19] Intelligent Transport Systems (ITS). “ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band v1.3.0”, 2019
- [20] Breed, Gary. "Bit error rate: Fundamental concepts and measurement issues." High Frequency Electronics 2.1 (2003): 46-47.
- [21] Ott, Henry W., and Henry W. Ott. “ Noise reduction techniques in electronic systems.” Vol. 442. New York: Wiley, 1988.
- [22] Johnson, Don H. "Signal-to-noise ratio." Scholarpedia 1.12 (2006): 2088.
- [23] Intelligent Transport Systems (ITS) “ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band v1.3.0” , 2019
- [24] M. Kahn. “V2V radio channel models. IEEE 802.11-14/0259r0” (2014, Feb).
- [25] Shaw, Joseph A. “Radiometry and the Friis transmission equation. American journal of physics” 81.1, p. 33-37. (2013).

- [26] Martin Sauter (2010). "3.7.1 Mobility Management in the Cell-DCH State". From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband (eBook). John Wiley & Sons. p. 160. ISBN 9780470978221
- [27] Lee, Kwongjong, et al. "Latency of cellular-based V2X: Perspectives on TTI-proportional latency and TTI-independent latency." *IEEE Access* 5 (2017): 15800-15809.
- [28] Sassi, Aymen, Yassin Elhillali, and Faiza Charfi. "Evaluating experimental measurements of the IEEE 802.11 p communication using ARADA LocoMate OBU device compared to the theoretical simulation results." *Wireless Personal Communications* 97.3 (2017): 3861-3874.
- [29] Rupp, Markus, Stefan Schwarz, and Martin Taranetz. *The Vienna LTE-advanced simulators*. Singapore: Springer, 2016.
- [30] Jaeckel, Stephan, et al. "QuADRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62.6 (2014): 3242-3256.
- [31] Samimi, Mathew K., and Theodore S. Rappaport. "3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 64.7 (2016): 2207-2225.
- [32] Sun, Shu, George R. MacCartney, and Theodore S. Rappaport. "A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications." *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2017.
- [33] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) physical channels and modulation. TS 36.211" (2015)
- [34] Nissel, Ronald, Stefan Schwarz, and Markus Rupp. "Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communications." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.8 (2017): 1768-1782.
- [35] Rao, Xiongbin, and Vincent KN Lau. "Interference alignment with partial CSI feedback in MIMO cellular networks." *IEEE Transactions on Signal Processing* 62.8 (2014): 2100-2110.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างการศึกษา

Taweep S. & Settawit P. (2020, August). **Comparison of Appropriate Vehicular Communication Technology for V2X in Thailand**. The SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST 2020)

ทวีป ศรีชาติ และ เศรษฐวิทย์ ภูฉายา. (2563, ตุลาคม). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่เหมาะสม สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย. The 43rd Electrical Engineering Conference (EECON43) (pp. 286 – 289)

Taweep S. & Settawit P. (2021, March). **5G NR : The Suitable Communication Technology for V2X in Thailand Vehicular Environment**. The 2021 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2021) (pp.). IEEE.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

SUT International Virtual Conference on Science and Technology
Nakhon-Ratchasima, Thailand
28th August 2020



EAT0011

Comparison of Appropriate Vehicular Communication Technology for V2X in Thailand

Taweep Srichalee* and Settawit Poochaya*

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

* Corresponding Author: m6113155@g.sut.ac.th, settawit@sut.ac.th

Abstract: Nowadays vehicular communication is a famous technology. This technology increases the efficiency of vehicle and road safety. IEEE802.11p and LTE-V are introduced for more vehicle safety. 3GPP defined a new technology (5G NR V2X) for new service of communication between vehicles, in Thailand is still not explicit in which technology is suitable. This work proposes a comparison of V2V communication link performance in terms of PER and SNR in various environments. Simulation processes are created according to communication standards such as doppler shift, path delay and path gain. Our results show that 5G NR V2X is the most proper technology for the communication link between vehicles in Thailand. 5G NR V2X is the highest performance according to PER.

Keywords: IEEE 802.11p, LTE-V, 5G NR V2X, V2X.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่เหมาะสม สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย

Comparison of appropriate Vehicular communication technology for V2X in Thailand

ทวีป ศรีชาติ¹ และ เสรณฐวิทย์ อุฒยา²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี m6113155@g.sut.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี settawit@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ทุกวันนี้เทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะเป็นเทคโนโลยีที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ยานพาหนะและช่วยทำให้การเดินทางบนถนนมีความปลอดภัยมากขึ้น มาตรฐาน IEEE802.11p และ LTE-V ถูกนำเสนอโดยนักวิจัยเพื่อเป็นเครื่องมือหนึ่งสำหรับการเพิ่มความปลอดภัยของการใช้ยานพาหนะ ซึ่งประสิทธิภาพของการสื่อสารของเทคโนโลยีดังกล่าวเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่ง 3GPP ได้กำหนดเทคโนโลยีรุ่นใหม่ (5GNR V2X) สำหรับการบริการรูปแบบใหม่เพื่อรองรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลชัดเจนว่าเทคโนโลยีใดเหมาะสม ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการเปรียบเทียบของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในส่วนของ PER และ SNR โดยจำแนกตามเทคโนโลยีและสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยจำลองตาม gain, path delay และ doppler shift จากผลการทดสอบพบว่า 5GNR V2X นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะบนถนนในประเทศไทย

คำสำคัญ: IEEE 802.11p, LTE-V, 5GNR, V2X

Abstract

Nowadays vehicular communication is a famous technology. This technology increases the efficiency of vehicle and road safety. IEEE802.11p and LTE-V are introduced for more vehicle safety. 3GPP defined a new technology (5GNR V2X) for new service of communication between vehicles, in Thailand is still not explicit in which technology is suitable. This work proposes a comparison of V2V communication link performance in terms of PER and SNR in various environments. Simulation processes are created according to communication standards such as doppler shift, path delay and path gain. Our results show that 5GNR V2X is the most proper technology for the communication link between vehicles in Thailand. 5GNR V2X is the highest performance according to PER.

Keywords: IEEE 802.11p, LTE-V, 5GNRV2X, V2X

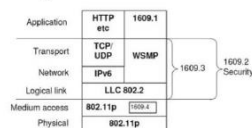
1. บทนำ

ทุกวันนี้อุบัติเหตุบนท้องถนนเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นอยู่เสมอ ในขณะที่การรายงานขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ได้ทำการสำรวจ พบว่ามีผู้คนถึง 1.35 ล้านคนต่อปีที่มีการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนถนนและตัวเลขของผู้เสียชีวิตนั้นยังคงเพิ่มขึ้น ในปี พ.ศ.2562 ประเทศไทยมีประชากรที่ได้รับผลกระทบจากอุบัติเหตุทางรถยนต์ถึง 360,000 ครั้ง มี 25,000 คนที่เสียชีวิต ประเทศไทยนั้นมีผู้เสียชีวิตสูงสุดเป็นอันดับ 1 ในเอเชียและเป็นอันดับที่ 9 ของโลก [1,2] เทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างยานพาหนะจะสามารถช่วยให้สถิติของอุบัติเหตุและผู้เสียชีวิตที่กล่าวมานั้นลดลงได้ [3] IEEE 802.11p ได้นำเสนอออกมาในปี พ.ศ.2553 และมีรูปแบบคลื่นเป็นแบบ OFDM ต่อมาในปี พ.ศ.2559 3GPP ได้นำเสนอ LTE-V2X Rel.14 และในปี พ.ศ.2562 ได้นำเสนอ 5GNR V2X ออกมา ในส่วนของ LTE-V2X และ 5GNR นั้นได้ถูกพัฒนามาจากเครือข่ายเซลลูลาร์ V2X (Vehicle to Everything) ถูกแบ่งเป็นแบบที่ใช้งานกับแอปพลิเคชันสำหรับความปลอดภัย และแอปพลิเคชันไม่ใช้ความปลอดภัย [3] IEEE802.11p และ LTE-V ซึ่งสองเทคโนโลยีนี้ต้องการค่าความแฝงเวลา(Latency) 100 มิลลิวินาที [4] 5GNR นั้นมีการสื่อสารที่นำเชื่อถือและในค่าเวลาแฝงที่ต่ำมาก

บทความนี้ได้นำเสนอการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของ 3 เทคโนโลยีได้แก่ IEEE 802.11p, LTE-V และ 5GNR โดยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างยานพาหนะโดยใช้ค่า SNR กับ PER สำหรับทั้ง 3 เทคโนโลยี และ 3 สถานการณ์ที่แตกต่างกันเพื่อหาเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมในการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทย

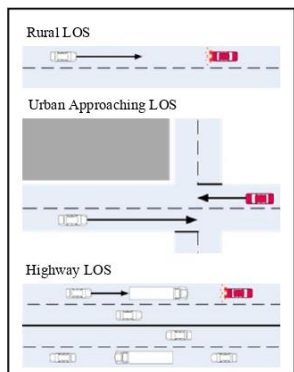
2. เทคโนโลยีการสื่อสาร

2.1 IEEE 802.11p



รูปที่ 1 IEEE 802.11p framework

3. แบบจำลองสถานการณ์



รูปที่ 4 การอธิบายสถานการณ์

ตารางที่ 2 รูปแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

Scenario	Path Delays (ns)	Path Gains (dB)	Doppler Shift (Hz)
Rural LOS	[0, 83, 183]	[0, -14, -17]	[0, 492, -295]
Urban Approaching LOS	[0, 117, 183, 333]	[0, -8, -10, -15]	[0, 236, -157, 492]
Highway LOS	[0, 100, 167, 500]	[0, -10, -15, -20]	[0, 689, -492, 886]

ในตารางที่ 2 แสดงรูปแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ เพื่อเสนอค่าความหน่วงเวลา gains และ doppler shift ในแต่ละสถานการณ์ [14] ที่ขึ้นตามสภาพแวดล้อม ดังรูปที่ 4. ได้แก่

3.1 พื้นที่ชนบท LOS

กรณีนี้เป็นสถานการณ์ของยานพาหนะ 2 คัน ที่มีพื้นที่เปิดโล่งกว้าง ไม่มีสิ่งก่อสร้างหรือสิ่งกีดขวาง

3.2 พื้นที่ในเมือง LOS

กรณีบนถนนในเมืองเป็นสถานการณ์ที่มียานพาหนะ 2 คัน เคลื่อนที่เข้าหากัน มีการสะท้อนและ Multipath fading เนื่องจากมีสิ่งก่อสร้าง ไฟจราจร และยานพาหนะที่แออัดมากกว่าพื้นที่ชนบท

3.3 พื้นที่บนทางด่วน LOS

ในกรณีนี้เป็นกรณีการสื่อสารของยานพาหนะ 2 คัน ที่เคลื่อนที่ตามถนนบนถนนที่มีมากกว่า 2 ช่องเดินรถ ทั้งยังมีการจราจรที่หนาแน่น ป้ายต่าง ๆ เนิบช้า และสะพานลอย ทำให้ doppler shift มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ 2 กรณีข้างต้น

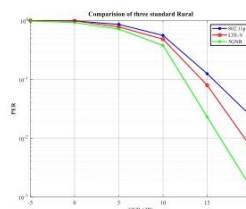
ผลการจำลองแบบนำพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 3 มาใช้ในการจำลองผล จะเห็นได้ว่าค่าของ Carrier, Symbol Duration และ Cyclic Prefix นั้นมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละเทคโนโลยี ส่วนค่า P_{tx} มีค่าเท่ากับ 23 dBm ค่า G_{rx} และ G_{tx} มีค่าเท่ากับ 3 dB มีการใช้การกล้ำสัญญาณ แบบ QPSK และขนาดข้อมูลที่มีขนาดเท่ากับ 200 ไบต์ สามารถ

เป็นค่าที่ใช้ได้สำหรับข้อมูลเชิงความปลอดภัย [15] การสูญเสียของภาครับที่ 1 เมตริก มีค่าเท่ากับ 47.86 dB

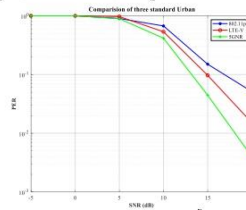
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

Parameter	802.11P	LTE-V	5GNRV2X
Carrier	156.25 kHz	15 kHz	60 kHz
Symbol duration	8 μs	66.7 μs	16.7 μs
Cyclic prefix	1.6 μs	4.69 μs	1.17 μs
P _{tx}	23 dBm		
G _{rx}	3 dB		
G _{tx}	3 dB		
Path loss at 1m 5.9 GHz	47.86 dB		
Noise Figure	9 dB		
Payload size	200 bytes		
Modulation	QPSK		

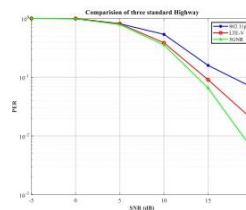
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบ 3 มาตรฐาน ของพื้นที่ชนบท LOS



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบ 3 มาตรฐาน ของพื้นที่ในเมือง LOS



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบ 3 มาตรฐาน ของพื้นที่บนทางด่วน LOS

ผลการจำลองดังรูปที่ 5-7 ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ โดยใช้ค่า PER/SNR และพิจารณาจากรูปแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ดังตารางที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็น

5GNR : The Suitable Communication Technology for V2X in Thailand Vehicular Environment

1st Taweep Srichalee
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: m6113155@g.sut.ac.th

2nd Settawit Poochaya
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: settawit@sut.ac.th

Abstract— Nowadays, vehicular communication is a famous technology. This technology increases the efficiency of vehicle and road safety. IEEE 802.11p and LTE-V are introduced for more vehicle safety. 3GPP defined a new technology (5GNR V2X) for new service of communication between vehicles, in Thailand is still not explicit in which technology is suitable. This work proposes a comparison of vehicle to vehicle (V2V) communication link performance in terms of Packet Error Rate (PER) versus Signal to Noise Ratio (SNR) and PER versus distance between vehicle in various environments. Simulation processes are created according to communication standards such as doppler shift, path delay and path gain. Our results show that 5GNR V2X is proper technology for communication link between vehicles in Thailand. 5GNR V2X is the highest performance according to PER values.

Keywords—IEEE 802.11p, LTE-V, 5GNR V2X, PER

I. INTRODUCTION

Today, accidents on the road are a significant problem. Meanwhile, World Health Organization (WHO) reported statistics about 1.35 million people per year are passed away from road fatality, and the number of deceased is still increased continuously. In Thailand 2019, 360,000 times of accidents affected to peoples. As a result, 25,000 peoples lost their lives, and has the highest number of deaths in Asia and is the 9th in the world [1,2]. Consequently, this research expects that V2X communication reduce the statistics of accidents and deaths on the road[3].

IEEE 802.11p technology was introduced in 2010 with OFDM waveforms. In 2016, 3GPP introduced LTE-V2X Rel.14 and in 2019 with 5GNR V2X. LTE-V2X and 5GNR were developed from the cellular network. Vehicle to Everything (V2X) services are separated by safety application and non-safety application. The researcher also introduced two technologies, IEEE 802.11p and LTE-V, which require a latency of 100 milliseconds[4]. 5GNR was developed with latency of 1 ms. 3GPP introducing NR (New Radio) for communication between vehicles, called 5GNR V2X. 5G Rel.16 was developed from the 3GPP Rel.14. [5]. 5GNR V2X is expected to support higher levels of 5G of New Radio (NR). V2X Rel.16 is presented for enhancing of mobile broadband (eMBB), Ultrareliable low latency (URLLC), and massive machine-type communications (mMTC)

This work present compares the differences between 3 technologies, namely IEEE 802.11p, LTE-V and 5GNR, by comparing the efficiency of

connected vehicles using SNR versus PER and PER versus distance for all three technologies three different situations. Finally, suitable for communication between vehicles in Thailand has been indicated.

II. TECHNOLOGY COMMUNICATION

A. IEEE 802.11p

The IEEE 802.11p standard was introduced in 2010, called DSRC (Dedicated Short Range Communications). The United States provided wave in 1999, the FCC (US Federal Communication Commission). The DSRC (short-range communication) IEEE 802.11p waveform has been developed from the standard IEEE 802.11a. IEEE 802.11p is improved from IEEE 802.11a standard. Communication services are operated in 5.850-5.925 GHz band which included 10 and 20 MHz bandwidth. Communication channels are divided into 7 channels [6] as shown in Fig. 1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is used in the PHY layer. IEEE 802.11p is managed to transmit as CSMA/CA and the MAC layer uses the IEEE 1609 standard [7], as in Fig. 2.

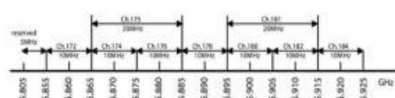


Fig. 1. IEEE 802.11p channels

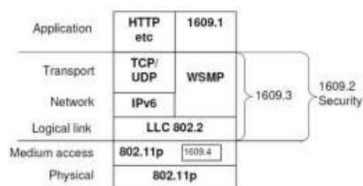


Fig. 2. IEEE 802.11p framework

B. LTE-V

3GPP developed the functionality of D2D (device-to-device) able to communicate directly in Release 12. However, what exciting things about connected vehicles is introduce the unique features of 3GPP for V2V (vehicle-to-vehicle) communication. 3GPP applied C-V2X (Cellular-V2X) as a cellular

connection and improving for V2X communication. The C-V2X divided the communication into two types 1. Communication between vehicle and network (V2N) in which the vehicle connects to the base station called the communication as Uu. 2. Communication between vehicle to vehicle. This communication does not require a telephone network base station, which can be directly connected in a low latency value and more reliability called communication PC5 [8] as shown in Fig. 3. The difference between IEEE 802.11p and LTE-V is SC-OFDM with symbol duration of IEEE 802.11p is 10 times less than the symbol duration of LTE-V, and LTE-V is Turbo encoder. The number of RBs (resource blocks) depends on the size of data and selection of MCS (Modulation and Coding Schemes) [9]. 1 sub-frame consists of 14 OFDM symbols. Supporting modulation since QPSK to 64 QAM at 10 or 20 MHz, peak rate is 41.472 Mbps.[10]. In addition, LTE-V also has using demodulation reference signal (DMRS) to control data transmission helps the receiver estimate the channel response appropriately. In 1 sub-frame of LTE-V PC5 have 4 DMRS symbols [13].

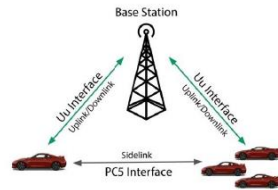


Fig. 3. LTE-V and 5G NR V2X interface

C. 5G NR V2X

5G NR V2X 3GPP was first proposed in Rel.15 and has been developed to certified for new applications in Rel.16. 5G NR supports OFDM waveforms for high-data applications. 3GPP has proposed a new standard in terms of 5G Release 16 with addition of other new techniques for system optimization with better communication, especially to make a low latency would be more attractive. 5G NR technology can support to using of MIMO antenna technology to increase capacity and coverage. 5G NR consists of two frequency ranges: sub 6 GHz (FR1: 450 MHz - 7.125 GHz) and millimeter wave (FR2: 24.25 GHz - 52.6 GHz). [11] The physical layer is designed for more reliable communication systems, especially in low latency, by 5G NR is a technology suitable for automated vehicles, also supports advanced coding LDPC for data channels and cyclic redundancy checking (CRC). Using Polar code to assist in channel control of the 5G NR is flexible and able to support more users. The most important to designing 5G NR technology is having its own subframe. Another essential improvement is frame structure. In 5G NR subframes are divided into 2 slots, each slot consists of 14 OFDM symbols different

from LTE. By the lowest TTI equal to one subframe for reducing latency. 5G NR has a mini-slot to send data using the OFDM symbols, only 2, 4 or 7 [4,12,13]. This article, using NR-V2X sub-6GHz MCS7 to modulate QPSK with a 10 MHz bandwidth. Table I. shows the comparison of three technology and Fig. 4. show of timeline vehicle communication.

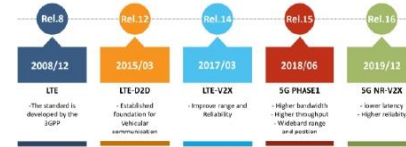


Fig. 4. 3GPP Timeline 5G NR development

TABLE I. COMPARATIVE OF TECHNOLOGY

Feature	IEEE 802.11p	LTE-V Rel-14	5G NR Rel-16
Published	2010	2016	2019
Synchronization	Asynchronous	Synchronous	Synchronous
Channel size	10,20 MHz	10,20 MHz	10,20,40,60,80,100 MHz
Data channel coding	Convolution	Turbo	LDPC
Waveform	OFDM	CP-OFDM	SC-FDMA and OFDMA
Radio resources	CSMA/CA	Semi persistent transmission with frequency domain	Semi persistent transmission with frequency domain
Latency	100 ms.	50 ms.	1 ms.
bitrate	3-27 Mbps	~41 Mbps	PC5 ~60 Mbps
Coverage distance	<1000 meters	~ 1000 meters direct mode and very large with cellular	~ 2000 meters direct mode and very large with cellular
MIMO support	No	Support up to 2 Tx/Rx antenna	Support up to 8 Tx/Rx antenna
Modulation support	Up to 64 QAM	Up to 64 QAM	Up to 256 QAM
High mobility support	Up to relative speeds of 500 km/hr with advanced receiver implement	Up to relative speed of 500 km/hr as a minimum requirement	Up to relative speed of 500 km/hr as a minimum requirement

III. SCENARIOS AND CHANNEL MODELS

A. Rural LOS

This scenario of two vehicles with open environmental areas, without buildings and fences.

B. Urban Approaching LOS

On the urban street is approaching each other of two vehicles in this scenario, has high reflections and multi-path fading due to a lot of buildings, traffic light, and crowded vehicles.

C. Highway LOS

Communicating of two vehicles following each other in a multilane with high density traffic, signs, hillsides, and overpasses. Doppler shift is higher when compared between Rural LOS and Urban Approaching LOS.

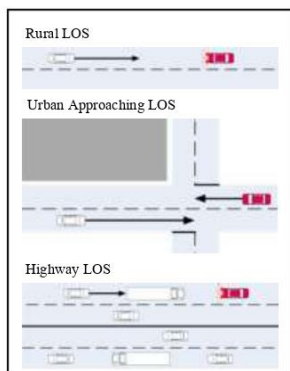


Fig. 5. Description of scenarios

TABLE II V2V CHANNEL MODELS

Scenario	Path Delays (ns)	Path Gains (dB)	Doppler Shift (Hz)
Rural LOS	[0, 83, 183]	[0, -14, -17]	[0, -492, -295]
Urban Approaching LOS	[0, 117, 183, 333]	[0, -8, -10, -15]	[0, 236, -157, 492]
Highway LOS	[0, 100, 167, 500]	[0, -10, -15, -20]	[0, 689, -492, 886]

In table II, presents V2V Channel models for different scenarios Delay, Gains, and Doppler shift. In each scenario indicates an environmental [14,15] area as according to Fig. 5.

TABLE III SIMULATION PARAMETERS

Parameter	IEEE802.11P	LTE-V	5GNRV2X
Carrier	156.25 kHz	15 kHz	60 kHz
Symbol duration	8 μs	66.7 μs	16.7 μs
Cyclic prefix	1.6 μs	4.69 μs	1.17 μs
Ptx	23 dBm		
Grx	3 dB		
Gtx	3 dB		
Path loss at 1m 5.9 GHz	47.86 dB		
Noise Figure	9 dB		
Loss exponent	2.75		
Payload size	200 bytes		
Modulation	QPSK		

The simulation result is generated corresponding to table III. Simulation parameters presented as Ptx = 23 dBm, Grx and Gtx = 3dB, QPSK modulation mode. A payload size of 200 bytes can be obtainable value for safety messages.[16] Receiver path loss at 1 meter is equal to 47.86 dB. Carrier, Symbol Duration, and Cyclic Prefix are different in each technology. The simulation and comparison between PER and distance are using the Friis equation to simulate the result for finding the distance from the equation [17]. LTE-V used 1800 MHz bands and 5GNR used 2600

MHz bands according to the NBTC auction in Thailand.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

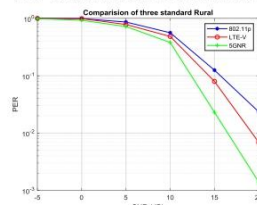


Fig. 6. Comparison of three standard Rural LOS

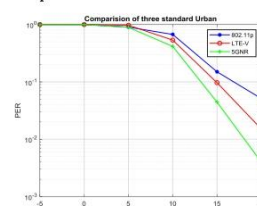


Fig. 7. Comparison of three standard Urban Approaching LOS

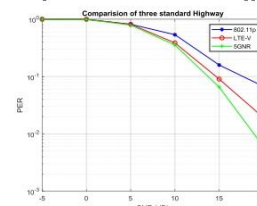


Fig. 8. Comparison of three standard Highway LOS

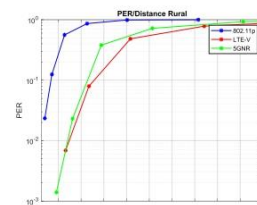


Fig. 9. PER versus between vehicle in Rural Environment

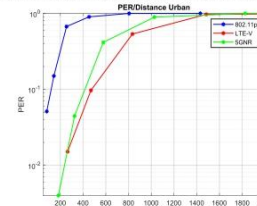


Fig. 10. PER versus between vehicle in Urban Environment

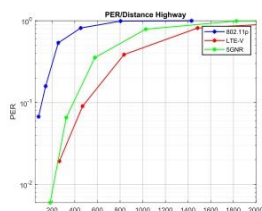


Fig. 11. PER versus between vehicle in Highway Environment

The simulation results as in Fig. 6-8 compare the efficiency of connected vehicles using the PER / SNR and consider from V2V channel model as shown in Tables II. Shows that the 5G NR standard has the lowest PER, followed LTE-V, and IEEE 802.11p has the highest PER. In a scenario where the lowest PER is the Rural area LOS. Next, the areas in Urban Approaching LOS and Highway LOS were higher respectively. In the range of SNR of -5 to 5 dB, each technology has a very high PER. Focusing on SNR = 15 dB, in rural 5G NR scenario PER that having better than LTE-V on 45.30% and better than IEEE 802.11p on 81.56%. In the urban 5G NR scenario, PER is better than LTE-V on 34.69% and better than IEEE 802.11p on 70.33%. Highway 5G NR scenario PER has better than LTE-V on 15.67% and better than IEEE 802.11p on 58.81%. Representing that 5G NR-V2X is the best technology based on PER consideration. Next is LTE-V because 5G NR has an LDPC encoder, LTE-V has a Turbo encoder and different DMRS numbers. Therefore, 5G NR is the most appropriate communication technology between vehicles with the best performance and lowest PER.

Fig. 9-11 presents the comparisons between PER and distance between vehicle. The results show that IEEE 802.11p technology has the lowest efficiency and the shortest communication. Focusing at 800 meters PER almost equal to 1 in every situation. Compare between 5G NR and LTE-V, can be seen that LTE-V has a longer communication range than 5G NR because 5G NR uses a wave at a higher band than LTE-V according to the NBTC auction in Thailand. However, 5G NR referring to basic safety message (BSM) transmission, 5G NR still performs better because it has the lowest latency.

V. CONCLUSION

This work is a comparison of three different vehicle communication standards and three different scenarios. The efficacy of PER versus SNR has already been checked. Results of the research indicate that 5G NR is a suitable technology for V2X in Thailand, but compared to PER versus distance between vehicle, LTE-V technology has the longest communication range. However, 5G NR is still a suitable technology. Especially, Low latency and high

reliability will increase the safety of the vehicle due to the fast warning of an alarm message (basic safety message). Moreover, this paper recommends suitable communication technology for vehicle communication in Thailand. Therefore, 5G NR is the most attractive technology based on simulation results.

REFERENCES

- [1] World Health Organization. "Global status report on road safety 2018. Summary. No. WHO/NMH/NVI/18.20." World Health Organization, 2018.
- [2] The Office of Transport and Traffic Policy and planning, Thailand. "Road accident situation analysis report Of the Ministry of Transport", 2019
- [3] Cecchini, G., Bazzi, A., Masini, B. M., and Zanella, A. "Performance comparison between IEEE 802.11 p and LTE-V2V in-coverage and out-of-coverage for cooperative awareness." IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), pp.109-114, 2017.
- [4] Naik, Gaurang, Bipray Choudhury, and Jung-Min Park. "IEEE 802.11 bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications." IEEE Access 7 ,2019: 70169-70184.
- [5] 3GPP. "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Overall description; Stage 2 (v14.3.0, Release 14) 3GPP. Tech. Rep. 36.300", June 2017.
- [6] Hyoungu Ji, Sunho Park, Jeongho Yeo, Younsun Kim, Juho Lee, and Byonghyo Shim. "Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects." IEEE Wireless Communications 25.3, pp.124-130, 2018
- [7] Jiang, Daniel, and Luca Delgrossi. "IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments." VTC Spring 2008. IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, pp.2036-2040, 2008.
- [8] AHMADI, Sassan. "5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards." Academic Press, 2019.
- [9] Bazzi, A., Masini, B. M., Zanella, A., & Thibault, I. "On the performance of IEEE 802.11 p and LTE-V2V for the cooperative awareness of connected vehicles." IEEE Transactions on Vehicular Technology 66 11, 2017
- [10] International Telecommunication Union (ITU). "Intelligent transport systems (ITS) Report ITU-R M.2445-0." 2018
- [11] Masini, B. M., Bazzi, A., & Natalizio, E. "Radio access for future 5G vehicular networks." IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) IEEE, pp. 1-7, 2017
- [12] 3rd Generation Partnership Project. "TR 38.801-2. V16.0.0 Technical Specification Group Radio Access Network, NR, User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 16)", June 2019
- [13] Lien, S. Y., Shieh, S. L., Huang, Y., Su, B., Hsu, Y. L., and Wei, H. Y. "5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access." IEEE communications magazine, 55(6), pp. 64-71, 2017
- [14] Intelligent Transport Systems (ITS) "ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band v1.3.0", 2019
- [15] M. Kahn. "V2V radio channel models." IEEE 802.11-14/0259r0, Feb. 2014.
- [16] V. D. Khaimar and K. Kotecha "Performance of vehicle-to-vehicle communication using IEEE 802.11 p in vehicular ad-hoc network environment" arXiv:1304.3357, 2013
- [17] Shaw, Joseph A. "Radiometry and the Friis transmission equation." American journal of physics 81.1 pp. 33-37, 2013

ประวัติผู้เขียน

นายทวีป ศรีชาติ เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย จังหวัดร้อยเอ็ด และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นศึกษาต่อในปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาได้นำเสนอบทความเข้าร่วมประชุมในงานประชุมนานาชาติ The SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST 2020) ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2563

การประชุมทางวิชาการระดับชาติในงาน The 43rd Electrical Engineering Conference หรือ EECON 43 ณ โรงแรมท็อปแลนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย ในวันที่ 28-30 ตุลาคม 2563

และการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติในงาน The 2021 International Electrical Engineering Congress หรือ iEECON 2021 ณ โรงแรม ณ โรงแรมพูลแมน พัทยา จี, พัทยา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ในวันที่ 10-12 มีนาคม 2564

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี