



## รายงานการวิจัย

ความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน  
Optimization Beamwidth for Virtual Traffic Lights



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2564



## รายงานการวิจัย

ความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน  
Optimization Beamwidth for Virtual Traffic Lights

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2564

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ขอขอบคุณผู้วิจัยในที่ปรึกษาของผู้วิจัยหลายๆ คนที่ช่วยเก็บผลการทดลองและมีส่วนร่วมดำเนินการวิจัยในหลายส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งนายทวีป ศรีชาติ นายณรรต สัจสุวรรณ นายถิรมนัส สาระภิรมย์ นายเชาวนันท เรื่องสุรย์ และนายธนภัทร เพี้ยชัย

ผู้วิจัย

กันยายน 2564



## บทคัดย่อ

ระบบขนส่งอัจฉริยะเป็นเทคโนโลยีใหม่ เสริมความปลอดภัยบนถนนโดยลดการสร้างถนนใหม่ มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารเข้ามาเป็นเครื่องมือในการรับ-ส่งข้อมูลต่างๆ บนถนน การรับ-ส่งข้อมูลประกอบด้วยอุปกรณ์ข้างทาง RSU และ อุปกรณ์ติดยานพาหนะ OBU ระบบไฟจราจรเสมือนเป็นอีกหนึ่งระบบซึ่งต้องการความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดสมรรถนะสูงสุดต่อระบบไฟจราจรเสมือน เนื่องด้วย ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเกี่ยวข้องกับอัตราขยายของสายอากาศ ความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ และยังส่งผลถึงสมรรถนะโดยรวมของระบบสื่อสาร นอกจากนี้แล้วกระบวนการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่พิจารณาพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของทางแยกที่พิจารณา ทำให้สามารถออกแบบและเลือกใช้สายอากาศ ที่ให้ประสิทธิภาพการสื่อสารที่ดีต่อระบบไฟจราจรเสมือนได้ การใช้ตัวสะท้อนแบบมุมซึ่งสอดคล้องกับค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมช่วยรวมพลังงานที่สูญเสียไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ ผลการจำลองแบบและผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงยืนยันว่าสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้สายอากาศแบบเดิม

## Abstract

Intelligent Transportation System (ITS) is a famous technology which reduces new road constructions. ITS increases road safety. Telecommunication technology is a powerful tool for data transmission along the road. Data transmission along the road equipped with Road Side Unit (RSU) and On Board Unit (OBU). Virtual Traffic Light (VTL) is another system providing road safety at intersection. VTL requires optimum antenna Half Power Beam Width (HPBW). Optimum antenna HPBW introduces high performance of data dissemination between RSU and OBU. This work presents VTL optimum antenna HPBW with SQP optimization method. Simulation and experimental results introduce VTL with optimum antenna HPBW produces high performance comparing to the conventional system.

## สารบัญ

## หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำที่มาและความสำคัญของปัญหา</b>	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	9
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	11
ขอบเขตของการวิจัย .....	11
<b>บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
ปรีทรรศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
<b>บทที่ 3 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
3.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ.....	20
3.2 โพรโตคอลของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ.....	23
3.3 ชุดอุปกรณ์บนยานพาหนะ.....	24
3.4 บริเวณการแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
3.4.1 บริเวณสนามรีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive Near-field Region).....	26

## สารบัญ (ต่อ)

3.4.2 บริเวณสนามแผ่กระจายระยะใกล้ (Radiating Near-field Region)...	27
3.4.3 บริเวณสนามระยะไกล (Far-field Region).....	27
3.5 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern).....	28
3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity).....	29
3.7 อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain).....	30
3.8 โครงสร้างของแบบจำลองที่นำเสนอ.....	31
3.8.1 การจำแนกสภาพแวดล้อมบนถนน.....	32
3.8.2 การหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่นำเสนอ.....	33
3.8.2.1 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและพารามิเตอร์ด้านสมรรถนะที่เกี่ยวข้อง.....	38
3.8.2.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง.....	39
3.9 เทคนิคการรวบรวมพลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศไปยังทิศทางที่ต้องการโดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม...40	
<b>บทที่ 4 ผลการจำลองแบบของระบบที่นำเสนอและการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง</b>	
4.1 แบบจำลองของระบบเมื่อใช้สายอากาศที่ให้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังซึ่งส่งผลให้มีการรับสัญญาณที่รถยนต์ภาครับได้ดีขึ้น.....	43
4.2 การทดสอบวัดผลด้วยอุปกรณ์ Arada Locomate.....	47
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
สรุปผลการวิจัย .....	57
ข้อเสนอแนะในการพัฒนา.....	57

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม .....67

ภาคผนวก

    ภาคผนวก ก .....59

    ภาคผนวก ข .....60

    ประวัติผู้วิจัย .....66





## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง.....	18
ตารางที่ 3.1 แถบความถี่ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	20
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆของมาตรฐาน IEEE802.11p.....	21
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงข้อกำหนดของช่องสัญญาณให้บริการและความถี่.....	22
ตารางที่ 3.4 หน้าที่ของช่องสัญญาณ.....	22
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	31
ตารางที่ 4.1 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	44
ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่พิจารณา.....	52



## สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 เครือข่ายยานพาหนะ (Vehicular Ad hoc Networks).....	13
รูปที่ 2.2 รูปที่ 2.2 ช่องสัญญาณและความถี่ DSRC.....	14
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของระบบไฟจราจรเสมือน.....	15
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างระบบไฟจราจรเสมือน เมื่ออุปกรณ์ข้างทางทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นเหมาะสมที่สุด.....	17
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์บนยานพาหนะ.....	23
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ LocoMate™ OBU.....	24
รูปที่ 3.3 บริเวณการแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	26
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทางรอบตัวในระนาบเดียว.....	28
รูปที่ 3.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง.....	29
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ.....	31
รูปที่ 3.7 สภาพแวดล้อมและสถานการณ์ของยานพาหนะแบบในเมือง.....	32
รูปที่ 3.8 สภาพแวดล้อมและสถานการณ์ของยานพาหนะแบบชานเมือง.....	32
รูปที่ 3.9 การหาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังสำหรับลำคลื่นหลักที่มีทิศทางด้านหน้าและด้านหลัง.....	33
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\phi_r$ และ $\phi_t$ .....	37
รูปที่ 3.11 สายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง โดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม.....	41
รูปที่ 3.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบของตัวสะท้อนแบบมุม.....	42
รูปที่ 3.13 แบบจำลองสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางโดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม.....	42
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองแบบ.....	45
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ยานพาหนะภาครับ.....	45
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่รับได้ที่รถยนต์ภาครับ.....	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.4	เส้นทางและแผนที่ในการทดสอบ Arada Locomate.....	47
รูปที่ 4.5	การจัดวางอุปกรณ์ OBU ที่ใช้ในการทดสอบ ภาครับ(สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวใน ระนาบเดียว).....	47
รูปที่ 4.6	การจัดวางอุปกรณ์ OBU ที่ใช้ในการทดสอบ ภาครับ(สายอากาศที่มีการใช้ตัวสะท้อนแบบมุม).....	48
รูปที่ 4.7	การจัดวางอุปกรณ์ RSU ภาคส่ง (สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว).....	49
รูปที่ 4.8	การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	50
รูปที่ 4.9	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศของสายอากาศแบบเดิม.....	50
รูปที่ 4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศของสายอากาศเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนแบบมุมเพื่อรวม พลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ (Optimum HPBW=70 องศา).....	51
รูปที่ 4.11	ผลเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณระหว่างระบบที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่ พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว.....	53
รูปที่ 4.12	ผลเปรียบเทียบจำนวนแพ็กเกจข้อมูลที่ภาครับระหว่างระบบที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีแบบรูปการ แผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว.....	53
รูปที่ 4.13	ผลเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลระหว่างระบบที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีแบบ รูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว.....	54
รูปที่ 4.14	เปรียบเทียบ PER กับทั้ง 3 เทคโนโลยี สภาพแวดล้อมแบบในเมือง.....	56
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงพารามิเตอร์สำหรับการใช้ LTE Vienna Simulator ในการจำลองสถานการณ์.....	55

## บทที่ 1

### บทนำ ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการจราจรติดขัด ความปลอดภัยของผู้ขับขี่ที่ใช้รถบนถนน ตลอดจนการลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ ล้วนเป็นประเด็นสำคัญของรัฐบาลในแต่ละประเทศที่ต้องการแก้ไขปัญหานี้ เพื่อเป็นการลดการสูญเสียทรัพยากรเชื้อเพลิงในขณะที่เกิดสภาวะการจราจรติดขัด เพื่อลดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินของประชากรในประเทศนั้น ๆ เนื่องจากปัญหาดังกล่าวนั้นส่งผลกระทบต่อสุขภาพจิต สุขภาพร่างกาย การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เวลา ตลอดจนโอกาสในการติดต่อทางธุรกิจของผู้ขับขี่ที่สูญเสียไปบนถนนเนื่องจากปัญหาการจราจรติดขัด ซึ่งปัญหานี้ นับเป็นปัญหาที่รัฐบาลหลายประเทศให้ความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาตามบริเวณทางแยกต่าง ๆ บนถนน เมื่อปริมาณยานพาหนะเพิ่มมากขึ้น โอกาสในการเกิดอุบัติเหตุก็เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีระบบไฟสัญญาณจราจรที่ถูกติดตั้งขึ้นมาเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกและการเดินทางของยานพาหนะที่ต้องการเดินทางผ่านทางแยกให้เป็นระบบระเบียบ ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งระบบไฟสัญญาณจราจรแบบเดิมนั้นยังคงมีราคาการติดตั้งและค่าบำรุงรักษาในอัตราที่สูง ทำให้ปริมาณทางแยกที่ติดตั้งระบบไฟสัญญาณจราจรยังมีจำนวนจำกัด จากข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นทำให้มีผู้เสนอระบบไฟจราจรเสมือนมาแทนที่ระบบไฟสัญญาณจราจรแบบเดิม งานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอการเพิ่มอัตราการเคลื่อนตัวของยานพาหนะเมื่อผ่านทางแยกในชั่วโมงเร่งด่วนถึง 60% ระบบไฟจราจรเสมือนประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 2 อย่าง ได้แก่ อุปกรณ์ข้างทาง (RSU: Road Side Unit) และ อุปกรณ์ติดยานพาหนะ (OBU: On Board Unit) โดยอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด อาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล ทำงานที่ความถี่ 5.9 GHz บนมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) และใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว ซึ่งสามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ทุกทิศทาง แต่เมื่อพิจารณาสภาพแวดล้อมแบบในเมือง พบว่า มีตึกสูงรอบๆทางแยก ทำให้การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ข้างทางไปยังอุปกรณ์ติดยานพาหนะถูกบดบัง ผลกระทบดังกล่าวทำให้การส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ข้างทางไปยังอุปกรณ์ติดยานพาหนะเกิดความผิดพลาดขึ้น จึงมีผู้เสนอการใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง เข้ามาแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยติดตั้งกับอุปกรณ์ข้างทางที่เปรียบเสมือนเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater) ทำหน้าที่กระจายสัญญาณไฟจราจรที่รับมาจากยานพาหนะที่อยู่ใกล้จุดกึ่งกลางทางแยกที่สุด ส่งต่อไปยังยานพาหนะตามด้านที่เหลือในทางแยกนั้น ๆ ด้วยจุดเด่นที่สำคัญของสายอากาศแบบมีทิศทางที่สามารถรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการได้นั้น ทำให้สามารถลดผลกระทบจากการสื่อสารในบริเวณที่มีตึกสูงบดบังทิศทางการสื่อสารได้ ความสามารถของสายอากาศแบบมี

ทิศทางในการรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการได้นั้น ประกอบด้วย อัตราขยายของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศ โดยที่อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบ ในทางตรงกันข้าม อัตราขยายของสายอากาศต่ำเมื่อความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกว้าง ด้วยเหตุดังกล่าว เพื่อให้การส่งสัญญาณในระบบไฟจราจรเสมือนให้สมรรถนะที่ดี และมีความน่าเชื่อถือ การหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศสำหรับระบบไฟจราจรเสมือนจึงเป็นที่น่าสนใจศึกษา ดังนั้นการทำวิจัยเรื่องนี้จึงเป็นเรื่องที่น่าจะให้ความสำคัญเพราะสามารถสร้างองค์ความรู้ทันกับการพัฒนาประเทศและเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบัน ซึ่งผลสำเร็จจากการวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มคุณภาพและความน่าเชื่อถือของการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์บนถนนและอุปกรณ์ติดยานพาหนะ ผลของระบบสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือนี้ทำให้ระบบไฟจราจรเสมือนมีการรับ - ส่งข้อมูลที่มีคุณภาพ และยังช่วยลดผลกระทบจากตึกสูงรอบ ๆ ทางแยกที่มีต่อการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์บนถนนกับอุปกรณ์ติดยานพาหนะ ด้วยจุดเด่นของระบบไฟจราจรเสมือนผนวกกับการใช้สายอากาศแบบมีทิศทางที่มีค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุด จึงส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ข้างทาง และอุปกรณ์ติดยานพาหนะ ส่งผลทางอ้อมให้อัตราการเคลื่อนตัวผ่านทางแยกของยานพาหนะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปัญหาการจราจรติดขัดลดลง และยังเป็นการช่วยลดการใช้พลังงาน ช่วยลดมลภาวะบริเวณทางแยกในตัวเมืองได้อีกด้วย ทำให้งานวิจัยนี้สอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2555-2559) ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 2 การสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนาทางเศรษฐกิจ กลยุทธ์การวิจัยที่ 7 เพิ่มสมรรถนะและขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร แผนงานวิจัยที่ 5 การวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อุปกรณ์โทรคมนาคมและเทคโนโลยีสารสนเทศ และยิ่งสอดคล้องกับแผนงานวิจัยกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555-2559) เรื่อง 4. ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจสู่การเติบโตอย่างมีคุณภาพและยั่งยืน หัวข้อ 4.2 การพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัย และนวัตกรรม นอกจากนี้ผลสำเร็จของโครงการวิจัยยังเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับระบบไฟจราจรเสมือน แก้ปัญหาในพื้นที่ที่คุณภาพสัญญาณต่ำ เนื่องจากตึกสูงรอบ ๆ ทางแยกในเมือง อันเป็นการยกระดับคุณภาพชีวิตของกลุ่มเป้าหมาย ด้วยการพัฒนาองค์ความรู้จากนักวิจัยในประเทศไทย จากการสำรวจวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยที่น่าเสนอนี้กำลังเป็นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากช่วยแก้ปัญหาการจราจรติดขัด และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาระบบไฟจราจรได้ ซึ่งงานวิจัยในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังสำหรับระบบไฟจราจรเสมือนนี้เป็นเรื่องใหม่ที่ยังไม่เคยมีงานวิจัยใดเสนอมาก่อน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังนำเสนอเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมบนถนนตามทางแยก

ในตัวเมือง ทั้งความกว้างของถนน ความกว้างของทางแยก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ข้างทางกับอุปกรณ์ติดยานพาหนะ ทำให้ผู้ที่สนใจศึกษา สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ให้เข้ากับพื้นที่ใช้งานตามมาตรฐานของประเทศนั้น ๆ ถือว่าเป็นแนวทางในการพัฒนาที่นำไปสู่การสร้างฐานรากงานวิจัยของอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีสื่อสารเคลื่อนที่ของประเทศ และยังมีคุณูปการแก่ผู้สนใจในประเทศอื่น ๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสอดคล้องกับกลุ่มเรื่องวิจัยที่ควรมุ่งเน้นตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2555-2559) หัวข้อ 9. เทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม และสอดคล้องแผนงานวิจัยกับยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติรายประเด็นที่ 8 ยุทธศาสตร์การวิจัยรายเทคโนโลยี

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ความรู้ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศสำหรับการรับส่งข้อมูลในระบบไฟจราจรเสมือน
2. เพื่อหาค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายอากาศแบบมีทิศทางของระบบไฟจราจรเสมือน
3. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมของทางแยก เช่น ความกว้างของทางแยก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ข้างทางที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องทวนสัญญาณกับอุปกรณ์ติดยานพาหนะ

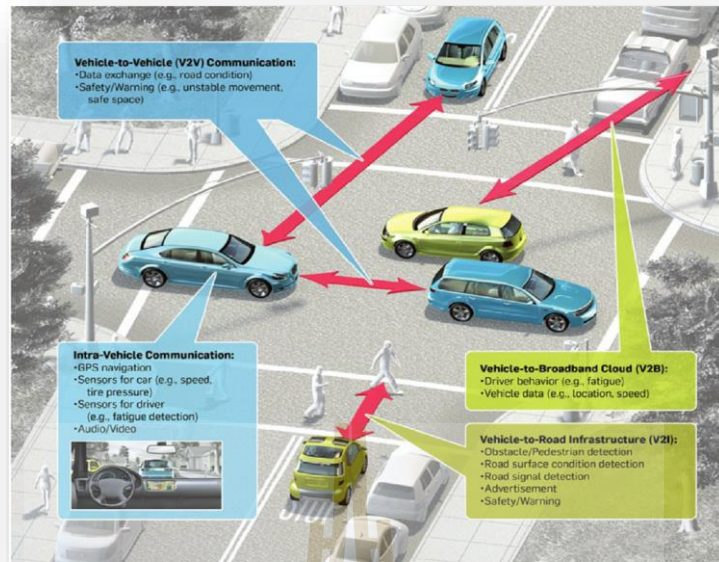
### ขอบเขตของโครงการวิจัย

การหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟจราจรเสมือนในโครงการวิจัยนี้ กำหนดการศึกษา วิจัยและทดสอบด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงประจักษ์และการวัดสัญญาณในพื้นที่จริงซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนาการจำลองแบบ ผู้วิจัยจะดำเนินการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถรวมพลังงานของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียวให้ตรงกับค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุด เพื่อทำการวัดสัญญาณจริงในบริเวณทางแยก ทั้งนี้โปรแกรมที่ทำงานบนอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ และอุปกรณ์ข้างทาง อยู่ภายใต้ข้อตกลงของบริษัทที่ให้ข้อมูล อาจมีบางส่วนที่เปิดเผยได้และต้องปกปิด

## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครือข่ายการสื่อสารสำหรับยานพาหนะ (Vehicular Ad-hoc Network: Vanet) เป็นเครือข่ายที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากเครือข่าย Manet: Mobile Ad-hoc Network ซึ่งข้อแตกต่างที่เด่นชัดของทั้ง 2 เครือข่ายคือ Vanet จะไม่มีการคำนึงถึงการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณภายในเครือข่าย เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ เชื่อมต่อกับระบบไฟของยานพาหนะ ทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ ตลอดจนเครือข่ายการสื่อสารสำหรับยานพาหนะ มีการรับส่งแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างยานพาหนะ ดังนั้น เครือข่ายดังกล่าวจึงมีผลต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทำให้ความต้องการในการส่งข้อมูลอย่างรวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือถูกเลือกให้เป็นความต้องการหลักของเครือข่ายการสื่อสารสำหรับยานพาหนะเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ถนน เครือข่ายการสื่อสารสำหรับยานพาหนะ แบ่งรูปแบบการสื่อสารออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ (Vehicle to Vehicle communications) และการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง (Vehicle to Infrastructure communications) ดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้วเครือข่ายการสื่อสารสำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะนั้นอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ (DSRC: Dedicated Short Range Communication) ซึ่งทำงานด้วยความถี่ 5.9 GHz ตามมาตรฐาน IEEE802.11p ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 7 ช่อง ซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกันไปตามมาตรฐานที่กำหนด รูปที่ 2.2 แสดงช่องสัญญาณ ความถี่ และหน้าที่หลักของช่องสัญญาณนั้น ๆ

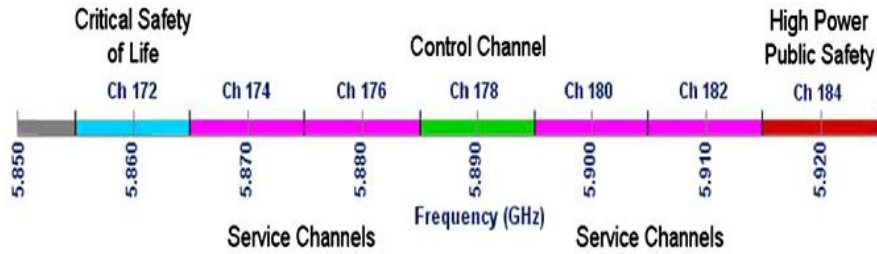


รูปที่ 2.1 เครือข่ายยานพาหนะ (Vehicular Ad hoc Networks) [Saif Al-Sultan,2013]

วัตถุประสงค์หลักของระบบขนส่งอัจฉริยะ คือ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้งาน คนเดินเท้า และแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัด อาศัยเทคโนโลยีทางโทรคมนาคมโดยปราศจากการสร้างถนนใหม่ ด้วยเหตุนี้ แอปพลิเคชันของระบบขนส่งอัจฉริยะจึงถูกแบ่งเป็น แอปพลิเคชันสำหรับความปลอดภัย (Safety Applications) และ แอปพลิเคชันสำหรับข้อมูลสาระบันเทิง (Infotainment Applications) โดยที่แอปพลิเคชันทั้ง 2 แตกต่างกันว่า แอปพลิเคชันสำหรับความปลอดภัย ต้องการการสื่อสารที่มีคุณภาพดี มีความน่าเชื่อถือสูง มีระยะเวลาในการส่งข้อมูลสั้น เพื่อให้ทันต่อการแจ้งเตือนและการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่รวดเร็วและทันเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนถนน ด้วยเหตุดังกล่าว ระบบไฟจราจรเสมือน จึงถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของแอปพลิเคชันสำหรับความปลอดภัย

เมื่อพิจารณาระบบไฟจราจรเดิม ซึ่งมีข้อจำกัด ได้แก่ ค่าติดตั้งและค่าบำรุงรักษาที่สูง ตลอดจนมีการกำหนดช่วงเวลาการให้สัญญาณไฟจราจรที่คงที่ ไม่แปรเปลี่ยนตามปริมาณยานพาหนะ ทำให้ระบบไฟจราจรแบบเดิมนั้นช่วยได้เพียงแค่ควบคุมการเดินทางผ่านทางแยกของยานพาหนะให้ปลอดภัยเท่านั้น งานวิจัยที่ [1] ได้นำเสนอระบบไฟจราจรเสมือน โดยยานพาหนะที่อยู่ใกล้จุดกึ่งกลางของทางแยกที่สุด จะถูกเลือกให้เป็นผู้นำ (Vehicle Leader) โดยผ่านกระบวนการระบุตำแหน่ง (Localization) จากอุปกรณ์ติดตามยานพาหนะ ที่สามารถให้บริการระบบระบุตำแหน่งได้ เช่น Google map เป็นต้น ยานพาหนะที่ถูกเลือกให้เป็นผู้นำจะทำหน้าที่ให้





## รูปที่ 2.2 ช่องสัญญาณและความถี่ DSRC

Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems — 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2010. [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/E2213.htm>

ไฟสัญญาณจราจรแยกยานพาหนะที่ตามหลัง และไฟสัญญาณไฟจราจรไปยังยานพาหนะที่อยู่บนทางแยกในส่วนที่เหลือโดยผ่านทางอุปกรณ์ข้างทาง ที่ทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณ เมื่อยานพาหนะที่ตามหลังผู้นำคันสุดท้ายผ่านทางแยก จะเริ่มต้นกระบวนการเลือกผู้นำใหม่ ระบบไฟจราจรเสมือนนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 2 ส่วนได้แก่ อุปกรณ์ข้างทาง และ อุปกรณ์ติดยานพาหนะ รูปที่ 2.3 โดยอุปกรณ์ข้างทางมีหน้าที่กระจายสัญญาณไฟจราจรไปยังทิศทางต่างๆบนทางแยกนั้นๆ ในส่วนของอุปกรณ์ติดยานพาหนะถูกติดตั้งบนยานพาหนะ จากรูปจะเห็นได้ว่า ยานพาหนะแต่ละคันจะมีสัญญาณไฟจราจรเป็นของตนเอง ซึ่งจะได้รับมาจากยานพาหนะที่อยู่ใกล้กับจุดกึ่งกลางของทางแยกมากที่สุด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า บริเวณทางแยกมีตึกสูงอยู่รอบด้าน ระบบไฟจราจรเสมือนแบบเดิมนั้น อาศัยการส่งสัญญาณผ่านทางสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว ผลกระทบจากตึกสูงรอบ ๆ ด้าน ทำให้การรับส่งสัญญาณมีข้อผิดพลาด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการติดตั้งสายอากาศแบบมีทิศทางแทนที่สายอากาศแบบเดิมบนอุปกรณ์ข้างทาง ที่ทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณ ส่งสัญญาณไปยังทิศทางต่าง ๆ บนทางแยก เมื่อพิจารณาสายอากาศแบบมีทิศทาง คุณสมบัติแรกที่คำนึงถึงคือ อัตราขยายของสายอากาศและค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศ ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกัน การเลือกสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบ จะให้อัตราขยายของสายอากาศสูงกว่าสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกว้าง นอกจากนี้แล้วอัตราขยายของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น ยังส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับได้ หากคุณภาพสัญญาณดี การสื่อสารก็น่าเชื่อถือ ส่งผลให้การรับส่งข้อมูลกันบนเครือข่ายสำหรับยานพาหนะมีความรวดเร็ว ถูกต้อง ในการหาค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน จะเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันอัตราขยายของสายอากาศเป็นอันดับแรก



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของระบบไฟจราจรเสมือน [O. K. Tonguz, 2011]

ฟังก์ชันอัตราขยายของสายอากาศถูกนำเสนอโดยงานวิจัยที่ [6] เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟจราจรเสมือน สามารถพิจารณาได้ดัง (2.1) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของสายอากาศ ทิศทางการหันลำคลื่น และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง โดยเป้าหมายของงานวิจัยเป็นการหาค่าความกว้างลำคลื่นที่ทำให้ระบบไฟจราจรเสมือนมีคุณภาพสัญญาณดีที่สุด นั่นหมายถึงระบบมีอัตราขยายเฉลี่ยที่สูงที่สุดเมื่อป้อนอินพุตเป็นค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้งานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานและความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศในระนาบ Azimuth เท่านั้น เนื่องจากระยะระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณกับอุปกรณ์ติดยานพาหนะสั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ Elevation

$$G(\phi) = \begin{cases} 10 \left( 0.1 \times \left( G_{\max} - 12 \left[ \frac{\phi - \phi_{MB}}{\phi_{-3dB}} \right]^2 \right) \right) & \\ 0; \text{elsewhere} & \end{cases} \quad (2.1)$$

นอกจากนั้นแล้วปัจจัยที่ควรพิจารณาอื่นๆ ได้แก่ ความน่าจะเป็นของจำนวนยานพาหนะที่อยู่บนทางแยกต่างๆ ความกว้างของถนน ความกว้างของทางแยก ระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยที่ (2.2) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เหล่านี้ล้วนส่งผลต่ออัตราขยายของสายอากาศทั้งสิ้น

$$p(\phi) = \frac{\text{vehicle position probability}}{\text{angle spread between beams}(\Delta\phi)} \quad (2.2)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \Delta\phi = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\text{road width}}{\text{distance between RSU and OBU}} \right)$$

อัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศสามารถหาได้จาก (2.3) ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ สอดคล้องกับ (2.1) และ (2.2) โดยที่พารามิเตอร์ที่น่าสนใจคือทิศทางและส่งผลกระทบต่ออัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศ ได้แก่ ความน่าจะเป็นของตำแหน่งยานพาหนะบนทางแยกนั้นๆ ซึ่งแสดงได้ดัง (2.2) นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่ออัตราขยายเฉลี่ย คือ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีลำคลื่นหลักหันจากอุปกรณ์ข้างทางไปยังอุปกรณ์ติดยานพาหนะดังสมการที่ (2.3)

$$\bar{G} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} G(\phi) p(\phi) d\phi \quad (2.3)$$

ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศ จะใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ ข้อจำกัดที่พิจารณา โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แสดงดัง (2.4) และ (2.5) ซึ่งเป็นการหาค่าสูงสุดของอัตราเฉลี่ยระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน โดยที่ข้อจำกัดของปัญหาที่พิจารณาแสดงไว้ใน (2.5) โดยที่เป้าหมายหลักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นการหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยที่สูงที่สุด ที่สอดคล้องกับค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ป้อนเป็นอินพุตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (2.5)

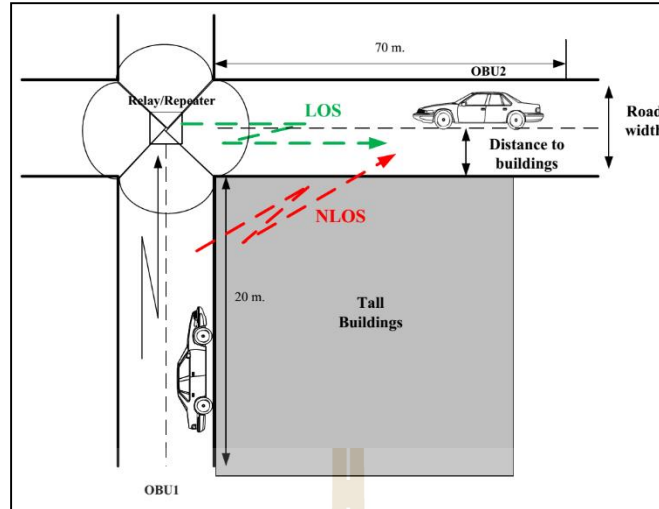
$$f(\phi_{-3dB}) = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{P_t}{N} \int_0^{2\pi} G(\phi) p(\phi) d\phi \quad (2.4)$$

*Maximize*

$$f(\phi_{-3dB_1}, \phi_{-3dB_2}, \dots, \phi_{-3dB_M}) \quad (2.5)$$

*Subject to*

$$\phi_{-3dB} = 2\pi \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างระบบไฟจราจรเสมือน เมื่ออุปกรณ์ข้างทางทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นเหมาะสมที่สุด

จากสมการที่เกี่ยวข้องในข้างต้น สามารถแสดงสมรรถนะของการแลกเปลี่ยนข้อมูลในระบบไฟจราจรเสมือนได้ในรูปแบบต่าง ๆ บนชั้น MAC Layer ได้ อาทิเช่น อัตราความผิดพลาดบิต (BER) ดัง (2.7) ซึ่งเป็นการประมาณค่าอัตราความผิดพลาดบิตเบื้องต้น เนื่องจากบริเวณที่สนใจศึกษา มีระยะห่างระหว่างยานพาหนะสั้น และยานพาหนะใช้ความเร็วต่ำบริเวณทางแยก ทำให้ความเร็วของยานพาหนะไม่มีผลต่อกระทบต่อการแลกเปลี่ยนข้อมูล จึงทำให้สามารถประมาณค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลได้ นอกจากนี้แล้วพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และ (2.8)-(2.11) ซึ่งประกอบด้วยอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกตข้อมูล (PER) ดัง (2.8) และเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (Communication Delay) ดัง (2.9) เพื่อแสดงเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟจราจรเสมือนแบบเดิมที่ใช้สายอากาศแบบรอบตัวในระนาบเดียว ระบบไฟจราจรเสมือนที่มีการใช้สายอากาศแบบมีทิศทางแบบดั้งเดิม และระบบไฟจราจรเสมือนที่มีการใช้สายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุด

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \right) \quad (2.7)$$

$$PER = 1 - (1 - BER)^{8 \times N} \quad (2.8)$$

$$\text{Delay Time} = \frac{1}{1 - PER} (\text{Minimum Delay}) \quad (2.9)$$

$$\text{Minimum Delay} = T_p + T_{PHY} + T_{DATA} + T_{DIFS} + \tau + \left( \frac{CW_{\min} \times T_{slot}}{2} \right) \quad (2.10)$$

$$T_{DATA} = T_{Preamble} + T_{SIGNAL} + \frac{16+(8 \times N)+6}{\text{Datarate}} + \frac{T_{SYM}}{2} \quad (2.11)$$

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

Symbol	Parameter	Values
$N$	Packet Size	100-1000(Bytes)
$T_{slot}$	Slot time	$9 \mu s$
$T_{DIFS}$	DIFS time	$34 \mu s$
$CW_{\min}, CW_{\max}$	Contention window size	Minimum=15, Maximum=1,023
$T_p$	Preamble transmission time	$16 \mu s$
$T_{PHY}$	Physical header transmission time	$\mu s$
$T_{HDATA}$	MAC overhead	$\mu s$
$T_{DATA}$	Data transmission time depend on system data rate	3 Mbps-27Mbps
$\tau$	Propagation delay	Depend on the distance between vehicles
$T_{SYM}$	Symbol interval	$4.1 \times 10^{-17}$
$T_{Preamble}$	PLCP preamble duration	$5.9 \times 10^{-17}$
$T_{SIGNAL}$	Duration of QPSK-OFDM symbol	$8 \times 10^{-17}$

จากข้อจำกัดดังกล่าวมาข้างต้น งานวิจัยที่ [1] ได้นำเสนอระบบไฟจราจรเสมือน แทนที่ระบบไฟสัญญาณจราจรแบบเดิม ระบบไฟจราจรเสมือนดังกล่าว ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ข้างทาง (Road Side Unit: RSU) และ อุปกรณ์ติดยานพาหนะ (On Board Unit) ที่ถูกติดตั้งบนกระจกของยานพาหนะทำหน้าที่ประมวลผลช่วงเวลาการแสดงผลไฟสัญญาณจราจรและส่งสัญญาณไฟจราจรไปยังยานพาหนะที่ตามมาด้านหลังโดยอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด อาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ ทำงานที่ความถี่ 5.9 GHz บนมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) [2] งานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอการเพิ่มอัตราการเคลื่อนตัวของยานพาหนะเมื่อผ่านแยกในชั่วโมงเร่งด่วน 60% เมื่อเปรียบเทียบกับไฟจราจรแบบเดิมและพิจารณาในกรณีที่ยานพาหนะมีปริมาณ

มาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสภาพแวดล้อมแบบในเมือง พบว่า มีตึกสูงรอบทางแยก ทำให้การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ข้างทางไปยังอุปกรณ์ติดตั้งยานพาหนะถูกบดบัง ผลกระทบดังกล่าวทำให้การส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ข้างทางไปยังอุปกรณ์ติดตั้งยานพาหนะเกิดความผิดพลาดขึ้น งานวิจัยที่ [3] จึงได้นำเสนอการใช้สายอากาศแบบมีทิศทางเข้ามาแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยอาศัยจุดเด่นของสายอากาศแบบมีทิศทาง [4-6] ได้แก่ เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโดยการรวบรวมกำลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ ผลจากจุดเด่นนี้ทำให้ระยะครอบคลุมการสื่อสารระหว่างยานพาหนะเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอด และรักษาการเชื่อมต่อเฉพาะการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ข้างทางที่ทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณกับอุปกรณ์ติดตั้งยานพาหนะที่ต้องการเพียงเท่านั้น งานวิจัยที่ [7] แสดงฟังก์ชันอัตราขยายของสายอากาศ และงานวิจัยที่ [8] แสดงการพิจารณาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ระนาบ Azimuth และระนาบ Elevation เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาเฉพาะระนาบ Azimuth เนื่องจาก ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าในระนาบ Elevation เพราะยานพาหนะอยู่ใกล้กันกับอุปกรณ์ข้างทาง งานวิจัยดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศที่สัมพันธ์กันกับทิศทางของลำคลื่นและความน่าจะเป็นที่ยานพาหนะจะอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ นอกจากนี้ งานวิจัยที่ [9-10] ได้แสดงถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ผ่านทาง BER, PER และ Communication Delay time จากการทำปรีทรศน์วรรณกรรม ทำให้เห็นถึงความสำคัญของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศที่ส่งผลถึงสมรรถนะของระบบสื่อสารสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน ดังนั้นการเลือกสายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับระบบไฟจราจรเสมือนจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจศึกษาโดยเฉพาะ การศึกษาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เกิดสมรรถนะสูงสุดต่อระบบไฟจราจรเสมือน เนื่องด้วย ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเกี่ยวข้องกับอัตราขยายของสายอากาศ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ และยังส่งผลถึงสมรรถนะโดยรวมของระบบสื่อสาร นอกจากนี้แล้วกระบวนการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่พิจารณาได้แสดงไว้ใน [11] และ [12] ยังเป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้มีความน่าสนใจศึกษา เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของทางแยกที่พิจารณา ทำให้สามารถออกแบบและเลือกใช้สายอากาศ ที่ให้ประสิทธิภาพการสื่อสารที่ดีต่อระบบไฟจราจรเสมือนได้อีกด้วย จากการศึกษาปรีทรศน์วรรณกรรม ยังไม่พบงานวิจัยได้นำเสนอการศึกษาในหัวข้อดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงนำเสนอการหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน

### บทที่ 3

## โครงสร้างของระบบที่นำเสนอและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### บทนำ

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการกล่าวถึงพื้นฐานทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง จนนำไปสู่การหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุด เทคนิคการรวมพลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศเพื่อแผ่พลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ และการจำลองผลระบบที่นำเสนอ

### 3.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

ระบบขนส่งอัจฉริยะ แบ่งรูปแบบของการสื่อสารออกเป็น 2 รูปแบบ [2] ได้แก่ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง (V2I) และ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (V2V) โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงการทำงานของ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะ และการรับ-ส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ข้างทางไปยังยานพาหนะ

ระบบขนส่งอัจฉริยะอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ในการส่งสัญญาณ โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นไปตามมาตรฐานชั้นกายภาพ IEEE802.11p ที่ทำงานบนย่านความถี่ 5.9 GHz โดยที่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบขนส่งอัจฉริยะได้จัดสรรแถบความถี่สำหรับการสื่อสารในรูปแบบดังกล่าวที่แตกต่างกันตามพื้นที่และข้อกำหนดของหน่วยงานในประเทศนั้น ไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แถบความถี่ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

เขตพื้นที่	มาตรฐาน	ย่านความถี่ (GHz)
ยุโรป	EN 12253	5.795-5.815
ITU-R	ITU-R M.1453	5.725-5.875
ญี่ปุ่น	ARIB T55	5.770-5.850
อเมริกาเหนือ	ASTM 2213-02,03	5.850-5.925

### มาตรฐาน IEEE802.11p ชั้นกายภาพ

มาตรฐาน IEEE802.11p ชั้นกายภาพ กำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะได้แก่ รูปแบบการมอดูเลตสัญญาณ ความถี่ใช้งาน ค่ามาตรฐานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆของมาตรฐาน IEEE802.11p

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	5.9 GHz
Modulation type	BPSK QPSK
Data transmission rate	3-27 Mbps
Number of data subcarrier	52
Number of FFT length	64
Number of cyclic prefix	32
OFDM symbol duration	8 $\mu$ s

การรับส่งข้อมูลของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ โดยใช้จุดเด่นของเทคโนโลยี OFDM ที่ทนต่อผลของการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี การสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะได้กำหนดช่องสัญญาณไว้สำหรับการใช้งานในแอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 3.3 โดยที่เลขประจำช่องสัญญาณสื่อถึงความถี่กลางของช่องสัญญาณนั้นๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f_c = 5000 + (5 \times n_{ch}) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $n_{ch} = 0, 1, \dots, 200$  (คือ เลขประจำช่องสัญญาณ)

เช่น ช่องสัญญาณที่ 172 มีความถี่กลาง คือ  $f_c = 5000 + (5 \times 172) = 5860$  (MHz)

หน้าที่ของช่องสัญญาณสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่ใช้มาตรฐาน IEEE802.11p ประกอบด้วย ช่องสัญญาณให้บริการจำนวน 6 ช่องสัญญาณ หรือ SCH และ มีช่องสัญญาณควบคุม CCH อีก 1 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีความกว้างแถบ 10 MHz โดยมีค่าต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 3.4



**ตารางที่ 3.3** ตารางแสดงข้อกำหนดของช่องสัญญาณให้บริการและความถี่

พื้นที่	แถบความถี่ (GHz)	ช่องสัญญาณบริการ	ความถี่กลาง (MHz)
อเมริกา และแคนาดา	ITS-RS (5.850-5.925)	172	5860
		174	5870
		175	5875
		176	5880
		178	5890
		180	5900
		181	5905
		182	5910
		184	5920

**ตารางที่ 3.4** ช่องสัญญาณแต่ละช่อง

ตัวเลขประจำช่องสัญญาณ	172	174	176	178	180	182	184
ชนิดของช่องสัญญาณ	Service Channels	Service Channels	Service Channels	Control Channels	Service Channels	Service Channels	Service Channels
กำลังส่ง (dBm)	33	33	33	44.8	23	23	40
ความถี่ (GHz)	5.860	5.870	5.880	5.890	5.900	5.910	5.920

การจัดสรรหน้าที่ของช่องสัญญาณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ช่องสัญญาณที่ 172: Public Safety V2V

ช่องสัญญาณที่ 174: Public Safety Private

ช่องสัญญาณที่ 176: Public Safety Private

ช่องสัญญาณที่ 178: Control Channel

ช่องสัญญาณที่ 180: Public Safety /Private

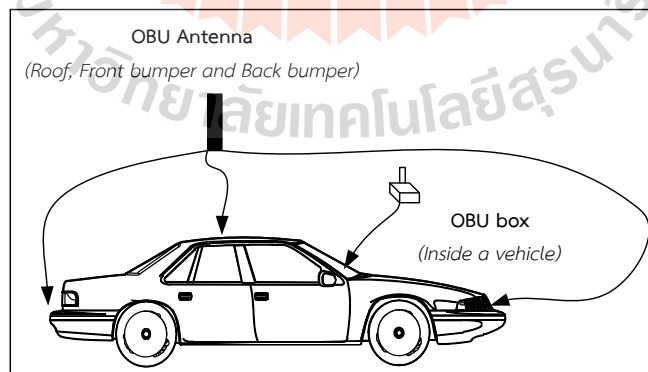
ช่องสัญญาณที่ 182: Public Safety /Private

ช่องสัญญาณที่ 184: Public Safety/Intersections

### 3.2 โพรโตคอลของการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ

การสื่อสารระหว่างยานพาหนะนั้น ยานพาหนะแต่ละคันจะติดต่อรับส่งข้อมูลกันเป็นจำนวนหลาย ๆ คัน เรียกการสื่อสารระหว่างยานพาหนะแบบนี้ว่า VANET: Vehicular Ad-hoc Network เมื่อพิจารณา 1 การเชื่อมโยงของเครือข่ายการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ กุญแจหลักในการควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณคือ โพรโตคอลแม็ค ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้มีความสามารถในการให้บริการหลายช่องสัญญาณที่ทำงานพร้อมๆกันได้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE1609.4 ซึ่งมาตรฐาน IEEE802.11 เดิมนั้นไม่สามารถทำได้ โดยที่ชั้นกายภาพของมาตรฐาน IEEE802.11p ถูกกำหนดให้มีช่องสัญญาณที่ไม่ซ้อนทับกันด้วยความกว้างของช่องสัญญาณ 10 MHz ช่องสัญญาณกลางคือช่องสัญญาณควบคุม หรือช่องสัญญาณหมายเลข 178 ส่วนที่เหลือ คือช่องสัญญาณบริการได้แก่ ช่องสัญญาณหมายเลข 172, 174, 176, 180, 182 และ 184

กลไกที่สามารถให้บริการหลายช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารระยะใกล้เรียกว่า DMCC : DSRC Multi-Channel Coordination คือรูปแบบการแยกช่องสัญญาณในการทำงานร่วมกัน โดยที่ช่องสัญญาณแต่ละช่องจะสามารถใช้งานร่วมกันได้โดยอาการกระบวนกรสลับช่องสัญญาณอย่างไรก็ตามถึงแม้มาตรฐานที่กำหนดให้อุปกรณ์รองรับการทำงานร่วมกันแบบหลายช่องสัญญาณได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่อง การบริหารจัดการสลับช่องสัญญาณของชุดอุปกรณ์อยู่ โดยที่หากสลับช่องสัญญาณไม่รวดเร็วพอ โอกาสในการขาดการติดต่อสื่อสารของยานพาหนะก็เพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งชุดอุปกรณ์แต่ละชุดจะต้องมีการเข้าจังหวะ (synchronize) ที่ตรงกัน โดยทั่วไปแล้วมักใช้สัญญาณเวลาของ GPS เป็นสัญญาณในการการปรับจังหวะให้เข้ากัน ฉะนั้น ในขณะที่ชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะกำลังติดต่อสื่อสารกันอยู่ โดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน ชุดอุปกรณ์อื่นจะไม่สามารถเข้ามาใช้งานร่วมกันได้ แต่จะใช้ช่องสัญญาณอื่นในการเชื่อมต่อกัน



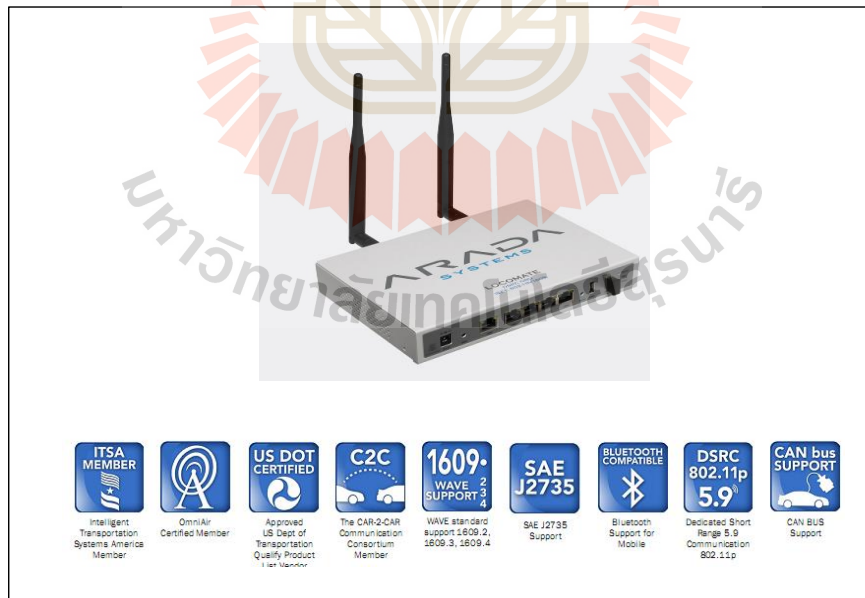
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ

### 3.3 ชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ

ชุดอุปกรณ์ของระบบขนส่งอัจฉริยะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ ชุดอุปกรณ์ข้างทาง (Road Side Unit: RSU) และ ชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ (On Board Unit: OBU) ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอุปกรณ์ติดยานพาหนะเพื่อใช้ในการศึกษาสมรรถนะของระบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะเมื่อสายอากาศที่ใช้งานมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังสอดคล้องกับการออกแบบ โดยชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะติดตั้งไว้ในตัวยานพาหนะ และเชื่อมต่อกับสายอากาศ ไม่ว่าจะเป็นที่ ตำแหน่งบนหลังคา กันชนหน้า กันชนหลัง หรือแผงควบคุมหน้ายานพาหนะ โดยทั่วไปนิยมจัดวางสายอากาศไว้ด้านหน้ายานพาหนะภายในยานพาหนะ

ชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ สามารถเชื่อมต่อกับสัญญาณจีพีเอส เพื่อบอกตำแหน่งที่อยู่ ความสูงจากพื้นโลก และทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะได้ รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของอุปกรณ์ติดยานพาหนะ

การปรับตั้งค่าต่าง ๆ ของชุดอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ผู้ใช้งานเลือกใช้ โดยสามารถกำหนดอัตราเร็วในการส่งข้อมูล รูปแบบการมอดูเลต สายอากาศที่ใช้ กำลังงานส่ง และพารามิเตอร์ต่าง ๆ เกี่ยวข้องซึ่งสามารถปรับตั้งค่าได้ตามมาตรฐาน IEEE802.11p สำหรับชั้นกายภาพชุดอุปกรณ์ที่เลือกใช้เป็นของบริษัท Arada Systems ที่สามารถให้บริการการสื่อสารระหว่างยานพาหนะตามมาตรฐาน IEEE802.11p ได้ รูปที่ 3.2 ได้แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งบนยานพาหนะ



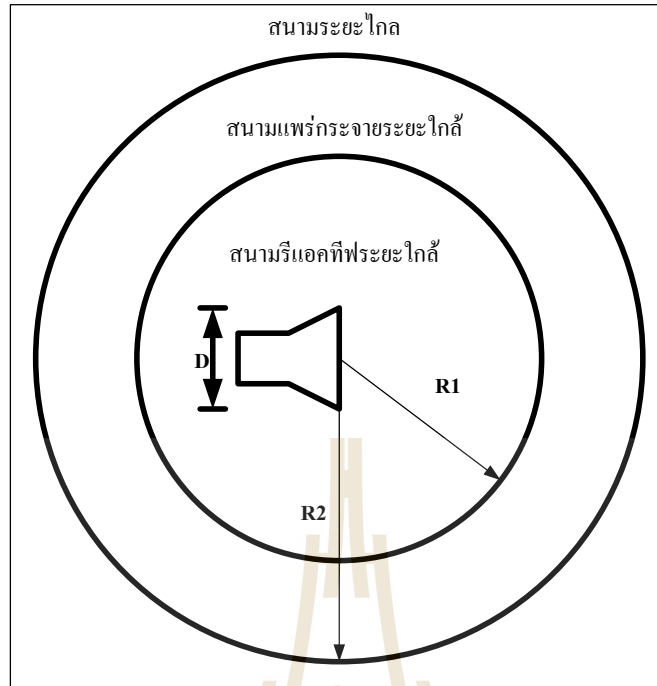
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ LocoMate™ OBU

ชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะสามารถติดตั้งได้ทั้งบริเวณหลังคา ภายในยานพาหนะ ฝากระโปรงหน้า และบริเวณฝากระโปรงท้ายของยานพาหนะ งานวิจัยที่นำเสนอติดตั้งภายในยานพาหนะ โดยสามารถรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE802.11p ที่ความถี่ 5.85-5.925 GHz ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อเพื่อรับสัญญาณจีพีเอส ระบุตำแหน่งและความสูง ณ บริเวณที่ทำการทดสอบได้ ชุดอุปกรณ์มาพร้อมกับชุดโปรแกรมที่ผู้ใช้งานสามารถพัฒนาให้เข้ากับแอปพลิเคชันที่ใช้งานได้บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ โดยผู้ใช้งานสามารถวัดสมรรถนะของระบบสื่อสารได้ อาทิเช่น ปริมาณงาน (throughput) อัตราความผิดพลาดของแพ็กเก็ตข้อมูล (PER) และค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI มีหน่วย dBm)

ชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะมาพร้อมกับสายอากาศแบบไดโพล สายอากาศที่มาพร้อมมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว มีการแผ่พลังงานออกไปทุกทิศทาง ซึ่งมีข้อเสียคือเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณแทรกสอด อีกทั้งยังเป็นการเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจากเนื้อหาในบทที่ผ่านมา จากการปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ใช้ร่วมกับระบบสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ควรจะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสม สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยคาดหวังว่าสมรรถนะของระบบจะดีขึ้นเมื่อมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสถานการณ์และสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นบนถนน

### 3.4 บริเวณการแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การจำแนกบริเวณการแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญต่อการการศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยที่แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยทั่วไปนิยมวัดสมรรถนะที่สนามระยะไกล รูปที่ 3.3 แสดงบริเวณการแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 บริเวณการแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

พื้นที่ว่างหรืออากาศอิสระที่อยู่ล้อมรอบสายอากาศขณะที่มีการแผ่กระจายกำลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณโดยพิจารณาจากระยะทางที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive Near-field Region)

บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้และอยู่รอบสายอากาศมากที่สุด โดยรัศมีของบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ จะกำหนดให้มีค่าประมาณ

$$R_1 \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (3.2)$$

โดยที่	$R_1$	คือ	ระยะจากสายอากาศถึงบริเวณสนามระยะใกล้
	$D$	คือ	ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น

### 3.4.2 บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้ (Radiating Near-field Region)

บริเวณนี้จะเป็นบริเวณตรงกลางระหว่างสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับสนามระยะไกล หรือเรียกว่า บริเวณเฟรสเนล (Fresnel region) โดยรัศมีของบริเวณสนามนี้จะกำหนดให้มีค่าประมาณ

$$0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.3)$$

โดยที่	$R$	คือ	ระยะจากสนามแพร่กระจายระยะใกล้
	$D$	คือ	ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น

### 3.4.3 บริเวณสนามระยะไกล (Far-field Region)

บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่พื้นที่วงกลมนอกสุดถัดออกไปจากบริเวณเฟรสเนล หรือบางครั้งจะถูกเรียกว่า บริเวณฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer region) องค์ประกอบของสนามที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัดขวางกับทิศทางการเดินทาง (Transverse Electromagnetic Wave: TEM Wave) ทำให้สามารถนำมาพล็อตเพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงานที่เกิดขึ้นจริงของสายอากาศใด ๆ ที่ต้องการได้ โดยสนามระยะไกลจะถูกกำหนดโดย

$$R_2 \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.4)$$

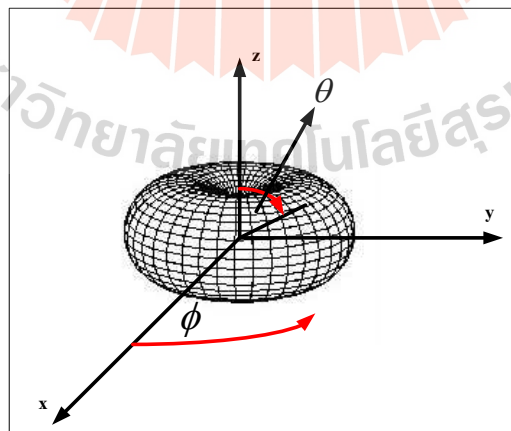
โดยที่	$R_2$	คือ	ระยะจากสนามแพร่กระจายระยะใกล้
	$D$	คือ	ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น

### 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) [22]

แบบรูปการแผ่พลังงาน หรือแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นการบอกคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปของกราฟิกหรือรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดตำแหน่ง (space coordinates) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานจะต้องกระทำในสนามระยะไกลและแสดงในรูปของฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (directional coordinate) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสามารถวัดและพล็อตได้จากความเข้มของสนาม (Field Intensity) ในรูปของ  $|\vec{E}(\theta, \phi)|$  หรือ  $|\vec{H}(\theta, \phi)|$  โดยกำหนดให้รัศมีของการวัดสนามคงที่ เรียกแบบรูปนี้ว่า แบบรูปแอมพลิจูดสนาม (Amplitude Field Pattern) หรือถ้าทำการวัดและพล็อตจากกำลังงานรูปของ  $|\vec{E}(\theta, \phi)|^2$  หรือ  $\eta|\vec{H}(\theta, \phi)|^2$  ที่รับเข้ามาหรือส่งออกไปโดยสายอากาศ ก็จะเรียกแบบรูปนี้ว่า แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Power Pattern) ในการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสามารถแสดงได้ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานในแบบ 2 มิติ คำศัพท์และความหมายที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ได้แก่

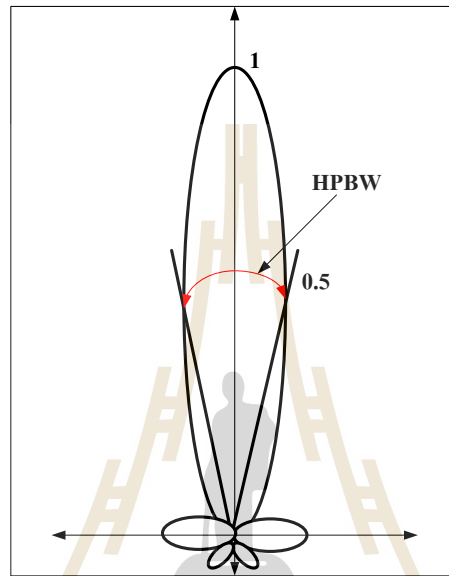
-**สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna)** คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับกำลังงานเข้ามาอย่างมีประสิทธิภาพในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ

-**สายอากาศแบบมีทิศทางรอบตัวในระนาบเดียว (Omnidirectional Antenna)** คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานแบบรอบตัวในระนาบใดระนาบหนึ่ง ส่วนระนาบอื่นที่ตั้งฉากกันจะมีการแผ่กระจายคลื่นในลักษณะแบบมีทิศทาง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทางรอบตัวในระนาบเดียว

-**ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power Beamwidth)** คือ ในระนาบหนึ่ง ๆ ของแบบรูปที่ประกอบไปด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและมีมุมที่อยู่ระหว่างสองทิศทางซึ่งความเข้มของการแผ่กำลังงานมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งจากจุดสูงสุด ซึ่งคำนี้มักใช้อธิบายถึงความกว้างของลำคลื่นที่มีค่าความเข้มลดลง 3 dB (3dB Beamwidth) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

### 3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้คือ อัตราส่วนความเข้มของการแผ่คลื่นในทิศทางนั้น เทียบกับค่าความเข้มของการแผ่คลื่นที่เฉลี่ยออกไปทุกทิศทาง โดยค่าความเข้มของการแผ่คลื่นเฉลี่ยดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับกำลังงานรวมที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศหารด้วย  $4\pi$  สำหรับกรณีที่ไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้ นั้น การกำหนดค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะพิจารณาในทิศทางที่มีการแผ่คลื่นสูงสุด ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่คลื่นแบบไอโซทรอปิกที่ถูกลบอินพุตด้วยกำลังงานที่เท่ากัน สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{av}} = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \quad (3.5)$$



เมื่อ	$D(\theta, \varphi)$	คือ	สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในทิศทางที่กำหนด
	$U(\theta, \varphi)$	คือ	ความเข้มของการแผ่คลื่นในทิศทางที่กำหนด
	$U_{av}$	คือ	ความเข้มของการแผ่คลื่นที่เฉลี่ยออกไปทุกทิศทาง
	$P_{rad}$	คือ	กำลังงานที่แผ่กระจาย

โดยที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางนั้นเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย ค่าสูงสุดจะมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเท่านั้น

### 3.7 อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain)

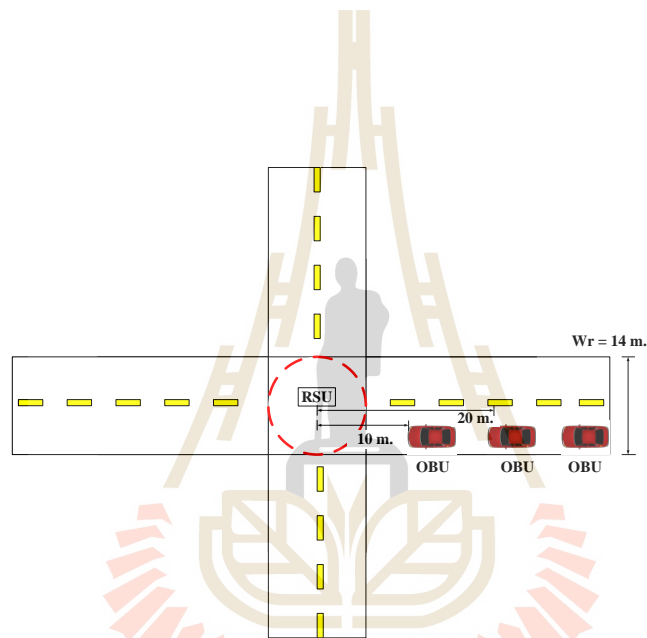
ค่าอัตราขยายของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่กระจายกำลังงาน  $U$  ในทิศทางที่กำหนด ให้อัตราส่วนค่าความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานที่สายอากาศได้รับ ถ้ากำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศถูกแผ่กระจายออกไปในลักษณะของไอโซทรอปิก สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (3.6)$$

อัตราขยายไม่มีหน่วย ในทางปฏิบัตินั้นการที่สายอากาศจะมีอัตราขยายมากเพียงพอตามที่ต้องการหรือไม่ มีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งการสูญเสียภายในตัวสายอากาศ การสูญเสียที่เกิดในสายนำสัญญาณ เป็นต้น

### 3.8 โครงสร้างของแบบจำลองที่นำเสนอ

จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรม สามารถนำมาสร้างเป็นโครงสร้างของระบบที่นำเสนอ ในการออกแบบความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับไฟจราจรเสมือนได้ดังรูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ ประกอบด้วย RSU: Road Side Unit ซึ่งระบบที่นำเสนอเป็นการจำลองแบบ โดยกำหนดให้ RSU ถูกติดตั้งบริเวณกลางถนน ระยะห่างระหว่าง RSU กับอุปกรณ์ติดรถยนต์ OBU: On Board Unit ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันทุก ๆ จุด ในการส่งข้อมูลมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.11p WAVE-DSRC มีค่าดังตารางที่ 3.5



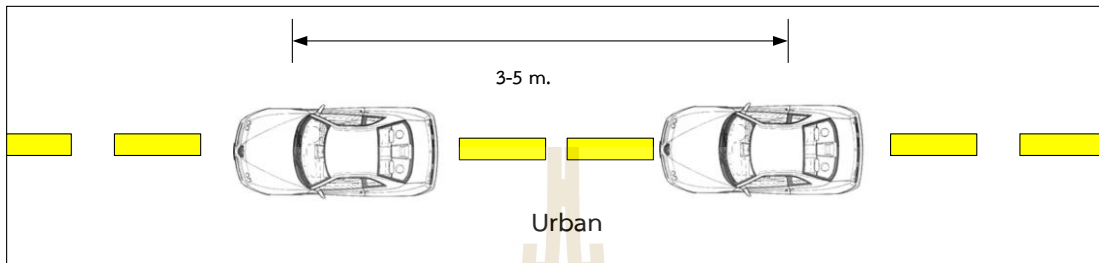
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

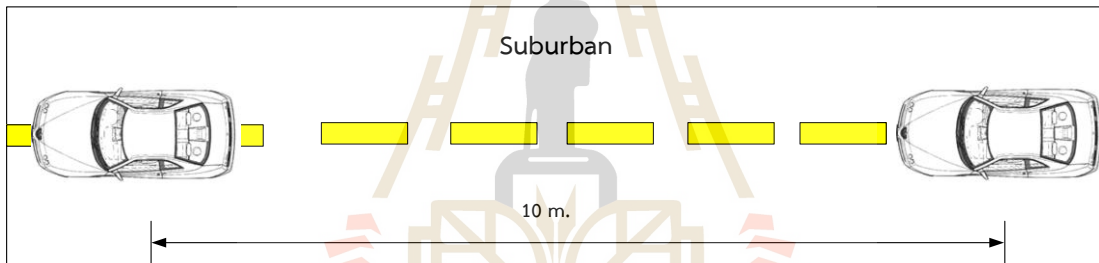
Service	Specification
Modulation type	BPSK
Data rate	27Mbps
Frequency band	5.85-5.925 GHz
Transmission power	23 dBm
RSU antenna radiation pattern	Omni-directional
OBU antenna radiation pattern	Omni-directional and the proposed system

### 3.8.1 การจำแนกสภาพแวดล้อมบนถนน

งานวิจัยที่ [17] ได้อธิบายถึงระยะระหว่างยานพาหนะที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบในเมืองดังรูปที่ 3.7 ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ 3-5 เมตร สภาพการจราจรติดขัดมาก และ แบบชานเมือง ดังรูปที่ 3.8 ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ 10 เมตร สภาพการจราจรคล่องตัว



รูปที่ 3.7 สภาพแวดล้อมและสถานการณ์ของยานพาหนะแบบในเมือง

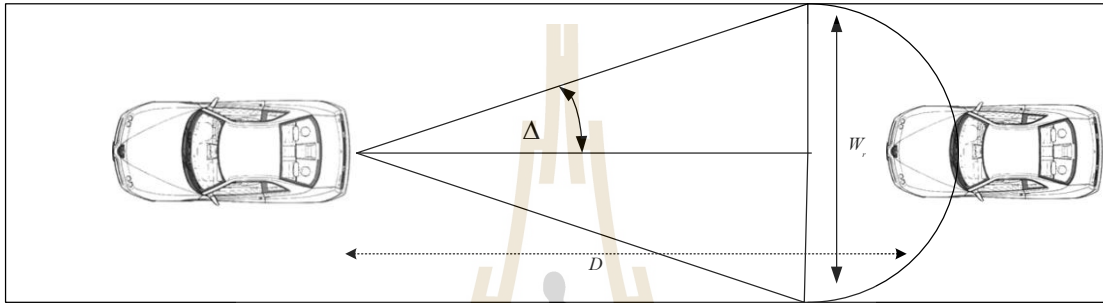


รูปที่ 3.8 สภาพแวดล้อมและสถานการณ์ของยานพาหนะแบบชานเมือง

ในงานวิจัยที่นำเสนอ แบบจำลองของระบบถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มสภาพแวดล้อมแบบในเมือง เนื่องจากในสถานการณ์จริงยานพาหนะเมื่อเข้าสู่การรอสัญญาณไฟจราจร จะมีระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่ใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างยานพาหนะดังรูปที่ 3.6 ความน่าจะเป็นของตำแหน่งยานพาหนะบนถนนจึงมีค่าเท่ากันๆ ในทุกๆ จุด

### 3.8.2 การหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่นำเสนอ

การออกแบบความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเพื่อรวบรวมพลังงานที่สูญเสียไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ จึงพิจารณาจากลำคลื่นที่หันไปทางด้านหน้าและหลัง โดยสอดคล้องกับโครงสร้างแบบจำลองของระบบที่นำเสนอได้ดังรูปที่ 3.9 โดยที่รถที่อยู่ใกล้ทางแยกมากที่สุดจะรับข้อมูล และส่งต่อไปยังรถที่อยู่ในลำดับถัดไปในการรอคิวเพื่อผ่านทางแยก



รูปที่ 3.9 การหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังสำหรับลำคลื่นหลักที่มีทิศทางด้านหน้าและด้านหลัง

จากการทำปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ  $D$  มีค่าเฉลี่ย 5 เมตรเป็นระยะปลอดภัย และความกว้างของถนน 7 เมตร เมื่อพิจารณาเฉพาะช่องจราจรเดียวกัน จากการพิจารณาค่าดังกล่าวสามารถหาค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมได้ดัง (3.7) ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

$$\Delta = \tan^{-1} \left( \frac{0.5W_r}{D} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่

- $\Delta$  คือ ครึ่งหนึ่งของค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง
- $W_r$  คือ ความกว้างของถนน
- $D$  คือ ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ

### 3.8.2.1 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและพารามิเตอร์ด้านสมรรถนะที่เกี่ยวข้อง

สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว (Omni-directional antenna) มีการสูญเสียพลังงานในทิศทางที่ไม่ต้องการ การใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางที่ต้องการ โดยที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งาน จึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการค้นหาเพื่อให้ได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาถึงระบบไฟจราจรเสมือน ยานพาหนะที่อยู่ใกล้ชิดกัน ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ ตำแหน่งของยานพาหนะ ความกว้างของถนน ส่งผลต่อการหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมและถูกนำไปใช้ในการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสม *Z. Zhang (2008)* และ *F. Liu (2010)* ได้กล่าวถึงการหาค่าความกว้างลำคลื่นที่สอดคล้องกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบ จะทำให้ได้ระยะการสื่อสารที่ยาวขึ้น แต่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสาร นอกจากระยะห่างระหว่างยานพาหนะและความกว้างของถนน ที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพิจารณาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแล้ว *O. Klemp (2010)* และ *K. Xu (2010)* ยังได้กล่าวถึง อัตราขยายของสายอากาศมีความเกี่ยวข้องกับความเป็นอิสระของตำแหน่งยานพาหนะบนถนน *V.L. Knoop (2012)* กล่าวถึงหากมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมจะส่งผลให้คุณภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณดีขึ้น *K. Mase (2008)* แสดงถึงฟังก์ชันของอัตราขยายของสายอากาศขึ้นอยู่กับทิศทางหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไปยังทิศทางที่ต้องการ *J. Harri (2013)* แสดงถึงระยะห่างที่มีประสิทธิภาพสูงสุด Effective Communication Range (ECR) หรือ  $R_{safe}$  ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEEE802.11p นอกจากนั้นแล้ว  $R_{safe}$  ยังสามารถเชื่อมโยงกับระยะเวลาก่อนการชน  $T_{safe}$  ซึ่งแสดงได้ดัง (3.8) และ (3.9) ระยะปลอดภัย  $R_{safe}$  เกี่ยวเนื่องกับความเร็วของยานพาหนะ ( $\delta$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับถนนชนิดแอสฟัลต์.

$$R_{safe} = \frac{(\delta \cdot 3.6)^2}{100} \quad (3.8)$$

$$T_{safe} = \frac{R_{safe} - R}{\delta} \quad (3.9)$$

ความสัมพันธ์ของการรับส่งข้อมูลสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ด้วย (3.10)

$$y = hx + n \quad (3.10)$$

โดยที่  $y$  คือ สัญญาณที่ภาครับ

$h$  คือ ช่องสัญญาณไร้สาย

$x$  คือ สัญญาณที่ภาคส่ง

ระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สามารถแสดงได้ดัง (3.11)

$$P_r = |x|^2 \overline{|h|^2} + \overline{|n|^2} \quad (3.11)$$

$$P_r(\phi_r, \phi_t) = P_t(\phi_r, \phi_t) G_t(\phi_r, \phi_t) G_r(\phi_r, \phi_t) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \overline{|h|^2} \quad (3.12)$$

$$\gamma(\phi_r, \phi_t) = \frac{P_r(\phi_r, \phi_t)}{N(\phi_r, \phi_t)} \quad (3.13)$$

$$\gamma(\phi_r, \phi_t) = \frac{P_t(\phi_r, \phi_t) G_t(\phi_r, \phi_t) G_r(\phi_r, \phi_t) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \overline{|h|^2}}{N} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $P_r$  คือ ระดับพลังงานเฉลี่ยของสัญญาณที่รับ

$N$  คือ ระดับสัญญาณรบกวนเฉลี่ย  $\overline{|n|^2}$ . และระดับพลังงานของสัญญาณที่ต้องการต่อ

สัญญาณรบกวนสามารถคำนวณได้จาก (3.13) และ (3.14)

$$\bar{\gamma} = E \left\{ \frac{P_r(\phi_r, \phi_t)}{N} \right\} \quad (3.15)$$

$$G(\phi) = g \times 10 \left( G_{\max} - 12 \left[ \frac{\phi - \phi_{MB}}{BW} \right]^2 \right) \quad (3.16)$$

$$ps = \frac{P_v}{\Delta\phi} \quad (3.17)$$

$$\Delta\phi = 2 \cdot \arctan \left( \frac{W_r}{D_v} \right) \quad (3.18)$$

โดยที่

$W_r$  คือ ความกว้างของถนน

$D_v$  คือ ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ

$g$  คือ ตัวปรับเทียบอัตราขยายสายอากาศ

$\phi$  คือ ทิศทางของสัญญาณขาเข้า

$BW$  คือ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

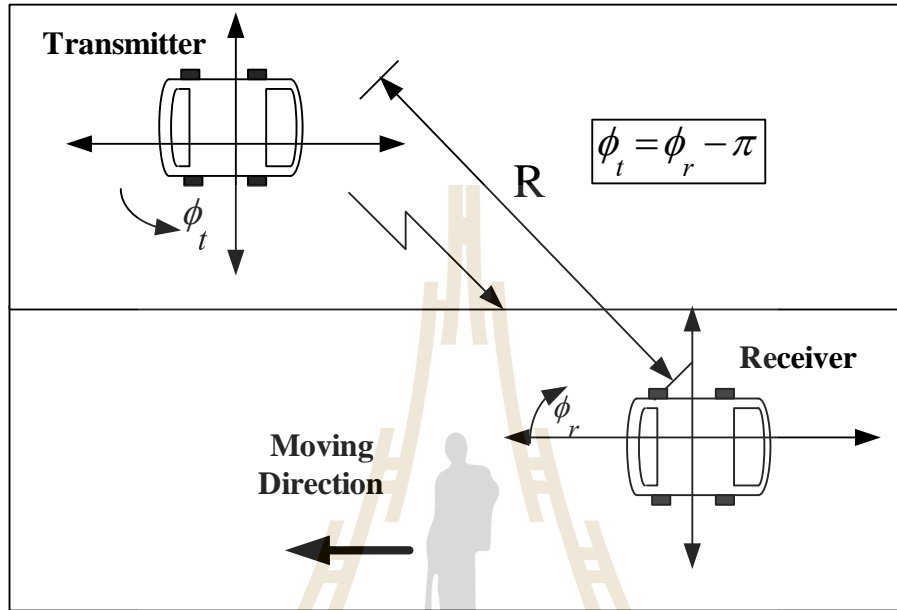
$G(\phi)$  คือ ฟังก์ชันของอัตราขยายของสายอากาศ

$G_t(\phi_r, \phi_t)$  คือ ฟังก์ชันของอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง

$G_r(\phi_r, \phi_t)$  คือ ฟังก์ชันของอัตราขยายของสายอากาศภาครับ

ดังนั้น อัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศสามารถหาได้จาก (3.19)

$$\overline{G_r} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} G_i(\phi) p_i(\phi) d\phi \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi_r$  และ  $\phi_t$

กำหนดให้  $P_t(\phi_r, \phi_t) = P_t$ ,  $G_t(\phi_r, \phi_t) = G_t(\phi_t)$  และ  $G_r(\phi_r, \phi_t) = G_r(\phi_r)$ . ความสัมพันธ์ของ  $\phi_r$  และ  $\phi_t$

สามารถแสดงได้ด้วย  $\phi_t = \phi_r - \pi$ . ดังนั้นระดับพลังงานที่รับได้สามารถหาได้จาก (3.20) และ (3.21)

$$P_r(\phi_r, \phi_t) = P_r(\phi_r) = P_t G_t(\phi_t) \overline{G_r(\phi_r)} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \overline{|h|^2} \quad (3.20)$$

$$P_r(\phi_r) = P_t G_t(\phi_r - \pi) \overline{G_r(\phi_r)} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \overline{|h|^2} \quad (3.21)$$



$$\bar{\gamma} = E \left\{ \frac{P_t G_t(\phi_r - \pi) \overline{G_r(\phi_r)} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2}{N} \right\} \overline{|h|^2} \quad (3.22)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{P_t}{N} \overline{|h|^2} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \int_0^{2\pi} G_t(\phi_r - \pi) \overline{G_r(\phi_r)} p(\phi_r) d\phi_r \quad (3.23)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{P_t}{N} \overline{|h|^2} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \int_0^{2\pi} G_r(\phi_r) p(\phi_r) d\phi_r \quad (3.24)$$

พิจารณาระดับพลังงานของสัญญาณรบกวนซึ่งแทนด้วย  $N$  นอกจากนั้นแล้วอัตราค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลและอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลจะถูกนำมาพิจารณา มาตรฐาน IEEE802.11p กำหนดอัตราการส่งข้อมูลมาตรฐานไว้ที่ 90% ซึ่งเป็นอัตราการส่งข้อมูลที่เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการรับส่งข้อมูล *H. Alturkostani (2015)* กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลกับอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของแพ็กเกจข้อมูลที่ใช้ในระบบขนส่ง ซึ่งแสดงได้ด้วย (3.25) และ (3.26)

$$BER_{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \right) \quad (3.25)$$

$$PER = 1 - (1 - BER)^{8L} \quad (3.26)$$

### 3.8.2.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ปัญหาทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่มีลักษณะเป็น non-linear optimization problem โดยในแต่ละปัญหา จะประกอบไปด้วยตัวแปรหลายตัวแปร เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เชิงวิศวกรรมที่สอดคล้องกับสถานการณ์จริงที่สนใจในการหาคำตอบของปัญหา ปัญหาเชิงวิศวกรรมแบบหลายตัวแปรที่เป็น non-linear optimization problem ถูกบังคับด้วยเงื่อนไข (constraint) โดยที่ constraint ดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ equality constraint และ inequality constraint เมื่อพิจารณาความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ และพิจารณาความเป็น equality และ inequality สามารถกำหนดระเบียบวิธีในการหาคำตอบของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังได้ซึ่งสอดคล้องกับปัญหาแบบ multivariable optimization problem and linear equality constraint ในทางตรงกันข้าม เมื่อฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับมีลักษณะเป็น inequality constraints วิธีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาได้แก่ Karush Kuhn Tucker ในการแก้ไขปัญหา อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงปัญหาที่นำเสนอ พบว่า ปัญหาที่นำเสนอมีลักษณะเป็น Multi-variable and Non-linear optimization problem with linear equality constraints ซึ่งระเบียบวิธีที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาคือ การใช้ fmincon

เมื่อพิจารณาถึงปัญหาที่สนใจพบว่าฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับเป็นฟังก์ชันที่เป็นผลรวมของค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังซึ่งเมื่อรวมกันแล้วจะต้องไม่เกิน 360 องศา จากนั้นเมื่อนำค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังขาเข้าป้อนเข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในที่นี้ได้กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ อัตราเฉลี่ยของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีความเกี่ยวเนื่องกับอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศ ดังนั้นวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าหมายไว้ ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดจะส่งผลให้ได้อัตราเฉลี่ยของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุด (3.21) แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งถูกจัดกลุ่มให้อยู่ใน multivariable optimization and linear equality constrained *D. E. Kirk (2012)* and *H. P. Geering (2007)* กล่าวถึงระเบียบวิธีจาโคเบียนและระเบียบวิธีลากรองจ์ ทั้งนี้ระเบียบวิธีทั้งสองนั้นเหมาะสมกับปัญหาแบบที่มี single equality constraint ทั้งนี้เงื่อนไขในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยฟังก์ชันอัตราขยายของสายอากาศ ตำแหน่งของยานพาหนะ ความน่าจะเป็นของตำแหน่งของยานพาหนะจึงทำให้ระเบียบวิธีจาโคเบียนและระเบียบวิธีลากรองจ์ จึงยังไม่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา

*P. Venkatarama (2009)* ได้กล่าวถึงระเบียบวิธี Sequential Quadratic Programming (SQP) ซึ่งเป็นกระบวนการในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาที่พิจารณา วิธีการ SQP เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขที่ก่อกำหนด SQP เป็นวิธีการที่ใช้ระยะเวลาในการประมวลผลต่ำด้วยเหตุผลดังข้างต้น วิธี SQP จึงได้รับการเลือกให้เป็นระเบียบวิธีในการใช้หาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุด โดยที่ (3.27)-(3.29) แสดงถึงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งต้องค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ให้ค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

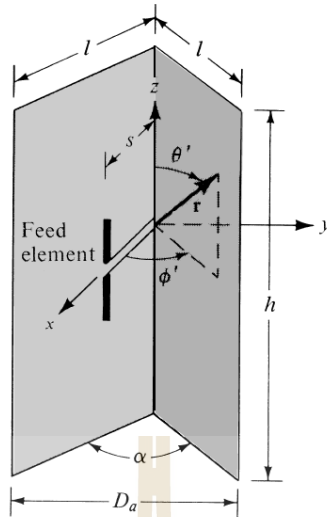
$$f(\Delta_1, \dots, \Delta_M) = \frac{P_t}{N} |h|^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \int_0^{2\pi} G_r(\phi_r) p(\phi_r) d\phi_r \quad (3.27)$$

$$\text{Maximize: } f(\Delta_1, \dots, 2\pi) \quad (3.28)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{i=1}^M \Delta_i = 2\pi \quad (3.29)$$

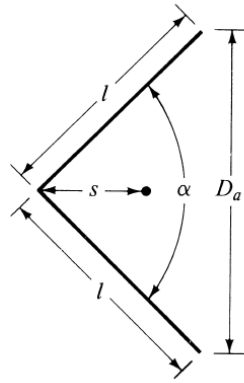
### 3.9 เทคนิคการรวบรวมพลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศไปยังทิศทางที่ต้องการโดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม

สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว (Omni-directional antenna) มีการสูญเสียพลังงานในทิศทางที่ไม่ต้องการ เมื่อพิจารณาถึงระบบไฟจราจรเสมือน มีการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทาง (RSU) พบว่า การรับ-ส่งข้อมูลเน้นที่ด้านหน้าและด้านหลังของยานพาหนะ เพื่อให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลจากระบบไฟจราจรเสมือนได้ ดังนั้นการใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบเจาะจงทิศทางจึงเป็นส่วนสำคัญที่จะมีการรวมพลังงานจากทิศทางที่ไม่ต้องการไปยังทิศทางที่ต้องการ ทั้งนี้จากการทำปรีทศน์วรรณกรรมการใช้ Corner Reflector เป็นตัวสะท้อน ดังรูปที่ 3.11 เป็นการทำให้พลังงานที่ต้องการบังคับให้ไปในทิศทางที่ต้องการคือด้านหน้าและด้านหลังของยานพาหนะ โดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม (reflectors) 2 ชุด ที่ให้ระนาบแต่ละชุดทำมุมซึ่งกันและกันเนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่าย และมีคุณสมบัติการใช้งาน ที่เป็นลักษณะเฉพาะอีกมากมาย ตัวอย่างเช่น Radar ที่ใช้งานตัวสะท้อน เพื่อหาวัตถุเป้าหมาย หรือการใช้งานทางด้านสื่อสารโทรคมนาคม เป็นต้น ผลจากการใช้ตัวสะท้อนแบบมุม ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีคุณภาพดีขึ้น



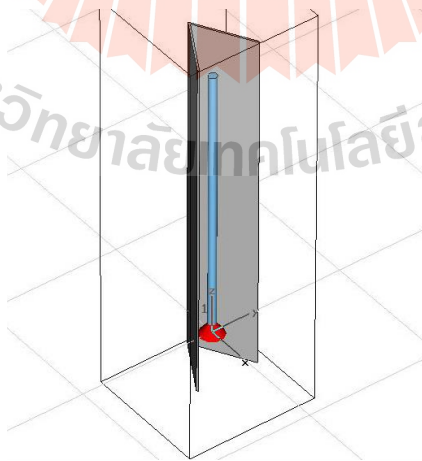
รูปที่ 3.11 สายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง โดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม

การใช้งานในทางปฏิบัติ โดยส่วนมากจะตัดตัวสะท้อนเป็นมุม  $90^\circ$  อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งมีการใช้งานที่มุมอื่น ๆ เพื่อรักษาประสิทธิภาพให้กับระบบ ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างจุดยอดของมุมกับจุดป้อนสัญญาณของตัวสะท้อนเพิ่มขึ้น ทำให้มุมสำหรับตัวสะท้อนลดลง และในทางกลับกัน สำหรับตัวสะท้อนที่มีความยาวด้านข้างมาก ๆ จะทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น ขณะที่มุมระหว่างระนาบลดลง ถึงจะอย่างไร สำหรับจาน (Plate) ที่มีขนาดจำกัดขอบเขต อาจจะไม่เป็นเช่นนั้น ในโครงการนี้จะสันนิษฐานว่าจานเหล่านี้ ไม่มีขอบเขต ( $l = \infty$ ) อย่างไรก็ตาม ส่วนมากในวิธีปฏิบัติ ความกว้าง ยาวและหนาจะต้องจำกัดขอบเขต โดยจะมีขนาดของช่องรับส่งสัญญาณ ( $D_a$ ) ความกว้าง ( $l$ ) และความสูง ( $h$ ) ที่จะต้องแสดง ด้านหน้าของตัวสะท้อน มักจะนิยมทำ ช่องตาข่ายมากกว่าทำแบบแผ่นโลหะ โดยจะทำช่องเล็กๆ ( $g$ ) น้อยกว่าความยาวคลื่น (ปกติใช้  $g \leq \lambda/10$ ) ความกว้างของเส้นขนานสำหรับไดโพล งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวสะท้อนแบบมุมที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม ในทางปฏิบัติขนาดของช่องรับส่งสัญญาณ ( $D_a$ ) จะใช้ระหว่าง 1 ความยาวคลื่นถึง 2 ความยาวคลื่น ( $\lambda < D_a < 2\lambda$ ) ความยาวของตัวสะท้อนที่ทำมุม  $90^\circ$  จะประมาณ 2 เท่าของระยะห่างระหว่าง จุดป้อนสัญญาณกับจุดยอดของมุม ( $l \approx 2s$ ) สำหรับมุมของตัวสะท้อนที่น้อยลง ( $\alpha < 90^\circ$ ) จะใช้ขนาดจานที่ยาวขึ้น ระยะห่างระหว่างจุดป้อนกับจุดยอดของมุม ( $s$ ) จะอยู่ในช่วงระหว่าง  $\lambda/3$  กับ  $2\lambda/3$  ( $\lambda/3 < s < 2\lambda/3$ ) เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 3.12 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวสะท้อนแบบมุม



รูปที่ 3.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบของตัวสะท้อนแบบมุม

สำหรับตัวสะท้อนแต่ละตัว หากมีระยะห่างที่เล็กมากเกินไป จะทำให้ค่าความต้านทานการแผ่พลังงาน ( $R_r$ ) น้อยลง กลายเป็นความต้านทานการสูญเสีย ( $R_l$ ) ของระบบไป และส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง สำหรับระยะห่างที่ยาวมาก ๆ จะทำให้ระบบเกิด Lobe ที่ไม่ต้องการเพิ่มขึ้นอีกมากมาย และจะสูญเสียคุณลักษณะในการเจาะจงทิศทาง มีการสังเกตการทดลองโดยการเพิ่มขนาดด้านข้างของจาน พบว่ามีผลกระทบต่อความกว้างลำคลื่น และสภาพเจาะจงทิศทางไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มค่าแบนวิดและความต้านทานการแผ่พลังงาน ( $R_r$ ) พูหลักของสะท้อนที่มีขนาดมีขอบเขตจะกว้างกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดไม่มีขอบเขต ความสูง ( $h$ ) สำหรับแผ่นตัวสะท้อน โดยปกติแล้วจะสูงประมาณ 1.2 ถึง 1.5 เท่าของความยาวของสายอากาศ บางทีก็ใหญ่กว่าผลรวมของความกว้าง ( $l$ ) กับจุดบ่อนสัญญาณ ( $s$ ) ในการแผ่พลังงาน ลำดับพลังงานจะลดลงจากปลายสุดไปยังบริเวณด้านหลังแบบจำลองของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางโดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุมสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบจำลองสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางโดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม

## บทที่ 4

### ผลการจำลองแบบของระบบที่นำเสนอและการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง

ความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลของระบบไฟจราจรเสมือนบริเวณแยกต่างๆ เป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการส่งข้อมูลให้อยู่ภายในช่องจราจรที่ต้องการ จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรม สามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องนำมาใช้ในการจำลองแบบระบบ ซึ่งแบบจำลองของระบบแบ่งเป็น แบบจำลองของระบบเมื่อใช้สายอากาศที่ให้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังซึ่งส่งผลให้มีการรับสัญญาณที่รถยนต์ภาครับได้ดีขึ้น และการแสดงความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน

#### 4.1 แบบจำลองของระบบเมื่อใช้สายอากาศที่ให้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังซึ่งส่งผลให้มีการรับสัญญาณที่รถยนต์ภาครับได้ดีขึ้น

$$G_r(\phi) = g \times 10^{0.1 \left( G_{\max} - 12 \left[ \frac{\phi}{\Delta} \right]^2 \right)} \quad (4.1)$$

$$\Delta = \tan^{-1} \left( \frac{0.5W_r}{D} \right) \quad (4.2)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองแบบดัง (4.1) และ (4.2) เป็นการหาอัตราขยายของสายอากาศที่รถยนต์ภาครับ เมื่อ  $G_r(\phi)$  แสดงอัตราขยายของสายอากาศภาครับหรือเรียกฟังก์ชันอัตราขยายของสายอากาศภาครับ นอกจากนี้ยังมีความน่าจะเป็นของตำแหน่งรถยนต์ที่อยู่บนถนน ( $P_r$ ) และมีความกว้างช่วงของลำคลื่นซึ่งถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลบริเวณสี่แยก ความกว้างของถนนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการพิจารณาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ระยะจากจุดกึ่งกลางสี่แยกจนถึงรถยนต์คันแรกที่จอดอยู่บริเวณสี่แยก ( $D$ )

$$y = hx + n \quad (4.3)$$

$$P_r = |x|^2 |h|^2 + |n|^2 \quad (4.4)$$

$$f(\Delta_1, \dots, \Delta_M) = \frac{P_t}{N} \overline{|h|^2} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \int_0^{2\pi} G_r(\phi_r) p(\phi_r) d\phi_r \quad (4.5)$$

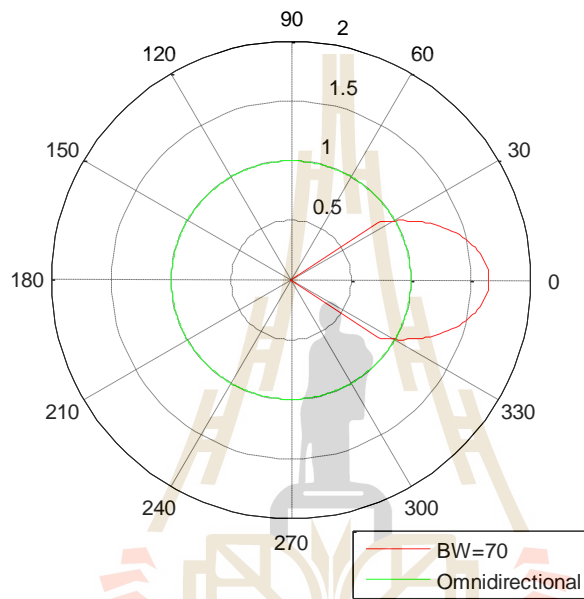
$$\text{Maximize: } f(\Delta_1, \dots, 2\pi) \quad (4.6)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{i=1}^M \Delta_i = 2\pi$$

ตารางที่ 4.1 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

Parameter	Value
Carrier	5.9 GHz
Symbol duration	8 $\mu$ s
Cyclic prefix	1.6 $\mu$ s
Ptx	23 dBm
Grx	3 dB
Gtx	3 dB
Payload size	200 bytes
Modulation	QPSK

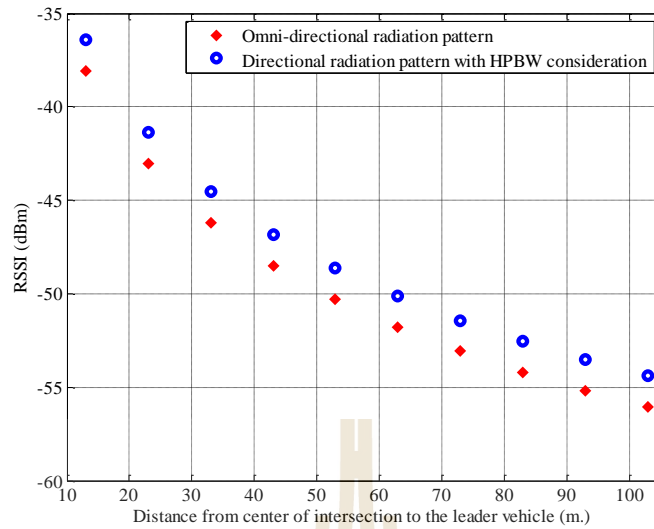
การจำลองระบบโดยใช้ SQP ในการหาค่าความกว้างลำคลื่นที่เหมาะสมอาศัยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEEE802.11p เพื่อให้ใกล้เคียงกับการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง การป้อนค่าความกว้างลำคลื่นครั้งกำลังเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดใช้โปรแกรม MATLAB 2018a ในการจำลองแบบ ผลการจำลองแบบพบว่า ความกว้างลำคลื่นครั้งกำลังมีค่า 70 องศาทำให้เกิดอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงสุด มีค่า 58.95 dB ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขตั้ง (4.5) และ (4.6)



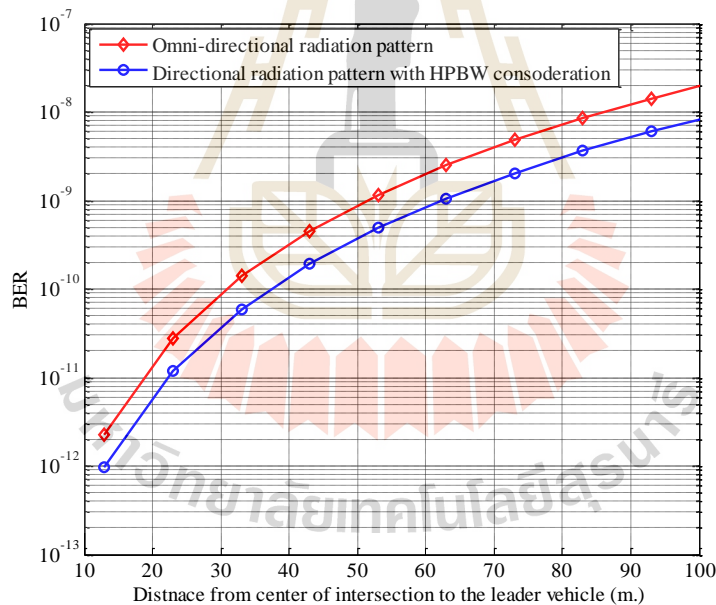
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองแบบ

เมื่อทำการพล็อตแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปรียบเทียบกันเป็นไปดัง 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการรวมพลังงานที่สูญเสียไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ และรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายสายอากาศส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดีขึ้น ดังรูปที่ 4.2 เมื่อระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับจุดกึ่งกลางแยกมีค่ามากขึ้น ค่าความแรงของสัญญาณจะมีค่าลดลง





รูปที่ 4.2 ผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ยานพาหนะภาครับ



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่รับได้ที่รถยนต์ภาครับ

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองแบบซึ่งจากการใช้ SQP อัตราเฉลี่ยสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุดเมื่อความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมีค่า 70 องศาและเมื่อนำค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ได้ไปใช้เพื่อการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่น ๆ พบว่า RSSI , BER และ PER มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดตามมาตรฐาน ผลการจำลองแบบสามารถ

ยืนยันได้ถึงการรวมพลังงานในทิศทางที่ไม่ต้องการ ไปยังทิศทางที่ต้องการสามารถเพิ่มคุณภาพของสัญญาณที่ ยานพาหนะภาครับได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวไปใช้เพื่อออกแบบ ตัวสะท้อนแบบมุม เพื่อให้สามารถรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการและมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังใกล้เคียง กับผลที่ได้จากการจำลองแบบ

## 4.2 การทดสอบวัดผลด้วยอุปกรณ์ Arada Locomate

### เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ

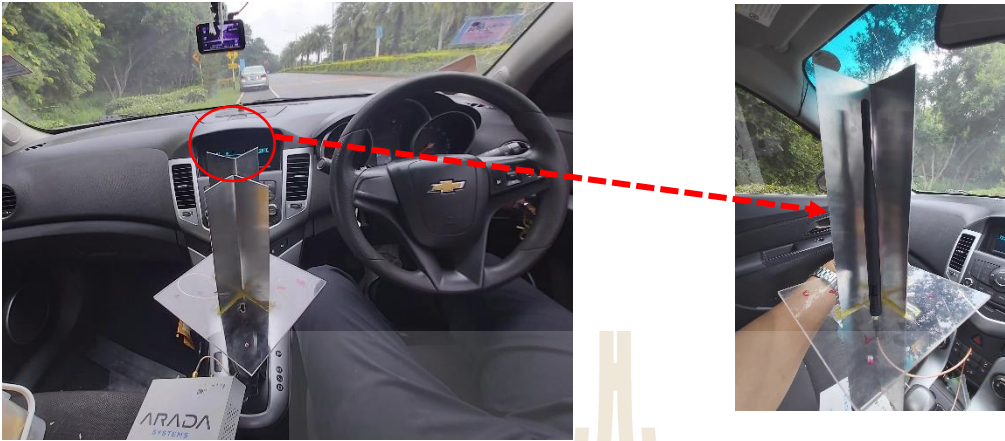
ในการทดสอบมีการเพิ่มระยะสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางเพิ่มขึ้นทีละ 10 เมตร และใช้ ถนนที่มีระนาบเดียวกันในการทดสอบ ในการทดสอบจะมีการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ข้างทาง และทำการเคลื่อน ยานพาหนะเข้าไปใกล้ ๆ อุปกรณ์ข้างทางครั้งละ 10 เมตร ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เส้นทางและแผนที่ในการทดสอบ Arada Locomate



รูปที่ 4.5 การจัดวางอุปกรณ์ OBU ที่ใช้ในการทดสอบ ภาครับ (สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว)

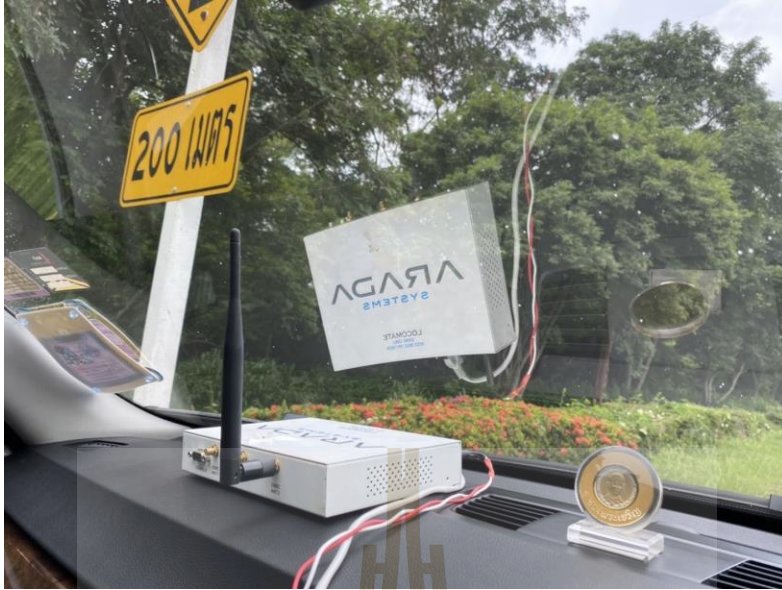


รูปที่ 4.6 การจัดวางอุปกรณ์ OBU ที่ใช้ในการทดสอบ ภาครับ

(สายอากาศที่มีการใช้ตัวสะท้อนแบบมุม)

การติดตั้งอุปกรณ์ที่ยานพาหนะภาครับ เป็นไปดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งมีการใช้พลังงานจากตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 12V เป็น 220V AC. และนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปใช้เชื่อมต่อกับ Arada Locomate และทำการปรับค่าการรับ-ส่งข้อมูล แพ็กเกจ ระดับพลังงานส่ง ตลอดจนการวัดสมรรถนะ การวัดคุณภาพของสัญญาณตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ในการทดสอบบนถนนจริง เนื่องจากมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ผู้วิจัยจึงมีการเลือกระยะเวลาที่มียานพาหนะไม่พลุกพล่าน ไม่ทำการทดลองในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน เพื่อหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุ ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ดังรูปที่ 4.5 เป็นการทดสอบเมื่อใช้สายอากาศแบบเดิมที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว และ ในส่วนที่ 2 ดังรูปที่ 4.6 จะมีการทดสอบเมื่อมีการใช้ตัวสะท้อนแบบมุมเพื่อรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 4.7 การจัดวางอุปกรณ์ RSU ภาคส่ง

(สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว)

การติดตั้งอุปกรณ์ข้างทางที่ถูกกำหนดให้เป็นภาคส่ง หรือ RSU ติดตั้งกับยานพาหนะด้านหน้า โดยในการทดสอบจะมีการเคลื่อนตัวของยานพาหนะที่ติดตั้ง OBU ให้เคลื่อนตัวเข้าหา RSU ดังรูปที่ 4.7 ครั้งละ 10 เมตร และทำการวัดค่าคุณภาพของสัญญาณ ได้แก่ ความแรงของสัญญาณ เปรียบเทียบกัน เพื่อพิสูจน์และยืนยันสมมติฐานและผลการจำลองแบบ ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุดจะให้คุณภาพของสัญญาณระหว่าง OBU และ RSU ที่ดีขึ้นกว่าระบบเดิมที่ใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว

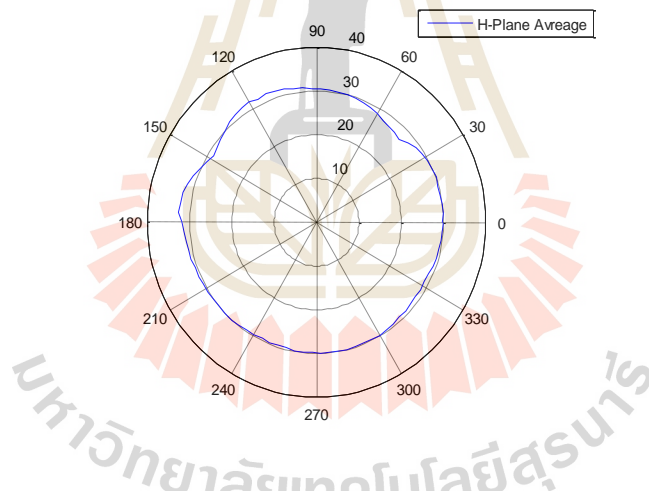


(ก) สายอากาศแบบเดิม



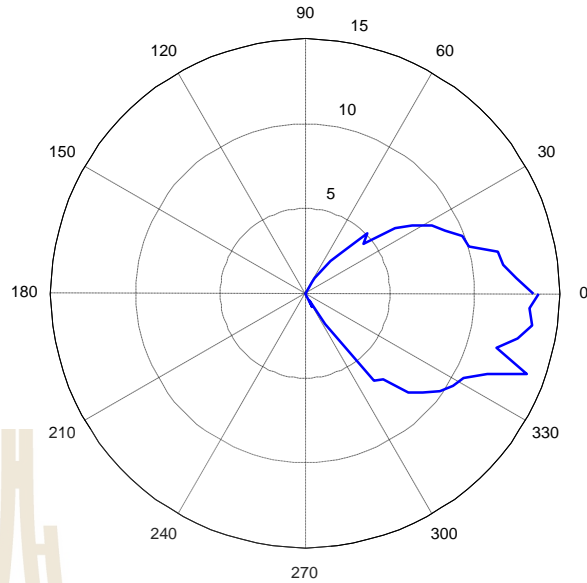
(ข) สายอากาศที่มีการติดตั้งตัวสะท้อนแบบมุม

รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ



รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศของสายอากาศแบบเดิม

สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบถูกนำไปทดสอบการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในห้อง Anechoic Chamber Room เพื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผลที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 4.9



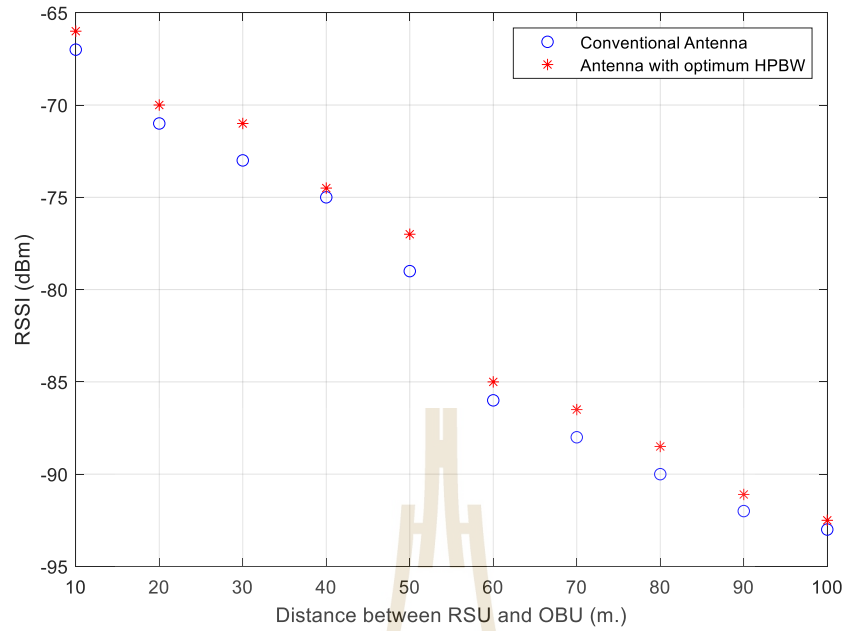
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนแบบมุมเพื่อรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ (Optimum HPBW=70 องศา)

รูปที่ 4.10 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่มีการติดตั้งตัวสะท้อน ให้แบบรูปการแผ่พลังงานมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 70 องศาตามผลการจำลองแบบ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแล้ว และเป็นไปตามสมมติฐานของงานวิจัย การทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงสามารถแสดงผลได้ด้วยตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง จะเห็นได้ว่า ผลการทดสอบของระบบที่มีการใช้ตัวสะท้อนแบบมุมรวมพลังงานในทิศทางที่ไม่ต้องการไปยังทิศทางที่ต้องการ ส่งผลให้มีคุณภาพของการรับ ส่งข้อมูลที่ดีขึ้น

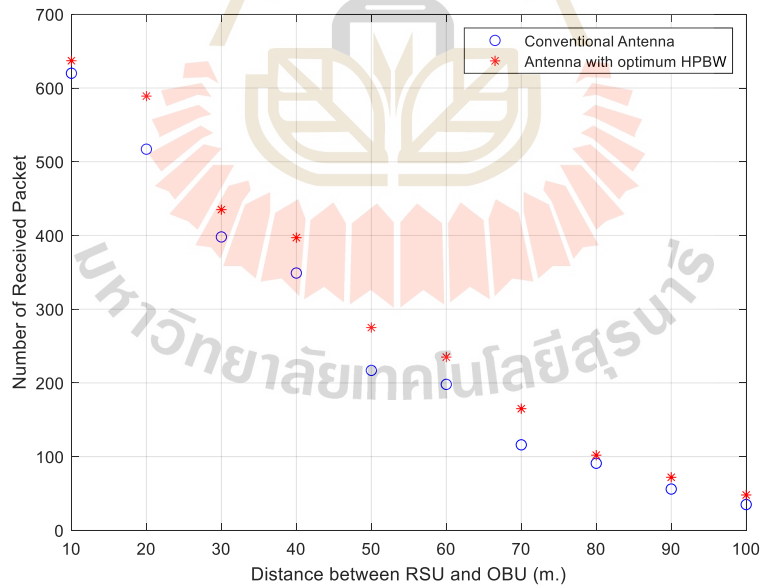
ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่พิจารณา

ระยะทาง	RSSI (Conventional)	RSSI (Proposed System)	Ntx	Nrx (Conventional)	Nrx (Proposed System)	PER (Conventional)	PER (Proposed System)
10	-67 dBm	-66 dBm	638	620	637	0.028213	0.001567
20	-71 dBm	-70 dBm	594	517	589	0.12963	0.008418
30	-73 dBm	-71 dBm	570	398	435	0.301754	0.236842
40	-75 dBm	-74 dBm	580	349	397	0.398276	0.315517
50	-79 dBm	-77 dBm	611	217	275	0.644845	0.549918
60	-86 dBm	-85 dBm	628	198	235	0.684713	0.625796
70	-88 dBm	-86 dBm	627	116	165	0.814992	0.736842
80	-90 dBm	-88 dBm	615	91	102	0.852033	0.834146
90	-92 dBm	-91 dBm	622	56	72	0.909968	0.884244
100	-93 dBm	-92 dBm	631	35	48	0.944532	0.92393

ที่ระยะ 100 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างสูงสุดที่กำหนดไว้ใน การทดสอบพบว่า ค่าความแรงของ สัญญาณของระบบที่นำเสนอมีค่าดีกว่าระบบเดิม 1 dB เมื่อพิจารณาจำนวนแพ็กเกจข้อมูลที่ได้รับพบว่า ระบบที่ นำเสนอสามารถรับแพ็กเกจข้อมูลได้มากกว่าระบบเดิม 13 แพ็กเกจ หรือ คิดเป็น 37.14% หมายถึงหากมีการรับ- ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทาง กับ อุปกรณ์ติดรถ ในระบบไฟจราจรเสมือนด้วยการรวมพลังงานจากทิศทางที่ไม่ ต้องการไปในทิศทางที่ต้องการโดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุมกับสายอากาศแบบเดิม ส่งผลให้คุณภาพการสื่อสารดีขึ้น และ ส่งผลให้เกิดความน่าเชื่อถือของการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับ



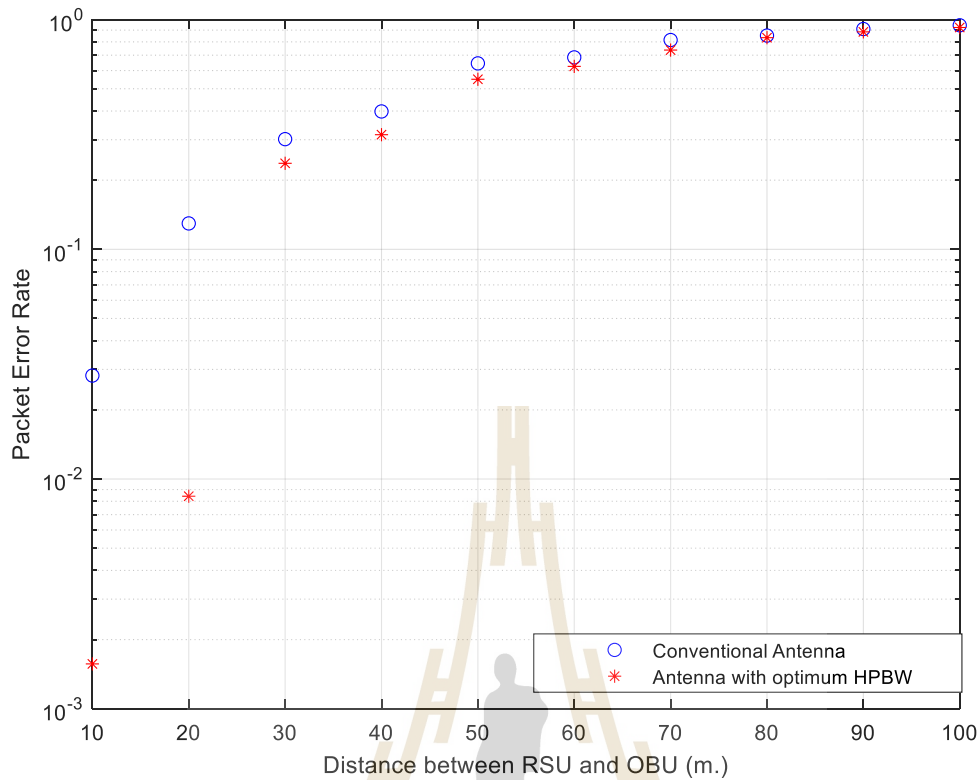
รูปที่ 4.11 ผลเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณระหว่างระบบที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว



รูปที่ 4.12 ผลเปรียบเทียบจำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่ภาครับ

ระหว่างระบบที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว



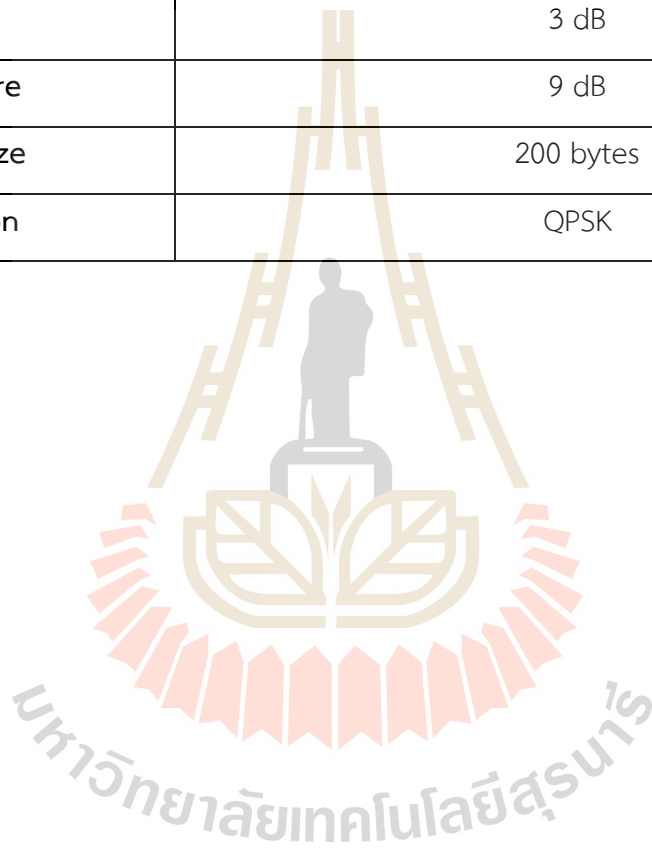


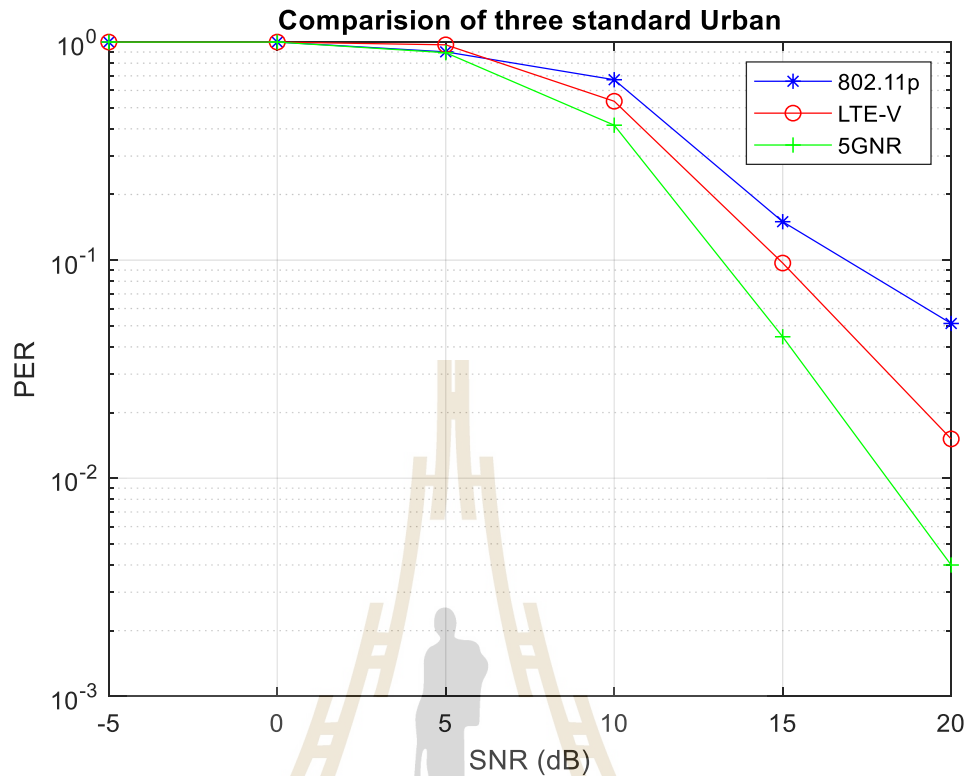
รูปที่ 4.13 ผลเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดของแพ็คเกจข้อมูลระหว่างระบบที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในระนาบเดียว

จากผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงพบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังรูปที่ 4.11-4.13 แสดงถึงคุณภาพของสัญญาณที่อุปกรณ์ติดยานพาหนะได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น สืบเนื่องจากการรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลการจำลองแบบ และผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงสามารถยืนยันคุณภาพการสื่อสาร การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทาง และ อุปกรณ์ติดยานพาหนะได้นอกจากนี้ในระหว่างการทำวิจัย พบว่ามีมาตรฐานเกิดขึ้นมาเพื่อรองรับการรับ-ส่งข้อมูลด้านการจราจรขนส่งหลายมาตรฐาน ผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองแบบเพิ่มเติม เมื่อใช้ 4G-LTE และ 5G NR C-V2X โดยใช้โปรแกรม Matlab และ LTE Vienna Simulator เพื่อทำการหาเทคโนโลยีการสื่อสารที่เหมาะสม การปรับตั้งค่าของโปรแกรม LTE Vienna Simulator เป็นไปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพารามิเตอร์สำหรับการใช้ LTE Vienna Simulator ในการจำลองสถานการณ์

Parameter	802.11P	LTE-V	5GNRV2X
Subcarriers	156.25 kHz	15 kHz	60 kHz
Duration Symbol	8 $\mu$ s	66.7 $\mu$ s	16.7 $\mu$ s
Cyclic prefix	1.6 $\mu$ s	4.69 $\mu$ s	1.17 $\mu$ s
Ptx	23 dBm		
Grx	3 dB		
Gtx	3 dB		
Noise figure	9 dB		
Payload size	200 bytes		
Modulation	QPSK		





รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบ PER กับทั้ง 3 เทคโนโลยี สภาพแวดล้อมแบบในเมือง

จากการจำลองแบบเปรียบเทียบทั้ง 3 มาตรฐาน ดังรูปที่ 4.14 เพื่อเสริมความทันต่อสถานการณ์ปัจจุบันและความใหม่ของงานวิจัยพบว่า ที่อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 10dB พบว่า 5G NR C-V2X เหมาะสมสำหรับการใช้งานในประเทศไทยเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ หากมีการนำความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ให้ค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดมาร่วมใช้ จะเป็นการก่อประโยชน์แก่คุณภาพการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ข้างทางและอุปกรณ์ติดยานพาหนะได้ เมื่อเปรียบเทียบ 5G C-V2X กับ IEEE802.11p เดิม พบว่า 5G C-V2X มีคุณภาพของการสื่อสารที่ดีกว่าในด้านความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูล จากนั้น LTE-V และ IEEE802.11p ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน โดย ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี SQP เป็นเครื่องมือที่น่าสนใจ โดยการจำลองโครงสร้างของระบบไฟจราจรเสมือนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับมาตรฐานและรูปแบบ การรับ-ส่งข้อมูลบนถนน ผลสำเร็จจากการวิจัยนี้ ด้วยค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมที่สุด และการรวม พลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการด้วยตัวสะท้อนแบบมุม ช่วยเพิ่มคุณภาพและความน่าเชื่อถือของการแลกเปลี่ยน ข้อมูลระหว่างอุปกรณ์บนถนนและอุปกรณ์ติดยานพาหนะ ผลของระบบสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือนี้ทำให้ระบบไฟ จราจรเสมือนมีการรับ-ส่งข้อมูลที่มีคุณภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาองค์ความรู้ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความ กว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศสำหรับการรับส่งข้อมูลในระบบไฟจราจรเสมือน หาค่าความกว้างลำคลื่นที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับสายอากาศแบบมีทิศทางของระบบไฟจราจรเสมือน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ สามารถประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมของทางแยก เช่น ความกว้างของทางแยก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ข้างทาง ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องทวนสัญญาณกับอุปกรณ์ติดยานพาหนะ อย่างไรก็ตามการหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟจราจรเสมือนในโครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยและทดสอบด้วยการจำลองแบบใน คอมพิวเตอร์ การวัดสัญญาณในพื้นที่จริงยังมีข้อจำกัดด้านพลังงานและอุปกรณ์ที่ยังมีราคาสูงอยู่ ผลที่ได้จากการ วิจัยดังกล่าวทำให้ยืนยันได้ว่า การรวมพลังงานด้วยการใช้ตัวสะท้อนแบบมุมและการรับ-ส่งข้อมูลด้วยการใช้ สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงาน มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเหมาะสมที่สุด ทำให้การรับ-ส่งข้อมูลใน ระบบไฟจราจรเสมือนมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอนาคตของระบบขนส่ง อัจฉริยะ โดยทำการจำลองแบบด้วยมาตรฐานใหม่ LTE-V และ 5G C-V2X ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี ที่เหมาะสมกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะในประเทศไทยที่สอดคล้องกับการประมูล 5G คือ 5GNR เนื่องจากมี Packet error rate (PER) ที่ต่ำที่สุด ด้วยเหตุผลดังกล่าว การส่งข้อความแจ้งเตือนระหว่างยานพาหนะมีความ ถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้การสื่อสารมีความน่าเชื่อถือสูง รองลงมาคือเทคโนโลยี LTE-V และสุดท้ายคือ IEEE 802.11P ตามลำดับ

### ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

การทำงานจำลองการรับ-ส่งข้อมูล ด้วยสายอากาศที่มีการรวมพลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการ ด้วยตัวสะท้อนแบบมุม และค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟจราจรเสมือน หากมีการพัฒนาสายอากาศให้เล็กลง และสามารถใช้กับยานพาหนะได้หลากหลาย อีกทั้งพิจารณาถึงความถี่ URRRC ซึ่งเป็นอนาคตของระบบขนส่งอัจฉริยะ จะช่วยเพิ่มความสามารถให้กับระบบขนส่งอัจฉริยะซึ่งเป็นเทคโนโลยีหลักของระบบไฟจราจรเสมือนได้น่าสนใจมากขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้ ใช้พื้นฐานจากโปรแกรม Vienna Cellular Communications Simulators (VCCS) ผ่านโปรแกรม Matlab ด้วยการทำงานจำลองในสภาพแวดล้อมต่างๆ และในอนาคตหากราคาอุปกรณ์ 5G C-V2X ราคาต่ำลง น่าสนใจอย่างยิ่งในการนำมาทดสอบบนสภาพถนนจริงร่วมกับงานวิจัยนี้



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Settawit P. (2017, March). **Performance Enhancement of DSRC Message Dissemination in an Urban Intersection Area**. 11th South East Asia Technical University Consortium Symposium (SEATUC 2017)At: Ho Chi Minh, Vietnam

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)

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.



ภาคผนวก ข

รายละเอียดบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

OS09 Electrical, Electronic and  
Telecommunication EngineeringThe 11<sup>th</sup> South East Asian Technical University Consortium Symposium  
Ho Chi Minh University of Technology (HCMUT), 13<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> March 2017

OS09-28

## PERFORMANCE ENHANCEMENT OF DSRC MESSAGE DISSEMINATION IN AN URBAN AREA INTERSECTION AREA

Settawit Poochaya

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakornratchasima, Thailand

Email: settawit@sut.ac.th

### ABSTRACT

This paper presents the significant of antenna HPBW for DSRC (Dedicated Short Range Communication) message transmission in urban area. Intersection Collision Warning (ICW) is established for the increasing of traffic safety at intersection. Conventional ICW is equipped with an antenna having omni-directional pattern. Signal power radiates in all directions. Then, signal power loss in undesired directions. Also, signal quality in terms of Receive Signal Strength Indicator (RSSI), Bit Error Rate (BER) and system reliability are decreased due to such problems. An antenna having directional pattern has been proposed for the solution. Directional antenna aggregates the main beam to the desired directions. Then, the signal power increases at a receiving side. However, antenna half power beamwidth (HPBW) is significant factor which affects to V2V (Vehicle to Vehicle Communication) communication link performance. Also, this work presents the performance enhancement of DSRC message dissemination at intersection area when concerning antenna half power beamwidth corresponding to the vehicle position and road environments. The results indicate the improvement of DSRC message dissemination at intersection area. RSSI is increased due to the proposed system. Then, BER performance is better than the conventional ICW system. Also, traffic safety is increased due to the consideration of antenna HPBW according to vehicle position and road environments.

**KEYWORDS:** DSRC, Intersection Collision Warning, ITS, V2V, V2I.

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.



## 5G NR : The Suitable Communication Technology for V2X in Thailand Vehicular Environment

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

2<sup>nd</sup> 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 (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 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 5G NR V2X is proper technology for communication link between vehicles in Thailand. 5G NR V2X is the highest performance according to PER values.

**Keywords**—IEEE 802.11p, LTE-V, 5G NR 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 5G NR V2X. LTE-V2X and 5G NR 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]. 5G NR was developed with latency of 1 ms. 3GPP introducing NR (New Radio) for communication between vehicles, called 5G NR V2X. 5G Rel.16 was developed from the 3GPP Rel.14. [5]. 5G NR 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 5G NR, 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.

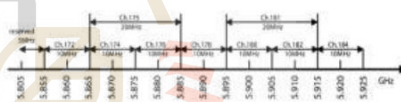


Fig. 1. IEEE 802.11p channels

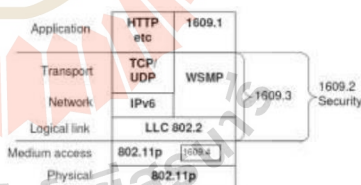


Fig. 2. IEEE 802.11p framework

#### 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].

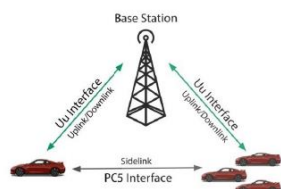


Fig. 3. LTE-V and 5G NR V2X interface

### 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.

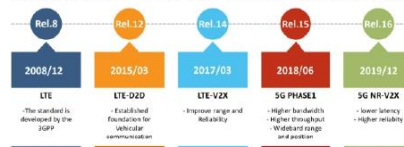


Fig. 4. 3GPP Timeline 5G NR development

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.

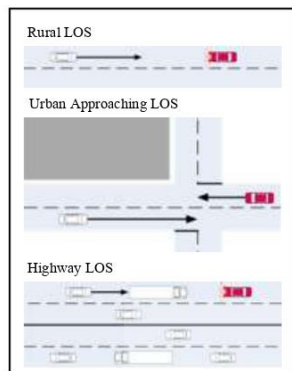


Fig. 5. Description of scenarios

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

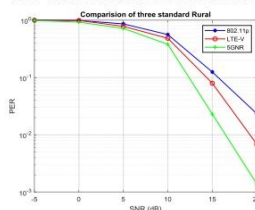


Fig. 6. Comparison of three standard Rural LOS

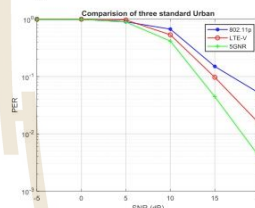


Fig. 7. Comparison of three standard Urban Approaching LOS

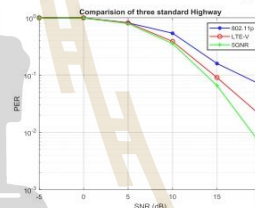


Fig. 8. Comparison of three standard Highway LOS

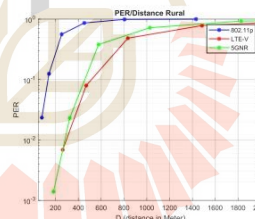


Fig. 9. PER versus between vehicle in Rural Environment

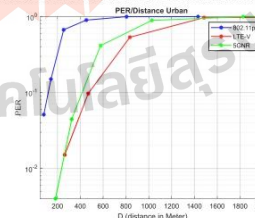


Fig. 10. PER versus between standard vehicle in Urban Environment

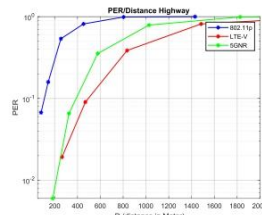


Fig. 11. PER versus between vehicle in Highway Environment

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, 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.
- [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] Hyoungju 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

## บรรณานุกรม

- [1] O.K., Tonguz: Notice of Violation of IEEE Publication Principles Biologically inspired solutions to fundamental transportation problems, Communications Magazine, IEEE, vol.49, no.11, pp.106,115, November 2011
- [2] Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems — 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2010. [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/E2213.htm>
- [3] ITS safety support communication by vehicle-roadside-vehicle Relay at intersection, [http://ir.lib.uec.ac.jp/infolib/user\\_contents/9000000695/9000000695.pdf](http://ir.lib.uec.ac.jp/infolib/user_contents/9000000695/9000000695.pdf)
- [4] Wu, Y., Zhang, L., Wu, Y., & Niu, Z. (2009). Motion-indicated interest dissemination with directional antennas for wireless sensor networks with mobile sinks. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 58(2), 977-989.
- [5] Li, Y., Wang, Z., Jin, D., Zeng, L., & Chen, S. (2012). Collaborative vehicular content dissemination with directional antennas. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 11(4), 1301-1306.
- [6] Acharya, T., Roy, R., & Chattopadhyay, S. (2008, May). Energy-Efficient Broadcasting in Wireless Ad Hoc Networks Using Directional Antennas. In Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE (pp. 36-40). IEEE.
- [7] Reference radiation patterns of omnidirectional and other antennas in point-to-multipoint systems for use in sharing studies. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336/en>
- [8] Z. Zhang, F. Liu, W. Chen, Z. Feng, and W. Xiang, "An endfire phased array used in Wireless Access for Vehicular Environments (WAVE)," Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. ICMMT 2008. International Conference on , vol.1, no., pp.428,431, 21-24 April 2008
- [9] R. Sabouni, and R.M. Hafez, "Performance of DSRC for V2V communications in urban and highway environments," Electrical & Computer Engineering (CCECE), 2012 25th IEEE Canadian Conference on , vol., no., pp.1,5, April 29 2012-May 2 2012

### บรรณานุกรม

- [10] R. Sabouni, Sabouni, Rami. Evaluation of DSRC For V2V communications. Diss. Carleton University, 2011. [Online]. Available: [curve.carleton.ca/system/files/theses/28706.pdf](http://curve.carleton.ca/system/files/theses/28706.pdf)
- [11] Kirk, Donald E. Optimal control theory: an introduction. Courier Dover Publications, 2012.
- [12] Geering, Hans P. Optimal control with engineering applications. Berlin: Springer, 2007.
- [13] กรมขนส่งทางบก “รายงานจำนวนรถที่จดทะเบียนสะสม” กันยายน 2563
- [14] World Health Organization. “Global status report on road safety 2018: Summary (No. WHO/NMH/NVI/18.20)” World Health Organization. (2018)
- [15] The Office of Transport and Traffic Policy and planning, Thailand. “Road accident situation analysis report Of the Ministry of Transport” (2019)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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)
- [19] Ji, Hyoungju, et al. “Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects.” IEEE Wireless Communications 25,3 (2018): 124-130.
- [20] 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.
- [21] 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.

**บรรณานุกรม**

- [22] 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 Layer (PHY) Specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments" IEEE, New York, NY, USA, 2010.
- [23] Ahmadi, Sassan. "5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards." Academic Press, 2019.
- [24] 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.
- [25] International Telecommunication Union (ITU). "Intelligent transport systems (ITS) Report ITU-R M.2445-0". 2018
- [26] 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.
- [27] 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)
- [28] Ganesan, Karthikeyan, et al. "NR Sidelink Design Overview for Advanced V2X Service." IEEE Internet of Things Magazine 3.1 (2020): 26-30.
- [29] Lien, Shao-Yu, et al. "5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access." IEEE communications magazine 55.6 (2017): 64-71.
- [30] Intelligent Transport Systems (ITS). "ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band v1.3.0", 2019

## บรรณานุกรม

- [31] Breed, Gary. "Bit error rate: Fundamental concepts and measurement issues." High Frequency Electronics 2.1 (2003): 46-47.
- [32] Ott, Henry W., and Henry W. Ott. "Noise reduction techniques in electronic systems." Vol. 442. New York: Wiley, 1988.
- [33] Johnson, Don H. "Signal-to-noise ratio." Scholarpedia 1.12 (2006): 2088.
- [34] Intelligent Transport Systems (ITS) "ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band v1.3.0" , 2019
- [35] M. Kahn. "V2V radio channel models. IEEE 802.11-14/0259r0" (2014, Feb).
- [36] Shaw, Joseph A. "Radiometry and the Friis transmission equation. American journal of physics" 81.1, p. 33-37. (2013).
- [37] 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
- [38] Lee, Kwongjong, et al. "Latency of cellular-based V2X: Perspectives on TTI-proportional latency and TTI-independent latency." IEEE Access 5 (2017): 15800-15809.
- [39] 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.
- [40] Rupp, Markus, Stefan Schwarz, and Martin Taranetz. The Vienna LTE-advanced simulators. Singapore: Springer, 2016.
- [41] 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.
- [42] 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.



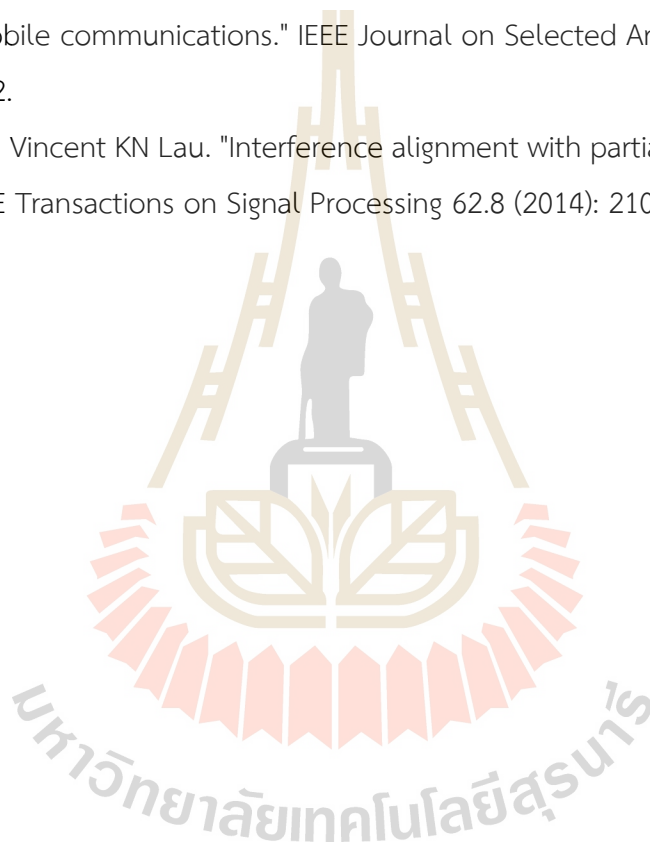
**บรรณานุกรม**

[43] 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.

[44] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) physical channels and modulation. TS 36.211" (2015)

[45] 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.

[46] 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.



## ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐวิทย์ ภูฉายา สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 1 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2551, 2553 และ 2557 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทได้รับทุนการศึกษาจากคณะกรรมการกรรมการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) โดย TRIDI และ ระดับปริญญาเอกได้รับทุนการศึกษาโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 13 และได้เข้าร่วมทำงานวิจัยที่ Carnegie Mellon University ประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันมีบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการ 3 บทความและในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ และระดับชาติ 10 บทความ

