

การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ  
โดยใช้เทคนิคโมโม

นายเศรษฐวิทย์ ภูญา

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2553

**DATA RATE ENHANCEMENT OF DEDICATED SHORT  
RANGE COMMUNICATION FOR INTELLIGENCE  
TRANSPORTATION SYSTEM USING MIMO  
TECHNIQUE**

**Settawit Poochaya**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2010**

การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ  
โดยใช้เทคนิคโมโ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ

(ดร.สุพจน์ เขียววุฒิ)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ คำนกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เศรษฐวิทย์ ภูญา : การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบ  
ขนส่งอัจฉริยะ โดยใช้เทคนิค MIMO (DATA RATE ENHANCEMENT OF DEDICATED  
SHORT RANGE COMMUNICATION FOR INTELLIGENCE TRANSPORTATION  
SYSTEM USING MIMO TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล, 125 หน้า.

ระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transport System) เป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจ  
มากเพราะระบบขนส่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการดำรงชีวิตในปัจจุบัน การสร้างความอัจฉริยะ  
ให้กับระบบขนส่งนี้สามารถทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีเฉพาะทางด้านการสื่อสารระยะใกล้  
(Dedicated Short Range Communication) เทคโนโลยีนี้จะสามารถทำให้ยานพาหนะติดต่อกับสื่อสาร  
กับป้ายสัญญาณหรืออุปกรณ์ที่อยู่ริมถนน รวมไปถึงสามารถติดต่อกับสื่อสารระหว่างยานพาหนะด้วย  
กันเองได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ ระบบแจ้งเตือนภัย  
ล่วงหน้า ระบบนำทางอัจฉริยะ ระบบช่วยขับรถเพื่อความปลอดภัย และระบบแจ้งข้อมูลข่าวสาร  
เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติถือว่าเป็นระบบที่ประสบความสำเร็จ  
มากที่สุดในการพาณิชย์ โดยพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงมากนัก แต่เมื่อพาหนะมีความเร็ว  
สูงขึ้นภาครับไม่สามารถรับข้อมูลได้ถูกต้อง ประกอบกับความคาดหมายที่จะส่งข้อมูลในรูปแบบ  
เสียงและภาพด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น จึงทำให้ยังมีการค้นหาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมอยู่ใน  
ปัจจุบัน จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา สามกลุ่มประเทศคือ อเมริกาเหนือ ยุโรป และญี่ปุ่น มุ่งเน้น  
ที่จะพัฒนาเทคโนโลยีบนความถี่ 5.8 – 5.9 GHz ทั้งนี้ไม่ว่าสามกลุ่มประเทศจะเสนองานวิจัยที่  
แตกต่างกันก็ตาม แต่ก็ยังคงต้องพิจารณาปัญหาที่สำคัญที่สุดร่วมกันคือ การส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็ว  
สูงไปยังพาหนะที่เคลื่อนที่เร็ว ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูล  
เพื่อให้ได้อัตราเร็วที่สูงขึ้น โดยประยุกต์ใช้เทคนิค MIMO (Multiple Input Multiple Output : MIMO)  
ที่มีการถอดรหัสเชิงเวลาและตำแหน่ง ทำให้ระบบที่ใช้เทคนิค MIMO สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่  
สูงขึ้นในขณะที่พาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

SETTAWIT POOCHAYA : DATA RATE ENHANCEMENT OF  
DEDICATED SHORT RANGE COMMUNICATION FOR INTELLIGENCE  
TRANSPORTATION SYSTEM USING MIMO TECHNIQUE. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D., 125 PP.

MIMO STBC/ITS/SDR/DSRC

Recently, Intelligent Transport System (ITS) gains a lot of attention from many researchers because the transportation has a huge impact on daily life. In order to provide such a successful ITS, Dedicated Short Range Communication (DSRC) becomes a necessary technology to fulfill the requirements. This will make the communication between Road Side Unit (RSU) and On Board Unit (OBU) possible; for examples: the automatic Electronic Toll Collection (ETC), the advanced emergency alarm system, the intelligent navigation system, the driving aid system and the information acknowledgement on road. In literatures, ETC is the most popular and successful commercial system using DSRC technology. However, when the speed of vehicles is increased, the quality of signal at receiver is degraded. In addition, the future trend of DSRC aims to support all multimedia with the high speed data transmission. Therefore, the search on developing technology for such a requirement is still challenge. From literatures, DSRC can be grouped by three different countries including North America, Europe and Japan. All standards allocate the frequency band of 5.8 – 5.9 GHz. Although there are many techniques introducing for those standards but they still face the same problem on the high speed data transmission when vehicles have a high mobility. In this light, the thesis focus on the improvement of data rate transmission by applying Multiple Input Multiple Output (MIMO) technique into

DSRC. This thesis provides both simulation and measurement results in order to confirm the help of MIMO technique on DSRC for ITS applications.

School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรงค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและให้โอกาสในการศึกษาและขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (TRIDI) ที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด นางสาวปณิษฐาท์ อาจหาญ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี และขอขอบคุณ นายสำราญ สันทาลุณย์ เป็นพิเศษสำหรับการให้คำแนะนำเกี่ยวกับรูปแบบการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่ง มาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

เศรษฐวิทย์ ภูญาษา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญรูป .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ปรัชญาบรรณกรรม .....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
1.4 ขอบเขตของเรื่อง .....	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย .....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย .....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ .....	7
<b>2 องค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย .....</b>	<b>9</b>
2.1 กล่าวนำ .....	9
2.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะ .....	9
2.3 เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ .....	10
2.3.1 การแยกรูปแบบของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ .....	11
2.3.2 มาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับ ระบบขนส่งอัจฉริยะ .....	12



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	จุดเด่นของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล	15
2.4	เทคโนโลยีโมโม	16
2.4.1	ประเภทของเทคโนโลยีโมโม	17
2.4.2	จุดเด่นของเทคโนโลยีโมโม	22
2.5	ช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี	23
2.5.1	ช่องสัญญาณแบบเรย์ลี	23
2.5.2	ช่องสัญญาณแบบโรเซียน	24
2.5.3	ความถี่คอปเพลอร์	26
2.5.4	การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี	27
2.6	เทคโนโลยี OFDM	29
2.7	บทสรุป	31
3	เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์	33
3.1	กล่าวนำ	33
3.2	เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์	33
3.3	GNU Radio Software package	34
3.3.1	โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน	36
3.3.2	การสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณสำหรับ GNU Radio	39
3.4	ชุดอุปกรณ์ Universal software radio peripheral	44
3.4.1	ส่วนประกอบหลักของ USRP Board	44
3.5	ทิศทางการไหลของสัญญาณใน USRP Board	49
3.5.1	ภาครับ	49
3.5.2	ภาคส่ง	50
3.6	การติดตั้งโปรแกรม GNU Radio	51
3.6.1	Install dependencies	52
3.6.2	Install an SVN Client	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu .....	53
3.7.1 ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น .....	54
3.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น .....	55
3.8 บทสรุป .....	60
<b>4 ผลการจำลองแบบและการออกแบบชุดทดสอบ .....</b>	<b>61</b>
4.1 กล่าวนำ .....	61
4.2 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ .....	61
4.2.1 การจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณไมโม .....	61
4.2.2 การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับ ระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยใช้มาตรฐาน ARIB STD-T75 .....	63
4.2.3 การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับ ระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยใช้มาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) .....	77
4.3 การออกแบบชุดทดสอบและผลการทดสอบ .....	82
4.3.1 การออกแบบชุดทดสอบ .....	84
4.3.2 พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการทดสอบ .....	95
4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ .....	97
4.3.4 ผลการทดสอบ .....	104
4.4 บทสรุป .....	109
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>110</b>
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ .....	110
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	112
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต .....	112
รายการอ้างอิง .....	113

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก .....	115
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	115
ประวัติผู้เขียน .....	125

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของระบบขนส่งอัจฉริยะ.....11
2.2	การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ <i>Vehicle to Vehicle (V2V)</i> .....12
2.3	การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง <i>Vehicle to Infrastructure (V2I)</i> ..... 12
2.4	ภาพรวมระบบขนส่งอัจฉริยะ.....16
2.5	ภาพรวมระบบโมโม..... 17
2.6	โครงสร้างการเข้ารหัสแบบ Alamouti..... 19
2.7	ตัวอย่างการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK..... 20
2.8	แบบจำลองการเข้ารหัสแบบ SM..... 22
2.9	รูปแบบเรขาคณิตสำหรับระบบสายอากาศแถวลำดับ..... 24
2.10	ส่วนประกอบของปรากฏการณ์คอปเพลอร์..... 26
2.11	กระบวนการในการส่งสัญญาณ OFDM..... 30
2.12	กระบวนการทำงานของภาครับสัญญาณ OFDM..... 31
3.1	โครงสร้างของ GNU Radio ..... 35
3.2	แบบจำลอง Flow graph ของระบบโทรศัพท์แบบ dial tone..... 38
3.3	บอร์ด USRP ..... 45
3.4	ชุดอุปกรณ์ Daughter boards..... 46
3.5	ชุดอุปกรณ์ USRP..... 47
3.6	ส่วนประกอบภายในบอร์ด USRP..... 49
3.7	ภาพรวมของ GNU Radio และ USRP ..... 51
4.1	ผลการจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณ เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งภาครับ..... 62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	แบบจำลองลักษณะช่องสัญญาณไร้สายสำหรับระบบ ขนส่งอัจฉริยะ..... 63
4.3	โครงสร้างของแบบจำลองภาคส่งสำหรับระบบไมโม..... 66
4.4	การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK..... 66
4.5	แสดงอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราความแรง ของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวน โดยเปรียบเทียบ เทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบไมโม..... 68
4.6	ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็ว ของยานพาหนะ..... 71
4.7	ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของยานพาหนะ กับ Throughput..... 72
4.8	ผลการจำลองแบบเมื่อความถี่คอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 100 Hz..... 73
4.9	ผลการจำลองแบบเมื่อความถี่คอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 200 Hz..... 74
4.10	ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบ กับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง ระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิค ไมโม..... 75
4.11	ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่ง หน่วยเวลาเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบ เทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิค ไมโมสำหรับ อัตราเร็วข้อมูล 1 Mbp..... 76
4.12	ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิต ณ ความถี่คอปเพลอร์ ค่าต่าง ๆ..... 79
4.13	ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิม กับระบบไมโมที่ความถี่คอปเพลอร์ 100Hz..... 80

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิม กับระบบโมโมที่ความถี่คอปเพลอร์ 200 Hz.....	81
4.15 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิม กับระบบโมโมที่ความถี่คอปเพลอร์ 300 Hz.....	82
4.16 ชุดอุปกรณ์.....	83
4.17 ชุดอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานแบบโมโม.....	83
4.18 บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบทั้งภาคส่งและภาครับ.....	84
4.19 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์.....	85
4.20 โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ภาคส่ง.....	86
4.21 โปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างเฟรมข้อมูล.....	87
4.22 โครงสร้างโปรแกรมในส่วนที่ตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจ.....	88
4.23 โครงสร้างของภาคส่งสัญญาณ OFDM.....	89
4.24 โครงสร้างของภาครับสัญญาณ OFDM.....	90
4.25 แผนผังโปรแกรมสำหรับภาคส่ง.....	92
4.26 แผนผังกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ.....	93
4.27 แผนผังโปรแกรมในส่วนของภาครับ.....	94
4.28 แบบจำลองส่วนประกอบของระบบโมโมที่มีการใช้เทคโนโลยี กำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์.....	95
4.29 การจัดวางชุดทดสอบ.....	97
4.30 การจัดวางอุปกรณ์ RSU.....	98
4.31 การจัดวางอุปกรณ์ติดตามพาหนะ OBU.....	99
4.32 การจัดวางชุดทดสอบระบบโมโม.....	101
4.33 การจัดวางอุปกรณ์ RSU ระบบโมโม.....	101
4.34 การจัดวางอุปกรณ์ OBU ระบบโมโม.....	103
4.35 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบ กับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ.....	104

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ.....	105
4.37 ผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ.....	106
4.38 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ.....	107
4.39 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ.....	108
4.40 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ.....	109

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงเทคโนโลยีที่ใช้กับระะยะการสื่อสาร .....	11
2.2 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p .....	13
2.3 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน CEN-DSRC .....	14
2.4 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน ARIB STD-T75 .....	15
2.5 รูปแบบการเข้ารหัสของ Alamouti .....	19
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ .....	64
4.2 คุณลักษณะของมาตรฐาน ARIB STD-T75 .....	65
4.3 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p .....	78
4.4 แสดงสัญลักษณ์ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ .....	91
5.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	112



# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นคำอธิบายถึงประวัติความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบขนส่งอัจฉริยะ เป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากทุกมุมโลกเพราะระบบขนส่ง อาทิเช่น การจราจร การขนส่งสินค้า เป็นระบบที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการดำรงชีวิตในปัจจุบัน ระบบขนส่งอัจฉริยะนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาการจราจร แก้ไขปัญหาทางด้านการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระบบขนส่งโดยปราศจากการก่อสร้างถนนใหม่ การสร้างความอัจฉริยะให้กับการขนส่งนี้สามารถทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีเฉพาะทางการสื่อสารระยะใกล้ (Dedicate Short Range Communication) เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้นี้ เป็นการสื่อสารที่มีระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับไม่มากนัก โดยมีเป้าหมายคือ ระบบต้องรองรับการสื่อสารความเร็วสูง สามารถรองรับการใช้งานที่หลากหลาย มีความน่าเชื่อถือสูงและมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เทคโนโลยีนี้สามารถแบ่งรูปแบบการติดต่อสื่อสารออกเป็น 2 แบบ แบบแรกคือ การติดต่อสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะ (Vehicle to Vehicle Communications : V2V) แบบที่สองคือ การติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง (Vehicle to Infrastructure : V2I) เช่น ป้ายสัญญาณต่าง ๆ ที่ติดอยู่ตามข้างทาง ซึ่งในการติดต่อสื่อสารกันทั้ง 2 รูปแบบนั้นใช้ความถี่ในการสื่อสารที่ย่าน 5.8 – 5.9 GHz เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้นี้สามารถแบ่งตามมาตรฐานในการสื่อสารของแต่ละประเทศออกเป็น 3 กลุ่มประเทศ ได้แก่ มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น (ARIB) มาตรฐานของยุโรป (CEN-DSRC) มาตรฐานของอเมริกาเหนือ (ASTM) ข้อแตกต่างของ 3 มาตรฐานนี้คือ แตกต่างกันตามรูปแบบของการมอดูเลต ทางฝั่งของยุโรปและอเมริกาจะมีการมอดูเลตแบบ OFDM ส่วนทางญี่ปุ่นจะไม่มีการใช้การมอดูเลตแบบ OFDM

จากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้การพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งทาง IEEE ได้ตั้งมาตรฐานใหม่ขึ้นมา คือ IEEE802.11p (WAVE-Wireless Access in Vehicular Environments) โดยมาตรฐานนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากมาตรฐาน IEEE802.11a เนื่องจากในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะและยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางนั้น มีปัจจัยที่เป็นอุปสรรคในการติดต่อสื่อสาร คือความเร็วของยานพาหนะ ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของความถี่โคปเปลอร์ จากมาตรฐานเดิมที่เคยใช้ คือ ASTM 2213-03 และ IEEE802.11a นั้นรองรับการใช้งานเพียงแต่ในอาคาร แต่ไม่รองรับการใช้งานแบบนอกอาคารและสภาพการติดต่อสื่อสารที่ภาครับและภาคส่งมีการเคลื่อนที่ ดังนั้นมาตรฐาน IEEE802.11p จึงถูกตั้งขึ้นมาเพื่อรองรับการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะและยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง ด้วยความสามารถเหล่านี้ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ ระบบแจ้งเตือนภัยล่วงหน้า ระบบนำทางอัจฉริยะ ระบบช่วยขับรถเพื่อความปลอดภัย และระบบแจ้งข้อมูลข่าวสาร เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติถือว่าเป็นระบบที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดในเชิงพาณิชย์ ซึ่งระบบนี้จะอาศัยเทคโนโลยีจำแนกลักษณะด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification) เพื่อติดต่อระหว่างเครื่องเก็บค่าผ่านทางและพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงมากนัก แต่เมื่อพาหนะมีความเร็วสูงขึ้นการใช้เทคนิคจำแนกลักษณะด้วยคลื่นวิทยุไม่สามารถใช้งานได้ เพราะเครื่องอ่านไม่สามารถรับข้อมูลในเวลาอันสั้นได้ ประกอบกับความคาดหมายที่จะส่งข้อมูลในรูปแบบเสียงและภาพด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น จึงทำให้ยังมีการค้นหาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมอยู่ในปัจจุบัน ทั้งนี้ไม่ว่าสามกลุ่มประเทศจะเสนองานวิจัยที่แตกต่างกันก็ตาม แต่ก็ยังคงต้องพิจารณาปัญหาที่สำคัญที่สุดร่วมกันคือการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงไปยังพาหนะที่เคลื่อนที่เร็ว เนื่องจากการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงไปยังพาหนะที่เคลื่อนที่เร็วนั้นยังเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการติดต่อสื่อสาร เพราะในช่วงเวลาที่พาหนะจะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลมีน้อยลงหากพาหนะเคลื่อนที่เร็วขึ้น และปัญหาเรื่องการแทรกแซงจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath)

จากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า การใช้เทคนิคโมโม (Multiple Input Multiple Output : MIMO) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลเพื่อให้ได้อัตราเร็วที่สูงขึ้นในระยะเวลาเท่าเดิม โดยอาศัยหลักการทำงานของระบบโมโม ที่มีการถอดรหัสเชิงเวลาและตำแหน่ง ทำให้ระบบที่ใช้เทคนิคโมโมสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นในขณะที่อยู่ภายใต้การแทรกแซงจากสัญญาณหลายวิถี ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จะนำเทคนิคโมโมเข้ามาประยุกต์กับมาตรฐานของระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยคาดหวังให้มีอัตราการส่งข้อมูลที่ดีขึ้น

## 1.2 ปรัชญ์นั้วรณกรรม

เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยจึงได้มีการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา รวมถึงการค้นคว้าจากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย และทางอินเทอร์เน็ต โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง ปรัชญ์นั้วรณกรรม ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ได้ดังนี้ ระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล และเทคนิคโมโม

### 1.2.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะและเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล

การนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลเข้ามาใช้งานกับระบบขนส่งอัจฉริยะเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจไม่ว่าจะเป็นงานของ (Kukshya, V., and Krishnan, H., 2006) ได้กล่าวถึงการนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลเข้ามาช่วยในการพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่งแบ่งประเภทตามรูปแบบในการใช้งานออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ Vehicle to Vehicle (V2V) เป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ และ Vehicle to Infrastructure (V2I) ซึ่งเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง โดยการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งกับภาครับนี้ทำงานภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11p ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลมาใช้โดยเฉพาะ นอกจากนี้ (Oh, H., Yae Ahn, C., and Cho, H., 1999); (Yuan, R., 1997) ได้แสดงให้เห็นว่าการติดต่อสื่อสารในระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลนั้นทำงานที่ย่านความถี่ 5.8-5.9 GHz ภายใต้มาตรฐานต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้ โดยแยกออกเป็นค่าย ๆ ได้แก่ ค่ายยุโรปจะใช้มาตรฐาน CEN-DSRC ค่ายอเมริกาเหนือจะใช้มาตรฐาน ASTM ค่ายญี่ปุ่นจะใช้มาตรฐาน ARIB อย่างไรก็ตามทั้ง 3 ค่ายดังกล่าวก็ได้มีการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ อาทิเช่น การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณแทรกสอดหลายวิถี ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบที่ภาครับ การเกิดความผิดพลาดในการติดต่อสื่อสารเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะ ซึ่งอยู่ในเทอมของความถี่ดอปเพลอร์ สภาพแวดล้อมในบริเวณที่ภาคส่งและภาครับถูกติดตั้งอยู่ สภาพการจราจรซึ่งสะท้อนไปถึงสภาพช่องสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร เนื่องจากเป็นการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งสภาพช่องสัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล

## 1.2.2 เทคนิคไมโม

เทคนิคไมโมเป็นเทคนิคหนึ่งซึ่งในปัจจุบันที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัยจากทั่วโลกเนื่องด้วยข้อดีที่หลากหลายของเทคนิคไมโม แต่ก็ต้องยอมรับกับความซับซ้อนของอุปกรณ์เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของระบบสื่อสาร งานวิจัยของ (Foschini, G.J., 1996); (Telatar, I.E., 1995) ได้แสดงให้เห็นว่าความจุช่องสัญญาณในระบบไมโมสามารถเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามจำนวนคู่ของสายอากาศระหว่างภาครับและภาคส่ง ซึ่งความจุของช่องสัญญาณนั้นหากมีค่ามากจะทำให้ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้มีค่ามาก อีกทั้งหากค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่ามากนั้นหมายถึงผู้ใช้งานสามารถรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงได้อีกด้วย (Tarokh, V., 1999) ได้กล่าวถึงการศึกษาประสิทธิภาพของระบบไมโมที่การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย เป็นการกล่าวอธิบายถึงกระบวนการในการเข้ารหัสที่ภาคส่ง กล่าวถึงกระบวนการถอดรหัสที่ภาครับ อีกทั้งยังได้กล่าวถึงกระบวนการในการประมาณค่าช่องสัญญาณที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในเทอมของอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Wee, S., Ros, M., and Vial, P., 2009) ได้กล่าวถึงการนำเทคนิคไมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาไปใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์โดยมีการอธิบายถึงวิธีการออกแบบระบบ การนำเทคนิคไมโมไปออกแบบระบบด้วยการใช้โปรแกรม GNU Radio โดยแสดงประสิทธิภาพของระบบในเทอมของอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับและยังมีงานวิจัยที่นำเทคนิคไมโมไปใช้ในการออกแบบการทดลองไม่ว่าจะเป็น (Palchak, D., Behrouz, Boroujeny, F., 2006); (Li, .X., 2006); (Homayoun, W., Zadeh, Y., 2008) โดยงานวิจัยหลังนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคไมโมให้สามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ได้

## 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยการใช้เทคนิคไมโม โดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1.3.1 เพื่อศึกษาหลักการทํางานและทฤษฎีพื้นฐานของระบบขนส่งอัจฉริยะ
- 1.3.2 เพื่อศึกษาหลักการทํางานและทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล
- 1.3.3 เพื่อศึกษาระบบไมโมให้สามารถเพิ่มอัตราส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะไกลได้
- 1.3.4 เพื่อสร้างชุดทดสอบของระบบดังกล่าวและวัดประสิทธิภาพในทางปฏิบัติ

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ในการจำลองแบบมีการใช้ช่องสัญญาณในการสื่อสารเป็นแบบไร้สาย เนื่องจากมีทั้งส่วนของสัญญาณในวิถีตรงและวิถีสะท้อนปะปนกันอยู่

1.4.2 สายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับมีจำนวนไม่เกิน 2 ต้นเพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

1.4.3 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบ (simulation) อัตราความผิดพลาดบิตและใช้ชุดทดสอบในการวัดอัตราความผิดพลาดของแพ็คเกจข้อมูลและอัตราความผิดพลาดบิต

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกในการพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะเมื่อมีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้

1.5.2 ออกแบบและจำลองผลสมรรถนะของระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยการวัดอัตราการผิดพลาดบิตและปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลาเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อไม่มีการใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลา

1.5.3 ในการจำลองแบบและการออกแบบชุดทดสอบ กระทำภายใต้ชั้นกายภาพ (Physical layer) เท่านั้น

1.5.4 ออกแบบชุดทดสอบและวัดประสิทธิภาพจริงภายใต้ขีดจำกัดของอุปกรณ์ที่สามารถทำการทดสอบได้

## 1.6. วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาหลักการงานรวมถึงทฤษฎีระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้
- 3) ศึกษาหลักการงานรวมถึงทฤษฎีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่งในระบบโมโม
- 4) ทำความเข้าใจในการรับข้อมูลช่องสัญญาณในระบบโมโม พร้อมทั้งได้ทำการวัดข้อมูลช่องสัญญาณจริงเพื่อใช้ในการทดสอบ
- 5) ทำการจำลองแบบการทดลองสมรรถนะของระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่ง

6) ทดสอบการรับส่งข้อมูลของระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก

7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบที่ได้ในทางปฏิบัติและจากการจำลองแบบ

### 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัยเป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงาน

1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) ทดสอบสมรรถนะของระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่ง โดยเขียนโปรแกรมจำลองแบบการทำงานร่วมกับโปรแกรม (MATLAB)

3) วัดช่องสัญญาณจริงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณจริงและนำไปพิจารณาสมรรถนะของระบบในทางปฏิบัติ

4) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบในข้อ 2 และ 3 รวบรวมข้อมูลเพื่อเขียนเป็นรายงาน

### 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

### 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
- 2) โปรแกรมเฉพาะทางวิศวกรรม เช่น โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB)
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer)
- 4) อุปกรณ์จ่ายไฟ (power supply)
- 5) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM)
- 6) เครื่องกำเนิดสัญญาณวิทยุ (RF signal generator)
- 7) เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum analyser)

### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เก็บรวบรวมข้อมูลระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่ง จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2) เก็บผลการทดลองที่ได้จากการจำลองแบบสมรรถนะอัตราความผิดพลาดบิตและปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลาของระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้และไม่มีการใช้เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่ง

3) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการวัดช่องสัญญาณระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมเด็มที่มีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่งในเวลาจริง

#### 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลของสมรรถนะของระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมเด็มที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก โดยข้อมูลที่ได้จากผลทั้งการจำลองแบบและการวัดจริงจะใช้ในการวิเคราะห์และสรุป

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่อมีการใช้เทคนิคโมเด็มที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาปรับปรุงระบบเดิมนั้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.7.1 ผลที่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบขนส่งอัจฉริยะ เช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ

1.7.2 เป็นแนวทางในการสร้างระบบระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้เทคนิคโมเด็มที่มีการเข้ารหัสเชิงเวลาและตำแหน่งแบบบล็อก

### 1.8 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ ประวัติความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม วัตถุประสงค์ของการวิจัยสมมติฐานของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

**บทที่ 2** กล่าวถึงองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ เทคนิคโมเด็ม

**บทที่ 3** ทฤษฎีเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ เป็นการกล่าวถึงองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีดังกล่าว

**บทที่ 4** กล่าวถึงแบบจำลองของระบบ โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่มีการใช้เทคนิคโมเด็มและระบบที่ไม่มีใช้เทคนิคโมเด็ม การออกแบบชุดทดสอบ ผลการทดลองทั้งในส่วนของการจำลองแบบ และส่วนของชุดทดสอบ รวมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผล โดยอ้างอิงผลของการจำลองแบบและผลของชุดทดสอบ นอกจากนี้ยังรวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาในอนาคต



## บทที่ 2

### องค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ผู้เขียนจะได้กล่าวถึงองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วยระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ เทคโนโลยีโม โม เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็ม และคุณลักษณะช่องสัญญาณไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีและเทคนิคเหล่านี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

#### 2.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะ

ระบบขนส่งอัจฉริยะ คือ การนำเทคโนโลยีทางการสื่อสาร เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งแบบเดิม โดยมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาด้านการจราจร ลดปัญหาการเกิดอุบัติเหตุ แก้ปัญหาการจราจรติดขัด โดยปราศจากการก่อสร้างถนนใหม่หรือโครงสร้างพื้นฐานใหม่ขึ้นมา ระบบขนส่งอัจฉริยะมีผลดีในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การแก้ไขปัญหาในการขนส่งลดอุบัติเหตุ แก้ไขปัญหาการจราจร รับส่งข้อมูลและรายงานข้อมูลสภาพการจราจรให้แก่ผู้ใช้รถใช้ถนนได้ทราบ ตลอดจนการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์หาวิธีแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบขนส่งแบบเดิม

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีระบบขนส่งได้เข้ามามีอิทธิพลต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมากทั้งในด้านการเดินทางไปตามสถานที่ต่าง ๆ การขนส่งสินค้าไปตามที่ต่าง ๆ แต่ด้วยจำนวนประชากรมนุษย์ที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้ความต้องการใช้งานระบบขนส่งมีมากขึ้น เทคโนโลยีในด้านระบบขนส่งก็ต้องถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้อย่างรวดเร็วและมีความปลอดภัยสูง ตัวอย่างระบบขนส่ง ได้แก่ การจราจร การขนส่งสินค้า เป็นต้น ในการที่จะทำให้ระบบขนส่งกลายเป็นระบบขนส่งอัจฉริยะได้นั้นจะต้องอาศัยเทคโนโลยีในการสื่อสารโทรคมนาคมเข้ามาเพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพของระบบขนส่งแบบเดิม มีคำกล่าวที่ว่า **“เทคโนโลยีทางการสื่อสารโทรคมนาคมเป็นหัวใจหลักของระบบขนส่งอัจฉริยะ”** ซึ่ง ดร.ภาสกร ประถมบุตร ได้กล่าวเอาไว้ในการประชุมวิชาการ ITS Asia Pacific 2010 ที่ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ ในปัจจุบันนี้ปัญหาเกี่ยวกับระบบขนส่งนับว่าเป็นปัญหาระดับชาติ ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น อาทิเช่น รถติดซึ่งเป็นปัญหาอันดับแรก ๆ ที่ถูกกล่าวถึงมากที่สุด การนำเอาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารเข้ามาช่วยระบบขนส่งแบบเดิมที่เห็นได้ทั่วไป

คือป้ายจราจรอัจฉริยะที่อยู่ตามแยกสำคัญ ๆ ต่างในกรุงเทพมหานคร โดยป้ายจราจรอัจฉริยะนี้จะรับข้อมูลมาจาก ศูนย์ควบคุมการจราจรกลาง เพื่อแจ้งสถานะถนนเส้นนั้นให้ผู้ขับขี่ใช้ถนนทราบว่า ถนนเส้นนั้นรถติดหรือไม่ ผลที่ได้นั้นคือทำให้ผู้ใช้งานสามารถวางแผนการเดินทางเพื่อไปถึงจุดหมายได้อย่างทันเวลา เมื่อเทียบกับการที่จะต้องสูญเสียงบประมาณในการก่อสร้างถนนใหม่ แล้ว สามารถกล่าวได้ว่าระบบขนส่งอัจฉริยะมีความประหยัดกว่าการสร้างถนนหรือ โครงสร้างพื้นฐานใหม่ขึ้นมา ในการแก้ไขปัญหาการจราจรที่เกิดขึ้นทุกวันนี้สามารถกระทำได้หลากหลายวิธีการ ในการที่มุ่งเน้นไปสู่การก่อสร้าง โครงสร้างพื้นฐานใหม่ ให้สามารถรองรับความต้องการในการใช้งานระบบขนส่งเดิมนั้นเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณสูง ซึ่งไม่เหมาะกับสถานการณ์ของประเทศ และไม่ใช่วิธีทางที่ยั่งยืนในการแก้ปัญหาซึ่งปัจจุบันนี้หลายประเทศได้ให้ความสนใจไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งแบบเดิมไปเป็นระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยอาศัยเทคโนโลยี ด้านโทรคมนาคมเข้ามาช่วย จึงก่อให้เกิดเป็น “ระบบขนส่งอัจฉริยะ” ขึ้นมา

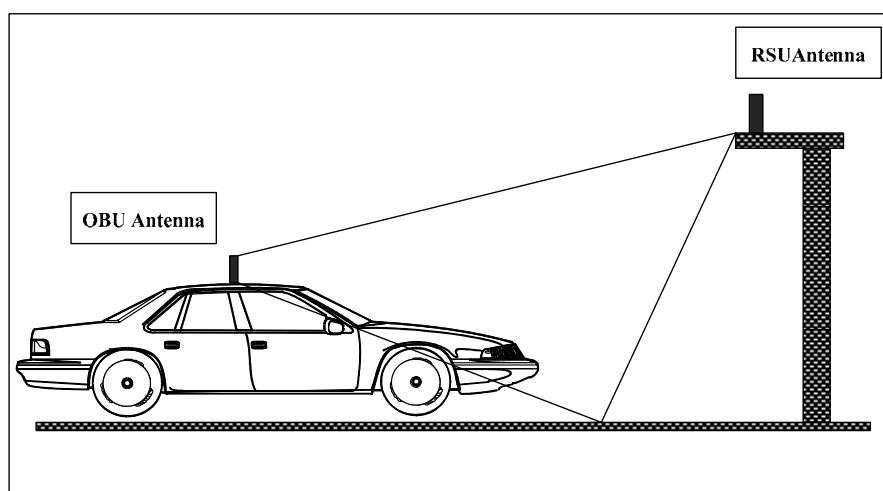
### 2.3 เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีในการสื่อสารไร้สายนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญต่อชีวิตมนุษย์ ด้วยข้อดีที่หลากหลาย ความสะดวกสบายที่ได้รับที่มากมาย ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีที่สามารถเห็นได้ชัดคือ เทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมทั่วโลก โดยเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาให้การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีระยะห่างที่ไกลกันในระดับกิโลเมตร นักวิจัยจากทั่วโลกจึงมุ่งเน้นไปที่การวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อาทิเช่น ทำอย่างไรถึงจะทำให้พื้นที่ครอบคลุมในการติดต่อสื่อสารเพิ่มมากขึ้น ทำอย่างไรจะทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่มีอัตราเร็วขึ้น หรือแม้กระทั่งจะทำอย่างไรให้สถานีฐานหนึ่งรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากขึ้น เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นระบบสื่อสารที่มีระยะไกล ดังแสดงด้วยตารางที่ 2.1 ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีในการสื่อสารไร้สายระยะไกลจึงถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งภายใต้การสื่อสารระยะไกลนี้ยังมีการสื่อสารระยะใกล้อยู่ เมื่อการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารในระยะไกลเริ่มมีแนวโน้มไปในทางที่ดีขึ้น จึงได้มีผู้หันมาเริ่มที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ Dedicated Short Range Communication (DSRC) ขึ้นมา

ตารางที่ 2.1 แสดงเทคโนโลยีที่ใช้กับระยะการสื่อสาร

Short Range	Medium Range	Long Range
Bluetooth, Zigbee	WiFi 802.11b/g/n:	WiMaX, EDGE, GPRS

เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล คือ เทคโนโลยีการสื่อสารในระยะสั้นจนถึงระยะกลาง ซึ่งเป็นระบบสื่อสารไร้สายสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน โดยมีจุดเด่นในด้านคุณสมบัติของระบบที่รองรับการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับด้วยอัตราเร็วสูง มีความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูลสูง เป็นต้น ส่วนประกอบที่สำคัญของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นประกอบไปด้วย อุปกรณ์ติดรถ On Board Unit (OBU) เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับการรับส่งข้อมูลโดยสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งภาครับและภาคส่ง และอุปกรณ์ข้างทาง Road Side Unit (RSU) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ตามข้างทางเพื่อใช้เป็นภาคส่งหรือรับข้อมูลดังรูปที่ 2.1

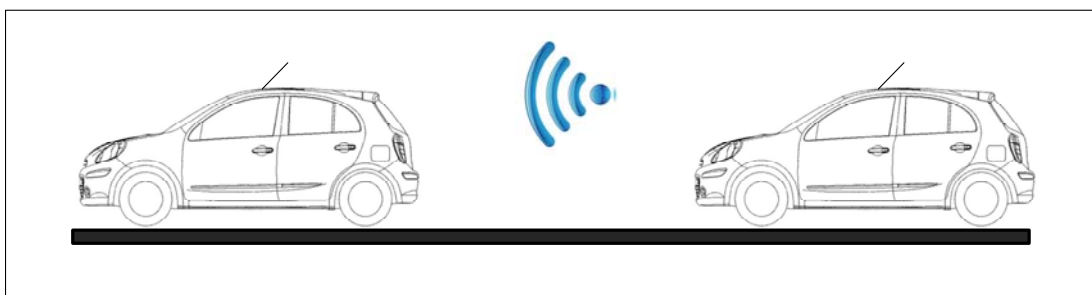


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบขนส่งอัจฉริยะ

### 2.3.1 การแยกรูปแบบของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

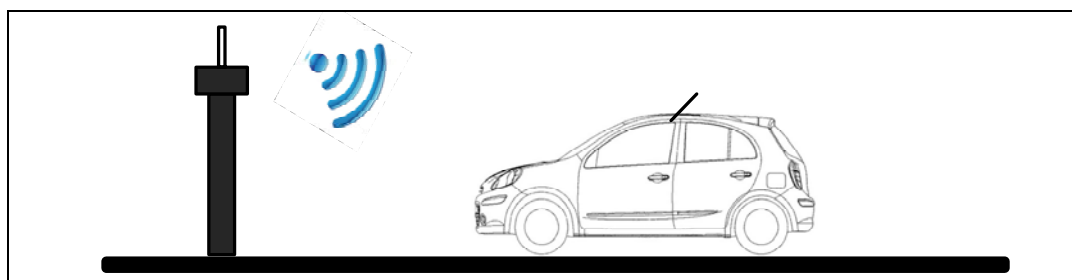
เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบในการนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลไปใช้กับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้น สามารถแยกได้เป็น 2 รูปแบบ

1) การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ Vehicle to Vehicle (V2V) ซึ่งเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ โดยมีภาคส่งติดอยู่กับยานพาหนะ และภาครับติดอยู่กับยานพาหนะอีกคันเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ Vehicle to Vehicle (V2V)

2) การรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทางกับยานพาหนะ Vehicle to Infrastructure (V2I) เป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทางกับยานพาหนะ โครงสร้างของระบบประกอบไปด้วย RSU ติดอยู่ข้างทาง ส่วน OBU ติดตั้งอยู่บนยานพาหนะ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง Vehicle to Infrastructure (V2I)

### 2.3.2 มาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

มาตรฐานของระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 มาตรฐาน ซึ่งเป็นการแยกประเภทตามกลุ่มประเทศที่ใช้งาน

#### 1) มาตรฐานที่ใช้ในทวีปอเมริกาเหนือ

มาตรฐานที่ใช้ในทวีปอเมริกาเหนือคือมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM) เป็นมาตรฐานที่ทำงานบนความถี่ 5.9 GHz ภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11p WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ถูกออกแบบมาให้รองรับการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง มาตรฐานนี้มีการพัฒนาต่อมาจากมาตรฐาน IEEE802.11a หรือ ASTM E2213-03 โดยมีการใช้ข้อดีของการมอดูเลชันแบบ OFDM ที่มีความทนทานต่อปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี โดยการเพิ่ม

ช่วงเวลาของอักขระเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของมาตรฐาน IEEE802.11a ทำให้ภาคส่งและภาครับสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในสภาพช่องสัญญาณที่ภาคส่งหรือภาครับมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะที่สำคัญของมาตรฐาน IEEE802.11p-WAVE

ตารางที่ 2.2 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน 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

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งในระหว่างการส่งและรับสัญญาณนั้นมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาครับ ภาคส่ง อาทิเช่น สิ่งกีดขวางระหว่างภาครับและภาคส่ง การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี สภาพแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ตั้งของภาคส่งและภาครับ เป็นต้น ด้วยข้อดีของเทคโนโลยีระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก OFDM ซึ่งเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งในการนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยอาศัยจุดเด่นที่ทนต่อสัญญาณรบกวน และสามารถส่งข้อมูลในอัตราเร็วสูง ปัญหาการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์สามารถแก้ไขได้โดยการเติมไซคลิกเข้าไปที่เฟรมข้อมูลก่อนทำการส่ง จึงทำให้มาตรฐานนี้รองรับการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้ โดยปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับหลัก ๆ คือความเร็วซึ่งอยู่ในเทอมของความถี่คอปเพลอร์

## 2) มาตรฐานที่ใช้ในแถบยุโรป

มาตรฐาน CEN-DSRC เป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะสำหรับกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป เป็นมาตรฐานที่กำหนดคุณลักษณะของระบบขนส่งอัจฉริยะที่ผู้ใช้งานสามารถนำมามาตรฐานดังกล่าวไปใช้อ้างอิงในการออกแบบระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน CEN-DSRC

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	5.8 GHz
Communication system	Passive
Maximum data transmission rate	500 kbps (downlink) 250 kbps (uplink)
Communication range	15 m
Maximum power	RSE:33 dBm OBE:-15 dBm

### 3) มาตรฐานญี่ปุ่น ARIB STD-T75

มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่นถูกกำหนดขึ้นมาโดยองค์กร Association of Radio Industrial and Business (ARIB) ซึ่งเป็นองค์กรที่มีหน้าที่ในการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมโทรคมนาคมของประเทศญี่ปุ่น โดยทาง ARIB ได้กำหนดมาตรฐาน ARIB STD-T55 ขึ้นมาเพื่อเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะพื้นฐานของระบบขนส่งอัจฉริยะให้มีมาตรฐานที่เด่นชัด และหลังจากนั้นยังได้พัฒนามาตรฐาน ARIB STD-T75 ขึ้นมาอีกครั้งเพื่อนำไปใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศญี่ปุ่น ดังตารางที่ 2.4 มาตรฐานดังกล่าวจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกับมาตรฐานของกลุ่มประเทศในทวีปยุโรปและทวีปอเมริกาเหนือ โดยที่จะไม่มีการนำเอาเทคโนโลยี OFDM มาใช้งาน เนื่องจากในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้งานระบบขนส่งอัจฉริยะที่เด่นชัด คือ ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติซึ่งเป็นระบบที่ไม่ต้องการอัตราเร็วของข้อมูลมากนักและในการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งที่ถูกติดตั้งอยู่ที่รถยนต์กับภาครับที่ถูกติดตั้งอยู่ที่อุปกรณ์ข้างถนนมีความเร็วซึ่งเป็นอุปสรรคของการติดต่อสื่อสารเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำเทคโนโลยี OFDM มาใช้งานร่วมกับระบบขนส่งอัจฉริยะ คุณลักษณะที่สำคัญของมาตรฐานดังกล่าวได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน ARIB STD-T75

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	5.8 GHz
Modulation type	ASK,QPSK
Data rate	1 Mbps for ASK 4 Mbps for QPSK
Communication	TDMA/FDD
Power supplied to RSU antenna	10 m to 30 m =300mW
Power supplied to OBU antenna	Less than 10 mW

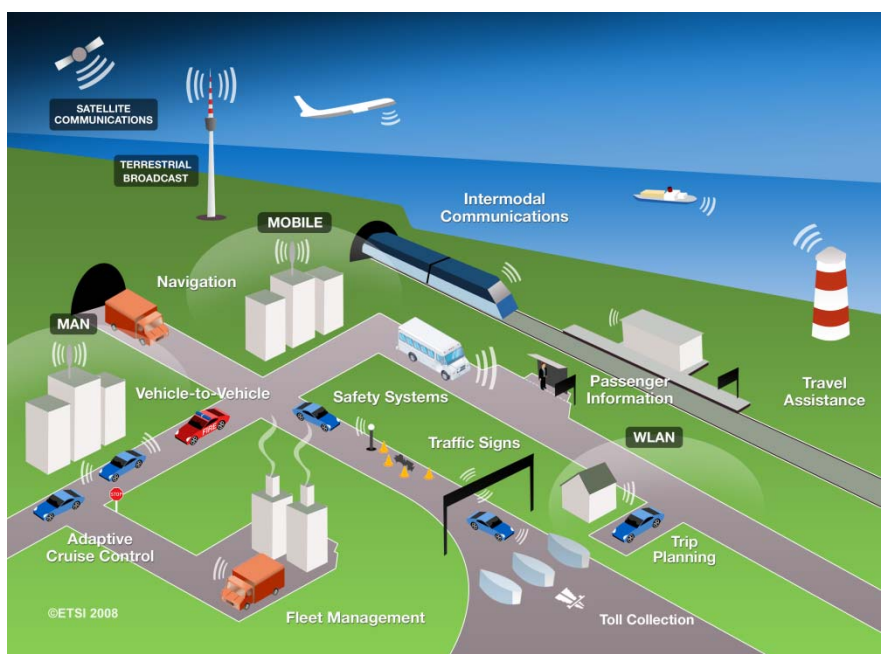
มาตรฐานต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นมาตรฐานที่องค์กรต่าง ๆ กำหนดขึ้นขึ้นมาเพื่อเป็นตัวอ้างอิงให้แก่ผู้พัฒนาและออกแบบระบบสื่อสารให้กับระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยในการเลือกมาตรฐานมาใช้งานนั้น จะต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน ตัวอย่างระบบขนส่งอัจฉริยะที่พบได้ทั่วไป ได้แก่ ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ ระบบรายงานสภาพการจราจร ระบบตรวจจับความเร็วของยานพาหนะ ระบบนำทาง ระบบช่วยจอดยานพาหนะ ระบบนับจำนวนยานพาหนะ ป้ายจราจรอัจฉริยะที่ใช้ในการรายงานสภาพการจราจร เป็นต้น อนึ่งในการเลือกใช้มาตรฐานสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะควรคำนึงถึงปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางด้วย เช่น ในการรายงานสภาพการจราจรให้กับยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ควรเลือกใช้มาตรฐานของประเทศในกลุ่มของอเมริกาเหนือคือ IEEE802.11p (WAVE-DSRC) เป็นต้น

### 2.3.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้

เนื่องจากระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับมีไม่มากนักทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สามารถต่อสู้กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทางและอุปกรณ์ติดรถได้ดี อาทิเช่น

- รองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง
- มีความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูล

ด้วยจุดเด่นดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้มีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ไปใช้งานด้านระบบขนส่งอัจฉริยะที่หลากหลาย อาทิเช่น ระบบแจ้งเหตุฉุกเฉินให้แก่ยานพาหนะ ระบบควบคุมความเร็วของยานพาหนะแบบปรับตัวได้ ระบบแจ้งเตือนการชนกันของยานพาหนะบริเวณแยกต่าง ๆ ระบบความปลอดภัยของยานพาหนะ ระบบเก็บเงินค่าผ่านทางอัตโนมัติ เป็นต้น และยังมีระบบอื่น ๆ อีกมากมายที่นำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะไปประยุกต์ใช้



รูปที่ 2.4 ภาพรวมระบบขนส่งอัจฉริยะ [ที่มา : [www.etsi.org](http://www.etsi.org)]

## 2.4 เทคโนโลยีโมโม

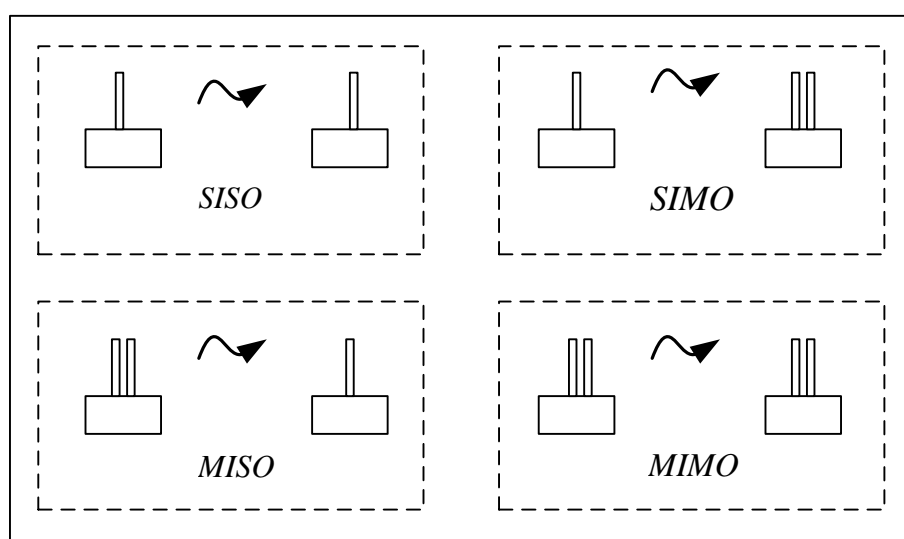
การสื่อสารไร้สายในปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมจากทั่วโลกเป็นอย่างมาก ยิ่งจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ความต้องการใช้งานก็ยิ่งมีมากขึ้นเท่านั้น อีกทั้งความถี่ที่มีอยู่ก็มีอยู่อย่างจำกัด เทคโนโลยีในอดีตนั้นไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้ หากทำการเพิ่มความถี่แล้วความถี่ก็สามารถทำได้แต่เป็นการสิ้นเปลืองความถี่ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด นักวิจัยทั่วโลกต่างมุ่งมั่นในการศึกษาค้นหาวิธีการที่จะได้มาซึ่งเทคโนโลยีที่รองรับการรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูง มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูง มีความจุของช่องสัญญาณมาก ๆ เพื่อรองรับการรับส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากแนวโน้มในปัจจุบันนี้ผู้ใช้งานมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลด้านภาพและเสียงที่คมชัดซึ่งมีขนาดข้อมูลใหญ่มาก จึงมีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้ค้นพบวิธีการที่จะให้ได้มาซึ่งเทคโนโลยีที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานดังที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยวิธีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับพร้อมทั้งเพิ่มเติมกระบวนการจัดการสัญญาณทั้งการเข้ารหัสสัญญาณ การถอดรหัสสัญญาณเข้าไปกับระบบ ด้วยเหตุดังข้างต้นจึงเป็นที่มาของระบบโมโม Multiple Input Multiple Output (MIMO) นั่นเอง

เทคนิคโมโม คือ การเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจำนวนมากกว่าหนึ่งต้นและสร้างกระบวนการให้สายอากาศที่เพิ่มเข้าไปนั้นช่วยกันรับส่งสัญญาณ และมีการนำสัญญาณที่ได้ไปจัดรูปแบบเพื่อให้สัญญาณที่ได้นั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น เมื่อสัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น



นั่นหมายถึง ประสิทธิภาพของระบบก็ต้องดีขึ้นไปด้วย อาทิเช่น ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลา (Throughput) อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล พื้นที่ในการติดต่อสื่อสารที่เพิ่มมากขึ้น ฯลฯ

การเพิ่มจำนวนสายอากาศให้กับเทคโนโลยีโมโนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ระบบที่ประกอบด้วยจำนวนสายอากาศภาคส่ง 1 ต้นและจำนวนสายอากาศที่ภาครับหลายต้น หรือ Single-Input Single-Output (SISO) ระบบที่ประกอบด้วยจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งจำนวนหลายต้นและจำนวนสายอากาศที่ภาครับมี 1 ต้น หรือ Multiple-Input Single-Output (MISO) และระบบที่ประกอบไปด้วยจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งหลายต้นและจำนวนสายอากาศที่ภาครับจำนวนหลายต้น หรือ Multiple-Input Multiple-Output โดยระบบดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพรวมระบบโมโน

#### 2.4.1 ประเภทของเทคโนโลยีโมโน

เทคโนโลยีโมโนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบเปิด Open-Loop และระบบปิด Close-Loop โดยทั้ง 2 ระบบนี้จะมีข้อแตกต่างกันคือ ในระบบปิดจะมีการป้อนกลับสัญญาณที่รับได้ไปวิเคราะห์ว่าสัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณภาพดีหรือไม่คืออย่างไร ถ้าไม่ดีก็จะทำการส่งข้อมูลป้อนกลับ ไปยังภาคส่งเพื่อให้ส่งข้อมูลมาใหม่ ในระบบปิดนี้จะมีคามซับซ้อนกว่าระบบเปิดมากแต่เมื่อเทียบกับคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นจะมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าระบบเปิด ซึ่งแตกต่างจากระบบเปิดที่ไม่มีป้อนกลับสัญญาณไปที่ภาคส่ง

### 1) ระบบเปิด (Open-loop)

เทคโนโลยีโมโระบบเปิดสามารถแบ่งประเภทตามเทคนิคการส่งสัญญาณ ออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ เทคโนโลยีแบบ Space-Time Coding และ เทคโนโลยีแบบ Spatial Multiplexing

#### เทคโนโลยีแบบ Space-time Coding

เทคโนโลยีแบบนี้จะอาศัยการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาซึ่งเป็นการเข้ารหัสที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้ามาในระบบเพื่อช่วยกันเข้ารหัส ผลที่ได้คือเกิดความหลากหลายทางตำแหน่งและเวลา ทำให้มีความทนทานต่อการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบไม่คงที่ และยังส่งผลให้มีความเชื่อถือในการส่งข้อมูล วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลานี้มีเทคนิคที่นิยมใช้ในการเข้ารหัสได้แก่

1. การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบเทรลลิส Space-Time Trellis Code (STTC)
2. การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก Space-Time Block Code (STBC)
3. การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบ Alamouti

การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบเทรลลิส Space-Time Trellis Code (STTC) เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณที่เป็นการทำไควเวอร์ซิตีที่ภาคส่ง เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการเข้ารหัสและถอดรหัสสูงมาก ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการเข้ารหัสที่ยากและถอดรหัสนี้กลับแลกลับมาด้วยประสิทธิภาพของระบบที่ดีขึ้น มีประสิทธิภาพในการต่อสู้กับอุปสรรคเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีได้ดี

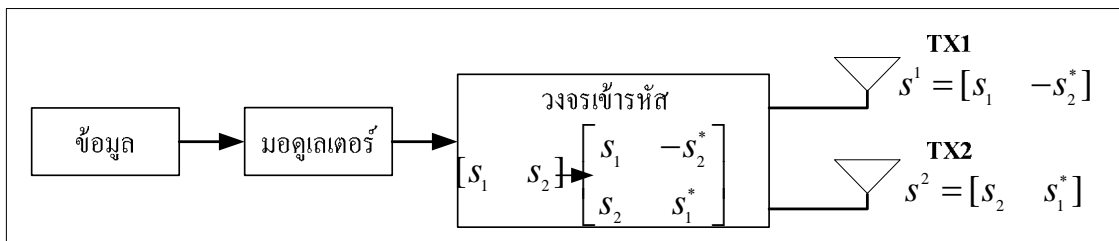
การเข้ารหัสเชิงปริภูมิและเวลาแบบบล็อก Space-Time Block Code (STBC) เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณที่มีความง่ายและไม่ซับซ้อน โดยเป็นการทำไควเวอร์ซิตีที่ภาคส่งโดยการใส่สายอากาศจำนวนหลายต้นที่ภาคส่ง (Alamouti, S.M., 1998) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการเทคนิคในการเข้ารหัสสัญญาณ โดยมีการดำเนินการแบบเชิงเส้นทั้งภาคส่งและภาครับ การเข้ารหัสสัญญาณและการถอดรหัสสัญญาณสามารถทำได้ด้วยบล็อก (Block) ของสัญลักษณ์ที่ถูกส่งออกไป

ตารางที่ 2.5 รูปแบบการเข้ารหัสของ Alamouti

	สายอากาศ 1	สายอากาศ 2
เวลา $t_1$	$s_1$	$s_2$
เวลา $t_2$	$-s_2^*$	$s_1^*$

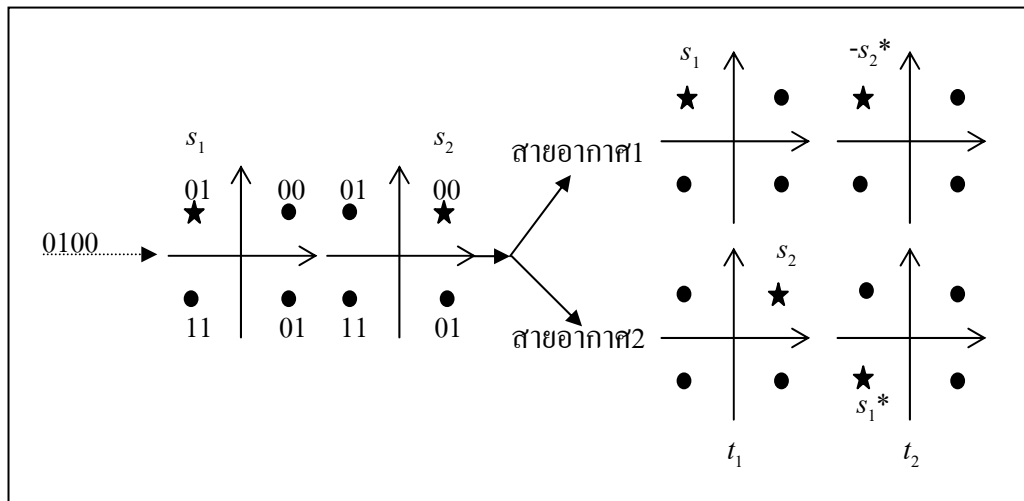
การเข้ารหัสเชิงปริภูมิเวลาแบบ Alamouti การเข้ารหัสแบบ Alamouti นั้นสามารถแสดงสัญลักษณ์ในการส่งสัญญาณได้ตามตารางที่ 2.5 เมื่อแหล่งกำเนิดข้อมูลสร้างสัญลักษณ์ข้อมูลส่งเข้าสู่ตัวมอดูเลเตอร์ ครั้งละ 2 สัญลักษณ์ จากนั้นสัญลักษณ์ทั้ง 2 จะถูกส่งเข้าไปสู่วงจรการเข้ารหัสและถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศส่งเพื่อส่งออกอากาศไปยังภาครับ การส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หรือสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาที่มีความต่อเนื่องกัน สมการที่ 2.1 แสดงรูปเมตริกซ์ของรูปแบบการส่งสัญญาณ โดยเมตริกซ์แถวจะแสดงตำแหน่งหรือสายอากาศที่จะส่ง ส่วนเมตริกซ์หลักจะแสดงเวลา ในช่วงเวลาที่  $t$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่  $s_1$  และ  $s_2$  ตามลำดับ และที่เวลา  $t+T$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ สัญญาณ  $-s_2^*$  และ  $s_1^*$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการเข้ารหัสแบบ Alamouti

ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเทคนิคการส่งสัญญาณโดยมีการเข้ารหัสแบบ Alamouti เข้ามาใช้งานด้วย ที่ภาคส่งมีจำนวนสายอากาศส่ง 2 ต้น และที่ภาครับมีจำนวนสายอากาศ 2 ต้น



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK

ตัวอย่างการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ได้แสดงดังรูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตสองสัญญาณจาก QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) คอนสเทลชันซึ่งแสดงอยู่ในระนาบเชิงซ้อน สัญลักษณ์ที่ถูกส่งจากสายอากาศส่งสองต้นได้แสดงในด้านขวาของรูป กระบวนการถอดรหัสสัญญาณอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  มีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นแรกไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,1}$  และรวมถึงสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่สองไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,2}$  จะต้องเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} h_{j,1} &= h_{j,1}(t) = h_{j,1}(t+T) = h_{j,1}(t_1) = h_{j,1}(t_2) \\ h_{j,2} &= h_{j,2}(t) = h_{j,2}(t+T) = h_{j,2}(t_1) = h_{j,2}(t_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  ของสองช่วงเวลา คือ  $r_j^1$  และ  $r_j^2$  สัญญาณที่รับได้ อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} r_j^1 &= h_{j,1} \cdot s_1 + h_{j,2} \cdot s_2 + n_j^1 \\ r_j^2 &= -h_{j,1} \cdot s_2^* + h_{j,2} \cdot s_1^* + n_j^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) องค์ประกอบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) ถูกเพิ่มลงไปที่ยานอากาศภาครับลำดับที่  $j$  ในช่วงระยะเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  แสดงโดย  $n_j^1$  และ  $n_j^2$  ตามลำดับ

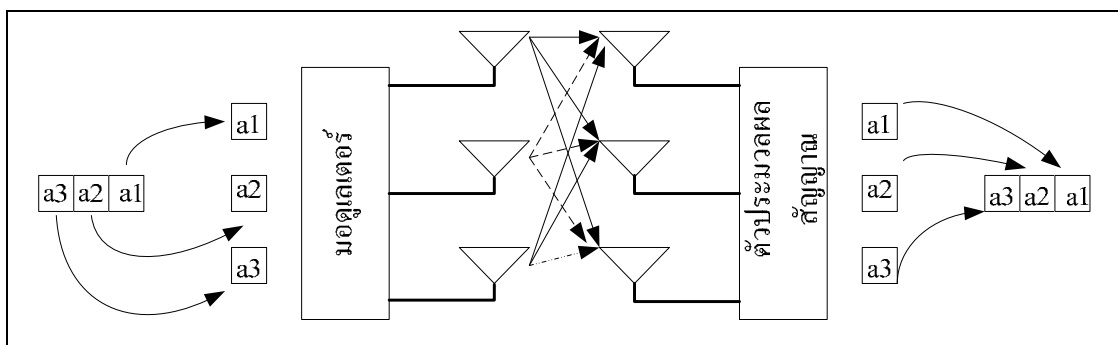
กระบวนการถอดรหัสทำได้โดยอาศัยการรวมของสัญญาณและการถอดรหัสแบบ Maximum likelihood อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการนี้ สัมประสิทธิ์ของสัญญาณถูกพิจารณาว่าถูกรับรู้โดยถูกต้องสมบูรณ์ที่ภาครับ ในการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่ภาครับสามารถทำได้โดยใช้สัญญาณนำร่อง (Pilot Signal) กระบวนการของการรวมเชิงเส้นและสัญญาณถูกป้อนไปยังส่วนถอดรหัสแบบ Maximum likelihood ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\widehat{S}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot r_j^1 + h_{j,2} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_i + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot n_j^1 + h_{j,2} \cdot (n_j^2)^* \right\} \\ \widehat{S}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot r_j^1 - h_{j,1} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot n_j^1 - h_{j,1} \cdot (n_j^2)^* \right\}\end{aligned}\quad (2.4)$$

เราจะเห็นว่าสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อในการตัดสินใจจากการถอดรหัสประกอบด้วยขนาดของสัญญาณที่ถูกส่งและสัญญาณรบกวน ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับผลรวมของขนาดสัญญาณที่ได้จากสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และสัญญาณรบกวนคือผลรวมของสัญญาณรบกวนที่ยานอากาศภาครับคูณกับสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ

### เทคโนโลยีแบบ Spatial-Multiplexing

เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณแบบสลับตำแหน่ง ซึ่งแตกต่างจากการเข้ารหัสแบบอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เทคนิคการเข้ารหัสในการส่งสัญญาณแบบนี้ให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่งจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมดเท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งต่อหนึ่งคาบสัญญาณ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการเข้ารหัสแบบ SM

เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้จะอาจเรียกง่าย ๆ ว่าต่างคนต่างส่งข้อมูลโดยที่ส่งความถี่เดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือช่วยให้อัตราการส่งข้อมูลสามารถส่งได้เร็วขึ้น แต่ก็ยังพบปัญหาในด้านการรบกวนกันของสัญญาณอยู่ ทำให้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้ไม่เหมาะสมกับสภาพการส่งสัญญาณแบบแนวตรง Line of Sight และไม่สามารถเพิ่มพื้นที่การสื่อสารออกไปได้ไกลมากนัก

#### 1) ระบบปิด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าระบบโมโม่แบบระบบปิดนั้นจะมีความแตกต่างจากระบบโมโม่แบบเปิดคือ ระบบปิดจะมีการป้อนกลับสัญญาณไปยังภาคส่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณให้ดีขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเทคนิคทางด้านสายอากาศเองได้รับความสนใจเพื่อพัฒนาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีโมโม่ ซึ่งเทคนิคทางด้านสายอากาศเองนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนแบบรูปการแผ่พลังงานในการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยรูปแบบที่ต้องการนั้นคือ จะเน้นให้ลำคลื่นหลักพุ่งตรงไปยังที่อยู่ของผู้ใช้งานอยู่เพื่อให้ได้กำลังส่งที่ดี ความแรงของสัญญาณที่ดี จึงส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลมีความเร็วสูง มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูงแต่ผู้ใช้งานก็ต้องยอมแลกกับความยุ่งยากซับซ้อนของระบบด้วย

### 2.4.2 จุดเด่นของเทคโนโลยีโมโม่

#### 1. อัตราขยายแถวลำดับ (Array gain)

ด้วยการที่เพิ่มจำนวนสายอากาศที่ใช้ขึ้นมาหลายต้น ทำให้อัตราขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะทางในการสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมในการสื่อสารเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนั้นแล้วเมื่อมองกลับไปยังภาครับ ทำให้ภาครับนั้นใช้พลังงานน้อยลงไปด้วย

## 2. อัตราขยายไดเวอร์ซิตี (Diversity gain)

โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีโมโม่เมื่อได้รับผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี สายอากาศแต่ละต้นจะได้รับผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณที่แตกต่างกันและเป็นอิสระต่อกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานของช่องสัญญาณจากในระบบเดิมคือระบบ SISO มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่ภาครับมาก เมื่อมีการใช้เทคนิคโมโม่จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงกำลังงานในช่องสัญญาณมีค่าลดลง

## 3. กำลังขยายมัลติเพลกซ์ (Spatial Multiplexing gain)

ด้วยการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับ ทำให้ความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ทำให้อัตราการส่งข้อมูลเร็วขึ้น สามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ได้เร็วขึ้น

## 4. ลดการแทรกสอด (Interference reduction)

เนื่องจากการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นจะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถลดการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณหรือ Co-channel Interference ได้

## 2.5 ช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

ในระบบเครือข่ายการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย อากาศเปรียบเสมือนตัวกลางในการรับส่งสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับ หากเปรียบกับระบบการสื่อสารแบบมีสายนั้นสายอากาศก็เปรียบเสมือนสาย ซึ่งหากสายนั้นมีขนาดใหญ่ก็สามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็ว และหากภายในสายไม่มีการหักงอ ก็จะได้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่ดี แต่ในทางตรงกันข้าม ไม่มีใครสามารถรับรู้ได้ว่าช่องสัญญาณไร้สายนั้นมีลักษณะอย่างไร นักวิจัยจึงได้พยายามสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายเพื่อให้มีความคล้ายคลึงกับสภาพความเป็นจริงของช่องสัญญาณจริงให้มากที่สุด โดยสามารถแบ่งรูปแบบของช่องสัญญาณไร้สายได้ดังนี้

### 2.5.1 ช่องสัญญาณแบบเรย์ลี

เมื่อการรับส่งสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสัญญาณในแนวสายตาหรือ Line of Sight กล่าวคือสัญญาณวิถีตรงถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งกับภาครับ เช่น การรับส่งสัญญาณในระยะไกลหรือในสภาพกลางแจ้ง (Outdoor) ซึ่งหากพิจารณาที่ภาครับจะพบว่าสัญญาณที่รับได้จะแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สัญญาณแบบร่วมเฟส (In-phase) และสัญญาณตั้งฉาก (Quadrature) เมื่อมีจำนวนสัญญาณหลายวิถี

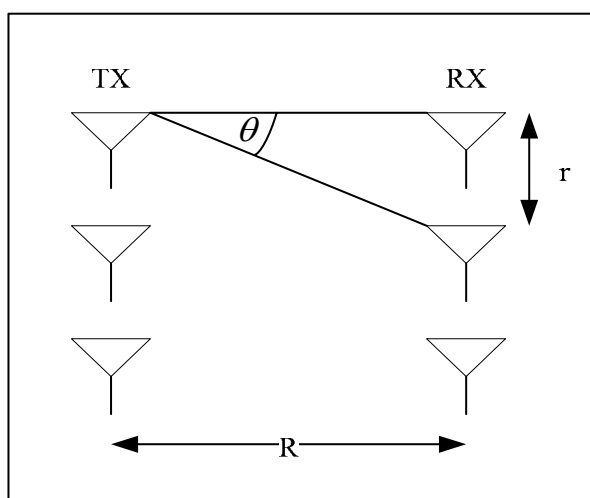
จำนวนมากที่ภาครับและจากองค์ความรู้ขีดจำกัดกลาง (Central Limit Theorem) นั้นทำให้สามารถประมาณการได้ว่าส่วนของสัญญาณรวมเฟสและส่วนของสัญญาณตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์จึงเป็นไปตามองค์ความรู้การแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) เข้ามาอธิบายแบบจำลองของช่องสัญญาณ

### 2.5.2 ช่องสัญญาณแบบไรเซียน

ในกรณีที่สภาพแวดล้อมในการรับส่งสัญญาณมีสัญญาณหลักหรือสัญญาณวิถีตรง (LOS) ที่เด่นชัด เช่น สภาพแวดล้อมในอาคาร (Indoor) และสัญญาณที่กระจัดกระจายเนื่องจากการสะท้อน ผลรวมของสัญญาณในแนววิถีตรงและสัญญาณในแนวที่เกิดการกระจัดกระจายสามารถแสดงได้ดัง (2.5)

$$\mathbf{H}_{Rice} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\phi_0} \mathbf{H}_{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{Rayleigh} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\mathbf{H}_{Rice}$  คือ เมทริกซ์ของช่องสัญญาณของระบบโมโม  $\mathbf{H}_{Rayleigh}$  คือเมทริกซ์ของช่องสัญญาณที่เกิดจากการกระจัดกระจายตัวของสัญญาณเนื่องมาจากการสะท้อน  $\mathbf{H}_{LOS}$  คือเมทริกซ์ของช่องสัญญาณในแนววิถีตรงหรือสัญญาณหลัก ค่า  $K$  คือค่าสัมประสิทธิ์ไรเซียน ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังของสัญญาณหลักต่อกำลังของสัญญาณหลายวิถี และค่า  $\phi_0$  คือค่าการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่เคลื่อนที่จากภาคส่งไปยังภาครับ



รูปที่ 2.9 รูปแบบเรขาคณิตสำหรับระบบสายอากาศแนวลำดับ



จากรูปที่ 2.9 ได้แสดงรูปแบบเรขาคณิตสำหรับการสื่อสารในระบบไมโม เมื่อ  $R$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับและ  $r$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแถวลำดับ สำหรับเมทริกซ์  $\mathbf{H}_{LOS}$  สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\mathbf{H}_{LOS} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\theta} & \dots & e^{-j(N_T-1)\theta} \\ e^{-j\theta} & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & e^{j\theta} \\ e^{-j(N_R-1)\theta} & e^{-j(N_R-2)\theta} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมของการเลื่อนเฟสระหว่างสายอากาศข้างเคียงของสายอากาศแถวลำดับ

เมื่อพิจารณาให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่งถูกสมมติให้มีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศแถวลำดับมาก ๆ นั่นคือ  $R \gg r$  จึงมีค่าลดลงจนถึงจุดที่สามารถละเลยได้ไม่พิจารณาได้ ในกรณีนี้  $\mathbf{H}_{LOS}$  สามารถพิจารณาเป็นเมทริกซ์ขนาด  $N_R \times N_T$  โดยที่องค์ประกอบภายในเมทริกซ์มีค่าเป็น 1 ( $\mathbf{H}(1)$ ) จากสมการที่ (2.6) จะได้

$$\mathbf{H}_{Rice} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\phi_0} \mathbf{H}(1) + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{Rayleigh} \quad (2.7)$$

จากสมมติฐาน เราสามารถพิจารณาช่องสัญญาณแบบใดเขียนได้ว่า

- สัญญาณหลักถูกพิจารณาว่าเกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นแบบ LOS
- ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่งถูกพิจารณาว่ามีค่ามากกว่าระยะห่าง

ระหว่างสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับ

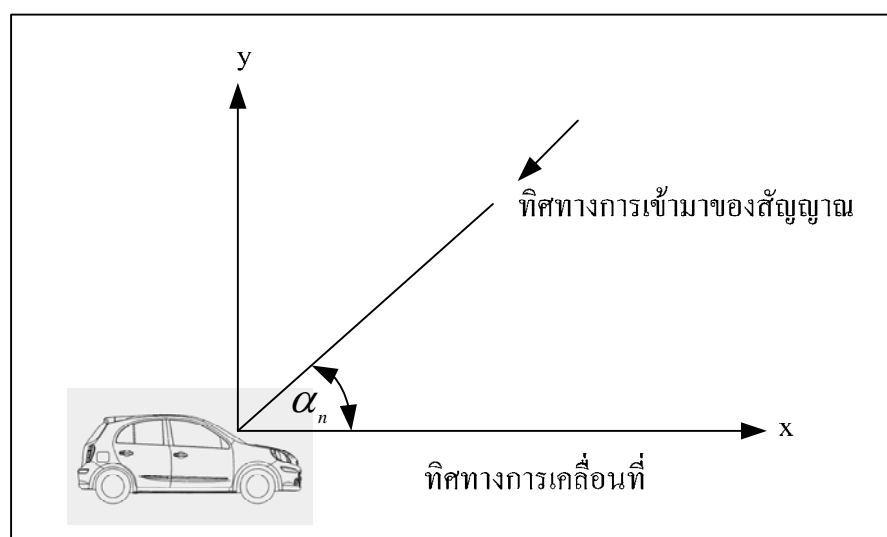
อย่างไรก็ตามข้อสมมติฐานเหล่านี้ไม่ถูกต้องเสมอไป ผลที่ได้บ่งบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณหลักต่อความจุช่องสัญญาณในระบบไมโม สำหรับกรณีที่สัญญาณหลักเกิดจากคลื่นหลายวิถี

จากสมการ (2.7) เมื่อคำนวณความจุช่องสัญญาณในระบบไมโมโดยใช้ช่องสัญญาณแบบใดเขียนและทำการเพิ่มค่า  $K$ -factor ของไรเขียนพบว่า เมื่อค่า  $K$  มีค่าสูงขึ้น ความจุช่องสัญญาณที่ได้มีค่าลดลง นั่นหมายความว่าผลจากสัญญาณหลัก (LOS) ส่งผลโดยตรงต่อความจุ

ช่องสัญญาณในระบบไมโม โดยที่ช่องสัญญาณที่ได้รับผลจากสัญญาณหลักมากกว่าสัญญาณหลายวิธีถือได้ว่าช่องสัญญาณดังกล่าวคือยประสิทธิภาพในด้านความจุช่องสัญญาณ

### 2.5.3 ความถี่ดอปเพลอร์

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า ปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการสื่อสารไร้สายคือ ความถี่ดอปเพลอร์ เมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงรูปที่ 2.10 ส่งผลให้สัญญาณที่มาถึงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป มุมของสัญญาณขาเข้า ( $\alpha_n$ ) ถูกกำหนดให้เป็นมุมระหว่างสัญญาณในวิถีที่  $n$  และทิศทางการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน ค่าความถี่ดอปเพลอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

$$f_n = f_d \cos \alpha_n \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f_d$  คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของผู้ใช้งาน  $v$  และค่า  $f_c$  คือค่าความถี่กลางที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของระบบ

$$f_d = \frac{v}{c} f_c \quad (2.9)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ ค่าความถี่ของสัญญาณพาห้

$c$  คือ ค่าความเร็วของแสง  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

เนื่องด้วยผลของการเกิดความถี่ดอปเพลอร์นี้เองทำให้ประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างภาคส่งและภาครับมีคุณภาพที่ด้อยลงไปด้วยความถี่ดอปเพลอร์นี้จะส่งผลให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่ถูกส่งกระจายออกไปในระหว่างที่ส่งข้อมูลเมื่อพิจารณาในเชิงเวลาจะพบว่าปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นี้จะทำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (Channel Impulse Response) มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

#### 2.5.4 การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

ในการส่งสัญญาณแบบไร้สายนั้นสัญญาณที่เดินทางจากภาคส่งไปยังภาครับที่ภาครับไม่สามารถรับสัญญาณได้ทั้งหมด เนื่องจากว่าระหว่างภาคส่งและภาครับนั้นมีสิ่งกีดขวาง มีสิ่งที่เป็นอุปสรรคต่อการรับส่งสัญญาณระหว่างภาคส่งภาครับอยู่มากมาย อาทิเช่น กำแพง ตึก ยานพาหนะ มนุษย์ ต้นไม้ ฯลฯ สัญญาณที่เดินทางมาจากภาคส่งเป็นเส้นเดียวเมื่อกระทบกับสิ่งกีดขวางก็จะแตกออกเป็นหลาย ๆ เส้น เราจึงเรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณหลายวิถีหรือ Multipath เมื่อเราทำการรับสัญญาณที่ภาครับจึงพบว่าสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นมีทั้งดีและไม่ดี เหตุผลคือสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นหากมีเป็นผลรวมจากสัญญาณที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันก็จะทำให้คุณภาพสัญญาณที่ได้นั้นมีคุณภาพดี แต่หากเป็นการแทรกสอดแบบหักล้างกันนั้นก็จะส่งผลให้ที่ภาครับมีคุณภาพสัญญาณไม่ดี จึงสามารถกล่าวได้ว่า การส่งสัญญาณจากภาคส่งมายังภาครับเมื่อสัญญาณกระทบสิ่งกีดขวางจึงก่อให้เกิดสัญญาณหลายวิถี เมื่อสัญญาณหลายวิถีวิ่งไปรวมกันยังภาครับในกรณีที่เกิดการแทรกสอดของสัญญาณหลายวิถีแบบหักล้างกันก็จะทำให้สัญญาณที่ได้คุณภาพไม่ดีจึงเป็นที่มาของ การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

##### 1. การแผ่แบบหน่วงเวลา (Delay spread)

ผลจากการเกิดสัญญาณหลายวิถีทำให้สัญญาณที่รับได้ที่ปลายทางประกอบไปด้วยสัญญาณที่สะท้อนมาจากหลายเส้นทาง ซึ่งมาถึงปลายทางที่ภาครับในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณที่รวมกันได้ที่ปลายทางจึงเกิดการหน่วงเวลาขึ้นมา ผลจากการเกิดการแผ่แบบหน่วงเวลานั้นจะทำให้เกิดการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและสภาพช่องสัญญาณ

##### 2. การแผ่แบบดอปเพลอร์ (Doppler spread)

การเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานออกจากสถานีฐาน ส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาถึงภาครับในแต่ละเส้นทางนั้นเกิดการเลื่อนความถี่ เรียกการเลื่อนความถี่แบบนี้ว่า การเลื่อนความถี่

แบบคอปเพลอร์ ผลจากการแผ่แบบคอปเพลอร์นี้จะทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณตามเวลานั้นจะมีอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความเร็วของการเกิดการจางหายและการความเร็วในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานด้วย

ในการพิจารณาในการแยกประเภทของการจางหายนั้นสามารถพิจารณาได้จากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยตัวแปรที่ใช้พิจารณาประเภทของการจางหายนั้น ได้แก่ ช่วงเวลาสัญลักษณ์ (Symbol period) อัตราการส่งสัญญาณ (Transmission rate) ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)

การแผ่แบบหน่วงเวลา (delay spread) ส่งผลต่อการจางหายของสัญญาณได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การจางหายของสัญญาณแบบราบ (flat fading) และการจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่ (frequency selective fading)

การแผ่ของคอปเพลอร์ (doppler spread) ส่งผลให้เกิดการจางหายของสัญญาณ 2 รูปแบบ ได้แก่ การจางหายของสัญญาณแบบช้า (slow fading) และการจางหายแบบรวดเร็ว (fast fading)

จะเห็นได้ว่าในการพิจารณาประเภทของการจางหายของสัญญาณนั้นสามารถแยกประเภทได้ตามการเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณไร้สาย ซึ่งไม่ว่าจะเลือกพิจารณาปัจจัยก็สามารถพิจารณาได้เช่นกัน เนื่องจากการแผ่แบบหน่วงเวลา และการแผ่แบบคอปเพลอร์นั้นเป็นอิสระต่อกัน เนื้อหาในส่วนถัดไปจะเป็นการอธิบายถึงการจางหายของสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ

#### กรณีที่พิจารณาการแผ่แบบหน่วงเวลา (delay spread)

เมื่อเราพิจารณาการแผ่แบบหน่วงเวลา เนื่องจากสัญญาณหลายวิถีจะทำให้สามารถแยกประเภทของการจางหายของสัญญาณได้ 2 รูปแบบ

#### ก) การจางหายของสัญญาณแบบราบ (Flat Fading)

คุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณแบบราบ จะมีลักษณะเชิงสเปกตรัมเหมือนเดิม แต่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลกระทบของสัญญาณหลายวิถี เมื่อค่ากำลังของช่องสัญญาณเปลี่ยนนั้นคือการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของช่องสัญญาณหรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด การแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักจะพบทั่วไปจะเป็นการกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution)

#### ข) การจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่ (Frequency selective fading)

การจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่นี้ สเปกตรัมของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณไม่เท่ากันทั้งหมด โดยสเปกตรัมที่อยู่นอกแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบที่แตกต่างกันออกไป ช่วงความถี่ของช่องสัญญาณที่ได้รับ

ผลกระทบเนื่องจากช่องสัญญาณที่มีขนาดเท่ากันเรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วมนัย (Coherence bandwidth) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ เนื่องจากผลตอบสนองของช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งมีความยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับถูกลดขนาดและมีการประวิงเวลาจึงเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ขึ้นมา

#### *กรณีทีพิจารณาการแผ่ของคอปเพลอร์ (Doppler spread)*

การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีเมื่อพิจารณาการแผ่ของคอปเพลอร์จะเป็นการพิจารณาเมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่สามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท

##### 1) การจางหายของสัญญาณแบบรวดเร็ว (Fast fading)

การเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานส่งผลให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายได้แก่ Doppler spread และ Coherence time เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากการจางหายแบบรวดเร็วนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ภายในช่วงเวลาที่ยังส่งสัญญาณ เวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์และคุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลาย ๆ ครั้ง ในขณะที่กำลังส่งสัญลักษณ์ออกไป เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณแบบรวดเร็วผลคือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณก็จะผิ่คเพิ่มขึ้นไปเช่นกัน

##### 2) การจางหายของสัญญาณแบบช้า (Slow fading)

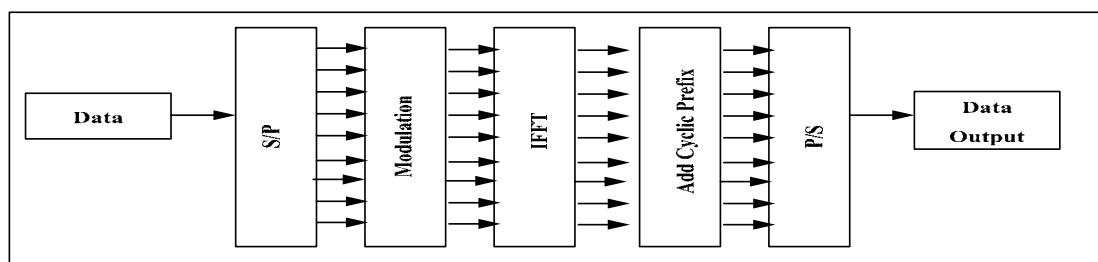
การจางหายของสัญญาณแบบช้าเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหรือ เวลาร่วมนัย (Coherence time) มากกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol time) ซึ่งการจางหายของสัญญาณแบบช้านี้จะทำให้ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบในช่วงเวลาที่ยาวนานติดต่อกัน

## 2.6 เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplex : OFDM)

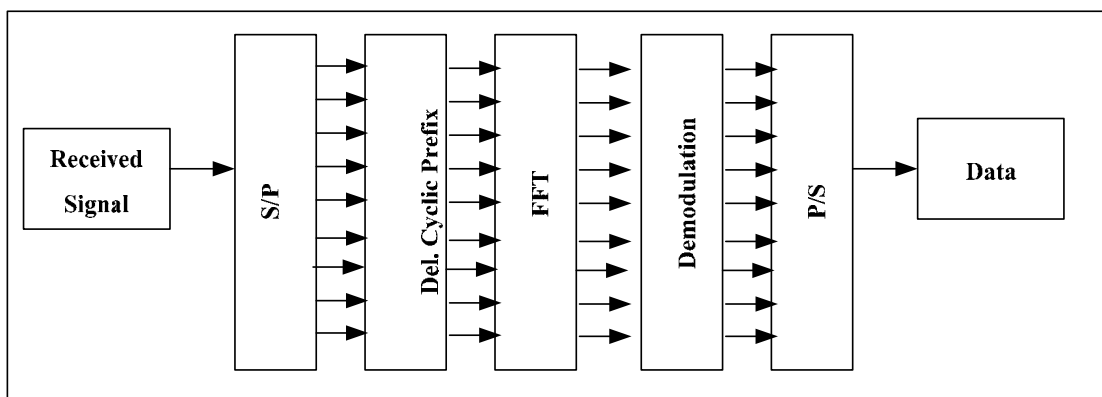
เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมอดูเลตแบบหลายสัญญาณพาหะ (multiple carrier modulation) เป็นการแบ่งช่องสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารออกเป็นช่องย่อย ๆ และในแต่ละส่วนของช่องสัญญาณที่ถูกแบ่งนั้นจะเป็นอิสระต่อกัน หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็นรูปแบบของการสื่อสารแบบขนาน โอเอฟดีเอ็มถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการสื่อสารไร้สายที่มีแบนด์กว้าง (Broad Band) มีอัตราการส่งข้อมูลสูง เช่น ระบบเครือข่ายไร้สาย Wireless Local Area Network (WLAN) ระบบกระจายเสียงแบบดิจิทัล Digital Audio Broadcasting (DAB) ระบบโทรทัศน์แบบดิจิทัล Digital Television (DTV) และอีกหลากหลายงานที่นำเทคนิคโอเอฟดีเอ็มไปประยุกต์ใช้

ในการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันปฏิเสธไม่ได้เลยว่า ปัญหาเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีที่เป็นผลมาจากการส่งสัญญาณจากภาคส่งออกไป แทนที่สัญญาณนั้นจะเดินทางในทางตรงไปหาภาครับในทันที แต่ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับนั้น ยังมี ติก อาคาร ต้นไม้ มนุษย์ รถยนต์ เป็นสิ่งกีดขวางทำให้สัญญาณที่เดินทางมาที่ภาครับนั้นเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางแล้วเกิดการสะท้อน ซึ่งการสะท้อนนั้นเมื่อสัญญาณเดินทางมาที่ภาครับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเฟสและแอมพลิจูด เมื่อสัญญาณเกิดการรวมกันแต่การรวมกันของสัญญาณที่ภาครับนั้นมีการรวมกันทั้งแบบเสริมกันและหักล้างกันหากรวมกันแบบเสริมกันก็เป็นผลดีต่อระบบ แต่หากเป็นการรวมกันของสัญญาณแบบหักล้างการนั้นจะส่งผลไปยังประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร เพิ่มความผิดพลาดให้กับระบบสื่อสาร เพิ่มความยุ่งยากให้แก่นักวิจัยในการแก้ปัญหา

สำหรับการส่งและรับข้อมูลด้วยเทคโนโลยี OFDM นั้น ที่ภาคส่งจะมีการแบ่งแยกความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อย ๆ จำนวน  $N$  ช่อง แต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญลักษณ์ดิจิทัลซึ่งทำให้สัญญาณพาหะย่อยเหล่านี้มีความตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในรูปที่ 2.11 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งสัญญาณ โดยใช้เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็ม หลังจากนั้นก็แบ่งช่องสัญญาณออกเป็นช่องย่อย ๆ แล้วก็จะนำสัญญาณที่ถูกแบ่งกลุ่มนั้นไปทำการมอดูเลชันกับสัญญาณพาหะย่อย รูปแบบในการมอดูเลชันสัญญาณพาหะที่นิยมทั่วไปได้แก่ BPSK QPSK QAM 16 QAM และ 64 QAM สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลชันนี้จะอยู่ในรูปของโดเมนความถี่ ในการที่จะแปลงกลับมาเป็นสัญญาณในแกนเวลาอีกครั้งจะสามารถทำได้โดยอาศัยการแปลงกลับฟาสต์ฟูเรียร์ (IFFT) จากนั้นจะเป็นกระบวนการที่เสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่ตัวสัญญาณเพื่อแก้ปัญหาการรบกวนของสัญญาณเนื่องจากการประวิงเวลาที่เป็นผลมาจากการได้รับผลกระทบของการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี สุดท้ายจะเป็นการใช้เทคนิคการรวมข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบขนานมาเป็นข้อมูลแบบอนุกรม (Parallel to Serial) สำหรับที่ภาครับจะมีกระบวนการทำงานที่กลับกันกับภาคส่งดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 กระบวนการในการส่งสัญญาณ OFDM



รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของภาครับสัญญาณ OFDM

ประโยชน์ของเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็ม ได้แก่ สามารถลดผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี เมื่อมีการเติมไซคลิกจะทำให้สามารถแก้ปัญหาการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้ สามารถรับส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงได้ เป็นการใช้ประโยชน์ของแถบความถี่พาหะได้อย่างเต็มประสิทธิภาพได้ ตัวอย่างการนำเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มไปประยุกต์ใช้ได้แก่ การส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบดิจิตอล ระบบ WiMax ระบบวิทยุกระจายเสียงดิจิตอล เป็นต้น

## 2.7 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงองค์ความรู้ระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยกล่าวถึงมาตรฐานที่ใช้กันทั่วโลกจะมีอยู่ 3 ค่า ได้แก่ มาตรฐานสำหรับทวีปอเมริกาเหนือ มาตรฐานสำหรับทวีปยุโรป และมาตรฐานสำหรับประเทศญี่ปุ่น จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้เมื่อนำมาใช้กับระบบขนส่งอัจฉริยะสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะหรือ Vehicle to Vehicle (V2V) และการติดต่อสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง Vehicle to Infrastructure (V2I) อีกทั้งยังได้กล่าวถึงเทคโนโลยีโมโมซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบเปิดและระบบปิดซึ่งทั้งสองระบบมีความแตกต่างกันที่ระบบปิดจะต้องมีการป้อนกลับสัญญาณเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณให้ดีขึ้น ส่วนระบบเปิดนั้นไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณทั้งสองระบบต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงช่องสัญญาณในการสื่อสาร ซึ่งอุปสรรคจากสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ก่อให้เกิดการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี Multipath Fading ซึ่งส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านเฟส และ แอมพลิจูด จึงส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสาร ในที่สุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มที่เป็นการนำข้อมูลความเร็ว

สูงมาแบ่งออกเป็นข้อมูลความเร็วต่ำย่อย ๆ แล้วผ่านกระบวนการการสร้างสัญญาณ โอเอฟดีเอ็ม พร้อมทั้งการเติมไซคลิกเข้าไปที่ตัวสัญญาณทำให้สามารถทนต่อปัญหาจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิธีได้



## บทที่ 3

### เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

#### 3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ Software Defined Radio (SDR) ซึ่งจะได้กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องตลอดจนถึงกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีในการสื่อสารมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมาก จากที่สามารถรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วต่ำ ๆ ในอดีต อัตราความผิดพลาดมีมากมาย แต่ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีในการสื่อสารมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วสามารถพัฒนาให้ระบบสามารถมีคุณภาพและประสิทธิภาพที่ดีได้ สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง ๆ ได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านฮาร์ดแวร์อยู่ ยิ่งระบบสื่อสารนั้นมีประสิทธิภาพดีเท่าไร ฮาร์ดแวร์ของระบบและส่วนประกอบต่าง ๆ ยังมีความซับซ้อนมากขึ้นเท่านั้นอีกทั้งยังมีราคาสูงตามไปด้วย นักวิจัยจึงพยายามคิดหาวิธีในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยเปลี่ยนปัญหาจากปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์ไปเป็นปัญหาทางด้านซอฟต์แวร์แทน ซึ่งนี่ก็เป็นจุดกำเนิดของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ขึ้นมา

#### 3.2 เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

##### Software Defined Radio (SDR)

Software Defined Radio (SDR) คือ ระบบสื่อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงจากระบบเดิมที่มีการวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ mixers filters amplifiers modulator demodulator detector ไว้ในระบบ แต่ระบบ SDR (เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์) มีการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังกล่าวมาข้างต้นด้วยซอฟต์แวร์ที่ถูกติดตั้งอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรืออุปกรณ์ embedded computing devices ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงปัญหาจากปัญหาด้านฮาร์ดแวร์ไปสู่ปัญหาในด้านซอฟต์แวร์ คุณลักษณะเบื้องต้นของเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์คือ มีการใช้ซอฟต์แวร์ในการกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณ และทำการดีมอดูเลตสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับด้วยซอฟต์แวร์ ในทางตรงกันข้ามแล้วระบบสื่อสารเดิมมีการใช้วงจรแอนะล็อกที่มีขนาดใหญ่ แต่เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์นี้เป็นการใช้ข้อดีของวงจรแอนะล็อก

มารวมกันกับข้อดีของวงจรดิจิทัลเพื่อสร้างเป็นระบบสื่อสาร โดยใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์เป็นการพัฒนาการออกแบบระบบสื่อสารที่มีความสามารถในการสร้างสัญญาณวิทยุที่มีการเปลี่ยนแปลงในอากาศ เป็นการเพิ่มตัวเลือกอีกตัวหนึ่งแก่ผู้ใช้งาน ในทางทฤษฎีเทคโนโลยี SDR นั้นสามารถทำงานได้เหมือนกันกับระบบสื่อสารแบบดั้งเดิมแต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี SDR นี้ก็ยังคงมีความยืดหยุ่นสูง เหมาะแก่นักออกแบบระบบสื่อสารที่สามารถใช้เป็นตัวเลือกหนึ่งในการสร้างระบบสื่อสารที่ยาก ๆ ในแบบเดิมให้ง่ายขึ้น ด้วยการที่ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบสื่อสารผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ และยังง่ายต่อการใช้งานระบบสื่อสาร น่าสนใจและเป็นที่ยึดความสนใจของเหล่านักออกแบบและพัฒนาาระบบสื่อสาร ในการสร้างงานวิจัย หรือแอปพลิเคชันใหม่ ๆ ออกมาสู่ผู้บริโภคในท้องตลาด

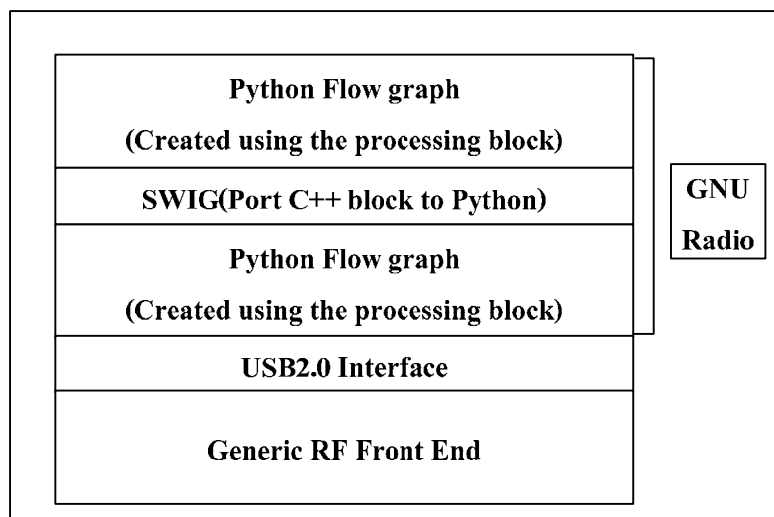
### 3.3 GNU Radio Software package

GNU Radio คือ ซอฟต์แวร์ที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเรียนรู้ การสร้างและการใช้งานเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ GNU Radio มีการให้ไลบรารีของการประมวลผลสัญญาณมาให้มากมาย ซึ่ง GNU Radio นี้เป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีลิขสิทธิ์สามารถใช้งานได้ฟรี ซอฟต์แวร์นี้ทำให้ซอสโค้ดที่สมบูรณ์แบบสำหรับการทดลองสร้างระบบสื่อสารโดยไม่มีการปิดบังรายละเอียดของโค้ดโปรแกรมแม้แต่ชนิดเดียว ในการใช้งาน GNU Radio วิศวกรผู้ออกแบบระบบสื่อสารจะต้องมีพื้นฐานความรู้ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

- 1) การเขียนโปรแกรมแบบ Objected-oriented programming
- 2) การเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาไพธอน (Python) และภาษาซี C++
- 3) ทักษะในการใช้งานระบบปฏิบัติการลินุกซ์ โดยใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ อุบุนตุ (Ubuntu)
- 4) ในลำดับสุดท้ายจะต้องมีพื้นฐานความรู้ในด้านระบบการสื่อสารไร้สาย เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ฮาร์ดแวร์เบื้องต้น และการออกแบบวงจรไฟฟ้าทุกข้อที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ใช้งาน GNU Radio ทุกคนจะต้องมี

ซอฟต์แวร์ GNU Radio นี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วน ดังรูปที่ 3.1 โดยที่บล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ ประมวลผลประสิทธิภาพของระบบทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นจากการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา C++ ในส่วนที่สูงขึ้นไปคือ การบริหารจัดการระบบ การเชื่อมต่อระหว่างบล็อกแต่ละบล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณตลอดจนใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณนั้นสร้างขึ้นจากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาไพธอน บล็อกสำหรับใช้ในการ

ประมวลผลสัญญาณที่มีการใช้งานเป็นประจำหรือมีการใช้งานอยู่บ่อย ๆ จะมีมาให้พร้อมอยู่แล้วซึ่งจะอยู่ในส่วนของตัวโปรแกรม GNU Radio



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ GNU Radio

โครงสร้างดังรูปนี้จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับโครงสร้างของแบบจำลองเครือข่าย OSI-7 Layer โดยชั้นล่างสุดจะให้บริการแก่ชั้นสูงสุด ชั้นสูงสุดจะเป็นที่บรรจุตัวโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ โดยการใช้การเขียนโปรแกรมภาษา C++ ในการพัฒนาโปรแกรม ภายในบล็อกที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณในแต่ละบล็อกจะเป็นตัวแทนของการประมวลผลสัญญาณของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบสื่อสาร โดยแต่ละบล็อกสามารถเชื่อมต่อการทำงานด้วยกันได้ผ่านทาง flow graph จะเห็นได้ว่าตัวบล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณและตัวบล็อกที่เป็นแอปพลิเคชันนั้นถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยภาษาที่แตกต่างกัน การที่จะทำให้ทั้ง 2 บล็อก คือ บล็อกในการประมวลผลสัญญาณและบล็อกของแอปพลิเคชันสามารถสื่อสารกันได้ต้องใช้ SWIG ซึ่ง SWIG เป็นเครื่องมือในการเชื่อมต่อระหว่างคลาสของโปรแกรมภาษา C++ กับ Flow graph ที่ถูกพัฒนาด้วยภาษาไพธอน หรือหากมองให้เป็นเรื่องง่าย ๆ SWIG จะทำการแปลงคลาสของ C++ ให้อยู่ในรูปแบบที่คล้ายคลึงกับคลาสของภาษาไพธอนนั่นเอง ไม่ว่าจะด้วยเหตุใดก็ตามโค้ดโปรแกรมที่ถูกเขียนด้วยภาษาไพธอนนั้นมีข้อดีที่โค้ดโปรแกรมสั้น แต่ทำงานได้ดี อีกทั้งยังเหมาะสมในการใช้งานกับเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ ส่วนที่ยากที่สุดในการพัฒนาเทคโนโลยีนี้คือ การสร้างตัวประมวลผลสัญญาณด้วยภาษา C++ มีกฎอยู่อย่างหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งมีใจความว่า “สำหรับการสร้างแอปพลิเคชันใด ๆ นั้น ก่อนที่จะสร้างเราต้องทราบวัตถุประสงค์ในการสร้าง ซึ่งในระดับของ

ภาษาไพธอนนั้น จะทำการแสดงไคอะแกรมทิศทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณจากต้นกำเนิดไปยังจุดรับสัญญาณ ในบางครั้งก็ยังสามารถสนับสนุนการทำงานแบบ GUI ด้วย” ฉะนั้นการเรียนรู้ภาษาไพธอนจึงจำเป็นอย่างมากในการก้าวเข้ามาสู่โลกแห่งการเรียนรู้ของชุดโปรแกรม GNU Radio ข้อดีของภาษาไพธอน อาทิเช่นเป็นภาษาที่มีประสิทธิภาพ เป็นภาษาที่ง่ายและยืดหยุ่นในการเขียน โปรแกรม อีกทั้งหากเรามีความชำนาญด้านการเขียนโปรแกรมมาภาษา C++ อยู่แล้วก็ยิ่งทำให้โลกของเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ดูง่ายขึ้นและง่ายต่อการเรียนรู้

### 3.3.1 โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน

ในส่วนของโครงสร้างของโปรแกรมนี้อาจจะแยกออกเป็น 3 ส่วน ดังเนื้อหาในส่วนถัดไปนี้

```
#!/usr/bin/env python
#ส่วนนี้เป็นการประกาศให้ตัวแปลภาษาไพธอนให้คอมไพล์สคริปไพธอนนี้ได้
#ส่วนนี้เป็นการนำเข้าออบเจกต์ที่ต้องการใช้งานมาจากโมดูล โดยที่แต่ละออบเจกต์นั้นขึ้นอยู่กับงานที่ต้องการใช้

from gnuradio import gr, gru
from gnuradio import usrp
from gnuradio import eng_notation
#โค้ดที่เชื่อมต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่า Gnu Radio แยกการทำงานออกเป็น 3 ส่วน
####ส่วนที่ 1 Radio Class###
# 'gr.top_block' รับช่วงต่อจาก class ที่เราสร้างขึ้นคือ 'digital_radio'
class digital_radio(gr.top_block):
#เป็นการเริ่มทำงานของฟังก์ชันและการตั้งค่าระบบวิทยุ
def __init__(self):
#เริ่มการทำงานของ parent class
gr.top_block.__init__(self)
#ตั้งค่า block สำหรับระบบวิทยุ
self.source = setup_source()
self.sink = setup_USRP()
#เชื่อมต่อบล็อกใน Flow graph
self.connect(self.source, self.sink)
```

### ###ส่วนที่ 2 Main function ###

#ฟังก์ชันนี้จะถูกเรียกไปใช้งานเมื่อผู้ใช้งานทำการสั่งงานผ่านทาง command line

```
def main():
```

#สร้างระบบที่เราต้องการสร้าง ฟังก์ชัน \_\_init\_\_ จะถูกเรียกขึ้นมาใช้งานอย่าง

อัตโนมัติ

#ในส่วนนี้ เราจะต้องสร้างพารามิเตอร์เพื่อส่งไปยัง class

```
radio = digital_radio()
```

#เริ่มการทำงานของ Flow graph

```
radio.start()
```

#บริเวณนี้เราสามารถใส่โค้ดของระบบที่เราต้องการสร้างหรืองานที่ผู้ใช้งาน

ต้องการพัฒนาขึ้นมาใช้งาน

#รอจนSource ส่งข้อมูลเสร็จ

```
radio.Wait()
```

### ###ส่วนที่ 3 โปรแกรมเริ่มทำงาน ###

#ตรวจสอบว่า module ที่ใช้นั้นสามารถรันด้วยตนเองได้ไหม หรือว่าต้องรัน

ด้วย moduleอื่น

```
if __name__ == '__main__':
```

#หากสามารถรันด้วยตนเองได้ ก็ให้ try ทำการรันฟังก์ชัน main ทันที

```
try:
```

```
main()
```

#หากมีการรบกวนโดย keyboard โปรแกรมจะหยุดการทำงานทันทีโดยออก

จาก mainฟังก์ชัน

```
except KeyboardInterrupt:
```

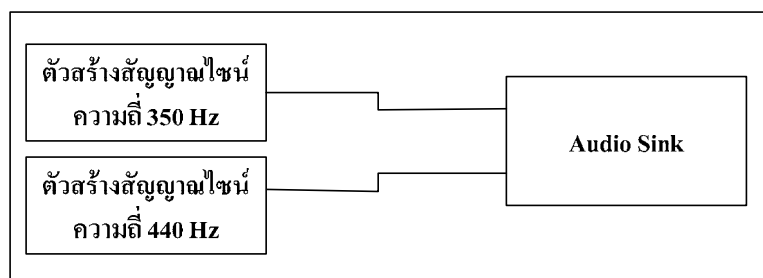
#'pass' นี้เป็นตัวหลักโดยที่จะถูกใช้งานเมื่อส่วนของโปรแกรมบางส่วนไม่ทำงาน

```
pass
```

### ตัวอย่างการใช้ภาษาไพธอนพัฒนาอแพพลิเคชัน

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงโครงสร้างโปรแกรมภาษาไพธอนที่ใช้สำหรับการสร้างแอปพลิเคชันของระบบสื่อสาร ในที่นี้จะยกตัวอย่างการสร้างระบบสัญญาณโทรศัพท์แบบ Dial tone โดยเริ่มต้นที่การออกแบบบล็อกหรือที่เรียกว่า Flow graph ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แสดงทิศทางการเดินทางของสัญญาณ จุดเชื่อมต่อของสัญญาณในระบบดังกล่าวที่จะเป็นจะต้องมีในระบบ

ที่ต้องการสร้าง ในระบบโทรศัพท์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยตัวสร้างสัญญาณไซน์ 2 ตัวเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์ 2 ความถี่ และเชื่อมต่อไปยังการ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลอง Flow graph ของระบบโทรศัพท์แบบ dial tone

ในตัวอย่างนี้เริ่มต้นบรรทัดแรก เป็นการประกาศให้ตัวแปรภาษาไพธอนสามารถคอมไพล์ตัวโปรแกรมได้ จากนั้นจะเป็นการเรียกใช้โมดูลจากแพ็คเกจ GNU radio และเรียกใช้ฟังก์ชันจากโมดูลในบรรทัดที่ 2 และ 3 ในบรรทัดที่ 4 เป็นการสร้างคลาสสำหรับระบบที่เราต้องการสร้างชื่อคลาสว่า `my_top_block` ในบรรทัดที่ 5 เป็นการสร้างฟังก์ชันชื่อ `init` และส่วนถัดไปตั้งแต่บรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 11 เป็นการสร้างระบบตามที่ใช้งานได้ออกแบบไว้ และในบรรทัดที่ 12 และ 13 เป็นการใช้เมธอด `connect` เข้ามาสร้าง flow graph ให้สัญญาณที่ถูกสร้างเดินทางจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังปลายทางที่ต้องการนั่นคือการ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้

```

1 #!/usr/bin/env python
2 from gnuradio import gr
3 from gnuradio import audio
4 class my_top_block(gr.top_block):
5     def __init__(self):
6         gr.top_block.__init__(self)
7         sample_rate = 32000
8         ampl = 0.1

```

```

9  src0 = gr.sig_source_f (sample_rate, gr.GR_SIN_WAVE, 350, ampl)
10 src1 = gr.sig_source_f (sample_rate, gr.GR_SIN_WAVE, 440, ampl)
11     dst = audio.sink (sample_rate, "")
12     self.connect (src0, (dst, 0))
13     self.connect (src1, (dst, 1))
14 if __name__ == '__main__':
15     try:
16         my_top_block().run()
17     except KeyboardInterrupt:
18         pass

```

### 3.3.2 การสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณสำหรับ GNU Radio

แพ็คเกจของ GNU Radio ที่ให้มานั้นประกอบไปด้วยบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณที่หลากหลาย อาทิเช่น การมอดูเลตสัญญาณ การดีมอดูเลตสัญญาณ การสร้างแพ็คเกจข้อมูล เป็นต้น แต่สำหรับการสร้างระบบสื่อสารของผู้ใช้งานนั้น ยังมีบางบล็อกประมวลผลสัญญาณที่ไม่มีในแพ็คเกจ GNU radio ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ใช้งานจะต้องเรียนรู้ถึงการสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณขึ้นมาเอง โดยการสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณนี้สามารถทำภายนอกแพ็คเกจหลักของ GNU Radio ได้แล้วค่อยเพิ่มเข้าไปในไลบรารีของแพ็คเกจ GNU Radio จากนั้นจึงประกาศให้ทั้งแพ็คเกจรับรู้ว่าคุณมีการสร้างบล็อกขึ้นมาใหม่ในแพ็คเกจ ซึ่งการเรียกใช้บล็อกที่สร้างขึ้นมาใหม่นั้นสามารถเรียกใช้ได้ผ่านทางเมธอด import แต่ข้อควรคำนึงถึงนั่นคือ บล็อกในการประมวลผลสัญญาณนี้จะต้องถูกพัฒนาด้วยภาษา C++ แต่การพัฒนาแอปพลิเคชันกลับพัฒนาผ่านทางภาษาไพธอน เครื่องมือสำคัญในการทำให้ทั้ง 2 ภาษาสามารถสื่อสารกันได้นั้นคือ Simplified Wrapper and Interface Generator (SWIG)

gr\_block เป็นคลาสแรกพื้นฐานของทุก ๆ คลาสที่ประกอบอยู่ใน GNU Radio แพ็คเกจ ซึ่งในการสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณนั้นจะต้องสร้างตัวโปรแกรมด้วยภาษา C++ และจะต้องสร้างขึ้นมาทั้งหมด 3 ส่วนประกอบได้แก่

1. .h เป็นการสร้างไลบรารีให้กับโค้ดโปรแกรม
2. .cc เป็นการกำหนดชื่อคลาสใหม่และยอมให้ภาษาไพธอนสามารถเรียกไป

ใช้งานได้

3. .i เป็นตัวบอก SWIG ว่าจะสร้างการเชื่อมต่อกับบล็อกต่าง ๆ อย่างไร  
 เนื้อหาในส่วนถัดไปนี้จะได้อธิบายถึงตัวอย่างการสร้างบล็อกสำหรับการ  
 ประมวลผลสัญญาณเพื่อใช้ในการหาขนาดของสัญญาณขาเข้าที่เป็นจุดทศนิยม ในการสร้างบล็อก  
 ประมวลผลสัญญาณจะต้องทำการสร้างทั้งหมด 3 ไฟล์ .cc ,.h และ .i สำหรับตัวอย่างนี้บล็อกในการ  
 ประมวลผลสัญญาณมีชื่อว่า how\_to\_square\_ff

ส่วนที่ 1 สำหรับไฟล์ชื่อ how\_to\_square\_ff.h

```

1  #ifndef INCLUDED_HOWTO_SQUARE_FF_H
2  #define INCLUDED_HOWTO_SQUARE_FF_H
3  #include <gr_block.h>
4  class howto_square_ff;
5  typedef boost::shared_ptr<howto_square_ff> howto_square_ff_sptr;
6  howto_square_ff_sptr howto_make_square_ff ();
7  class howto_square_ff : public gr_block
8  {
9  private:
10     friend howto_square_ff_sptr howto_make_square_ff ();
11     howto_square_ff ();
12 public:
13     ~howto_square_ff ();
14     int general_work (int noutput_items,
15                       gr_vector_int &ninput_items,
16                       gr_vector_const_void_star &input_items,
17                       gr_vector_void_star &output_items);
18 };
19 #endif

```

บรรทัดที่ 1 และ 2 ในโค้ด เป็นการป้องกันหากมีบล็อกนี้มากกว่า 1 บล็อก บรรทัด  
 ที่ 3 รวม gr\_block.h ลงไปในไลบรารี และ บรรทัดที่ 4 กำหนดชื่อคลาส howto\_make\_square\_ff  
 บรรทัดที่ 5 เป็นการใช้กำหนดการเข้าใช้งาน gr\_block.h บรรทัดที่ 6 กำหนดให้  
 howto\_make\_square\_ff เป็นอินเตอร์เฟซทั่วไป บรรทัดที่ 10 เป็นการประกาศให้ howto\_make\_  
 square\_ff ให้เข้าใช้งานตัวสร้างโปรเวทได้ บรรทัดที่ 11 กำหนดให้ howto\_square\_ff เป็นตัวสร้าง  
 โปรเวท บรรทัดที่ 13 ~howto\_square\_ff ถูกกำหนดเป็นตัวสร้างงานให้แก่ตัวแปรโปรเวท บรรทัด



ที่ 14-17 สร้างเมธอด `general_work` ที่กำหนดการทำงานของ `gr_block.h` ส่วนสุดท้ายบรรทัด  
ที่ 19 เป็นส่วนสุดท้ายของบล็อก `INCLUDED_HOWTO_SQUARE_FF_H`

ส่วนที่ 2 สำหรับไฟล์ชื่อ `how_to_square_ff.cc`

```

1 #ifdef HAVE_CONFIG_H
2 #include "config.h"
3 #endif
4 #include <howto_square_ff.h>
5 #include <gr_io_signature.h>
6 howto_square_ff_sptr
7 howto_make_square_ff ()
8 {
9     return howto_square_ff_sptr (new howto_square_ff ());
10 }
11 static const int MIN_IN = 1;
12 static const int MAX_IN = 1;
13 static const int MIN_OUT = 1;
14 static const int MAX_OUT = 1;
15 howto_square_ff::howto_square_ff ()
16 : gr_block ("square_ff",
17     gr_make_io_signature (MIN_IN, MAX_IN, sizeof (float)),
18     gr_make_io_signature (MIN_OUT, MAX_OUT, sizeof (float))) {}
19 howto_square_ff::~~howto_square_ff () {}
27 float *out = (float *) output_items[0];
28
29 for (int i = 0; i < noutput_items; i++) {
30     out[i] = in[i] * in[i];
31 }
32 consume_each (noutput_items);
33 return noutput_items; }

```

ในส่วนที่ 2 ไฟล์ config.h ในบรรทัดที่ 2 บรรจุผลที่ถูกสร้างขึ้นมาโดย configure บรรทัดที่ 6-10 เป็นการสร้าง howto\_square\_ff และส่งค่า shared\_ptr กลับคืนมา บรรทัดที่ 11-14 กำหนดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสายข้อมูลขาเข้าและสายข้อมูลขาออก สำหรับตัวอย่างนี้ มีเพียง 1 สายข้อมูลทั้งขาเข้าและขาออก บรรทัดที่ 15 ถึง 18 เป็นการกำหนดตัวสร้างหลัก และบรรทัดที่ 19 ถึง 31 เป็นการคำนวณค่า square ของเลขทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง บรรทัดที่ 32 และ 33 บอกระบบว่ามีจำนวนข้อมูลขาเข้าของแต่ละสายข้อมูลเป็นจำนวนเท่าใด

ส่วนที่ 3 สำหรับไฟล์ชื่อ how\_to\_square\_ff.i

```
1 %include "exception.i"
2 %import "gnuradio.i"
3 %{
4 #include "gnuradio_swig_bug_workaround.h"
5 #include "howto_square_ff.h"
6 #include <stdexcept>
7 %}
8 GR_SWIG_BLOCK_MAGIC(howto,square_ff);
9 howto_square_ff_sptr howto_make_square_ff ();
10 class howto_square_ff : public gr_block
11 {
12 private:
13   howto_square_ff ();
14 };
```

บรรทัดที่ 6 กำหนดรายงานข้อผิดพลาดของตัวโปรแกรม บรรทัดที่ 8 แสดงจำนวนอาร์กิวเมนต์ที่ต้องการของ howto ได้แก่ packet prefix และ square\_ff คือ ชื่อของคลาส

ยังมีอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ ไฟล์ howto.i ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการบอก SWIG ให้สามารถใช้งานบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณที่สร้างขึ้นมาได้

```

1 %include "exception.i"
2 %import "gnuradio.i"
3 %{
4 #include "gnuradio_swig_bug_workaround.h"
5 #include "howto_square_ff.h"
6 #include <stdexcept>
7 %}
8 GR_SWIG_BLOCK_MAGIC(howto,square_ff);
9 howto_square_ff_sptr howto_make_square_ff ();
10 class howto_square_ff : public gr_block
11 {
12 private:
13   howto_square_ff ();
14 };

```

ส่วนสุดท้ายเป็นไฟล์ที่ใช้ในการสร้างคลาสและนำบล็อกที่เราสร้างเข้าไปเก็บไว้ในส่วนหลักของแพ็คเกจ GNU Radio นั่นคือ Makefile.am

```

1 include $(top_srcdir)/Makefile.common
2 ourpythondir = $(grpythondir)
3 ourlibdir = $(grpyexecdir)
4 INCLUDES = $(STD_DEFINES_AND_INCLUDES)
   $(PYTHON_CPPFLAGS)
5 ourlib_LTLIBRARIES = _howto.la
6 _howto_la_SOURCES =
7   howto_square_ff.cc
8 _howto_la_LDFLAGS = -module -avoid-version
9 grinclude_HEADERS =
10   howto_square_ff.h
11 MOSTLYCLEANFILES = $(BUILT_SOURCES) *.pyc

```

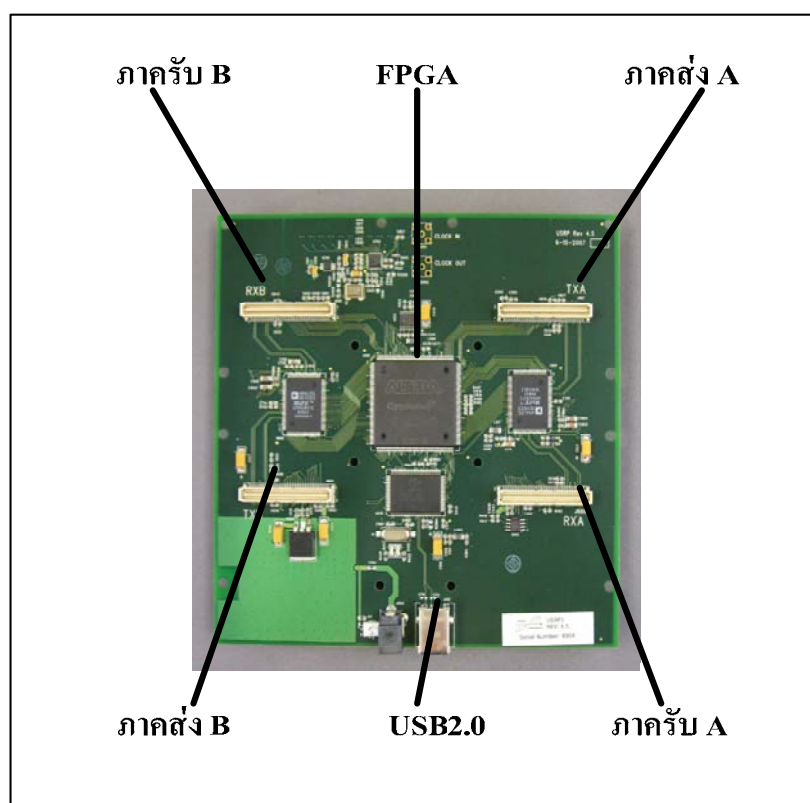
### 3.4 ชุดอุปกรณ์ Universal software radio peripheral

ชุดอุปกรณ์บอร์ด USRP ถูกออกแบบขึ้นมาให้รองรับการใช้งานตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยที่สามารถใช้ออกแบบระบบรับส่งสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ได้ที่แบนด์วิธสูง กล่าวคือตัวบอร์ด USRP ถูกออกแบบให้มีทั้งส่วนของสัญญาณดิจิทัลอนาล็อกและสัญญาณความถี่กลางเพื่อรองรับการออกแบบระบบสื่อสาร โดยการใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

หน้าที่หลักของชุดอุปกรณ์ USRP คือทำการประมวลผลสัญญาณวิทยุ อาทิเช่น การมอดูเลตที่ภาคส่ง และการดีมอดูเลตสัญญาณที่ภาครับ ผ่านทางเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่เชื่อมต่อกับตัวอุปกรณ์ อีกทั้งรองรับการใช้งานทั่วไปด้วยความเร็วสูง ทั้ง Digital Up Convertor (DUC) และ Digital Down Convertor (DDC) Interpolation และ Decimation ทั้งหมดถูกกระทำโดยบอร์ด Field Programming Gate Array (FPGA)

#### 3.4.1 ส่วนประกอบหลักของ USRP Board

ชุดอุปกรณ์ USRP Board ชุดหนึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ อยู่สองส่วนคือ USRP Mother Board 1 ตัว และ Daughter Board ซึ่งรองรับได้ทั้งหมด 4 ตัว USRP Mother Board 1ตัว จะประกอบไปด้วยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลความเร็วสูง (ADCS) จำนวน 4 ตัว และตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความเร็วสูง (DACs) อีก 4 ตัว ซึ่งเป็นทางเดินของสัญญาณขาเข้าจำนวน 4 ชุด และเป็นทางเดินของสัญญาณขาออกจำนวน 4 ชุด เชื่อมต่อไปยัง FPGA Altera Cyclone EPIC12 โดยเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมชุดอุปกรณ์ผ่านทางพอร์ตเชื่อมต่อแบบ USB2.0 ในตัว FPGA นั้นจะมีชุดอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมคือ Cypress FX2 USB2.0 แต่ข้อควรคำนึงคือชุดอุปกรณ์นี้จะไม่รองรับการทำงาน โดยการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวบอร์ด USRP ด้วยพอร์ตเชื่อมต่อแบบ USB1.1 รูปที่ 3.3 แสดงถึงตัวบอร์ด USRP และส่วนประกอบต่าง ๆ ของบอร์ด



รูปที่ 3.3 บอร์ด USRP

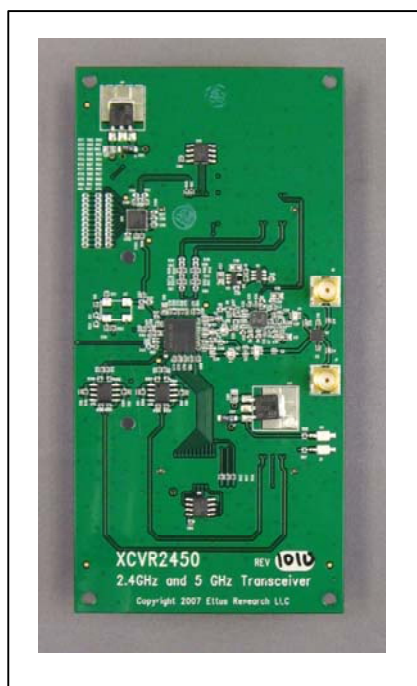
- **ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (AD/DA Converters)**

ในชุดอุปกรณ์ USRP Mother Board นั้นมีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลความเร็วสูงจำนวน 4 ตัว ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณจำนวน 12 บิต และมีอัตราการแซมปลิง 64 MS/s ในทางทฤษฎี ในภาคส่งนั้นประกอบไปด้วยตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความเร็วสูงจำนวน 4 ตัวซึ่งมีความละเอียด 14 บิต โดยมีความถี่ของสัญญาณนาฬิกาคือ 128 MHz ในทางทฤษฎีเราจะมีจำนวนช่องสัญญาณขาเข้าจำนวน 4 ช่องและ จำนวนช่องสัญญาณขาออกจำนวน 4 ช่องสัญญาณ หากเราใช้การแซมปลิงแบบ real sampling ใดๆก็ตามหากเราใช้การแซมปลิงแบบเชิงซ้อน (I/Q Sampling) จะทำให้มีช่องสัญญาณขาเข้าจำนวน 2 ช่องสัญญาณ และจำนวนช่องสัญญาณขาออกจำนวน 2 ช่องสัญญาณ

- **Daughter Board**

ชุดอุปกรณ์ Daughter Board XCVR2450 ดังรูปที่ 3.4 มีหน้าที่ในการกำหนดความถี่ของสัญญาณวิทยุในภาครับหรือภาคส่งรองรับตั้งแต่ 2.4 GHz-6.0 GHz ชุดอุปกรณ์ USRP Mother Board จะมีสล๊อต 4 สล๊อต ซึ่งเราสามารถเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ Daughter Board ได้ 2 ชุด คือ

ภาคส่ง TXA และ TXB และที่ภาครับก็สามารถเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ Daughter Board ได้ 2 ชุด เช่นกัน คือ ภาครับ RXA และ RXB



รูปที่ 3. 4 ชุดอุปกรณ์ Daughter boards

แต่ละสล็อตของ Daughter Board สามารถใช้งานตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกได้อย่างละ 2 ตัว คือ ส่วนของสัญญาณขาออกของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ภาคส่งและส่วนสัญญาณขาเข้าของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ภาครับด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ตัวบอร์ด USRP สามารถใช้งานในการส่งสัญญาณออกไปพร้อม ๆ กันได้ที่สายอากาศทั้ง 2 ด้าน และรองรับการทำงานด้วยระบบไม โม การทำงานของ daughter board จะทำการรับสัญญาณที่ถูกประมวลผลแล้วจาก บอร์ด USRP ซึ่งจะทำการประมวลผลสัญญาณเบสแบนด์ และส่งสัญญาณดังกล่าวไปยัง daughter board



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ USRP

รูปที่ 3.5 แสดงชุดอุปกรณ์ USRP ที่ประกอบเข้าไปยังกล่องเก็บอุปกรณ์ จากรูปประกอบไปด้วยตัวบอร์ด USRP และ Daughterboard

- **ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC)**

ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณเชิงเลขโดยผ่านกระบวนการดิจิทัลสัญญาณ ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะถูกติดตั้งอยู่ในภาครับของ USRP มีจำนวนทั้งหมด 4 ตัว ความละเอียดในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอยู่ที่ 12 บิต อัตราการแซมปลิง 64 MS/Second โดยปกติแล้วตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะสามารถดิจิทัลสัญญาณได้กว้างถึง 32 MHz ดังนั้นสัญญาณที่อยู่เหนือแบนด์วิธ 32 MHz นี้ ตัวแปลงสัญญาณจะไม่สามารถแปลงสัญญาณได้ ซึ่งแบนด์วิธ 32 MHz สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของไนควิสต์

- **ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (DAC)**

ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่ภาคส่งของ USRP ที่ภาคส่งนั้นมีตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความเร็วสูงอยู่ทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณ 14 บิต ด้วยอัตราการแซมปลิง 128 MS/Second ดังนั้นจากทฤษฎีของไนควิสต์ แบนด์วิธ

ของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะอยู่ที่ 64 MHz แต่อย่างไรก็ตามจะต้องให้แบนด์วิธของสัญญาณต่ำกว่านี้เพื่อที่จะให้ภาครับสามารถกรองสัญญาณได้ง่าย ซึ่งย่านที่ทำงานได้คืออยู่ที่ประมาณ 44 MHz สำหรับการส่งสัญญาณ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะถูกบรรจุอยู่ในชิป AD9862 CODEC ซึ่งในภาคส่งนี้มีอุปกรณ์ที่สำคัญอีกอย่างคือ Digital Up Convertor (DUC) ซึ่งมีหน้าที่ในการประมาณค่าช่วงของสัญญาณ (interpolation) จากนั้นจะทำการแปลงสัญญาณไปสู่ความถี่กลางและสุดท้ายส่งสัญญาณไปที่ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

- **FPGA**

FPGA เป็นหัวใจหลักของชุดอุปกรณ์ USRP ซึ่ง FPGA ที่บรรจุอยู่ในชุดอุปกรณ์ USRP คือ Altera Cyclone EP1C2Q240C8 ซึ่งชุดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกทุกตัวจะเชื่อมต่อกับ FPGA โดยที่ FPGA สามารถรองรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยแบนด์วิธสูง ประสิทธิภาพในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยแบนด์วิธสูงนี้ถูกเรียกว่า Digital Down Convertor (DDC) ซึ่ง DDC จะทำการแปลงสัญญาณจากความถี่วิทยุลงมาเป็นสัญญาณที่ความถี่กลาง จากนั้นก็จะทำการดีซิเมทสัญญาณต่อไป

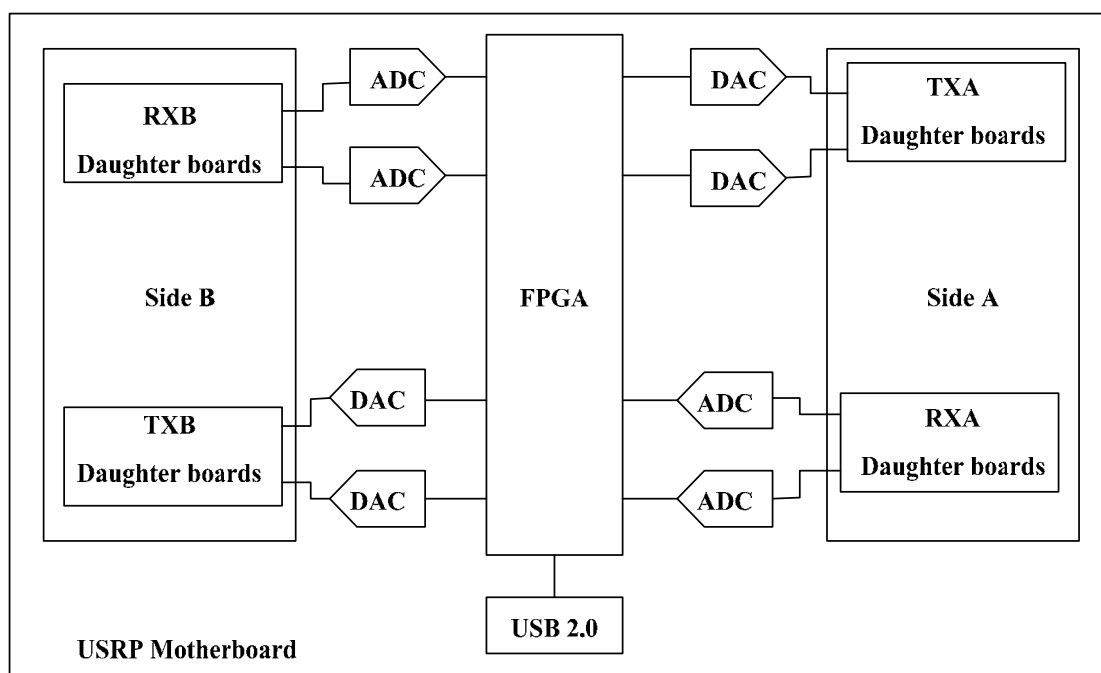
- **USB2.0**

USB เป็นช่องทางในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับชุดอุปกรณ์ USRP ด้วยชิปของ Cy-press FX2 ชุดอุปกรณ์ USRP จะทำการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์และรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงแต่มีข้อจำกัดที่ว่าการเชื่อมต่อนั้นรองรับการทำงานเพียง USB2.0 เท่านั้น แต่ไม่รองรับการเชื่อมต่อแบบ USB1.1 โดยที่อัตราการรับส่งข้อมูลผ่านทาง USB2.0 สูงสุดอยู่ที่ 32 MB/sec และในการเชื่อมต่อผ่านทาง USB2.0 นี้ผู้ใช้งานก็ต้องคำนึงถึงด้วยว่า หากทำการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงสุดจะก่อให้เกิดการใช้งานหน่วยประมวลผลกลางของเครื่องคอมพิวเตอร์มาก ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ประมวลผลล่าช้าหรือในบางครั้งเครื่องคอมพิวเตอร์อาจหยุดการทำงานในบางเวลา



### 3.5 ทิศทางการไหลของสัญญาณใน USRP Board

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการศึกษาเข้าไปถึงภายในของชุดอุปกรณ์เพื่อดูว่า ทิศทางการไหลของสัญญาณภายใน USRP Board นั้นเป็นอย่างไร หลังจากศึกษาส่วนนี้แล้วผู้ใช้งานจะต้องทำการศึกษาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลต่อไป ซึ่งทิศทางการไหลของสัญญาณในตัว USRP Board นั้นสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 3.6 ได้แก่



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบภายในบอร์ด USRP

#### 3.5.1 ภาครับ

ที่ภาครับมีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจำนวน 4 ตัว และตัวแปลงสัญญาณ DDCS จำนวน 4 ตัวเช่นกัน โดยทั่วไปแล้ว Daughter Board แต่ละตัวนั้นจะมีสัญญาณแอนะล็อกขาเข้าจำนวน 2 สัญญาณ ซึ่งจะถูกส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นสัญญาณที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงเลขแล้วจะถูกส่งไป FPGA เพื่อทำการประมวลผลสัญญาณในลำดับถัดไป จากนั้นสัญญาณที่ขาออกของ FPGA จะถูกนำส่งไปยังส่วนต่าง ๆ โดยชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ (MUX) เพื่อเข้าไปสู่ตัวแปลง DDCs ต่อไป

ชุดตัวแปลง DDCS จะมี อยู่ 4 ชุด แต่ละชุดจะมีสัญญาณขาเข้า 2 สัญญาณ คือ สัญญาณ I และสัญญาณ Q ชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ (MUX) นั้นจะมีลักษณะการทำงาน

คล้าย ๆ กันกับเราเตอร์หรือวงจรถับสัญญาณ ซึ่งชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ (MUX) นี้มีหน้าที่กำหนดเส้นทางว่า ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ DDCS ตัวไหนผู้ใช้งานสามารถควบคุมชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ได้โดยใช้ `usrp.set_mux()` ซึ่งเป็นเมธอดหนึ่งในไพธอน

จากนั้นพิจารณาที่ชุดอุปกรณ์ DDCS ในอันดับแรกอุปกรณ์นี้จะทำการแปลงจากความถี่กลางเป็นความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ ลำดับที่สองทำการ Decimate สัญญาณเพื่อส่งผ่านพอร์ต USB2.0 เข้าไปสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมชุดอุปกรณ์ รูปที่ 3.4 แสดงชุดอุปกรณ์ DDCs สัญญาณขาเข้าเชิงซ้อนที่ความถี่กลางจะถูกคูณด้วยสัญญาณเอ็กโปกเนนเชียลที่มีความถี่คงที่ หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณเชิงซ้อนที่ตั้งอยู่ที่ความถี่ศูนย์ และเราจะทำการ Decimate สัญญาณด้วยแฟคเตอร์ M ต่อไป

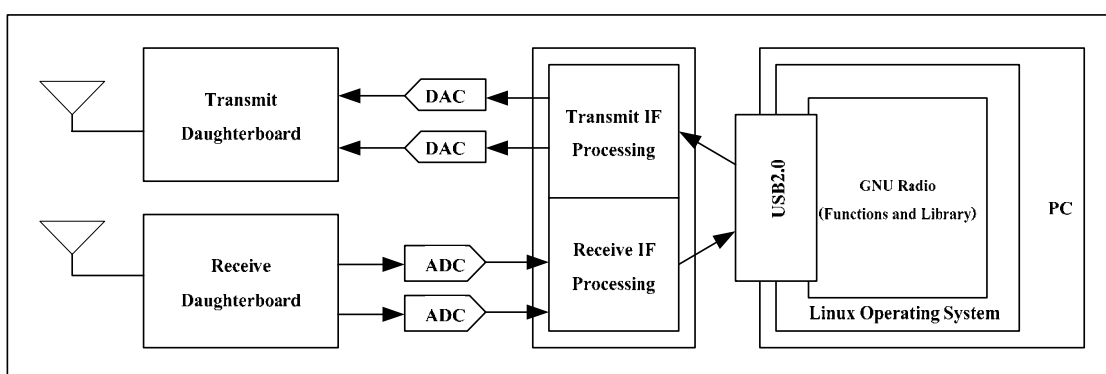
### 3.5.2 ภาคส่ง

ที่ภาคส่งนี้จะมีกระบวนการที่ทำงานกันย้อนกลับกับภาครับ เราต้องการที่จะส่งสัญญาณเบสแบนด์เชิงซ้อน I/Q ไปยัง USRP ตัว DUCS จะทำการ interpolate สัญญาณจากนั้นจะทำการแปลงความถี่ IF ไปเป็นความถี่ RF และส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกก่อนทำการส่งออกอากาศต่อไปเมื่อพิจารณาลงไปถึงรายละเอียดเล็ก ๆ แล้วจะพบว่า ข้อมูลที่ถูก Interleaved จะถูกส่งมาจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมตัวบอร์ด USRP นั้นจะถูกนำส่งไปยัง FIFO (First In First Out) ในตัวบอร์ด USRP กลุ่มตัวอย่างสัญญาณเชิงซ้อนจะมีขนาด 32 บิต ซึ่งประกอบไปด้วย 16 bit ในส่วนของสัญญาณ I และ 16 บิต สำหรับสัญญาณ Q ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกทำการ Interleaved และถูกส่งไปเป็นข้อมูลขาเข้าของส่วนที่ทำการ Interpolate สัญญาณ โดยจะทำการ Interpolates สัญญาณขาเข้าด้วยอัตรา L/4 ด้วยตัวกรองสัญญาณแบบ CIC สัญญาณขาออกของส่วนที่ทำการ Interpolate สัญญาณถูกส่งไปยังตัว DEMUX ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าตัว MUX ที่อยู่ทางภาครับ ที่ส่วนนี้สัญญาณ I และ Q ที่เป็นสัญญาณขาออกของ CIC Filters แต่ละตัวจะถูกส่งไปเป็นสัญญาณขาเข้าของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ในตัวชิพ AD9862 CODEC chip สัญญาณเชิงซ้อนจะถูก Interpolate ด้วยแฟคเตอร์ 4 โดยการใช้ Half band filter interpolators หลังจากทีสัญญาณผ่านส่วนนี้มาแล้วสัญญาณเชิงซ้อนจะถูกส่งไปยัง DUC เพื่อแปลงสัญญาณจากความถี่กลาง ไปเป็นความถี่วิทยุเพื่อส่งออกอากาศ สัญญาณเชิงซ้อนในรูปแบบ I/Q ที่เป็นสัญญาณขาออกของ DUC ที่อยู่ในรูป 14-bit samples จะถูกส่งไปยัง DACS ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยอัตรา 128MS/s และสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จะถูกส่งจาก AD9862 ไปยัง Daughter board แต่ละอันผ่านตัว J667 J669 อินเทอร์เฟซ ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคส่ง TXA และ TXB

ข้อแตกต่างระหว่าง DDC และ DUC คือ DUC นั้นจะอยู่ในชิป AD9862 CODEC ไม่ได้อยู่ใน FPGA เหมือน DDC ในภาคส่งนี้ FPGA จะทำเพียงแค่การ Interpolate สัญญาณเพียงเท่านั้น สิ่งที่น่ารู้ก็คือ ช่องสัญญาณของภาครับทุกช่องจะมีอัตราเร็วของข้อมูลที่เท่ากัน และที่ภาคส่งก็เหมือนกันคือ อัตราเร็วในการส่งข้อมูลต้องมีค่าเท่ากันทุกช่อง เมื่อผู้ใช้งานมีการเรียนรู้ถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบแล้ว ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ หลังจากนั้นก็จะเป็นการนำความรู้ทั้งสองส่วนดังกล่าวเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานวิจัย ซึ่งเมื่อนำทั้งสองส่วนมาประกอบรวมกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

### 3.6 การติดตั้งโปรแกรม GNU Radio

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นวิธีการในการติดตั้งโปรแกรม GNU Radio วิธีการนี้นำเสนอการติดตั้งโปรแกรม GNU Radio เวอร์ชันล่าสุดซึ่งมีชื่อเรียกว่า trunk ซึ่งปกติแล้วเราสามารถติดตั้งได้โดยผ่านทาง Synaptic package manager แต่ตัวแพ็คเกจของโปรแกรมที่อยู่ใน Synaptic package manager นั้นยังเป็นตัวโปรแกรมที่ยังไม่มีการปรับปรุงฐานข้อมูล ผู้ใช้งานสามารถเลือกติดตั้งผ่านทาง Synaptic package manager ก็ได้หรือจะทำการติดตั้งผ่านทาง SVN (Smart Subversion) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บตัวแพ็คเกจที่ได้รับการปรับปรุงให้เป็นเวอร์ชันที่พัฒนาแล้วจากผู้ใช้งานให้ใหม่อยู่เสมอ ๆ เนื้อหาในส่วนนี้มีความคาดหวังว่าผู้ใช้งานจะสามารถติดตั้ง Ubuntu และ GNU radio ได้โดยไม่ต้องใช้ synaptic package manager แต่จะให้ผู้ใช้งานสามารถติดตั้งตัวโปรแกรมผ่านทาง Linux command line กับตัวแพ็คเกจที่อยู่ใน SVN ได้



รูปที่ 3.7 ภาพรวมของ GNU Radio และ USRP

### 3.6.1 Install dependencies

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการติดตั้งตัวโปรแกรมนี้สามารถเข้าไปค้นหาวิธีได้ใน <http://gnuradio.org/trac/wiki/Ubuntuinstall> เพื่อที่จะได้ติดตั้งแพ็คเกจ GNU radio แต่ละตัวที่มีทั้งหมดอย่างอัตโนมัติ ในการที่เราจะทำการติดตั้งแพ็คเกจแต่ละแพ็คเกจด้วยตนเองนั้นในตัว SVN ก็มีชื่อแพ็คเกจที่ต้องใช้บอกไว้เรียบร้อยแล้ว เราสามารถเริ่มต้นการติดตั้งได้เลยหลังจากที่เราทำการตั้งค่า SVN เรียบร้อยแล้ว

```
sudo apt-get -y install swig g++ automake1.9 libtool python-dev fftw3-dev \
libcppunit-dev libboost1.35-dev sdcc-nf libusb-dev \
libsdl1.2-dev python-wxgtk2.8 subversion guile-1.8-dev \
libqt4-dev python-numpy ccache python-opengl libgs10-dev \
python0cheetah python-lxml doxygen qt4-dev-tools \
libqwt5-qt4-dev libqwtplot3d-qt4-dev python-qwt5-qt4
```

หากผู้ใช้งานมีการใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu 8.10 สิ่งที่จะได้แสดงต่อไปนี้เป็น `command line` ที่ใช้สำหรับการติดตั้ง GNU radio software package ซึ่งมีเครื่องหมายที่น่าสนใจคือ เครื่องหมาย `\` ซึ่งเป็นเครื่องหมายที่ใช้เชื่อมสายอักขระเข้าด้วยกัน

หากผู้ใช้งานใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu 8.04 ผู้ใช้งานจะต้องทำการรัน `Command line` นี้

```
sudo apt-get -y install swig g++ automake1.9 libtool python-dev fftw3-dev \
libcppunit-dev libboost1.35-dev sdcc-nf libusb-dev \
libsdl1.2-dev python-wxgtk2.8 subversion guile-1.8-dev \
libqt4-dev python-numpy ccache python-opengl libgs10-dev \
python0cheetah python-lxml doxygen qt4-dev-tools \
libqwt5-qt4-dev libqwtplot3d-qt4-dev python-qwt5-qt4
```

### 3.6.2 Install an SVN Client

SVN เซิร์ฟเวอร์นั้นมีการเปิดการใช้การควบคุมเวอร์ชันของตัวโค้ดโปรแกรมหากโค้ดโปรแกรมมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ที่เซิร์ฟเวอร์จะยอมให้มีการกลับไปใช้โค้ดโปรแกรมเวอร์ชันเดิมที่ไม่มีความผิดพลาด เนื่องจาก SVN server มีลักษณะที่สามารถใช้งานได้สะดวกและคล่องตัวแถมยังมีการปรับปรุงฐานข้อมูลของโค้ดโปรแกรมให้ทันสมัยและใหม่อยู่เสมอ ๆ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้งานเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเมื่อผู้ใช้งานมีการติดตั้งตัวโปรแกรม GNU radio ลงไปในเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว หากต้องการที่จะปรับปรุงฐานข้อมูลของโค้ดโปรแกรมย่อยก็สามารถเลือกอัปเดตข้อมูลนั้น ๆ ได้ จากนั้น GNU radio ก็จะทำการติดตั้งแพ็คเกจใหม่อีกครั้งเพื่อปรับปรุงโค้ดให้ใหม่อยู่เสมอ ๆ เช่นกัน ในขั้นตอนนี้เริ่มต้นผู้ใช้งานจะต้องดาวน์โหลด Smart SVN มาจาก [www.syntevo.com/smartsvn/download.html](http://www.syntevo.com/smartsvn/download.html) จากนั้นทำการ unzip ตัว smart svn ที่โหลดมาแล้วทำการย้ายไปยัง /usr/share ทางที่ง่ายที่สุดในการทำขั้นตอนนี้คือเปิด file browser ด้วยสิทธิ์การใช้งานแบบ root

### 3.7 ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ซึ่งทั้ง 2 ส่วนเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง ซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ หากใช้ระบบปฏิบัติการไม่เหมาะสมกับคุณลักษณะฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ก็จะทำให้การใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ ปัจจุบันนี้มีซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการมากมายเป็นตัวเลือกให้กับผู้ใช้งาน และที่เป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลกได้แก่ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ของไมโครซอฟต์ ทุกคนต่างรู้ว่าราคาลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์มีราคาสูงอีกทั้งผู้ใช้งานได้เพียงแค่อ้างแต่มาสามารถพัฒนาตัวซอฟต์แวร์ได้ เมื่อไม่นานมานี้มีระบบปฏิบัติการหนึ่งที่ถูกกล่าวถึงและเป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลก ระบบปฏิบัติการนั้นคือลินุกซ์ ซึ่งมีการพัฒนามาหลากหลายเวอร์ชัน ด้วยข้อดีที่ไม่มีลิขสิทธิ์ ไม่ต้องจ่ายเงินแพงในการใช้ระบบปฏิบัติการ อีกทั้งยังสามารถเข้าไปแก้ไขระบบปฏิบัติการเชิงลึกได้ด้วย จึงทำให้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์เป็นที่นิยมใช้ไปทั่วโลกและเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานที่จะเลือกระบบปฏิบัติการให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งานเอง

ในการใช้งานระบบปฏิบัติการลินุกซ์อบุนตุนเบื้องต้นนั้น ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจถึงโครงสร้างพื้นฐานของระบบปฏิบัติการนี้ สิทธิ์ในการเข้าใช้ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ ตลอดจนพื้นฐานในการใช้งานคอมมานไลน์ เป็นต้น

### 3.7.1 ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น

#### 1) ระบบไฟล์ของระบบปฏิบัติการ

- root คือ ส่วนรากหรือส่วนแรกสุดของระบบ
- bin คือ ส่วนที่เก็บคำสั่งของระบบ
- boot คือ ส่วนที่เก็บไฟล์ที่ใช้ในการเริ่มทำงานของระบบ
- etc คือ ส่วนที่เก็บการตั้งค่าต่าง ๆ ของโปรแกรมต่าง ๆ
- home คือ ส่วนที่เก็บไฟล์ต่าง ๆ ของผู้ใช้งานคล้าย ๆ กับ My Documents

ในระบบปฏิบัติการวินโดวส์

- media คือ ส่วนที่แสดงสถานะอุปกรณ์ต่างเช่น แฟลชไดรฟ์ ที่เชื่อมต่อกับเครื่องอยู่
- sbin คือ ส่วนที่เก็บคำสั่งสำคัญของระบบ เช่น ปิดเครื่อง
- tmp คือ ส่วนที่ใช้เก็บไฟล์ชั่วคราว และจะถูกลบไปเมื่อเริ่มระบบใหม่
- usr คือ ที่เก็บแฟ้มเอกสารข้อมูลต่าง ๆ ที่ผู้ใช้ต้องใช้

ข้อควรระวัง ทุก ๆ ครั้งที่ใช้งาน เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่อง ในบางครั้งจะไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากสิทธิ์ในการเข้าใช้งานของผู้ใช้ยังไม่เป็น root จึงเป็นที่มาที่ต้องเพิ่มคำสั่ง sudo เข้าไปในการสั่งงานผ่านทางคอมมานด์ไลน์ทุกครั้ง

### 3.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น

Privillage	Network
<p>sudo <i>command</i> – run <i>command</i> as root</p> <p>sudo -s – open a root shell</p> <p>sudo -s -u <i>user</i> – open a shell as <i>user</i></p> <p>sudo -k – forget sudo passwords</p> <p>gksudo <i>command</i> – visual sudo dialog (GNOME)</p> <p>kdesudo <i>command</i> – visual sudo dialog (KDE)</p> <p>sudo visudo – edit /etc/sudoers</p> <p>gksudo nautilus – root file manager (GNOME)</p> <p>kdesudo konqueror – root file manager (KDE)</p> <p>passwd – change your password</p>	<p>ifconfig – show network information</p> <p>iwconfig – show wireless information</p> <p>sudo iwlist scan – scan for wireless networks</p> <p>sudo /etc/init.d/networking restart – reset network for manual configurations</p> <p>(file) /etc/network/interfaces – manual configuration</p> <p>ifup <i>interface</i> – bring <i>interface</i> online</p> <p>ifdown <i>interface</i> – disable <i>interface</i></p>
Display	Special Packages
<p>sudo /etc/init.d/gdm restart – restart X and return to login (GNOME)</p> <p>sudo /etc/init.d/kdm restart – restart X and return to login (KDE)</p> <p>(file) /etc/X11/xorg.conf – display configuration</p> <p>sudo dexconf – reset xorg.conf configuration</p> <p>Ctrl+Alt+Bksp – restart X display if frozen</p> <p>Ctrl+Alt+FN – switch to tty <i>N</i></p> <p>Ctrl+Alt+F7 – switch back to X display</p>	<p>ubuntu-desktop – standard Ubuntu environment</p> <p>kubuntu-desktop – KDE desktop</p> <p>xubuntu-desktop – XFCE desktop</p> <p>ubuntu-minimal – core Ubuntu utilities</p> <p>ubuntu-standard – standard Ubuntu utilities</p> <p>ubuntu-restricted-extras – non-free, but useful</p> <p>kubuntu-restricted-extras – KDE of the above</p> <p>xubuntu-restricted-extras – XFCE of the above</p> <p>build-essential – packages used to compile programs</p> <p>linux-image-generic – latest generic kernel image</p> <p>linux-headers-generic – latest build headers</p>

### 3.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

System Services	Firewall
start <i>service</i> – start job <i>service</i> (Upstart) stop <i>service</i> – stop job <i>service</i> (Upstart) status <i>service</i> – check if <i>service</i> is running (Upstart) /etc/init.d/ <i>service</i> start – start <i>service</i> (SysV) /etc/init.d/ <i>service</i> stop – stop <i>service</i> (SysV) /etc/init.d/ <i>service</i> status – check <i>service</i> (SysV) /etc/init.d/ <i>service</i> restart – restart <i>service</i> (SysV) runlevel – get current runlevel	ufw enable – turn on the firewall ufw disable – turn off the firewall ufw default allow – allow all connections by default ufw default deny – drop all connections by default ufw status – current status and rules ufw allow <i>port</i> – allow traffic on <i>port</i> ufw deny <i>port</i> – block <i>port</i> ufw deny from <i>ip</i> – block <i>ip</i> adress
Package Management	Application Names
apt-get update – refresh available updates apt-get upgrade – upgrade all packages apt-get dist-upgrade – upgrade with package replacements; upgrade Ubuntu version apt-get install <i>pkg</i> – install <i>pkg</i> apt-get purge <i>pkg</i> – uninstall <i>pkg</i> apt-get autoremove – remove obsolete packages apt-get -f install – try to fix broken packages dpkg --configure -a – try to fix broken packages dpkg -i <i>pkg.deb</i> – install file <i>pkg.deb</i> (file) /etc/apt/sources.list – APT repository list	nautilus – file manager (GNOME) dolphin – file manager (KDE) konqueror – web browser (KDE) kate – text editor (KDE) gedit – text editor (GNOME)



### 3.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

File Commands	System Info
ls -al – formatted listing with hidden files	date – show the current date and time
cd <i>dir</i> - change directory to <i>dir</i>	cal – show this month's calendar
cd – change to home	uptime – show current uptime
pwd – show current directory	w – display who is online
mkdir <i>dir</i> – create a directory <i>dir</i>	whoami – who you are logged in as
rm <i>file</i> – delete <i>file</i>	finger <i>user</i> – display information about <i>user</i>
rm -r <i>dir</i> – delete directory <i>dir</i>	uname -a – show kernel information
rm -f <i>file</i> – force remove <i>file</i>	cat /proc/cpuinfo – cpu information
rm -rf <i>dir</i> – force remove directory <i>dir</i> *	cat /proc/meminfo – memory information
cp <i>file1 file2</i> – copy <i>file1</i> to <i>file2</i>	man <i>command</i> – show the manual for <i>command</i>
cp -r <i>dir1 dir2</i> – copy <i>dir1</i> to <i>dir2</i> ; create <i>dir2</i> if it doesn't exist	df – show disk usage
mv <i>file1 file2</i> – rename or move <i>file1</i> to <i>file2</i>	du – show directory space usage
if <i>file2</i> is an existing directory, moves <i>file1</i> into directory <i>file2</i>	free – show memory and swap usage
ln -s <i>file link</i> – create symbolic link <i>link</i> to <i>file</i>	whereis <i>app</i> – show possible locations of <i>app</i>
touch <i>file</i> – create or update <i>file</i>	which <i>app</i> – show which <i>app</i> will be run by default
cat > <i>file</i> – places standard input into <i>file</i>	
more <i>file</i> – output the contents of <i>file</i>	
head <i>file</i> – output the first 10 lines of <i>file</i>	
tail <i>file</i> – output the last 10 lines of <i>file</i>	
tail -f <i>file</i> – output the contents of <i>file</i> as it grows, starting with the last 10 lines	

### 3.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

Process Management	Compression
<p>ps – display your currently active processes</p> <p>top – display all running processes</p> <p>kill <i>pid</i> – kill process id <i>pid</i></p> <p>killall <i>proc</i> – kill all processes named <i>proc</i> *</p> <p>bg – lists stopped or background jobs; resume a stopped job in the background</p> <p>fg – brings the most recent job to foreground</p> <p>fg <i>n</i> – brings job <i>n</i> to the foreground</p>	<p>tar cf <i>file.tar files</i> – create a tar named <i>file.tar</i> containing <i>files</i></p> <p>tar xf <i>file.tar</i> – extract the files from <i>file.tar</i></p> <p>tar czf <i>file.tar.gz files</i> – create a tar with Gzip compression</p> <p>tar xzf <i>file.tar.gz</i> – extract a tar using Gzip</p> <p>tar cjf <i>file.tar.bz2</i> – create a tar with Bzip2 compression</p> <p>tar xjf <i>file.tar.bz2</i> – extract a tar using Bzip2</p> <p>gzip <i>file</i> – compresses <i>file</i> and renames it to <i>file.gz</i></p> <p>gzip -d <i>file.gz</i> – decompresses <i>file.gz</i> back to <i>file</i></p>
File Permission	Network
<p>chmod <i>octal file</i> – change the permissions of <i>file</i> to <i>octal</i>, which can be found separately for user, group, and world by adding:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 4 – read (r)</li> <li>● 2 – write (w)</li> <li>● 1 – execute (x)</li> </ul> <p>Examples:</p> <p>chmod 777 – read, write, execute for all</p> <p>chmod 755 – rwx for owner, rx for group and world</p>	<p>ping <i>host</i> – ping <i>host</i> and output results</p> <p>whois <i>domain</i> – get whois information for <i>domain</i></p> <p>dig <i>domain</i> – get DNS information for <i>domain</i></p> <p>dig -x <i>host</i> – reverse lookup <i>host</i></p> <p>wget <i>file</i> – download <i>file</i></p> <p>wget -c <i>file</i> – continue a stopped download</p>

### 3.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

SSH	Installation
<p><code>ssh user@host</code> – connect to <i>host</i> as <i>user</i></p> <p><code>ssh -p port user@host</code> – connect to <i>host</i> on port <i>port</i> as <i>user</i></p> <p><code>ssh-copy-id user@host</code> – add your key to <i>host</i> for <i>user</i> to enable a keyed or passwordless login</p>	<p>Install from source:</p> <p><code>./configure</code></p> <p><code>make</code></p> <p><code>make install</code></p> <p><code>dpkg -i pkg.deb</code> – install a package (Debian)</p> <p><code>rpm -Uvh pkg.rpm</code> – install a package (RPM)</p>
Searching	Shortcuts
<p><code>grep pattern files</code> – search for <i>pattern</i> in <i>files</i></p> <p><code>grep -r pattern dir</code> – search recursively for <i>pattern</i> in <i>dir</i></p> <p><code>command   grep pattern</code> – search for <i>pattern</i> in the output of <i>command</i></p> <p><code>locate file</code> – find all instances of <i>file</i></p>	<p><code>Ctrl+C</code> – halts the current command</p> <p><code>Ctrl+Z</code> – stops the current command, resume with <code>fg</code> in the foreground or <code>bg</code> in the background</p> <p><code>Ctrl+D</code> – log out of current session, similar to <code>exit</code></p> <p><code>Ctrl+W</code> – erases one word in the current line</p> <p><code>Ctrl+U</code> – erases the whole line</p> <p><code>Ctrl+R</code> – type to bring up a recent command</p> <p><code>!!</code> - repeats the last command</p> <p><code>exit</code> – log out of current session</p>

### 3.8 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความหมายของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ อธิบายถึงแพ็คเกจ GNU Radio ชุดอุปกรณ์ USRP ที่ประกอบไปด้วยบอร์ดหลักคือ USRP Motherboard และบอร์ดรอง Daughterboard ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของผู้ใช้งานผ่านทาง USB 2.0 จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงองค์ประกอบภายในของชุดอุปกรณ์ เมื่อผู้ใช้งานมีความเข้าใจในองค์ประกอบของอุปกรณ์แล้ว ต้องมาเรียนรู้ถึงตัวแพ็คเกจ GNU Radio ซึ่งมีการใช้ภาษาไพธอนเป็นตัวเชื่อมบล็อกในการประมวลผลสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากภาษา C++ โดยทั้งสองภาษาจะสามารถเชื่อมต่อหรือสามารถสื่อสารกันได้ผ่านทาง SWIG Wrapper จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงระบบปฏิบัติการลินุกซ์เบื้องต้นซึ่งผู้ใช้งานจะต้องเรียนรู้ถึงโครงสร้างของระบบไฟล์และสิทธิ์ในการเข้าใช้งาน โปรแกรมต่าง ๆ ในระบบปฏิบัติการ หลังจากที่ผู้ใช้งานได้รับความรู้จากเนื้อหาในบทนี้ผู้ใช้งานจะสามารถเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการทำงานตลอดจนทิศทางการไหลของสัญญาณเมื่อมีการใช้งานเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

## บทที่ 4

### ผลการจำลองแบบและการออกแบบชุดทดสอบ

#### 4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการจำลองแบบและผลที่ได้จากการจำลองแบบการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล โดยมีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร อาทิเช่น อัตราความผิดพลาดบิต ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือ Throughput เทียบกับค่าความแรงของสัญญาณต่อค่าความแรงของสัญญาณรบกวน (SNR) โดยอันดับแรกจะเป็นการเปรียบเทียบการรับส่งข้อมูลโดยไม่มีการใช้เทคนิคโมโม จากนั้นจะเป็นการจำลองแบบโดยมีการนำเทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาใช้งาน และทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการใช้เทคนิคโมโมกับระบบที่ไม่มีการใช้เทคนิคโมโมว่าระบบไหนให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่ากันผ่านทางโปรแกรม MATLAB จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบ การออกแบบการทดลอง ผลที่ได้จากชุดทดสอบ ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมที่ไม่มีการใช้เทคนิคโมโมเข้ามาช่วยกับระบบที่มีการนำเทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยว่าระบบใดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากัน ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลทั้งผลจากการจำลองแบบและผลที่ได้จากชุดทดสอบพร้อมทั้งสรุปผลที่ได้รับจากการศึกษาและออกแบบระบบต่อไป

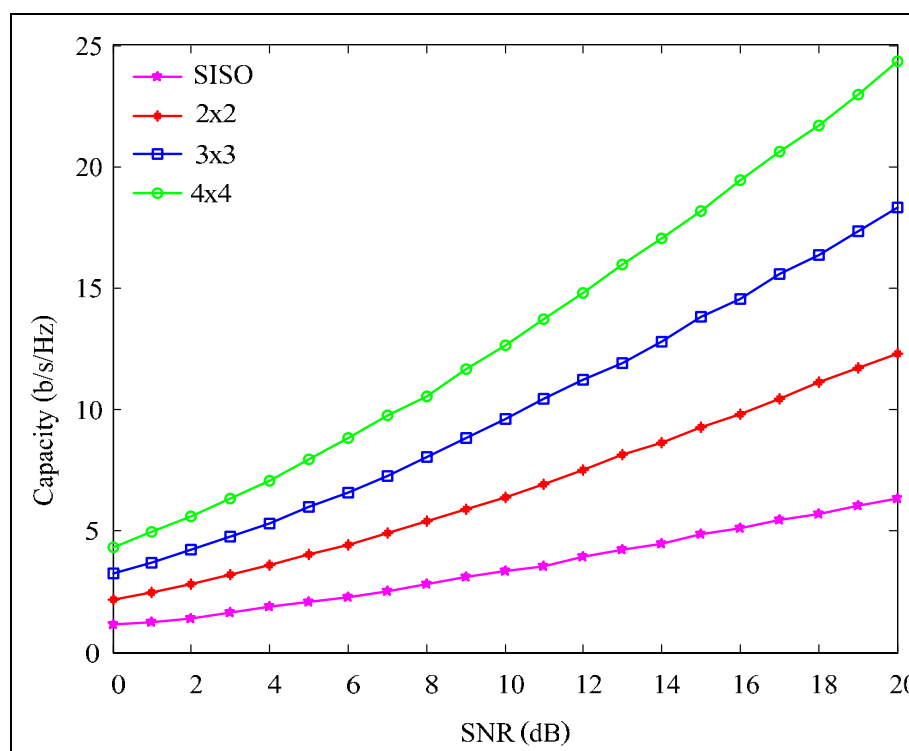
#### 4.2 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

การจำลองแบบระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นมีปัจจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลัก ๆ ได้แก่ ช่องสัญญาณ ไร้สาย มาตรฐานที่ใช้ การกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง เป็นต้น ซึ่งในการจำลองแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณโมโม

จากทฤษฎีของระบบโมโมที่มีอยู่ว่า หากทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจะทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับจำนวนสายอากาศ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อพิสูจน์ทฤษฎีในการจำลองแบบนั้น ผู้วิจัยได้จำลองผลจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและภาคส่งผ่านช่องสัญญาณไร้สายแบบไร้เงื่อนไข ซึ่งมีการจำลองแบบเปรียบเทียบกัน 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่เพิ่มสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่ง

และภาครับจำนวน 2 3 และ 4 ต้น ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความจุของช่องสัญญาณกับค่าความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อศึกษาถึงผลจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ระบบว่าทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งภาครับ

จากรูปเส้นที่มีสัญลักษณ์เครื่องหมายดาวแสดงความจุของช่องสัญญาณสำหรับระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่ง 1 ต้น และที่ภาครับจำนวน 1 ต้น จากนั้นเส้นที่มีเครื่องหมายวงแสดงถึงค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจำนวน 2 ต้น พบว่าค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าระบบเดิม เส้นที่มีเครื่องหมายสี่เหลี่ยมแสดงค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและภาคส่งอย่างละ 3 ต้น ส่วนเส้นที่มีเครื่องหมายวงกลมแสดงถึงค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจำนวน 4 ต้น พบว่าผลการ

ทดสอบได้ยืนยันว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศให้กับภาคส่งและภาครับจะทำให้ระบบมีความจุของช่องสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นกว่าระบบเดิม

เมื่อทำการจำลองแบบเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ทำให้สามารถรับรองได้ว่าเมื่อเพิ่มสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับแล้วจะสามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้เนื่องจากความจุของช่องสัญญาณที่มากขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณมาก ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ก็ต้องมากขึ้นด้วย อีกทั้งยังสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงได้อีกด้วย

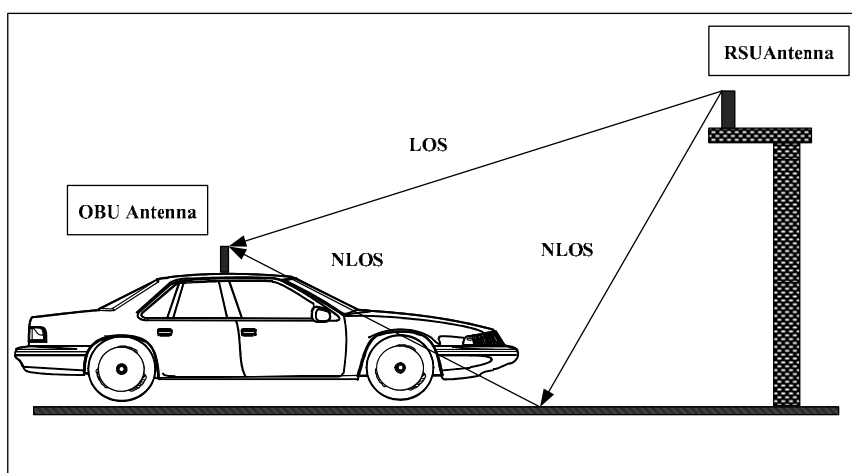
#### 4.2.2 การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้

##### มาตรฐาน ARIB STD-T75

การจำลองแบบการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่ใช้มีรูปแบบเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางโดยที่โครงสร้างของระบบประกอบด้วยยานพาหนะ 1 คัน ติดตั้งชุดอุปกรณ์ OBU และชุดอุปกรณ์ข้างทาง RSU 1 ชุด ทำการรับส่ง โดยกำหนดให้ภาคส่งและภาครับทำการรับส่งสัญญาณกันในระยะที่กำหนดตามมาตรฐานที่ใช้ภายใต้สภาพการจราจรที่มียานพาหนะ 1 คัน วิ่งบนถนนที่มีช่องจราจร 2 ช่อง

##### 1) แบบจำลองช่องสัญญาณไร้สาย

แบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้เป็นแบบจำลองช่องสัญญาณแบบไร้เขียนจากทฤษฎีช่องสัญญาณที่อยู่ในบทที่ 2 พบว่าช่องสัญญาณไร้สายที่มีลักษณะเป็นแบบไร้เขียนนั้นจะประกอบไปด้วยสัญญาณในแนววิถีตรง LOS กับสัญญาณในแนว NLOS ที่เด่นชัดดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองลักษณะช่องสัญญาณไร้สายสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

$$\mathbf{H}_{Rice} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\phi_0} \mathbf{H}_{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{Rayleigh} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.2 โครงสร้างของแบบจำลองของช่องสัญญาณไร้สายสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะมีลักษณะการสื่อสารแบบ Vehicle to Infrastructure (V2I) ระบบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ข้างทาง (RSU) จะถูกติดตั้งอยู่ริมข้างทาง อุปกรณ์ติดยานพาหนะ (OBU) จะติดตั้งอยู่ในตัวยานพาหนะและติดตั้งสายอากาศไว้ที่หลังคาของยานพาหนะ เมื่อ RSU ส่งสัญญาณออกมาพบว่ามีสัญญาณในแนวตรงจะเดินทางไปยังสายอากาศของ OBU และสัญญาณอีกส่วนหนึ่งจะเดินทางไปกระทบกับพื้นถนนและสะท้อนขึ้นไปยังสายอากาศของ OBU ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายแบบไโรเซียนที่มีสัญญาณในแนวตรงและสัญญาณในแนว NLOS ที่เด่นชัด แบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายแบบไโรเซียนดังสมการที่ 4.1 (Kermoal, J.P., 2000) จึงถูกเลือกเป็นแบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในระบบขนส่งอัจฉริยะ อีกทั้งสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการจำลองแบบนั้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 กล่าวคือ ในการจำลองแบบจะมีชุดอุปกรณ์ที่ใช้เป็นชุดอุปกรณ์ข้างทาง (RSU) และชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ (OBU) ทำการรับส่งข้อมูลกันเพียง 1 ชุด ภายใต้สภาพการจราจรที่มียานพาหนะเคลื่อนที่เพียง 1 คัน และสภาพถนนเป็นถนนที่มี 2 ช่องจราจร พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำไปใช้ในการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
จำนวนช่องจราจร	2 ช่องจราจร
จำนวนยานพาหนะ	1 คัน
จำนวนชุดอุปกรณ์	1 ชุด
ค่า K-factor	3.623
ความเร็วของยานพาหนะ	0,20,40,60,80,100 Km./h.

## 2) มาตรฐาน ARIB STD-T75

มาตรฐานที่นำมาใช้ในการจำลองแบบคือมาตรฐาน ARIB STD-T75 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ Association of radio and Industrial Business ของญี่ปุ่น ได้ออกแบบมาสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยเป็นมาตรฐานที่กำหนดคุณลักษณะดังตารางที่ 4.2



ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของมาตรฐาน ARIB STD-T75

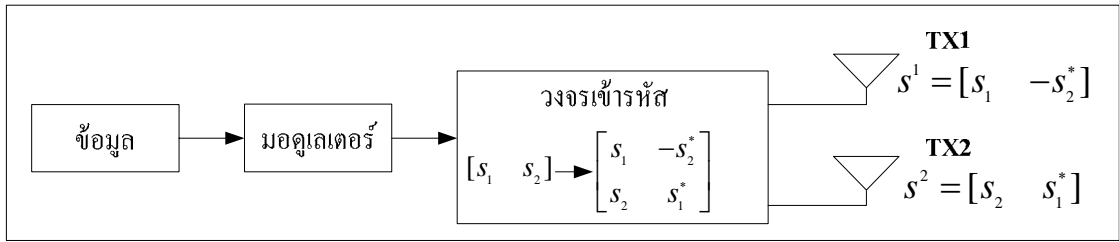
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	5.8 GHz
Modulation type	QPSK
Data rate	4 Mbps for QPSK
Communication	TDMA/FDD
Power supplied to RSU antenna	10 m to 30 m =300 mW
Power supplied to OBU antenna	Less than 10 mW

### 3) การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก

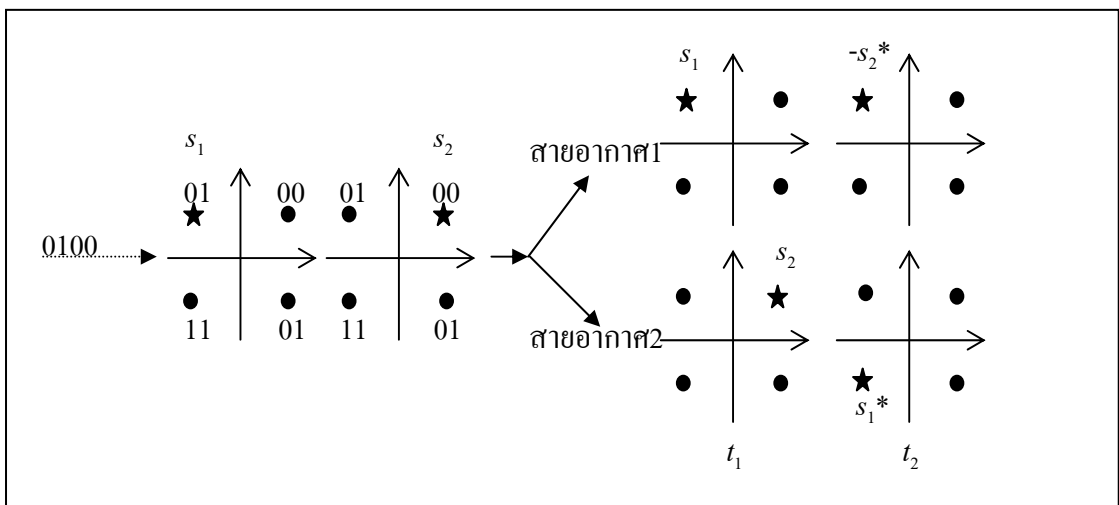
ในการจำลองแบบมีการใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรูปแบบที่เป็นที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกในรูปแบบของ Alamouti เมื่อแหล่งกำเนิดข้อมูลสร้างสัญลักษณ์ข้อมูลส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ ครั้งละ 2 สัญลักษณ์ จากนั้นสัญลักษณ์ทั้ง 2 จะถูกส่งเข้าไปสู่วงจรการเข้ารหัสและถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศส่งเพื่อส่งออกอากาศไปยังภาครับ การส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หรือสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาที่มีความต่อเนื่องกัน สมการที่ 4.2 แสดงรูปเมตริกซ์ของรูปแบบการส่งสัญญาณ โดยเมตริกซ์แถวจะแสดงตำแหน่งหรือสายอากาศที่จะส่ง ส่วนเมตริกซ์หลักจะแสดงเวลา ในช่วงเวลาที่  $t$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่  $s_1$  และ  $s_2$  ตามลำดับ และที่เวลา  $t+T$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ สัญญาณ  $-s_2^*$  และ  $s_1^*$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบเมื่อมีการนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยที่ข้อมูลจะถูกสร้างออกมาจากแหล่งกำเนิดจำนวน 2 สัญลักษณ์ จากนั้นจะข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปเข้าวงจรมอดูเลเตอร์เพื่อทำการมอดูเลตข้อมูล หลังจากที่ข้อมูลถูกมอดูเลตแล้ว ข้อมูลดังกล่าวก็จะเดินทางเข้าไปสู่วงจรเข้ารหัสแบบ Alamouti และทำการส่งออกอากาศไปยังภาครับ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของแบบจำลองภาคส่งสำหรับระบบไมโม



รูปที่ 4.4 การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK

กระบวนการถอดรหัสสัญญาณอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  มีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นแรกไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,1}$  และรวมถึงสัมประสิทธิ์ของสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่สองไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,2}$  จะต้องเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 h_{j,1} &= h_{j,1}(t) = h_{j,1}(t+T) = h_{j,1}(t_1) = h_{j,1}(t_2) \\
 h_{j,2} &= h_{j,2}(t) = h_{j,2}(t+T) = h_{j,2}(t_1) = h_{j,2}(t_2)
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  ของสองช่วงเวลา คือ  $r_j^1$  และ  $r_j^2$  สัญญาณที่รับได้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} r_j^1 &= h_{j,1} \cdot s_1 + h_{j,2} \cdot s_2 + n_j^1 \\ r_j^2 &= -h_{j,1} \cdot s_2^* + h_{j,2} \cdot s_1^* + n_j^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) องค์ประกอบ additive white gaussian noise (AWGN) ถูกเพิ่มลงไปที่สายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  ในช่วงระยะเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  แสดงโดย  $n_j^1$  และ  $n_j^2$  ตามลำดับ

กระบวนการถอดรหัสทำได้โดยอาศัยการรวมของสัญญาณและการถอดรหัสแบบ Maximum likelihood อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการนี้ สัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณถูกพิจารณาว่าถูกรับรู้โดยถูกต้องสมบูรณ์ที่ภาครับ ในการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่ภาครับสามารถทำได้โดยการใช้สัญญาณนำร่อง (Pilot Signal) กระบวนการของการรวมเชิงเส้นและสัญญาณถูกป้อนไปยังส่วนถอดรหัสแบบ Maximum likelihood ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

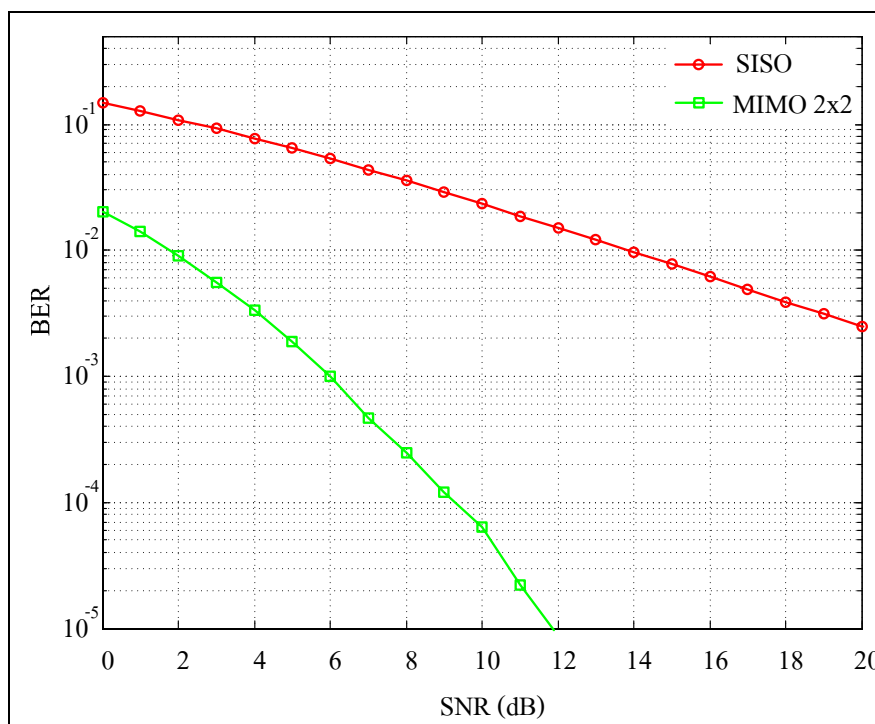
$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot r_j^1 + h_{j,2} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_i + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot n_j^1 + h_{j,2} \cdot (n_j^2)^* \right\} \\ \tilde{S}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot r_j^1 - h_{j,1} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot n_j^1 - h_{j,1} \cdot (n_j^2)^* \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

#### 4) ผลที่ได้จากการจำลองแบบ

ผลที่ได้จากการจำลองแบบนั้นจะแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ ซึ่งได้แก่ *ลักษณะที่ 1* จะเป็นผลที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลโดยที่ช่องสัญญาณไม่มีผลเนื่องจากความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง *ลักษณะที่ 2* จะเป็นผลที่ได้จากช่องสัญญาณที่มีความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง

- **ลักษณะที่ 1** เมื่อช่องสัญญาณไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความเร็ว

ผลการจำลองแบบในลักษณะนี้จะไม่มีผลเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะซึ่งอยู่ในรูปความถี่คอปเพลอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการจำลองผลนั้นจะเลือกใช้ช่องสัญญาณไร้สายที่มีคุณลักษณะการกระจายตัวแบบไรเซียนดังสมการที่ 4.1 จากรูปที่ 4.5 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราค่าความแรงของสัญญาณเทียบกับความแรงของสัญญาณรบกวนของระบบเดิมและระบบโมโมที่มีการมีการใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบล็อก จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการมีการใช้เทคนิคโมโมเข้ามาช่วย จะส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตลดลงเมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ใช้สายอากาศในการรับส่งข้อมูลเพียงต้นเดียว



รูปที่ 4.5 แสดงอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวน โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบไมโม

1) ลักษณะที่ 2 เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะ

เมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ก่อให้เกิดพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งมีผลกระทบต่อช่องสัญญาณไร้สาย นั่นคือความถี่ดอปเพลอร์ สมการที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ดอปเพลอร์กับความเร็วของยานพาหนะและความถี่สัญญาณพาหะ ซึ่งแบบจำลองของช่องสัญญาณสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 (Jeruchim, M., 2000)

$$f_d = \frac{v}{c} f_c \quad (4.3)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ ค่าความถี่ของสัญญาณพาหะ

$c$  คือ ค่าความเร็วของแสง  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$v$  คือ ความเร็วของยานพาหนะ

ตัวอย่างเช่น ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 km/h จะได้ว่า

$$\text{ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว } (60 \times \frac{5}{18}) \text{ m/s} \quad \text{ดังนั้น } f_d = 20 \times 5.8 \times 10^9 \times (1/3 \times 10^8) \\ = 386.67 \text{ Hz}$$

แบบจำลองของช่องสัญญาณที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบ band limited discrete multipath channel model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สมมติว่า Delay power profile และ Doppler spectrum ของช่องสัญญาณสามารถแยกกันได้ โดย  $S_i$  แสดงถึงจำนวนตัวอย่างที่ถูกสร้างเข้าไปในช่องสัญญาณ และ  $y_i$  คือสัญญาณขาออกของช่องสัญญาณซึ่งมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับ  $S_i$  (Jeruchim, M., 2000) ดังสมการที่ 4.4

$$y_i = \sum_{n=-N_1}^{N_2} s_i^{-n} g_n \quad (4.4)$$

$g_n$  คือ จำนวนแท็บของตัวถ่วงน้ำหนักของช่องสัญญาณทั้งหมดของช่องสัญญาณ

$$g_n = \sum_{k=1}^K a_k \text{ sinc} \left[ \frac{\tau_k}{T_s} - n \right], -N_1 \leq n \leq N_2 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 สามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

โดยที่ $T_s$	คือ	ช่วงเวลาของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกสร้างเข้ามาในช่องสัญญาณ
$\{\tau_k\}$	คือ	เซตของ path delay เมื่อ $1 \leq k \leq K$
$K$	คือ	จำนวนของสัญญาณหลายวิถีที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ
$\{a_k\}$	คือ	เซตของ complex path gains ที่อยู่ในช่องสัญญาณ
		เมื่อ $1 \leq k \leq K$ ซึ่ง path gain นี้จะเป็นอิสระต่อกัน (Uncorrelate)
$N_1$ และ $N_2$	คือ	ค่าที่ถูกเลือกเพื่อให้ขนาดของ $ g_n $ มีขนาดเล็ก เมื่อ $n$ มีค่าน้อยกว่า $-N_1$ หรือมากกว่า $N_2$ ซึ่งค่าของ $a_k$ เมื่อพิจารณาช่องสัญญาณแบบไร้เสียงที่มีค่า $K=3.1623$ สามารถหาได้จากสมการที่ 4.6

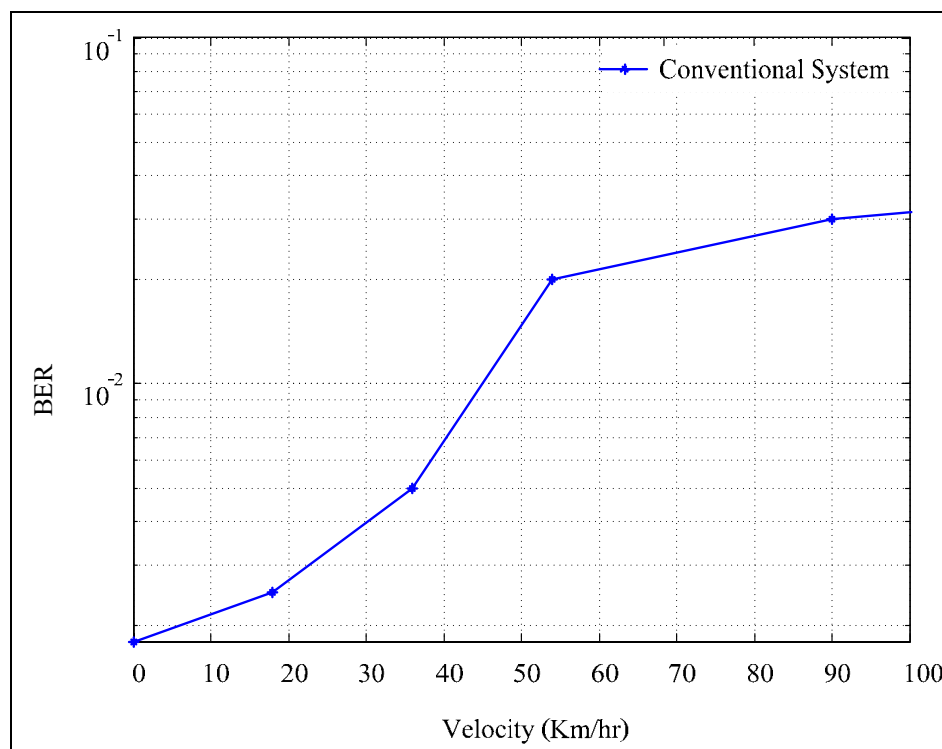
$$a_k = \sqrt{\Omega_k} \left[ \frac{z_k}{\sqrt{k_{r,k} + 1}} + \sqrt{\frac{k_{r,k}}{k_{r,k} + 1}} e^{j(2\pi f_{d,LOS} + \theta_{LOS,k})} \right] \quad (4.6)$$

$k_{r,k}$  คือ ค่าไรเซชันแฟคเตอร์

$f_{d,LOS}$  คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์ของสัญญาณในแนววิถีตรง LOS มีหน่วยเป็น Hz

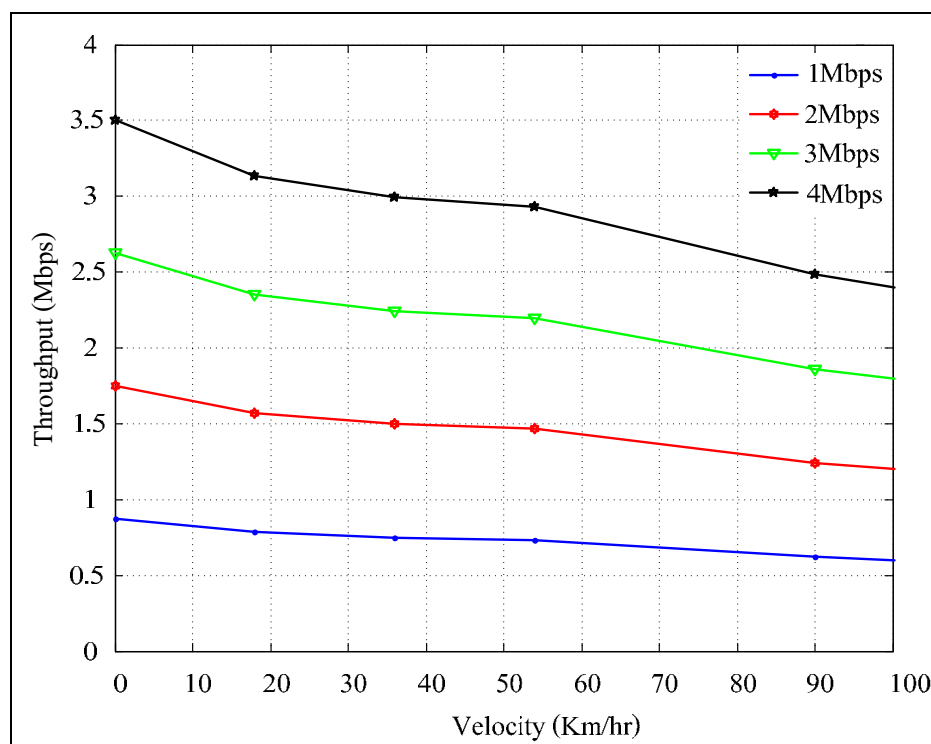
$\theta_{LOS,k}$  คือ มุมเฟสของสัญญาณในแนววิถีตรง

ในการจำลองแบบนี้กำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและทำการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ข้างทาง ที่โครงสร้างของระบบประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ข้างทาง 1 ชุด และชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ 1 ชุด รับส่งข้อมูลภายใต้สภาพการจราจรที่มียานพาหนะ 1 คัน เคลื่อนที่บนถนนที่มี 2 ช่องจราจร ซึ่งมีโครงสร้างของระบบเป็นดังรูปที่ 4.2 และในการเก็บข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลค่าอัตราความผิดพลาดบิต ณ จุดที่อัตราความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 10 dB โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของยานพาหนะไปเรื่อย ๆ จนถึง 100 km/h ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่ภาครับภาคส่งของระบบขนส่งอัจฉริยะ (Ikawa, M., 2004); (Stege, M., 2002) มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ตำแหน่งของค่าความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10 dB อยู่ที่  $10^{-3}$  เช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ สามารถรับส่งข้อมูลกันได้โดยการรับส่งข้อมูลนั้นมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ARIB STD-T75 จะได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะ

พิจารณารูปที่ 4.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะ จากกราฟพบว่าหากยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อทำการพิจารณาที่พารามิเตอร์ของปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือ Throughput พบว่าเมื่อความเร็วของยานพาหนะมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลามีค่าลดลง เนื่องจากได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี



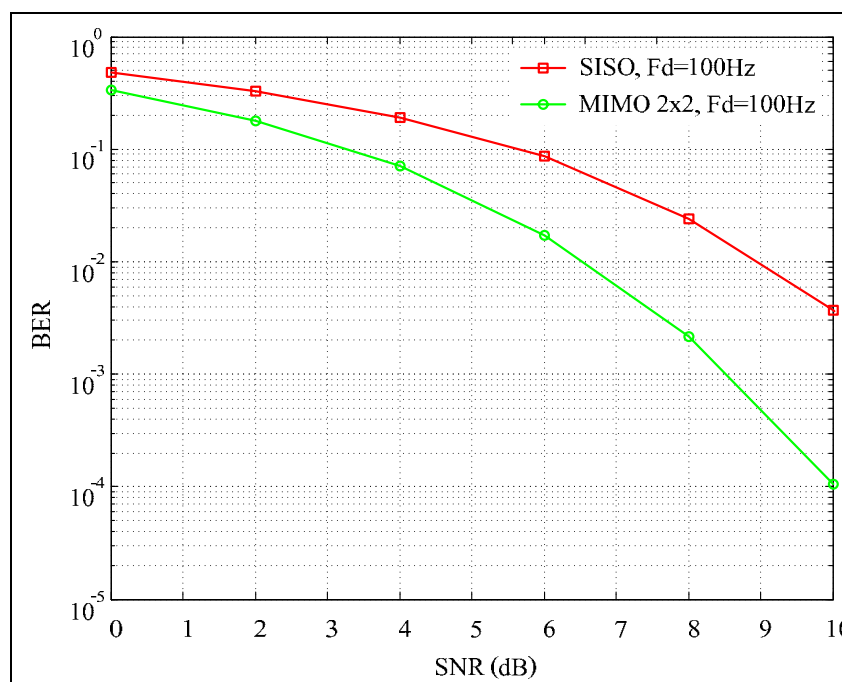
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของยานพาหนะกับ Throughput

ผลที่ได้เมื่อพิจารณาปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาของระบบพบว่าตั้งแต่ 1 Mbps จนถึง 4 Mbps นั้นมีปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาดลดลงเมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น หลังจากที่ได้ทำการจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะในรูปของความถี่ดอปเพลอร์ที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณ สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ความถี่ดอปเพลอร์เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ดอปเพลอร์เพิ่มขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณไร้สาย หากความเร็วของยานพาหนะมีค่ามากก็จะทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลามากไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของช่องสัญญาณก่อให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับ หลังจากที่ได้ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม (Tarokh, V., 1999) พบว่า เทคนิคโมโม มีข้อดีจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับแล้วส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น มีอัตราเร็วของข้อมูลที่สูงขึ้น มีการใช้จุดเด่นจากความหลากหลายของช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลหรือ Transmit Diversity กับ ความหลากหลายของช่องสัญญาณในการรับข้อมูล หรือ Receive Diversity เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของภาคส่งและภาครับทำให้ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารมีคุณภาพที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาไปถึงความหลากหลายของช่องสัญญาณที่ภาคส่งพบว่าเทคนิคที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับคือ

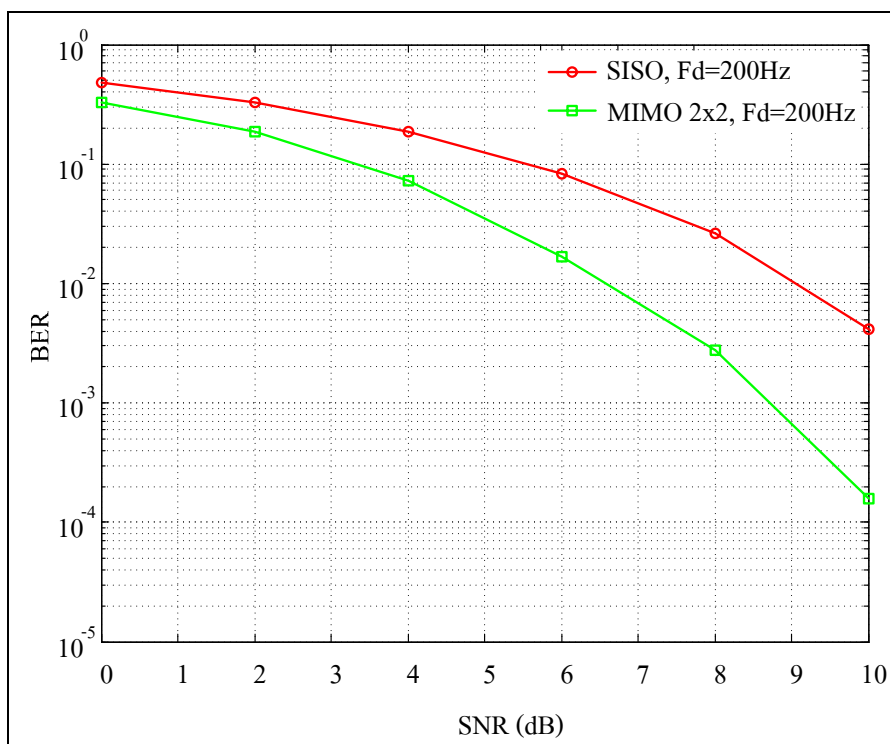


การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการต่อสู้กับปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (Shan, C., 2004)

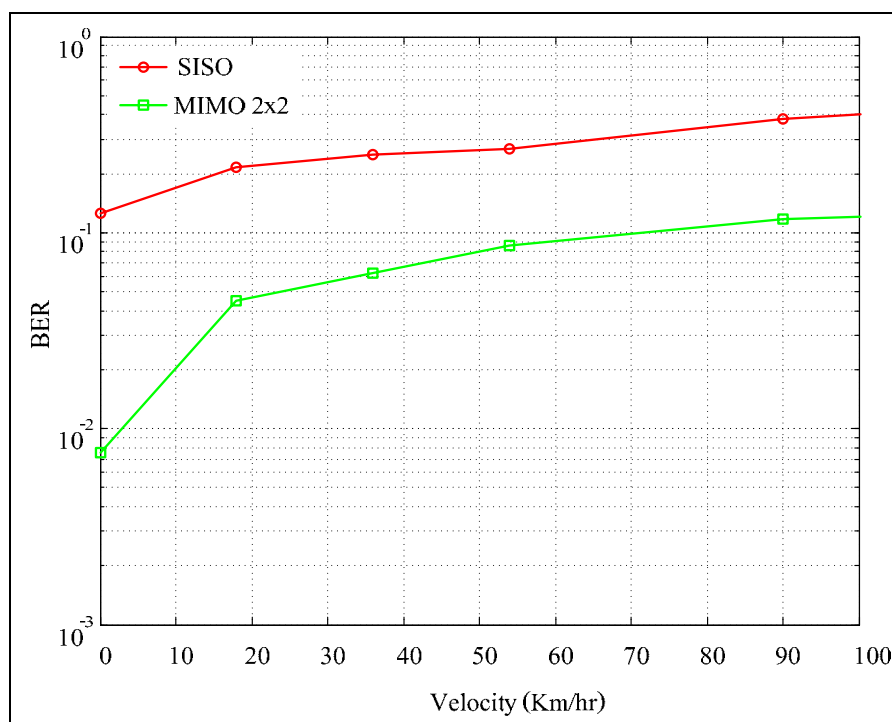
ในการจำลองแบบนี้ได้เลือกใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก โดยใช้รูปแบบการเข้ารหัสแบบ Alamouti การรับส่งข้อมูลอ้างอิงตามมาตรฐาน ARIB STD-T75 และมีรูปแบบในการจำลองแบบเช่นเดียวกับระบบเดิมที่ไม่มีการเพิ่มจำนวนสายอากาศและการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก เพื่อพิสูจน์ถึงผลที่ได้จากการจำลองแบบเมื่อมีการนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสื่อสารและนำผลที่ได้จากระบบเดิมมาเปรียบเทียบกับระบบโมโม



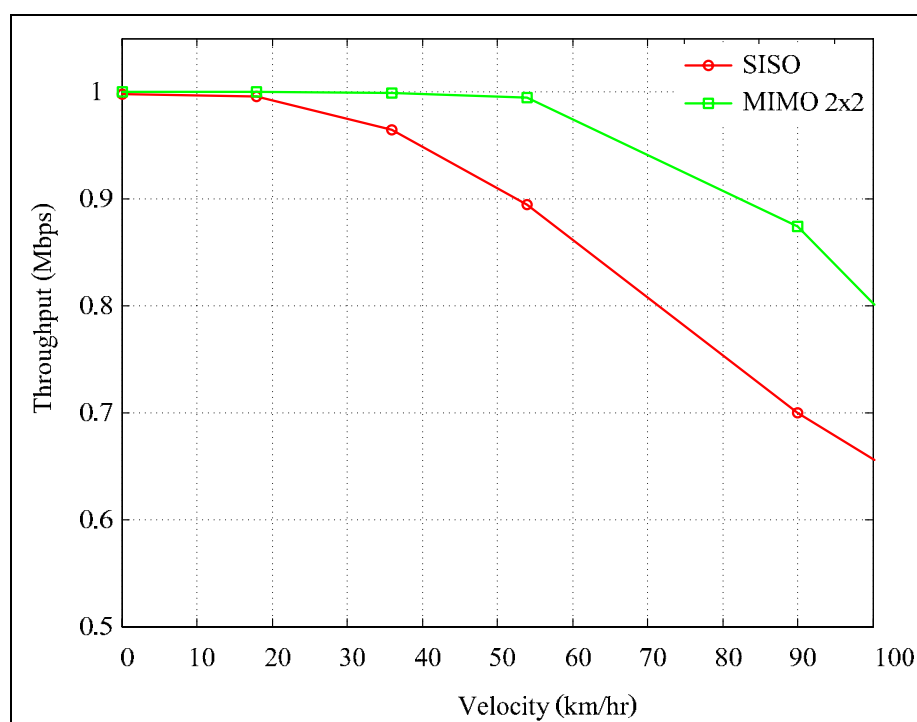
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองแบบเมื่อความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 100 Hz



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองแบบ เมื่อความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 200 Hz



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิคไมโม



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิคโมโมสำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps

ในการจำลองแบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้เริ่มต้นจากการศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมเพื่อสรุปถึงเนื้อหา ทฤษฎี และหัวข้อต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนวิธีที่จะเข้ามาช่วยแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากสรุปปัญหาของงานวิจัยได้แล้ว โดยระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลนั้นมีปัญหาในการรับส่งข้อมูลเนื่องจากผลกระทบของการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีที่ส่งผลกระทบไปยังช่องสัญญาณไร้สายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของช่องสัญญาณไร้สายทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล ปัญหาที่เห็นได้ชัด ได้แก่ ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในขณะที่ทำการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ข้างทาง ยิ่งความเร็วของยานพาหนะมีมากขึ้น ช่องสัญญาณไร้สายก็มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลามากขึ้นส่งผลให้ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เมื่อศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบโมโมพบว่า ระบบโมโมมีจุดเด่นหลายอย่างที่น่าสนใจและมีความน่าจะเป็นที่จะทำให้ระบบสื่อสารแบบเดิมมีคุณภาพดีขึ้น หลังจากที่ได้ทำการจำลองแบบและนำระบบโมโมที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมนั้น จากผลการจำลองแบบสามารถยืนยันได้ว่าหากนำ

ระบบโมโตที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาใช้งานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้

#### 4.2.3 การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้

##### มาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC)

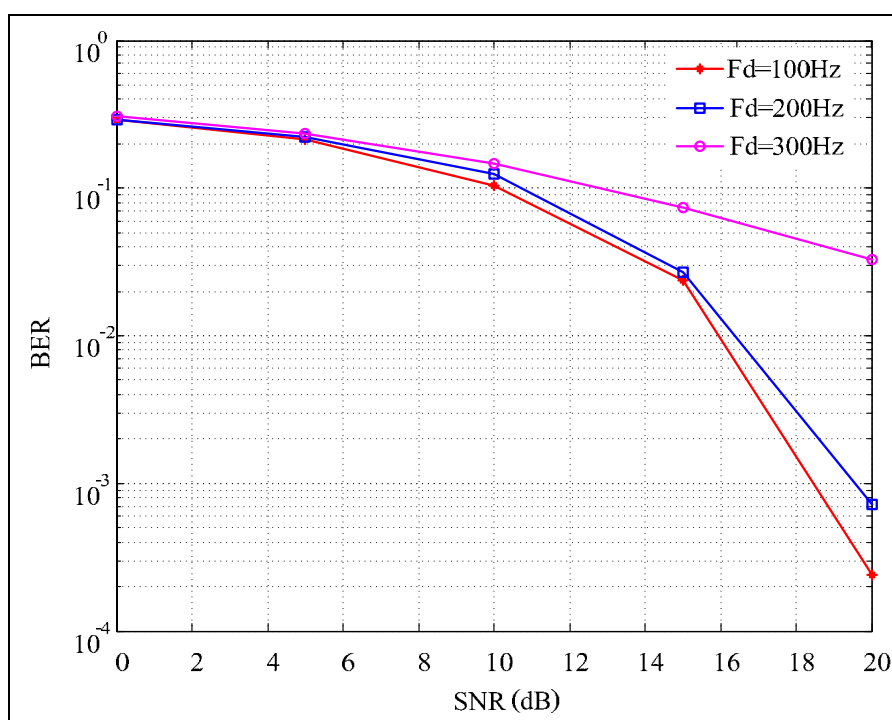
เนื่องจากมาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่นิยมใช้กันทั่วโลกมีอยู่ 3 กาย ทั้งทางด้านของญี่ปุ่น ยุโรป และอเมริกาเหนือ มาตรฐานเหล่านี้ต่างถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับการสื่อสารระหว่างภาครับและภาคส่งหรืออุปกรณ์ข้างทาง RSU กับอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งบนยานพาหนะ OBU ในการติดต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 2 มีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยความเร็ว ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อความเร็วของยานพาหนะมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ช่องสัญญาณไร้สายได้รับผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี ทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลลดลง มาตรฐาน IEEE 802.11p (WAVE-DSRC) ดังตารางที่ 4.3 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับรูปแบบการสื่อสารในลักษณะดังที่กล่าวมาข้างต้น มาตรฐานดังกล่าวได้เพิ่มช่วงเวลาของสัญลักษณ์เพิ่มขึ้นจากมาตรฐานเดิมคือ IEEE802.11a เป็น 2 เท่า ด้วยการเพิ่มช่วงเวลาสัญลักษณ์นี้ส่งผลให้ระบบสามารถรองรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่กับอุปกรณ์ข้างทางได้

ในการจำลองแบบสำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) เป็นการจำลองแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางในแบบ vehicle to infrastructure (V2I) โดยกำหนดให้ช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบมีการกระจายตัวแบบไรเซียน และมีการเพิ่มความเร็วของยานพาหนะ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วของยานพาหนะที่มีต่อระบบสื่อสารเทียบกับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล ซึ่งในการจำลองแบบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) ทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p

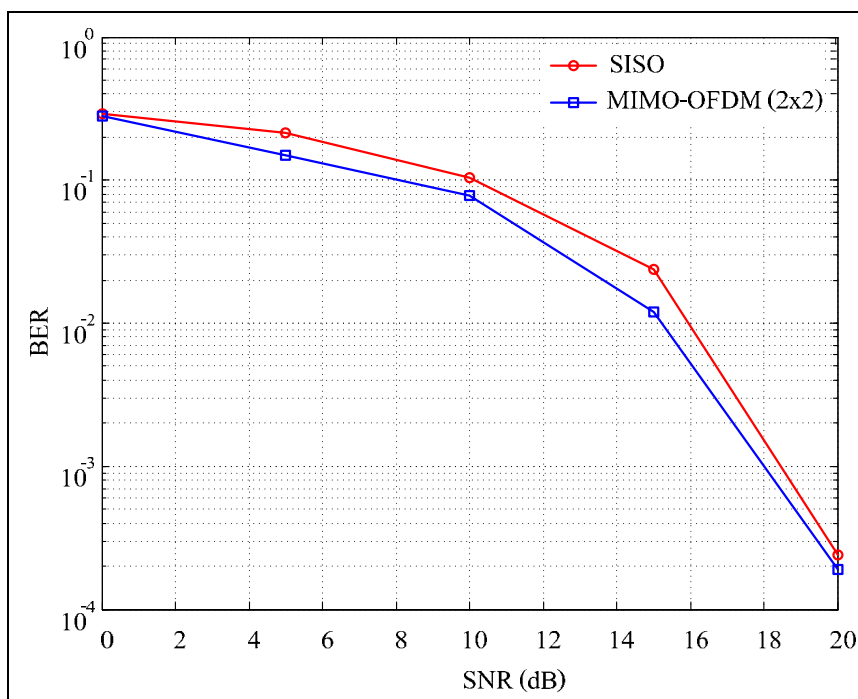
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	5.9GHz
Modulation type	BPSK,QPSK
Data transmission rate	3-27Mbps
Number of data subcarrier	52
Number of FFT length	64
Number of cyclic prefix	32
OFDM symbol duration	8 $\mu$ s

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราส่วนค่าความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ความถี่คอปเพลอร์ตั้งแต่ 100Hz 200Hz และ 300Hz โดยในการจำลองแบบนั้นใช้คุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการกระจายตัวแบบไรเซียน ผลที่ได้จากการจำลองแบบพบว่า เมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นอัตราความผิดพลาดบิตนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเนื่องด้วยเหตุนี้ผลกระทบจากความเร็วก่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในระหว่างการสื่อสารรับส่งข้อมูลที่อยู่ในรูปของความถี่คอปเพลอร์จึงส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสารหากมีการนำเทคนิคโมโม่ เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับเพียง 1 ต้น อาจจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเป็นไปในทางที่ดีขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



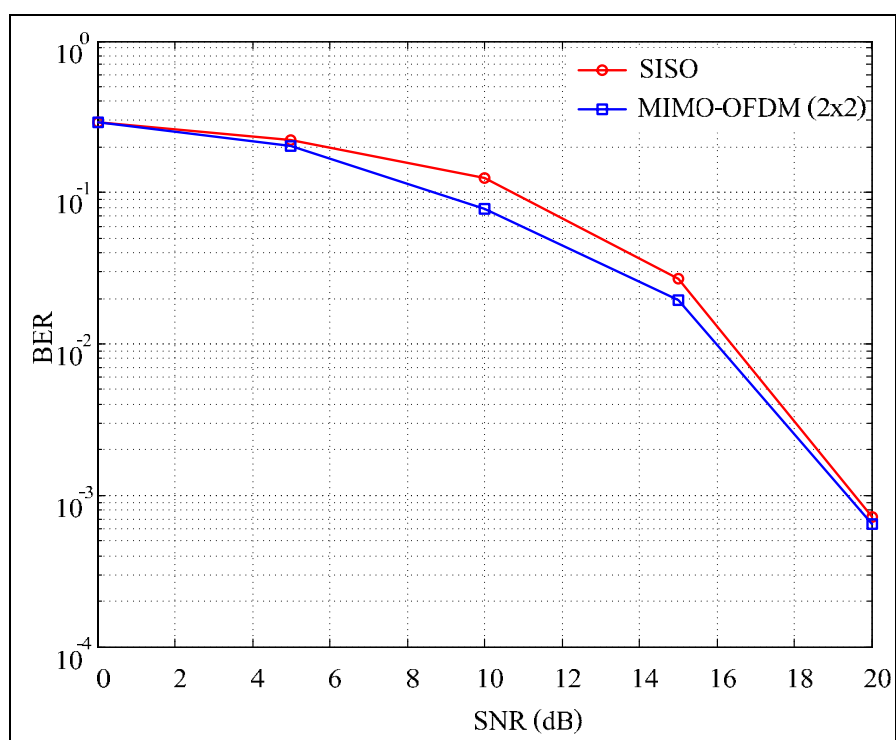
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิต ณ ความถี่ดอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ

เมื่อนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาประยุกต์ใช้กับระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับด้านละ 1 ต้น พบว่า เทคนิคโมโมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ โดยจากผลการจำลองแบบ ณ ความถี่ดอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ สามารถยืนยันได้ว่าเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบโมโมที่ไม่มีการใช้เทคโนโลยี OFDM พบว่า ยังมีอัตราความผิดพลาดบิตสูงกว่า เนื่องจากเทคโนโลยี OFDM ยังมีปัญหาเกี่ยวกับช่องสัญญาณย่อยอยู่

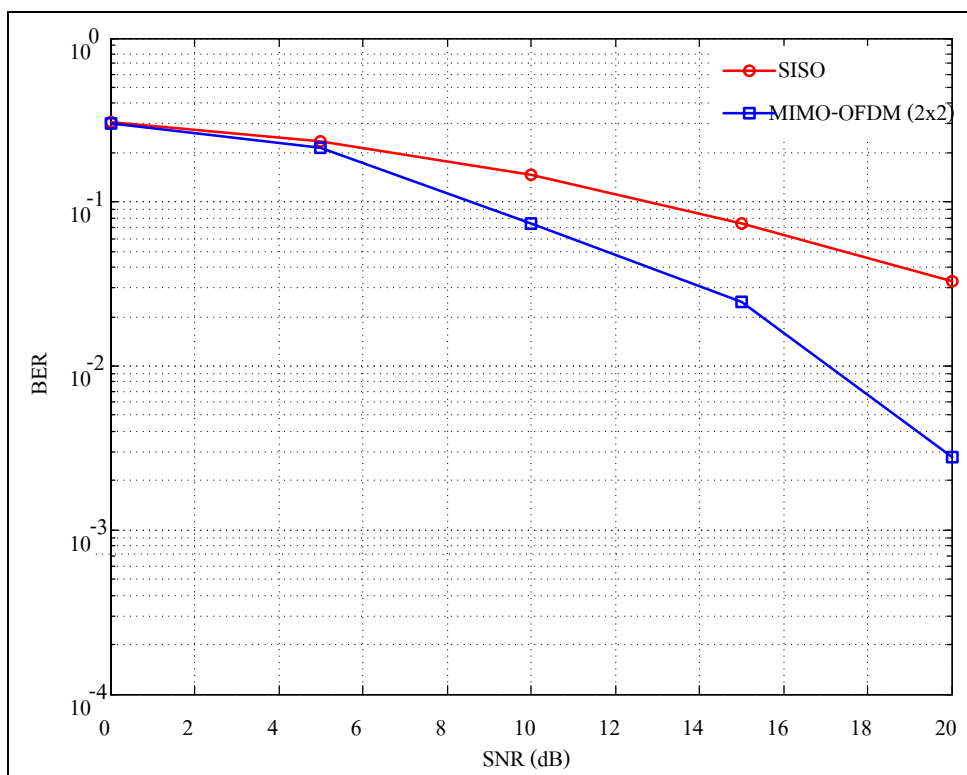


รูปที่ 4.13 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโม  
ที่ความถี่ดอปเพลอร์ 100 Hz





รูปที่ 4.14 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโม  
ที่ความถี่ดอปเพลอร์ 200 Hz



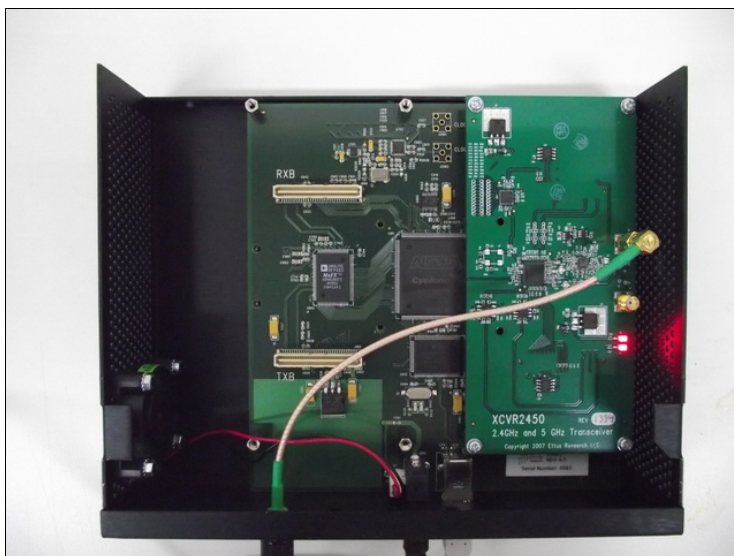
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโม ที่ความถี่ดอปเพลอร์ 300Hz

จากผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิตเปรียบเทียบกัน ณ ความถี่ดอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ สามารถยืนยันได้ว่าการนำระบบโมโมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสามารถทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นมาได้

### 4.3 การออกแบบชุดทดสอบและผลการทดสอบ

ในการออกแบบชุดทดสอบ การวัดผลการทดสอบ จะต้องมีการเลือกชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบที่สอดคล้องกับทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่ได้ศึกษา ชุดอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้เป็นชุดอุปกรณ์ที่มีขีดความสามารถในการทำงานที่ดี มีข้อดีหลาย ๆ ด้านที่น่าสนใจ อาทิเช่น ซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลเป็นซอฟต์แวร์แบบโอเพ่นซอส ซึ่งทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu ที่เป็นระบบปฏิบัติการที่ไม่มีลิขสิทธิ์ ชุดอุปกรณ์ที่นำมาใช้นั้นมีทั้งชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณเบสแบนด์หรือ FPGA ที่มีขีดความสามารถสูง อีกทั้งยังให้ชุดอุปกรณ์ความถี่วิทยุมาพร้อมกันด้วยหรือที่เรียกว่า daughter board ที่สำคัญชุดอุปกรณ์ชุดนี้รองรับการทำงานด้วยระบบโมโม โดยชุดอุปกรณ์ 1 ชุดสามารถเชื่อมต่อ

กับ daughter board ได้ 2 ตัว เชื่อมต่อกับสายอากาศได้ 2 ต้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ผู้ใช้สามารถ ออกแบบระบบให้สามารถทำงานเป็นระบบโมโมแบบ 2x2 ที่มีการใช้สายอากาศที่ ภาคส่ง 2 ต้น และที่ภาครับ 2 ต้นได้ รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงถึงชุดอุปกรณ์ที่เลือกใช้



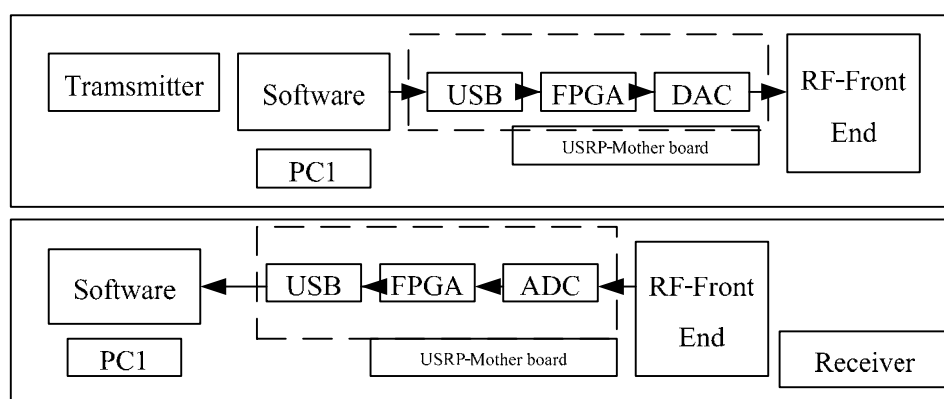
รูปที่ 4.16 ชุดอุปกรณ์



รูปที่ 4.17 ชุดอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานแบบโมโม

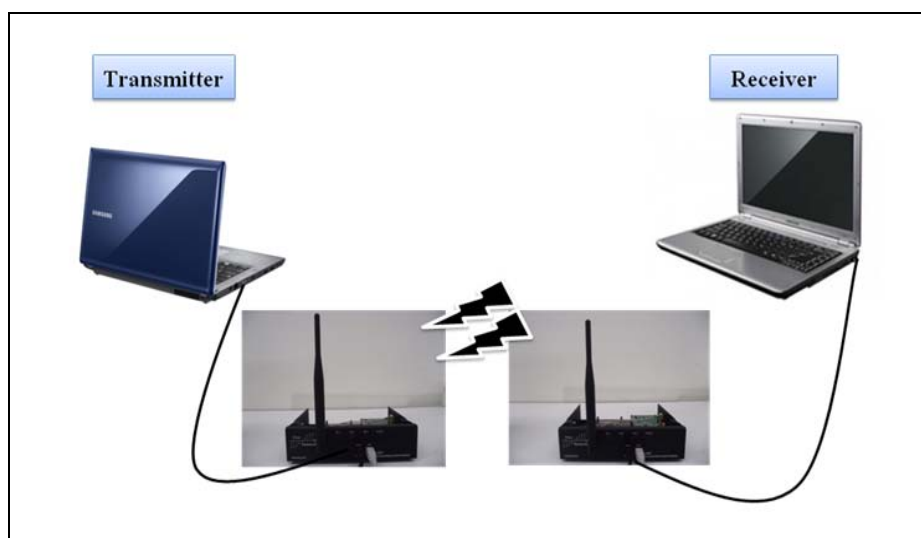
### 4.3.1 การออกแบบชุดทดสอบ

การออกแบบระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ ส่วนประกอบของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบของระบบทั้งภาคส่งและภาครับ และรูปที่ 4.19 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างชุดอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุม



รูปที่ 4.18 บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบทั้งภาคส่งและภาครับ

ส่วนประกอบเบื้องต้นของระบบที่ภาคส่งประกอบไปด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสร้างข้อมูลเพื่อส่งไปยังบอร์ด USRP ซึ่งที่ตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ภาคส่งนี้จะต้องติดตั้งระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu และติดตั้งตัวแพ็คเกจ GNU Radio ด้วย หรือ หากผู้ใช้งานต้องการใช้งานผ่านทางระบบปฏิบัติการวินโดวส์ของไมโครซอฟท์ก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งานพบว่าในการใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ พร้อมทั้งติดตั้ง GNU Radio นั้นมีความสะดวกและให้ประสิทธิภาพดีกว่า ทำให้ผู้วิจัยเลือกที่จะใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu แทนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ตัวบอร์ด USRP จะเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตเชื่อมต่อ USB 2.0 เพื่อรับข้อมูลที่ต้องการส่งจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปประมวลผลที่บอร์ด USRP ก่อนส่งออกอากาศไปยังภาครับ ในตัวบอร์ด USRP จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ FPGA ที่ใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูลและส่งข้อมูลดังกล่าวไปที่อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก หลังจากที่ข้อมูลผ่านตัวแปลงสัญญาณ DAC แล้ว สัญญาณดังกล่าวก็จะถูกส่งไปที่ Daughter board (XCVR2450) เพื่อทำการส่งออกอากาศไปยังภาครับต่อไป



รูปที่ 4.19 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์

เมื่อสัญญาณเดินทางมายังภาครับ ที่ประกอบไปด้วยตัวบอร์ด USRP ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB 2.0 สัญญาณที่รับมาจะถูกแปลงจากคลื่นวิทยุให้เป็นความถี่กลางและทำการแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งข้อมูลไปยัง FPGA เพื่อประมวลผลข้อมูลก่อนส่งไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมเก็บข้อมูลที่ได้อีกต่อไป

#### 4.3.1.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC)

- ภาคส่ง

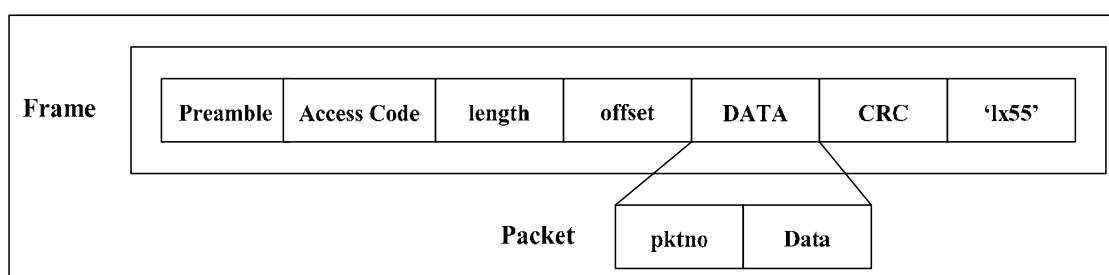
การออกแบบชุดทดสอบตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) ทางผู้วิจัยได้นำตัวอย่างโปรแกรมชื่อ `benchmark_ofdm_tx.py` ที่อยู่ในไฟล์ `/usr/share/gnuradio/example/digital/ofdm` มาทำการปรับปรุงเพื่อให้เข้ากับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) ซึ่งในการส่งข้อมูลนั้นมีพารามิเตอร์ที่สำคัญมากอยู่ 1 ตัวคือ ค่าอัตราการส่งข้อมูลของภาคส่ง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากเพราะหากมีค่าไม่เท่ากับภาครับจะทำให้ที่ภาครับไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ ซึ่งอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.7

$$Tx\_bitrate = \frac{Dr}{Ipr} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $Dr$  คือ อัตราการแซมปลิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 64 MS/sec.

$Ipr$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้บอกอินเตอร์โพลเตอร์ของ FPGA ในการอินเตอร์โพลตสัญญาณ ด้วยค่าที่เรากำหนดโดยมีค่าอยู่ระหว่าง [4-512]

- โครงสร้างเฟรมข้อมูล



รูปที่ 4.20 โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ภาคส่ง

เฟรมข้อมูลที่ถูกขึ้นมาที่ภาคส่งเพื่อทำการส่งออกอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 สามารถสร้างเฟรมข้อมูลได้จากผู้ใช้งานโดยตรงหรือสามารถสร้างเฟรมข้อมูลได้ในตัวโปรแกรม ซึ่งโครงสร้างเฟรมมีส่วนที่สำคัญนั่นคือแพ็คเกจข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังภาครับประกอบไปด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$pktno$  คือ เลขประจำตัวแพ็คเกจ หรือ packet number มีขนาด 2 ไบต์

$Data$  คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

ขนาดแพ็คเกจข้อมูล ( $pkt\_size$ ) คือ 1500 ไบต์ ซึ่ง 2 ไบต์แสดงเลขของแพ็คเกจ ดังนั้นในแต่ละเฟรมจะบรรจุข้อมูลที่มีขนาด  $pkt\_size - 2$  ซึ่งในแต่ละเฟรมนั้นจะมีส่วนที่แสดงจุดสิ้นสุดของเฟรมนั่นคือ  $0x55$  เมื่อภาครับตรวจเจอตัวเลขชุดนี้ก็จะหยุดรับข้อมูลทันที และในส่วนที่แสดงให้ภาครับรับรู้ว่ภาคส่งเริ่มส่งเฟรมข้อมูลมาใหม่นั้นคือ preamble รูปที่ 4.21 แสดงถึงโปรแกรมในการสร้างเฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง ฟังก์ชัน `struct` มีหน้าที่ในการสร้างแพ็คเกจตามรูปที่ 4.21 `struct.pack()` มีหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่ถูกสร้างออกมาให้อยู่ในรูปของแพ็คเกจข้อมูล และ `struct.unpack()` มีหน้าที่ในการถอดข้อมูลออกจากแพ็คเกจข้อมูลซึ่งจะมีการใช้งานฟังก์ชันนี้ที่ภาครับ

```

nbytes = int(1e6 * options.megabytes)
n = 0
pktno = 0
pkt_size = int(options.size)
while n < nbytes:
    if options.from_file is None:
        data = (pkt_size - 2) * chr(pktno & 0xff)
    else:
        data = source_file.read(pkt_size - 2)
    if data == "":
        break;
    payload = struct.pack('!H', pktno & 0xffff) + data
    send_pkt(payload)
    n += len(payload)
    sys.stderr.write('.')
    if options.discontinuous and pktno % 5 == 4:
        time.sleep(1)
    pktno += 1
send_pkt(eof=True)
tb.wait()

```

#### รูปที่ 4.21 โปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างเฟรมข้อมูล

- **ภาครับ**

สำหรับ โปรแกรมที่ใช้ในภาครับเป็นการนำโปรแกรม benchmark\_ofdm\_rx.py ที่อยู่ใน /usr/share/gnuradio/example/digital/ofdm มาพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) โดยที่ภาครับนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจข้อมูลที่ได้รับโดยวิธี Cyclic Redundancy Check โดยทำการตรวจสอบหมายเลขแพ็กเกจ หากมีหมายเลขแพ็กเกจที่ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับก็จะนับแพ็กเกจนั้นเป็นแพ็กเกจที่ถูกต้อง รูปที่ 4.22 แสดงโครงสร้างของส่วนที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจที่ภาครับ หากแพ็กเกจที่ได้รับได้ที่ภาครับมีความถูกต้องจะแสดงสถานะใน command line คือ True หากแพ็กเกจที่ได้รับได้มีความผิดพลาดและเลขแพ็กเกจไม่ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับสถานะใน command line จะแสดงเป็น False

```

global n_rcvd, n_right
def main():
    global n_rcvd, n_right
    n_rcvd = 0
    n_right = 0
    def rx_callback(ok, payload):
        global n_rcvd, n_right
        (pktno,) = struct.unpack('!H', payload[0:2])
        n_rcvd += 1
        if ok:
            n_right += 1
        print "ok = %5s pktno = %4d n_rcvd = %4d n_right = %4d" % (
            ok, pktno, n_rcvd, n_right)

```

รูปที่ 4.22 โครงสร้างโปรแกรมในส่วนที่ตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจ

ในส่วนของภาครับมีพารามิเตอร์ที่สำคัญเหมือนกันกับภาคส่งนั่นคืออัตรา  
การรับข้อมูลเข้ามาประมวลผล หากมีค่าไม่ตรงกันกับอัตราการส่งข้อมูลออกมาจากภาคส่ง จะทำให้  
ไม่สามารถรับแพ็กเกจข้อมูลที่ภาครับได้เลย สมการที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ในการหาอัตราเร็วใน  
การรับข้อมูลที่ภาครับ

$$Rx\_bitrate = \frac{Ar}{Dcr} \quad (4.8)$$

เมื่อ  $Ar$  คือ อัตราการแซมปลิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกซึ่งมีค่า  
เท่ากับ 128 MS/sec.

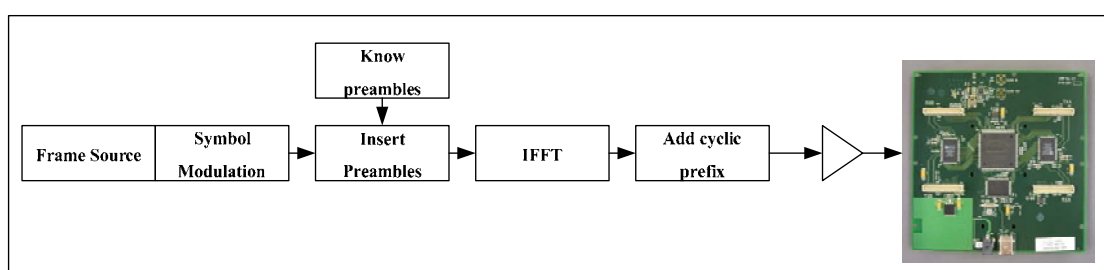
$Dcr$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้บอกค่าที่ใช้ในการ Decimate สัญญาณ ไปยังชุดอุปกรณ์  
Digital Down Convertor (DDC) ซึ่งมีค่า [2-256]



### 4.3.1.2 บล็อกไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE802.11p

#### (WAVE-DSRC)

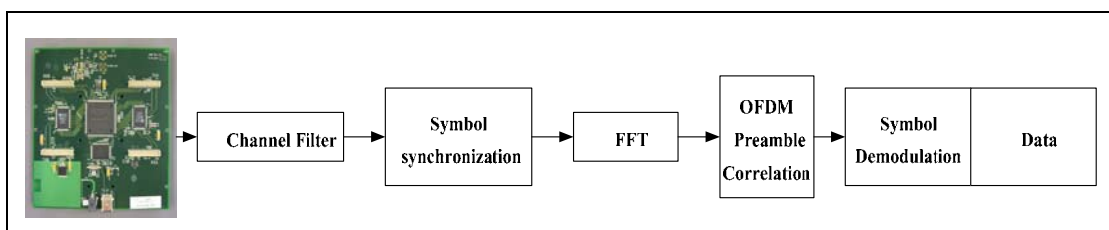
ในการออกแบบชุดอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) นี้มีการนำโปรแกรม benchmark\_ofdm\_tx.py และ benchmark\_ofdm\_rx.py มาพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐานดังกล่าวรูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของภาคส่ง



รูปที่ 4.23 โครงสร้างของภาคส่งสัญญาณ OFDM

โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ภาคส่งประกอบด้วยบล็อกในการสร้างเฟรมข้อมูลซึ่งมีกระบวนการในการสร้างเฟรมดังเนื้อหาที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น จากนั้นเมื่อได้เฟรมข้อมูลแล้วก็จะนำเฟรมที่ได้ไปทำการมอดูเลต หลังจากนั้นก็จะทำการเพิ่ม Preamble เข้าไปเพื่อแจ้งให้ภาครับสามารถรับเฟรมข้อมูลได้ เมื่อได้เฟรมข้อมูลที่มีการเพิ่ม preamble เข้าไปแล้วก็จะนำไปผ่านกระบวนการ IFFT และเสริมสร้างไซคลิกเพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความคงทนต่อการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีก่อนที่จะส่งสัญญาณไปยังตัวบอร์ด USRP และทำการส่งสัญญาณไปยังภาครับผ่านทางชุดอุปกรณ์ daughter board ซึ่งในการพัฒนาตัวโปรแกรม benchmark\_ofdm\_tx.py จะทำการพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) โดยทิศทางการเดินทางของข้อมูล (Flow graph) จะเป็นไปดังรูปดังกล่าวมาข้างต้น

โครงสร้างของภาครับเป็นไปดังรูปที่ 4.24 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ USRP เมื่อรับสัญญาณผ่านทาง daughter board มาแล้ว สัญญาณก็จะเข้าไปสู่ตัวกรองสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะถูกถอดตัวเสริมสร้างไซคลิกและเดินทางเข้าไปสู่บล็อกในการทำ Symbol synchronization ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการใช้วิธีการ ML synchronization เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วสัญญาณจะเดินทางไปยังกระบวนการ FFT จากนั้นก็จะนำสัญญาณที่ได้ไปดีมอดูเลตเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4.24 โครงสร้างของภาครับสัญญาณ OFDM

ส่วนที่มีความสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือกระบวนการปรับแต่งสัญญาณที่ภาครับเพื่อให้ได้มาซึ่งช่องสัญญาณ กระบวนการนี้สามารถคำนวณได้จาก preamble เมื่อ  $x[i]$  แสดงถึงค่า preamble ที่อยู่ในแต่ละความถี่ย่อย และ  $\hat{y}[i]$  คือสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ ดังสมการที่ 4.9

$$\hat{y}[i] = y[i] \exp\left(j2\pi f_{\Delta} i \frac{N_{cp}}{N_{FFT}}\right) \quad (4.9)$$

เมื่อ  $N_{cp}$  คือ Number of Cyclic prefixes length

$N_{FFT}$  คือ FFT length

ดังนั้นเมื่อภาครับรับสัญญาณได้และมีการรับรู้ Preamble ที่ถูกสร้างมาในแต่ละความถี่ย่อย ก็จะสามารถประมาณช่องสัญญาณได้จากสมการ 4.10 และนำช่องสัญญาณที่ได้ไปใช้งานต่อไป

$$H[i] = \frac{x[i]}{\hat{y}[i]} \quad 4.10$$

#### 4.3.1.3 วิธีการ Synchronization แบบ Van de Beek

กระบวนการทำ Synchronization นี้จะเป็นการใช้ประโยชน์จาก preamble ที่ถูกสร้างขึ้นมา ซึ่งประโยชน์ของ preamble นี้สามารถใช้ในการบอกจุดเริ่มต้นของเฟรม ประมาณค่า frequency offset คำนวณและปรับปรุงช่องสัญญาณ วิธีการ synchronization หลาย ๆ วิธีต่างก็มีพื้นฐานที่ใช้ประโยชน์จาก preamble ทั้งสิ้น จุดเด่นของการทำ Synchronization แบบ Van de Beek

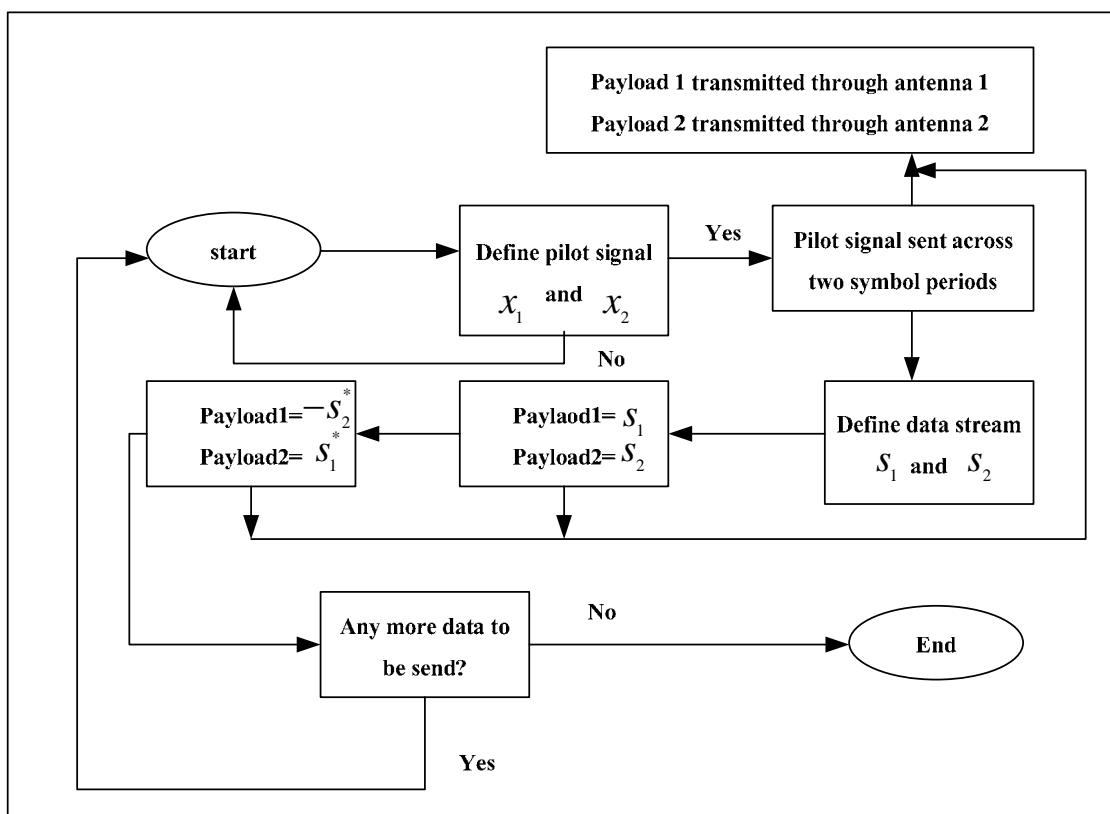
คือการใช้วิธีนี้มีการสร้างสัญญาณทางเวลาให้กับสัญญาณที่รับได้ทุก ๆ สัญญาณ มรการประมาณค่าทางความถี่ให้แก่แต่ละสัญญาณ ทำให้แต่ละสัญญาณเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งแตกต่างจากวิธีอื่นที่ทำให้แก่เฟรมทั้งเฟรมเพียงสัญญาณเดียว ทำให้ที่ภาครับมีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถรับเฟรมข้อมูลได้ทั้งเฟรมและมีความถูกต้องมากขึ้น

#### 4.3.1.4 เทคนิคไมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก

ในการนำระบบไมโมที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ รูปที่ 4.25 แสดงถึงผังโปรแกรมสำหรับภาคส่ง และ รูปที่ 4.27 แสดงถึงผังโปรแกรมของภาครับ โดยที่ภาคส่งนั้น หนึ่งช่วงเวลาสัญลักษณ์ (Symbol period) จะมีสัญลักษณ์ข้อมูลจำนวน 2 สัญญาณสัญลักษณ์ถูกส่งไปพร้อม ๆ กันจากสายอากาศ 1 และ 2 สัญลักษณ์ข้อมูลนั้น คือ  $S_1$  และ  $S_2$  ตามลำดับและในช่วงเวลาถัดไปที่ช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่สอง ( $t + T$ ) สัญลักษณ์  $-S_2^*$  จะถูกส่งจากสายอากาศต้นที่ 1 และ สัญญาณ  $S_1^*$  จะถูกส่งออกจากสายอากาศต้นที่ 2 เมื่อ \* คือ complex conjugate และ T คือ symbol duration กระบวนการทำ complex conjugate ใน ช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่สองทำให้มั่นใจว่า สัญญาณ orthogonal ถูกส่งออกไปจากสายอากาศสองต้น เนื่องจากสัญญาณนั้น orthogonal ต่อกันและกัน โอกาสที่จะเกิด correlation ระหว่างสองสัญญาณนั้นจะมีค่าลดลงตลอดการส่งสัญญาณ ดังตารางที่ 4.4

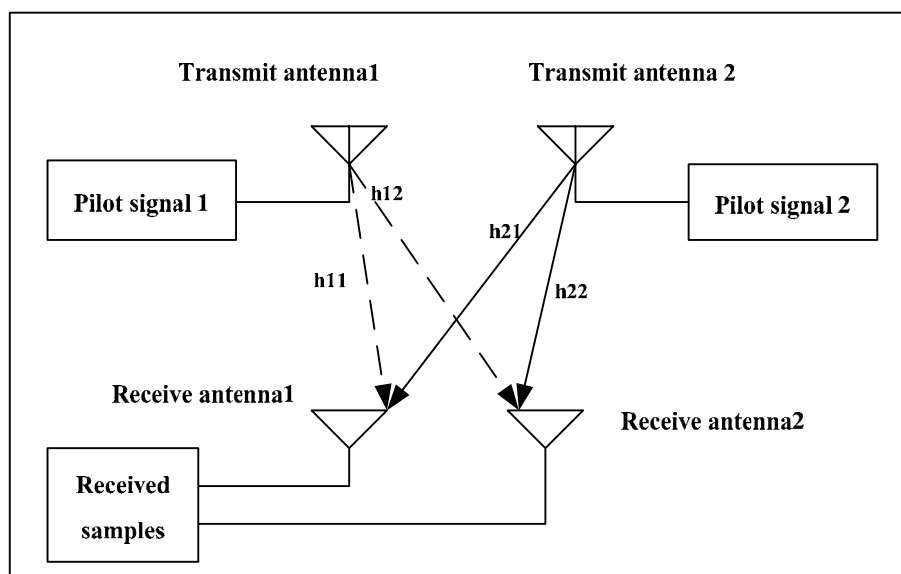
ตารางที่ 4.4 แสดงสัญลักษณ์ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ

	สายอากาศ 1	สายอากาศ 2
ช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่ 1	$S_1$	$S_2$
ช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่ 2	$-S_2^*$	$S_1^*$



รูปที่ 4.25 แผนผังโปรแกรมสำหรับภาคส่ง

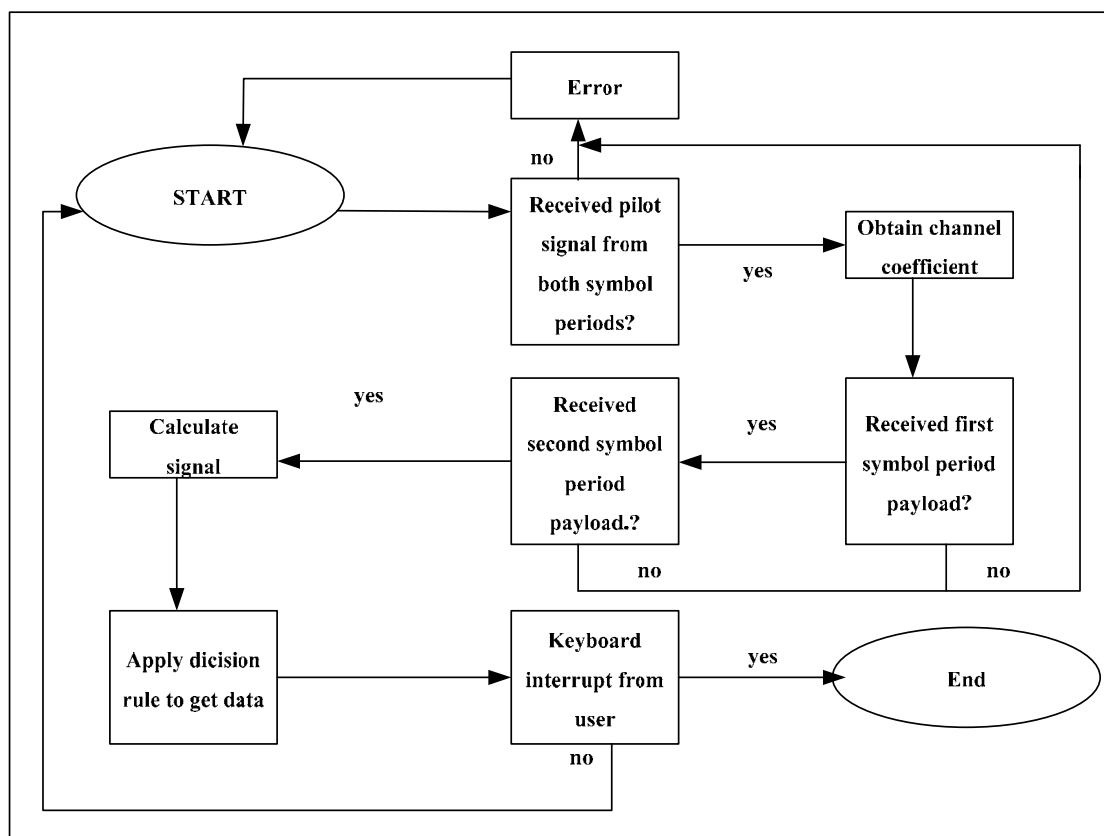
ในส่วนของภาครับนั้นเมื่อมีการนำระบบโมโม่เข้ามาใช้งาน ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ช่องสัญญาณ หากภาครับไม่มีการรับรู้สภาพช่องสัญญาณก็อาจจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าระบบเดิมที่ใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับเพียงด้านละ 1 ต้น ฉะนั้นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบโมโม่ นั้นคือช่องสัญญาณไร้สาย จะต้องมีกระบวนการประมาณค่าช่องสัญญาณดังกล่าวละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.26 ฟังแสดงกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ

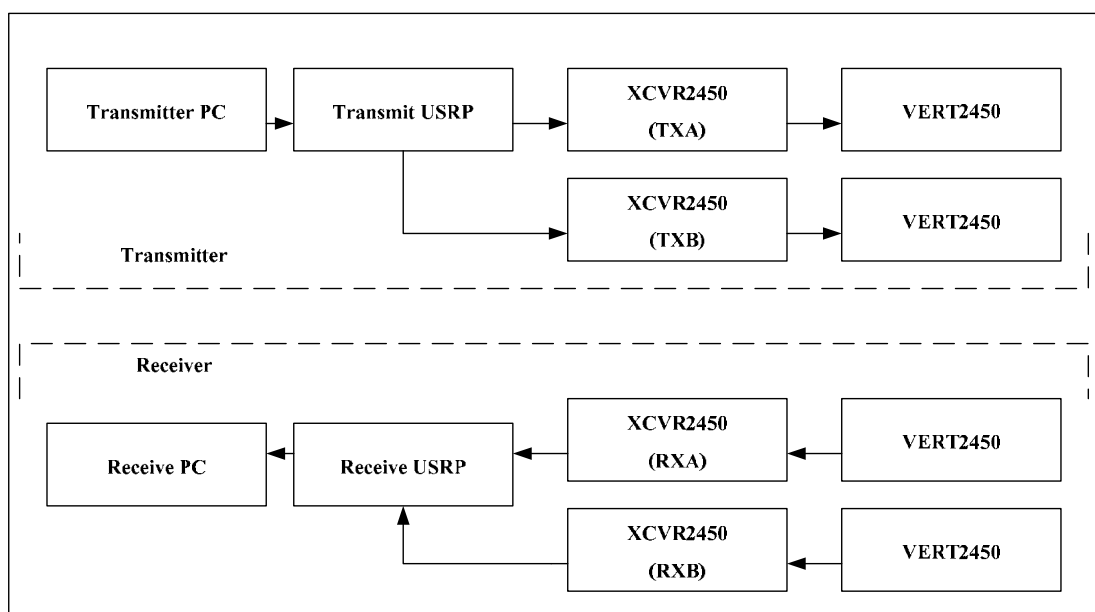
กระบวนการประมาณช่องสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ขั้นตอนแรก เป็นการกำหนด pilot ขึ้นมาและบอกให้ภาครับรู้ว่า pilot นั้นมีลักษณะอย่างไรจากนั้นทำการกำหนดขนาด pilot ที่ใช้ ซึ่งในที่นี้มีการใช้สายอากาศที่ภาครับจำนวน 2 ต้น ดังนั้นจะต้องมีการทำการประมาณค่าช่องสัญญาณทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อให้ได้มาซึ่งสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ จากนั้นทำการส่งสัญญาณ pilot และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณและนำช่องสัญญาณที่ได้ไปใช้ต่อไป

ในส่วนของภาครับมีแผนผังโปรแกรมดังรูปที่ 4.26 ซึ่งที่ภาครับนี้ก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปถอดเอาข้อมูลออกมานั้นจะต้องมีการใช้ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ได้ประมาณการไว้มาดำเนินการหาสัญญาณที่รับมา และนำไปทำการคิมอดูเลตเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4.27 แผนผังโปรแกรมในส่วนของภาครับ

หลังจากที่ได้ทราบถึงการออกแบบโปรแกรมที่ภาคส่งและภาครับแล้ว สามารถนำมาสร้างเป็น Flow graph เพื่อนำเข้าไปสู่การเขียนโปรแกรมที่สอดคล้องกับงานได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แบบจำลองส่วนประกอบของระบบไม โมที่มีการใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

### 4.3.2 พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการทดสอบ

ในการวัดผลประสิทธิภาพของระบบทดสอบ สามารถวัดผลได้ดังพารามิเตอร์ต่อไปนี้

#### 4.3.2.1 อัตราความผิดพลาดแพ็กเกจ

อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจสามารถวัดผลได้ด้วยค่าต่าง ๆ ได้แก่  
 $pktno$  คือ เลขแพ็กเกจ

$n\_rcvd$  คือ จำนวนแพ็กเกจที่รับได้

$n\_right$  คือ จำนวนแพ็กเกจที่รับได้ถูกต้อง

ในการตรวจสอบเลขแพ็กเกจ หากแพ็กเกจนั้นมีความถูกต้องจะนับ  $n\_right$  เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนแพ็กเกจที่ถูกต้อง ส่วนจำนวนแพ็กเกจที่รับได้นั้นก็จะเพิ่มจำนวนไปเรื่อยจนหมดจำนวนตามที่ภาคส่งส่งมา สมการที่ 4.11 (Syahrezal, M., 2009) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดกับพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น

$$PER = \left( 1 - \left( \frac{n\_right}{pktno} \right) \right) \times 100\% \quad (4.11)$$

ตัวอย่าง กำหนด  $pktno=2451$   $n\_rcvd=780$   $n\_right=750$

นำค่าต่าง ๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4.11 จะได้ว่า

$$PER = \left( 1 - \left( \frac{750}{2451} \right) \right) \times 100\% = 69.4\%$$

ดังนั้น อัตราความผิดพลาดบิตจะได้ 69.4%

#### 4.3.2.2 อัตราความผิดพลาดบิต

หลังจากที่สามารถหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจได้แล้ว จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจสามารถแสดงได้ดังสมการ 4.12 (Kukshya, V., 2006)

$$1 - PER = (1 - BER)^L \quad (4.12)$$

เมื่อ  $PER$  คือ อัตราความผิดพลาดแพ็กเกจ

$BER$  คือ อัตราความผิดพลาดบิต

$L$  คือ จำนวนแพ็กเกจที่ใช้

ตัวอย่าง จากตัวอย่างข้างต้น  $PER=69.04\%$  ดังนั้น  $PER=69.04/100=0.694$

ขนาดแพ็กเกจมีค่า 1500 ไบต์ - 2 ไบต์ (เลขแพ็กเกจ)

จำนวนแพ็กเกจแพ็กเกจ 400 แพ็กเกจ

จะได้  $1 - 0.694 = (1 - BER)^{400}$

$$BER = 2.956 \times 10^{-3}$$

หลังจากที่ทราบถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องแล้ว ในส่วนถัดไปจะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบชุดอุปกรณ์

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ



ผู้วิจัยได้เลือกออกแบบชุดทดสอบตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) เนื่องจากมาตรฐานดังกล่าวถูกออกแบบสำหรับการสื่อสารระยะใกล้ที่มีการนำไปใช้งานกับระบบขนส่งอัจฉริยะและมาตรฐานนี้ยังมีการเพิ่มช่วงเวลาสัญลักษณ์ OFDM ส่งผลให้ระบบสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ติดรถ OBU กับอุปกรณ์ข้างทาง RSU ได้ดี อีกทั้งการเติมโซ่คลิกเข้าไปที่ภาคส่งก่อนส่งสัญญาณ OFDM นั้นทำให้สัญญาณมีความทนทานต่อปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

#### 4.3.3.1 การทดลองตามมาตรฐาน IEEE802.11p

##### ● การจัดวางชุดทดสอบ

ในการจัดวางชุดทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงถึงการจัดวางชุดอุปกรณ์ทดสอบแบบเดิม (SISO) ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ข้างทาง (RSU) ถูกติดตั้งอยู่ริมทาง โดยเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมชุดอุปกรณ์ มีการนำชุดอุปกรณ์ข้างทางติดตั้งไว้ริมข้างทางบนแท่นวางความสูง 2 เมตรและชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ (OBU) ติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมที่ติดตั้งอยู่ในยานพาหนะและตัวบอร์ด USRP ถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะ กำหนดให้ภาคส่งคือ อุปกรณ์ข้างทาง และภาครับคืออุปกรณ์ติดยานพาหนะ โดยสภาพถนนที่ใช้ทดสอบเป็นถนน 2 ช่องจราจร สถานที่ทดสอบ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 4.29 การจัดวางชุดทดสอบ

- การทดสอบ

ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างชุดอุปกรณ์ข้างทางกับชุดอุปกรณ์ติครด มีวัตถุประสงค์ในการหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างชุดอุปกรณ์ภาคส่งกับชุดอุปกรณ์ภาครับ และหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยการทดสอบสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

*ภาคส่ง (RSU)*



รูปที่ 4.30 การจัดวางอุปกรณ์ RSU

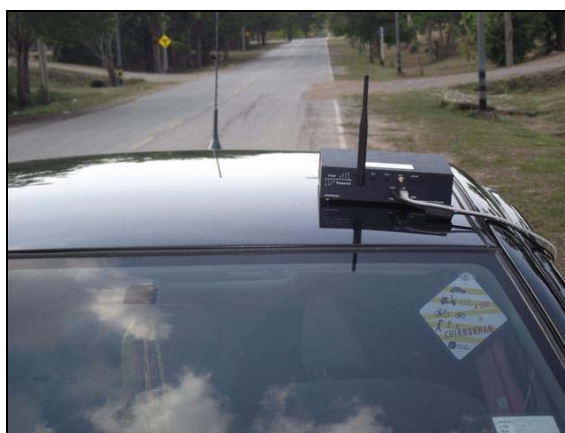
- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและลือกอินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่งsudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปสู่ที่อยู่ของโปรแกรม benchmark\_ofdm\_tx.py
- ตั้งค่าสคริปที่ภาคส่งดังต่อไปนี้

```
sudo ./benchmark_ofdm_tx.py -tx-freq=5900000000 -m bpsk -
S 400 -i 128 -tx-amplitude=7000 -fft-length=64 -occupied-tones=52 -cp-length=32
```

ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้

--tx-freq	คือ ค่าความถี่ที่ใช้
--m	คือ รูปแบบการมอดูเลต
-S	คือ ตั้งขนาดความยาวของแพ็กเกจ
-i	คือ การตั้งค่า interpolation rate ของภาคส่ง
--tx-amplitude	คือ การตั้งค่า Transmitter Digital Amplitude ที่ภาคส่งมี ค่าตั้งแต่ [0-32768]
--fft-length	คือ จำนวนความถี่ย่อยทั้งหมด
--occupied-tones	คือ จำนวนความถี่ย่อยของข้อมูล
--cp-length	คือ จำนวนตัวเสริมสร้างไซคลิก

ภาครับ (OBU)



รูปที่ 4.31 การจัดวางอุปกรณ์ติดยานพาหนะ OBU

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและล็อกอินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่งsudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปสู่ที่อยู่ของโปรแกรม benchmark\_ofdm\_rx.py
- ตั้งค่าสคริปที่ภาครับดังต่อไปนี้
- `sudo ./benchmark_ofdm_rx.py --rx-freq=5900000000 -`  
`m bpsk-d 64 --fft-length=64 --occupied-tones=52 --cp-length=32 --log`
- ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้
- --rx-freq                   คือ ค่าความถี่ที่ใช้





รูปที่ 4.32 การจัดวางชุดทดสอบระบบโมโม

- การทดสอบ

ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างชุดอุปกรณ์ข้างทางกับชุดอุปกรณ์ติดรถ มีวัตถุประสงค์ในการหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างชุดอุปกรณ์ภาคส่งกับชุดอุปกรณ์ภาครับ และหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยการทดสอบสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

*ภาคส่ง (RSU)*



รูปที่ 4.33 การจัดวางอุปกรณ์ RSU ระบบโมโม

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและถือกินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่ง sudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปสู่ที่อยู่ของโปรแกรม benchmark\_ofdm\_tx\_mimo.py
- ตั้งค่าสคริปที่ภาคส่งดังต่อไปนี้

```
sudo ./benchmark_ofdm_tx_mimo.py --tx-freq=5900000000 --m bpsk --S 400 --i
128 --tx-amplitude=7000 --fft-length=64 --occupied-tones=52 --cp-length=32 --
tx-ant=2 --rx-ant=2
```

ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้

--tx-freq	คือ ค่าความถี่ที่ใช้
--m	คือ รูปแบบการมอดูเลต
-S	คือ ตั้งขนาดความยาวของแพ็กเกจ
-i	คือ การตั้งค่า interpolation rate ของภาคส่ง
--tx-amplitude	คือ การตั้งค่า Transmitter Digital Amplitude ที่ภาคส่งมีค่าตั้งแต่ [0-32768]
--fft-length	คือ จำนวนความถี่ย่อยทั้งหมด
--occupied-tones	คือ จำนวนความถี่ย่อยของข้อมูล
--cp-length	คือ จำนวนตัวเสริมสร้างไซคลิก
--rx-ant	คือ จำนวนสายอากาศที่ใช้ในภาครับ
--tx-ant	คือ จำนวนสายอากาศที่ใช้ในภาคส่ง

#### ภาครับ (OBU)

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและถือกินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่ง sudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปสู่ที่อยู่ของโปรแกรม benchmark\_ofdm\_rx\_mimo.py
- ตั้งค่าสคริปที่ภาครับดังต่อไปนี้
- sudo ./benchmark\_ofdm\_rx\_mimo.py --rx-freq=5900000000 --m bpsk --d 64 --fft-length=64 --occupied-tones=52 --cp-length=32 --log --rx-ant=2 --tx-ant=2
- ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้
- --rx-freq คือ ค่าความถี่ที่ใช้
- --m คือ รูปแบบการมอดูเลต
- -d คือ การตั้งค่า Decimation rate ของภาครับ
- --fft-length คือ จำนวนความถี่ย่อยทั้งหมด

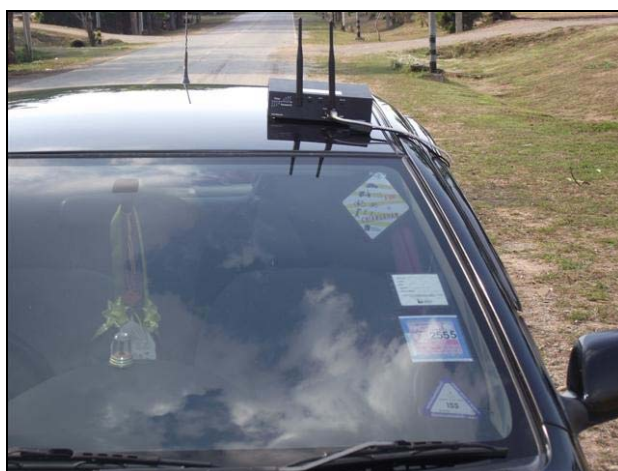
- --occupied-tones คือ จำนวนความถี่ย่อยของข้อมูล
- --cp-length คือ จำนวนตัวเสริมสร้างไซคลิก
- --rx-ant คือ จำนวนสายอากาศที่ใช้ในภาครับ
- --tx-ant คือ จำนวนสายอากาศที่ใช้ในภาคส่ง

จากการตั้งค่า Interpolation rate และ Decimation rate สามารถแสดงอัตราการส่งข้อมูลและรับข้อมูลได้ดังนี้

$$Tx\_rate = \frac{Dr}{Ipr} = \frac{128 \times 10^6}{128} = 1Mbps$$

$$Rx\_rate = \frac{Ar}{Dcr} = \frac{64 \times 10^6}{64} = 1Mbps$$

ซึ่งการตั้งค่าอัตราการส่งข้อมูลและรับข้อมูลนี้จะต้องมีค่าเท่ากันเพื่อให้สามารถรับแพ็กเกจและวิเคราะห์แพ็กเกจข้อมูลได้ ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงระยะทางไปเรื่อย ๆ จาก 1 เมตร จนถึง 5 เมตร โดยที่ค่าระยะทาง 1 ค่า จะทำการรับส่งข้อมูลกันทั้งหมด 10 ครั้ง พารามิเตอร์ที่ต้องการจะถูกเก็บไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ภาครับ จากนั้นเมื่อทำการทดลองครบทุกค่าแล้ว ก็จะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการถอดแพ็กเกจข้อมูลนำค่า pktno,n\_rcvd และ n\_right มาทำการวิเคราะห์หาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูล ซึ่งค่าระยะทาง 1 ค่า จะมีค่าอัตราความผิดพลาดของข้อมูล 10 ค่า จากนั้นจึงนำค่าดังกล่าวไปหาค่าเฉลี่ยและทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะทางต่อไป



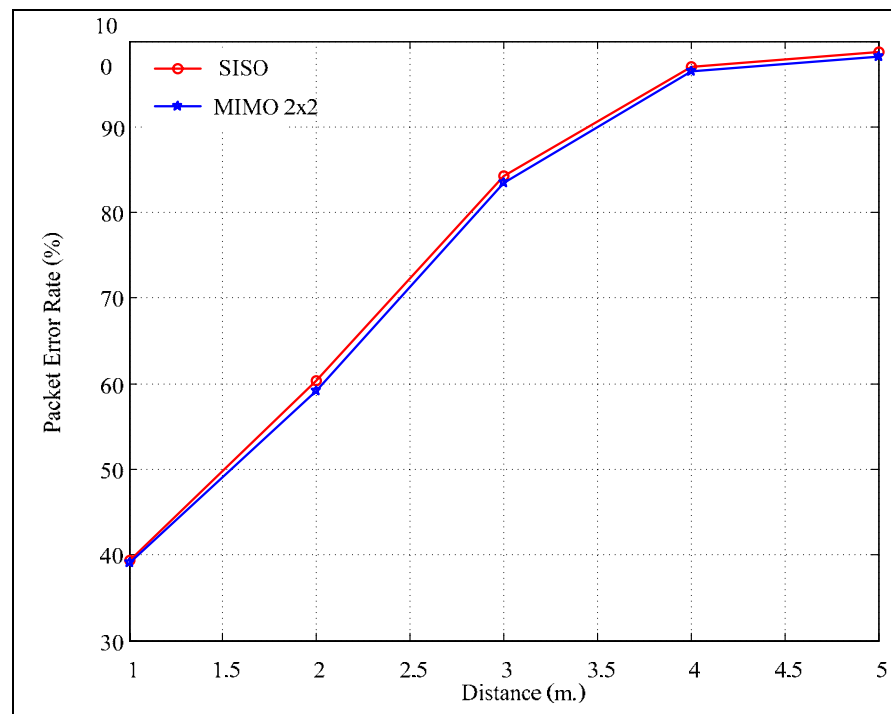
รูปที่ 4.34 การจัดวางชุดอุปกรณ์ OBU ระบบโมโม

#### 4.3.4 ผลการทดสอบ

ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นว่า ในการทดสอบ ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้การออกแบบตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) โดยพารามิเตอร์ที่สนใจในการวัดประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูล อัตราความผิดพลาดบิต และปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลา

##### 4.3.4.1 ผลการทดสอบระบบ SISO และ ระบบ MIMO

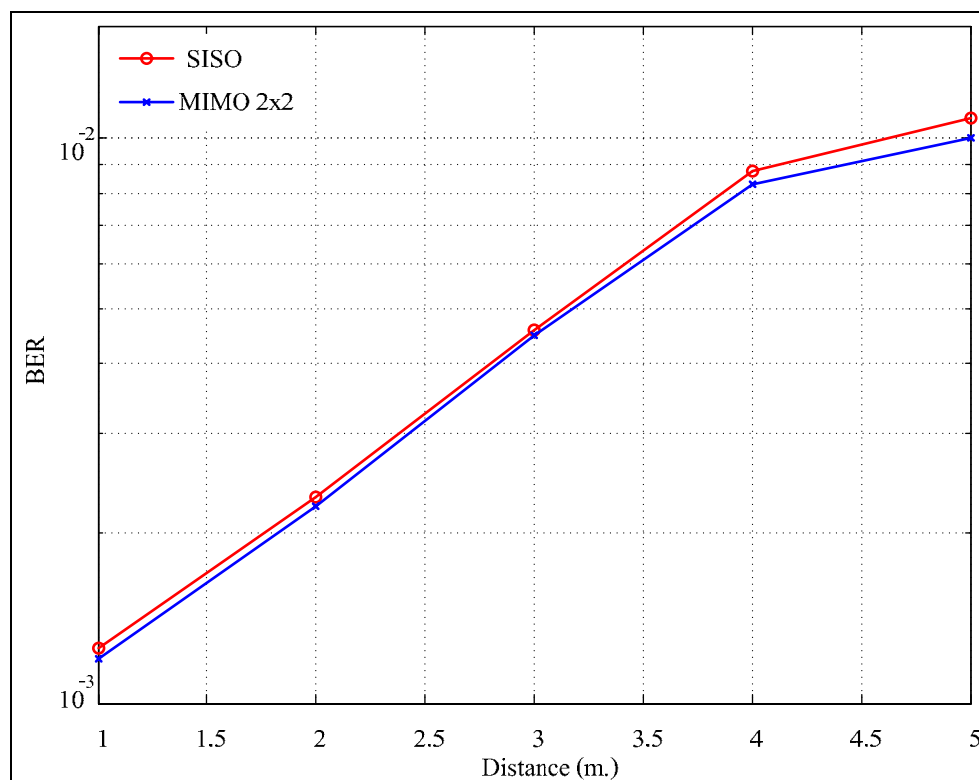
จากรูปที่ 4.35 แสดงผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยเส้นสีแดงแสดงอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจของระบบเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจของระบบโมโม ที่ระยะทางเท่ากับศูนย์เป็นบริเวณที่ภาคส่งหรือชุดอุปกรณ์ข้างทางถูกติดตั้งอยู่จะทำการส่งข้อมูลไปยังภาครับที่ถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ออกห่างจากภาคส่งจะส่งผลให้อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างชุดอุปกรณ์เดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับจำนวนอย่างละ 1 ต้น จะมีอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจสูงกว่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจของระบบโมโม จากผลการทดสอบสามารถยืนยันถึงประสิทธิภาพของระบบโมโมได้



รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

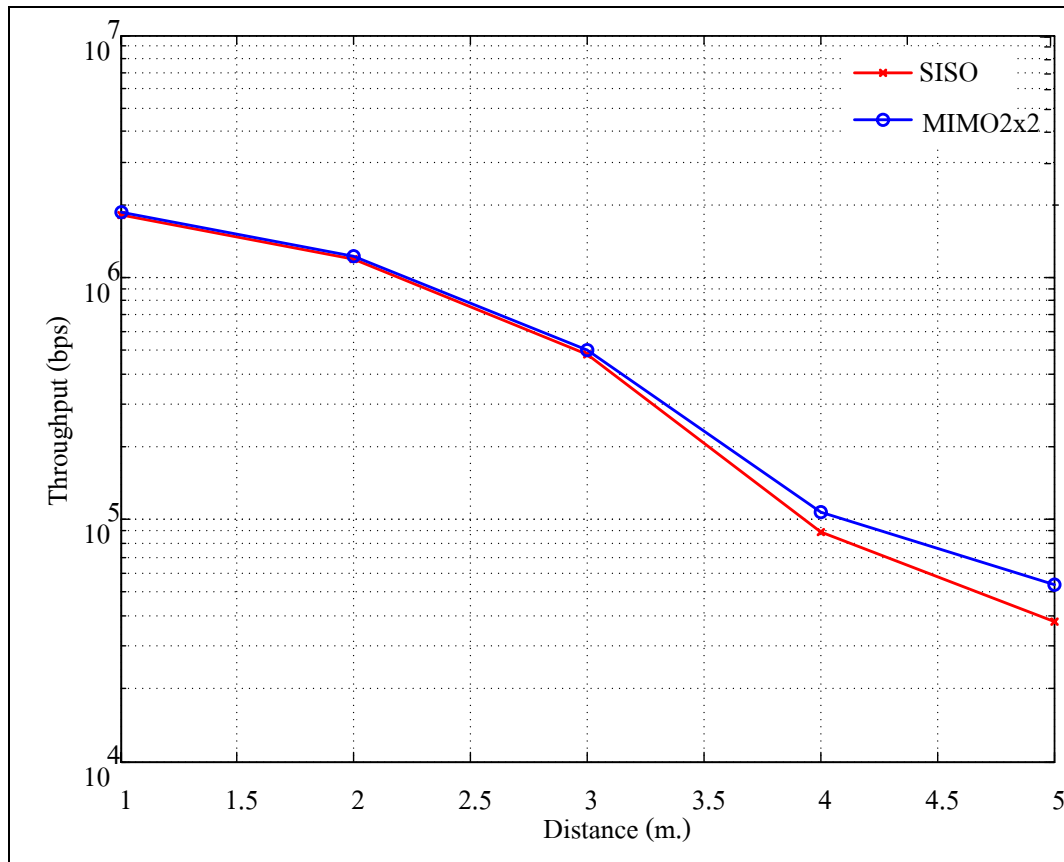


จากรูปที่ 4.36 คือผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ ซึ่งพบว่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ออกห่างจากชุดอุปกรณ์ข้างทาง RSU พบว่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีปริมาณที่สูงขึ้น โดยเฉพาะระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศรับและส่งจำนวน 1 ต้น นั้นมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สูงกว่าระบบ MIMO



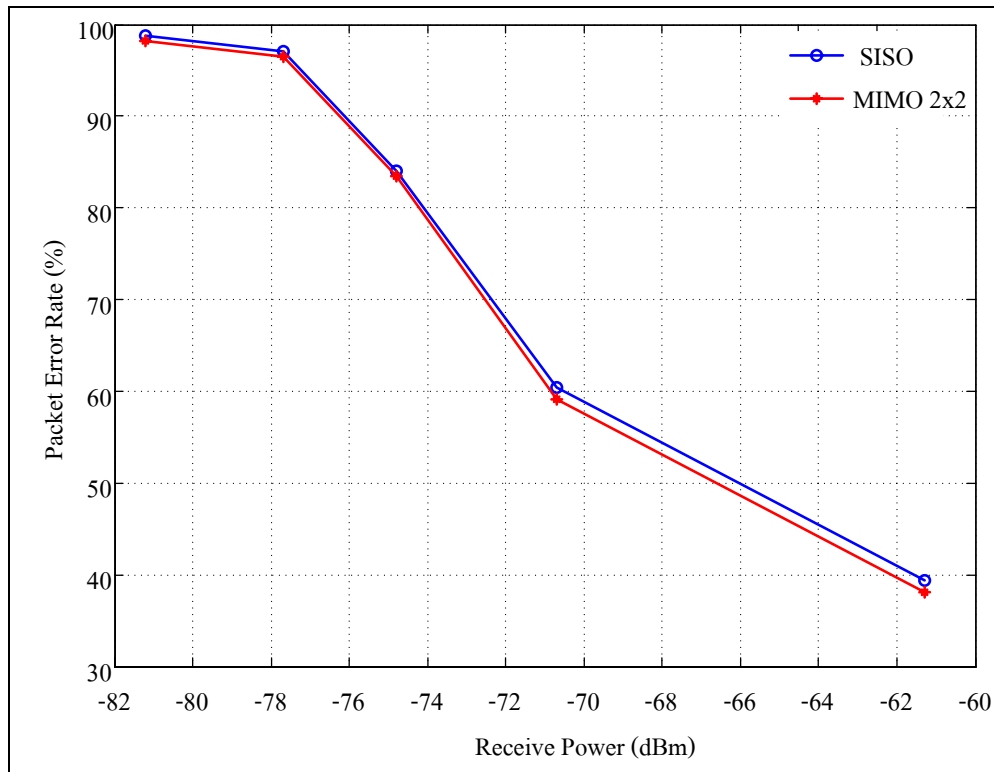
รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

เมื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 4.37 พบว่าเมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ออกห่างจากภาคส่งหรืออุปกรณ์ข้างทางจะทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลามีค่าลดลง ซึ่งจากรูปพบว่า ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาของระบบ MIMO มีปริมาณสูงกว่าระบบเดิม ทั้งนี้สามารถยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพของระบบ MIMO ดังทฤษฎีที่ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและส่งจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อค่าความจุช่องสัญญาณมากขึ้นก็จะสามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นเช่นกัน



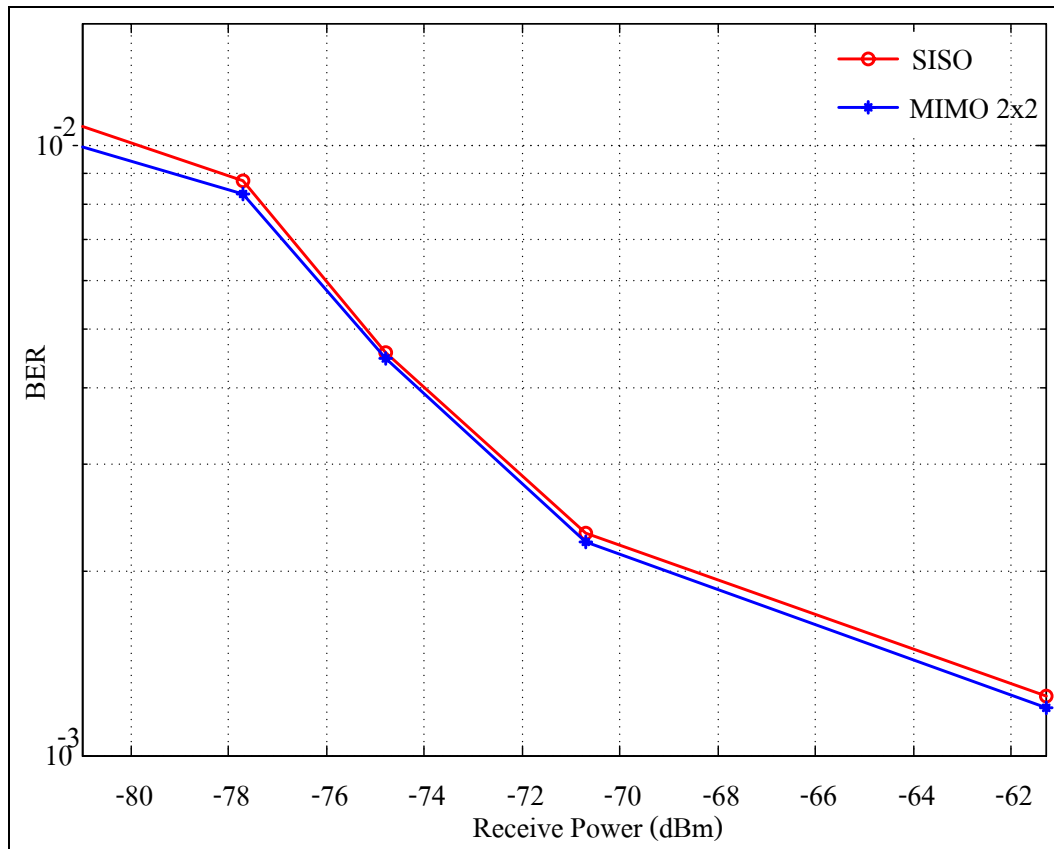
รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับ ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ข้างทางกับ อุปกรณ์ติดยานพาหนะ เพื่อศึกษาถึงผลที่ได้จากระบบโมโมแล้ว พบว่าระบบโมโมได้เข้ามาช่วยเพิ่ม คุณภาพของระบบเดิมได้ จากนั้นเมื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดังรูปที่ 4.38 พบว่าเมื่อความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ ภาครับมีค่าเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่ายานพาหนะเคลื่อนที่เข้าใกล้ชุดอุปกรณ์ RSU ทำให้อัตราความ ผิดพลาดของแพ็กเกจมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าระบบโมโมยังให้ประสิทธิภาพที่ดีเช่นเคย



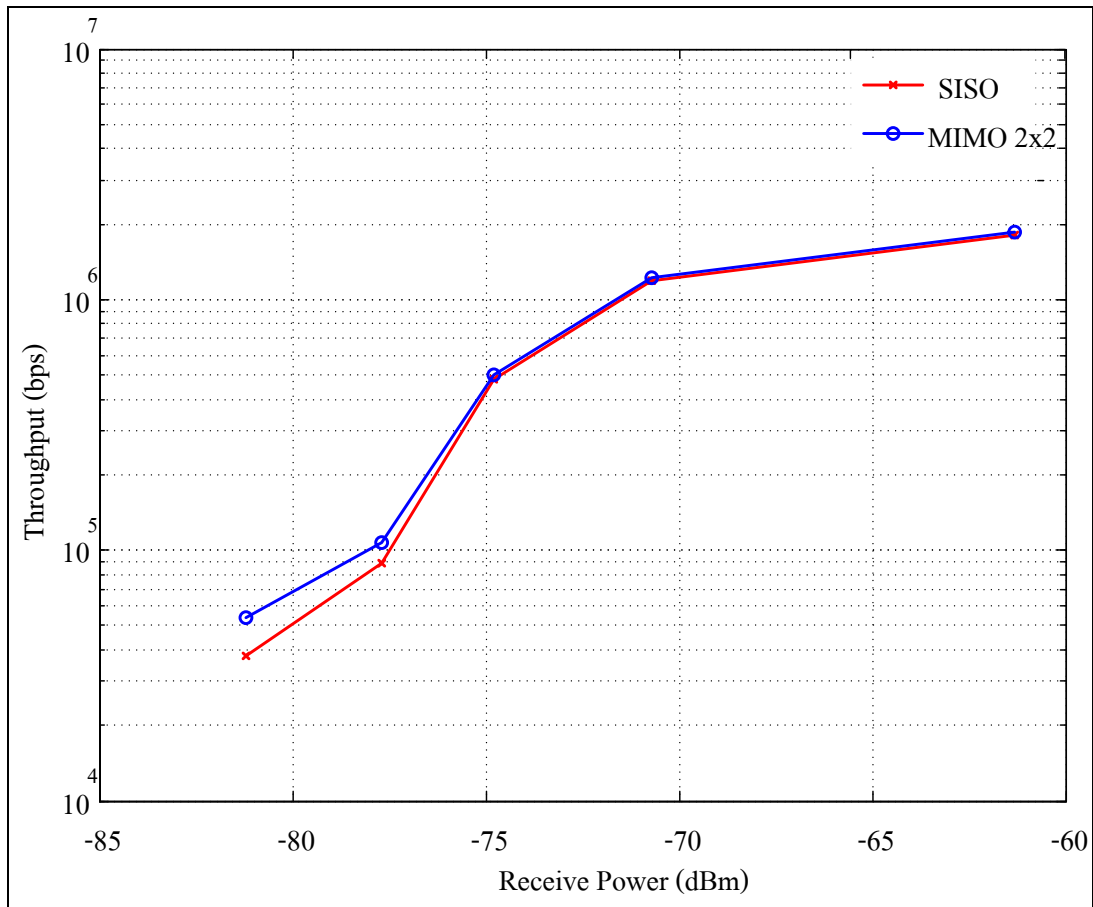
รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับ  
ความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.39 พบว่าอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการใช้ระบบโมโมนั้นมีค่าต่ำกว่าระบบเดิม ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดังรูปสามารถแสดงได้ถึงประสิทธิภาพของระบบโมโมที่มีเหนือกว่าระบบเดิม



รูปที่ 4.39 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

ผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดังรูปที่ 4.40 พบว่า ระบบโมโมยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบเดิม เช่นเคย หลังจากที่ได้ทำการทดสอบเก็บค่าเพื่อศึกษาถึงผลที่ได้จากการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลด้วยเทคนิคโมโมสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นพบว่าระบบโมโมอาศัยข้อดีและจุดเด่นที่หลากหลายเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้



รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

#### 4.4 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้หลังจากที่ได้อ่านแล้วจะได้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบชุดทดสอบ การเลือกชุดทดสอบ การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของระบบ กล่าวถึงกระบวนการในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้รองรับการทำงานที่ตรงต่อเป้าหมายในการใช้งาน ตลอดจนเรียนรู้ถึงการปรับตั้งค่าที่ภาคส่งและภาครับ โดยที่มีข้อควรระวังคือที่ภาครับเมื่อผู้ใช้งานสั่งให้มีการเก็บข้อมูล จะก่อให้เกิดปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ของหน่วยเก็บข้อมูล จากนั้นเมื่อพิจารณาลงลึกถึงผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า เมื่อมีการนำระบบโมโมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารระบบโมโมช่วยทำให้ระบบสื่อสารมีคุณภาพที่ดีขึ้น ดังกราฟที่แสดงให้เห็นศักยภาพของระบบโมโมแล้ว

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยเทคนิคโมโม่ที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก โดยอ้างอิงตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ARIB STD-T75 และ มาตรฐานของทวีปอเมริกาเหนือ IEEE802.11p (WAVE-DSRC) โดยในขั้นต้นได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ ระบบสื่อสารไร้สาย ช่องสัญญาณไร้สาย จากนั้นจึงนำประเด็นสำคัญของแต่ละเรื่องสรุปใจความที่เกี่ยวข้องกัน พบว่าช่องสัญญาณไร้สายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อ การสื่อสารของระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่งระบบขนส่งอัจฉริยะนี้มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สามารถแบ่งรูปแบบการสื่อสารได้เป็น 2 แบบ คือ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะ Vehicle to Vehicle (V2V) และ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง Vehicle to Infrastructure (V2I) งานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง หลังจากที่สามารถเลือกรูปแบบการสื่อสารได้แล้วจึงได้ศึกษาพบว่า ความเร็วระยะห่างระหว่างภาครับภาคส่ง มีผลกระทบต่อ การสื่อสารในรูปแบบดังกล่าว อีกทั้งปัจจัยที่สำคัญคือ การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (multipath fading) เป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการสื่อสารเนื่องจากการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับมีสิ่งกีดขวางมากมาย เมื่อสัญญาณเดินทางไปกระทบกับสิ่งกีดขวางเหล่านั้นก็จะเกิดการสะท้อนส่งผลให้เฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนไป ที่ภาครับเมื่อทำการรับสัญญาณก็เกิดปัญหาหากสัญญาณที่ภาครับเกิดการรวมกันแบบเสริมกันก็จะทำให้รับสัญญาณได้ดี แต่หากเกิดการรวมกันแบบหักล้างกันก็จะทำให้สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพที่แย่ลงไป ความเร็วซึ่งแฝงอยู่ในรูปของความถี่คอปเพลอร์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อระบบสื่อสาร หากยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ความถี่คอปเพลอร์ก็มีค่าสูง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงทางเวลาของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว เมื่อรับสัญญาณที่ภาครับอาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลยเนื่องจากเวลาในการส่งข้อมูลมีน้อย อีกทั้งข้อมูลที่ต้องการส่งก็ยังมีขนาดใหญ่ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้มุ่งหาวิธีที่จะเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว พบว่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและภาคส่งจะทำให้ช่องสัญญาณในการสื่อสารมีความจุมากขึ้น ซึ่งหากความจุของช่องสัญญาณมากขึ้นนั้นหมายถึงสามารถส่งข้อมูลปริมาณมาก ๆ ได้และสามารถส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น อีกทั้งหากเพิ่มกระบวนการปรับปรุงสัญญาณเข้าไป

ก็จะทำให้ระบบสามารถทนต่อการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีได้ ซึ่งระบบไมโม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบเปิด และระบบปิด 2 ระบบนี้แตกต่างกันที่ระบบปิดมีการป้องกันของสัญญาณเพื่อปรับปรุงให้สามารถรับสัญญาณได้ดีขึ้นแต่มีข้อเสียคือซับซ้อน ส่วนระบบเปิดไม่มีการป้องกันสัญญาณ แต่ในการประมวลผลสัญญาณจะมีความง่ายไม่ซับซ้อนดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบไมโมแบบระบบเปิดที่มีการใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีที่ภาคส่งด้วยการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกโดยใช้สายอากาศที่ภาคส่ง 2 ต้น ภาครับ 2 ต้น หลังจากนั้นจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อให้ได้มาซึ่งผลจำลองแบบ แบบจำลองนี้ใช้ช่องสัญญาณไร้สายที่มีการกระจายตัวแบบไรเซียน จากผลการจำลองแบบพบว่า ยิ่งความเร็วเพิ่มขึ้นก็ยิ่งทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลานั้นมีค่าลดลง จากนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกชุดอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบพบว่า เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์หรือ Software Defined Radio เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากการใช้ซอฟต์แวร์กำหนดรูปคลื่นสัญญาณที่ส่ง และดีมอดูเลตสัญญาณที่ภาครับ อีกทั้งยังเป็นการเปลี่ยนปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์เป็นปัญหาทางด้านซอฟต์แวร์แทน แม้กระทั่งระบบปฏิบัติการที่ใช้ควบคุมยังเป็นแบบโอเพ่นซอส จึงเป็นเหตุให้ผู้วิจัยเลือกใช้ชุดอุปกรณ์ Universal Software Radio Peripheral (USRP) ที่มี GNU Radio เป็นแพ็คเกจหลักในการออกแบบระบบสื่อสาร โดยที่ GNU Radio ใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2 ภาษา ได้แก่ C++ และ ไพธอน ภาษา C++ ใช้ในการสร้างบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณและใช้ไพธอนเชื่อมบล็อกประมวลผลสัญญาณแต่ละบล็อกเข้าด้วยกัน หลังจากที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบชุดทดสอบแล้ว จึงได้ทำการทดสอบระบบเก็บผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีการนำระบบไมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ อีกทั้งระบบที่ใช้เป็นระบบไมโมแบบระบบเปิดทำให้ระบบไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งชุดอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นแบบโอเพ่นซอสทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องลิขสิทธิ์ของตัวซอฟต์แวร์อีกด้วย

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหา	ข้อเสนอแนะ
1. ปัญหาตัวซอฟต์แวร์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอยู่บ่อยๆทำให้บางฟังก์ชันใช้งานไม่ได้	ผู้ใช้งานควรทำการปรับปรุงฐานข้อมูลของตัวโปรแกรมทุกวัน
2. ปริมาณข้อมูลที่ต้องการเก็บไปวิเคราะห์มีขนาดใหญ่มาก	การเก็บข้อมูลแต่ละครั้งควรเขียนลงแผ่นดีวีดีแล้วค่อยนำข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์
3. ชุดอุปกรณ์ไม่มีคู่มือการใช้งานมาให้	ผู้ใช้งานจะต้องค้นหาข้อมูลเองและทำการตั้งเครื่องข้อมูลที่ได้นั้นมาใช้งานต่อไป

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยเทคนิคโมโม โดยพิจารณาจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและรับอย่างละ 2 ต้น และพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล อัตราความผิดพลาดของแพ็คเกจข้อมูล และปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลา เทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ และเทียบกับค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นยังไม่เพียงพอ ในอนาคตจะต้องสามารถทดสอบระบบในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ๆ ได้



## รายการอ้างอิง

- Andrea, G. (2005) **Wireless Communications**, Stanford University, Chap. 10.
- Bantli, H., Ring, E., and Goff, E. (1997) **Requirements for Direct Short Range, Vehicle to Roadside Communications**. IEEE Conferences, Aerospace Conference,. Proceedings., IEEE Volume: 1
- Bera, R., Bera, J., Sil, S., Dogra, S., Sinha, N.B., and Mondal, D. (2006) **Dedicated Short Range Communication for Intelligence Transportation System**. Wireless and Optical Communications Networks, 2006 IFIP International Conference
- Gesbert, D., Shafi, M., Shan, S.D., Smith, P.J., and Naguib, A. (2003) **From theory to practice : an overview of MIMO space-time coded wireless systems**. IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 21, No. 3 : pp 281 - 302.
- Hozumi, H., and Hasegawa, T. (2001) **A Study on a seamless and High Speed Road-to-Vehicle Communication system**. Vehicular Technology Conference IEEE VTS 54<sup>th</sup> Volume 1
- Hyunseo, O., Chungil, Y., Ahn, D., and Cho, H. (1999) **5.8 GHz DSRC Packet Communication System for ITS Services** Vehicular Technology Conference. VTC 1999 - Fall. IEEE VTS 50th Volume 4
- Jiang, D., Taliwal, Meier, V., Holfelder, W., and Herrtwich, R. (2006) **Design of 5.9 ghz dsrc-based vehicular safety communication**. Wireless Communications, IEEE Volume 13
- Kukshya, V., and Krishnan, H. (2006) **Experimental Measurements and Modeling for Vehicle-to-Vehicle Dedicated Short Range Communication (DSRC) Wireless Channels** Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006
- Mar, J., Lung, T., Lin ,Y., and Kuo, C. (2008) **Design of a software defined radio channel simulator for mobile communications: Performance demonstration with DSRC for different vehicle speeds**. Communications, Circuits and Systems ICCAS 2008. International Conference

- Sarit, K., Monchai, C., and Promwong, S. (2006) **Cooperative MIMO Transmission Scheme for Intelligent Transport System**. Communications and Information Technologies, 2006. ISCT '06.
- Singh, J.P., Bambos, N., Srinivasan, B., and Clawin, D. ( 2002)"**Wireless LAN Performance Under Varied Stress Conditions in Vehicular Traffic Scenarios**. Vehicular Technology Conference, Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th Volume 2
- Shan, C.P., Kam, Y., and Nallanathan, A. (2004) **Theoretical performance of space-time block coded systems with channel estimation**. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '04), vol. 6 Status of Project IEEE 802.11p, (2006) [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/ Reports/tgp update.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/ Reports/tgp_update.htm),
- Syahrezal, M. (2009) **“VIDEO TRANSMISSION VIA SOFTWARE DEFINED RADIO”** University Technology Malaysia
- Tarokh, V., Jafarkhani, H., and Calderbank, A.R. (1999) **Space-time block codes from orthogonal designs**. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45
- Tarokh, V., Jafarkhani, H., and Calderbank, A. R. (1999) **Space-time block coding for wireless communications: performance results**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,
- Telatar, I.E. (1995) **Capacity of multiantenna Gaussian channels**. AT&T Bell Laboratories. Tech. Memo.
- Yuan, R. (1997) **North American dedicated short range communications standard for Intelligent Transportation System**. ITSC 97. IEEE Conference

ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

**บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ**

Poochaya, S., Uthansakul, P., and Uthansakul, M. (2010) **Implementation of IEEE 802.16 Transceiver using SDR Technology**, EECON-33, Thailand.

Poochaya, S., Uthansakul, P., and Uthansakul, M. (2010) **Experimental Study of ARIB T-75 Coverage Range for Installing Neighbor Road Side Unit**, CIVS 2010, Korea

## กลับสู่สารบัญหมวด

CM 010

### การสร้างอุปกรณ์รับส่งตามมาตรฐาน IEEE 802.16 โดยใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

#### Implementation of IEEE 802.16 Transceiver using SDR Technology

เชรมชววิทย์ อุจฉายา, พิระพรณ์ อุจจารสกุล และ มนต์ทิพย์ทา อุจจารสกุล  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 0-4422-4351  
E-mail: m5142507@g.sut.ac.th, (uthansakul, mtp)@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการเข้าถึงไร้สายบรอดแบนด์ที่กำลังได้รับความนิยมสนใจในขณะนี้คือเทคโนโลยี WiMAX ซึ่งอยู่บนมาตรฐานของ IEEE 802.16 อย่างไรก็ตามงานวิจัยและพัฒนาในระดับฮาร์ดแวร์ในประเทศไทยยังมีน้อยมาก ทั้งนี้เพราะมีรายละเอียดที่ยุ่งยากของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiplex: OFDM) ที่สามารถแก้ปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี บทความนี้จึงได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ (Software Defined Radio: SDR) เพื่อสร้างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย ผ่านทาง USRP และควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม GNU Radio เพราะสามารถสร้างได้ง่ายและราคาไม่แพง ผลที่ทำการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถส่งข้อมูลไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.16 ได้เป็นผลสำเร็จ โดยสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ เช่น ประเภทของการมอดูเลต, ขนาดของความเร็วพาหะย่อย เป็นต้น

คำสำคัญ: WiMAX, OFDM, SDR, GNU Radio, USRP

#### Abstract

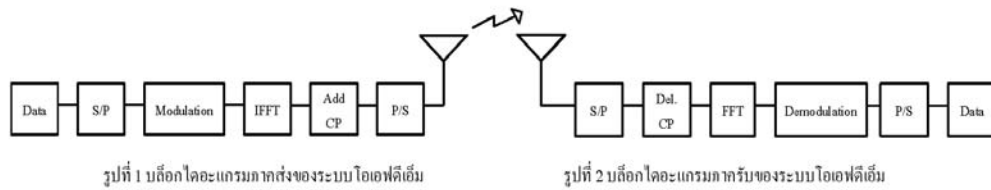
One of the most interesting WBA (Wireless Broadband Access) technologies is WiMAX. This technology is based on IEEE 802.16 standard. However, in Thailand, there are a few researches dealing with its implementation. This is because of the hardware complexity concerning OFDM technology. This paper proposes the implementation of IEEE 802.16 transceiver by using SDR technology because it is flexible and easy to configure. Also the USRP and GNU Radio is low cost. The experimental results show the success of radio transmissions measured by our implemented system according to IEEE 802.16 standard.

Keywords: WiMAX, OFDM, SDR, GNU Radio, USRP

#### 1. คำนำ

เทคโนโลยีการเข้าถึงไร้สายไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งในระหว่างการส่งและรับสัญญาณนั้น มีปัจจัยต่างๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาครับภาคส่ง อาทิเช่น สิ่งกีดขวางระหว่างภาครับและภาคส่ง การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี สภาพแวดล้อมรอบๆ บริเวณที่ตั้งของภาคส่งและภาครับ เป็นต้น ในหลายๆงานวิจัยได้นำระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก OFDM [1] ซึ่งเป็นเทคนิคในโลอินที่ใช้ในการนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว ได้โดยอาศัยจุดเด่นที่ทนต่อสัญญาณรบกวน และสามารถส่งข้อมูลในอัตราเร็วสูง ปัญหาการแทรกสอดระหว่างสัญญาณสามารถแก้ไขได้โดยการเสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่เฟรมข้อมูลก่อนทำการส่ง ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉากโอเอฟดีเอ็มไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย [2] (Wireless Local Area Network: WLAN), ระบบไวแมกซ์ [3] (WiMAX), ระบบขนส่งอัจฉริยะ [4] (Intelligence Transportation System: ITS) เป็นต้น ในการศึกษาการรับส่งสัญญาณไร้สายสำหรับเทคโนโลยีการเข้าถึงไร้สายบรอดแบนด์ที่มีการใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบความถี่ตั้งฉากนั้น เทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้ศึกษาการส่งสัญญาณไร้สายดังกล่าวข้างต้นคือ SDR (Software Defined Radio) [5] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ซอฟต์แวร์ในการปรับและกำหนดคุณลักษณะของฮาร์ดแวร์ในการรับ-ส่งสัญญาณ วิทยุภายใต้แพลตฟอร์มมาเดียว [6] นำเสนอการจำลองผลการส่งสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแต่ยังไม่มีการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง บทความนี้จึงนำเสนอการใช้งานเทคโนโลยี SDR โดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณ USRP (Universal Software Radio Peripheral) [7] ร่วมกับชุดวงจรมวลสัญญาณวิทยุ (XCVR2450) [8] ผ่านการควบคุมด้วยโปรแกรม GNU Radio [9] ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบโอเพนซอร์สที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของ USRP และ XCVR2450 โดยบทความนี้แบ่งเนื้อหาที่เกี่ยวข้องเป็นส่วนๆ ได้แก่ ส่วนที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉากเบื้องต้น, SDR, GNU Radio และ USRP ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการทดสอบจริงและผลการทดสอบ และสุดท้ายจะเป็นการอภิปรายผลและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบจริง





รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมภาคส่งของระบบโอเอฟดีเอ็ม

รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม



รูปที่ 3 USRP Mother Board และ XCVR2450 Daughter Board



รูปที่ 4 การจัดวางภาคส่งและภาครับในการวิจัยจริง

**2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

**2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่สำหรับ WiMAX**

เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ซึ่งใช้สำหรับระบบ WiMAX นี้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์จากความถี่เล็กๆ ซึ่งเรียกว่าคลื่นพาหะย่อย (Sub-carrier) เพื่อให้ได้มาซึ่งการใช้ประโยชน์สูงสุดของใช้งานช่องสัญญาณ โดยมีการแบ่งความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อยแล้วแยกส่งข้อมูลหลายช่อง รูปที่ 1 เป็นบล็อกไดอะแกรมของภาคส่ง โดยมีการแปลงชุดข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นแบบขนานและนำข้อมูลที่ได้ไปทำการมอดูเลต จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแปลง IFFT หรือ Inverse Fast Fourier Transform ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์จนกระทั่งได้แอมพลิจูดสัญญาณ ที่ความถี่ต่างๆที่ Orthogonal กันออกมา เนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบๆภาคส่งและภาครับ เช่น สิ่งกีดขวาง, ผนัง, กำแพง เหล่านี้ก่อให้เกิดการกระจายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี การแทรกสอดระหว่างสัญญาณเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบดังกล่าว จึงมีการเสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่เฟรมข้อมูลและแปลงชุดข้อมูลจากแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมก่อนทำการส่งผ่านสายอากาศไปยังภาครับดังรูปที่ 2 เมื่อสัญญาณผ่านเข้ามาที่ภาครับแล้ว จะมีการแปลงชุดข้อมูลจากแบบอนุกรมไปเป็นแบบขนานและทำการถอดไซคลิกออก จากนั้นจึงนำข้อมูลไปทำการแปลง FFT Fast Fourier Transform และทำการดีมอดูเลต พร้อมทั้งแปลงจากชุดข้อมูลแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรม และได้ข้อมูลเดิมกลับมา

**2.2 เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์**

SDR (Software Defined Radio) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ซอฟต์แวร์ในการควบคุม กำหนดคุณลักษณะของการส่งสัญญาณวิทยุ เทคโนโลยี SDR นี้เป็นการช่วยลดความซับซ้อนและความยุ่งยากในการ

สร้างระบบส่งสัญญาณวิทยุ SDR แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ อันดับแรก คือ ซอฟต์แวร์ ที่ภาคส่งจะใช้ในการควบคุม การกำหนดคุณลักษณะ ให้ตรงกับมาตรฐานของการส่งสัญญาณนั้นๆ ส่วนในภาครับจะเป็นการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของข้อมูลที่ได้รับมา อันดับที่สองเป็นส่วนของฮาร์ดแวร์ ซึ่งประกอบไปด้วยบอร์ดหลัก(USRP) และ บอร์ดรอง (Daughter Board) ซึ่งบอร์ดรองจะทำหน้าที่ในการรับส่งสัญญาณวิทยุ จากนั้นบอร์ดหลักจะนำสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลต่อไป

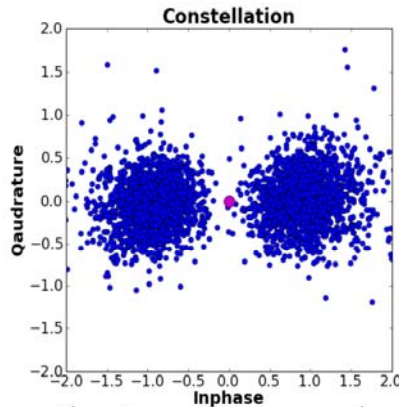
**2.3 GNU Radio**

GNU Radio เป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุม กำหนดคุณลักษณะ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร ที่มีการใช้เทคโนโลยี SDR โดย GNU Radio จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรม และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการเชื่อมต่อของฟังก์ชันต่างๆในการสร้างระบบส่งสัญญาณวิทยุ หรือเรียกว่าบล็อกนั่นเอง ซึ่งใช้ภาษา Python ในการสร้างและพัฒนาซอฟต์แวร์

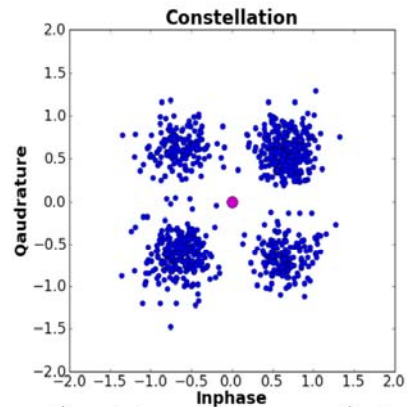
**2.4 USRP**

USRP (Universal Software Radio Peripheral) ในรูปที่ 3 เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างระบบส่งสัญญาณวิทยุ ซึ่งในบอร์ด USRP จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ บอร์ดหลักเรียกว่า Mother Board มีหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณโดยใช้ FPGA (Filed Programming Gate Array) และทำการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ภาคส่ง และแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่รับเข้ามาไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป และ





รูปที่ 5 แขนงสัญญาณของสัญญาณ OFDM (BPSK) ที่ถูกรับ



รูปที่ 6 แขนงสัญญาณของสัญญาณ OFDM (QAM) ที่ถูกรับ

บอร์ดสัญญาณวิทยุ เรียกว่า Daughter Board หรือ RF- Front end มีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ IF ไปเป็นสัญญาณ RF ในภาคส่งโดยใช้ตัว Up converter และแปลงสัญญาณจากสัญญาณ RF ที่รับได้เป็นสัญญาณ IF โดยใช้ตัว Down Converter ซึ่ง USRP บอร์ด มีคุณสมบัติดังนี้

**คุณสมบัติของ USRP Board**

- FPGA: Altera Cyclone EP1C12
- ADC: 4 ADCs 12 bits per sample with 64 Msamples/sec
- DAC: 4 DACs 14 bits per sample with 128 Msamples/sec
- Connection: USB 2.0

**คุณสมบัติของ Daughter Board XCVR2450**

- ย่านความถี่ : 2.4 GHz-2.5 GHz และ 4.9 GHz-5.9GHz
- กำลังงานส่ง : 100 mW(20dBm)

**3. การทดสอบจริงและผลการทดสอบ**

ในการทดสอบจริงได้มีการทดลองส่งสัญญาณและรับสัญญาณ ไอเอฟดีเอ็ม โดยติดตั้งเครื่องรับและเครื่องส่งให้ห่างกัน 10 เมตร ในสภาพแวดล้อมแบบภายในอาคาร โดยทำการวัด พ. อากาศ เครื่องมือ 4 ท้อง F4202 สัญญาณ OFDM ที่ใช้ในการส่งและรับนั้นถูกกำหนดโดยใช้โปรแกรม GNU Radio ซึ่งทำงานร่วมกับ USRP Board และ XCVR2450 Board โดยมีคุณสมบัติต่างๆตรงตามมาตรฐาน IEEE802.16 WiMAX ดังตารางที่ 1 โดยในการเก็บข้อมูลนั้นสามารถทำได้โดยใช้คำสั่งที่อยู่ในตัว โปรแกรม โดยคำสั่งดังกล่าวมีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลที่ส่งสัญญาณในกระบวนการส่งและการรับสัญญาณ ซึ่งในการทดสอบจริงมีการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับเป็นระยะทางห่างกัน 1 เมตร และ 10 เมตร ดังรูปที่ 4 เพื่อศึกษาถึงผลของกำลังความแรงของสัญญาณ จากนั้นเมื่อเราทำการรับและส่งสัญญาณเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

เมื่อทำการรับทำการรับสัญญาณแล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ โดยใช้แผนผังสัญญาณ โดยรูปที่ 5 เป็นแผนผังสัญญาณของสัญญาณ BPSK และในรูปที่ 6 เป็นแผนผังสัญญาณของสัญญาณ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของมาตรฐาน IEEE802.16

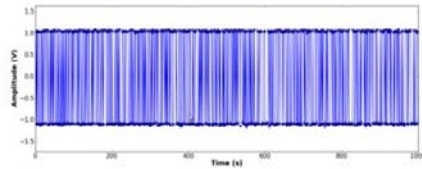
Service	Specification
Modulation type	QAM,BPSK
Number of Subcarriers	512
Number of Occ-tones	360
Frequency band	2.5GHz
Transmit Bandwidth	5MHz
Cyclic Prefix	1/8

QAM ที่ถูกรับหลังจากผ่านกระบวนการดังรูปที่ 2 เรียกว่า BPSK ซึ่งผลที่ได้จากรูปที่ 5 แสดงแผนผังสัญญาณของสัญญาณ BPSK ที่ถูกรับและ รูปที่ 6 แสดงแผนผังสัญญาณของสัญญาณ QAM: เป็นการยืนยันความสำเร็จของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในการกำหนดรูปแบบการมอดูเลตได้เป็นอย่างดี

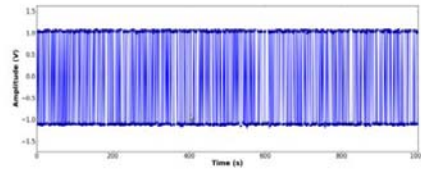
ในรูปที่ 7 เป็นค่าของสัญญาณ BPSK ที่ถูกรับ และในรูปที่ 8 เป็นค่าของสัญญาณ BPSK ที่ถูกรับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย พบว่าที่ถูกรับรับข้อมูลได้ถูกต้อง ซึ่งยืนยันถึงความสำเร็จในการส่งและรับสัญญาณ และยังสามารถนำผลที่ได้ไปพัฒนาเพื่อศึกษาสภาพของช่องสัญญาณไร้สาย

เมื่อพิจารณาถึงกำลังความแรงของสัญญาณนั้น รูปที่ 9 คือ กำลังความแรงของสัญญาณ มีค่าประมาณ -55 dBm เมื่อติดตั้งภาคส่งและภาครับห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร และรูปที่ 10 คือ กำลังความแรงของสัญญาณมีค่า -72 dBm เมื่อติดตั้งภาคส่งและภาครับห่างกันเป็นระยะทาง 10 เมตร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณ Agilent MXA N9020A จากผลที่ได้รับสามารถบอกได้ว่าระยะทางที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังงานที่รับได้ที่ถูกรับลดลง ซึ่งสามารถนำผลที่ได้ไปศึกษาเพื่อหา-

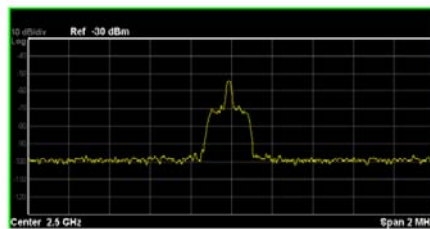




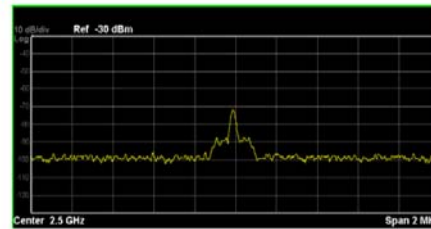
รูปที่ 7 ค่าของสัญญาณ BPSK ที่ภาคส่ง



รูปที่ 8 ค่าของสัญญาณ BPSK ที่ภาครับ



รูปที่ 9 ค่าความแรงของสัญญาณเมื่อภาครับและภาคส่งห่างกัน 1 เมตร



รูปที่ 10 ค่าความแรงของสัญญาณเมื่อภาครับและภาคส่งห่างกัน 10 เมตร

แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณ หรือ แบบจำลองการสูญเสียในสภาพแวดล้อมแบบต่างๆได้

**4.สรุป**

จากการทดลองการศึกษารับส่งสัญญาณ ไร้สายสำหรับเทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ เช่น ระบบ WiMAX ที่มีการใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบความถี่ตั้งฉาก โดยใช้เทคโนโลยี SDR บนชุดอุปกรณ์ USRP พบว่า ที่ภาครับสามารถรับสัญญาณได้และสามารถเชื่อมต่อออกมาได้ถูกต้องตรงตามที่ภาคส่งข้อมูลมาซึ่งภาครับ โดยที่ภาครับนั้นยังมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่ อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจายสัญญาณที่มีทั้งสิ่งกีดขวางและปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี ผลที่ได้จากการวัดจริงมีแนวโน้มเป็นไปตามแผนผังหุ้มดาวของสัญญาณ BPSK และ สัญญาณ QAM ส่วนกำลังงานที่รับได้มีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาสภาพช่องสัญญาณและศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณในสภาพแวดล้อมแบบต่างๆได้

**5. กิตติกรรมประกาศ**

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรม โทรคมนาคม(TRDD) Grant No.MS/015/2551). สำนักงานคณะกรรมการกิจการ โทรคมนาคมแห่งชาติ

**เอกสารอ้างอิง**

[1] O.A. Alim, H.S. Abdallah, A.M. Elaskary, "Simulation of WiMAX Systems," Communications Workshop, 2008. LCW 2008. IEEE Lebanon, vol., no., pp.11-16, 31-31 May 2008

[2] N. Nggjikin, N. Fisal, S.K. Yusof, "Peak to average power ratio in WLAN-OFDM system," Telecommunication Technology, 2003. NCTT 2003 Proceedings. 4th National Conference on , vol., no., pp. 123- 126, 14-15 Jan. 2003

[3] Fan Wang, A. Ghosh, C. Sankaran, P. Fleming, F. Hsieh, S. Bones, "Mobile WiMAX systems: performance and evolution," Communications Magazine, IEEE , vol.46, no.10, pp.41-49, October 2008

[4] J. Mar, Ti-Han Lung, You-Rong Lin, Chi-Cheng Kuo, "Design of a software defined radio channel simulator for mobile communications: Performance demonstration with DSRC for different vehicle Speeds," Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2008. International Conference, Page(s):345 - 349, 2008

[5] D.C. Tucker, G.A. Tagliarini, "Prototyping with GNU radio and the USRP - where to begin" ,SOUTHEASTCON '09. IEEE Conference , pp.50 - 54, 2009

[6] Thomas W. Rondeau, Matt Ettus, Robert W. McGwier, "OPEN SOURCE TRANSPARENCY FOR OFDM EXPERIMENTATION ", Proceedings of the SDR '08 Technical Conference and product Exposition, 2008

[7] Ettus Research LLC., <http://www.ettus.com>, 2008

[8] [http://www.ettus.com/downloads/ettus\\_ds\\_transceiver\\_dbrds\\_v6c.pdf](http://www.ettus.com/downloads/ettus_ds_transceiver_dbrds_v6c.pdf)

[9] <http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnurad>





# Experimental Study of ARIB T-75 Coverage Range for Installing Neighbor Road Side Units

S. Poochaya, P. Uthansakul and M. Uthansakul

*School of Telecommunication Engineering*

*Suranaree University of Technology*

*NakhonRatchasima, 30000, Thailand*

Email: {m5142507, uthansakul, mtp}@g.sut.ac.th

**Abstract** – DSRC (Dedicate Short Range Communication) is promisingly concerned as the technology to enhance data rate transmission for ITS (Intelligent Transportation System). Among many standards of DSRC technology, ARIB STD-T75 has gained a lot of attention due to its cost of installation. The popular application of ARIB STD-T75 standard is ETC (Electronic Toll Collection) which RSU (Road Side Unit) operates in a standalone mode. However, the concept of DSRC has extended to a network scenario where multiple RSUs together provide the accessibility to vehicles. In this paper, the experimental study on coverage range of ARIB STD-T75 standard has been presented. The packet error rate and channel power are measured by SDR (Software Defined Radio) technology. The results are initially used as a tool for estimating an optimal distance between neighbor RSUs.

*Index Terms* – DSRC, ITS, ARIB STD-T75, SDR

## I. INTRODUCTION

ITS (Intelligent Transportation System) is a recent technology which combines transportation system and communication technology to solve traffic problems and improve traditional transportation system to intelligent transportation system without a new road construction. The implementation of ITS has been growing and supporting a variety of services such as traffics report, ETC (Electric Toll Collection), multimedia advertisement, etc. To make ITS successful, DSRC [2] (Dedicate Short Range Communication) becomes a significant technology that provides a high data rate transmission. The concept of DSRC is not limited to one spot communication but it can provide the continuous connection between vehicles and multiple road side equipments.

For a real world system, OBU (On Board Unit) and RSU (Road Side Unit) communicate to each other via air interface according to specific standard. RSU is always installed at a dashboard or a roof of buildings while OBU is located inside a car. A pair of OBU and RSU exchanges data with two-way communications. Among DSRC standards, ARIB STD-T75 [1] is one of the most popular standards that offer a low cost of installation. This standard is originally established in Japan but nowadays it is widely used around the world. It defines a communication specification for RSU, OBU and the other system components. This standard operates at 5.8GHz band with 5 MHz bandwidth.

From literature, there are many works that present the success of ARIB STD-T75 in practice. Those works concern on using RSU as one spot connection. However, in some applications, vehicles require a longer connecting time by using a handover procedure between neighbor RSUs. Unfortunately, the report on such a scenario is rarely presented. In this light, this paper presents the preliminary study to design the optimal distance between neighbor RSUs by investigating a coverage range in practice. Both RSU and OBU are developed by using SDR (Software Define Radio) technology. SDR is a new technology that defines all transmitting and receiving procedures by software configurations. SDR can solve a hardware problem by converting to a software problem. The authors use USRP (Universal Software Radio Peripheral)[3] and GNU Radio to perform measurements. SDR is so flexible that users are able to design overall of a system by using GNU Radio or GNU Radio Companion. GNU Radio is a free software packet that provides tools for radio engineer to design radio system. GNU Radio occurs from a combining of Python language and C++ language. Python is used to glue all signal processing block and C++ language is used to build a signal processing block. In [4], a basic to study GNU Radio and USRP is presented.

Two parameters, packet error rate and channel power, are the main factors to examine the coverage range. From measured data, it is able to estimate the simple formula in order to calculate the appropriated distance between neighbour RSUs. The results indicate some helpful information to apply on ITS design. The remainders of this paper are organized as follows. Section II presents a system overview including DSRC, ARIB and SDR technology. Measurement results are presented in section III. Section IV provides discussions and finally conclusion has been presented in section V.

## II. SYSTEM OVERVIEW

### A. DSRC System

Fig. 1 presents the conventional DSRC [5-6] system consisting of RSU and OBU. RSU is located on the road or beside road in which sometime it is called as a roadside base station. OBU is placed on the vehicle and it can be either indoor or outdoor modules. When the vehicle moves in range

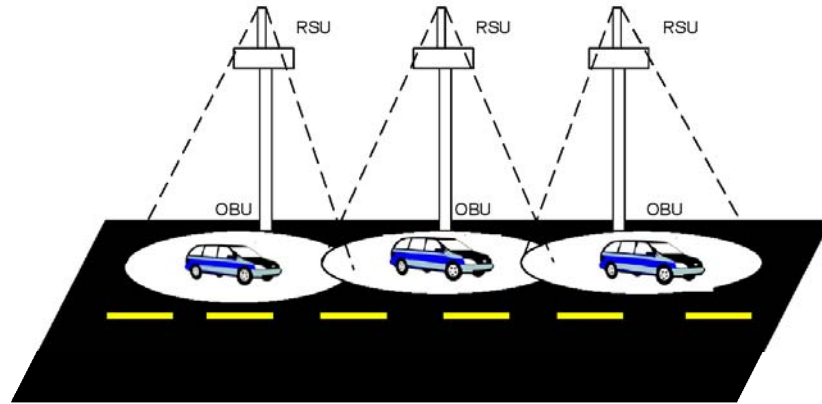


Fig. 1 Configuration of OBUs and RSUs

of communication area, RSU will start initializing and transmitting data to vehicle through OBU. After vehicle moves out of the communication area, then the connection will be discarded from RSU. For network topology in Fig. 1, OBU is able to be connected with the neighbour RSU while using the procedure like handover in cellular networks. The effective time interval during RSU communication depends on power of equipments, fading channel and vehicle velocity. The short interval due to high velocity causes a short timing for data transmission or a low throughput. In addition, high velocity also causes the characteristic of wireless link between RSU and OBU more severe.

#### B. ARIB Standard

Among commercial standards, ARIB STD-T75 is successfully launched. It is established by the Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) [7] for the DSRC [8] system in range of 5.8GHz band. This can be applied on the information shower service in addition to the ETC system. With this standard, two-way communication can be conducted by a maximum transmission rate of 1Mbps for ASK modulation type. 4Mbps for QPSK modulation type within a service radius less than 10m. Table I shows DSRC specifications for ITS communication between RSU and OBU.

TABLE I  
DSRC SPECIFICATIONS ACCORDING TO ARIB STD-T75

Service	Specification
Modulation type	ASK, QPSK
Data rate	1(ASK)-4(QPSK) Mbps
Coverage range	<10m.
Frequency band	5.8GHz
Bandwidth	5MHz
Transmit Power	<10mW (distance less than 10 m.)

#### C. SDR technology

SDR is the technology to decrease the complexity of radio transmission system by using software for the radio signal processing. The signal processing is done by using microcomputer. SDR is a new technology to change hardware problem to software problem. Components of a communication system where implemented in hardware but for SDR the components is implemented in software. Software is the main core for this technology. It defines the transmitted waveforms and all parameters of communication system including demodulation of the received waveforms. At transmitter, before sending a signal through the air, it is necessary to convert a digital signal to analog signal by using DAC and then an analog signal goes straight to a transmitting antenna. At receiver, the signal from receiving antenna is an analog signal so it has to be converted back to be a digital signal by using ADC.

### III. MEASUREMENT SETUP

#### A. EQUIPMENT

Fig. 2 and Fig. 3 present a Transmitter and Receiver Block Diagram respectively. USRP do all tasks but except a radio frequency transmission which is done by RF Front End module. Fig. 4 depicts the USRP (Universal Software Radio Peripheral) hardware developed by Ettus Research LLC. Inside the USRP, there are two main components to create a radio communication system. The first component is a mother board FPGA (Field Programming Gate Array). It is the main component of USRP to control all components. The responsibility of FPGA is to calculate and process signals at transmitter and receiver. At transmitter, USRP includes a high speed DAC in order to convert digital signal to analog signal. At receiver, a high speed ADC has been installed to reverse analog signal to digital signal before sending signals to FPGA. The main idea of FPGA is the high-speed general purpose operation, like digital up and down conversion. Decimation and interpolation are done on it. The second component is a daughter board. The duty of daughter board is to hold RF interface.

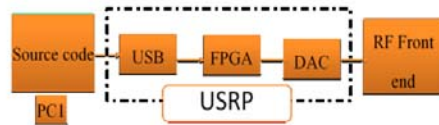


Fig. 2 Transmitter Block Diagram



Fig. 3 Receiver Block Diagram

The complete set of USRP and daughter board equipment can be easily connected with USB 2.0 through a host PC.

Inside a mother board, it contains an Altera Cyclone EP1C12 Field Programmable Gate Array (FPGA) which has 4 ADCs and DACs. Each ADC running is 12 bits per sample with 64 Msamples/sec and each DAC running is 14 bits per sample with 128 Msamples/sec. This paper employs XCVR2450 daughter board which responses to radio frequency in dual band, 2.4 GHz and 5.9 GHz. All components are assembled in one USRP box using 3A 6V power supply.

#### B. MEASUREMENT SCENARIO

Measurement setup contains with transmitter or RSU and receiver or OBU. The transmitter consists of USRP board which contains mother board and XCVR 2450 daughter board. Our software are developed and installed on mother board in order to transmit ARIB STD-T75 signals over the air. At receiver, all parameters are set as similar to transmitter based on the same standard. The authors carefully set all parameters for both transmitter and receiver such as decimation rate, interpolate rate, number of sample per symbols. Also the signals are tested in laboratory before real measurements to make a validation of using our software.

For OBU, the USRP is connected to a laptop while the USRP of RSU is connected to a personal computer (PC). Both laptop and PC were used to generate and collect data packets. Daughter boards used for these experiments are XCVR2450 at both OBU and RSU. The frequency in measurement is on 5.9GHz band. The authors use the scripts that are provided from GNU Radio software package. These are benchmark\_tx.py and benchmark\_rx.py in /gnuradio/gnuradio-example/digital/. USRP A set as RSU located beside the road and USRP B set as OBU located on a roof of a car. Experiments are conducted in an outdoor environment which the maximum distance between RSU and OBU are 10 m following the ARIB STD-T75 standard. Fig. 5 shows the experimental scenario and Fig. 6 shows the photograph of this scenario. In each measuring location, 10 times of data collection are performed. The aim of these experiments is to determine the relationship between packet error rate versus a distance between RSU and OBU with QPSK modulation type.



Fig. 4 USRP and XCVR2450

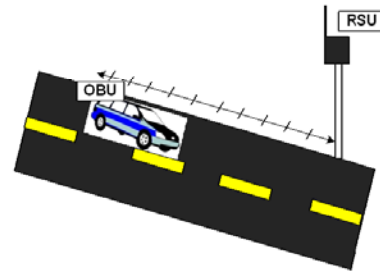


Fig. 5 Experimental Scenario



Fig. 6 Photograph of Experimental scenario

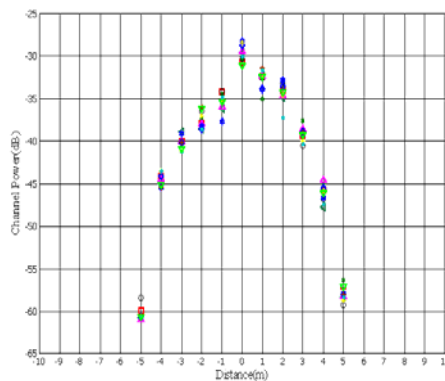


Fig. 7 Channel Power versus Distance

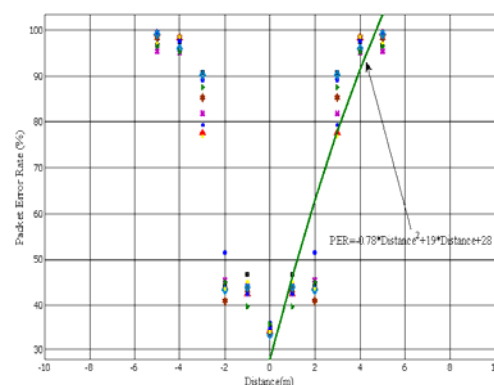


Fig. 8 Packet Error Rate versus Distance

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 7 presents a channel power versus a distance between RSU and OBU. As seen in this figure, the channel power increases when OBU is near RSU. For the distance over 6 meters, the receiving module cannot detect any signals. It is below -70 dBm which is the minimum sensitivity of receiver.

Fig. 8 shows the relationship between packet error rate versus a distance between RSU and OBU. When the OBU moves near RSU, packet error rate decreases as a function of distance. As similarly noticed in Fig 7, the receiver cannot record any packets over 6 meters. It implies that the use of practical SDR technology provides the capability less than a specification of standard.

In addition, the authors try to formulate the relationship in Fig. 8. The simple formula is shown below.

$$PER = -0.78 \times Dis \tan ce^2 + 19 \times Dis \tan ce + 28$$

This formula is a guideline for designing a distance between neighbor RSUs. For example, if the packet error is required at 80%, it means that the distance between neighbor RSUs is about 6 meters.

#### V. CONCLUSION

This paper presents the experimental results of ARIB STD-T75 standard by using SDR technology. The aim is to investigate on a coverage range or a distance between RSU and OBU. Both channel power and packet error rate are measured. The simple formula presenting a relationship between packet error rate and distance between OBU and RSU is established. This can be used as a guideline for installing multiple RSUs for ITS application. For the next work, the authors will apply MIMO technique on this standard in order to improve a system performance.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by the Telecommunications Research Industrial and Development Institute (TRIDI), National Telecommunications Commission Fund (Grant No.MS/015/2551)

#### REFERENCES

- [1] Hyunseo Oh, Chungil Yae, Donghyon Ahn and Hanberg Cho, "5.8 GHz DSRC Packet Communication System for ITS Services," Vehicular Technology Conference, 1999.VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th 19-22 Sept. 1999 Page(s):2223 - 2227 vol.4
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dedicated\\_short-range\\_communications](http://en.wikipedia.org/wiki/Dedicated_short-range_communications)
- [3] Ettus Research LLC, <http://www.ettus.com>, 2008
- [4] D.C. Tucker, G.A. Tagliarini, "Prototyping with GNU radio and the USRP - where to begin," SOUTHEASTCON '09. IEEE Conference, pp.50 - 54, 2009.
- [5] Kukshya,V. Krishnan,H. , "Experimental Measurements and Modeling for Vehicle-to-Vehicle Dedicated Short Range Communication (DSRC) Wireless Channels," Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall.2006 IEEE 64th 25-28 Sept. 2006 Page(s):1 - 5
- [6] <http://www.leeamstrong.com/DSRC%20Home/General%20Info/DSRC%20General%20What%20is.htm>
- [7] [http://www.itsforum.gr.jp/Public/E4Meetings/P01/2Z11.JPN\\_StatusRPTv2.pdf](http://www.itsforum.gr.jp/Public/E4Meetings/P01/2Z11.JPN_StatusRPTv2.pdf)
- [8] <http://www.coe.montana.edu/ce/rwolff/shel%20leader%20dsrc.pdf>

## ประวัติผู้เขียน

นายเศรษฐวิทย์ ภูญาษา เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 2529 ที่จังหวัดมหาสารคาม เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลมหาสารคาม ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสารคามพิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (TRIDI) สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) มีบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการ ปี 2553 จำนวน 2 เรื่องดังนี้

- (1) **Implementation of IEEE 802.16 Transceiver using SDR Technology** และ
- (2) **Experimental Study of ARIB T-75 Coverage Range for Installing Neighbor Road Side Unit.** โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.