



## รายงานการวิจัย

การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่ง  
อัจฉริยะด้วยเทคนิคไมโม

**Data Transmission Rate Enhancement of Dedicated Short Range  
Communication for Intelligent Transportation System using MIMO  
Technique**

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่ง  
อัจฉริยะด้วยเทคนิคไมโม

**Data Transmission Rate Enhancement of Dedicated Short Range  
Communication for Intelligent Transportation System using MIMO  
Technique**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2555

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้วิจัยในที่ปรึกษาของผู้วิจัยหลายๆ คนที่ช่วยเก็บผลการทดลองและมีส่วนร่วมดำเนินการวิจัยในหลายส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งนายเศรษฐวิทย์ ภูญาษา และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูซาทสกุล สำหรับคำแนะนำในเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2555

## บทคัดย่อ

ระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transport System) เป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจมากเพราะระบบขนส่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการดำรงชีวิตในปัจจุบัน การสร้างความอัจฉริยะให้กับการขนส่งนี้สามารถทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีเฉพาะทางด้านการสื่อสารระยะใกล้ (Dedicated Short Range Communication) เทคโนโลยีนี้จะสามารถทำให้ยานพาหนะติดต่อสื่อสารกับป้ายสัญญาณหรืออุปกรณ์ที่อยู่ริมถนน รวมไปถึงสามารถติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะด้วยกันเองได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ ระบบแจ้งเตือนภัยล่วงหน้า ระบบนำทางอัจฉริยะ ระบบช่วยจับรถเพื่อความปลอดภัย และระบบแจ้งข้อมูลข่าวสารเป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติถือว่าเป็นระบบที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดในเชิงพาณิชย์ โดยพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงมากนัก แต่เมื่อพาหนะมีความเร็วสูงขึ้นภาครับไม่สามารถรับข้อมูลได้ถูกต้อง ประกอบกับความคาดหมายที่จะส่งข้อมูลในรูปแบบเสียงและภาพด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น จึงทำให้ยังมีการค้นหาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมอยู่ในปัจจุบัน จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา สามกลุ่มประเทศคือ อเมริกาเหนือ ยุโรป และญี่ปุ่น มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเทคโนโลยีบนความถี่ 5.8 – 5.9 GHz ทั้งนี้ไม่ว่าสามกลุ่มประเทศจะเสนองานวิจัยที่แตกต่างกันก็ตาม แต่ก็ยังคงต้องพิจารณาปัญหาที่สำคัญที่สุดร่วมกันคือ การส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงไปยังพาหนะที่เคลื่อนที่เร็ว ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลเพื่อให้ได้อัตราเร็วที่สูงขึ้น โดยประยุกต์ใช้เทคนิคโมโม (Multiple Input Multiple Output : MIMO)ที่มีการถอดรหัสเชิงเวลาและตำแหน่งทำให้ระบบที่ใช้เทคนิคโมโมสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น ในขณะที่พาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้

## **Abstract**

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 research project focus on the improvement of data rate transmission by applying Multiple Input Multiple Output (MIMO) technique into DSRC. This research project provides both simulation and measurement results in order to confirm the help of MIMO technique on DSRC for ITS applications.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	2
1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ผลสำเร็จของ โครงการ.....	3
1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ โครงการวิจัย.....	3
1.5.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะและเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้.....	3
1.5.2 เทคนิคโมโม.....	4
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	6
2.3 แเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้.....	7
2.3.1 การแยกรูปแบบของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	8
2.3.2 มาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	9
2.3.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้.....	13
2.4 เทคโนโลยีโมโม.....	14
2.4.1 ประเภทของเทคโนโลยีโมโม.....	15
2.4.2 จุดเด่นของเทคโนโลยีโมโม.....	20

2.5	ช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี.....	20
2.5.1	ช่องสัญญาณแบบเรย์ลี .....	21
2.5.2	ช่องสัญญาณแบบไรเซียน .....	21
2.5.3	ความถี่คอปเพลอร์.....	23
2.5.4	การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี.....	24
2.6	เทคโนโลยีโอเอ็ฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplex: OFDM).....	27
2.7	กล่าวท้ายบท.....	29
บทที่ 3	การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารระยะใกล้.....	31
3.1	กล่าวนำ .....	31
3.2	เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ (Software Defined Radio: SDR).....	31
3.3	GNU Radio Software package.....	32
3.3.1	โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน .....	34
3.3.2	การสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณสำหรับ GNU Radio.....	35
3.4	ชุดอุปกรณ์ Universal software radio peripheral .....	38
3.4.1	ส่วนประกอบหลักของ USRP Board.....	39
3.5	ทิศทางการไหลของสัญญาณใน USRP Board.....	43
3.5.1	ภาครับ.....	43
3.5.2	ภาคส่ง .....	44
3.6	การติดตั้งโปรแกรม GNU Radio.....	45
3.6.1	Install dependencies.....	46
3.6.2	การติดตั้ง SVN Client.....	47
3.7	ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu.....	47
3.7.1	ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น .....	48
3.7.2	รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น .....	49
3.8	กล่าวท้ายบท.....	54
บทที่ 4	การสร้างชุดทดสอบและผลการทดลอง.....	55
4.1	กล่าวนำ .....	55
4.2	การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ .....	55

4.2.1	การจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณไมโม .....	56
4.2.2	การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้มาตรฐาน ARIB STD-T75.....	57
4.2.3	การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะโดยใช้มาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC).....	70
4.3	การออกแบบชุดทดสอบและผลการทดสอบ .....	74
4.3.1	การออกแบบชุดทดสอบ .....	75
4.3.2	พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการทดสอบ .....	86
4.3.3	ขั้นตอนการทดสอบ .....	87
4.3.4	ผลการทดสอบ .....	93
4.4	กล่าวท้ายบท.....	99
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	100
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	100
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	102
บรรณานุกรม.....		103
ภาคผนวก ก การเผยแพร่ผลงานวิจัย .....		105
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ .....		106
ประวัติผู้วิจัย.....		113



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1	โครงสร้างของระบบขนส่งอัจฉริยะ .....	8
รูปที่ 2-2	การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ Vehicle to Vehicle (V2V) .....	9
รูปที่ 2-3	การรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง Vehicle to Infrastructure (V2I) .....	9
รูปที่ 2-4	ภาพรวมระบบขนส่งอัจฉริยะ [ที่มา : www.etsi.org] .....	13
รูปที่ 2-5	ระบบที่ใช้สายอากาศหลายต้นในการสื่อสาร .....	15
รูปที่ 2-6	โครงสร้างการเข้ารหัสแบบ Alamouti .....	17
รูปที่ 2-7	ตัวอย่างการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK .....	17
รูปที่ 2-8	แบบจำลองการเข้ารหัสแบบ SM .....	19
รูปที่ 2-9	รูปแบบเรขาคณิตสำหรับระบบสายอากาศแถวลำดับ .....	22
รูปที่ 2-10	ส่วนประกอบของปรากฏการณ์คอปเพลอร์ .....	24
รูปที่ 2-11	กระบวนการในการส่งสัญญาณ OFDM .....	28
รูปที่ 2-12	กระบวนการทำงานของภาครับสัญญาณ OFDM .....	29
รูปที่ 3-1	โครงสร้างของ GNU Radio .....	33
รูปที่ 3-2	แบบจำลอง Flow graph ของระบบโทรศัพท์แบบ dial tone .....	34
รูปที่ 3-3	บอร์ด USRP .....	39
รูปที่ 3-4	ชุดอุปกรณ์ Daughter boards .....	40
รูปที่ 3-5	ชุดอุปกรณ์ USRP .....	41
รูปที่ 3-6	ส่วนประกอบภายในบอร์ด USRP .....	43
รูปที่ 3-7	ภาพรวมของ GNU Radio และ USRP .....	46
รูปที่ 4-1	ผลการจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับ .....	56
รูปที่ 4-2	แบบจำลองลักษณะช่องสัญญาณ ไร้สายสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ .....	58
รูปที่ 4-3	โครงสร้างของแบบจำลองภาคส่งสำหรับระบบโมโม .....	60
รูปที่ 4-4	การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK .....	60
รูปที่ 4-5	แสดงอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวน โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโม .....	62

รูปที่ 4-6 ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะ .....	65
รูปที่ 4-7 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของยานพาหนะกับ Throughput.....	66
รูปที่ 4-8 ผลการจำลองแบบเมื่อความถี่คอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 100 Hz .....	67
รูปที่ 4-9 ผลการจำลองแบบ เมื่อความถี่คอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 200 Hz .....	68
รูปที่ 4-10 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำ การเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิค โมโม .....	68
รูปที่ 4-11 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับความเร็วของ ยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิค โมโมสำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps .....	69
รูปที่ 4-12 ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิต ณ ความถี่คอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ .....	71
รูปที่ 4-13 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบ โมโมที่ความถี่คอปเพลอร์ 100 Hz...	72
รูปที่ 4-14 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบ โมโม ที่ความถี่คอปเพลอร์ 200 Hz..	73
รูปที่ 4-15 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบ โมโมที่ความถี่คอปเพลอร์ 300 Hz...	73
รูปที่ 4-16 ชุดอุปกรณ์ภาคส่ง.....	74
รูปที่ 4-17 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานแบบ โมโม.....	75
รูปที่ 4-18 บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบทั้งภาคส่งและภาครับ.....	75
รูปที่ 4-19 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์.....	76
รูปที่ 4-20 โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ภาคส่ง.....	77
รูปที่ 4-21 โปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างเฟรมข้อมูล.....	78
รูปที่ 4-22 โครงสร้างโปรแกรมในส่วนที่ตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจ .....	79
รูปที่ 4-23 โครงสร้างของภาคส่งสัญญาณ OFDM .....	80
รูปที่ 4-24 โครงสร้างของภาครับสัญญาณ OFDM .....	81
รูปที่ 4-25 แผนผังโปรแกรมสำหรับภาคส่ง.....	83
รูปที่ 4-26 ผังแสดงกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ.....	84
รูปที่ 4-27 แผนผังโปรแกรมในส่วนของภาครับ .....	85
รูปที่ 4-28 แบบจำลองส่วนประกอบของระบบ โมโมที่มีการใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วย ซอฟต์แวร์ .....	86
รูปที่ 4-29 การจัดวางชุดทดสอบ .....	88
รูปที่ 4-30 การจัดวางอุปกรณ์ RSU.....	89

รูปที่ 4-31 การจัดวางอุปกรณ์ดีคยานพาหนะ OBU .....	90
รูปที่ 4-32 การจัดวางชุดทดสอบระบบไมโม .....	91
รูปที่ 4-33 การจัดวางอุปกรณ์ RSU ระบบไมโม.....	92
รูปที่ 4-34 การจัดวางชุดอุปกรณ์ OBU ระบบไมโม .....	93
รูปที่ 4-35 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ ..	94
รูปที่ 4-36 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ .....	95
รูปที่ 4-37 ผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ.....	96
รูปที่ 4-38 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ .....	97
รูปที่ 4-39 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ .....	98
รูปที่ 4-40 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ .....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 เทคโนโลยีที่ใช้กับระบบการสื่อสาร .....	8
ตารางที่ 2-2 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p.....	10
ตารางที่ 2-3 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน CEN-DSRC .....	11
ตารางที่ 2-4 แสดงชุดพารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน ARIB STD-T75 .....	12
ตารางที่ 2-5 รูปแบบการเข้ารหัสของ Alamouti .....	16
ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	59
ตารางที่ 4-2 คุณลักษณะของมาตรฐาน ARIB STD-T75.....	59
ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p.....	71
ตารางที่ 4-4 แสดงสัญลักษณ์ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ .....	82

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transport System) เป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจมากจากทุกมุมโลก เพราะระบบขนส่งอาทิเช่น การจราจร การขนส่งสินค้า เป็นระบบที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการดำรงชีวิตในปัจจุบัน การสร้างความอัจฉริยะให้กับระบบขนส่งนี้สามารถทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีเฉพาะด้านการสื่อสารระยะใกล้ (Dedicated Short Range Communication) เทคโนโลยีนี้จะทำให้ยานพาหนะติดต่อสื่อสารกับป้ายสัญญาณหรืออุปกรณ์ที่อยู่ริมถนน รวมไปถึงสามารถติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะด้วยกันเองได้ ด้วยหลักการเหล่านี้ทำให้เกิดแนวคิดประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายเช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ ระบบแจ้งเตือนภัยล่วงหน้า ระบบนำทางอัจฉริยะ ระบบช่วยขับรถเพื่อความปลอดภัย และระบบแจ้งข้อมูลข่าวสาร เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติถือว่าเป็นระบบที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดในเชิงพาณิชย์ ซึ่งระบบนี้จะอาศัยเทคโนโลยีจำแนกลักษณะด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification) เพื่อติดต่อระหว่างเครื่องเก็บค่าผ่านทางและพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงมากนัก แต่เมื่อพาหนะมีความเร็วสูงขึ้นการใช้เทคนิคจำแนกลักษณะด้วยคลื่นวิทยุไม่สามารถใช้งานได้ เพราะเครื่องอ่านไม่สามารถรับข้อมูลในเวลาอันสั้นได้ ประกอบกับความคาดหมายที่จะส่งข้อมูลในรูปแบบเสียงและภาพด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น จึงทำให้ยังมีการค้นหาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมอยู่ในปัจจุบัน จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา การสื่อสารระยะใกล้เฉพาะทางนี้ถูกกำหนดทิศทางจากสามกลุ่มประเทศคือ อเมริกาเหนือ ยุโรป และญี่ปุ่น โดยทั้งสามกลุ่มมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเทคโนโลยีบนความถี่ 5.8 – 5.9 GHz และมีแนวโน้มที่จะใช้โปรโตคอลในการส่งข้อมูลด้วย IEEE 802 .11 ทั้งนี้ไม่ว่าสามกลุ่มประเทศจะเสนองานวิจัยที่แตกต่างกันก็ตาม แต่ก็ยังคงต้องพิจารณาปัญหาที่สำคัญที่สุดร่วมกันคือ การส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงไปยังพาหนะที่เคลื่อนที่เร็ว เพราะช่วงเวลาที่พาหนะจะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลมีน้อยลงหากพาหนะเคลื่อนที่เร็วขึ้น และปัญหาเรื่องการแทรกแซงจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath) ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลเพื่อให้ได้อัตราเร็วที่สูงขึ้นในระยะเวลาเท่าเดิม โดยอาศัยหลักการทำงานของระบบโมโม (Multiple Input Multiple Output: MIMO) ที่มีการถอดรหัส

เชิงเวลาและตำแหน่ง ทำให้ระบบที่ใช้เทคนิคโมโมสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นในขณะที่อยู่ภายใต้การแทรกแซงจากสัญญาณหลายวิถีเท่าเดิม ซึ่งประเด็นปัญหาในงานวิจัยนี้ถือว่าสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2554) ในยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 1 กลยุทธ์การวิจัยที่ 8 แผนงานวิจัยที่ 1 เรื่องการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะและพัฒนาศักยภาพขีดความสามารถทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

ถึงแม้จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าม้งานวิจัยจำนวนหนึ่งที่สนใจการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ แต่ยังไม่เคยม้งานวิจัยใดที่ประยุกต์ใช้เทคนิคโมโม ฉะนั้นแนวคิดของโครงการวิจัยนี้น่าสนใจมากขึ้น นอกจากนี้เนื้อหาของการทำงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการทำงานในชั้นกายภาพ (Physical Layer) เท่านั้น จึงมีความสะดวกในการนำไปประยุกต์กับการใช้งานจริงได้ทันที ทำให้ผลสำเร็จของโครงการวิจัยนี้ถือว่าการสร้างกระบวนการออกแบบจากเทคโนโลยีใหม่ที่สนใจ ซึ่งสามารถนำไปแข่งขันกับวิธีการอื่นๆ ในต่างประเทศได้ จึงสอดคล้องกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2554) ในกลุ่มเทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม นอกจากนี้ผลสำเร็จที่ได้ยังเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้กับภาคธุรกิจต่างๆ ทำให้ไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ลดการนำเข้าเทคโนโลยีราคาแพงและเสริมสร้างความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจของประเทศในทางอ้อมได้อีกด้วย ประเด็นนี้ถือว่าสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2550-2554) ในยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืนเป็นอย่างมาก และยังคงเป็นฐานสำหรับการวิจัยและพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต ทำให้ตรงกับนโยบายของรัฐบาล นโยบายระยะการบริหารราชการของรัฐบาล ในหัวข้อ 1.1 การสร้างความเชื่อมั่นและกระตุ้นเศรษฐกิจในภาพรวมเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นแก่ภาคประชาชน และ 2.3.5 นโยบายเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยเทคนิคโมโม
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้ของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ
3. เพื่อสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

## 1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

2. จำลองแบบการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะในคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB
3. ศึกษาระบบโมโม และกำหนดจำนวนสายอากาศที่เป็นไปได้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ
4. ประยุกต์ระบบโมโมเข้ากับการจำลองแบบระบบขนส่งอัจฉริยะ
5. ทดสอบสมรรถนะของการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ด้วยการเปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลกับวิธีเดิม
6. พัฒนาเทคนิคโมโมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด
7. ออกแบบ และสร้างการทดสอบเทคนิคโมโมเพื่อยืนยันผลสำเร็จของโครงการ
8. ปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคโมโมจากผลการทดสอบเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ
9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงเทคนิคโมโม
11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

#### 1.4 ผลสำเร็จของโครงการ

ผลสำเร็จของโครงการวิจัยนี้คือต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่ใช้เทคนิคโมโม โดยมีการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2 บทความ และกำลังส่งผลงานในวารสารวิชาการอีก 1 บทความ

#### 1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยจึงได้มีการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมารวมถึงการค้นคว้าจากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย และทางอินเทอร์เน็ต โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงปริทรรศน์วรรณกรรมซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้ ระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ และเทคนิคโมโม

##### 1.5.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะและเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้

การนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้เข้ามาใช้งานกับระบบขนส่งอัจฉริยะเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจไม่ว่าจะเป็นงานของ (Kukshya, V., and Krishnan, H., 2006) ได้กล่าวถึงการนำเทคโนโลยีการ

สื่อสารระยะใกล้เข้ามาช่วยในการพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่งแบ่งประเภทตามรูปแบบในการใช้งาน ออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ Vehicle to Vehicle (V2V) เป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะ และ Vehicle to Infrastructure (V2I) ซึ่งเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง โดยการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งกับภาครับนี้ทำงานภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11p ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้มาใช้โดยเฉพาะ นอกจากนี้ (Oh, H., Yae Ahn, C., and Cho, H., 1999); (Yuan, R., 1997) ได้แสดงให้เห็นว่าการติดต่อสื่อสารในระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้นั้นทำงานที่ย่านความถี่ 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 เนื่องจากการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งสภาพช่องสัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้

### 1.5.2 เทคนิคโมโม

เทคนิคโมโมเป็นเทคนิคหนึ่งซึ่งในปัจจุบันที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยจากทั่วโลกเนื่องด้วยข้อดีที่หลากหลายของเทคนิคโมโม แต่ก็ต้องยอมรับกับความซับซ้อนของอุปกรณ์เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของระบบสื่อสาร งานวิจัยของ (Foschini, G.J., 1996) และ (Telatar, I.E., 1995) ได้แสดงให้เห็นว่าความจุช่องสัญญาณในระบบโมโมสามารถเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามจำนวนคู่ของสายอากาศระหว่างภาครับและภาคส่ง ซึ่งความจุของช่องสัญญาณนั้นหากมีค่ามากจะทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้มีค่ามาก อีกทั้งหากค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่ามากนั้นหมายถึงผู้ใช้งานสามารถรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงได้อีกด้วย (Tarokh, V., 1999) ได้กล่าวถึงการศึกษาประสิทธิภาพของระบบโมโมที่การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย เป็นการกล่าวอธิบายถึงกระบวนการในการเข้ารหัสที่ภาคส่ง กล่าวถึงกระบวนการถอดรหัสที่ภาครับ อีกทั้งยังได้กล่าวถึงกระบวนการในการประมาณค่าช่องสัญญาณที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในเทอมของอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Wee, S., Ros, M., and Vial, P., 2009) ได้กล่าวถึงการทำเทคนิคโมโม



ที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาไปใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ โดยมีการอธิบายถึงวิธีการออกแบบระบบ การนำเทคนิคไมโมไปออกแบบระบบด้วยการใช้โปรแกรม GNU Radio โดยแสดงประสิทธิภาพของระบบในเทอมของอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับและยังมีงานวิจัยที่นำเทคนิคไมโมไปใช้ในการออกแบบการทดลองไม่ว่าจะเป็น (Palchak, D., Behrouz, Boroujeny, F., 2006); (Li, .X., 2006); (Homayoun, W., Zadeh, Y., 2008) โดยงานวิจัยหลังนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคไมโมให้สามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ได้

## บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

### 2.1 กล่าวนำ

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่หลายอย่าง ในบทนี้ผู้วิจัยจึงเสนอองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย ระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ เทคโนโลยีโมโม เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็ม และคุณลักษณะช่องสัญญาณไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีและเทคนิคเหล่านี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

### 2.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะ

ระบบขนส่งอัจฉริยะ คือ การนำเทคโนโลยีทางการสื่อสาร เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งแบบเดิม โดยมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาด้านการจราจร ลดปัญหาการเกิดอุบัติเหตุ แก้ปัญหาการจราจรติดขัดโดยปราศจากการก่อสร้างถนนใหม่หรือโครงสร้างพื้นฐานใหม่ขึ้นมา ระบบขนส่งอัจฉริยะมีผลดีในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การแก้ไขปัญหาในด้านการขนส่งลดอุบัติเหตุ แก้ไขปัญหาการติดขัด รับส่งข้อมูลและรายงานข้อมูลสภาพการจราจรให้แก่ผู้ใช้รถใช้ถนนได้ทราบ ตลอดจนการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์หาวิธีแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นในระบบขนส่งแบบเดิม

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีระบบขนส่งได้เข้ามามีอิทธิพลต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมากทั้งในด้านการเดินทางไปตามสถานที่ต่าง ๆ การขนส่งสินค้าไปตามที่ต่าง ๆ แต่ด้วยจำนวนประชากรมนุษย์ที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้ความต้องการใช้งานระบบขนส่งมีมากขึ้น เทคโนโลยีในด้านระบบขนส่งก็ต้องถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้อย่างรวดเร็วและมีความปลอดภัยสูง ตัวอย่างระบบขนส่ง ได้แก่ การจราจร การขนส่งสินค้า เป็นต้น ในการที่จะทำให้ระบบขนส่งกลายเป็นระบบขนส่งอัจฉริยะได้นั้นจะต้องอาศัยเทคโนโลยีในการสื่อสาร โทรคมนาคมเข้ามาเพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพของระบบขนส่งแบบเดิม มีคำกล่าวที่ว่า เทคโนโลยีทางการสื่อสาร โทรคมนาคมเป็นหัวใจหลักของระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่ง ดร.ภาสกร ประถมบุตรได้กล่าวเอาไว้ในการประชุมวิชาการ ITS Asia Pacific 2010 ที่ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ ในปัจจุบันนี้ปัญหาเกี่ยวกับระบบขนส่งนับว่าเป็นปัญหาระดับชาติ ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น อาทิเช่น รถติดซึ่งเป็นปัญหาอันดับแรก ๆ ที่ถูก

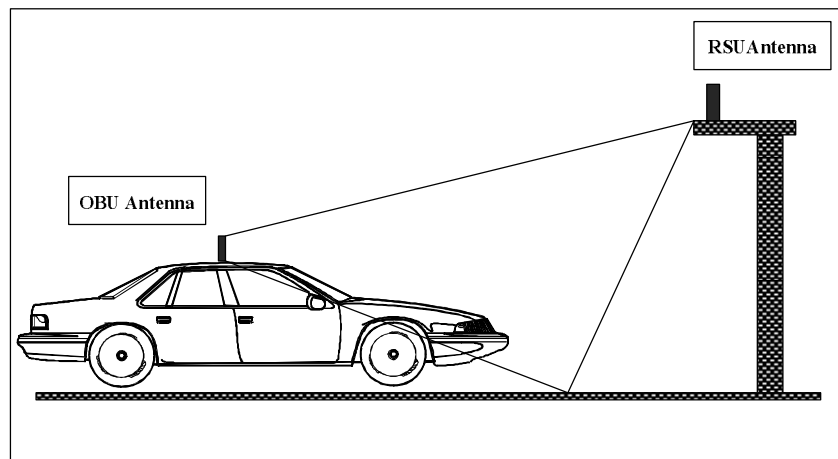
กล่าวถึงมากที่สุด การนำเอาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารเข้ามาช่วยระบบขนส่งแบบเดิมที่เห็นได้ทั่วไปคือป้ายจราจรอัจฉริยะที่อยู่ตามแยกสำคัญ ๆ ต่างในกรุงเทพมหานคร โดยป้ายจราจรอัจฉริยะนี้จะรับข้อมูลมาจากศูนย์ควบคุมการจราจรกลาง เพื่อแจ้งสถานะถนนเส้นนั้นให้ผู้ขับขี่ทราบว่าจะมีรถติดหรือไม่ ผลที่ได้นั่นคือทำให้ผู้ใช้งานสามารถวางแผนการเดินทางเพื่อไปถึงจุดหมายได้อย่างทันเวลา เมื่อเทียบกับการที่จะต้องสูญเสียงบประมาณในการก่อสร้างถนนใหม่แล้ว สามารถกล่าวได้ว่าระบบขนส่งอัจฉริยะมีความประหยัดกว่าการสร้างถนนหรือโครงสร้างพื้นฐานใหม่ขึ้นมา ในการแก้ไขปัญหาการจราจรที่เกิดขึ้นทุกวันนี้สามารถกระทำได้หลากหลายวิธีการ ในการที่มุ่งเน้นไปสู่การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานใหม่ให้สามารถรองรับความต้องการในการใช้งานระบบขนส่งเดิมนั้นเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณสูง ซึ่งไม่เหมาะสมสถานการณ์ของประเทศ และไม่ใช่วิธีทางที่ยั่งยืนในการแก้ปัญหาซึ่งปัจจุบันนี้หลายประเทศได้ให้ความสนใจไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งแบบเดิมไปเป็นระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยอาศัยเทคโนโลยีด้านโทรคมนาคมเข้ามาช่วย จึงก่อให้เกิดเป็นระบบขนส่งอัจฉริยะขึ้นมา

### 2.3 แพลตฟอร์มการสื่อสารระยะใกล้

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีในการสื่อสารไร้สายนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญต่อชีวิตมนุษย์ด้วยข้อดีที่หลากหลาย ความสะดวกสบายที่ได้รับที่มากมาย ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีที่สามารถเห็นได้ชัดคือ เทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมทั่วโลก โดยเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาให้การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีระยะห่างที่ไกลกันในระดับกิโลเมตร นักวิจัยจากทั่วโลกจึงมุ่งเน้นไปที่การวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อาทิเช่น ทำอย่างไรถึงจะทำให้พื้นที่ครอบคลุมในการติดต่อสื่อสารเพิ่มมากขึ้น ทำอย่างไรจะทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่มีอัตราเร็วขึ้น หรือแม้กระทั่งจะทำอย่างไรให้สถานีฐานสถานีหนึ่งรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากขึ้น เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นระบบสื่อสารที่มีระยะไกล ดังแสดงด้วยตารางที่ 2-1 ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีในการสื่อสารไร้สายระยะไกลจึงถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งภายใต้การสื่อสารระยะไกลนี้ยังมีการสื่อสารระยะใกล้อยู่ เมื่อการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารในระยะไกลเริ่มมีแนวโน้มไปในทางที่ดีขึ้น จึงได้มีผู้หันมาเริ่มที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ Dedicate Short Range Communication (DSRC) ขึ้นมา

ตารางที่ 2-1 เทคโนโลยีที่ใช้กับระยะการสื่อสาร

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



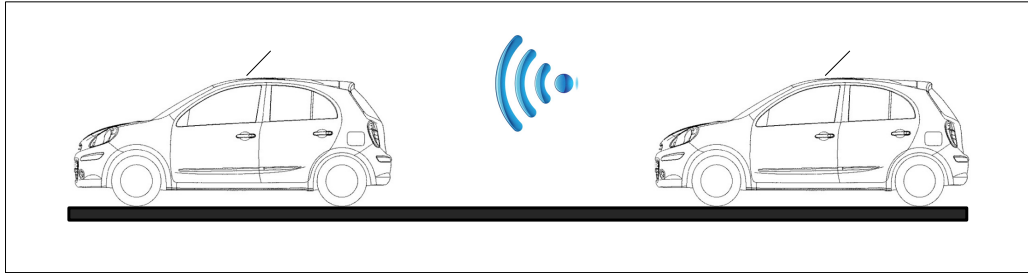
รูปที่ 2-1 โครงสร้างของระบบขนส่งอัจฉริยะ

เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล คือ เทคโนโลยีการสื่อสารในระยะสั้นจนถึงระยะกลางซึ่งเป็นระบบสื่อสารไร้สายสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน โดยมีจุดเด่นในด้านคุณสมบัติของระบบที่รองรับการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับด้วยอัตราเร็วสูง มีความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูลสูง เป็นต้น ส่วนประกอบที่สำคัญของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ติดรถ On Board Unit (OBU) เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับการรับส่งข้อมูลโดยสามารถทำหน้าที่ทั้งภาครับและภาคส่ง และอุปกรณ์ข้างทาง Road Side Unit (RSU) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ตามข้างทางเพื่อใช้เป็นภาคส่งหรือรับข้อมูลดังรูปที่ 2-1

### 2.3.1 การแยกรูปแบบของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

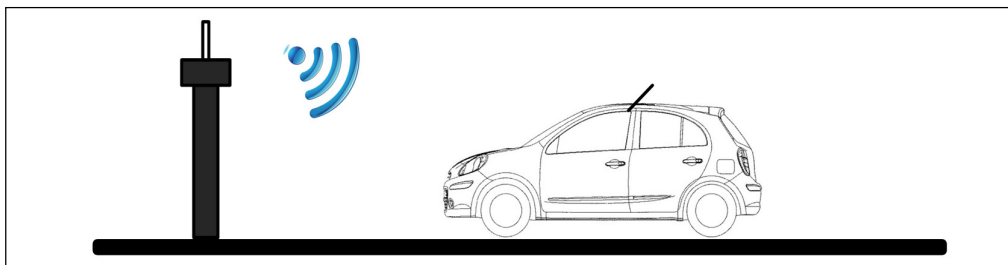
เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบในการนำเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลไปใช้กับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้น สามารถแยกได้เป็น 2 รูปแบบ

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 มาตรฐานนี้มีการพัฒนาต่อยอดมาจากมาตรฐาน IEEE802.11a หรือ ASTM E2213-03 โดยมีการใช้ข้อดีของการมอดูเลชันแบบOFDM ที่มีความทนทานต่อปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี โดยการเพิ่มช่วงเวลาของอักขระเพิ่มขึ้นเป็น 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 $\mu s$

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งในระหว่างการส่งและรับสัญญาณนั้นมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาครับ ภาคส่ง อาทิเช่น สิ่งกีดขวางระหว่างภาครับและภาคส่ง การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณ

หลายวิถี สภาพแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ตั้งของภาคส่งและภาครับ เป็นต้น ด้วยข้อดีของเทคโนโลยีระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก OFDM ซึ่งเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งในการนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวได้ โดยอาศัยจุดเด่นที่ทนต่อสัญญาณรบกวนและสามารถส่งข้อมูลในอัตราเร็วสูง 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

มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ถูกกำหนดขึ้นมาโดยองค์กร Association of Radio Industrial and Business (ARIB) ซึ่งเป็นองค์กรที่มีหน้าที่ในการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมโทรคมนาคมของประเทศญี่ปุ่น โดยทาง ARIB ได้กำหนดมาตรฐาน ARIB STD-T55 ขึ้นมาเพื่อเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะพื้นฐานของระบบขนส่งอัจฉริยะให้มีมาตรฐานที่เด่นชัดและหลังจากนั้นยังได้พัฒนามาตรฐาน 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

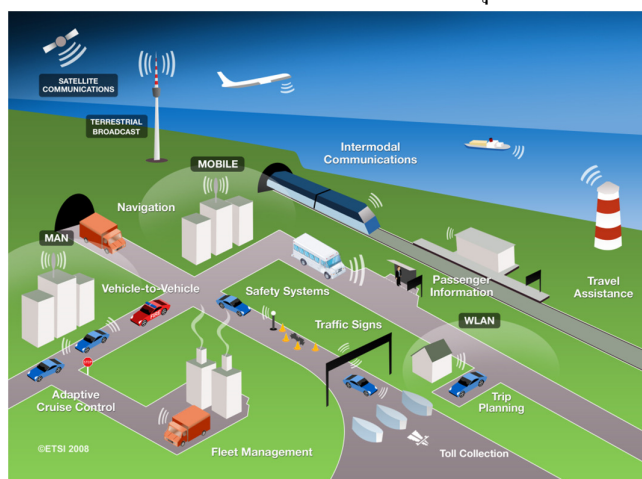
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	5.8 GHz
Modulation type	ASK,QPSK
Data rate	1 Mbps for ASK 4 Mbps for QPSK
Communication	TDMA/FDD
Power supplied to RSU antenna	10 m to 30 m =300mW
Power supplied to OBU antenna	Less than 10 mW



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

### 2.3.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล

เนื่องจากระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับมีไม่มากนักทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลนั้นสามารถต่อสู้กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ข้างทางและอุปกรณ์ติดรถได้ดี อาทิเช่น รองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงและมีความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูล เป็นต้น ด้วยจุดเด่นดังกล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้มีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลไปใช้งานด้านระบบขนส่งอัจฉริยะที่หลากหลาย อาทิเช่น ระบบแจ้งเหตุฉุกเฉินให้กับยานพาหนะ ระบบควบคุมความเร็วของยานพาหนะแบบปรับตัวได้ ระบบแจ้งเตือนการชนกันของยานพาหนะบริเวณแยกต่าง ๆ ระบบความปลอดภัยของยานพาหนะ ระบบเก็บเงินค่าผ่านทางอัตโนมัติ เป็นต้น และยังมีระบบอื่น ๆ อีกมากมายที่นำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะไปประยุกต์ใช้



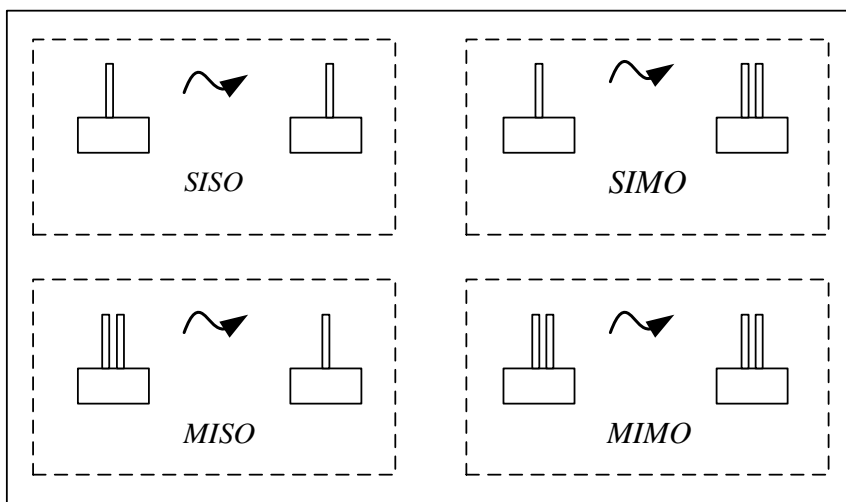
รูปที่ 2-4 ภาพรวมระบบขนส่งอัจฉริยะ [ที่มา : [www.etsi.org](http://www.etsi.org)]

## 2.4 เทคโนโลยีโมโม

การสื่อสารไร้สายในปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมจากทั่วโลกเป็นอย่างมาก ยิ่งจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ความต้องการใช้งานก็ยิ่งมีมากขึ้นเท่านั้น อีกทั้งความถี่ที่มีอยู่ก็มียุ่อย่างจำกัดเทคโนโลยีในอดีตนั้นไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้ หากทำการเพิ่มความกว้างแถบความถี่ก็สามารถทำได้แต่เป็นการสิ้นเปลืองความถี่ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด นักวิจัยทั่วโลกต่างมุ่งมั่นในการศึกษาค้นคว้าหาวิธีการที่จะได้มาซึ่งเทคโนโลยีที่รองรับการรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูง มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูง มีความจุของช่องสัญญาณมาก ๆ เพื่อรองรับการรับส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากแนวโน้มในปัจจุบันนี้ผู้ใช้งานมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลด้านภาพและเสียงที่คมชัดซึ่งมีขนาดข้อมูลใหญ่มาก จึงมีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้ค้นพบวิธีการที่จะให้ได้มาซึ่งเทคโนโลยีที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานดังที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยวิธีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับพร้อมทั้งเพิ่มเติมกระบวนการจัดการสัญญาณทั้งการเข้ารหัสสัญญาณ การถอดรหัสสัญญาณเข้าไปกับระบบ ด้วยเหตุดังข้างต้นจึงเป็นที่มาของระบบโมโม Multiple Input Multiple Output (MIMO) นั่นเอง

เทคนิคโมโม คือ การเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจำนวนมากกว่าหนึ่งต้นและสร้างกระบวนการให้สายอากาศที่เพิ่มเข้าไปนั้นช่วยกันรับส่งสัญญาณ และมีการนำสัญญาณที่ได้ไปจัดรูปแบบเพื่อให้สัญญาณที่ได้นั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น เมื่อสัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้นนั้นหมายถึง ประสิทธิภาพของระบบก็ต้องดีขึ้นไปด้วย อาทิเช่น ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลา (Throughput) อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล พื้นที่ในการติดต่อสื่อสารที่เพิ่มมากขึ้น ฯลฯ

การเพิ่มจำนวนสายอากาศให้กับเทคโนโลยีโมโมนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบได้แก่ ระบบที่ประกอบด้วยจำนวนสายอากาศภาคส่ง 1 ต้นและจำนวนสายอากาศที่ภาครับหลายต้น หรือ Single-Input Single-Output (SIMO) ระบบที่ประกอบด้วยจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งจำนวนหลายต้นและจำนวนสายอากาศที่ภาครับมี 1 ต้น หรือ Multiple-Input Single-Output (MISO) และระบบที่ประกอบไปด้วยจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งหลายต้นและจำนวนสายอากาศที่ภาครับจำนวนหลายต้น หรือ Multiple-Input Multiple-Output โดยระบบดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ระบบที่ใช้สายอากาศหลายต้นในการสื่อสาร

#### 2.4.1 ประเภทของเทคโนโลยีโมโม

เทคโนโลยีโมโมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบเปิด Open-Loop และระบบปิด Close-Loop โดยทั้ง 2 ระบบนี้จะมีข้อแตกต่างกันคือ ในระบบปิดจะมีการป้อนกลับสัญญาณที่รับได้ไปวิเคราะห์ว่าสัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณภาพดีหรือไม่คืออย่างไร ถ้าไม่ดีก็จะทำการส่งข้อมูลป้อนกลับไปยังภาคส่ง เพื่อให้ส่งข้อมูลมาใหม่ ในระบบปิดนี้ จะมีความซับซ้อนกว่าระบบเปิดมากแต่เมื่อเทียบกับคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นจะมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าระบบเปิด ซึ่งแตกต่างจากระบบเปิดที่ไม่มีมีการป้อนกลับสัญญาณไปที่ภาคส่ง

##### 1) ระบบเปิด (Open-loop)

เทคโนโลยีโมโมระบบเปิดสามารถแบ่งประเภทตามเทคนิคการส่งสัญญาณออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทคนิค Space-Time Coding และ เทคนิค Spatial Multiplexing โดยเทคโนโลยีแบบ Space-time Coding นี้จะอาศัยการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาซึ่งเป็นการเข้ารหัสที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้ามาในระบบเพื่อช่วยกันเข้ารหัส ผลที่ได้คือเกิดความหลากหลายทางตำแหน่งและเวลา ทำให้มีความทนทานต่อการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบไม่คงที่ และยัง

ส่งผลให้มีความเชื่อถือในการส่งข้อมูล 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) เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณที่เป็นการทำไคเวอร์ซิตีที่ภาคส่ง เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการเข้ารหัสและถอดรหัสสูงมาก ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการเข้ารหัสที่ยากและถอดรหัสที่ยากนี้กลับแลกลับมาด้วยประสิทธิภาพของระบบที่ดีขึ้น มีประสิทธิภาพในการต่อสู้กับอุปสรรคเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีได้ดี

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

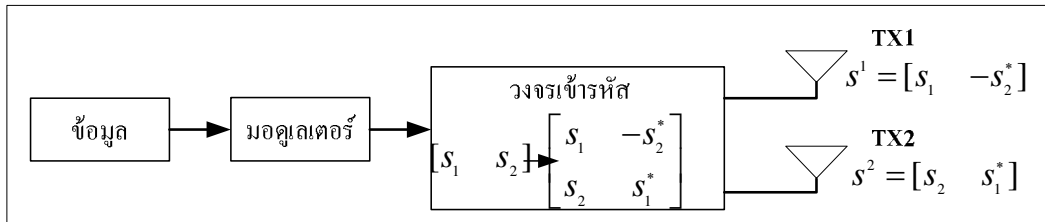
ตารางที่ 2-5 รูปแบบการเข้ารหัสของ Alamouti

	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 เมื่อแหล่งกำเนิดข้อมูลสร้างสัญลักษณ์ข้อมูลส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ ครึ่งละ 2 สัญลักษณ์ จากนั้นสัญลักษณ์ทั้ง 2 จะถูกส่งเข้าไปสู่วงจรการเข้ารหัสและถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศส่งเพื่อส่งออกอากาศไปยังภาครับ การส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หรือสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาที่มีความต่อเนื่องกันสมการที่ 2-1 แสดงรูปเมตริกซ์ของรูปแบบการส่งสัญญาณ โดยเมตริกซ์แถวจะแสดงตำแหน่งหรือสายอากาศที่จะส่ง ส่วนเมตริกซ์หลักจะแสดงเวลา ในช่วง

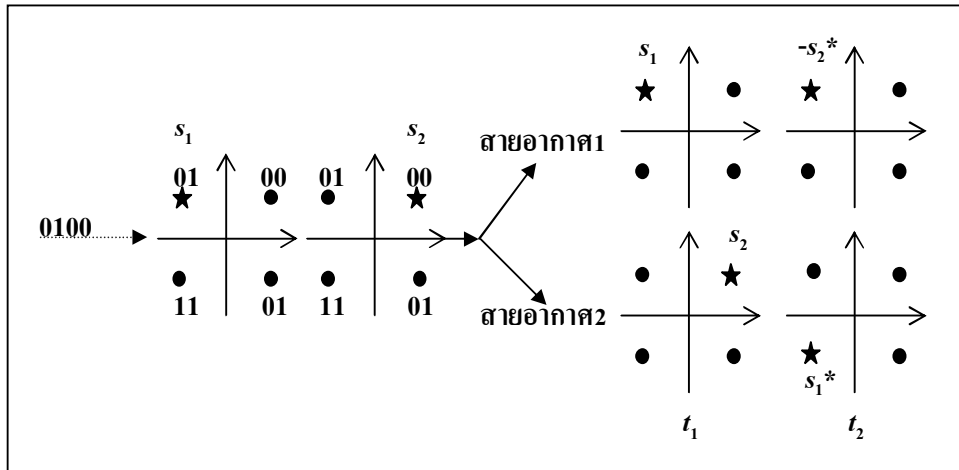
เวลาที่  $t$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่  $s_1$  และ  $s_2$  ตามลำดับ และที่เวลา  $t+T$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่ สัญญาณ  $-s_2^*$  และ  $s_1^*$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \tag{2-1}$$



รูปที่ 2-6 โครงสร้างการเข้ารหัสแบบ Alamouti

ซึ่งใน โครงการวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการส่งสัญญาณ โดยมีกรเข้ารหัสแบบ Alamouti เข้ามาใช้งานด้วย ที่ภาคส่งมีจำนวนสายอากาศส่ง 2 ต้น และที่ภาครับมีจำนวนสายอากาศ 2 ต้น



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK

ตัวอย่างการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ได้แสดงดังรูปที่ 2-7 สัญญาณที่ถูกมอดูเลตสองสัญญาณจาก QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) คอนสแตเลชันซึ่งแสดงอยู่ในระนาบเชิงซ้อน สัญญาณที่ถูกส่งจากสายอากาศส่งสองต้นได้แสดงในด้านขวาของรูป

กระบวนการถอดรหัสสัญญาณอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  มีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นแรกไปยังสายอากาศภากรับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,1}$  และรวมถึงสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่สองไปยังสายอากาศภากรับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,2}$  จะต้องเป็นดังนี้

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

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

$$\begin{aligned} r_j^1 &= h_{j,1} \cdot s_1 + h_{j,2} \cdot s_2 + n_j^1 \\ r_j^2 &= -h_{j,1} \cdot s_2^* + h_{j,2} \cdot s_1^* + n_j^2 \end{aligned} \quad (2-3)$$

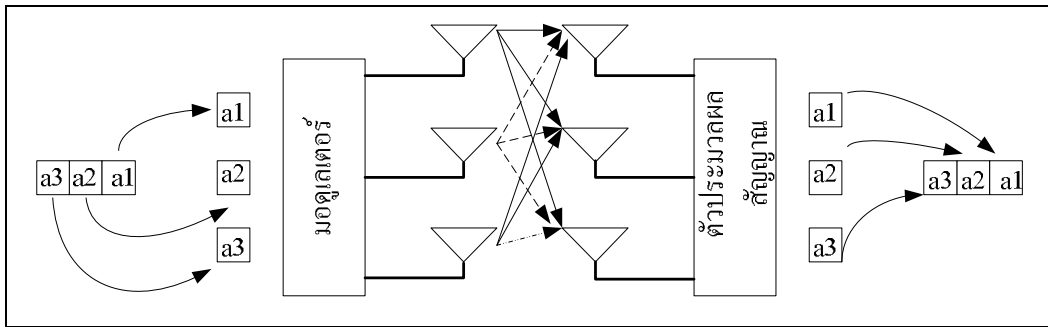
จากสมการที่ (2-3) องค์ประกอบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) ถูกเพิ่มลงไปให้สายอากาศภากรับลำดับที่  $j$  ในช่วงระยะเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  แสดงโดย  $n_j^1$  และ  $n_j^2$  ตามลำดับ

กระบวนการถอดรหัสทำได้โดยอาศัยการรวมของสัญญาณและการถอดรหัสแบบ Maximum likelihood อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการนี้ สัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณถูกพิจารณาว่าถูกรับรู้โดยถูกต้องสมบูรณ์ที่ภากรับ ในการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่ภากรับสามารถทำได้โดยใช้สัญญาณนำร่อง (Pilot Signal) กระบวนการของการรวมเชิงเส้นและสัญญาณถูกป้อนไปยังส่วนถอดรหัสแบบ Maximum likelihood ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\widehat{S}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot r_j^1 + h_{j,2} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_1 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot n_j^1 + h_{j,2} \cdot (n_j^2)^* \right\} \\ \widehat{S}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot r_j^1 - h_{j,1} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot n_j^1 - h_{j,1} \cdot (n_j^2)^* \right\}\end{aligned}\quad (2-4)$$

เราจะเห็นว่าสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อในการตัดสินใจจากการถอดรหัสประกอบด้วยขนาดของสัญญาณที่ถูกส่งและสัญญาณรบกวน ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับผลรวมของขนาดสัญญาณที่ได้จากสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ และสัญญาณรบกวนคือผลรวมของสัญญาณรบกวนที่สายอากาศภาครับคลื่นกับสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ

สำหรับเทคโนโลยีแบบ Spatial-Multiplexing เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณแบบสลับตำแหน่ง ซึ่งแตกต่างจากการเข้ารหัสแบบอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เทคนิคการเข้ารหัสในการส่งสัญญาณแบบนี้ให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่งจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมดเท่ากับจำนวนสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งต่อหนึ่งคาบสัญญาณ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 แบบจำลองการเข้ารหัสแบบ SM

เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้จะอาจเรียกง่าย ๆ ว่าต่างคนต่างส่งข้อมูล โดยที่ส่งความถี่เดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือช่วยให้อัตราการส่งข้อมูลสามารถส่งได้เร็วขึ้น แต่ก็ยังพบปัญหาในด้านการรบกวนกันของสัญญาณอยู่ ทำให้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบนี้ไม่เหมาะสมกับสภาพการส่งสัญญาณแบบแนวตรง Line of Sight และไม่สามารถเพิ่มพื้นที่การสื่อสารออกไปได้ไกลมากนัก

## 2.4.2 จุดเด่นของเทคโนโลยีโมโม

### 1. อัตราขยายแถวลำดับ (Array gain)

ด้วยการที่เพิ่มจำนวนสายอากาศที่ใช้ขึ้นมาหลายต้น ทำให้อัตราขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะทางในการสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมในการสื่อสารเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้แล้วเมื่อมองกลับไปยังภาครับ ทำให้ภาครับนั้นใช้พลังงานน้อยลงไปด้วย

### 2. อัตราขยายไดเวอร์ซิตี (Diversity gain)

โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีโมโมเมื่อได้รับผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี สายอากาศแต่ละต้นจะได้รับผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณที่แตกต่างกัน และเป็นอิสระต่อกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานของช่องสัญญาณจากในระบบเดิมคือระบบ SISO มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่ภาครับมาก เมื่อมีการใช้เทคนิคโมโมจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงกำลังงานในช่องสัญญาณมีค่าลดลง

### 3. กำลังขยายมัลติเพลกซ์ (Spatial Multiplexing gain)

ด้วยการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับ ทำให้ความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ทำให้อัตราการส่งข้อมูลเร็วขึ้น สามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ได้เร็วขึ้น

### 4. ลดการแทรกสอด (Interference reduction)

เนื่องจากการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นจะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถลดการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณหรือ Co-channel Interference ได้

## 2.5 ช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจาก

### สัญญาณหลายวิถี

ในระบบเครือข่ายการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย อากาศเปรียบเสมือนตัวกลางในการรับส่งสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับ หากเปรียบกับระบบการสื่อสารแบบมีสายนั้นสายอากาศก็เปรียบเสมือนสาย ซึ่งหากสายนั้นมีขนาดใหญ่ก็สามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็ว และหากภายในสายไม่มีการหักงอ ก็จะได้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่ดี แต่ในทางตรงกันข้าม ไม่มีใครสามารถรับรู้ได้ว่าช่องสัญญาณไร้สายนั้น



มีลักษณะอย่างไร นักวิจัยจึงได้พยายามสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายเพื่อให้มีความคล้ายคลึงกับสภาพความเป็นจริงของช่องสัญญาณจริงให้มากที่สุด โดยสามารถแบ่งรูปแบบของช่องสัญญาณไร้สายได้ดังนี้

### 2.5.1 ช่องสัญญาณแบบเรย์ลี

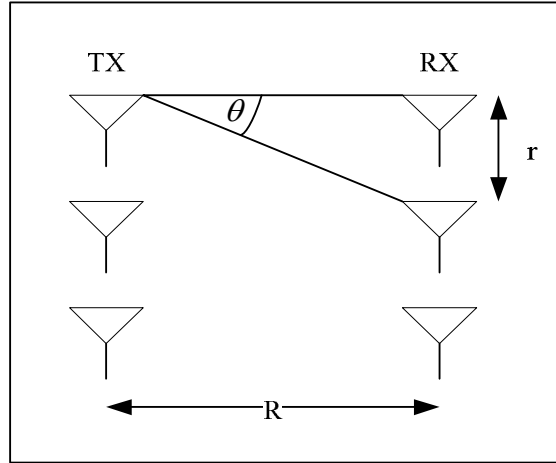
เมื่อการรับส่งสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสัญญาณในแนวสายตา หรือ Line of Sight กล่าวคือสัญญาณวิถีตรงถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งกับภาครับ เช่น การรับส่งสัญญาณในระยะไกลหรือในสภาพกลางแจ้ง (Outdoor) ซึ่งหากพิจารณาที่ภาครับจะพบว่าสัญญาณที่รับได้จะแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่สัญญาณแบบร่วมเฟส (In-phase) และสัญญาณตั้งฉาก (Quadrature) เมื่อมีจำนวนสัญญาณหลายวิถีจำนวนมากที่ภาครับและจากองค์ความรู้ขีดจำกัดกลาง (Central Limit Theorem) นั้นทำให้สามารถประมาณการได้ว่าส่วนของสัญญาณร่วมเฟสและส่วนของสัญญาณตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์จึงเป็นไปตามองค์ความรู้การแจกแจงแบบเรย์ลี (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 เมทริกซ์ของช่องสัญญาณของระบบไมโม  $\mathbf{H}_{Rayleigh}$  คือเมทริกซ์ของช่องสัญญาณที่เกิดจากการกระจัดกระจายตัวของสัญญาณเนื่องมาจากการสะท้อน  $\mathbf{H}_{LOS}$  คือเมทริกซ์ของช่องสัญญาณในแนววิถีตรงหรือสัญญาณหลัก ค่า  $K$  คือค่าสัมประสิทธิ์ไรเซียน ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังของสัญญาณหลักต่อกำลังของสัญญาณหลายวิถี และค่า  $\phi_0$  คือค่าการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่เคลื่อนที่จากภาคส่งไปยังภาครับ



รูปที่ 2-9 รูปแบบเรขาคณิตสำหรับระบบสายอากาศแถวลำดับ

จากรูปที่ 2-9 ได้แสดงรูปแบบเรขาคณิตสำหรับการสื่อสารในระบบ MIMO 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 (\$H(1)\$) จากสมการที่ (2-6) จะได้

$$\mathbf{H}_{Rice} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\phi_0} \mathbf{H}(1) + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{Rayleigh} \quad (2-7)$$

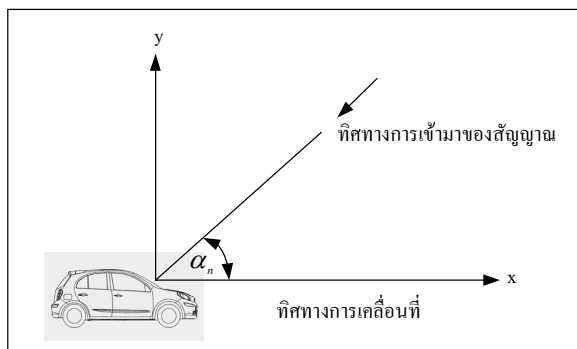
จากสมมติฐาน เราสามารถพิจารณาช่องสัญญาณแบบไร้เซชันได้ว่า สัญญาณหลักถูกพิจารณาว่าเกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นแบบ LOS และระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่งถูกพิจารณาว่ามีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับ

อย่างไรก็ตามข้อสมมติฐานเหล่านี้ไม่ถูกต้องเสมอไป ผลที่ได้บ่งบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณหลักต่อความจุช่องสัญญาณในระบบโมโม สำหรับกรณีที่สัญญาณหลักเกิดจากคลื่นหลายวิถี

จากสมการ (2-7) เมื่อคำนวณความจุช่องสัญญาณในระบบโมโม โดยใช้ช่องสัญญาณแบบไร้เซชัน และทำการเพิ่มค่า  $K$ -factor ของไร้เซชันพบว่า เมื่อค่า  $K$  มีค่าสูงขึ้น ความจุช่องสัญญาณที่ได้มีค่าลดลง นั่นหมายความว่าผลจากสัญญาณหลัก (LOS) ส่งผลโดยตรงต่อความจุช่องสัญญาณในระบบโมโม โดยที่ช่องสัญญาณที่ได้รับผลจากสัญญาณหลักมากกว่าสัญญาณหลายวิถีถือได้ว่าช่องสัญญาณดังกล่าวคือประสิทธิภาพในด้านความจุช่องสัญญาณ

### 2.5.3 ความถี่ดอปเพลอร์

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า ปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการสื่อสารไร้สายคือ ความถี่ดอปเพลอร์ เมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดังรูปที่ 2-10 ส่งผลให้สัญญาณที่มาถึงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป มุมของสัญญาณขาเข้า (Angle of arrival  $\alpha_n$ ) 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

เนื่องด้วยผลของการเกิดความถี่ดอปเพลอร์นี้เองทำให้ประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างภาคส่งและภาครับมีคุณภาพที่ด้อยลงไปด้วยความถี่ดอปเพลอร์นี้จะส่งผลให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่ถูกส่งกระจายออกไปในระหว่างที่ส่งข้อมูลเมื่อพิจารณาในเชิงเวลาที่จะพบว่าปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นี้จะทำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (Channel Impulse Response) มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

#### 2.5.4 การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

ในการส่งสัญญาณแบบไร้สายนั้นสัญญาณที่เดินทางจากภาคส่งไปยังภาครับที่ภาครับไม่สามารถรับสัญญาณได้ทั้งหมด เนื่องจากว่าระหว่างภาคส่งและภาครับนั้นมีสิ่งกีดขวาง มีสิ่งที่เป็นอุปสรรคต่อการรับส่ง

สัญญาณระหว่างภาคส่งภาครับอยู่มากมาย อาทิเช่น กำแพง ตึกยานพาหนะ มนุษย์ ต้นไม้ ฯลฯ สัญญาณที่เดินทางมาจากภาคส่งเป็นเส้นเดียวเมื่อกระทบกับสิ่งกีดขวางก็จะแตกออกเป็นหลาย ๆ เส้น เราจึงเรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณหลายวิถีหรือ Multipath เมื่อเราทำการรับสัญญาณที่ภาครับจึงพบว่าสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นมีทั้งดีและไม่ดี เหตุผลคือ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับนั้นหากมีเป็นผลรวมจากสัญญาณที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันก็จะทำให้คุณภาพสัญญาณที่ได้นั้นมีคุณภาพดี แต่หากเป็นการแทรกสอดแบบหักล้างกันนั้นก็จะส่งผลให้ที่ภาครับมีคุณภาพสัญญาณไม่ดี จึงสามารถกล่าวได้ว่า การส่งสัญญาณจากภาคส่งมายังภาครับเมื่อสัญญาณกระทบสิ่งกีดขวางจึงก่อให้เกิดสัญญาณหลายวิถี เมื่อสัญญาณหลายวิถีวิ่งไปรวมกันยังภาครับในกรณีที่เกิดการแทรกสอดของสัญญาณหลายวิถีแบบหักล้างกันก็จะทำให้สัญญาณที่ได้คุณภาพไม่ดีจึงเป็นที่มาของ การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

#### 1. การแผ่แบบหน่วงเวลา (Delay spread)

ผลจากการเกิดสัญญาณหลายวิถีทำให้สัญญาณที่รับได้ที่ปลายทางประกอบไปด้วยสัญญาณที่สะท้อนมาจากหลายเส้นทาง ซึ่งมาถึงปลายทางที่ภาครับในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณที่รวมกันได้ที่ปลายทางจึงเกิดการหน่วงเวลาขึ้นมา ผลจากการเกิดการแผ่แบบหน่วงเวลานั้นจะทำให้เกิดการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและสภาพช่องสัญญาณ

#### 2. การแผ่แบบดอปเพลอร์ (Doppler spread)

การเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานออกจากสถานีฐาน ส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาถึงภาครับในแต่ละเส้นทางนั้นเกิดการเลื่อนความถี่ เรียกการเลื่อนความถี่แบบนี้ว่า การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ ผลจากการแผ่แบบดอปเพลอร์นี้จะทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณตามเวลานั้นจะมีอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความเร็วของการเกิดการจางหายและการความเร็วในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานด้วย

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)

การแผ่ของดอปเพลอร์ (doppler spread) ส่งผลให้เกิดการจางหายของสัญญาณ 2 รูปแบบ ได้แก่ การจางหายของสัญญาณแบบช้า (slow fading) และการจางหายแบบรวดเร็ว (fast fading) จะเห็นได้ว่าการพิจารณาประเภทของการจางหายของสัญญาณนั้นสามารถแยกประเภทได้ตามการเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณไร้สาย ซึ่งไม่ว่าจะเลือกพิจารณาปัจจัยก็สามารถพิจารณาได้เช่นกัน เนื่องจากการแผ่แบบหน่วงเวลา และการแผ่แบบดอปเพลอร์นั้นเป็นอิสระต่อกัน เนื้อหาในส่วนถัดไปจะเป็นการอธิบายถึงการจางหายของสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ

#### กรณีที่พิจารณาการแผ่แบบหน่วงเวลา (delay spread)

เมื่อเราพิจารณาการแผ่แบบหน่วงเวลา เนื่องจากสัญญาณหลายวิถีจะทำให้สามารถแยกประเภทของการจางหายของสัญญาณได้ 2 รูปแบบ

##### ก) การจางหายของสัญญาณแบบราบ (Flat Fading)

คุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณแบบราบ จะมีลักษณะเชิงสเปกตรัมเหมือนเดิม แต่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลกระทบของสัญญาณหลายวิถี เมื่อค่ากำลังของช่องสัญญาณเปลี่ยนนั้นคือการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของช่องสัญญาณหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด การแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักจะพบทั่วไปจะเป็นการกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution)

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

การจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่นี้ สเปกตรัมของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณไม่เท่ากันทั้งหมด โดยสเปกตรัมที่อยู่นอกแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบที่แตกต่างกันออกไป ช่วงความถี่ของช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากช่องสัญญาณที่มีขนาดเท่ากันเรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วม (Coherence bandwidth) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ เนื่องจากผลตอบสนองของช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งมีความยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับถูกลดขนาดและมีการประวิงเวลาจึงเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ขึ้นมา

### กรณีที่พิจารณาการแผ่ของคอปเพลอร์ (Doppler spread)

การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี เมื่อพิจารณาการแผ่ของคอปเพลอร์จะเป็นการพิจารณาเมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่สามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท

#### 1. การจางหายของสัญญาณแบบรวดเร็ว (Fast fading)

การเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานส่งผลให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายได้แก่ Doppler spread และ Coherence time เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากการจางหายแบบรวดเร็วนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ภายในเวลาที่ส่งสัญญาณ เวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์และคุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลาย ๆ ครั้งในขณะที่กำลังส่งสัญลักษณ์ออกไป เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณแบบรวดเร็วผลคือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณก็จะผิดเพี้ยนไปเช่นกัน

#### 2. การจางหายของสัญญาณแบบช้า (Slow fading)

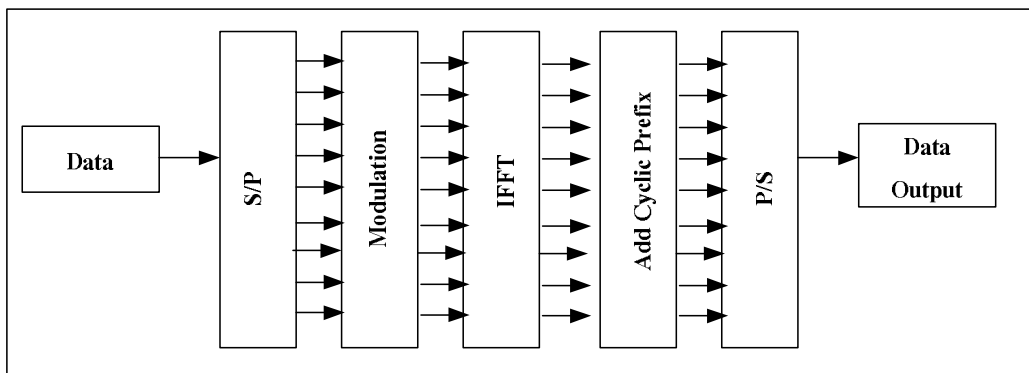
การจางหายของสัญญาณแบบช้าเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองของช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหรือ เวลาร่วมนัย (Coherence time) มากกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol time) ซึ่งการจางหายของสัญญาณแบบช้านี้จะทำให้ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบในช่วงเวลาที่ยาวนานติดต่อกัน

## 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) และอีกหลากหลายงานที่นำเทคนิคโอเอฟดีเอ็มไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันปฏิเสธไม่ได้เลยว่า ปัญหาเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีที่เป็นผลมาจากการส่งสัญญาณจากภาคส่งออกไป แทนที่สัญญาณนั้นจะเดินทางในทางตรงไปหาภาครับในทันที แต่

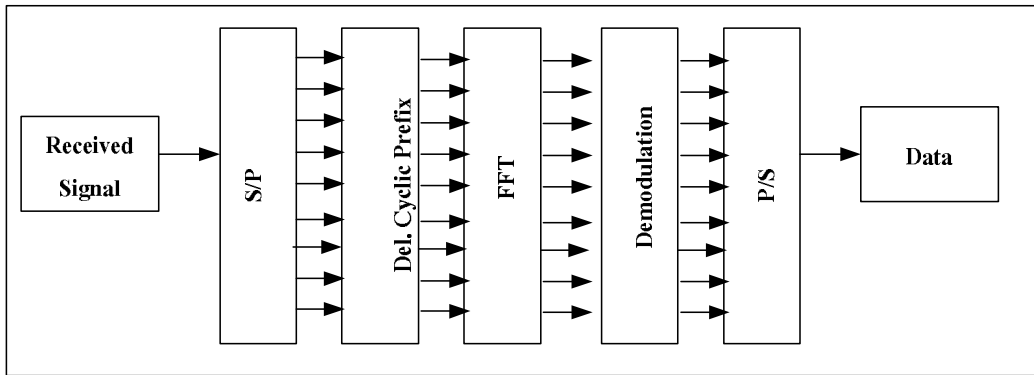
ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับนั้นยังมี ตึก อาคาร ต้นไม้ มนุษย์ รถยนต์ เป็นสิ่งกีดขวางทำให้สัญญาณที่เดินทางมาที่ภาครับนั้นเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางแล้วเกิดการสะท้อน ซึ่งการสะท้อนนั้นเมื่อสัญญาณเดินทางมาที่ภาครับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเฟสและแอมพลิจูด เมื่อสัญญาณเกิดการรวมกันแต่การรวมกันของสัญญาณที่ภาครับนั้นมีการรวมกันทั้งแบบเสริมกันและหักล้างกันหากรวมกันแบบเสริมกันก็เป็นผลดีต่อระบบแต่หากเป็นการรวมกันของสัญญาณแบบหักล้างการนั้นจะส่งผลไปยังประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร เพิ่มความผิดพลาดให้กับระบบสื่อสาร เพิ่มความยุ่งยากให้แก่นักวิจัยในการแก้ปัญหา

สำหรับการส่งและรับข้อมูลด้วยเทคโนโลยี OFDM นั้น ที่ภาคส่งจะมีการแบ่งแยกความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อย ๆ จำนวน  $N$  ช่อง แต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญลักษณ์ดิจิทัลซึ่งทำให้สัญญาณพาหะย่อยเหล่านี้มีความถี่ฉากซึ่งกันและกัน ในรูปที่ 2-11 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งสัญญาณ โดยใช้เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็ม หลังจากที่แบ่งช่องสัญญาณออกเป็นช่องย่อย ๆ แล้วก็จะนำสัญญาณที่ถูกแบ่งกลุ่มนั้นไปทำการมอดูเลชันกับสัญญาณพาหะย่อย รูปแบบในการมอดูเลชันสัญญาณพาหะที่นิยมทั่วไปได้แก่ BPSK QPSK QAM 16 QAM และ 64 QAM สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลชันนี้จะอยู่ในรูปของโดเมนความถี่ ในการที่จะแปลงกับมาเป็นสัญญาณ ในแกนเวลาอีกครั้งจะสามารถทำได้โดยอาศัยการแปลงกลับฟาสต์ฟูเรียร์ (IFFT) จากนั้นจะเป็นกระบวนการที่เสริมสร้างไซคลิกเข้าไปที่ตัวสัญญาณเพื่อแก้ปัญหาการรบกวนของสัญญาณเนื่องจากการประวิงเวลาที่เป็นผลมาจากการได้รับผลกระทบของการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี สุดท้ายจะเป็นการใช้เทคนิคการรวมข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบขนานมาเป็นข้อมูลแบบอนุกรม (Parallel to Serial) สำหรับที่ภาครับจะมีกระบวนการทำงานที่กลับกันกับภาคส่ง ดังรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-11 กระบวนการในการส่งสัญญาณ OFDM





รูปที่ 2-12 กระบวนการทำงานของภาครับสัญญาณ OFDM

ประโยชน์ของเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มได้แก่ สามารถลดผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณหลายวิถี เมื่อมีการเติมไซคลิกจะทำให้สามารถแก้ปัญหาการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้ สามารถรับส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงได้ เป็นการใช้ประโยชน์ของแถบความถี่พาหะได้อย่างเต็มประสิทธิภาพได้ ตัวอย่างการนำเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มไปประยุกต์ใช้ได้แก่ การส่งสัญญาณ โทรศัพท์แบบดิจิทัล ระบบ WiMax ระบบวิทยุกระจายเสียงดิจิทัล เป็นต้น

## 2.7 กล่าวท้ายบท

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 ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงต่อช่องสัญญาณทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านเฟส และ แอมพลิจูด จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของระบบสื่อสาร ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มที่เป็นการนำข้อมูลความเร็วสูงมาแบ่งออกเป็นข้อมูลความเร็วต่ำย่อย ๆ แล้วผ่านกระบวนการการสร้างสัญญาณ โอเอฟดีเอ็มพร้อมทั้งการ

เติมโซคลิกเข้าไปที่ตัวสัญญาณทำให้สามารถทนต่อปัญหาจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิธีได้

## บทที่ 3 การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารระยะใกล้

### 3.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีในด้านการสื่อสารมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมาก จากที่สามารถรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วต่ำ ๆ ในอดีต อัตราความผิดพลาดมีมากมาย แต่ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วสามารถพัฒนาให้ระบบสามารถมีคุณภาพและประสิทธิภาพที่ดีได้ สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง ๆ ได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านฮาร์ดแวร์อยู่ ยิ่งระบบสื่อสารนั้นมีประสิทธิภาพดีเท่าไร ฮาร์ดแวร์ของระบบและส่วนประกอบต่าง ๆ ยิ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นเท่านั้นอีกทั้งยังมีราคาสูงตามไปด้วย นักวิจัยจึงพยายามคิดหาวิธีในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยเปลี่ยนปัญหาจากปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์ไปเป็นปัญหาทางด้านซอฟต์แวร์แทนซึ่งนี่ก็เป็นจุดกำเนิดของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ขึ้นมา ดังนั้นการพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารระยะใกล้ในโครงการวิจัยนี้จึงใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ Software Defined Radio (SDR) ซึ่งเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องตลอดจนถึงกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

### 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 คุณลักษณะเบื้องต้นของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์คือ มีการใช้ซอฟต์แวร์ในการกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณ และทำการดีมอดูเลตสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับด้วยซอฟต์แวร์ ในทางตรงกันข้ามแล้วระบบสื่อสารเดิมมีการใช้วงจรแอนะล็อกที่มีขนาดใหญ่ แต่เทคโนโลยี

กำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์นี้เป็นการใช้ข้อดีของวงจรแอนะล็อก มารวมกันกับข้อดีของวงจรดิจิทัลเพื่อสร้างเป็นระบบสื่อสาร โดยใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์เป็นการพัฒนาการออกแบบระบบสื่อสารที่มีความสามารถในการสร้างสัญญาณวิทยุที่มีการเปลี่ยนแปลงในอากาศ เป็นการเพิ่มตัวเลือกอีกตัวหนึ่งแก่ผู้ใช้งาน ในทางทฤษฎีเทคโนโลยี SDR นั้นสามารถทำงานได้เหมือนกันกับระบบสื่อสารแบบดั้งเดิมแต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี SDR นี้ก็ยังมีขีดความยืดหยุ่นสูง เหมาะแก่นักออกแบบระบบสื่อสารที่สามารถใช้เป็นตัวเลือกหนึ่งในการสร้างระบบสื่อสารที่ยาก ๆ ในแบบเดิมให้ง่ายขึ้นด้วยการที่ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบสื่อสารผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ และยังสามารถใช้งานระบบสื่อสาร น่าสนใจและเป็นที่ยึดความสนใจของเหล่านักออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสาร ในการสร้างงานวิจัย หรือแอปพลิเคชันใหม่ ๆ ออกมาสู่ผู้บริโภคในท้องตลาด

### 3.3 GNU RADIO SOFTWARE PACKAGE

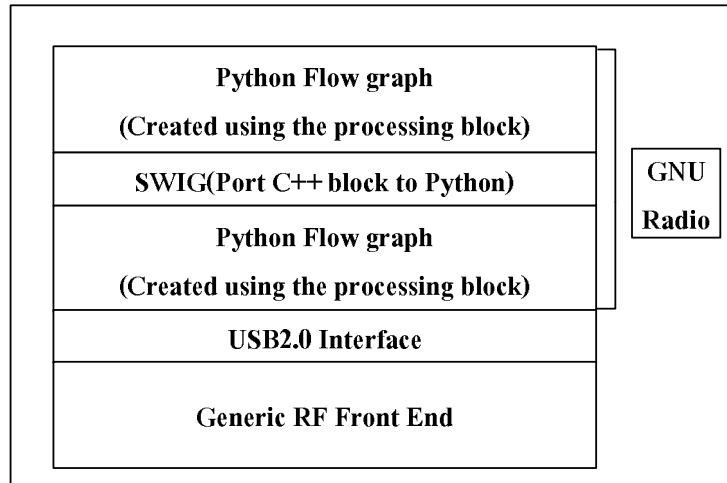
GNU Radio คือ ซอฟต์แวร์ที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเรียนรู้ การสร้างและการทำงานของเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ GNU Radio มีการให้ไลบรารีของการประมวลผลสัญญาณมาให้อย่างมากมาย ซึ่ง GNU Radio นี้เป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีลิขสิทธิ์สามารถใช้งานได้ฟรีซอฟต์แวร์นี้ได้ให้ข้อดีที่สมบูรณ์แบบสำหรับการทดลองสร้างระบบสื่อสารโดยไม่มีการปิดบังรายละเอียดของโค้ดโปรแกรมแม้แต่ชนิดเดียว ในการใช้งาน GNU Radio วิศวกรผู้ออกแบบระบบสื่อสารจะต้องมีพื้นฐานความรู้ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. การเขียนโปรแกรมแบบ Objected-oriented programming
2. การเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาไพธอน (Python) และภาษาซี C++
3. ทักษะในการใช้งานระบบปฏิบัติการลินุกซ์ โดยใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ อุบุนตุ(Ubuntu)
4. ในลำดับสุดท้ายจะต้องมีพื้นฐานความรู้ในด้านระบบการสื่อสารไร้สายเทคนิคการประมวลผล

สัญญาณดิจิทัล ฮาร์ดแวร์เบื้องต้น และการออกแบบวงจรไฟฟ้าทุกข้อที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ใช้งาน GNU Radio ทุกคนจะต้องมี

ซอฟต์แวร์ GNU Radio นี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วน ดังรูปที่ 3-1 โดยที่บล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ ประมวลผลประสิทธิภาพของระบบทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นมาจากการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา C++ ในส่วนที่สูงขึ้นไปคือ การบริหารจัดการระบบ การเชื่อมต่อระหว่างบล็อกแต่ละบล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณตลอดจนใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณนั้นสร้างขึ้นมาจากการเขียน

โปรแกรมด้วยภาษาไพธอน บล็อกสำหรับใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่มีการใช้งานเป็นประจำหรือมีการใช้งานอยู่บ่อย ๆ จะมีมาให้พร้อมอยู่แล้วซึ่งจะอยู่ในส่วนของตัวโปรแกรม GNU Radio



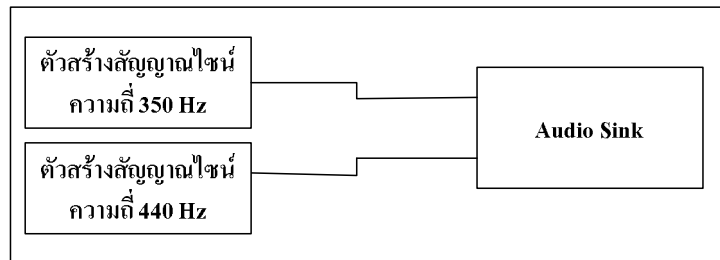
รูปที่ 3-1 โครงสร้างของ GNU Radio

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

กำเนิดไปยังจุดรับสัญญาณ ในบางครั้งก็ยังสามารถทำงานแบบ GUI ด้วย” ฉะนั้นการเรียนรู้ภาษาไพธอนจึงจำเป็นอย่างมากในการก้าวเข้ามาสู่โลกแห่งการเรียนรู้ของชุดโปรแกรม GNU Radio ข้อดีของภาษาไพธอน อาทิเช่นเป็นภาษาที่มีประสิทธิภาพ เป็นภาษาที่ง่ายและยืดหยุ่นในการเขียน โปรแกรม อีกทั้งหากเรามีความชำนาญด้านการเขียน โปรแกรมมาภาษา C++ อยู่แล้วก็ยิ่งทำให้โลกของเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ดูง่ายขึ้นและง่ายต่อการเรียนรู้

### 3.3.1 โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงโครงสร้างโปรแกรมภาษาไพธอนที่ใช้สำหรับการสร้างแอปพลิเคชันของระบบสื่อสาร ในที่นี้จะยกตัวอย่างการสร้างระบบสัญญาณโทรศัพท์แบบ Dial tone โดยเริ่มต้นที่การออกแบบบล็อกหรือที่เรียกว่า Flow graph ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แสดงทิศทางการเดินทางของสัญญาณ จุดเชื่อมต่อของสัญญาณในระบบดังกล่าวที่จะเป็นจะต้องมีในระบบที่ต้องการสร้าง ในระบบโทรศัพท์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยตัวสร้างสัญญาณไซน์ 2 ตัวเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณ ไซน์ 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 imit และส่วนถัดไปตั้งแต่บรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 11 เป็นการสร้างระบบตามที่ผู้ใช้งานได้ออกแบบไว้และในบรรทัดที่ 12 และ 13 เป็นการเชื่อมขอด 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 จากนั้นจึงประกาศให้ทั้งแพ็คเกจรับรู้ที่ผู้ใช้งานมีการสร้างบล็อกขึ้นมาใหม่ในแพ็คเกจซึ่งการเรียกใช้บล็อกที่สร้างขึ้นมาใหม่นั้นสามารถเรียกใช้ได้ผ่านทางเมธอด import แต่ข้อควรคำนึงถึงนั่นคือ บล็อกในการประมวลผลสัญญาณนี้จะต้องถูกพัฒนาด้วยภาษา C++ แต่การพัฒนาแอปพลิเคชันกลับพัฒนาผ่านทางภาษาไพธอน เครื่องมือสำคัญในการทำให้ทั้ง 2 ภาษาสามารถสื่อสารกันได้ นั่นคือ Simplified Wrapper and Interface Generator (SWIG) gr\_block เป็นคลาสแรกพื้นฐานของทุก ๆ คลาสที่ประกอบอยู่ใน GNU Radio แพ็คเกจ ซึ่งในการสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณนั้นจะต้องสร้างตัวโปรแกรมด้วยภาษา C++ และจะต้องสร้างขึ้นมาทั้งหมด 3 ส่วนประกอบได้แก่

1. .h เป็นการสร้างไลบรารีให้กับโค้ดโปรแกรม

2. .cc เป็นการกำหนดชื่อคลาสใหม่และยอมให้ภาษาไพธอนสามารถเรียกไปใช้งานได้
3. .i เป็นตัวบอก SWIGว่าจะสร้างการเชื่อมต่อกับบล็อกต่างๆอย่างไร

เนื้อหาในส่วนถัดไปนี้จะได้อธิบายถึงตัวอย่างการสร้างบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณเพื่อใช้ในการหาขนาดของสัญญาณขาเข้าที่เป็นจุดทศนิยม ในการสร้างบล็อกประมวลผลสัญญาณจะต้องทำการสร้างทั้งหมด 3 ไฟล์ .cc, .h และ .i สำหรับตัวอย่างนี้บล็อกในการประมวลผลสัญญาณมีชื่อว่า 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
7             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 บรรทัดที่ 3 รวม gr\_block.h ลงในไลบรารี และ บรรทัดที่ 4 กำหนดชื่อคลาส howto\_make\_square\_ff บรรทัดที่ 5 เป็นการกำหนดการเข้าใช้งาน gr\_block.h บรรทัดที่ 6 กำหนดให้ howto\_make\_square\_ff เป็นอินเตอร์เฟสทั่วไป บรรทัดที่ 10 เป็นการประกาศให้ howto\_make\_square\_ff ให้เข้าใช้งานตัวสร้างไพธอนได้ บรรทัดที่ 11 กำหนดให้ howto\_square\_ff เป็นตัวสร้างไพธอน บรรทัดที่ 13 ~howto\_square\_ff ถูกกำหนดเป็นตัว



สร้างงานให้แก่ตัวแปรไพรวาท บรรทัดที่ 14-17 สร้างเมธอด `general_work` ที่กำหนดการทำงานของ `gr_block.h` ส่วนสุดท้ายบรรทัดที่ 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 บรรทัดที่ถูกสร้างขึ้นมาโดย `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 และ บรรทัดที่ 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
0);
10 class howto_square_ff : public gr_block
11 {
12 private:
13   howto_square_ff();
14 };
```

บรรทัดที่ 6 กำหนดรายการข้อผิดพลาดของตัวโปรแกรม บรรทัดที่ 8 แสดงจำนวนอาร์กิวเมนต์ที่ต้องการของ howto ได้แก่ packet prefix และ square\_ff คือ ชื่อของคลาส ยังมีอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ ไฟล์ howto.i ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการบอก SWIG ให้สามารถใช้งานบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณที่สร้างขึ้นมาได้ ส่วนสุดท้ายเป็นไฟล์ที่ใช้ในการสร้างคลาสและนำบล็อกที่เราสร้างเข้าไปเก็บไว้ในส่วนหลักของแพ็คเกจ GNU Radio นั่นคือ Makefile.am

### 3.4 ชุดอุปกรณ์ UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL

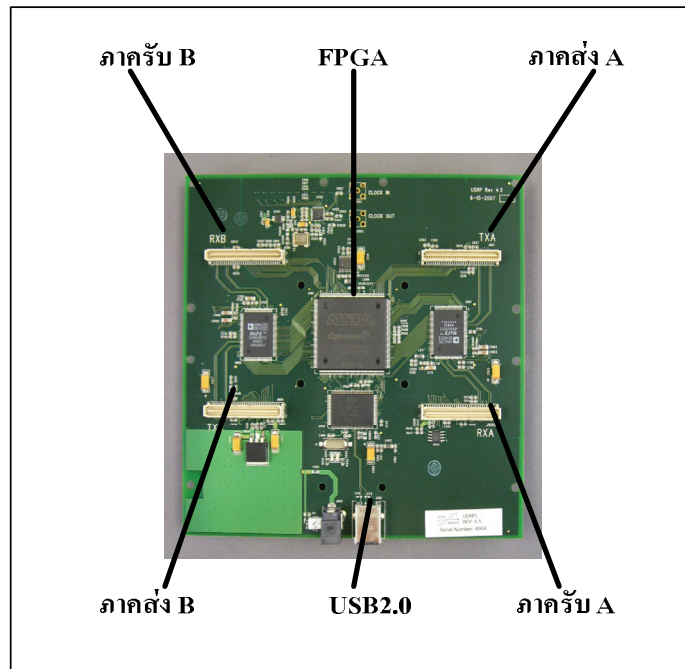
ชุดอุปกรณ์บอร์ด USRP ถูกออกแบบขึ้นมาให้รองรับการใช้งานตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยที่สามารถใช้ออกแบบระบบรับส่งสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ได้ที่แบนด์วิดท์สูงกล่าวคือตัวบอร์ด USRP ถูกออกแบบให้มีทั้งส่วนของสัญญาณดิจิทัลอนาล็อกและสัญญาณความถี่กลางเพื่อรองรับการออกแบบระบบสื่อสาร โดยการใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

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 1 ตัว 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 แต่ข้อควรคำนึงคือชุดอุปกรณ์นี้จะไม่รองรับการทำงานโดยการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวบอร์ด USRP ด้วยพอร์ตเชื่อมต่อแบบ USB 1.1 รูปที่ 3-3 แสดงถึงตัวบอร์ด USRP และส่วนประกอบต่างๆ ของบอร์ด



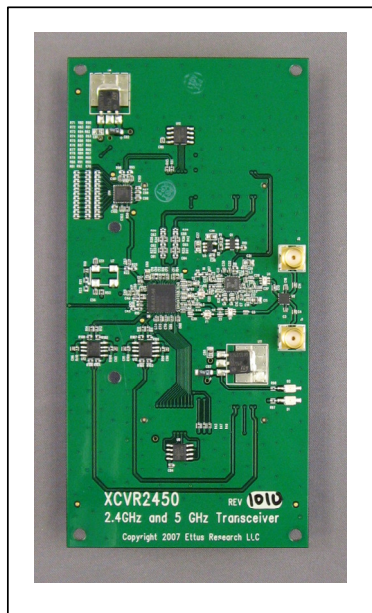
รูปที่ 3-3 บอร์ด USRP

### 1. ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (AD/DA Converters)

ในชุดอุปกรณ์ USRP Mother Board นั้นมีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลความเร็วสูงจำนวน 4 ตัว ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณจำนวน 12 บิต และมีอัตราการแซมปลิงถึง 64 MS/s ในทางทฤษฎี ในภาคส่งนั้นประกอบไปด้วยตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความเร็วสูงจำนวน 4 ตัวซึ่งมีความละเอียด 14 บิต โดยมีความถี่ของสัญญาณนาฬิกา คือ 128 MHz ในทางทฤษฎีเราจะมีจำนวนช่องสัญญาณขาเข้าจำนวน 4 ช่องและจำนวนช่องสัญญาณขาออกจำนวน 4 ช่อง สัญญาณ หากเราใช้การแซมปลิงแบบ real sampling อย่างไรก็ตาม ก็ตามหากเราใช้การแซมปลิงแบบเชิงซ้อน (I/Q Sampling) จะทำให้มีช่องสัญญาณขาเข้าจำนวน 2 ช่องสัญญาณ และจำนวนช่องสัญญาณขาออกจำนวน 2 ช่องสัญญาณ

### 2. Daughter Board

ชุดอุปกรณ์ Daughter Board XCVR2450 ดังรูปที่ 3-4 มีหน้าที่ในการกำหนดความถี่ของสัญญาณวิทยุในภาครับหรือภาคส่งรองรับตั้งแต่ 2.4 GHz-6.0 GHz ชุดอุปกรณ์ USRP Mother Board จะมีสล็อต 4 สล็อต 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 สามารถใช้งานตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกได้อย่างละ 2 ตัว คือ ส่วนของสัญญาณขาออกของ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ภาคส่งและส่วนสัญญาณขาเข้าของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ภาครับด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ตัวบอร์ด USRP สามารถใช้งานในการส่งสัญญาณออกไปพร้อม ๆ กันได้ที่สายอากาศทั้ง 2 ต้น และรองรับการทำงานด้วยระบบโมโม่ 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

### 3. ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC)

ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณเชิงเลข โดยผ่านกระบวนการดิจิทัลไซน์สัญญาณ ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะถูกติดตั้งอยู่ในภาครับของ USRP มีจำนวนทั้งหมด 4 ตัว ความละเอียดในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอยู่ที่ 12 บิต อัตราการแซม

ปลิง 64 MS/Second โดยปกติแล้วตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะสามารถดิจิทัลสัญญาณได้กว้างถึง 32 MHz ดังนั้นสัญญาณที่อยู่นอกเหนือแบนด์วิธ 32 MHz นี้ ตัวแปลงสัญญาณจะไม่สามารถแปลงสัญญาณได้ ซึ่งแบนด์วิธ 32 MHz สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของไนควิสต์

#### 4. ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (DAC)

ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่ภาคส่งของ USRP ที่ภาคส่งนั้นมีตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความเร็วสูงอยู่ทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณ 14 บิต ด้วยอัตราการแซมปลิง 128 MS/Second ดังนั้นจากทฤษฎีของไนควิสต์ แบนด์วิธของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะอยู่ที่ 64 MHz แต่อย่างไรก็ตามจะต้องให้แบนด์วิธของสัญญาณต่ำกว่านี้เพื่อที่จะให้ภาครับสามารถรองรับสัญญาณได้ง่าย ซึ่งย่านที่ทำงานได้คืออยู่ที่ประมาณ 44 MHz สำหรับการส่งสัญญาณ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะถูกบรรจุอยู่ในชิป AD9862 CODEC ซึ่งในภาคส่งนี้มีอุปกรณ์ที่สำคัญอีกอย่างก็คือ Digital Up Converter (DUC) ซึ่งมีหน้าที่ในการประมาณค่าช่วงของสัญญาณ (interpolation) จากนั้นจะทำการแปลงสัญญาณไปสู่ความถี่กลางและสุดท้ายส่งสัญญาณไปที่ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

#### 5. FPGA

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

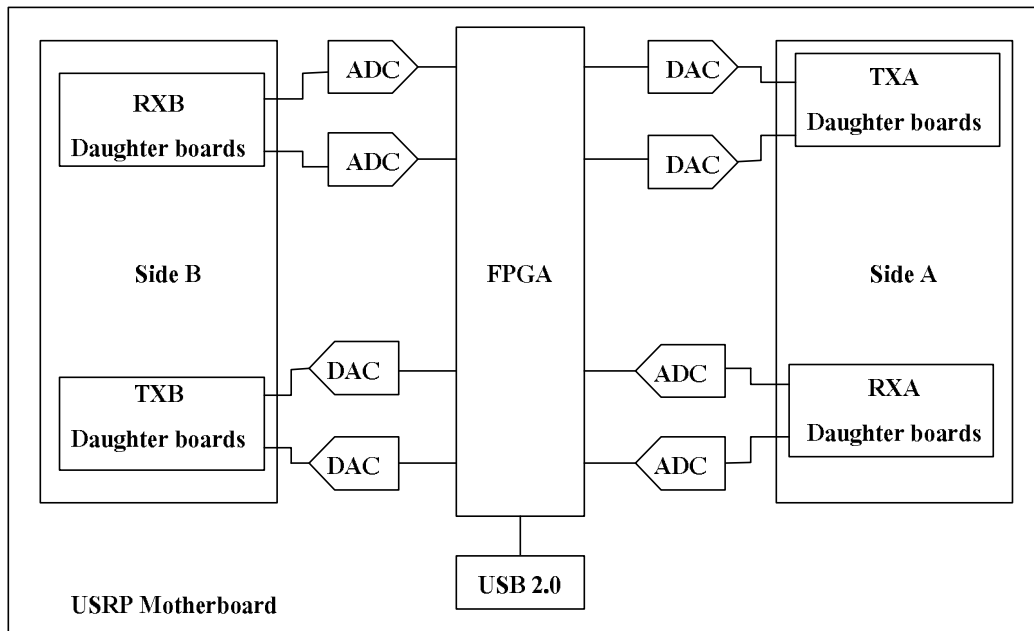
#### 6. USB2.0

USB เป็นช่องทางในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับชุดอุปกรณ์ USRP ด้วยชิปของ Cypress FX2 ชุดอุปกรณ์ USRP จะทำการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์และรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงแต่มีข้อจำกัดที่ว่า การเชื่อมต่อนั้นรองรับการทำงานเพียง USB2.0 เท่านั้น แต่ไม่รองรับการเชื่อมต่อแบบ USB1.1 โดยที่อัตราการรับส่งข้อมูลผ่านทาง USB2.0 สูงสุดอยู่

ที่ 32 MB/sec และในการเชื่อมต่อผ่านทางUSB2.0 นี้ผู้ใช้งานก็ต้องคำนึงถึงด้วยว่า หากทำการรับส่งข้อมูล ด้วยอัตราเร็วสูงสุดจะก่อให้เกิดการใช้งานหน่วยประมวลผลกลางของเครื่องคอมพิวเตอร์มาก ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ประมวลผลล่าช้าหรือ ในบางครั้งเครื่องคอมพิวเตอร์อาจหยุดการทำงานในบางเวลา

### 3.5 ทิศทางการไหลของสัญญาณใน USRP BOARD

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการศึกษาเข้าไปถึงภายในของชุดอุปกรณ์เพื่อดูว่า ทิศทางการไหลของสัญญาณภายใน USRP Board นั้นเป็นอย่างไร หลังจากศึกษาส่วนนี้แล้วผู้ใช้งานจะต้องทำการศึกษารายละเอียดของสัญญาณดิจิทัลต่อไป ซึ่งทิศทางการไหลของสัญญาณในตัว USRP Board นั้นสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 3-6 ได้แก่



รูปที่ 3-6 ส่วนประกอบภายในบอร์ด USRP

#### 3.5.1 ภาครับ

ที่ภาครับมีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจำนวน 4 ตัวและตัวแปลงสัญญาณ DDCS จำนวน 4 ตัวเช่นกัน โดยทั่วไปแล้ว Daughter Board แต่ละตัวนั้นจะมีสัญญาณแอนะล็อก

ขาเข้าจำนวน 2 สัญญาณ ซึ่งจะถูส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นสัญญาณที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงเลขแล้วจะถูกส่งไป FPGA เพื่อทำการประมวลผลสัญญาณในลำดับถัดไป จากนั้น สัญญาณ ที่ขาออกของ FPGA จะถูกนำส่งไปยังส่วนต่างๆ โดยชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ (MUX) เพื่อเข้าไปสู่ตัวแปลง DDCs ต่อไป ชุดตัวแปลง DDCS จะมีอยู่ 4 ชุด แต่ละชุดจะมีสัญญาณขาเข้า 2 สัญญาณคือ สัญญาณ I และสัญญาณ Q ชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ (MUX) นั้นจะมีลักษณะการทำงานคล้ายๆ กันกับเรทเทอร์หรือวงจรสลับสัญญาณ ซึ่งชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ (MUX) นี้มีหน้าที่กำหนดเส้นทางว่า ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ DDCS ตัวไหน ผู้ใช้งานสามารถควบคุมชุดอุปกรณ์มัลติเพลกซ์ได้โดยใช้ `usrp.set_mux ()` ซึ่งเป็นเมธอดหนึ่งในไพธอน

จากนั้นพิจารณาที่ชุดอุปกรณ์ DDCS ในอันดับแรกอุปกรณ์นี้จะทำการแปลงจากความถี่กลางเป็นความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ลำดับที่สอง ทำการ Decimate สัญญาณเพื่อส่งผ่านพอร์ต USB2.0 เข้าไปสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมชุดอุปกรณ์ รูปที่ 3-4 แสดงชุดอุปกรณ์ DDCs สัญญาณขาเข้าเชิงซ้อนที่ความถี่กลางจะถูกคูณด้วยสัญญาณเอ็กโปเนนเชียลที่มีความถี่คงที่ หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณเชิงซ้อนที่ตั้งอยู่ที่ความถี่ศูนย์ และเราจะทำการ Decimate สัญญาณด้วยแฟคเตอร์ M ต่อไป

### 3.5.2 ภาคส่ง

ที่ภาคส่งนี้จะมีกระบวนการที่ทำงานกันย้อนกลับกับภาครับ เราต้องการที่จะส่งสัญญาณเบสแบนด์เชิงซ้อน I/Q ไปยัง USRP ตัว DUCS จะทำการ interpolate สัญญาณจากนั้นจะทำการแปลงความถี่ IF ไปเป็นความถี่ RF และส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกก่อนทำการส่งออกอากาศต่อไปเมื่อพิจารณาไปถึงรายละเอียดเล็กๆ แล้วจะพบว่า ข้อมูลที่ถูก Interleaved จะถูกส่งมาจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมตัวบอร์ด USRP นั้น จะถูกนำส่งไปยัง 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 แต่ละตัวจะถูกส่งไปเป็นสัญญาณขาเข้าของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกในตัวชิพ AD9862 CODEC chip สัญญาณเชิงซ้อนจะถูก Interpolate ด้วย แฟคเตอร์ 4 โดยการ

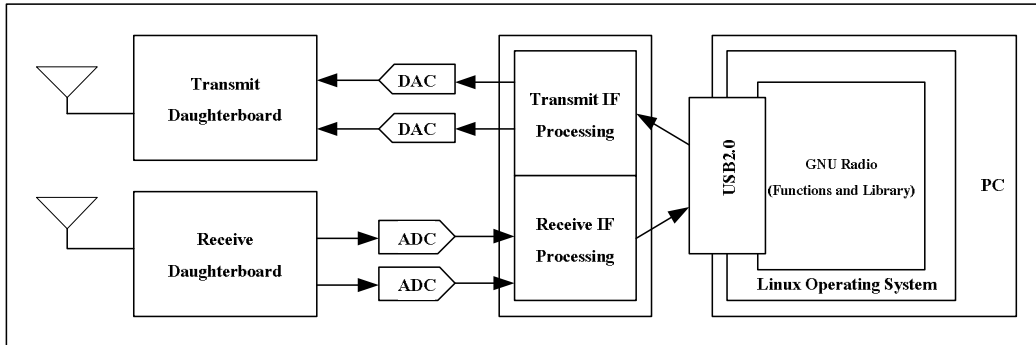


ใช้ Half band filter interpolators หลังจากที่สัญญาณผ่านส่วนนี้มาแล้วสัญญาณเชิงซ้อนจะถูกส่งไปยัง DUC เพื่อแปลงสัญญาณจากความถี่กลาง ไปเป็นความถี่วิทยุเพื่อส่งออกอากาศ สัญญาณเชิงซ้อนในรูปแบบ I/Q ที่เป็นสัญญาณขาออกของ DUC ที่อยู่ในรูป 14-bit samples จะถูกส่งไปยัง DACS ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยอัตรา 128MS/s และ สัญญาณแอนะล็อกที่ได้ จะถูกส่งจาก 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 จะทำเพียงแต่การ Interpolate สัญญาณเพียงเท่านั้น สิ่งที่น่ารู้อีกอย่างคือ ช่องสัญญาณของภาครับทุกช่องจะมีอัตราเร็วของข้อมูลที่เท่ากัน และที่ภาคส่งก็เหมือนกันคือ อัตราเร็วในการส่งข้อมูลต้องมีค่าเท่ากันทุกช่อง เมื่อผู้ใช้งานมีการเรียนรู้ถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบแล้ว ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ หลังจากนั้นก็จะเป็นการนำความรู้ทั้งสองส่วนดังกล่าวเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานวิจัย ซึ่งเมื่อนำทั้งสองส่วนมาประกอบรวมกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-7

### 3.6 การติดตั้งโปรแกรม GNU RADIO

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นวิธีการในการติดตั้งโปรแกรม GNU Radio วิธีการนี้นำเสนอการติดตั้งโปรแกรม GNU Radio เวอร์ชันล่าสุดซึ่งมีชื่อเรียกว่า trunk ซึ่งปกติแล้วเราสามารถติดตั้งได้ผ่านทาง 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 แต่จะให้ผู้ใช้สามารถติดตั้งตัวโปรแกรมผ่านทาง 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 ก็มีชื่อแพ็คเกจที่ต้องใช้บอกไว้อย่างดีแล้ว 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 สิ่งที่จะได้แสดงต่อไปนี้เป็นcommand lineที่ใช้สำหรับการติดตั้ง GNU radio software package ซึ่งมีเครื่องหมายที่น่าสนใจคือ เครื่องหมาย \ ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้เชื่อมสายอักขระเข้าด้วยกัน 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 การติดตั้ง SVN Client

SVN เซิร์ฟเวอร์นั้นมีการเปิดการใช้งานควบคุมเวอร์ชันของตัวโค้ดโปรแกรมหากโค้ดโปรแกรมมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ที่เซิร์ฟเวอร์จะยอมให้มีการกลับไปใช้โค้ดโปรแกรมเวอร์ชันเดิมที่ไม่มีความผิดพลาด เนื่องจาก SVN server มีลักษณะที่สามารถใช้งานได้สะดวกและคล่องตัวแถมยังมีการปรับปรุงฐานข้อมูลของโค้ดโปรแกรมให้ทันสมัยและใหม่อยู่เสมอ ๆ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้งานเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเมื่อผู้ใช้งานมีการติดตั้งตัวโปรแกรม GNU radio ลงไปในเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว หากต้องการที่จะปรับปรุงฐานข้อมูลของโค้ดโปรแกรมย่อก็สามารถเลือกอัปเดตข้อมูลนั้น ๆ ได้ จากนั้น GNU radio ก็จะทำการติดตั้งแพ็คเกจใหม่อีกครั้งเพื่อปรับปรุงโค้ดให้ใหม่อยู่เสมอ ๆ เช่นกัน ในขั้นตอนเริ่มต้นผู้ใช้งานจะต้องดาวน์โหลด Smart SVN มา จาก [www.syntevo.com/smartsvn/download.html](http://www.syntevo.com/smartsvn/download.html) จากนั้นทำการ unzip ตัว smart svn ที่โหลดมาแล้วทำการย้ายไปยัง /usr/share ทางที่ง่ายที่สุดในการทำขั้นตอนนี้คือ เปิด file browser ด้วยสิทธิ์การใช้งานแบบ root

### 3.7 ระบบปฏิบัติการ LINUX UBUNTU

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ซึ่งทั้ง 2 ส่วนเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง ซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ หากใช้ระบบปฏิบัติการไม่เหมาะสมกับ

คุณลักษณะฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ก็จะทำให้การใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ ปัจจุบันนี้มีซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการมากมายเป็นตัวเลือกให้กับผู้ใช้งาน และที่เป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลกได้แก่ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ของไมโครซอฟต์ ทุกคนต่างรู้ว่าราคาลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์มีราคาสูงอีกทั้งผู้ใช้งานได้เพียงแค่ว่าใช้แต่ไม่สามารถพัฒนาตัวซอฟต์แวร์ได้ เมื่อไม่นานมานี้มีระบบปฏิบัติการหนึ่งที่ถูกกล่าวถึงและเป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลก ระบบปฏิบัตินั้นคือลินุกซ์ ซึ่งมีการพัฒนามาหลากหลายเวอร์ชัน ด้วยข้อดีที่ไม่มีลิขสิทธิ์ ไม่ต้องจ่ายเงินแพงในการใช้ระบบปฏิบัติการ อีกทั้งยังสามารถเข้าไปแก้ไขระบบปฏิบัติการเชิงลึกได้ด้วย จึงทำให้ระบบปฏิบัตินลินุกซ์เป็นที่นิยมใช้ไปทั่วโลกและเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานที่จะเลือกระบบปฏิบัติการให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งานเอง

ในการใช้งานระบบปฏิบัตินลินุกซ์อันดับเบื้องต้นนั้น ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจถึงโครงสร้างพื้นฐานของระบบปฏิบัตินี้ สิทธิ์ในการเข้าใช้งานในส่วนต่าง ๆ ของระบบ ตลอดจนพื้นฐานในการใช้งานคอมมานด์ไลน์ เป็นต้น

### 3.7.1 ระบบปฏิบัติ Linux Ubuntu เบื้องต้น

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 ของวินโดวส์
- media คือ ส่วนที่แสดงสถานะอุปกรณ์ต่างเช่น แฟลชไดรฟ์ ที่เชื่อมต่อกับเครื่องอยู่
- sbin คือ ส่วนที่เก็บคำสั่งสำคัญของระบบ เช่น ปิดเครื่อง
- tmp คือ ส่วนที่ใช้เก็บไฟล์ชั่วคราว และจะถูกลบไปเมื่อเริ่มระบบใหม่
- usr คือ ที่เก็บแพ็คเกจข้อมูลต่าง ๆ ที่ผู้ใช้ต้องรู้

ข้อควรระวัง ทุก ๆ ครั้งที่ใช้งาน เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่อง ในบางครั้งจะไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากสิทธิ์ในการเข้าใช้งานของผู้ใช้ยังไม่เป็น root จึงเป็นที่มาที่ต้องเพิ่มคำสั่งsudo 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>

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

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

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>



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</p> <p><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 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความหมายของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์อธิบายถึงแพ็คเกจ GNU Radio ชุดอุปกรณ์ USRP ที่ประกอบไปด้วยบอร์ดหลักคือ USRP Motherboard และบอร์ดรอง Daughterboard ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของผู้ใช้งานผ่านทาง USB 2.0 จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงองค์ประกอบภายในของชุดอุปกรณ์ เมื่อผู้ใช้งานมีความเข้าใจในองค์ประกอบของอุปกรณ์แล้ว ต้องมาเรียนรู้ถึงตัวแพ็คเกจ GNU Radio ซึ่งมีการใช้ภาษาไพธอนเป็นตัวเชื่อมบล็อกลงในการประมวลผลสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากภาษา C++ โดยทั้งสองภาษาจะสามารถเชื่อมต่อหรือสามารถสื่อสารกันได้ผ่านทาง SWIG Wrapper จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงระบบปฏิบัติการลินุกซ์เบื้องต้นซึ่งผู้ใช้งานจะต้องเรียนรู้ถึงโครงสร้างของระบบไฟล์และสิทธิ์ในการเข้าใช้งานโปรแกรมต่าง ๆ ในระบบปฏิบัติการ หลังจาก que ผู้ใช้งานได้รับความรู้จากเนื้อหาในบทนี้ ผู้ใช้งานจะสามารถเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการทางานตลอดจนทิศ-ทางการไหลของสัญญาณเมื่อมีการใช้งานเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

## บทที่ 4 การสร้างชุดทดสอบและผลการทดลอง

### 4.1 กล่าวนำ

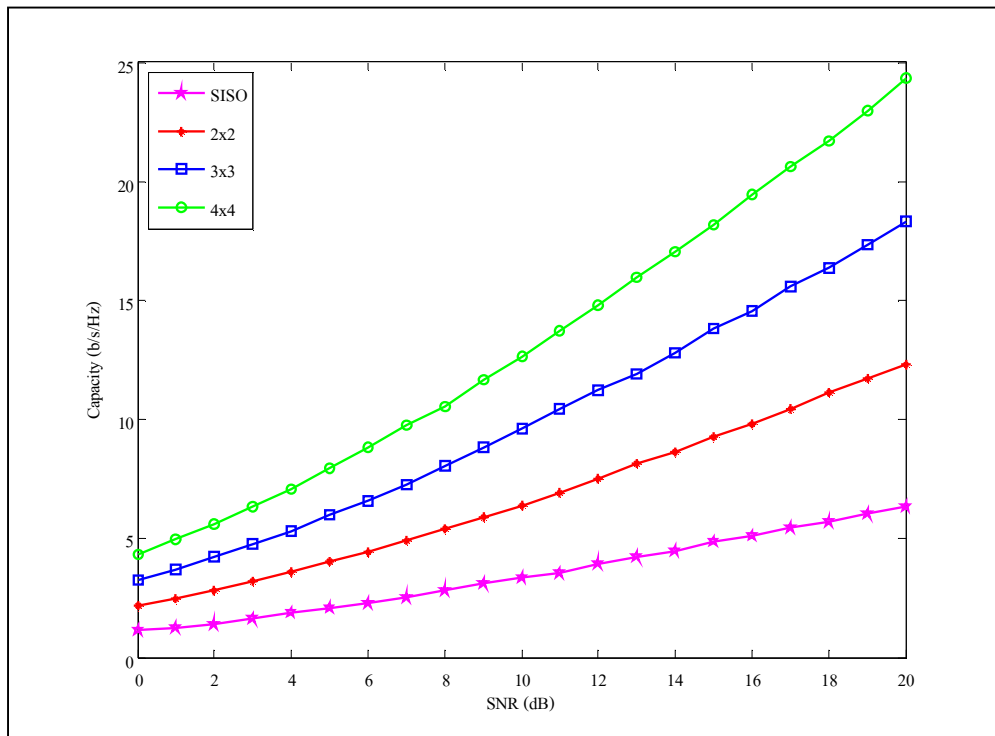
เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการจำลองแบบและผลที่ได้จากการจำลองแบบการรับส่งข้อมูล สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกล โดยมีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร อาทิเช่น อัตราความผิดพลาดบิต ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือ Throughput เทียบกับค่าความแรงของสัญญาณต่อค่าความแรงของสัญญาณรบกวน (SNR) โดยอันดับแรกจะเป็นการเปรียบเทียบการรับส่งข้อมูล โดยไม่มีการใช้เทคนิคโมโม่จากนั้นจะเป็นการจำลองแบบโดยมีการนำเทคนิคโมโม่ที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาใช้งาน และทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการใช้เทคนิคโมโม่กับระบบที่ไม่มีการใช้เทคนิคโมโม่ว่าระบบไหนให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่ากันผ่านทางโปรแกรม MATLABจากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบ การออกแบบการทดลอง ผลที่ได้จากชุดทดสอบ ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมที่ไม่มีการใช้เทคนิคโมโม่เข้ามาช่วยกับระบบที่มีการนำเทคนิคโมโม่ที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยว่าระบบใดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากัน ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลทั้งผลจากการจำลองแบบและผลที่ได้จากชุดทดสอบพร้อมทั้งสรุปผลที่ได้รับจากการศึกษาและออกแบบระบบต่อไป

### 4.2 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

การจำลองแบบระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นมีปัจจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลัก ๆ ได้แก่ ช่องสัญญาณไร้สาย มาตรฐานที่ใช้ การกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง เป็นต้น ซึ่งในการจำลองแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.2.1 การจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณโมโม

จากทฤษฎีของระบบโมโมที่มีอยู่ว่า หากทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจะทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับจำนวนสายอากาศ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อพิสูจน์ทฤษฎีในการจำลองแบบนั้นผู้วิจัยได้จำลองผลจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและภาคส่งผ่านช่องสัญญาณไร้สายแบบโรเซียน ซึ่งมีการจำลองแบบเปรียบเทียบกัน 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่เพิ่มสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่ง และภาครับจำนวน 2 3 และ 4 ต้น ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความจุของช่องสัญญาณกับค่าความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อศึกษาถึงผลจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ระบบว่าทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ผลการจำลองแบบความจุของช่องสัญญาณเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับ

จากรูปเส้นที่มีสัญลักษณ์เครื่องหมายดาวแสดงความจุของช่องสัญญาณสำหรับระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่ง 1 ต้น และที่ภาครับจำนวน 1 ต้น จากนั้นเส้นที่มีเครื่องหมายบวกแสดงถึงค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจำนวน 2 ต้น พบว่าค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าระบบเดิม เส้นที่มีเครื่องหมายสี่เหลี่ยมแสดงค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและภาคส่งอย่างละ 3 ต้น ส่วนเส้นที่มีเครื่องหมายวงกลมแสดงถึงค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับจำนวน 4 ต้น พบว่าผลการทดสอบได้ยืนยันว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศให้กับภาคส่งและภาครับจะทำให้ระบบมีความจุของช่องสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นกว่าระบบเดิม

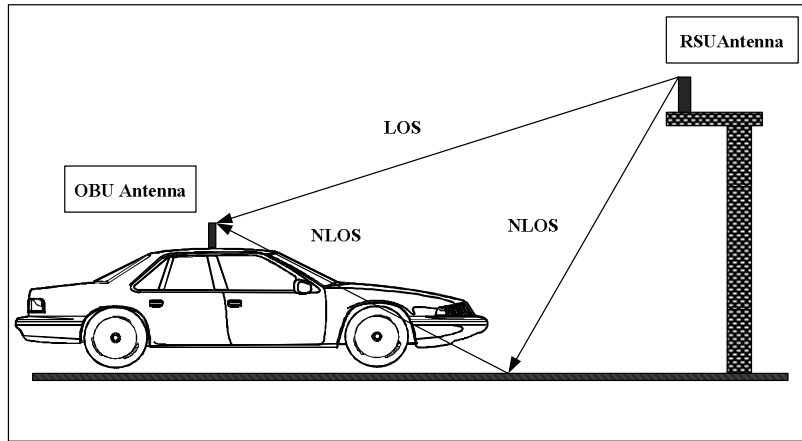
เมื่อทำการจำลองแบบเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ทำให้สามารถรับรองได้ว่าเมื่อเพิ่มสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับแล้วจะสามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้เนื่องจากความจุของช่องสัญญาณที่มากขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณมากปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ก็จะต้องมากขึ้นด้วย อีกทั้งยังสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงได้อีกด้วย

#### 4.2.2 การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยใช้มาตรฐาน 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) จะติดตั้งอยู่ในตัวยานพาหนะและติดตั้งสายอากาศไว้ที่หลังคายานพาหนะ เมื่อ RSU ส่งสัญญาณออกมาพบว่าสัญญาณในแนวตรงจะเดินทางไปยังสายอากาศของ OBU และสัญญาณอีกส่วนหนึ่งจะเดินทางไปกระทบกับพื้นถนนและสะท้อนขึ้นไปยังสายอากาศของ OBU ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายแบบโรเซียนที่มีสัญญาณในแนวตรงและสัญญาณในแนว NLOS ที่เด่นชัด แบบจำลองช่องสัญญาณไร้สายแบบโรเซียนดังสมการที่ 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 ของญี่ปุ่นได้ออกแบบมาสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยเป็นมาตรฐานที่กำหนดคุณลักษณะดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 คุณลักษณะของมาตรฐาน 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

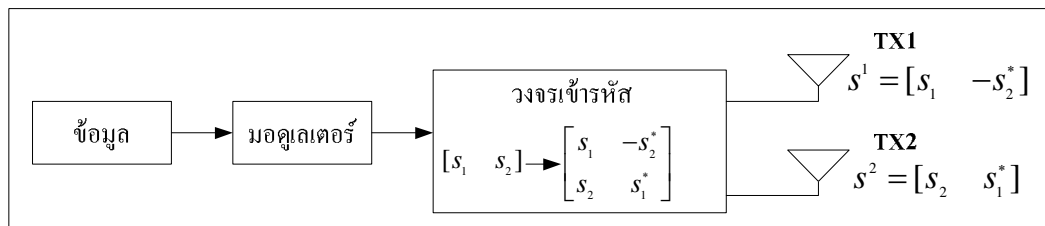
## 3) การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก

ในการจำลองแบบมีการใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยรูปแบบที่เป็นที่นิยมใช้กันได้แก่ การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกในรูปแบบของ Alamouti เมื่อแหล่งกำเนิดข้อมูลสร้างสัญลักษณ์ข้อมูลส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ ครั้งละ 2 สัญลักษณ์ จากนั้นสัญลักษณ์ทั้ง 2 จะถูกส่งเข้าสู่ผู้ส่งการเข้ารหัสและถูกส่งผ่านไป

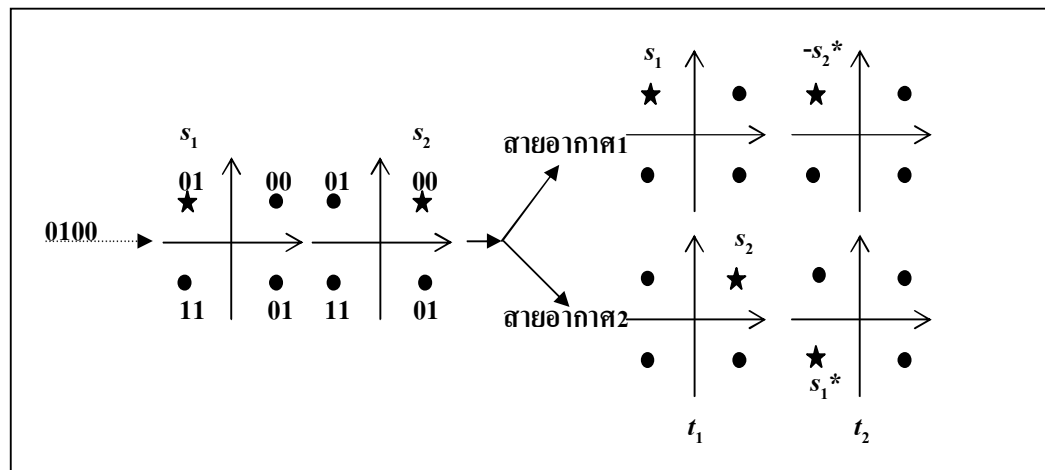
ยังสายอากาศส่งเพื่อส่งออกอากาศไปยังภาครับ การส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หรือสัญญาณหนึ่งบล็อกจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาที่มีความต่อเนื่องกัน สมการที่ 4-2 แสดงรูปเมตริกซ์ของรูปแบบการส่งสัญญาณ โดยเมตริกซ์แถวจะแสดงตำแหน่งหรือสายอากาศที่จะส่ง ส่วนเมตริกซ์หลักจะแสดงเวลา ในช่วงเวลาที่  $t$  สัญญาณที่ถูกส่งออกไปได้แก่  $s_1$  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 โครงสร้างของแบบจำลองภาคส่งสำหรับระบบโมโม



รูปที่ 4-4 การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาของ Alamouti ด้วยการมอดูเลตแบบ QPSK



กระบวนการถอดรหัสสัญญาณอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  มีค่าคงที่ นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นแรกไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,1}$  และรวมถึงสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งต้นที่สองไปยังสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  หรือ  $h_{j,2}$  จะต้องเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} h_{j,1} &= h_{j,1}(t) = h_{j,1}(t+T) = h_{j,1}(t_1) = h_{j,1}(t_2) \\ h_{j,2} &= h_{j,2}(t) = h_{j,2}(t+T) = h_{j,2}(t_1) = h_{j,2}(t_2) \end{aligned} \quad (4-3)$$

สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  ของสองช่วงเวลาคือ  $r_j^1$  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) องค์กรประกอบ additive white gaussian noise (AWGN) ถูกเพิ่มลงไปทีสายอากาศภาครับลำดับที่  $j$  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

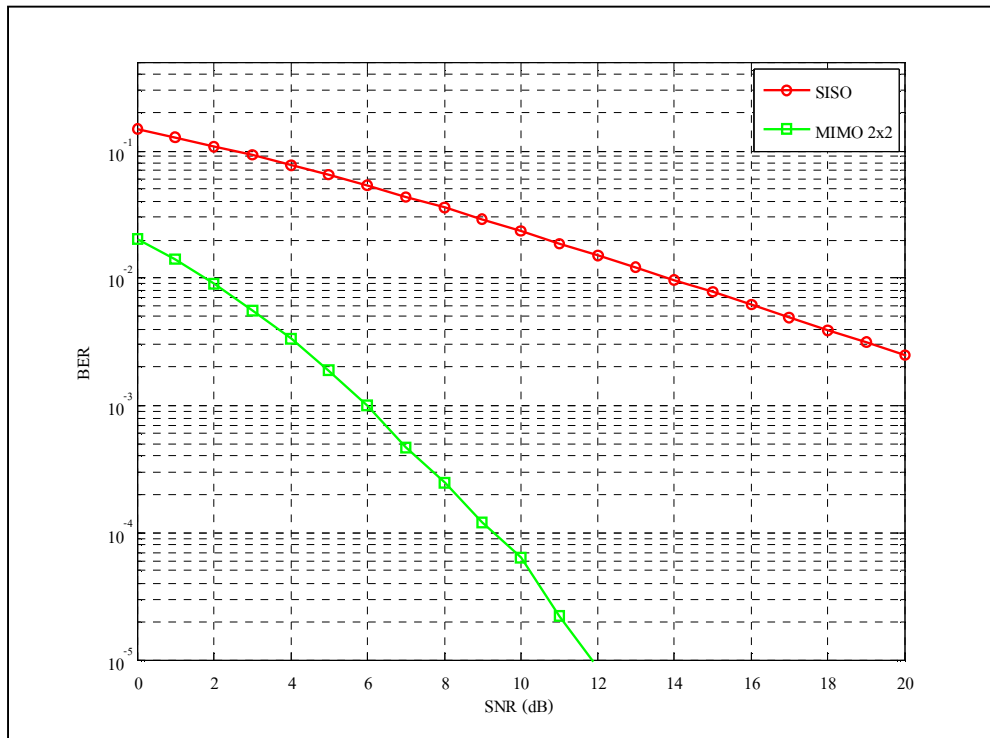
$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot r_j^1 + h_{j,2} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_1 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,1}^* \cdot n_j^1 + h_{j,2} \cdot (n_j^2)^* \right\} \\ \bar{S}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot r_j^1 - h_{j,1} \cdot (r_j^2)^* \right\} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 \cdot s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ h_{j,2}^* \cdot n_j^1 - h_{j,1} \cdot (n_j^2)^* \right\} \end{aligned} \quad (4-5)$$

#### 4) ผลที่ได้จากการจำลองแบบ

ผลที่ได้จากการจำลองแบบนั้นจะแยกออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะที่ 1 จะเป็นผลที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลโดยที่ช่องสัญญาณไม่มีผลเนื่องจากความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง ลักษณะที่ 2 จะเป็นผลที่ได้จากช่องสัญญาณที่มีความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง

ลักษณะที่ 1 เมื่อช่องสัญญาณไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความเร็ว

ผลการจำลองแบบในลักษณะนี้จะไม่มีผลเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะซึ่งอยู่ในรูปความถี่คอปเพลอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการจำลองผลนั้นจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ ไร้สายที่มีคุณลักษณะการกระจายตัวแบบไรเซียนดังสมการที่ 4-1 จากรูปที่ 4-5 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราค่าความแรงของสัญญาณเทียบกับความแรงของสัญญาณรบกวนของระบบเดิมและระบบโมโมที่มีการใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้เทคนิคโมโมเข้ามาช่วย จะส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตลดลงเมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ใช้สายอากาศในการรับส่งข้อมูลเพียงต้นเดียว



รูปที่ 4-5 แสดงอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโม

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 จะได้ว่ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วย

ความเร็ว  $(60 \times \frac{5}{18}) \text{m/s}$  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

$$g_n = \sum_{k=1}^K a_k \sin c \left[ \frac{\tau_k}{T_s} - n \right], -N_1 \leq n \leq N_2 \quad (4-5)$$

จากสมการที่ 4-5 สามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$T_s$  คือ ช่วงเวลาของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกสร้างเข้ามาในช่องสัญญาณ

$\{\tau_k\}$  คือ เซ็ตของ path delay เมื่อ  $1 \leq k \leq K$

$K$  คือ จำนวนของสัญญาณหลายวิถีที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ

$\{a_k\}$  คือ เซ็ตของ 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  $a_k$  เมื่อพิจารณาช่องสัญญาณแบบไร้เขียนที่มีค่า  $K=3.1623$  สามารถหาได้จากสมการที่ 4-6

$$a_k = \sqrt{\Omega_k} \left[ \frac{z_k}{\sqrt{k_{r,k} + 1}} + \sqrt{\frac{k_{r,k}}{k_{r,k} + 1}} e^{j(2\pi f_{d,LOS} + \theta_{LOS,k})} \right] \quad (4-6)$$

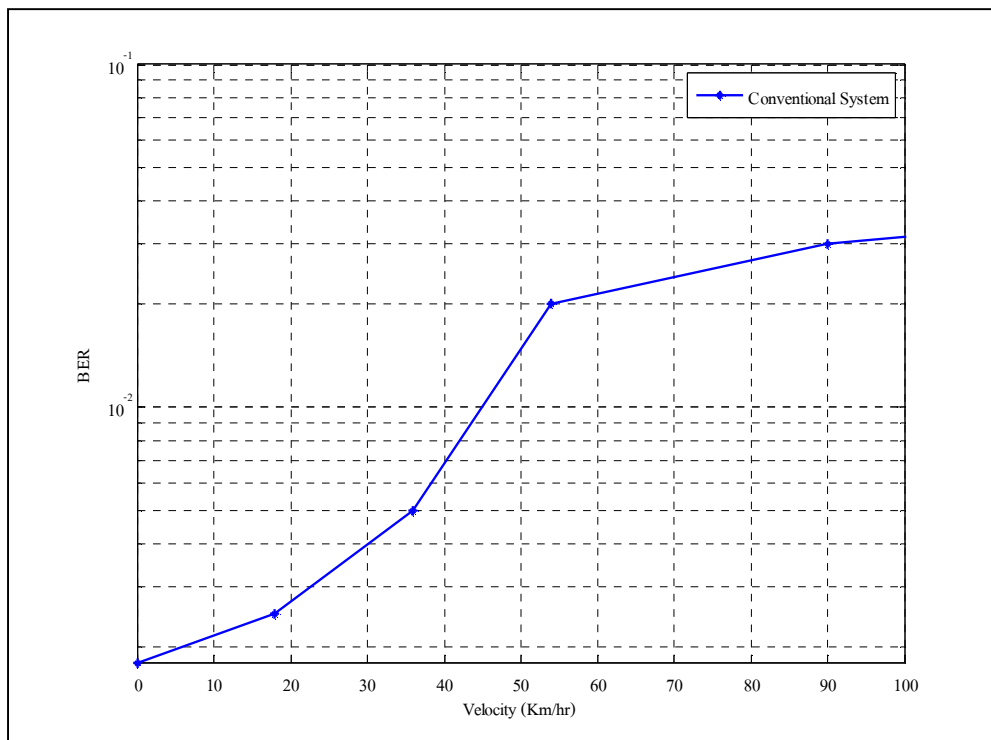
$k_{r,k}$  คือ ค่าไรเซชันแฟคเตอร์

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

$\theta_{LOS,k}$  คือ มุมเฟสของสัญญาณในแนววิถีตรง

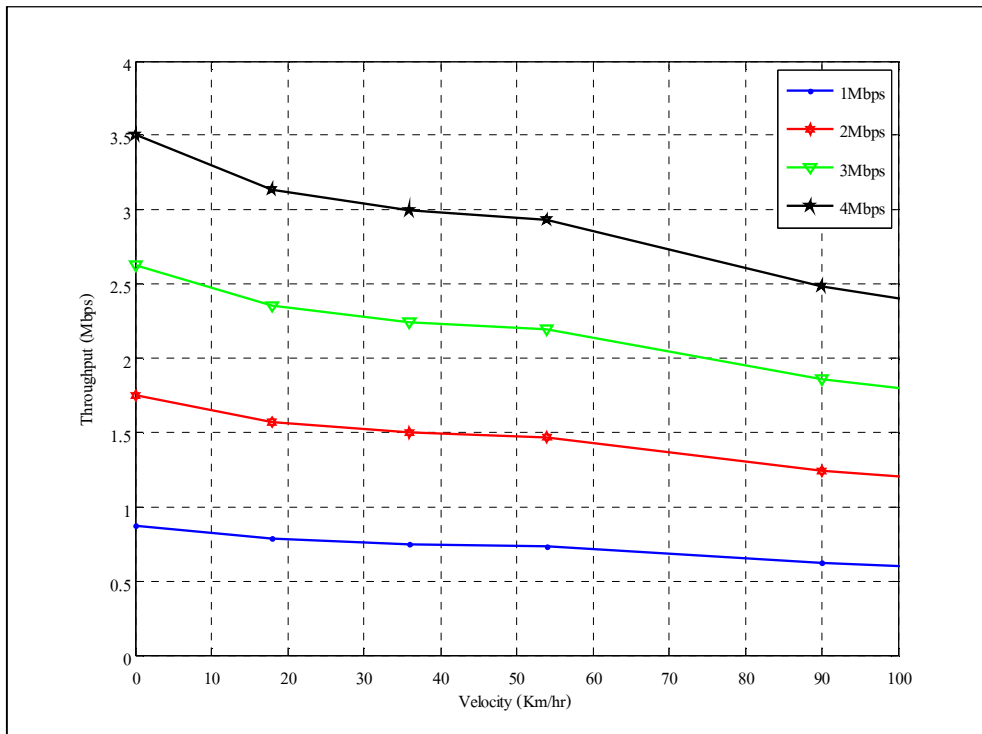
ในการจำลองแบบนั้นกำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและทำการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ข้างทาง ที่โครงสร้างของระบบประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ข้างทาง 1 ชุด และชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ 1 ชุด รับส่งข้อมูลภายใต้สภาพการจราจรที่มียานพาหนะ 1 คัน เคลื่อนที่บนถนนที่มี 2 ช่องจราจร ซึ่งมีโครงสร้างของระบบเป็นดังรูปที่ 4-2 และในการเก็บข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลค่าอัตราความผิดพลาดบิต ณ จุดที่อัตราความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 10 dB โดย

เปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของยานพาหนะไปเรื่อย ๆ จนถึง 100 km/h ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่ภาครับภาคส่ง  
 ข อ ง ร ะ บ บ ข น ส ึ่ง อ ัจ ฉ ริ ย ะ (Ikawa, M., 2004); (Stege, M., 2002)  
 มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ตำแหน่งของค่าความแรงของสัญญาณต่อความแรงของสัญญาณรบกวน  
 เท่ากับ 10 dB อยู่ที่  $10^{-3}$  เช่น ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ สามารถรับส่งข้อมูลกันได้โดยการรับส่งข้อมูล  
 นั้นมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ARIB STD-T75 จะได้ผลดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะ

พิจารณารูปที่ 4-6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของ  
 ยานพาหนะ จากกราฟพบว่าหากยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราความผิดพลาด  
 บิตมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อทำการพิจารณาที่พารามิเตอร์ของปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา  
 หรือ Throughput พบว่าเมื่อความเร็วของยานพาหนะมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่ง  
 หน่วยเวลามีค่าลดลง เนื่องจากได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและผลกระทบ  
 เนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

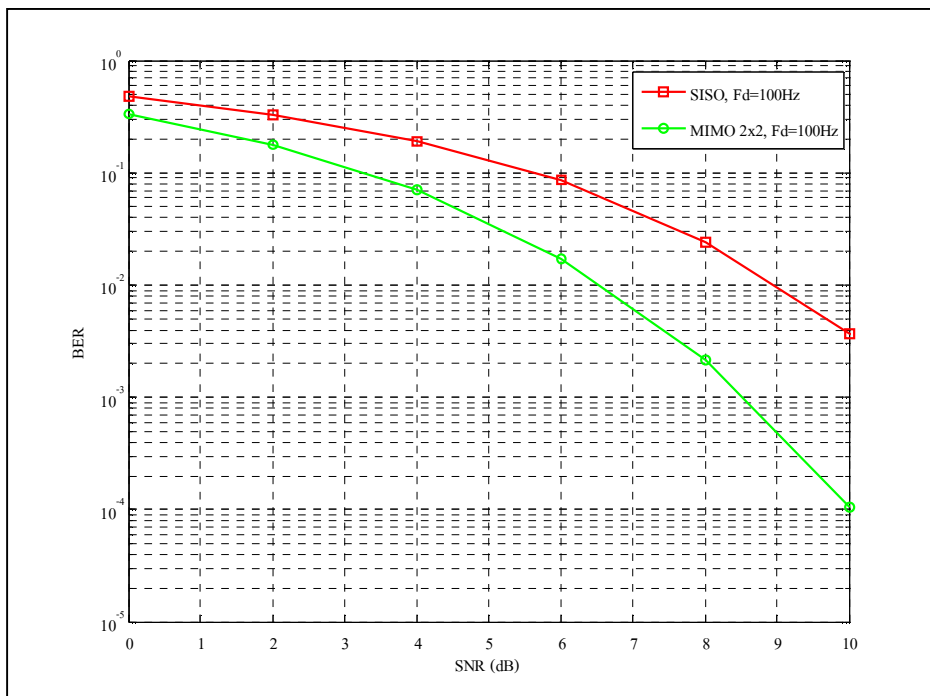


รูปที่ 4-7 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของยานพาหนะกับ Throughput

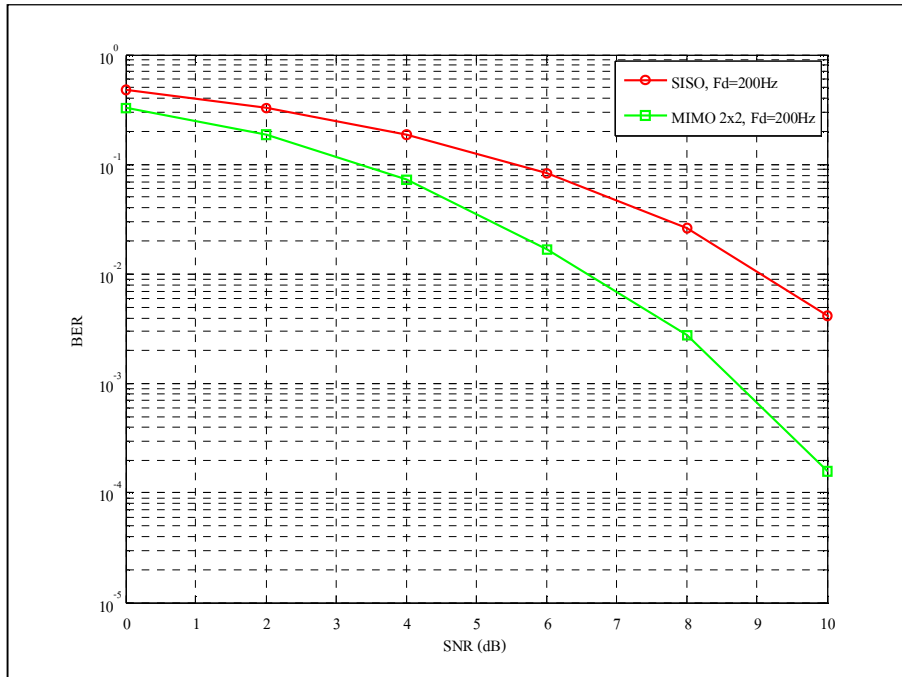
ผลที่ได้เมื่อพิจารณาปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาของระบบพบว่าตั้งแต่ 1 Mbps จนถึง 4 Mbps นั้นมีปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาดลดลงเมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น หลังจากที่ได้ทำการจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะในรูปของความถี่คอปเพลอร์ที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณ สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ความถี่คอปเพลอร์เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่คอปเพลอร์เพิ่มขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณไร้สาย หากความเร็วของยานพาหนะมีค่ามากก็จะทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านไป ด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของช่องสัญญาณก่อให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับ หลังจากที่ได้ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม (Tarokh, V., 1999) พบว่าเทคนิคโมมีข้อดีจากการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาคส่งและภาครับแล้วส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น มีอัตราเร็วของข้อมูลที่สูงขึ้น มีการใช้จุดเด่นจากความหลากหลายของช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลหรือ Transmit Diversity กับความหลากหลายของช่องสัญญาณในการรับข้อมูล หรือ Receive Diversity เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ

ภาคส่ง และ ภาครับ ทำให้ ประสิทธิภาพ ของ ระบบ สื่อสาร มี คุณภาพ ที่ดี ขึ้น เมื่อพิจารณาไปถึงความหลากหลายของช่องสัญญาณที่ภาคส่งพบว่าเทคนิคที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับใช้คือการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการต่อสู้กับปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (Shan, C., 2004)

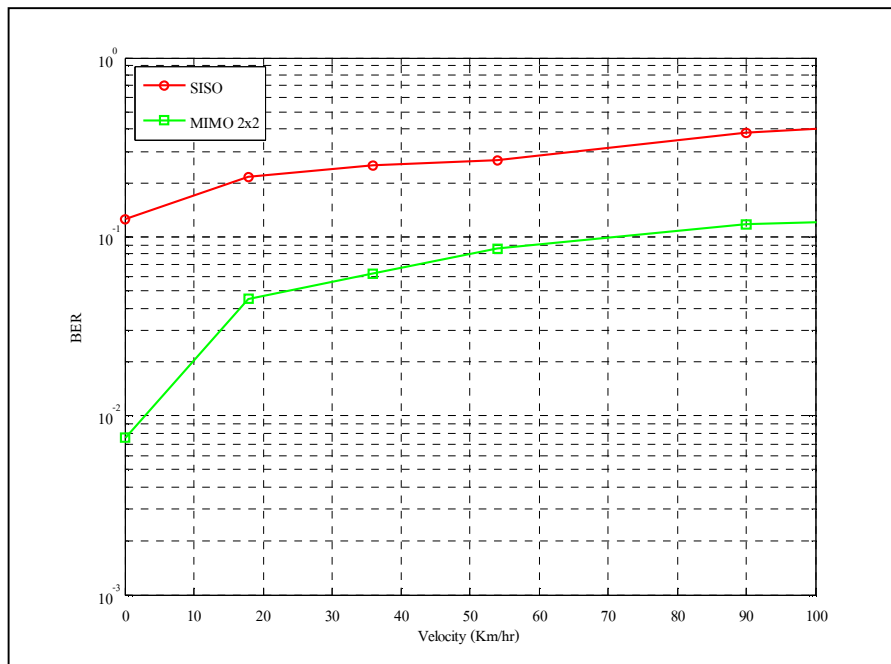
ในการจำลองแบบนี้ได้เลือกใช้การเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก โดยใช้รูปแบบการเข้ารหัสแบบ Alamouti การรับส่งข้อมูลอ้างอิงตามมาตรฐาน ARIB STD-T75 และมีรูปแบบในการจำลองแบบเช่นเดียวกับระบบเดิมที่ไม่มีการเพิ่มจำนวนสายอากาศและการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก เพื่อพิสูจน์ถึงผลที่ได้จากการจำลองแบบเมื่อมีการนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสื่อสารและนำผลที่ได้จากระบบเดิมมาเปรียบเทียบกับระบบโมโม



รูปที่ 4-8 ผลการจำลองแบบเมื่อความถี่คอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 100 Hz

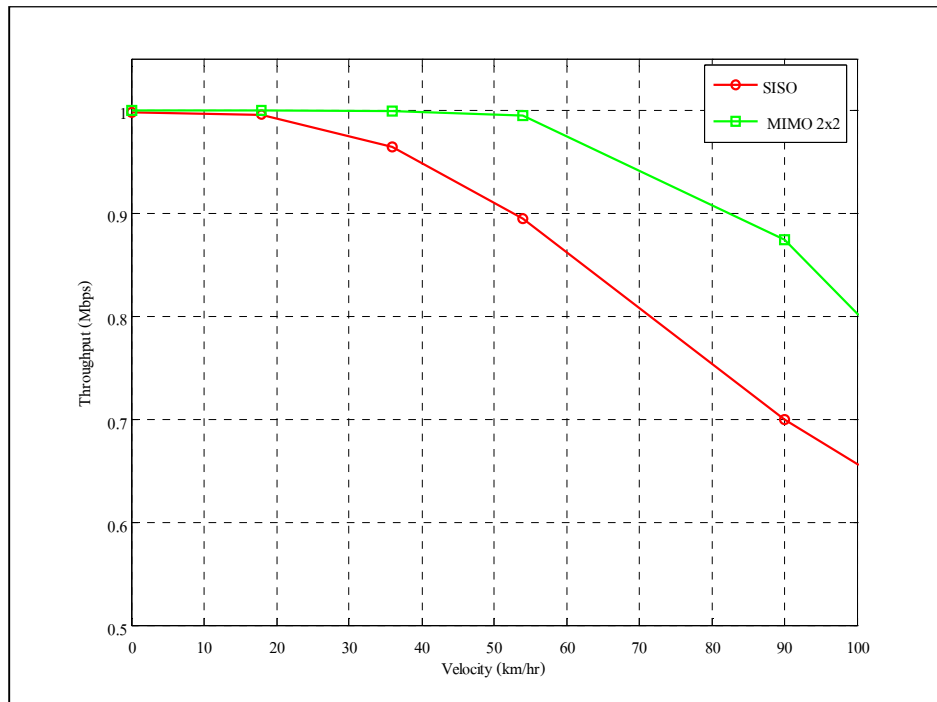


รูปที่ 4-9 ผลการจำลองแบบ เมื่อความถี่ดอปเพลอร์มีค่าเท่ากับ 200 Hz



รูปที่ 4-10 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิค โมโม





รูปที่ 4-11 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับความเร็วของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบที่มีการใช้เทคนิคโมโมสำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps

ในการจำลองแบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้เริ่มต้นจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อสรุปถึงเนื้อหา ทฤษฎี และหัวข้อต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนวิธีที่จะเข้ามาช่วยแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น หลังจากสรุปปัญหาของงานวิจัยได้แล้ว โดยระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ นั้นมีปัญหาในการรับส่งข้อมูลเนื่องจากผลกระทบของการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีที่ส่งผลกระทบไปยังช่องสัญญาณไร้สายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของช่องสัญญาณไร้สายทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล ปัญหาที่เห็นได้ชัดได้แก่ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ในขณะที่ทำการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ข้างทาง ยิ่งความเร็วของยานพาหนะมีมากขึ้น ช่องสัญญาณไร้สายก็มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลามากขึ้นส่งผลให้ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เมื่อศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวกับระบบโมโมพบว่า ระบบโมโมมีจุดเด่นหลายอย่างที่ น่าสนใจและมีความน่าจะเป็นที่จะทำให้ระบบสื่อสารแบบเดิมมีคุณภาพดีขึ้น หลังจากที่ได้ทำการจำลองแบบและนำระบบโมโมที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่ง

และเวลาเข้ามาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมนั้น จากผลการจำลองแบบสามารถยืนยันได้ว่าหากนำระบบโมโม่ที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาใช้งานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้

#### 4.2.3 การจำลองแบบในการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ โดยใช้มาตรฐาน IEEE802.11p

(WAVE-DSRC)

เนื่องจากมาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่นิยมใช้กันทั่วโลกมีอยู่ 3 ค่า ซึ่งทางด้านของญี่ปุ่น ยุโรป และอเมริกาเหนือ มาตรฐานเหล่านี้ต่างถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับการสื่อสารระหว่างภาครับและภาคส่งหรืออุปกรณ์ข้างทาง RSU กับอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งบนยานพาหนะ OBU ในการติดต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 2 มีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยความเร็ว ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อความเร็วของยานพาหนะมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ช่องสัญญาณไร้สายได้รับผลกระทบเนื่องจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี ทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลลดลง มาตรฐาน IEEE 802.11p (WAVE-DSRC) ดังตารางที่ 4-3 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับรูปแบบการสื่อสารในลักษณะดังกล่าวข้างต้น มาตรฐานดังกล่าวได้เพิ่มช่วงเวลาของสัญลักษณ์เพิ่มขึ้นจากมาตรฐานเดิมคือ IEEE802.11a เป็น 2 เท่า ด้วยการเพิ่มช่วงเวลาสัญลักษณ์นี้ส่งผลให้ระบบสามารถรองรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่กับอุปกรณ์ข้างทางได้

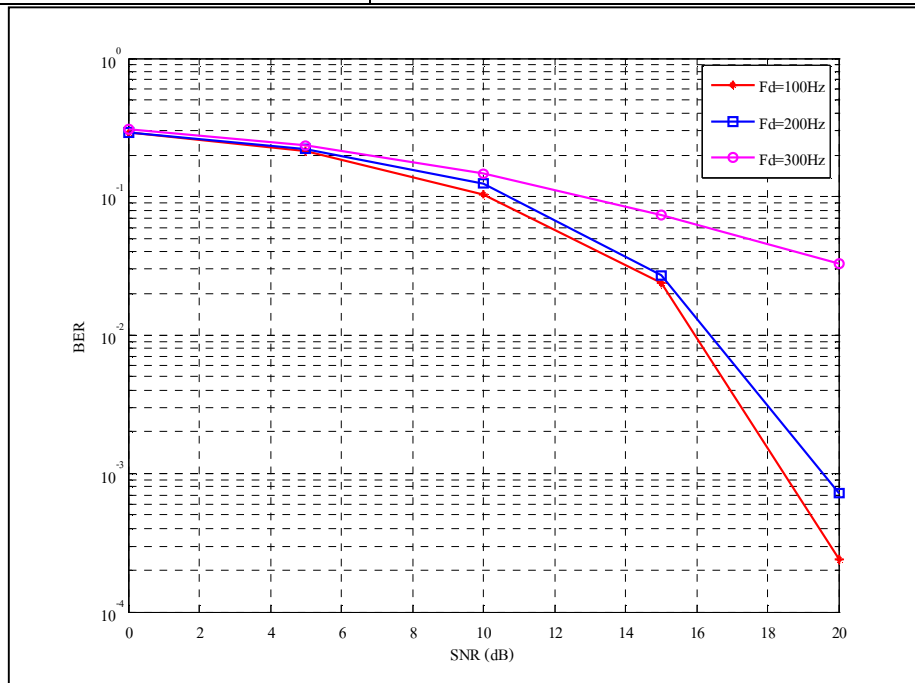
ในการจำลองแบบสำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) เป็นการจำลองแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทางในแบบ vehicle to infrastructure (V2I) โดยกำหนดให้ช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบมีการกระจายตัวแบบไรเซียน และมีการเพิ่มความเร็วของยานพาหนะ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วของยานพาหนะที่มีต่อระบบสื่อสารเทียบกับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล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

รูปที่ 4-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับอัตราส่วนค่าความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ณ ความถี่คออปเพลอร์ตั้งแต่ 100Hz 200 Hz และ 300Hz โดยในการจำลองแบบนั้นใช้คุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการกระจายตัวแบบไรเซียน ผลที่ได้จากการจำลองแบบพบว่า เมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นอัตราความผิดพลาดบิตนั้น

จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเนื่องด้วยเหตุนี้ผลกระทบจากความเร็วที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ในระหว่างการสื่อสารรับส่งข้อมูลที่อยู่ในรูปของความถี่คอปเพลอร์จึงส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสารหากมีการนำเทคนิคโมโม เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับเพียง 1 ต้น อาจจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเป็นไปในทางที่ดีขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 4-13 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ

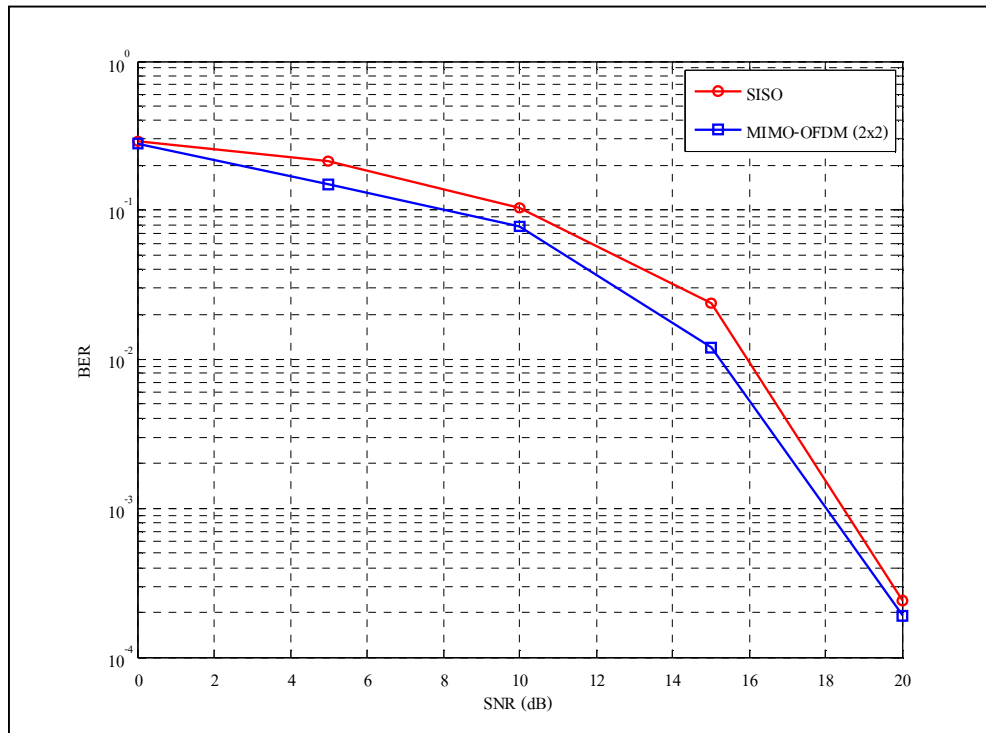
ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11p

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

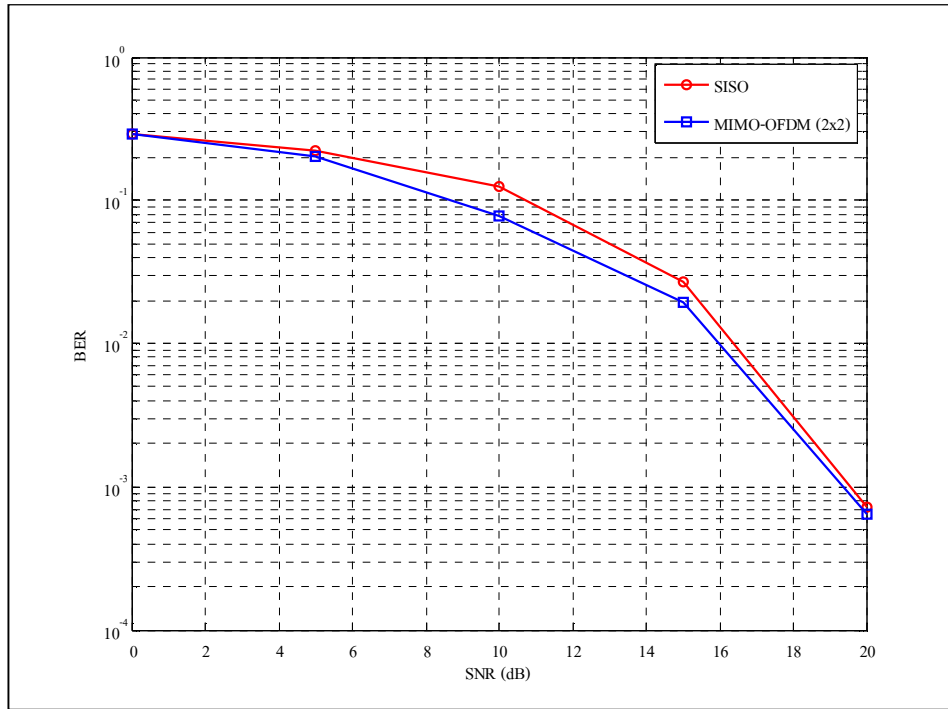


รูปที่ 4-12 ผลการจำลองแบบอัตราความผิดพลาดบิต ณ ความถี่คอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ

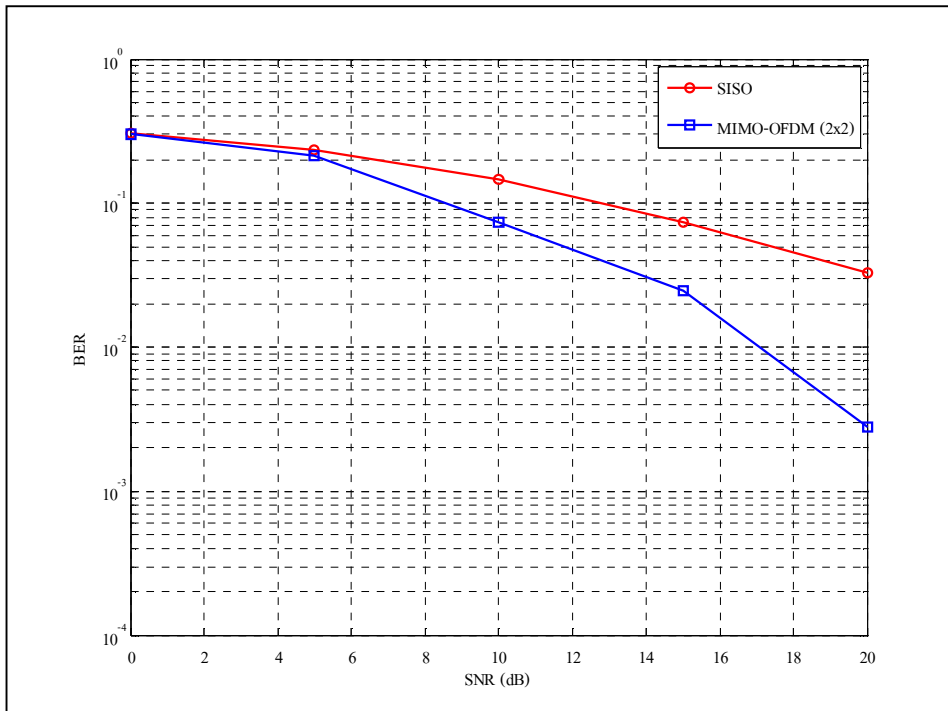
เมื่อนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาประยุกต์ใช้กับระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับด้านละ 1 ต้น พบว่า เทคนิคโมโมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ โดยจากผลการจำลองแบบ ณ ความถี่ดอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ สามารถยืนยันได้ว่าเทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบโมโมที่ไม่มีการใ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



รูปที่ 4-13 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโมที่ความถี่ดอปเพลอร์ 100 Hz



รูปที่ 4-14 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโม ที่ความถี่คอปเพลอร์ 200 Hz

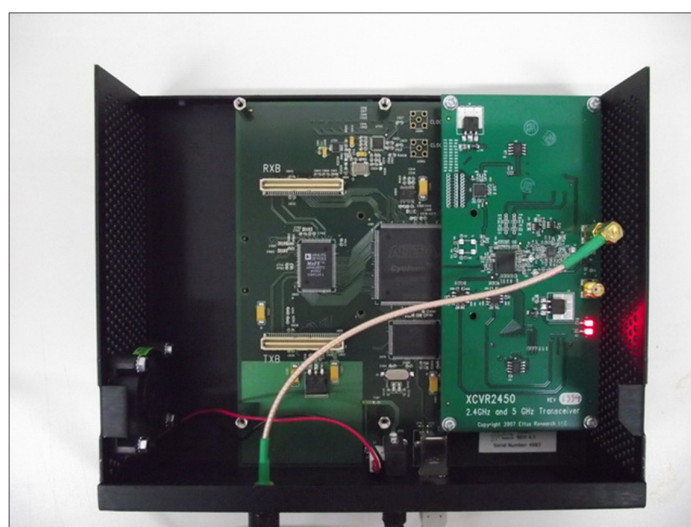


รูปที่ 4-15 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมกับระบบโมโมที่ความถี่คอปเพลอร์ 300 Hz

จากผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิตเปรียบเทียบกัน ณ ความถี่คอปเพลอร์ค่าต่าง ๆ สามารถยืนยันได้ว่าการนำระบบโมโมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสามารถทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นมาได้

### 4.3 การออกแบบชุดทดสอบและผลการทดสอบ

ในการออกแบบชุดทดสอบ การวัดผลการทดสอบ จะต้องมีการเลือกชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบที่สอดคล้องกับทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่ได้ศึกษา ชุดอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้เป็นชุดอุปกรณ์ที่มีขีดความสามารถในการทำงานที่ดี มีข้อดีหลาย ๆ ด้านที่น่าสนใจ อาทิเช่น ซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลเป็นซอฟต์แวร์แบบโอเพ่นซอส ซึ่งทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu ที่เป็นระบบปฏิบัติการที่ไม่มีลิขสิทธิ์ ชุดอุปกรณ์ที่ให้มานั้นมีทั้งชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณแบบแบนด์หรือ FPGA ที่มีขีดความสามารถสูง อีกทั้งยังให้ชุดอุปกรณ์ความถี่วิทยุมาพร้อมกันด้วยหรือที่เรียกว่า daughter board ที่สำคัญชุดอุปกรณ์ชุดนี้รองรับการทำงานด้วยระบบโมโม โดยชุดอุปกรณ์ 1 ชุดสามารถเชื่อมต่อกับ daughter board ได้ 2 ตัว เชื่อมต่อกับสายอากาศได้ 2 ต้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ผู้ใช้สามารถออกแบบระบบให้สามารถทำงานเป็นระบบโมโมแบบ 2x2 ที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่ง 2 ต้น และที่ภาครับ 2 ต้น ได้ รูปที่ 4-16 และ 4-17 แสดงถึงชุดอุปกรณ์ที่เลือกใช้



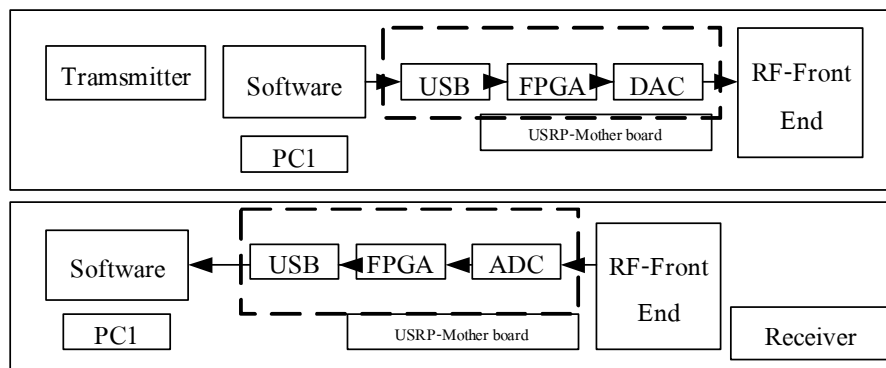
รูปที่ 4-16 ชุดอุปกรณ์ภาคส่ง



รูปที่ 4-17 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานแบบไมโม

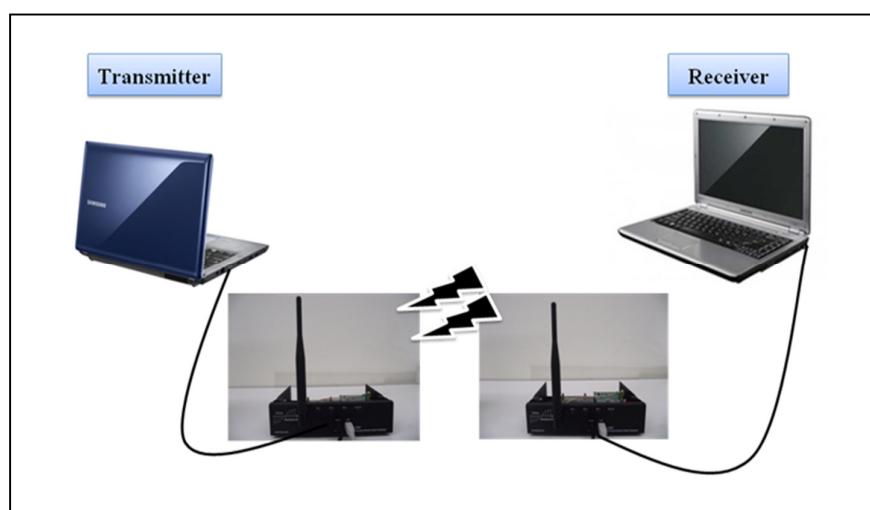
#### 4.3.1 การออกแบบชุดทดสอบ

การออกแบบระบบสื่อสารสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะที่มีการใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ ส่วนประกอบของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-18 ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบของระบบทั้งภาคส่งและภาครับ และรูปที่ 4-19 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างชุดอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุม



รูปที่ 4-18 บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบทั้งภาคส่งและภาครับ

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



รูปที่ 4-19 การเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์

เมื่อสัญญาณเดินทางมายังภาครับ ที่ประกอบไปด้วยตัวบอร์ด USRP ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB 2.0 สัญญาณที่รับมาจะถูกแปลงจากความถี่วิทยุให้เป็นความถี่กลางและทำ



การแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งข้อมูลไปยัง FPGA เพื่อประมวลผลข้อมูลก่อนส่งไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมเก็บข้อมูลที่ได้อีกวิเคราะห์ต่อไป

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

##### 1. ภาคส่ง

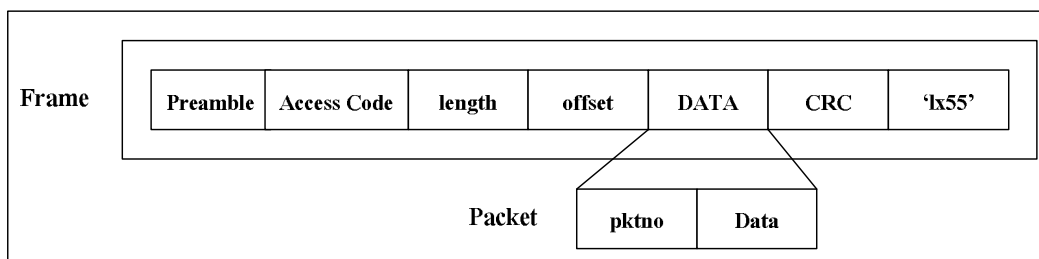
การออกแบบชุดทดสอบตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) ทางผู้วิจัยได้นำตัวอย่างโปรแกรมชื่อ `benchmark_ofdm_tx.py` ที่อยู่ในไฟล์ `/usr/share/gnuradio/example/digital/ofdm` มาทำการปรับปรุงเพื่อให้เข้ากับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) ซึ่งในการส่งข้อมูลนั้นมีพารามิเตอร์ที่สำคัญมากอยู่ 1 ตัวคือ ค่าอัตราการส่งข้อมูลของภาคส่งซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากเพราะหากมีค่าไม่เท่ากับภาครับจะทำให้ที่ภาครับไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ ซึ่งอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสามารถแสดงดังสมการที่ 4-7

$$Tx\_bitrate = \frac{Dr}{Ipr} \quad (4-7)$$

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

$Ipr$  คือ พารามิเตอร์ที่ใช้บอกอินเตอร์โพลเตอร์ของ FPGA ในการอินเตอร์โพลสัญญาณด้วยค่าที่เรา กำหนดโดยมีค่าอยู่ระหว่าง [4-512]

##### 2. โครงสร้างเฟรมข้อมูล



รูปที่ 4-20 โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ภาคส่ง

เฟรมข้อมูลที่ถูกขึ้นมาที่ภาคส่งเพื่อทำการส่งออกอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-20 สามารถสร้างเฟรมข้อมูลได้จากผู้ใช้งานโดยตรงหรือสามารถสร้างเฟรมข้อมูลได้ในตัวโปรแกรม ซึ่งโครงสร้างเฟรมมีส่วนที่สำคัญนั่นคือแพ็กเกจข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังภาครับประกอบไปด้วย Pktno คือ เลขประจำตัวแพ็กเกจ หรือ packet number มีขนาด 2 ไบต์ และ Data คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

ขนาดแพ็กเกจข้อมูล (pkt\_size) คือ 1500 ไบต์ ซึ่ง 2 ไบต์แสดงเลขของแพ็กเกจ ดังนั้นในแต่ละเฟรมจะบรรจุข้อมูลที่มีขนาด pkt\_size - 2 ซึ่งในแต่ละเฟรมนั้นจะมีส่วนที่แสดงจุดสิ้นสุดของเฟรมนั้นคือ 0x55 เมื่อภาครับตรวจเจอตัวเลขชุดนี้ก็จะหยุดรับข้อมูลทันที และในส่วนที่แสดงให้ภาครับรับรู้ว่าภาคส่งเริ่มส่งเฟรมข้อมูลมาใหม่นั้นคือ preamble รูปที่ 4-21 แสดงถึง โปรแกรมในการสร้างเฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง ฟังก์ชัน struct มีหน้าที่ในการสร้างแพ็กเกจตามรูปที่ 4-21 struct.pack() มีหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่ถูกสร้างออกมาให้อยู่ในรูปของแพ็กเกจข้อมูลและ struct.unpack() มีหน้าที่ในการถอดข้อมูลออกจากแพ็กเกจข้อมูลซึ่งจะมีการใช้งานฟังก์ชันนี้ที่ภาครับ

```
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

## 2. ภาครับ

สำหรับ โปรแกรมที่ใช้ในภาครับเป็นการนำโปรแกรม benchmark\_ofdm\_rx.py ที่อยู่ใน /usr/share/gnuradio/example/digital/ofdm มาพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) โดยที่ภาครับนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจข้อมูลที่ได้รับ โดยโดยวิธี Cyclic Redundancy Check โดยทำการตรวจสอบหมายเลขแพ็กเกจหากมีหมายเลขแพ็กเกจที่ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับก็จะนับแพ็กเกจนั้นเป็นแพ็กเกจที่ถูกต้อง รูปที่ 4-22 แสดงโครงสร้างของส่วนที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจที่ภาครับ หากแพ็กเกจที่ได้รับได้ที่ภาครับมีความถูกต้องจะแสดงสถานะใน command line คือ True หากแพ็กเกจที่ได้รับได้มีความผิดพลาดและเลขแพ็กเกจไม่ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับสถานะในcommand 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

ในส่วนของภาครับมีพารามิเตอร์ที่สำคัญเหมือนกันกับภาคส่งนั่นคืออัตราการรับข้อมูลเข้ามาประมวลผล หากมีค่าไม่ตรงกันกับอัตราการส่งข้อมูลออกมาจากภาคส่ง จะทำให้ไม่สามารถรับแพ็กเกจข้อมูลที่ภาครับได้เลย สมการที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ในการหาอัตราเร็วในการรับข้อมูลที่ภาครับ

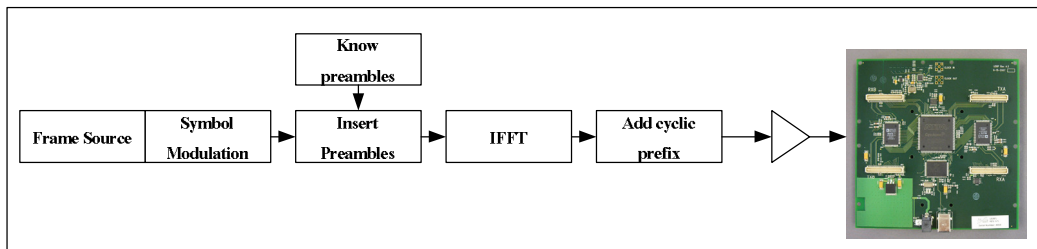
$$Rx\_bitrate = \frac{Ar}{Dcr} \quad (4-8)$$

เมื่อ  $Ar$  คือ อัตราการแซมปลิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกซึ่งมีค่าเท่ากับ 128 MS/sec.

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

#### 4.3.1.2 บล็อกไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC)

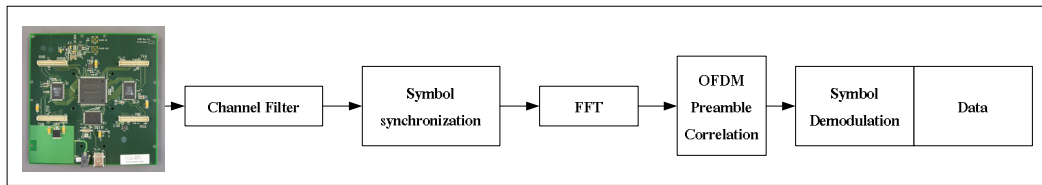
ในการออกแบบชุดอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) นี้มีการนำโปรแกรม benchmark\_ofdm\_tx.py และ benchmark\_ofdm\_rx.py มาพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐานดังกล่าวรูปที่ 4-23 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของภาคส่ง



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) จะเป็นไปตามรูปดังกล่าวมาข้างต้น

โครงสร้างของภาครับเป็นไปดังรูปที่ 4-24 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ USRP เมื่อรับสัญญาณผ่านทาง daughter board มาแล้ว สัญญาณก็จะเข้าไปสู่ตัวกรองสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะถูกถอดตัวเสริมสร้างไชคลิกและเดินทางเข้าไปสู่บล็อกในการทำ Symbol synchronization ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการใช้วิธีการ ML synchronization เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วสัญญาณจะเดินทางไปยังกระบวนการ FFT จากนั้นก็นำสัญญาณที่ได้ไปตีโมดูเลตเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4-24 โครงสร้างของภาครับสัญญาณ OFDM

ส่วนที่มีความสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือกระบวนการปรับแต่งสัญญาณที่ภาครับเพื่อให้ได้มาซึ่งช่องสัญญาณ กระบวนการนี้สามารถคำนวณได้จาก preamble เมื่อ  $x[i]$  แสดงถึงค่า preamble ที่อยู่ในแต่ละความถี่ย่อย และ  $\hat{y}[i]$  คือสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ ดังสมการที่ 4-9

$$\hat{y}[i] = y[i] \exp \left( j 2 \pi f_{\Delta} i \frac{N_{cp}}{N_{FFT}} \right) \quad (4-9)$$

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

$N_{FFT}$  คือ FFT length

ดังนั้นเมื่อภาครับรับสัญญาณได้และมีการรับรู้ Preamble ที่ถูกสร้างมาในแต่ละความถี่ย่อย ก็จะ สามารถประมาณช่องสัญญาณได้จากสมการ 4.10 และนำช่องสัญญาณที่ได้ไปใช้งานต่อไป

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

#### 4.3.1.3 วิธีการ Synchronization แบบ Van de Beek

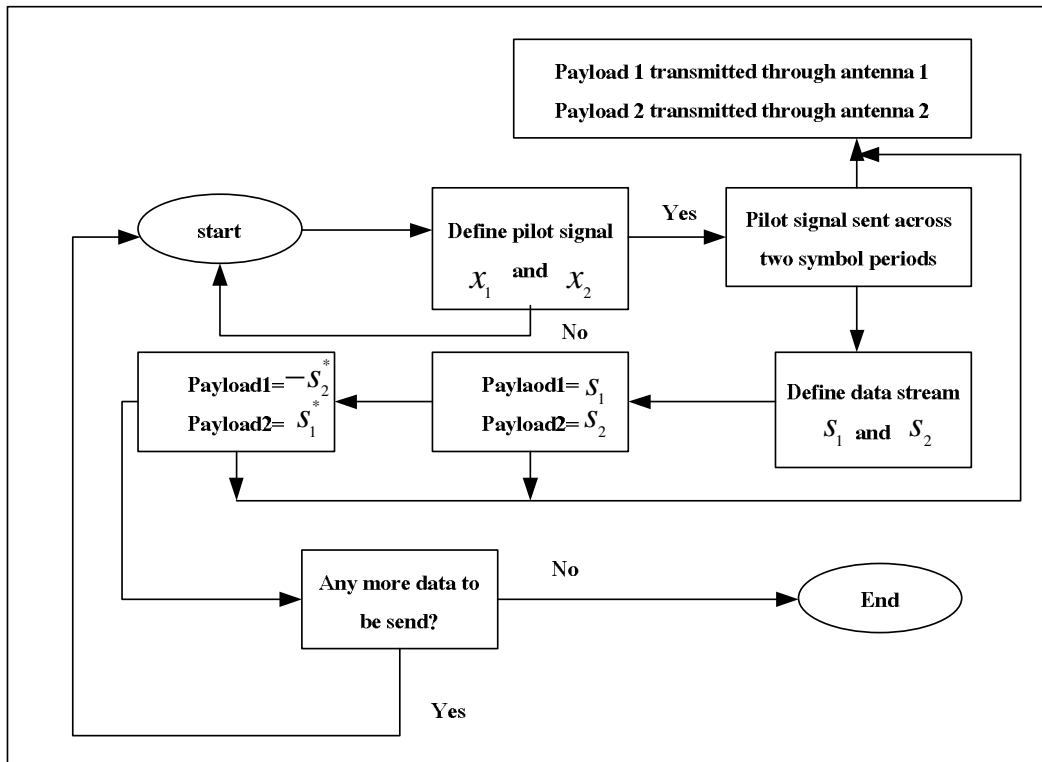
กระบวนการทำ Synchronization นี้จะเป็นการใช้ประโยชน์จาก preamble ที่ถูกสร้างขึ้นมา ซึ่งประโยชน์ของ preamble นี้สามารถใช้ในการบอกจุดเริ่มต้นของเฟรม ประมาณค่า frequency offset คำนวณและปรับปรุงช่องสัญญาณ วิธีการ synchronization หลาย ๆ วิธีต่างก็มีพื้นฐานที่ใช้ประโยชน์จาก preamble ทั้งสิ้น จุดเด่นของการทำ Synchronization แบบ Van de Beek คือการที่วิธีนี้มีการสร้างสัญญาณทางเวลาให้กับสัญญาณที่รับได้ทุก ๆ สัญญาณ มรการประมาณค่าทางความถี่ให้แก่แต่ละสัญญาณ ทำให้แต่ละสัญญาณเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งแตกต่างจากวิธีอื่นที่ทำให้แก่เฟรมทั้งเฟรมเพียงสัญญาณเดียว ทำให้ที่ภาครับมีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถรับเฟรมข้อมูลได้ทั้งเฟรมและมีความถูกต้องมากขึ้น

#### 4.3.1.4 เทคนิคโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก

ในการนำระบบโมโมที่มีการใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาเข้ามาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ 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 ในช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่สองทำให้มั่นใจว่า สัญญาณ orthogonal ถูกส่งออกไปจากสายอากาศสองต้น เนื่องจากสัญญาณนั้น orthogonal ต่อกันและกัน โอกาสที่จะเกิด correlation ระหว่างสองสัญญาณนั้นจะมีค่าลดลงตลอดการส่งสัญญาณดังตารางที่ 4-4

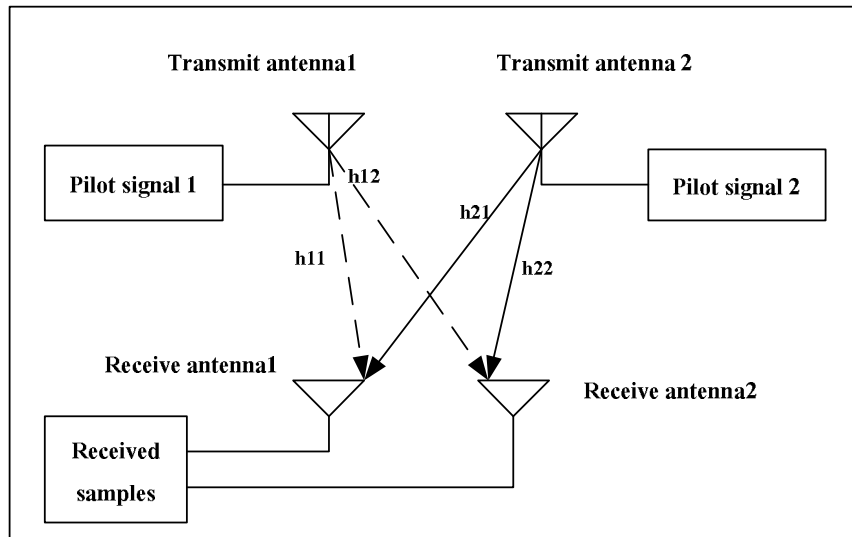
ตารางที่ 4-4 แสดงสัญลักษณ์ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ

	สายอากาศ 1	สายอากาศ 2
ช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่ 1	$s_1$	$s_2$
ช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่ 2	$-s_2^*$	$s_1^*$



รูปที่ 4-25 แผนผังโปรแกรมสำหรับภาคส่ง

ในส่วนของภาครับนั้นเมื่อมีการนำระบบโมโม่เข้ามาใช้งาน ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ช่องสัญญาณ หากภาครับไม่มีการรับรู้สภาพช่องสัญญาณก็จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าระบบเดิมที่ใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับเพียงด้านละ 1 ด้าน ฉะนั้นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบโมโม่ นั้นคือช่องสัญญาณไร้สาย จะต้องมีการคำนวณค่าช่องสัญญาณดังรายละเอียดต่อไปนี้

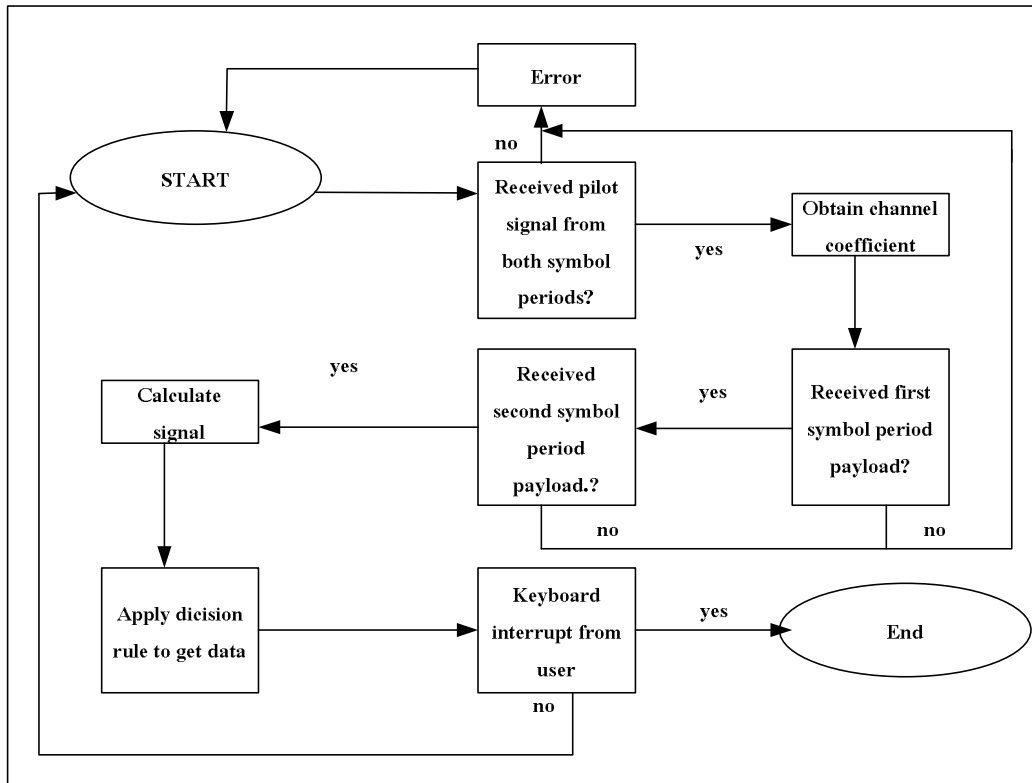


รูปที่ 4-26 ผังแสดงกระบวนการประมาณช่องสัญญาณ

กระบวนการประมาณช่องสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรก เป็นการกำหนด pilot ขึ้นมาและบอกให้ภาครับรู้ว่า pilot นั้นมีลักษณะอย่างไร จากนั้นทำการกำหนดขนาด pilot ที่ใช้ ซึ่งในที่นี้มีการใช้สายอากาศที่ภาครับจำนวน 2 คัน ดังนั้นจะต้องมีการทำการประมาณค่าช่องสัญญาณทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อให้ได้มาซึ่งสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ จากนั้นทำการส่งสัญญาณ pilot และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณและนำช่องสัญญาณที่ได้ไปใช้ต่อไป

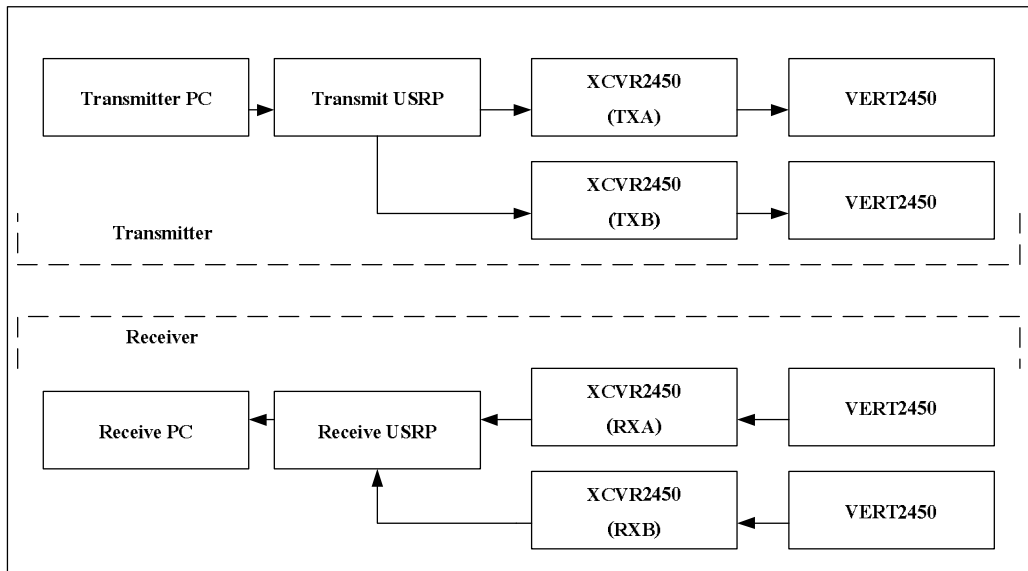
ในส่วนของภาครับมีแผนผังโปรแกรมดังรูปที่ 4-26 ซึ่งที่ภาครับนี้ก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปถอดเอาข้อมูลออกมานั้นจะต้องมีการใช้ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ได้ประมาณการไว้มาดำเนินการหาสัญญาณที่รับมา และนำไปทำการดีมอดูเลตเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของข้อมูลต่อไป





รูปที่ 4-27 แผนผังโปรแกรมในส่วนของภาครับ

หลังจากที่ได้ทราบถึงการออกแบบโปรแกรมที่ภาคส่งและภาครับแล้ว สามารถนำมาสร้างเป็น Flow graph เพื่อนำเข้าไปสู่การเขียนโปรแกรมที่สอดคล้องกับงาน ได้ดังรูปที่ 4-28



รูปที่ 4-28 แบบจำลองส่วนประกอบของระบบไมโมที่มีการใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

#### 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 (Syahreza, M., 2009) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดกับพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น

$$PER = \left( 1 - \left( \frac{n\_right}{pktno} \right) \right) \times 100\% \quad (4-11)$$

#### 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

หลังจากที่ทราบถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบและพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องแล้ว ในส่วนถัดไปจะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบชุดอุปกรณ์

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ผู้วิจัยได้เลือกออกแบบชุดทดสอบตามมาตรฐาน IEEE802.11p (WAVE-DSRC) เนื่องจากมาตรฐานดังกล่าวถูกออกแบบสำหรับการสื่อสารระยะใกล้ที่มีการนำไปใช้งานกับระบบขนส่งอัจฉริยะและมาตรฐานนี้ยังมีการเพิ่มช่วงเวลาสัญญาณ OFDM ส่งผลให้ระบบสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เคลื่อนที่ OBU กับอุปกรณ์ข้างทาง RSU ได้ดี อีกทั้งการเติมไซคลิกเข้าไปที่ภาคส่งก่อนส่งสัญญาณ OFDM นั้นทำให้สัญญาณมีความทนทานต่อปัญหาการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี

#### 4.3.3.1 การทดลองตามมาตรฐาน IEEE802.11p

ในการจัดวางชุดทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4-29 ซึ่งแสดงถึงการจัดวางชุดอุปกรณ์ทดสอบแบบเดิม (SISO) ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ข้างทาง (RSU) ถูกติดตั้งอยู่ริมทาง โดยเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมชุดอุปกรณ์ มีการนำชุดอุปกรณ์ข้างทางติดตั้งไว้ริมข้างทางบนแท่นวางความสูง 2 เมตรและชุดอุปกรณ์ติดยานพาหนะ (OBU) ติดตั้งอยู่บนหลังคายานพาหนะเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมที่ติดตั้งอยู่ในยานพาหนะและตัวบอร์ด USRP ถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะ กำหนดให้ภาคส่งคือ อุปกรณ์ข้างทาง และภาครับคืออุปกรณ์ติดยานพาหนะ โดยสภาพถนนที่ใช้ทดสอบเป็นถนน 2 ช่องจราจร สถานที่ทดสอบ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 4-29 การจัดวางชุดทดสอบ

ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างชุดอุปกรณ์ข้างทางกับชุดอุปกรณ์ติดรถ มีวัตถุประสงค์ในการหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างชุดอุปกรณ์ภาคส่งกับชุดอุปกรณ์ภาครับ และหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยการทดสอบสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและล็อกอินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่ง sudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปอยู่ที่อยู่ของโปรแกรม benchmark\_ofdm\_tx.py

- ตั้งค่าสกริปที่ภาคส่งดังต่อไปนี้

```
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
```



รูปที่ 4-30 การจัดวางอุปกรณ์ RSU

ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้

--tx-freq	คือ ค่าความถี่ที่ใช้
--m	คือ รูปแบบการมอดูเลต
--S	คือ ตั้งขนาดความยาวของแพ็คเกจ
--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



รูปที่ 4-31 การจัดวางอุปกรณ์ติดตามพาหนะ OBU

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

#### 4.3.3.2 การทดสอบระบบไมโม

ในการจัดวางชุดทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4-32 ซึ่งแสดงถึงการจัดวางชุดอุปกรณ์ทดสอบระบบไมโม ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ข้างทาง (RSU) ที่มีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ชุดอุปกรณ์ 2 ต้นถูกติดตั้งอยู่ริมทาง โดยเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมชุดอุปกรณ์ มีการนำชุดอุปกรณ์ข้างทางติดตั้งไว้ริมข้างทางบนแท่นวางความสูง 2 เมตรและชุดอุปกรณ์ติดตามพาหนะ (OBU) มีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ชุดอุปกรณ์จำนวน 2 ต้นติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมที่ติดตั้งอยู่ในยานพาหนะและตัวบอร์ด USRP ถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะ กำหนดให้ภาคส่งคือ อุปกรณ์ข้างทางและภาครับคืออุปกรณ์ติดตามพาหนะ โดยสภาพถนนที่ใช้ทดสอบเป็นถนน 2 ช่องจราจร สถานที่ทดสอบ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 4-32 การจัดวางชุดทดสอบระบบโมโม

ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างชุดอุปกรณ์ข้างทางกับชุดอุปกรณ์ติดรถ มีวัตถุประสงค์ในการหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างชุดอุปกรณ์ภาคส่งกับชุดอุปกรณ์ภาครับ และหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยการทดสอบสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและล็อกอินเข้าสู่โหมด 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 ที่

	ภาคส่งมีค่าตั้งแต่ [0-32768]
--fft-length	คือ จำนวนความถี่ย่อยทั้งหมด
--occupied-tones	คือ จำนวนความถี่ย่อยของข้อมูล
--cp-length	คือ จำนวนตัวเสริมสร้างไซคลิก
--rx-ant	คือ จำนวนสายอากาศที่ใช้ในภาครับ
--tx-ant	คือ จำนวนสายอากาศที่ใช้ในภาคส่ง



รูปที่ 4-33 การจัดวางอุปกรณ์ RSU ระบบโมโม

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





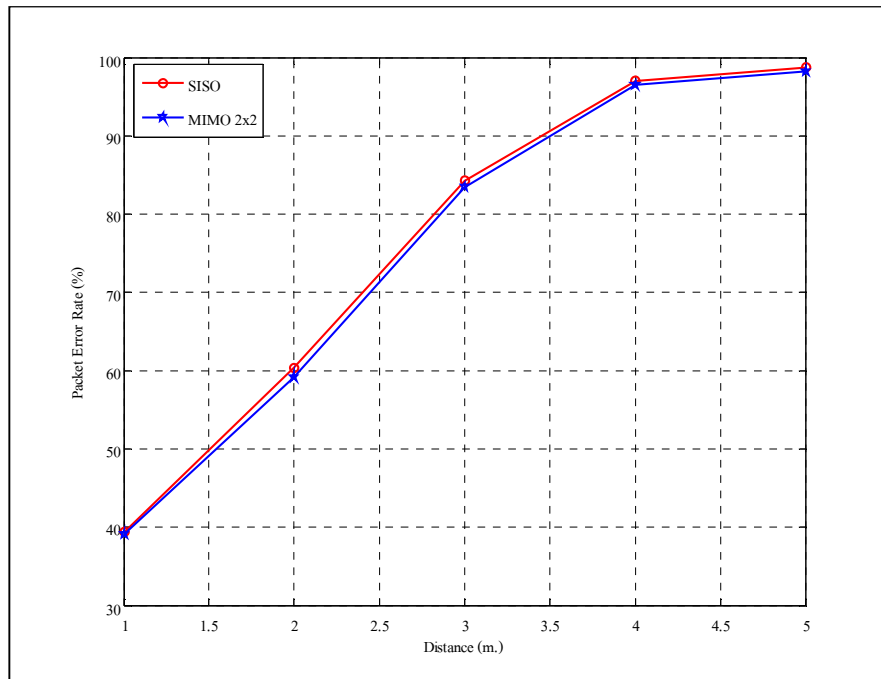
รูปที่ 4-34 การจัดวางชุดอุปกรณ์ OBU ระบบโมโม

#### 4.3.4 ผลการทดสอบ

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

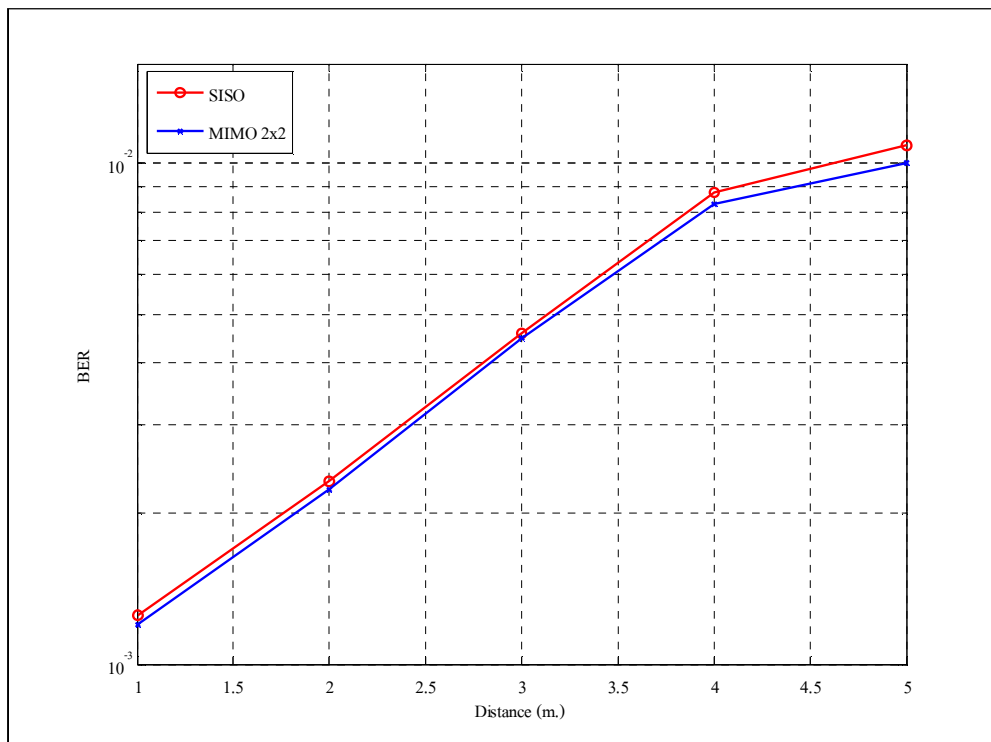
##### 4.3.4.1 ผลการทดสอบระบบ SISO และ ระบบ MIMO

จากรูปที่ 4-35 แสดงผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับโดยเส้นสีแดงแสดงอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจของระบบเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจของระบบโมโม ที่ระยะทางเท่ากับศูนย์เป็นบริเวณที่ภาคส่งหรือชุดอุปกรณ์ข้างทางถูกติดตั้งอยู่จะทำการส่งข้อมูลไปยังภาครับที่ถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ออกห่างจากภาคส่งจะส่งผลให้อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างชุดอุปกรณ์เดิมที่มีการใช้สายอากาศที่ภาคส่งและภาครับจำนวนอย่างละ 1 ต้น จะมีอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจสูงกว่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจของระบบโมโม จากผลการทดสอบสามารถยืนยันถึงประสิทธิภาพของระบบโมโมได้



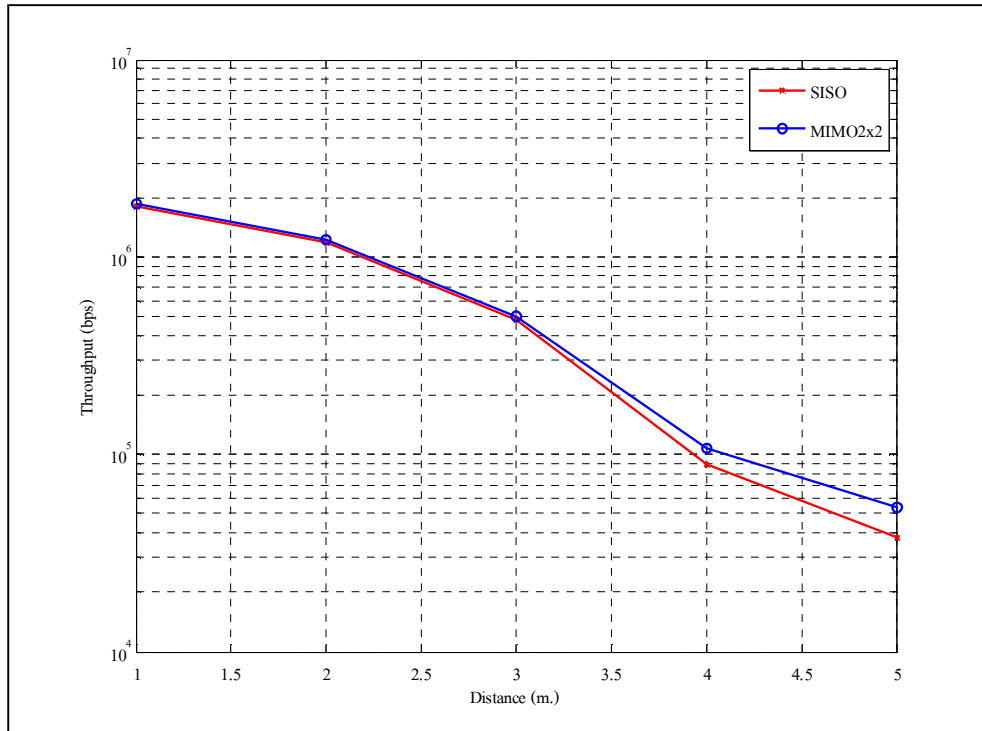
รูปที่ 4-35 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

จากรูปที่ 4-36 คือผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ ซึ่งพบว่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ออกจากชุดอุปกรณ์ข้างทาง RSU พบว่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีปริมาณที่สูงขึ้น โดยเฉพาะระบบเดิมที่มีการใช้สายอากาศรับและส่งจำนวน 1 ต้น นั้นมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สูงกว่าระบบโม



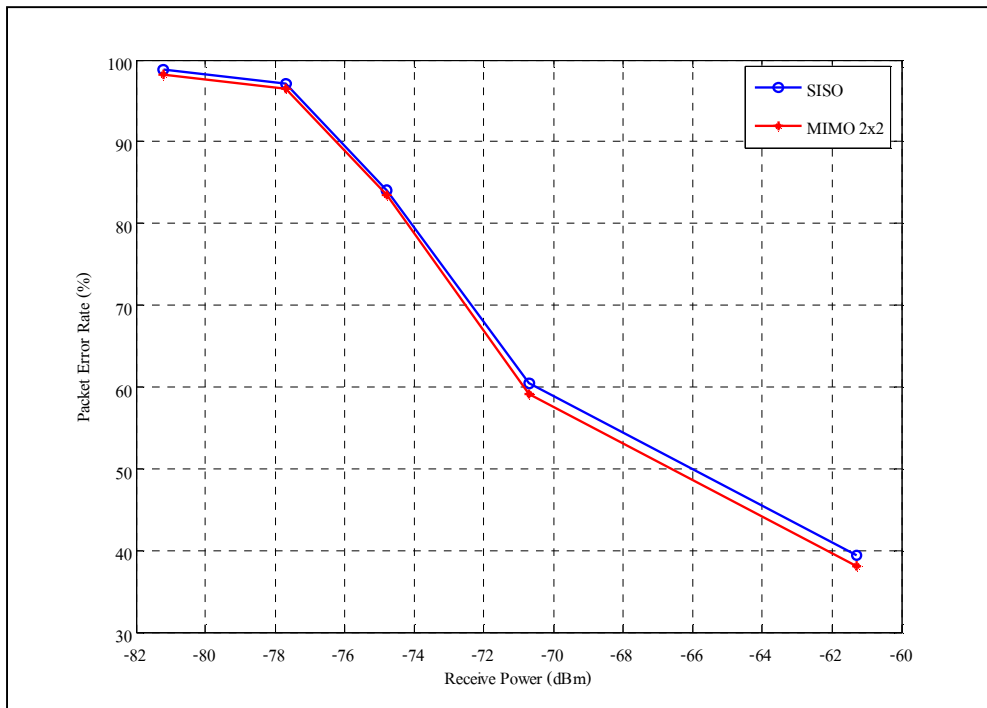
รูปที่ 4-36 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

เมื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 4-37 พบว่าเมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ออกห่างจากภาคส่งหรืออุปกรณ์ข้างทางจะทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลามีค่าลดลง ซึ่งจากรูปพบว่า ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาของระบบโมโมมีปริมาณสูงกว่าระบบเดิม ทั้งนี้สามารถยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพของระบบโมโม ดังทฤษฎีที่ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและส่งจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อค่าความจุช่องสัญญาณมากขึ้นก็จะสามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นเช่นกัน



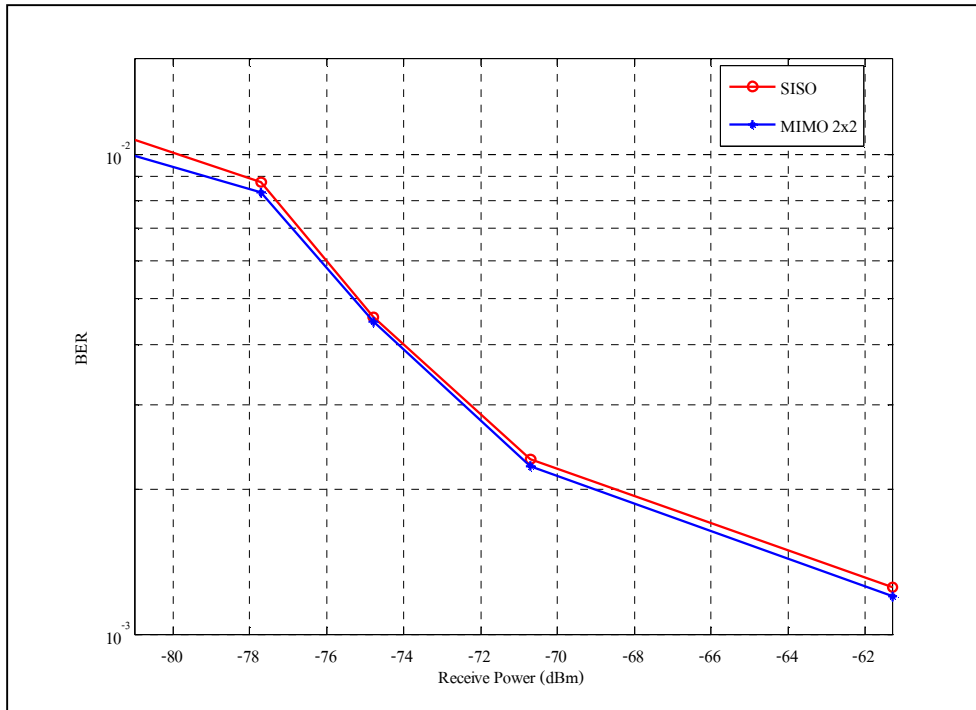
รูปที่ 4-37 ผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ข้างทางกับอุปกรณ์ติดยานพาหนะ เพื่อศึกษาถึงผลที่ได้จากระบบโมโมแล้ว พบว่าระบบโมโมได้เข้ามาช่วยเพิ่มคุณภาพของระบบเดิมได้ จากนั้นเมื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดังรูปที่ 4-38 พบว่าเมื่อความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับมีค่าเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่ายานพาหนะเคลื่อนที่เข้าใกล้ชุดอุปกรณ์ RSU ทำให้อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าระบบโมโมยังให้ประสิทธิภาพที่ดีเช่นเคย



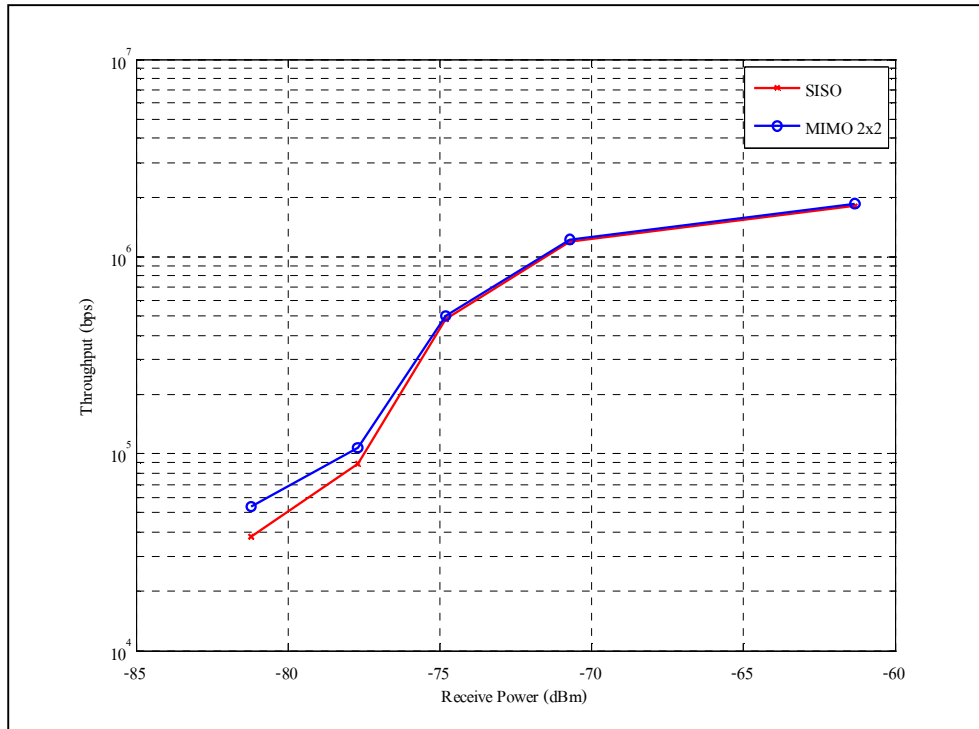
รูปที่ 4-38 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4-39 พบว่าอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อมีการใช้ระบบโมเด็มมีค่าต่ำกว่าระบบเดิม ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดังรูปสามารถแสดงได้ถึงประสิทธิภาพของระบบโมเด็มที่มีเหนือกว่าระบบเดิม



รูปที่ 4-39 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

ผลการทดสอบปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลาเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับดังรูปที่ 4-40 พบว่า ระบบโมโม่ยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบเดิมเช่นเคย หลังจากที่ได้ทำการทดสอบเก็บค่าเพื่อศึกษาถึงผลที่ได้จากการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลด้วยเทคนิคโมโม่สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นพบว่าระบบโมโม่อาศัยข้อดีและจุดเด่นที่หลากหลายเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมได้



รูปที่ 4-40 ผลการทดสอบอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ

#### 4.4 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้แสดงการออกแบบชุดทดสอบ การเลือกชุดทดสอบ การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของระบบกล่าวถึงกระบวนการในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้รองรับการทำงานที่ตรงต่อเป้าหมายในการใช้งาน ตลอดจนเรียนรู้ถึงการปรับตั้งค่าที่ภาคส่งและภาครับ โดยมีข้อควรระวังคือที่ภาครับเมื่อผู้ใช้งานสั่งให้มีการเก็บข้อมูล จะก่อให้เกิดปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ของหน่วยเก็บข้อมูล จากนั้นเมื่อพิจารณาลงลึกถึงผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า เมื่อมีการนำระบบโมโมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารระบบโมโมช่วยทำให้ระบบสื่อสารมีคุณภาพที่ดีขึ้น ดังกราฟที่แสดงให้เห็นศักยภาพของระบบโมโมแล้วด้วย

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยเทคนิคโมโม่ที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อก โดยอ้างอิงตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ARIB STD-T75 และ มาตรฐานของทวีปอเมริกาเหนือIEEE802.11p (WAVE-DSRC) โดยในขั้นต้นได้ทำการศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับระบบขนส่งอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ ระบบสื่อสารไร้สาย ช่องสัญญาณไร้สาย จากนั้นจึงนำประเด็นสำคัญของแต่ละเรื่องสรุปใจความที่เกี่ยวข้องกัน พบว่าช่องสัญญาณไร้สายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบขนส่งอัจฉริยะ ซึ่งระบบขนส่งอัจฉริยะนี้มีการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้สามารถแบ่งรูปแบบการสื่อสารได้เป็น 2 แบบ คือ การสื่อสารระหว่างยานพาหนะ Vehicle to Vehicle (V2V) และการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง Vehicle to Infrastructure (V2I) งานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับอุปกรณ์ข้างทาง หลังจากที่สามารถเลือกรูปแบบการสื่อสารได้แล้วจึงได้ศึกษาพบว่า ความเร็วระยะห่างระหว่างภาครับภาคส่ง มีผลกระทบต่อการทำงานของสื่อสารในรูปแบบดังกล่าว อีกทั้งปัจจัยที่สำคัญคือ การจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถี (multipath fading) เป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการสื่อสารเนื่องจากในการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับมีสิ่งกีดขวางมากมาย เมื่อสัญญาณเดินทางไปกระทบกับสิ่งกีดขวางเหล่านั้นก็จะเกิดการสะท้อนส่งผลให้เฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนไป ที่ภาครับเมื่อทำการรับสัญญาณก็เกิดปัญหาหากสัญญาณที่ภาครับเกิดการรวมกันแบบเสริมกันก็จะทำให้รับสัญญาณได้ดี แต่หากเกิดการรวมกันแบบหักล้างกันก็จะทำให้สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพที่แย่ลงไป ความเร็วซึ่งแฝงอยู่ในรูปของความถี่คอปเพลอร์ก็เป็อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อระบบสื่อสาร หากยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ความถี่คอปเพลอร์ก็มีความสูง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงทางเวลาของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว เมื่อรับสัญญาณที่ภาครับอาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลยเนื่องจากเวลาในการส่งข้อมูลมีน้อย อีกทั้งข้อมูลที่ต้องการส่งก็ยังมีขนาดใหญ่ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้มุ่งหาวิธีที่จะเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว พบว่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศเข้าไปที่ภาครับและภาคส่งจะทำให้ช่องสัญญาณในการสื่อสารมีความจุมากขึ้น ซึ่งหากความจุของช่องสัญญาณมากขึ้นนั้นหมายถึงสามารถส่ง



ข้อมูลปริมาณมาก ๆ ได้และสามารถส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น อีกทั้งหากเพิ่มกระบวนการปรับปรุงสัญญาณเข้าไปก็จะทำให้ระบบสามารถทนต่อการจางหายของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีได้ ซึ่งระบบโมโมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบเปิด และระบบปิด 2 ระบบนี้แตกต่างกันที่ระบบปิดมีการป้องกันของสัญญาณเพื่อปรับปรุงให้สามารถรับสัญญาณได้ดีขึ้นแต่มีข้อเสียคือซับซ้อน ส่วนระบบเปิดไม่มีการป้องกันสัญญาณ แต่ในการประมวลผลสัญญาณจะมีความง่ายไม่ซับซ้อนดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบโมโมแบบระบบเปิดที่มีการใช้เทคนิคโคเวอริจันต์ที่ภาคส่งด้วยการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกโดยใช้สายอากาศที่ภาคส่ง 2 ต้น ภาครับ 2 ต้น หลังจากนั้นจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อให้ได้มาซึ่งผลจำลองแบบ แบบจำลองนี้ใช้ช่องสัญญาณไร้สายที่มีการกระจายตัวแบบไรเอียน จากผลการจำลองแบบพบว่า ยิ่งความเร็วเพิ่มขึ้นก็ยิ่งทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลานั้นมีค่าลดลง จากนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกชุดอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบพบว่า เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์หรือ Software Defined Radio เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ซอฟต์แวร์กำหนดครูปคลื่นสัญญาณที่ส่ง และคิมอคูเลตสัญญาณที่ภาครับ อีกทั้งยังเป็นการเปลี่ยนปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์เป็นปัญหาทางด้านซอฟต์แวร์แทน แม้กระทั่งระบบปฏิบัติการที่ใช้ควบคุมยังเป็นแบบโอเพ่นซอส จึงเป็นเหตุให้ผู้วิจัยเลือกใช้ชุดอุปกรณ์ Universal Software Radio Peripheral (USRP) ที่มี GNU Radio เป็นแพ็คเกจหลักในการออกแบบระบบสื่อสาร โดยที่ GNU Radio ใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2 ภาษาได้แก่ C++ และ ไพธอน ภาษา C++ ใช้ในการสร้างบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณและใช้ไพธอนเชื่อมบล็อกประมวลผลสัญญาณแต่ละบล็อกเข้าด้วยกัน หลังจากที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบชุดทดสอบแล้ว จึงได้ทำการทดสอบระบบเก็บผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีการนำระบบโมโมที่มีการเข้ารหัสเชิงตำแหน่งและเวลาแบบบล็อกเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของระบบได้จริง แม้ว่าการเพิ่มจะอยู่ในระดับที่ไม่มากนักแต่ก็แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สามารถพัฒนาขึ้นได้อีกจากการใช้เทคนิคโมโม อีกทั้งระบบที่ใช้เป็นระบบโมโมแบบระบบเปิดทำให้ระบบไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งชุดอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นแบบโอเพ่นซอสทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องลิขสิทธิ์ของตัวซอฟต์แวร์อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยเทคนิคโมโม โดยพิจารณาจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและรับอย่างละ 2 ต้น และพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูล และปริมาณข้อมูลที่ส่งได้ต่อหน่วยเวลา ซึ่งเป็นการทดสอบเบื้องต้นเท่านั้น ในอนาคตน่าจะต้องสามารถทดสอบระบบในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ๆ ได้ และรวมไปถึงการใช้วิธีการเข้ารหัสของระบบ โมโมที่ซับซ้อนขึ้นจึงจะทำให้ได้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นกว่านี้

บรรณานุกรม

- 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 54th 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. ISCIT '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)
- Project IEEE 802.11p, (2006) [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/ Reports/tgpupdate.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgpupdate.htm)
- Syahrezal, M. (2009) **Video Transmission via Software Defined Radio**. Thesis, 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

## การเผยแพร่ผลงานวิจัย

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Settawit Poochaya, Monthippa Uthansakul and Peerapong Uthansakul (2012). **Preliminary study of DSRC using MIMO technique and software defined radio for ITS.** ECTI-CON 2012, May 16-18, 2012, Hua Hin, Thailand.

Settawit Poochaya, Monthippa Uthansakul and Peerapong Uthansakul (2012) **Performance Evaluation on Using IEEE802.11p for Indoor DSRC Approach.** IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP2012), August 27-29, 2012, Singapore.

ภาคผนวก ข

รายละเอียดบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

# Preliminary Study of DSRC using MIMO technique and Software Defined Radio for ITS

Settawit Poochaya, Peerapong Uthansakul and Monthippa Uthansakul  
 School of Telecommunication Engineering Suranaree University of Technology, Thailand  
 e-mail: d5440092@g.sut.ac.th, uthansakul@sut.ac.th and mtp@sut.ac.th

**Abstract**— The development of DSRC (Dedicated Short Range Communication) for ITS (Intelligence Transportation System) has been recently concerned for high speed data transmission. However, the existing DSRC technique provides a low speed data transmission. The searching for new techniques to support transmission requirement is still on focus. This paper introduces to apply MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technique and SDR technology to study the performance of 5.9GHz DSRC based on IEEE802.11p (WAVE-DSRC) standard. The experiment results show that both BER and throughput performances are improved by using the proposed system.

**Keywords**- DSRC; ITS; SDR;MIMO

## I. INTRODUCTION

ITS (Intelligence Transportation System) has been developed to solve the traffic problems such as traffic congestion, accidents and reduce the overall congestion cost. The final goal of ITS will improve the traffic efficiency and mobile safety without a new road construction required. IEEE802.11p is a standard used for DSRC (Dedicated Short Range Communication) communication system between RSU (Road Side Unit) and OBU (On Board Unit). DSRC is a short to medium range communication system and it is established for telecommunication exchanges between RSU and OBU system. DSRC provides a high speed radio link between RSU and OBU within a narrowband communication area. The most application of ITS is ETC or Electric Toll Collection system. ETC consist RSU locate on the road and OBU place on dash board or the roof of a car.

IEEE802.11p (WAVE-Wireless Access for Vehicular Environments) is a standard to be used in an outdoor propagation. An advantage of IEEE 802.11p [1] is achieved by using OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) technique so it can eliminate the effect of multipath fading or ISI (Inter symbol Interference) problem. This standard is benefit for outdoor broadband communication such as DSRC (Dedicated Short Range Communication)[2], ITS (Intelligence Transportation System) [3] because of its endurance for multipath fading as well as supporting a high mobility user while providing a high data rate transmission.

For measuring equipments, the authors develop our own transmitter and receiver using SDR (Software Defined Radio) technology. Researcher can control waveform by 2 host computers and SDR change hardware problems to software problems. In [4], the researcher presented a basic concept to study GNU Radio and USRP (Universal Software Radio Peripheral). The results showed that GNU Radio and USRP is

the rapid and low cost prototype suitable for any wireless technologies. The works in [5-6] presented an implementation of OFDM transmission by using USRP and GNU radio platform but many parameters of OFDM signals in IEEE 802.11p standard such as modulation type, power level, FFT bins and frame format are totally different from IEEE 802.11a. Although the implementation of IEEE802.11p standard was presented in [7] but it was an offline experiments. In this paper, USRPs and GNU Radio software are used to measure data in offline situation according to IEEE 802.11p standard. Many parameters such as packet error rate, bit error rate and throughput are collected.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) technique is one of the most promising technology that overcomes fading channels while maintain the benefits of high data rate transmission as well as low bit error rate [8-9]. By using multiple antennas at both transmitter and receivers, the system with space-time coding can provide more reliable transmission than conventional system employing only one antenna at transmitter and receiver. Also MIMO system can improve other system performances such as high spectral efficiency, high system capacity, high coverage area and high gain. In this light, this paper adopts the concept of MIMO technique to apply on communication link between RSU and OBU with SDR technology. Also this technique is able to be implemented for practical use and comparatively easier than power control plus coding technique. Hence, it is believed that MIMO technique can defeat the effect of fading channel and be able to destroy impediment between RSU and OBU. However, so far in literatures, there has never been any report concerning this issue before.

This paper introduces an implementation of MIMO technique apply with SDR technology to enhance the performance of 5.9GHz IEEE802.11p for ITS purposes such as ETC communication between RSU and OBU. All system configurations are based on IEEE802.11p standard [10] which is one of the most recent standards for DSRC system. This is because the fading channel due to buildings effect around the road still performs the same for any other standards. In experimentation, both BER (Bit Error Rate) and throughput performances are investigated via observing the distance between RSU and OBU. The comparisons between proposed

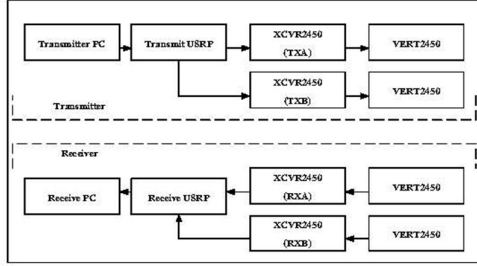


Figure1. Block Diagram of a system.

and conventional systems are also given in order to indicate a good of proposed technique. The remainders of paper are described as followed. The conventional DSRC, ITS system, MIMO technique, SDR technology and GNU Radio in section II. Then the system configuration used for experimentations are explained in section III including a system block diagram and equipment. In section IV, experiment setup and all results are discussions. Finally, the conclusion of this paper is given in section V.

TABLE I. IEEE 802.11P SPECIFICATIONS

Service	Specification
Modulation type	QPSK,BPSK
Data rate	3-27 Mbps
Frequency band	5.8GHz
Number of data sub carriers	48
Number of cyclic prefix	4
Total sub-carrier	52
OFDM symbol duration	8 $\mu$ s

## II. ITS, IEEE802.11P (WAVE-DSRC), MIMO, SOFTWARE DEFINED RADIO TECHNOLOGY

### A. ITS

Intelligent Transportation System is a new technology that occurs to improve traditional transport system. Main goal of ITS is improve traffic safety and solve the traffic problem without new road construction. Traffic problem is the main problem in many countries the government find solution to solve this problem. Many ITS system such as parking guidance system, intelligent traffic sign, traffic report and electric toll collection system. All of these, ETC is the most favorite system in the world. Because people can cash the tolls automatically by place the OBU on the dashboard or the top of a car. RSU located above the road and communicate with OBU. Then a wooden block is opening and a car can pass a toll gate. This method decrease travel time. But a surroundings around the toll gate cause an error to a communicate link between RSU and

OBU. Because multi-path fading is occurs its affect to a communication channel. This paper represents an implement of

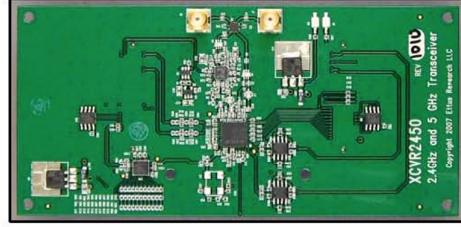


Figure2. XCVR2450 Daughter Board.

SDR and MIMO technology to study an improvement of conventional ITS system on ETC communication link between RSU and OBU.

### B. IEEE802.11p (WAVE-DSRC) Standard

IEEE802.11p (WAVE) was developed from IEEE 1609 WAVE project and it was extended from IEEE802.11a by using OFDM technology. The IEEE802.11p standard operates in 5.85-5.925GHz bands. It differs from the old version with an increase of frame duration from 4  $\mu$ s to 8  $\mu$ s. The effect after applying OFDM symbol duration is that it can support higher user mobility and also decrease more inter-symbol-interference. This is because doubled OFDM symbol times also mean the extension of the cyclic-prefix duration. The parameters for IEEE 802.11p WAVE are described in Table I.

### C. MIMO

There are two main techniques for MIMO encoder including spatial multiplexing and space-time coding. In this paper, the concept of space-time coding is chosen because its tolerance to fading channel caused by road surroundings is better than the other. The special case named as Alamouti STBC (Space Time Block Code) [8] is employed. The simplest form of Space Time Block Codes was invented by Alamouti in 1998. This code is designed for two-transmit antenna system. STBC operates on a block of input symbols, columns of the coding matrix represent time and rows represent antennas. Main feature of STBC is a very simple decoding scheme and the code matrix is given as

$$X_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

for  $N_r, N_t=2$

At a given symbol period, two signals are simultaneously transmitted from the two antennas, namely from the first antenna and from the second antenna. In the next symbol period ( $t + T$ ), signal  $s_2$  and  $s_1$  are transmitted from the first and the second antenna, where  $T$  denotes symbol period.



Columns of the matrix correspond to the antennas and a row corresponds to the time slots. This code matrix from (1) is orthogonal. At the receiver site, the space-time combiner



Figure3. Universal Software Radio Peripheral 1.

the received signals as follows (2):

$$\begin{pmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\|H\|^2} \sum_{j=1}^{N_r} \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j}^* r_{2,j} \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j}^* r_{2,j} \end{pmatrix} \quad (2)$$

for  $N_r, N_t=2$ .

and represents the estimated symbol in the codeword matrix. Represents the estimated channel from the transmit antennas and receive antenna and represents the summation of channel power per link.

#### D. SDR: Software Defined Radio and GNU Radio

SDR (Software Defined Radio) is a technology to decrease the complexity of radio transmission system by using software done the radio signal manipulate and processing. All of signal processing is done by using microcomputer. At the transmitter path before sending a signal on the air its must be convert a digital signal to analog signal by using DAC (Digital to Analog Converters) and then an analog signal go straight to a transmit antenna. At the receiver path a signal from receive antenna is an analog signal. To do a signal processing a signal must be converting to digital signal by using ADC (Analog to Digital Converter).

GNU radio is an open source software that control and processing a signal. GNU radio is a software package which creates by Python programming language and C++ programming language. Block and flow graph are create by Python and Signal processing are create by C++. GNU radio are working with USRP and user can develop their own code much the same as a radio engineer connects a sub device to make a radio communication system.

### III. SYSTEM CONFIGURATION

#### A. System Block Diagram

Fig.1 represents a transmitter and receiver. At the transmitter consists 1 host computer, 1 USRP, 2 XCVR2450 daughter board and 2 VERT2450 transmit antenna. At the

transmitter a host computer connected with USRP to control transmit waveform and control all of parameter such as



Figure4. Experiment Setup.

modulation type, number of subcarriers, number of antenna, number of cyclic prefix and transmit frequency. Equipments at the receiver are the same as the transmitter but it work reversely.

#### B. Equipment

USRP (Universal Software Radio Peripheral) in fig.3 is a platform which developed by Ettus Research LLC. Inside the USRP have 2 main components to create a radio communication system. First is mother board. Mother board contains an Altera Cyclone EP1C12 Field Programmable Gate Array (FPGA). It has 4 ADCs which each running 12 bits per sample with 64 Msamples/sec and 4 DACs which running 14 bits per sample with 128 Msamples/sec. Second is daughter board that working in a field of RF-Front End. Fig.2 represents XCVR2450 daughter board it's providing radio frequency in dual band such as 2.4 GHz and 5.9 GHz. All components are assembly in one USRP box using 3A 6V power supply. Finally, USRP is connecting to the host PC with USB 2.0 (Universal Serial Bus 2.0).

### IV. EXPERIMENT SETUP, RESULT AND DISCUSSION

#### A. Experiment Setup

Fig.4 showed the experiment setup. The author setup OBU and RSU parameter follows IEEE802.11p (WAVE-DSRC) standard and assume situation relate to ETC operation. RSU place on a tower located beside the road high 1.5 m. OBU place the top of a car. Because of hardware limitation such as transmit/receive antenna VERT2450 gain is 3dBi cause the communication range between RSU and OBU is 5m and measure 10 times/point. An experiment parameters are: modulation type qpsk, data rate 1Mbps and packet length is 400. The authors marking 5 points from RSU to OBU. After that we measured the data in offline method then we get packet number, number of correct receive packet and number of receive packet. The authors use (3) to calculated Packet Error Rate (PER), and (4) for (BER) observing with a distance between RSU and OBU.

TABLE II. EXPERIMENTATION RESULTS BER, THROUGHPUT VS. DISTANCE (M.)

Variable	Distance (m.)	Conventional System	MIMO 2x2
BER	1	$1.25 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-3}$
	2	$2.31 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-3}$
	3	$4.57 \times 10^{-3}$	$4.48 \times 10^{-3}$
	4	$8.76 \times 10^{-3}$	$8.30 \times 10^{-3}$
	5	$1.10 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-2}$
Throughput	1	$1.81 \times 10^6$	$1.90 \times 10^6$
	2	$1.18 \times 10^6$	$1.23 \times 10^6$
	3	$4.80 \times 10^5$	$4.97 \times 10^5$
	4	$8.88 \times 10^4$	$1.07 \times 10^5$
	5	$3.81 \times 10^4$	$5.37 \times 10^4$

$$PER = \left(1 - \left(\frac{n\_right}{pktno}\right)\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$1 - PER = (1 - BER)^L \quad (4)$$

$n\_right$  is a number of correct receive packet

$pktno$  is packet number

$L$  is Packet length

First, the authors extracted an offline data to compute average PER after that calculate BER compare with how long from RSU to OBU. Then compute throughput and keep the result to analysis and discussions.

### B. Result and Discussions

Table II represents a compare of conventional system and MIMO 2x2 systems at a distance from OBU and RSU equal 5 m. that show a different value. The result showed that BER of multiple antenna system less than conventional system related to improve system performance because it increases reliability of the ETC system and improve credibility of user. This result can improve authenticity of ETC system and attractive many people turn to use ETC system. From above a reason ETC is reduction in the man-hour required as the system does not require any human to work at the toll gate. Then reduction traffic jams because a car can pass the toll gate more quickly. When a car can pass toll gate quickly, time saving occur and fuel save is occur. And the most important reason is reduce an emission around toll gate. Focus on throughput vs. distance between RSU and OBU this results show that a throughput of MIMO system more than conventional system can indicate a good of the purpose system and improved system performance. These results showed that we can transmit the data rapidly. As a result a wooden block is opening speedy. Then drivers cannot stop and accelerate forward the toll gate it could be save the fuel and save the energy of a car.

### V. CONCLUSION

This paper represents a preliminary study of implementation SDR technology and applies MIMO technique to improve ITS/DSRC system such as ETC system. The results can lead a good way to develop and increase ITS and DSRC system performance by apply MIMO technique. Which an advantages of SDR such as translate hardware problems to software problems and cheap components are leading researchers to building a communication system by themselves. Next work the author planning to improve a system that supports vehicle mobility and develop the software to be stability.

### ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by the RGJ: Royal Golden Jubilee Scholarship, TRF Fund (Grant No. PHD/0041/2553).

### REFERENCES

- [1] Chi-Sheng Li, Che-Kang Sun, Jia-Chin Lin, "Performance evaluations of channel estimations in IEEE 802.11p environments," Ultra Modern Telecommunications&workshops. ICUMT International Conference, 2009.
- [2] Hyunseo Oh, Chungil Yae, Donghyon Ahn and Hanberg Cho, "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.
- [3] 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, 2008. ICCAS 2008. International Conference, Page(s):345 - 349, 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] A. Marwanto, M.A. Sarijari, Norsheila Faisal, S.K.S. Yusof, R.A. Rashid, "Experimental study of OFDM implementation utilizing GNU Radio and USRP - SDR," Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference, pp. 132 - 135, 2009.
- [6] S. Biddlestone, K.A. Redmill, "A GNU Radio based testbed implementation with IEEE 1609 WAVE functionality," Vehicular Networking Conference (VNC), IEEE Conference, pp. 1-7.
- [7] P. Fuxjäger, A. Costantini, D. Valerio, P. Castiglione, G. Zacheo, T. Zemen, F. Ricciato "IEEE 802.11p Transmission Using GNU Radio", 6th Karlsruhe Workshop on Software Radios, 2010
- [8] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, 1999.
- [9] C. Shan, P. Y. Kam, and A. Nallanathan, "Theoretical performance of space-time block coded systems with channel estimation," in Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '04), vol. 6, pp. 3666-3670, Dallas, Tex, USA, November-December 2004.

# Performance Evaluation on Using IEEE802.11p for Indoor DSRC Approach

Settawit Poochaya, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul  
School of Telecommunication Engineering  
Suranaree University of Technology  
NakhonRatchasima, Thailand  
e-mail : D5440092@g.sut.ac.th, uthansakul@sut.ac.th, mtp@sut.ac.th

**Abstract**— IEEE 802.11p has recently proposed for Dedicated Short Range Communication (DSRC) which supports the high speed data transmission for Intelligent Transportation System (ITS). Most aspects for this standard depict the link between roadside equipments to vehicles under outdoor scenarios. However, when vehicles move to undercover car parking or indoor constructions, the transmission link is automatically detached from roadside equipments. Therefore, it is a better approach if vehicles can extend their services under indoor scenarios via IEEE 802.11p. In this light, this paper presents an investigation on using this standard for indoor approach. The real prototype using GNU Radio and USRP (Universal Software Radio Peripheral) has been implemented for data measurements. The results reveal the possibility of using this standard for indoor communication.

*Keywords*-component; GNU Radio; USRP; DSRC; ITS

## I. INTRODUCTION

IEEE802.11p (WAVE-Wireless Access for Vehicular Environments) is a standard to be used in an outdoor propagation. An advantage of IEEE 802.11p [1] is achieved by using OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) technique so it can eliminate the effect of multipath fading or ISI (Inter symbol Interference) problem. This standard is benefit for outdoor broadband communication such as DSRC (Dedicated Short Range Communication)[2], ITS (Intelligence Transportation System) [3] because of its endurance for multipath fading as well as supporting a high mobility user while providing a high data rate transmission.

In general, the vehicles having OBU (On Board Unit) exchange outside information by communicating with RSU (Road Side Unit) which is located along the traffic road. This communication is no longer available when vehicles move to undercover car parkings or indoor constructions. The possible transmission for indoor scenarios can be achieved by other communication standards. However, it is a better approach if vehicles can still use their services via the same standard available for both outdoor and indoor. In this light, this paper presents the feasibility study on using IEEE 802.11p for indoor DSRC approach. So far in literatures, there has never been any report on using this standard for an indoor communication.

For measuring equipments, the authors develop our own transmitter and receiver using SDR (Software Define Radio)

technology. In [4], the researcher presented a basic concept to study GNU Radio and USRP (Universal Software Radio Peripheral). The results showed that GNU Radio and USRP is the rapid and low cost prototype suitable for any wireless technologies. The works in [5-6] presented an implementation of OFDM transmission by using USRP and GNU radio platform but many parameters of OFDM signals in IEEE 802.11p standard such as modulation type, power level, FFT bins and frame format are totally different from IEEE 802.11p. Although the implementation of IEEE802.11p standard was presented in [7] but it was an offline experiments. In this paper, USRPs and GNU Radio software are used to measure data in real time according to IEEE 802.11p standard. Many parameters such as packet error rate, packet loss, throughput and channel power are collected.

## II. MEASUREMENT SETUP AND RESULTS

This paper has presented the measured data to investigate the use of IEEE 802.11p for indoor DSRC approach. The packet loss, packet error rate, throughput, spectrum and channel power have been investigated under the indoor scenario. All parameters have been set according to the standard of IEEE 802.11p. The transmit and receive software is developed by authors. From all results, it concludes the possibility of using this standard for indoor with the same quality as outdoor only if the transmit power is high enough and there is no obstruction between transmitter and receiver. For the future work, the other technique such as MIMO will be applied to improve the performance of using this standard for indoor approach.



Figure 1. USRP (Universal Software Radio Peripheral) and XCVR2450 Daughter Board

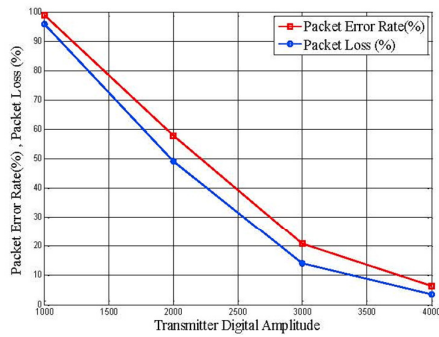


Figure 2. Packet Error Rate and Packet Loss Vs Transmitter Digital Amplitude for BPSK Modulation

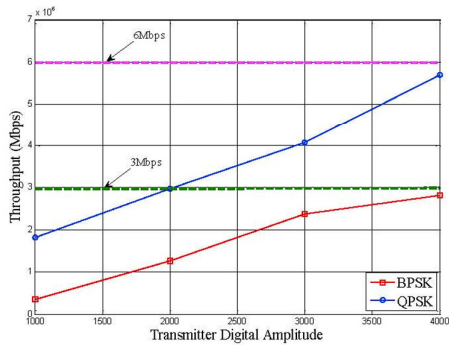


Figure 3. Throughput Vs Transmitter Digital Amplitude for BPSK and QPSK Modulations

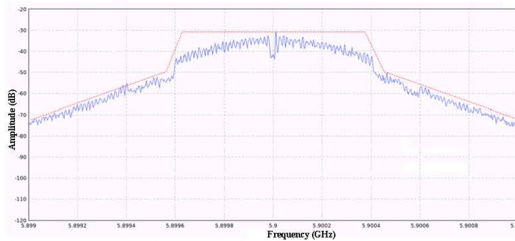


Figure 4. Spectrum mask of IEEE802.11p

REFERENCES

[1] Chi-Sheng Li, Che-Kang Sun, Jia-Chin Lin, "Performance evaluations of channel estimations in IEEE 802.11p environments," Ultra Modern Telecommunications&workshops.ICUMT International Conference, 2009.

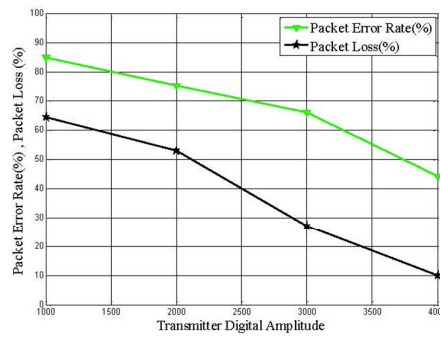


Figure 5. Packet Error Rate and Packet Loss Vs Transmitter Digital Amplitude for QPSK Modulation

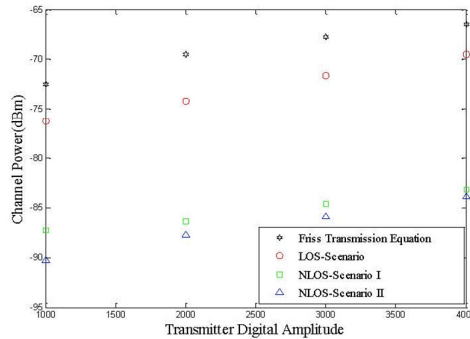


Figure 6. Average Channel Power Vs Transmitter Digital Amplitude

[2] Hyunseo Oh, Chungil Yae, Donghyon Ahn and Hanberg Cho, "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.

[3] 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, 2008. ICCAS 2008. International Conference, Page(s):345 – 349 ,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] A. Marwanto, M.A. Sarjari, Norsheila Faisal, S.K.S. Yusof, R.A. Rashid, "Experimental study of OFDM implementation utilizing GNU Radio and USRP - SDR," Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference, pp. 132 – 135 ,2009.

[6] S. Biddlestone, K.A. Redmill, "A GNU Radio based testbed implementation with IEEE 1609 WAVE functionality," Vehicular Networking Conference (VNC), IEEE Conference, pp. 1-7,

[7] P. Fuxjäger, A. Costantini, D. Valerio, P. Castiglione, G. Zacheo, T. Zemen, F. Ricciato "IEEE 802.11p Transmission Using GNU Radio", 6th Karlsruhe Workshop on Software Radios, 2010

[8] www2.rohde-schwarz.com/file/1MA152\_2e.pdf

## ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานใน ตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั่ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมา เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Signal Processing, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการ 26 บทความและในการประชุม วิชาการ 76 บทความ หนังสือวิชาการในประเทศ 1 เล่มและต่างประเทศ 1 เล่ม มีลิขสิทธิ์ 1 รายการและ สิทธิบัตร 1 รายการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antennas ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2553 ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัลพนักงานดีเด่น ด้านการวิจัย สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี