

เครื่องรับส่งการสื่อสารแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวที่ใช้
สายอากาศต้นเดียว

นายณัฐวุฒิ ภูงามเงิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**A SINGLE-CHANNEL FULL-DUPLEX
TRANSCIVER USING A SINGLE ANTENNA**

Nathawuth Phungamngern

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

เครื่องรับส่งการสื่อสารแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวที่ใช้สายอากาศต้นเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สมศักดิ์ วาณิชนันต์ชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐวุฒิ ภูงามเงิน : เครื่องรับส่งการสื่อสารแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวที่ใช้
สายอากาศต้นเดียว (A SINGLE-CHANNEL FULL-DUPLEX TRANSCEIVER USING
A SINGLE ANTENNA) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล,
138 หน้า.

ระบบการสื่อสารแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียว (single-channel full-duplex system) คือระบบที่สามารถรับและส่งสัญญาณพร้อมๆ กันได้ในเวลาเดียวกันผ่านช่องสัญญาณเดียวกัน ประเด็นที่มีความท้าทายสำหรับการออกแบบเครื่องรับส่งการสื่อสารแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวคือ การลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (self interference) ซึ่งเป็นสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากภาคส่งในโหนดเดียวกันกับภาครับซึ่งเป็นสัญญาณแทรกสอดที่เราไม่ต้องการ ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดที่ภาครับ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำเสนอแนวคิดที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองโดยมีเทคนิคหลากหลายวิธี แต่อย่างไรก็ตามแนวคิดเหล่านั้นยังมีข้อเสียตรงที่ต้องใช้จำนวนสายอากาศอย่างน้อยสองต้นสำหรับการสื่อสารสองทางโดยใช้หนึ่งต้นสำหรับเป็นสายอากาศภาคส่ง และอีกหนึ่งต้นสำหรับเป็นสายอากาศภาครับ ซึ่งการจัดวางสายอากาศจะมีระยะห่างการจัดวางร่วมด้วยทำให้ยากต่อการใช้งานจริงจากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มียานวิจัยชิ้นไหนที่ทำการออกแบบเครื่องรับส่งการสื่อสารแบบสองทางด้วยการใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวที่สามารถทำการรับและส่งสัญญาณในเวลาเดียวกัน แม้ว่าบางงานจะเสนอการใช้สายอากาศต้นเดียว แต่ก็ต้องการจุดป้อนสัญญาณ 2 จุด ซึ่งต้องการการออกแบบที่พิเศษและมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอแนวคิดที่จะออกแบบระบบการสื่อสารแบบสองทางด้วยสายอากาศเพียงต้นเดียวในการรับและส่งสัญญาณพร้อมๆ กันและเสนอเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารในทางปฏิบัติผลการทดสอบต้นแบบเครื่องรับส่งสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวและสายอากาศต้นเดียวมีประสิทธิภาพเรื่องอัตราความผิดพลาดใกล้เคียงกับระบบการสื่อสารที่ใช้สองช่องสัญญาณแต่ค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลมากกว่าเป็นสองเท่า

NATHAWUTH PHUNGAMNGERN : A SINGLE-CHANNEL FULL-
DUPLEX TRANSCEIVER USING A SINGLE ANTENNA. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D., 138 PP.

FULL-DUPLEX/SINGLE-CHANNEL/SINGLE-ANTENNA

A single-channel full-duplex system is the system that can transmit and receive at the same time on the same channel. The challenge for implementing the single-channel full-duplex transceiver is to eliminate the self interference. This interference is undesirably occurred when there is the transmitted signal. As a result, there are many works in literature that propose the method to suppress the self interference. However, most methods require at least two antennas, one for transmitting part and the other for receiving part. The antenna arrangement is difficult in practice due to the specific distance for each communication scheme. So far in literature, there is no work presenting the single-channel full-duplex transceiver with a single antenna. Although some works have used one antenna but it requires at least two feed points in which the special design and a lot of limitation are compulsory. Therefore, this thesis proposes the new design to implement the single-channel full-duplex system with a single antenna. The design includes the method to eliminate the self interference in both RF and digital processing. In addition, the proposed method is also suitable for implementing in practice. The experimental results from the proposed prototype indicate that the BER performance of proposed system is similar to the conventional system but the throughput is almost twice.

School of Telecommunication Engineering

Student's Signature _____

Academic Year 2012

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุทธารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา คำแนะและคำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุทธารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้โอกาสในการศึกษาและขอขอบคุณทุนการศึกษา จากการให้ทุนการศึกษาแก่นักศึกษาบัณฑิตที่เกณฑ์เข้ารับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG)

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด นางสาวปณิษฐาท์ อาจหาญ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

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

ณัฐวุฒิ ภูงามเงิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	7
2 หลักการสื่อสารแบบสองทาง.....	8
2.1 กล่าวนำ.....	8
2.2 ระบบการสื่อสารไร้สาย.....	8
2.3 สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณของระบบสื่อสารบกวนกันเอง.....	9
2.3.1 สัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณข้างเคียง.....	9
2.3.2 สัญญาณแทรกสอดของตนเองในช่องสัญญาณเดียวกัน.....	10
2.4 ประเภทการรับและส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ.....	11
2.4.1 ระบบการสื่อสารแบบทางเดียว (Simplex).....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	ระบบการสื่อสารแบบกึ่งสองทาง (Half Duplex).....	12
2.4.3	ระบบการสื่อสารแบบสองทาง (Full Duplex).....	12
2.5	เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอด.....	18
2.5.1	เทคนิคการกำจัดสัญญาณในส่วนแอนะล็อกหรือ RF-Front End.....	18
2.5.2	เทคนิคการกำจัดสัญญาณในส่วนดิจิทัล.....	21
2.5.3	สรุปงานที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.6	บทสรุป.....	34
3	การพัฒนาระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียว.....	35
3.1	กล่าวนำ.....	35
3.2	การออกแบบชุดทดสอบ.....	35
3.2.1	การออกแบบในส่วนแอนะล็อก.....	36
3.2.2	การออกแบบในส่วนดิจิทัล.....	39
3.2.3	ภาพรวมของการออกแบบทั้งระบบ.....	54
3.3	การทดสอบระบบสื่อสารแบบสองทางด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์.....	55
3.4	บทสรุป.....	58
4	เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์.....	59
4.1	กล่าวนำ.....	59
4.2	เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์.....	59
4.3	GNU Radio Software package.....	60
4.3.1	โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน.....	62
4.3.2	การสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณสำหรับ GNU Radio.....	65
4.4	ชุดอุปกรณ์ Universal software radio peripheral.....	70
4.4.1	ส่วนประกอบหลักของ USRP Board.....	70
4.5	ทิศทางการไหลของสัญญาณใน USRP Board.....	75
4.5.1	ภาครับ.....	75
4.5.2	ภาคส่ง.....	76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	การติดตั้งโปรแกรม GNU Radio	77
4.6.1	Install dependencies	78
4.6.2	Install an SVN Client.....	79
4.7	ระบบปฏิบัติการ LinuxUbuntu.....	79
4.7.1	ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น.....	80
4.7.2	รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น	81
4.8	บทสรุป.....	86
5	ผลการทดสอบระบบสื่อสารรับส่งแบบสองทางที่ได้พัฒนา	87
5.1	กล่าวนำ.....	87
5.2	ผลการทดสอบ.....	87
5.2.1	การทดสอบกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ.....	87
5.2.2	การทดสอบกำจัดสัญญาณแทรกสอดเมื่อนำเทคนิค การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุรวมเข้า กับการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัล	97
5.3	บทสรุป.....	118
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	119
6.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	119
6.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	120
6.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	121
	รายการอ้างอิง.....	122
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	126
	ประวัติผู้เขียน.....	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	จำนวนการกำจัดสัญญาณแทรกสอดในงานปรัศน์วรรณกรรมที่สำรวจ.....33
3.1	ผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติต่างๆ.....43
3.2	หน้าต่างแบบต่างๆ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ.....45
3.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ56
6.1	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....120



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณข้างเคียง.....	9
2.2	การรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกันที่เกิดจากสถานีข้างเคียง.....	10
2.3	แผนภาพการสื่อสารทางเดียว.....	11
2.4	แผนภาพการสื่อสารแบบกึ่งสองทาง.....	12
2.5	แผนภาพการสื่อสารแบบสองทาง.....	13
2.6	ระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ TDD (Time Division Duplex) สำหรับระบบสองช่องสัญญาณความถี่ในการสื่อสารรับส่งพร้อมๆ กัน.....	14
2.7	ระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ FDD (Frequency Division Duplex) สำหรับระบบสองช่องสัญญาณความถี่ในการสื่อสารรับส่งพร้อมๆ กัน.....	15
2.8	ผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดตนเอง (Self-interference) ของระบบ การสื่อสารแบบสองทางผ่านช่องสัญญาณเดียวสำหรับสื่อสารรับส่งพร้อมๆ กัน.....	15
2.9	แสดงการชนกันของข้อมูลขณะทำการรับส่งข้อมูลพร้อมๆ กัน.....	16
2.10	แสดงผลกระทบของการสื่อสารแบบสองทางที่เกิดจากสถานีอำพราง.....	17
2.11	แสดงการแลกเปลี่ยนแพ็คเกจในการสื่อสารแบบสองทาง.....	17
2.12	แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยสายอากาศ.....	19
2.13	แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยบาลูน.....	20
2.14	แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยวงจร QHx220.....	21
2.15	บล็อกไดอะแกรมระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	22
2.16	สเปกตรัมของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในย่านเดียวกับสัญญาณที่ต้องการ.....	25
2.17	โครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับได้.....	26
2.18	แผนภาพแสดงการทำงานของตัวกรองปรับได้.....	30
2.19	แผนภาพแสดงการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล โดยใช้ LMS Filter.....	31
3.1	แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่นำเสนอ.....	36
3.2	ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองออดมคติ.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	แผนภาพแสดงการการสร้างตัวกรองอิมพัลส์จำกัดโดยคอนโวลูชันปกติ.....45
3.4	แผนภาพแสดงการสร้างตัวกรองอิมพัลส์จำกัดเมื่ออาศัยคุณสมบัติการสมมาตร.....46
3.5	แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองผ่านต่ำ.....47
3.6	คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR.....47
3.7	ตัวกรองสัญญาณต่ำผ่านที่ออกแบบ.....48
3.8	แผนภาพแสดงการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลที่น่าเสนอ.....50
3.9	โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ภาคส่ง.....51
3.10	โปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างเฟรมข้อมูล.....52
3.11	โครงสร้างโปรแกรมในส่วนที่ตรวจสอบความถูกต้องของแพ็คเกจ.....53
3.12	แผนภาพรวมระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ได้นำเสนอ.....54
3.13	แผนภาพแสดงกระบวนการทำงานระบบสื่อสารแบบสองทางที่ได้นำเสนอ.....55
3.14	บล็อกแสดงการทดสอบด้วยการจำลองในโปรแกรม MATLAB.....56
3.15	ผลการจำลองแบบการวัดประสิทธิภาพความผิดพลาดบิตข้อมูล เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ.....57
3.16	ผลแบบจำลองการวัดประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูล เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ.....57
4.1	โครงสร้างของ GNU Radio.....61
4.2	แบบจำลอง Flow graph ของระบบโทรศัพท์แบบ dial tone.....64
4.3	บอร์ด USRP.....71
4.4	ชุดอุปกรณ์ Daughter boards.....72
4.5	ชุดอุปกรณ์ USRP.....73
4.6	ส่วนประกอบภายในบอร์ด USRP.....75
4.7	ภาพรวมของ GNU Radio และUSRP.....77
5.1	การจัดวางชุดอุปกรณ์การทดสอบการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ.....88
5.2	การหักล้างสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self interference).....89
5.3	แผนภาพทิศทางการทดสอบการตัดสัญญาณในส่วนการกำจัดสัญญาณ แทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ เมื่อทดสอบป้อนแรงดันให้กับตัวเลื่อนเฟส.....89

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการป้อนแรงดันเพื่อวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณแทรกสอด เมื่อมีการป้อนแรงดันจาก 0 โวลต์ถึง 15 โวลต์สำหรับกำลังส่ง 0dBm.....	91
5.5 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสทำการป้อนแรงดัน 4.3 โวลต์สำหรับกำลังส่ง 0dBm.....	91
5.6 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการป้อนแรงดันเพื่อวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณแทรกสอด เมื่อมีการป้อนแรงดันจาก 0 โวลต์ถึง 15 โวลต์สำหรับกำลังส่ง 20dBm.....	92
5.7 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสทำการป้อนแรงดัน 4.3 โวลต์สำหรับกำลังส่ง 20dBm.....	92
5.8 แผนภาพทิศทางการทดสอบการวัดสัญญาณในส่วนการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ เมื่อทดสอบ โดยการเพิ่มตัวลดทอนสัญญาณ.....	93
5.9 แสดงลายวงจรตัวลดทอนสัญญาณ -3dB ที่ได้ออกแบบ.....	94
5.10 ผลการจำลองแบบตัวลดทอนด้วยโปรแกรม CST.....	94
5.11 การวัดค่าเมื่อตัวลดทอนเข้ามาต่อร่วมกับระบบ สำหรับกำลังส่ง 0dBm.....	95
5.12 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการป้อนแรงดัน 4.1 โวลต์และตัวลดทอน -3dB สำหรับกำลังส่ง 0dBm.....	95
5.13 การวัดค่าเมื่อตัวลดทอนเข้ามาต่อร่วมกับระบบ สำหรับกำลังส่ง 20dBm.....	96
5.14 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการป้อนแรงดัน 4.1 โวลต์และตัวลดทอน -3dB สำหรับกำลังส่ง 20dBm.....	96
5.15 ภาพรวมของชุดทดสอบทั้งระบบ.....	97
5.16 แสดงความผิดพลาดบิตข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับเทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองทั้งก่อนและหลังการกำจัดสัญญาณแทรกสอด.....	102
5.17 แสดงความผิดพลาดบิตข้อมูลเทียบกับระยะทางรับส่งในขณะที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองในระบบและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองในระบบ.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 แสดงความผิดพลาดแพ็คเกจข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับเทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง ทั้งก่อนและหลังการกำจัดสัญญาณแทรกสอด.....	104
5.19 แสดงความผิดพลาดแพ็คเกจข้อมูลเทียบกับระยะทางรับส่งในขณะที่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเองในระบบและไม่มีสัญญาณแทรกสอด ของตนเองในระบบ.....	104
5.20 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps.....	106
5.21 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้สัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps.....	106
5.22 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps.....	107
5.23 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps.....	107
5.24 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps.....	108
5.25 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้สัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps.....	108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps.....	109
5.27 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps.....	109
5.28 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps.....	110
5.29 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้สัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps.....	110
5.30 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps.....	111
5.31 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps.....	111
5.32 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps.....	112
5.33 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้สัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps.....	112
5.34 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps.....	113

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.35 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps.....	113
5.36 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps.....	114
5.37 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้สัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps.....	114
5.38 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps.....	115
5.39 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps.....	115
5.40 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps.....	116
5.41 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้สัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps.....	116
5.42 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps.....	117
5.43 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps.....	117

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และ รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุในทุกวันนี้ถือได้ว่าเป็นระบบการสื่อสารที่เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในชีวิตประจำวัน เนื่องจากมีความคล่องตัวสูงและอาจจะนำมาใช้ทดแทนหรือเพิ่มเติมเข้ากับระบบการสื่อสารที่ใช้สายแบบดั้งเดิม เพื่อเข้ามาช่วยการตอบสนองต่อความต้องการทางด้านข้อมูลและการบริการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการดำเนินงานทางด้านธุรกิจ และการใช้ชีวิตประจำวัน สามารถจำแนกโดยการแบ่งตามรูปแบบทิศทางการรับและส่งสัญญาณได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ ระบบสื่อสารแบบทางเดียว (Simplex) ระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทาง (Half Duplex) ระบบสื่อสารแบบสองทาง (Full Duplex) จากรูปแบบการสื่อสารดังกล่าวจะพบว่าโดยทั่วไปแล้วการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายนั้น ส่วนใหญ่มักจะเป็นรูปแบบการสื่อสารรับส่ง (Duplex) คือสามารถทำการรับและส่งได้ในเวลาเดียวกันซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางและระบบสื่อสารแบบสองทาง เมื่อพิจารณาถึงข้อแตกต่างของ 2 ระบบนี้จะพบว่าระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางเป็นระบบที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการทั้งรับหรือส่งสัญญาณวิทยุ โดยจะทำการส่งสัญญาณด้วยความถี่เดียวกันแต่แบ่งการรับและส่งสัญญาณในช่วงเวลาที่ต่างกัน หมายความว่าผู้ใช้งานจะต้องทำการผลัดกันรับหรือส่งสัญญาณวิทยุ เนื่องจากระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางไม่สามารถทำหน้าที่ในการรับและส่งสัญญาณวิทยุพร้อมๆ กันได้ ดังนั้นสายอากาศที่ใช้จึงต้องทำหน้าที่เป็นทั้งสายอากาศภาครับและภาคส่งในต้นเดียวกัน โดยตัวอย่างระบบที่ใช้งานรูปแบบนี้อาทิเช่น ระบบวิทยุสื่อสาร ระบบการรับและส่งโทรสาร เป็นต้น จากการไร้ความสามารถในการทำหน้าที่รับและส่งของระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางที่ไม่รองรับให้ผู้ใช้งานทำหน้าที่ในการรับและส่งสัญญาณวิทยุพร้อมๆ กันได้ในเวลาเดียวกัน ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวข้างต้นจึงกลายเป็นประเด็นปัญหาสำคัญที่

นักวิจัยทั่วทุกมุมโลกให้ความสนใจอย่างมากที่จะคิดค้นหาแนวทางที่จะช่วยพัฒนาและออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุรูปแบบใหม่ๆ ขึ้นกันอย่างต่อเนื่อง และเพิ่มความสำคัญขึ้นเรื่อยๆ โดยมีเป้าหมาย คือ ต้องช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในระบบการสื่อสารที่สามารถรองรับให้ใช้งานทำการทั้งรับและส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุพร้อมๆ กันได้ในเวลาเดียวกันผ่านช่องสัญญาณเดียวกัน สามารถรองรับการใช้งานที่หลากหลาย สามารถอำนวยความสะดวกให้ใช้งาน มีความน่าเชื่อถือ ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในแง่อุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งซึ่งระบบนี้เรียกว่า ระบบสื่อสารแบบสองทาง โดยในระบบนี้ทั่วไปแล้วเราจะต้องทำการแยกความถี่ในการรับและส่งสัญญาณวิทยุโดยการใช้สายอากาศอย่างน้อยสองต้น คือ ใช้สายอากาศหนึ่งต้นสำหรับเป็นสายอากาศภาคส่ง และใช้สายอากาศอีกหนึ่งต้นสำหรับเป็นสายอากาศภาครับเพื่อให้แยกภาครับกับภาคส่งออกจากกันซึ่งจะช่วยให้ทำการสื่อสารเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง

ความท้าทายของการออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางมีด้วยกัน 3 ประเด็นหลักๆ คือ ประเด็นแรกเรื่องการจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (self interference) เพื่อลดระดับสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบที่ภาครับโหนดเดียวกัน ซึ่งเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการออกไป เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวเป็นอุปสรรคสำคัญยิ่งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการถอดรหัสสัญญาณที่ภาครับและอาจส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณขึ้น ดังนั้นวิธีการลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเองจึงมีรูปแบบการจัดสัญญาณอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ดังนี้ การจัดสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog Cancellation) หรือการจัดในส่ง RF-Front End และการกำจัดสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Cancellation)

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการคือ ประการแรกต้องคำนึงถึงความละเอียดที่ใช้ในการแปลงรหัสสัญญาณจากสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ภาครับ ประการที่สองคือ ช่วงความถี่สัญญาณที่แน่นอนที่รับได้ ประการสุดท้ายคือ ระดับสัญญาณแทรกสอดที่ต้องการกำจัดออกไปจากระบบที่ส่งผลในภาครับ ประเด็นที่สองคือ การออกแบบโดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวและมีจุดป้อนสัญญาณจุดเดียวในการรับและส่งสัญญาณโดยใช้เซอร์คูลเลเตอร์ (Circulator) ในการทำหน้าที่ช่วยแยกสัญญาณภาครับและภาคส่งออกจากกันเพื่อให้สามารถทำการรับและส่งสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน ประเด็นสุดท้ายคือการใช้ความถี่เดียวกันในการรับและส่งสัญญาณวิทยุด้วยระบบสื่อสารแบบสองทางผ่านช่องสัญญาณเดียว (Single Channel) เพราะเมื่อไม่นานมานี้ได้มีงานวิจัยชิ้นหนึ่ง ได้นำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างระบบสื่อสารแบบสองทางให้สามารถรองรับการรับและส่งสัญญาณวิทยุได้พร้อมๆ กัน โดยใช้ความถี่เดียวกันให้สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณเดียวกันได้ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอการออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้สายอากาศอย่างน้อย 3 ต้นคือ โหนดหนึ่งจะประกอบด้วยสายอากาศภาคส่งจำนวน 2 ต้น และสายอากาศภาครับจำนวน 1 ต้น และยังสามารถนำเสนอเทคนิคในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของ

ตนเองถึง 3 เทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคการกำจัดด้วยสายอากาศ (Antenna Cancellation) เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ (RF Interference Cancellation) และเทคนิคการกำจัดแบบดิจิทัล (Digital Cancellation) พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบการสื่อสารแบบสองทางได้ดีขึ้น มีข้อดีคือ มีค่าวิสัยความสามารถของการส่งข้อมูล(Throughput) เป็นสองเท่าของระบบการสื่อสารแบบทั้งสองทาง ลดปัญหาการชนกันของข้อมูล ลดการหน่วงที่ปลายสาย (End-to-End Delay) ในข่ายงาน และต่อมาแม้ว่าจะมีการพัฒนางานวิจัยด้วยวิธีการใหม่ๆ เพื่อลดจำนวนสายอากาศลงแต่ส่วนใหญ่แล้วยังคงลดลงเหลือได้เพียงสองด้านเท่านั้นซึ่งปัญหาในการใช้สายอากาศสองด้านคือ มีข้อจำกัดด้านการจัดวางสายอากาศที่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่ง ขนาดของสัญญาณรบกวนที่ไม่มีความแน่นอน ด้านเทคนิคยังคงใช้การกำจัดแบบแอนะล็อกเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยใช้สายอากาศ 3 ด้านกับระบบโมโม 3x3 พบว่าในขณะที่มีการออกแบบระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้สายอากาศ 3 ด้านสามารถเพิ่มค่าวิสัยความสามารถของการส่งข้อมูลได้สองเท่าแต่ระบบโมโมเพิ่มค่าวิสัยความสามารถของการส่งข้อมูลได้ถึงสามเท่า ซึ่งยังมีข้อจำกัดด้านแถบความถี่ (Bandwidth) ซึ่งสนับสนุนได้เพียงแถบความถี่กว้าง (Wideband) เท่านั้น สุดท้ายคือ ไม่สามารถปรับแต่งสัญญาณแบบอัตโนมัติได้

จากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มียานวิจัยขึ้นไหนที่ทำการออกแบบระบบการสื่อสารแบบสองทางด้วยการใช้สายอากาศเพียงด้านเดียวที่มีจุดป้อนสัญญาณเดียวที่สามารถทำการรับและส่งสัญญาณด้วยความถี่เดียวกันในเวลาเดียวกันได้ประกอบกับการใช้เซิร์ฟเวอร์ในการช่วยทำหน้าที่ในการแยกภาครับและภาคส่งออกจากกัน ประเด็นที่สำคัญคือ การใช้วิธีการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองโดยอาศัยหลักการกำจัดแบบดิจิทัล เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการรับและส่งข้อมูลให้มีความถูกต้องมีผลกระทบต่อภาคน้อยที่สุดในการรวมวิธีที่ดีกว่าเดิม ในขณะที่อยู่ภายใต้การแทรกสอดจากสัญญาณที่รั่วไหล (Leak) มาจากภาคส่ง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จะนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดแบบดิจิทัลร่วมกับการกำจัดสัญญาณแทรกสอดแบบแอนะล็อกมาเพื่อช่วยแก้ปัญหาเรื่องการลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเอง โดยคาดหวังให้มีระบบการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุที่สามารถทำการสื่อสารแบบสองทางมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างเครื่องรับส่งสื่อสารแบบสองทาง โดยใช้สายอากาศด้านเดียวที่มีการป้อนสัญญาณตำแหน่งเดียวทำหน้าที่ในการรับและส่งสัญญาณได้ในเวลาเดียวกันบนช่องสัญญาณเดียวกันโดยใช้เซิร์ฟเวอร์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยทำหน้าที่ในการแยกภาครับและภาคส่งออกจากกัน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การใช้สายอากาศชุดเดียวที่จะทำให้สามารถแยกสัญญาณภาครับและภาคส่งออกจากกันได้นั้นต้องอาศัยเซอร์คูเลเตอร์

1.3.2 การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองโดยใช้สายอากาศชุดเดียวของระบบสื่อสารสองทางจะสามารถทำได้ เมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณแบบดิจิทัลร่วมกับการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยแอนะล็อก

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 สายอากาศที่ใช้มีจำนวน 1 ดันทำหน้าที่เป็นทั้งสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับในดันเดียวกันเพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

1.4.2 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ในการจำลองแบบ (Simulation) เพื่อเปรียบเทียบการลดลงของสัญญาณแทรกสอดของตนเองหลังจากที่ได้ทำการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยวิธีแบบดิจิทัล

1.4.3 ดันแบบชุดทดสอบใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์เพื่อช่วยจัดการในส่วนซอฟต์แวร์

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาหลักการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารสองทางที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันและใช้สายอากาศดันเดียวสำหรับรับส่งสัญญาณพร้อมๆ กัน

1.5.2 การรับและส่งสัญญาณระยะทางจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1.5.3 ใช้โปรแกรมเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ในการเก็บข้อมูล

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาหลักการทํางานรวมถึงทฤษฎีการสื่อสารสองทาง
- 3) ศึกษาหลักการทํางานรวมถึงทฤษฎีการกําลังสัญญาณแทรกสอดของตนเองด้วยเทคนิคการกําลังสัญญาณแบบดิจิทัลและเทคนิคการกําลังสัญญาณแบบแอนะล็อก
- 4) ศึกษาหลักการทํางานรวมถึงทฤษฎีการทํางานของเซอร์คิวเลเตอร์ (Circulator)
- 5) ทํากาลจำลองแบบการทดลองสมรรถนะของการกําลังสัญญาณแทรกสอดของตนเองโดยใช้เทคนิคการกําลังสัญญาณแบบดิจิทัลในระบบการสื่อสารแบบสองทาง
- 6) ทดสอบวัดสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบการสื่อสารสองทาง
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้ในทางปฏิบัติและการจำลองแบบ

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัยเป็นงานวิจัยประยุกต์ซึ่งดำเนินการตามกรอบงาน

- 1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสํารวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ทดสอบสมรรถนะของระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้การลดระดับของสัญญาณแทรกสอดของตนเองด้วยการกําลังสัญญาณแบบดิจิทัลโดยเขียนโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB)
- 3) ทํากาลกำหนดรูปแบบสัญญาณเพื่อนําผลของสัญญาณภาครับและภาคส่งมาทํากาลเปรียบเทียบกันโดยการนํามาพิจารณาสมรรถนะของระบบในทางปฏิบัติ
- 4) ทํากาลวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในข้อ 2. และ 3. รวบรวมข้อมูลเพื่อเขียนเป็นรายงาน

1.6.3 สถานที่ทํากาลวิจัย

ห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม อาคารศูนย์เครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer)
- 2) โปรแกรมเฉพาะทางวิศวกรรม เช่น โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB)
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer)
- 4) อุปกรณ์จ่ายไฟ (power supply)
- 5) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM)
- 6) เครื่องกำเนิดสัญญาณวิทยุ (RF signal generator)
- 7) เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (spectrum analyser)

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลระบบการสื่อสารสองทาง จากการสำรวจประสิทธิภาพการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บผลการทดลองที่ได้จากการจำลองแบบสมรรถนะอัตราความผิดพลาดบิต โดยการเปรียบเทียบสัญญาณจากภาครับและภาคส่ง

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลของสมรรถนะของระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้เทคนิควิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลร่วมกับการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบแอนะล็อกโดยการสร้างแบบจำลองนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดสัญญาณจริง โดยข้อมูลที่ได้จากผลทั้งจะใช้ในการวิเคราะห์และสรุป

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีในการสร้างระบบสื่อสารแบบสองทาง โดยใช้สายอากาศประเภทใดก็ได้เพียงคนเดียวในการทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณได้ในเวลาเดียวกันซึ่งใช้เซอร์คิวเลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยทำหน้าที่แยกภาครับและภาคส่งออกจากกัน

1.8 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ ประวัติความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัยสมมติฐานของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 หลักการสื่อสารแบบสองทาง ซึ่งประกอบด้วย ระบบสื่อสารไร้สาย และสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับและรับสำหรับระบบสื่อสารแบบสองทาง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบและการจำลองแบบ รวมทั้งวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการจำลองแบบเพื่อพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสารทั้งรับและส่งพร้อมๆ กัน โดยใช้สายอากาศต้นเดียวเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารแบบสองทางระบบเดิม

บทที่ 4 เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ เป็นการกล่าวถึงองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีดังกล่าว

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบระบบจริง โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่มีการใช้สายอากาศต้นเดียวในการสื่อสารแบบสองทางโดยผ่านช่องสัญญาณเดียวเทียบกับระบบเดิมที่ใช้สายอากาศสองต้นในการสื่อสารแบบสองทางโดยผ่านสองช่องสัญญาณ ผลการทดลองทั้งในส่วนของการทดสอบการจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ ส่วนของทดสอบระบบด้วยดิจิทัล และการทดสอบระบบเมื่อนำการจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุร่วมกับการจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล รวมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผล โดยอ้างอิงผลของการจำลองแบบและผลของชุดทดสอบ นอกจากนี้ยังรวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2

หลักการสื่อสารแบบสองทาง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ผู้เขียนจะได้กล่าวถึงหลักการสื่อสารแบบสองทางซึ่งประกอบด้วย ระบบการสื่อสารไร้สาย สัญญาณแทรกสอดสอดที่เกิดจากการใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับและส่งคลื่นวิทยุ ปรีทศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เทคนิคที่ช่วยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ซึ่งเนื้อหาดังที่กล่าวข้างต้นเหล่านี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญ สำหรับการออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

2.2 ระบบการสื่อสารไร้สาย

ระบบการสื่อสารไร้สาย คือ เทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารที่สามารถส่งถ่ายข้อมูลไปยังผู้รับโดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณ โดยมีจุดเริ่มต้นมาจากแนวคิดของ เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) นักฟิสิกส์ชาวสหราชอาณาจักรในช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 1860 โดยได้นำเสนอผลงานในรูปสมการทางคณิตศาสตร์หรือที่เรียกว่าสมการแมกซ์เวลล์ แต่ผลงานนี้เป็นเพียงสูตรคณิตศาสตร์ที่มีเอกลักษณ์โดดเด่นเพียงเท่านั้น จนกระทั่งมาถึงปี ค.ศ. 1880 ไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ทำการสาธิตการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งการสร้างและการตรวจจับสัญญาณในระดับห้องปฏิบัติการจนเป็นผลสำเร็จ ซึ่งอาศัยความรู้จากสมการของแมกซ์เวลล์ โดยช่วงต้นคริสต์ทศวรรษที่ 1890 นั้นนักวิทยาศาสตร์ในหลายๆ ประเทศได้ให้ความสนใจกับการทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เช่นกัน หนึ่งในจำนวนนั้นคือ กูเกียเอล โม มาร์โคนี (Guglielmo Marconi) นักวิทยาศาสตร์ชาวไอริชอิตาลี ผู้ซึ่งได้นำเสนอเครื่องมือสำหรับการสร้างสัญญาณไร้สายขึ้นในปี ค.ศ. 1896 หลังจากนั้นระบบสร้างสัญญาณไร้สายด้วยคลื่นวิทยุจึงสามารถส่งสัญญาณครอบคลุมระยะทางได้ไกลหลายร้อยไมล์ และที่สำคัญถัดมาคือ มาร์โคนี สามารถทำการรับสัญญาณดังกล่าวที่ส่งจากเกาะอังกฤษข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกมายังเกาะนิวฟันด์แลนด์ (Newfoundland) ทวีปอเมริกาเหนือได้เป็นผลสำเร็จ

ระบบการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุในยุคแรกๆ นั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการส่งและรับสัญญาณมีขนาดค่อนข้างใหญ่มาก อีกทั้งยังมีปัญหาในเรื่องของเทคนิคการปรับจูนความถี่ของสัญญาณให้ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับ รวมถึงปัญหาใหญ่อีกประการหนึ่งคือ เรื่องของการ

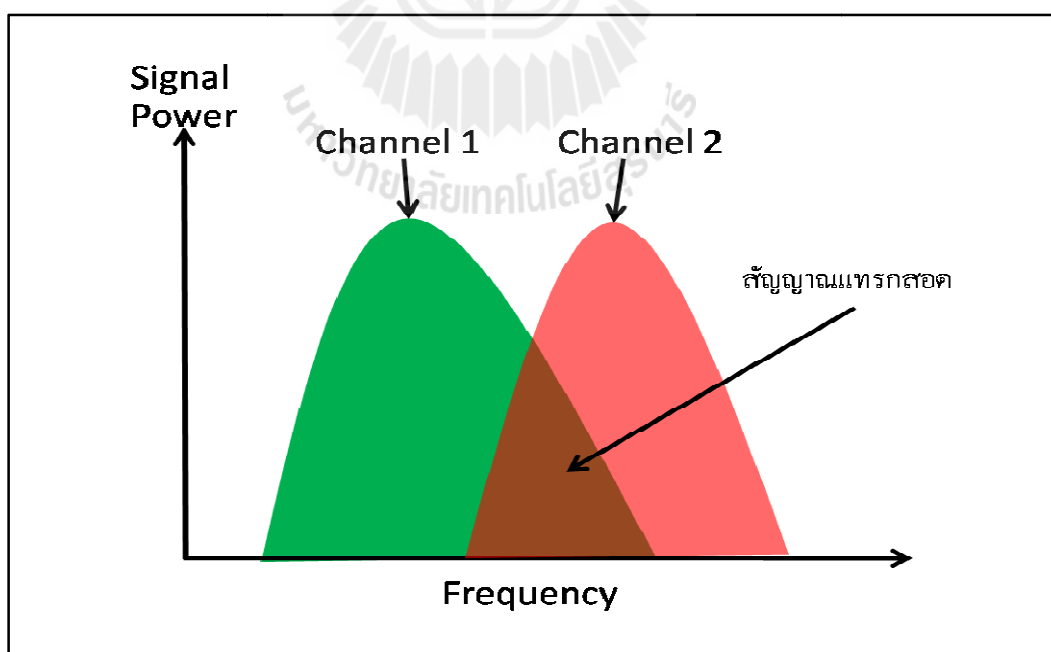
แทรกสอดกันหรือการรบกวนกันของสัญญาณต่างๆ จากสถานีอื่นที่มีอยู่จำนวนมาก ด้วยปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาการสื่อสารดำเนินมาอย่างต่อเนื่องและมีความสำคัญมากขึ้น

2.3 สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณของระบบสื่อสารรบกวนกันเอง

สัญญาณแทรกสอดบางประเภทก็เกิดจากสัญญาณของระบบสื่อสารแทรกสอดกันเอง โดยคลื่นเหล่านี้แพร่กระจายออกมาทำให้สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพที่แย่หรือด้อยลงไป มีทั้งเกิดขึ้นแบบตั้งใจและไม่ได้ตั้งใจส่วนมากจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การแทรกสอด หรือ การรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงและการรบกวนจากช่องสัญญาณเดียวกัน

2.3.1 สัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณข้างเคียง

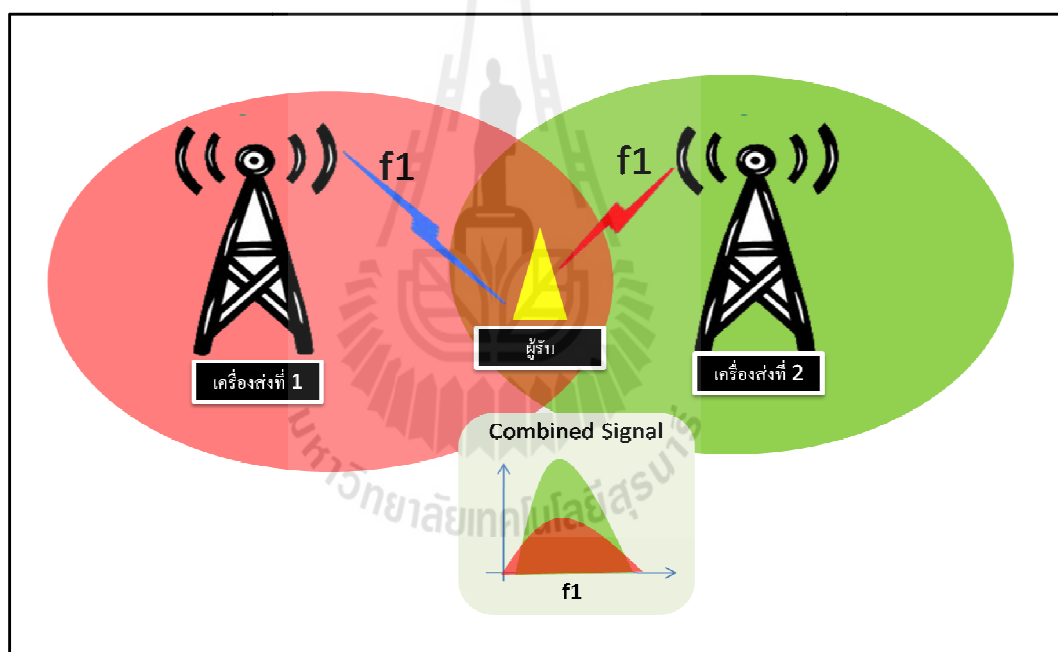
สัญญาณแทรกสอดสอดจากช่องสัญญาณข้างเคียง เกิดขึ้นจากการออกอากาศของสัญญาณวิทยุหนึ่งจะเกิดจากความถี่อื่นๆ รอบความถี่หลัก แม้ว่าความถี่ดังกล่าวจะมีความแรงของสัญญาณไม่มาก แต่เมื่อความถี่ของช่องสัญญาณทั้งสองอยู่ใกล้กันมากๆ ก็จะมีการแทรกสอดสัญญาณกันได้ ข้อมูลของสัญญาณที่อยู่ในช่วงสเปกตรัมของสัญญาณช่วงที่จะเกิดการแทรกสอดของสัญญาณกันขึ้นนั้นจะไม่สามารถแยกแยะออกมาได้ส่งผลทำให้ภาครับไม่อาจทำการรับสัญญาณที่ต้นทางได้ หรือ รับได้บ้างไม่ได้บ้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณข้างเคียง

2.3.2 สัญญาณแทรกสอดของตนเองในช่องสัญญาณเดียวกัน

การแทรกสอดของสัญญาณในช่องสัญญาณเดียวกัน เป็นการแทรกสอดของสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อมีเครื่องส่ง 2 เครื่องทำการส่งสัญญาณออกอากาศที่ความถี่เดียวกัน และเครื่องรับอยู่ในบริเวณที่สามารถรับสัญญาณจากเครื่องส่งทั้งสองได้ คลื่นจากสัญญาณที่ได้รับจากสถานีทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดของสัญญาณกันเองเกิดขึ้น โดยภาครับจะรับสัญญาณได้ขาดๆ หายๆ บางครั้งก็รับสัญญาณได้จากเครื่องส่งเครื่องแรกในทางกลับกันบางครั้งก็รับสัญญาณได้จากเครื่องส่งเครื่องที่สองขึ้นอยู่กับว่าบริเวณตำแหน่งที่ภาครับอยู่และกำลังส่งของสถานีนั้นว่าใครจะสามารถส่งสัญญาณได้แรงกว่ากัน โดยระบบการสื่อสารแบบนี้จะเกิดปัญหาความล่าช้าในการรับและส่งสัญญาณเกิดขึ้นและอาจส่งผลต่อการนำสัญญาณที่ได้รับมาประมวลผลซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



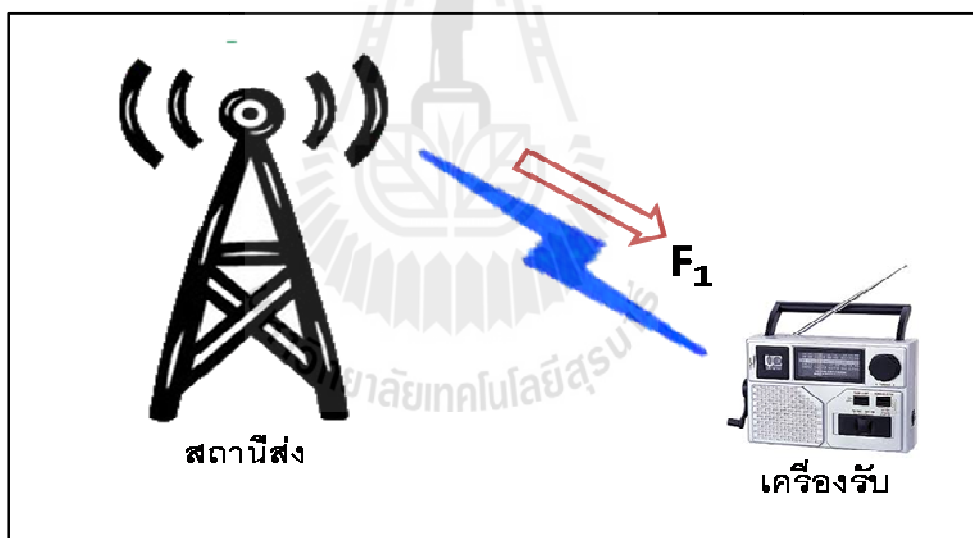
รูปที่ 2.2 การรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกันที่เกิดจากสถานีข้างเคียง

2.4 ประเภทการรับและส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ

รูปแบบของการสื่อสารในการรับและส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุมีเป้าหมายคือ การสื่อสารข้อมูลข่าวสารซึ่งสามารถประยุกต์การใช้งานได้หลากหลายประเภท ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับเป้าหมายหลักที่ต้องการโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.4.1 ระบบการสื่อสารแบบทางเดียว (Simplex)

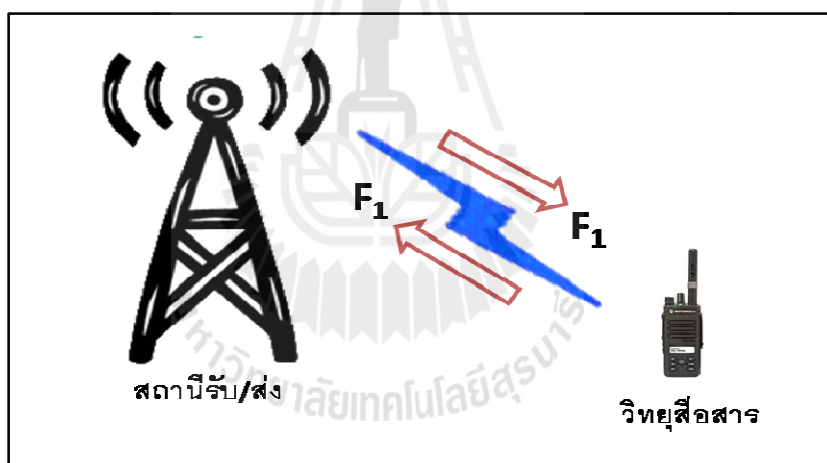
ระบบการสื่อสารทางเดียวจะใช้ช่องสัญญาณเดียวในการส่งสัญญาณวิทยุ โดยในระบบนี้สามารถทำการส่งสัญญาณวิทยุออกไปได้โดยไม่มีการรบกวนจากผู้รับ ซึ่งหมายความว่าผู้ส่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปอย่างเดียวและที่ภาครับผู้รับก็มีทำหน้าที่รับเพียงอย่างเดียวโดยไม่สามารถส่งสัญญาณวิทยุตอบโต้กันไปได้มา วิธีนี้จะไม่มีความซับซ้อน โดยมีเป้าหมาย คือ ส่งข้อมูลออกไปในทิศทางเดียวจะเห็นได้ว่าวิธีนี้จะไม่มีความเป็นธรรมชาติในการติดต่อสื่อสาร เนื่องจากไม่สามารถโต้ตอบกันได้ระหว่างผู้ส่งและผู้รับซึ่งหมายความว่าภาครับจะมีหน้าที่ในการรอรับคลื่นสัญญาณที่ผู้ส่งทำการส่งสัญญาณออกมาเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการสื่อสารทางเดียว

2.4.2 ระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทาง (Half Duplex)

ระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อด้อยของระบบการสื่อสารทางเดียว ซึ่งผู้รับไม่สามารถที่จะตอบโต้กลับใดๆ ได้กับภาคส่งเพียงแค่เป็นผู้รับฝ่ายเดียว ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงระบบติดต่อสื่อสารใหม่โดยให้ผู้รับสามารถส่งสัญญาณกลับไปหาผู้ส่งได้ ซึ่งระบบการสื่อสารแบบกึ่งสองทางก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ช่วยสื่อสารระหว่างทั้งสองระบบได้สื่อสารตอบโต้ตอบกันได้ เพราะต่างก็สามารถส่งและรับสัญญาณกันได้ และเพื่อช่วยให้ใช้ช่องทางการความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไปด้วยจึงต้องมีการสลับกันส่งและรับสัญญาณคลื่นวิทยุ โดยต้องให้ฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งหยุดส่งสัญญาณก่อนอีกฝ่ายหนึ่งจึงจะสามารถส่งสัญญาณได้ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ เพราะระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางมีการใช้ช่องสัญญาณความถี่ร่วมกันทั้งรับและส่ง หากมีการส่งสัญญาณพร้อมกัน คลื่นที่ถูกส่งออกมาก็จะชนกันในอากาศกลายเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถตีความได้หรือนำมาถอดรหัสเพื่อประมวลผลสัญญาณที่ได้รับในภาครับไม่ได้นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

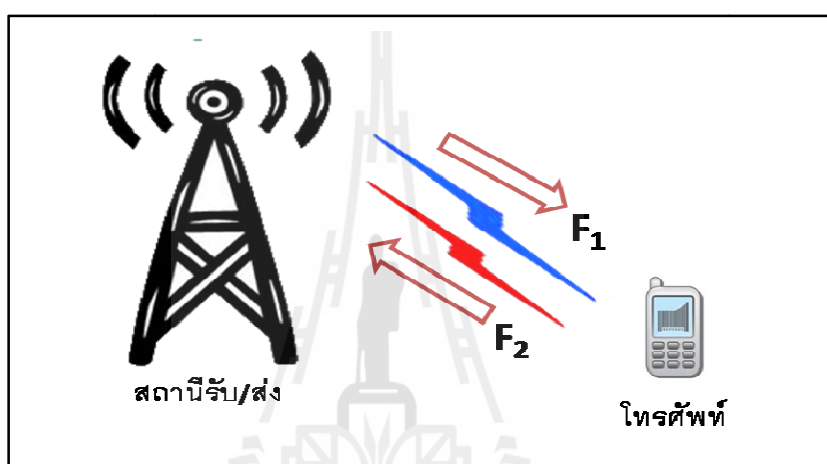


รูปที่ 2.4 แผนภาพการสื่อสารแบบกึ่งสองทาง

2.4.3 ระบบสื่อสารแบบสองทาง (Full Duplex)

แม้ว่าระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางจะสามารถทำให้สามารถรับและส่งสัญญาณตอบโต้กันได้ นั่น แต่ก็มีปัญหาคือ ไม่สามารถที่จะทำการส่งและรับสัญญาณตอบโต้กันพร้อมๆ กันในเวลาเดียวกันได้ และไม่มีความเป็นธรรมชาติในการสื่อสารเนื่องจากต้องรอหรือเว้นช่วงระยะเวลาหนึ่งให้ฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งหยุดการส่งข้อมูลก่อนแล้วจึงจะสามารถส่งข้อมูลข่าวสารหรือสัญญาณวิทยุได้ตอบกลับได้ ซึ่งวิธีการเดิมๆ ไม่สามารถทำได้ จึงได้มีการปรับปรุงระบบสื่อสารให้

สามารถรองรับการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุได้พร้อมๆ กัน เรียกระบบดังกล่าวว่าระบบสื่อสารสองทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 วิธีการนี้จะต้องแบ่งช่องสัญญาณความถี่ในการสื่อสารคลื่นความถี่ออกเป็นสองช่องสัญญาณความถี่ด้วยกัน โดยแต่ละช่องความถี่จะถูกแบ่งการใช้งานช่องหนึ่งสำหรับส่งสัญญาณของภาคส่งและอีกช่องสัญญาณหนึ่งจะใช้สำหรับภาครับ ข้อดีของวิธีนี้ทำให้การสื่อสารเป็นธรรมชาติมากขึ้น สามารถตอบโต้กันได้ทันที แต่มีข้อเสียคือ สิ้นเปลืองการใช้งานช่องความถี่ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและจำเป็นต้องใช้ถึงสองช่องความถี่ด้วยกัน ดังตัวอย่างที่พบเห็นในชีวิตประจำวันเช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



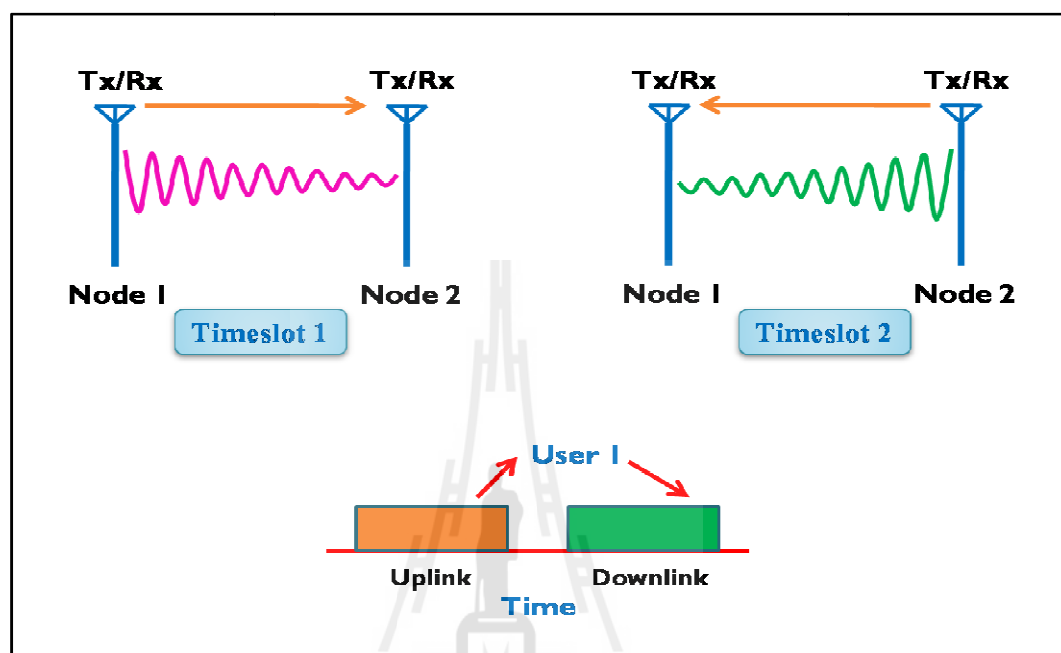
รูปที่ 2.5 แผนภาพการสื่อสารแบบสองทาง

2.4.3.1 ระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้สองช่องสัญญาณในการสื่อสาร

ระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้สองช่องสัญญาณในการรับส่งสัญญาณพร้อมๆ กันนั้นสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1 การสื่อสารรับส่งข้อมูลพร้อมๆ กันโดยใช้การแบ่งช่องสัญญาณเวลานั้น หรือเรียกว่า TDD (Time Division Duplex) คือ การรับและส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นกับด้านขาลงโดยใช้แถบความถี่เดียวกันในการรับและส่งสัญญาณข่าวสารและมีการจัดสรรช่องสัญญาณความถี่ในการรับและส่งข้อมูลในช่วงเวลาที่ต่างกัน การส่งข้อมูลจะมีการเปลี่ยนสลับช่องสัญญาณไปมาในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อให้การสื่อสารเป็นอย่างธรรมชาติ สำหรับการส่งสัญญาณนั้นจะถูกแบ่งช่วงเวลาออกเป็นเฟรมและในแต่ละเฟรมนั้นจะมีการแบ่งช่วงเวลาย่อยเป็นสองเฟรมย่อย การส่งข้อมูลในทิศทางขาขึ้นจะถูกส่งในช่วงเวลาเฟรมย่อยขาขึ้น ขณะที่การส่งข้อมูลทิศทางขาลง ส่งในช่วงเวลาเฟรมย่อยขาลง ดังนั้น TDD สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาเฟรม

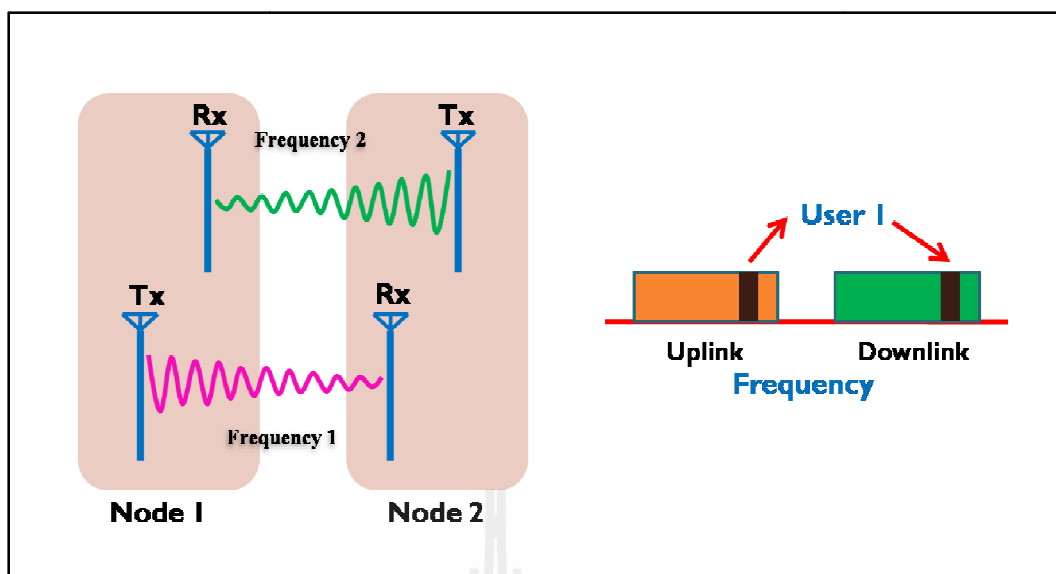
ได้คือ สัดส่วนช่วงเวลาของเฟรมย่อยขาขึ้นกับเฟรมย่อยขาลง มีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับปริมาณทราฟฟิกของสัญญาณขาขึ้นและขาลง ดังนั้น TDD จึงมีความยืดหยุ่นในการจัดการแบนด์วิดท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



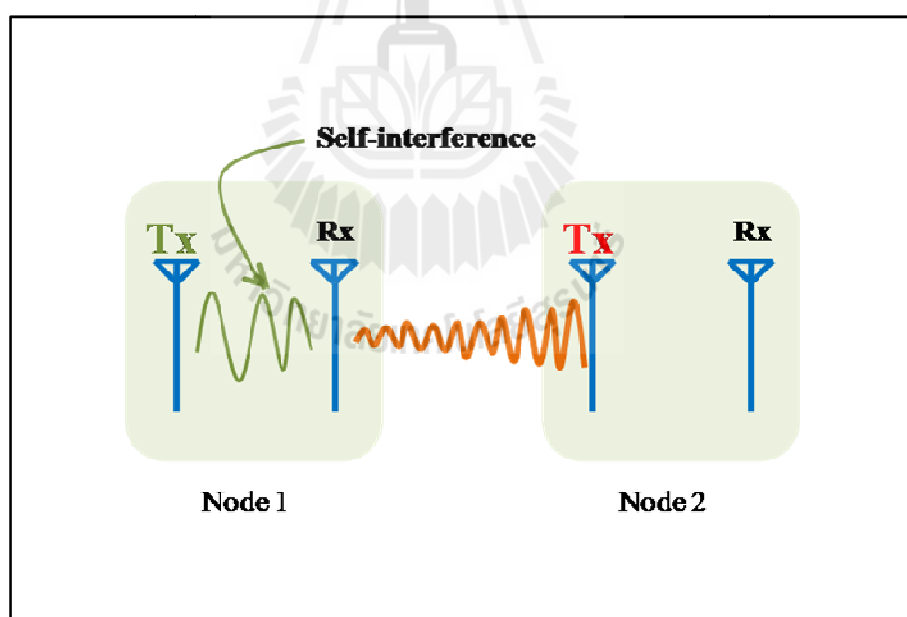
รูปที่ 2.6 ระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ TDD (Time Division Duplex)

สำหรับระบบสองช่องสัญญาณความถี่ในการสื่อสารรับส่งพร้อมๆ กัน

รูปแบบที่ 2 การสื่อสารรับส่งข้อมูลโดยใช้การแบ่งช่องสัญญาณความถี่สำหรับสื่อสารข้อมูลพร้อมๆ กัน หรือ เรียกว่า FDD (Frequency Division Duplex) คือ การส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นกับขาลงนั้นจะส่งในเวลาเดียวกัน แต่แบ่งกันส่งคนละช่องสัญญาณความถี่ นอกจากนี้ FDD ยังรองรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่เป็นแบบ Half-FDD คืออุปกรณ์ลูกข่ายจะทำการส่งข้อมูลและรับข้อมูลคนละช่วงเวลากันขณะที่อุปกรณ์ลูกข่ายกำลังส่งข้อมูลจะไม่สามารถรับข้อมูลได้แต่การส่งและรับข้อมูลยังใช้คนละความถี่กันการใช้รูปแบบ Half-FDD อุปกรณ์จะมีราคาถูกกว่า Full-FDD เพราะส่วนประกอบภาครับสัญญาณกับภาคส่งสัญญาณของอุปกรณ์สามารถใช้ชุดเดียวกันร่วมกันได้ภายในเฟรมของทั้ง TDD และ FDD จะมีการแบ่งย่อยออกเป็น time slot ซึ่งการส่งข้อมูลของทั้งสถานีฐานและสถานีลูกข่ายจะต้องส่งตรงตาม time slot ที่ว่านี้ ดังนั้นทั้งสถานีฐานและสถานีลูกข่ายจะต้องมีการตั้งเวลาให้ตรงกัน เพื่อให้ส่งข้อมูลลงใน time slot เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



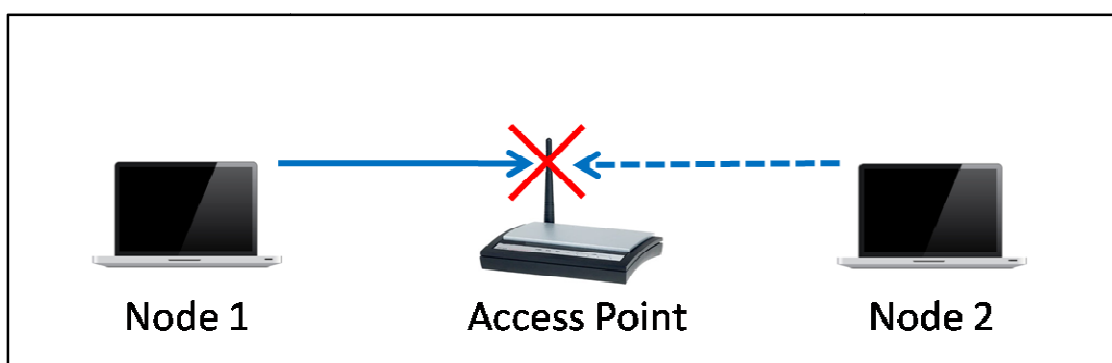
รูปที่ 2.7 ระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ FDD (Frequency Division Duplex)
สำหรับระบบสองช่องสัญญาณความถี่ในการสื่อสารรับส่งพร้อมๆ กัน



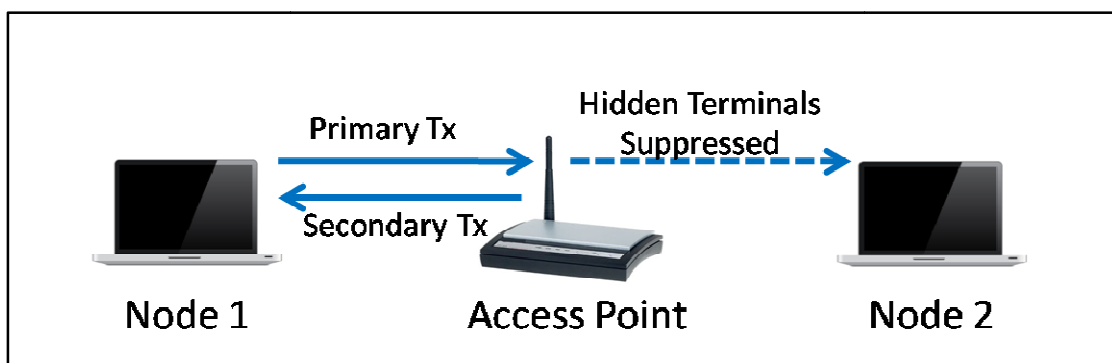
รูปที่ 2.8 ผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self-Interference) ของระบบ
การสื่อสารแบบสองทางผ่านช่องสัญญาณเดียวสำหรับการสื่อสารรับส่งพร้อมๆ กัน

2.4.3.2 ระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสาร

พื้นฐานในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายโดยทั่วไปแล้วจะไม่สามารถทำการรับและส่งคลื่นวิทยุได้พร้อมๆ กัน โดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกันได้ ดังมีคำกล่าวของ Andrea Goldsmith ที่ได้เขียนไว้ในตำราทางวิชาการที่เกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายมีใจความสำคัญว่า “โดยทั่วไปแล้วเป็นไปได้สำหรับระบบวิทยุที่จะทำการรับและส่งบนแถบความถี่เดียวกันเนื่องจากผลลัพธ์ของสัญญาณแทรกสอด ฉะนั้น ระบบการสื่อสารสองทางควรต้องแยกช่องสัญญาณขาขึ้นและช่องสัญญาณขาลง โดยเลือกวิธีการดำเนินการแบบแบ่งช่วงเวลา หรือ แบบช่องความถี่สำหรับสัญญาณที่สื่อสาร” ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อโหนด 1 และ โหนด 2 พยายามที่จะส่งข้อมูลข่าวสารพร้อมๆ กันโดยใช้ความถี่เดียวกัน จะพบว่าจะเกิดสัญญาณที่ย้อนกลับเข้ามารบกวนในระบบของตนเองเกิดขึ้น เรียกว่า สัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self Interference) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการรับ ด้วยปัญหาดังกล่าวถ้าเรามีการจัดการ หรือใช้เทคนิคที่เหมาะสมช่วยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด จะทำให้เราสามารถทำการรับส่งข้อมูลได้โดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับส่งข้อมูลได้ ซึ่งมีข้อดีคือ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้สามารถส่งข้อมูลได้สูงขึ้น เพิ่มค่าวิสัยความสามารถส่งผ่านข้อมูลได้เป็นสองเท่า ลดปัญหาความล่าช้าจากการรับส่งสัญญาณ เนื่องมาจากการชนกันของข้อมูล เมื่อโหนดสองโหนดส่งสัญญาณมาพร้อมๆ กัน เมื่อมาถึงภาครับเป้าหมายจะส่งผลให้ภาครับดังกล่าวรับข้อมูลเข้ามาขาดๆ หายๆ หรือรับได้บ้างไม่ได้บ้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณว่าสัญญาณที่รับเข้ามาสัญญาณที่ได้รับมาจากโหนดไหนแรงกว่ากัน แม้ว่าสัญญาณอีกโหนดจะมีสัญญาณอ่อนมากก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และปัญหา Hidden terminal หรือสถานีอำพราง ซึ่งเป็นสถานีที่เราไม่ทราบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

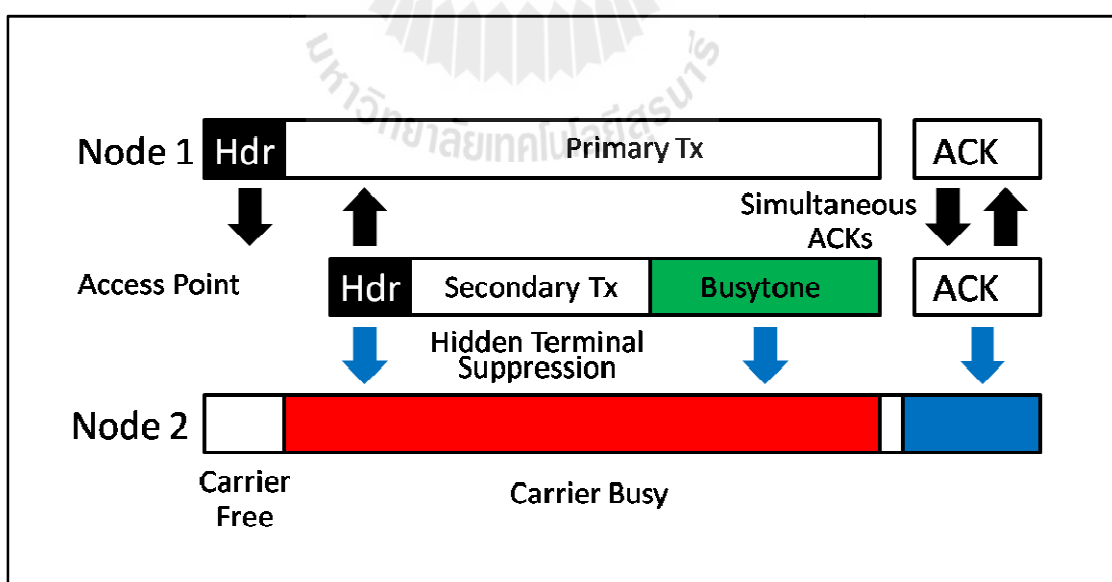


รูปที่ 2.9 แสดงการชนกันของข้อมูลขณะทำการรับส่งข้อมูลพร้อมๆ กัน



รูปที่ 2.10 ผลกระทบของการสื่อสารแบบสองทางที่เกิดจากสถานีอำพราง (Hidden Terminals)

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อโหนดที่ 2 ทำการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดที่ 1 ขณะเดียวกันนั้นโหนดที่ 1 ก็ต้องรอให้โหนดที่ 2 ทำการส่งข้อมูลแพ็คเกจเสร็จก่อนถึงจะทำการส่งข้อมูลได้ตอบกลับได้ เนื่องจากหากว่าทำการส่งสัญญาณพร้อมๆ กันจะส่งผลทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลในระบบสื่อสารที่ใช้ความถี่เดียวกันในการรับส่งข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกัน จากผลกระทบของปัญหาดังกล่าวจึงมีการใช้ busytone เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา เมื่อไรก็ตามโหนดที่ทำหน้าที่ในการส่งแพ็คเกจทำการส่งข้อมูลแล้วเสร็จก็จะทำการรอรับข้อมูลจนกระทั่งจบการติดต่อสื่อสาร



รูปที่ 2.11 แสดงการแลกเปลี่ยนแพ็คเกจในการสื่อสารแบบสองทาง

2.5 เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง

2.5.1 เทคนิคการกำจัดสัญญาณในส่วนแอนะล็อกหรือ RF-Front End

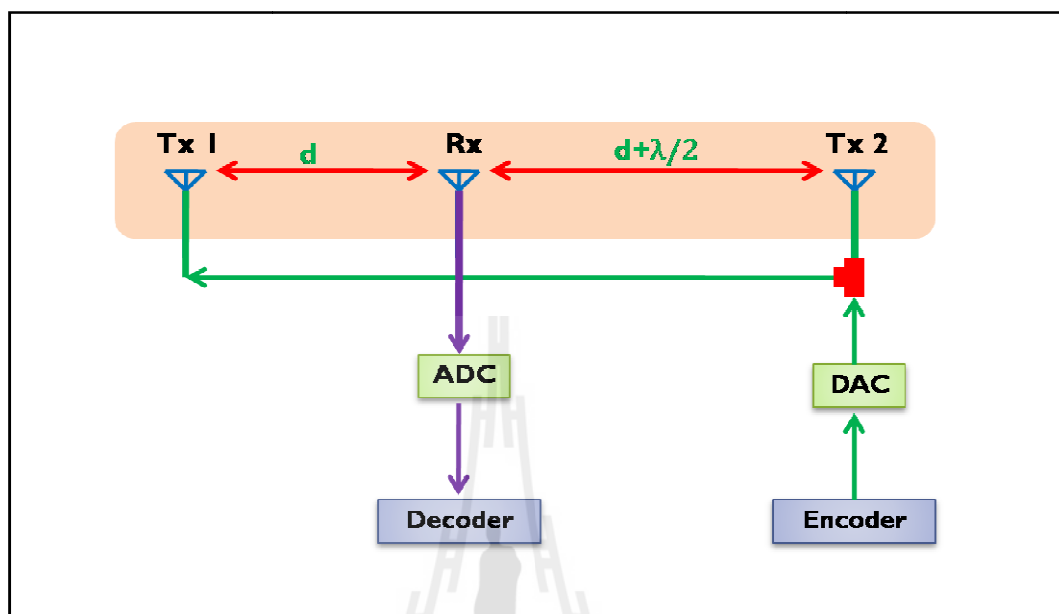
จากงานปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ทำการศึกษา เมื่อพิจารณาถึงหลักการออกแบบการกำจัดสัญญาณแทรกสอดในส่วนแอนะล็อกนั้นพบว่ามิงงานวิจัยที่ได้นำเสนอแนวคิดอยู่จำนวนไม่น้อยซึ่งแต่ละเทคนิคมีความซับซ้อนในการออกแบบวงจรแตกต่างกันไปแต่แนวคิดที่ใช้มีความคล้ายคลึงกันคือ มีความต้องการที่จะออกแบบวงจรให้สามารถปรับเฟสและขนาดของสัญญาณอ้างอิงทั้งสองสัญญาณในมีความต่างเฟสกันที่ π และมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่เท่ากันเพื่อให้สัญญาณถูกหักล้างกันเมื่อนำสัญญาณอ้างอิงดังกล่าวมารวมเข้าด้วยกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยสายอากาศ

เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยสายอากาศเป็นงานวิจัยที่ถูกนำเสนอโดย (Choi, J., et al., 2010) เทคนิคได้ใช้หลักการการปรับค่าเฟสของสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณที่ถูกส่งมาจากภาคส่งที่ทราบเพื่อนำมากำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยพื้นฐานของการดำเนินการของเทคนิคนี้คือ ในโหนดหนึ่งประกอบด้วยสายอากาศอย่างน้อยสามต้น โดยที่สายอากาศสองต้นทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและสายอากาศที่เหลืออีกหนึ่งต้นทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ โดยที่สายอากาศภาคส่งต้นที่หนึ่งจะถูกจัดวางห่างจากสายอากาศภาครับเป็นระยะทาง d และสายอากาศภาคส่งต้นที่สองจะถูกจัดวางห่างจากสายอากาศภาครับเป็นระยะทาง $d + \lambda / 2$ เมื่อความยาวคลื่นในการส่งคือ λ และระยะทางระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับคือ d สาเหตุที่จัดวางสายอากาศเช่นนี้เพื่อที่จะทำให้สัญญาณที่ถูกส่งออกจากสายอากาศภาคส่งทั้งสองมีเฟสที่ต่างกัน π เมื่อสัญญาณทั้งสองเดินทางมาถึงและถูกรวมเข้ากันที่ภาครับจะทำให้สัญญาณทั้งสองหักล้างกันได้อย่างสมบูรณ์หากมีขนาดของสัญญาณที่เท่ากัน

เทคนิคนี้ดูแม้จะมีประสิทธิภาพในการหักล้างสัญญาณที่ไม่ต้องการนั้นคือสัญญาณแทรกสอดในระบบสื่อสารแต่เทคนิคนี้ได้นำเสนอเพียงหลักการในการปรับค่าเฟสเท่านั้น การหักล้างจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อทำการปรับค่าการลดทอนหรือทำให้ขนาดสัญญาณแทรกสอดที่ขนาดของแอมพลิจูดที่เท่ากันด้วยสัญญาณอ้างอิงที่ทราบจึงจะถูกหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ด้วยข้อจำกัดของเทคนิคหลายๆ ด้านสามารถพิจารณาออกได้ 2 ประการด้วยกันคือ ประการแรกเรื่องการจัดวางสายอากาศที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากเมื่อใช้ช่องสัญญาณที่ต่างกันในการรับและส่งข้อมูลตำแหน่งในการจัดวางสายอากาศก็จะถูกเปลี่ยนแปลงไปด้วย ประการที่สองคือ ความเข้มของระดับสัญญาณในส่วนของสัญญาณที่สะท้อนกลับเข้ามาในระบบสื่อสารถ้ามีระยะทางที่มากเกินไปก็จะทำให้สัญญาณที่รับเข้ามามีระบบของสัญญาณที่ต่ำเนื่องจากการลดทอน สรุปได้ว่าเทคนิคนี้มี

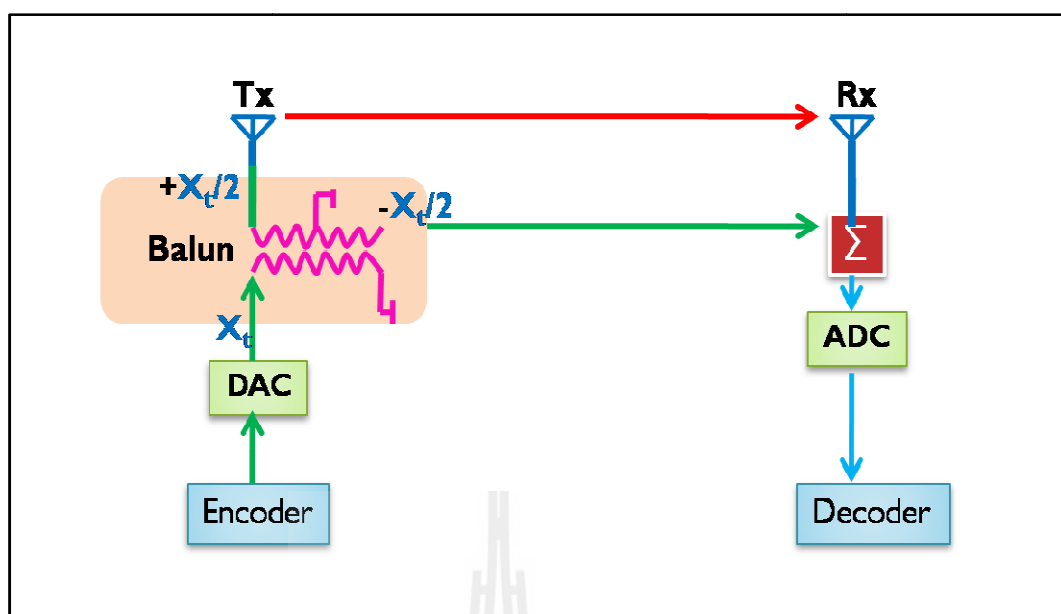
ข้อผิดพลาดและข้อจำกัดอยู่บ้าง ไม่ว่าจะเป็นความละเอียดอ่อนในด้านการออกแบบจัดวางซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา



รูปที่ 2.12 แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยสายอากาศ

- เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยบาลัน

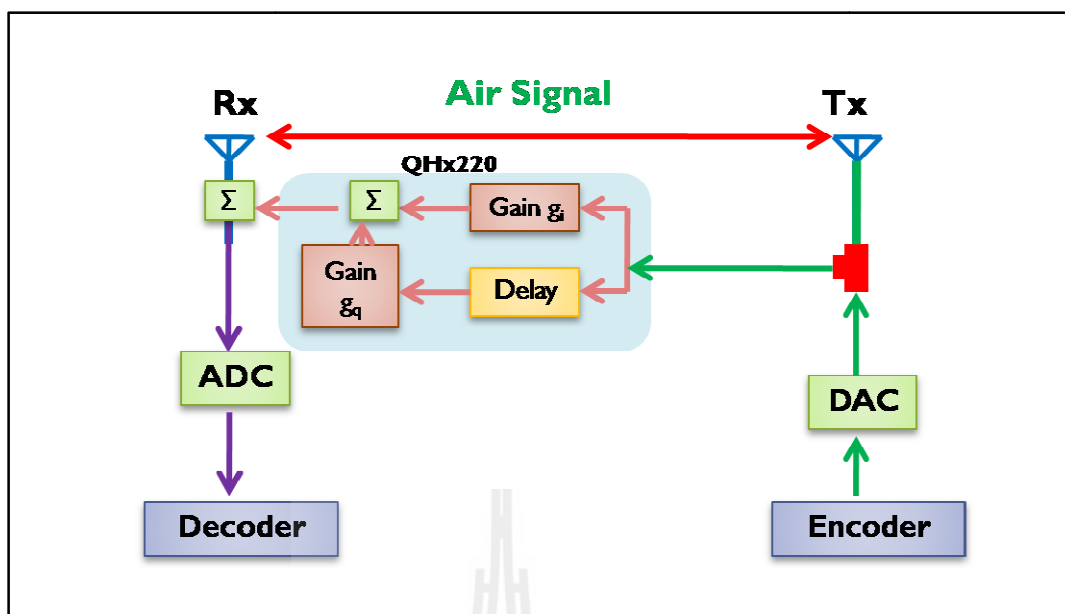
เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยบาลันเป็นงานวิจัยที่ถูกนำเสนอแนวความคิดโดย (Jain, M., et al., 2011) เทคนิคนี้ได้ใช้หลักการคือ อินพุตบาลันทำหน้าที่แบ่งกำลังคลื่นอินพุตออกมาเป็นสองเส้นทาง โดยที่เส้นทางทั้งสองจะต้องมีการกลับเฟสของทั้งสองส่วนให้ต่างกัน π เพื่อส่งไปขยายวงจรทั้งวงจรภาคส่งและวงจรภาครับ อินพุตบาลันจะประกอบด้วยพอร์ตทั้งหมดสามพอร์ตด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยที่พอร์ตที่ 1 เป็นพอร์ตด้านอินพุต เรียกว่าพอร์ตวอานบาลานซ์ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ส่วนพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นด้านเอาต์พุตเรียกว่า พอร์ตบาลานซ์ โดยทั้งสองพอร์ตนี้ต้องถูกสร้างให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 25 โอห์ม เอาต์พุตบาลันมีโครงสร้างคล้ายกับอินพุตบาลันแต่จะทำหน้าที่ในการรวมคลื่นวิทยุที่ถูกขยายโดยการขยายสัญญาณทั้งสองในเข้าด้วยกันใหม่อีกครั้งให้เป็นรูปคลื่นที่สมบูรณ์ และการแปลงค่าอิมพีแดนซ์จาก 25 โอห์ม จากพอร์ตอินพุตทั้งสองให้เป็น 50 โอห์มที่พอร์ตเอาต์พุต



รูปที่ 2.13 แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกด้วยบาลูน

- เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยวงจร QHx220

เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยวงจร QHx220 ซึ่งเป็นเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำเสนอบริษัท (Quellan Inc., 2009) วิธีการของวงจรคือ เมื่อภาคส่งทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุออกอากาศสัญญาณจะถูกแยกออกเป็นสองเส้นทางโดยเส้นทางแรกคือ เส้นทางที่ส่งสัญญาณออกอากาศ และสัญญาณเส้นที่สองจะเป็นเส้นทางรองจะเข้าตัววงจร เมื่อสัญญาณคลื่นวิทยุถูกส่งเข้าวงจรจะมีการแยกสัญญาณออกเป็นสองเส้นทางโดยเส้นทางแรกจะทำการปรับขนาดสัญญาณแทรกสอดลงโดยการปรับอัตราขยายให้กับสัญญาณหรือปรับการทดทอนให้กับสัญญาณโดยจะขึ้นกับสัญญาณอ้างอิง และเส้นทางที่สองจะทำการปรับขนาดของสัญญาณเช่นเดียวกับเส้นทางแรกจะต่างกันตรงที่ต้องมีการปรับเฟสเข้ามาร่วมด้วย โดยที่เมื่อสัญญาณทั้งสองเมื่อเดินทางมารวมกันที่ภาครับ ถ้าสัญญาณมีเฟสและขนาดต่างกันสัญญาณแทรกสอดที่รับเข้ามา π จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องพิจารณาคือ ตัวแปรสัมประสิทธิ์การขยายของสัญญาณ หน้าที่ของตัววงจรจะสร้างสัญญาณที่ต้องนำไปกำจัดสัญญาณแทรกสอดหรือสัญญาณรบกวนที่เกิดที่ภาครับของระบบสื่อสารดังแสดงที่รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยวงจร QHx220

2.5.2 เทคนิคการกำจัดสัญญาณในส่วนดิจิทัล

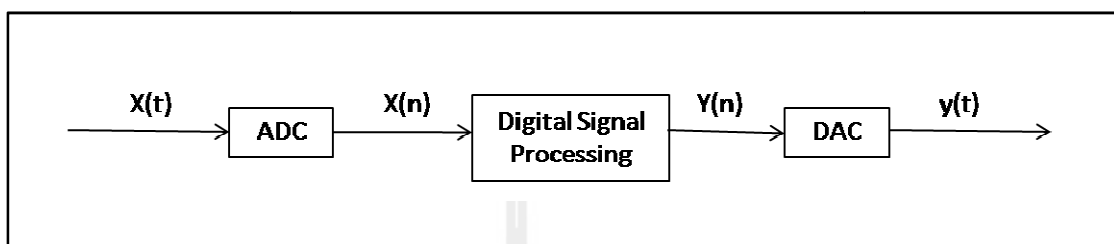
ส่วนนี้จะกล่าวถึงภาพรวมของเทคนิคที่ใช้การประมวลผลสัญญาณด้วยสัญญาณดิจิทัลในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายในระบบสื่อสาร สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ หลักการออกแบบระบบดิจิทัล หรืออัลกอริทึมที่ใช้ในการเขียนซอฟต์แวร์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะอธิบายในลำดับต่อไป

2.5.2.1 ส่วนประกอบในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสาร

การประมวลผลสัญญาณด้วยดิจิทัล สำหรับระบบสื่อสารโดยทั่วไปแล้ว ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วนด้วยกันดังนี้

- 1) วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการย่อยดังนี้ กระบวนการแรกคือ วงจรสุ่มสัญญาณ (Sampler) สัญญาณขาเข้าของวงจรนี้เป็นสัญญาณแอนะล็อก $x(t)$ ส่วนสัญญาณขาออกเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง $x(n)$ พารามิเตอร์วงจรสุ่มสัญญาณนี้ก็คือ ค่าอัตราการสุ่ม (sampling rate) หรือความถี่สำหรับการสุ่ม กระบวนการที่สองคือ วงจรขึ้นสัญญาณ (Quantizer) สัญญาณ $x(n)$ ที่ได้จากวงจรสุ่มสัญญาณ ถือว่ามีความละเอียดเต็มที่ในทางขนาด ซึ่งในทางปฏิบัติเมื่อนำไปใช้งานจะต้องลดความละเอียดของ $x(n)$ ลงให้สามารถแทนได้ด้วยสัญญาณดิจิทัลที่มีจำนวนบิตจำกัด กระบวนการลดความละเอียดนี้ เรียกว่า การแบ่งชั้นของสัญญาณ (quantization) ความละเอียดที่ได้จากการแบ่งชั้นสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่จะใช้ การแบ่งชั้นสัญญาณทำให้ค่าสัญญาณที่ได้คลาดเคลื่อนไป

จาก $x(n)$ จริง ซึ่งจะส่งผลเหมือนมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ วงจรสุ่มสัญญาณรวมกับวงจรแบ่งขั้นสัญญาณ ในทางปฏิบัติก็คือ ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลนั่นเอง ซึ่งจะรวมสองกระบวนการนี้อยู่ในวงจรเดียวกัน และโดยทั่วไปจะใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในรูปแบบของวงจรรวมสำเร็จรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

2) วงจรประมวลผลสัญญาณทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ $x(n)$ เพื่อกระทำผลบางอย่างกับสัญญาณ เช่น เป็นวงจรกรองความถี่บางย่านออกและให้ผลลัพธ์ของการประมวลผลสัญญาณขาออก $y(n)$ โดยจะทำหน้าที่คำนวณสัญญาณขาออกจากสัญญาณขาเข้าซึ่งจะมองเห็นสัญญาณขาเข้าในลักษณะลำดับของค่า ในชีวิตจริงอัลกอริทึมในการประมวลผลสัญญาณมีตั้งแต่ง่าย ๆ จนกระทั่งถึงยากมากหรือซับซ้อนมากๆ

3) วงจรสร้างสัญญาณคืน (Signal Reconstruction) ใช้ในระบบที่มีสัญญาณขาออกสุดท้ายเป็นสัญญาณต่อเนื่อง โดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณไม่ต่อเนื่อง $y(n)$ ให้กลับเป็นสัญญาณต่อเนื่อง $y(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณขาออกสุดท้ายของระบบ วงจรประเภทนี้ก็คือ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกนั่นเอง

2.5.2.2 การประมวลผลแบบเวลาจริงกับการเลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลแบบเวลาจริง หมายถึง การประมวลผลที่กระทำที่อัตราจริงของสัญญาณขาเข้า และให้สัญญาณขาออกทันกับสัญญาณขาเข้าที่เข้ามา เช่น ในระบบที่มีอัตราการสุ่มของสัญญาณขาเข้า และขาออกเท่ากัน เมื่อมีสัญญาณขาเข้าที่เข้ามา 1 ค่า ระบบจะต้องประมวลผลให้ได้สัญญาณขาออก 1 ค่าก่อนที่สัญญาณขาเข้าตัวถัดไปจะเข้ามา เป็นต้น การประมวลผลแบบเวลาจริงนี้มีการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก และเป็นตัวแทนที่แท้จริงของระบบที่เคยใช้เป็นแบบแอนะล็อกอย่างไรก็ตาม ระบบที่มีการประมวลผลแบบเวลาจริงไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณขาเข้า และออกเป็นสัญญาณแอนะล็อกทั้งคู่เสมอไป อาทิเช่น การถอดรหัสสัญญาณเสียงที่ถูกบีบอัดข้อมูลมา ในกรณีนี้สัญญาณขาเข้าเป็นดิจิทัล ซึ่งคือข้อมูลเสียงที่บีบอัดมาแล้ว ส่วนสัญญาณขา

ออก คือ สัญญาณเสียงแอนะล็อกที่ต้องส่งออกที่ลำโพง ดังนั้น การประมวลผลจะต้องเกิดที่อัตรา การสุ่มจริงของสัญญาณเสียงขาออก อันนี้ก็คือว่า เป็นการประมวลผลแบบเวลาจริง ส่วนการ ประมวลผลแบบไม่เป็นเวลาจริงนั้นไม่มีบังคับทางด้านเวลาในการประมวลผล อาทิเช่น การจำลอง ระบบประมวลผลด้วย MATLAB ในคอมพิวเตอร์ ในที่นี้ถือว่าคอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผล ซึ่ง ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ที่เร็วก็จะได้ผลลัพธ์เร็ว แต่ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ที่ช้าก็จะได้ผลลัพธ์ที่ช้า แต่ผลลัพธ์ ที่ได้แตกต่างกันเลยไม่ว่าจะเร็วหรือช้า ทั้งนี้เพราะการประมวลผลไม่ได้เกิดขึ้นที่อัตราการสุ่มจริง ของสัญญาณขาเข้า หรือขาออก เช่นการประมวลผลภาพนิ่งที่ไม่มีอัตราการสุ่มของข้อมูลที่เทียบต่อ เวลา ดังนั้น การประมวลผลภาพนิ่งจึงถือได้ว่าไม่มีข้อบังคับทางด้านเวลา จึงไม่เป็นการประมวลผล แบบเวลาจริง การประมวลผลสัญญาณแบบเวลาจริงทำให้เกิดข้อกำหนดที่สำคัญขึ้นมาต่อการ เลือกใช้ตัวประมวลสัญญาณ นั่นคือ การที่ต้องมีตัวประมวลผลที่เร็วพอที่จะประมวลผลสัญญาณที่ ทันทันได้โดยเฉพาอย่างยิ่ง ถ้าสัญญาณที่ต้องการประมวลผลมีอัตราการสุ่มที่สูง หรืออัลกอริทึมที่ใช้มี ความซับซ้อนในการคำนวณมากก็จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วสูงมากยิ่งขึ้น มี ทางเลือกใหญ่ อยู่ 3 ทางในการทำตัวประมวลผลคือ

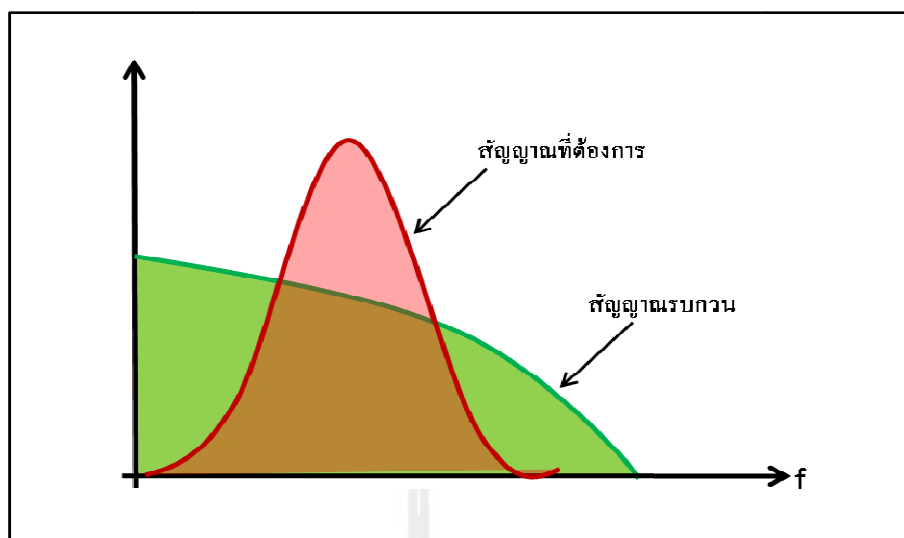
ทางเลือกแรกคือ การเขียนซอฟต์แวร์เพื่อใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ หรือใช้ กับชิพไมโครโพรเซสเซอร์ต่างๆ ไป ซึ่งถึงแม้ว่าคอมพิวเตอร์ หรือไมโครโพรเซสเซอร์จะไม่ได้ ออกแบบมาเฉพาะสำหรับการประมวลผลสัญญาณ แต่เราก็สามารถนำมาใช้ได้ในงานที่ต้องการ อัตราการประมวลผลไม่มากนัก หรือในการประมวลผลแบบไม่เป็นเวลาจริง อย่างไรก็ตาม ปัจจุบัน คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีความเร็วสูงมากจนสามารถนำมาใช้ทำการประมวลผลแบบเวลาจริง หลายๆ อย่างได้

ทางเลือกที่สองคือ การใช้ซอฟต์แวร์ร่วมกับชิพ DSP ชิป DSP เป็นชื่อ ของชิพประมวลผลสัญญาณ ซึ่งคือ ไมโครโพรเซสเซอร์ที่ถูกออกแบบมาสำหรับงานประมวลผล สัญญาณแบบเวลาจริงโดยเฉพาะ โดยไมโครโพรเซสเซอร์ประเภทนี้จะมีสถาปัตยกรรมที่ เอื้ออำนวยต่อการคำนวณ และการถ่ายโอนถ่ายข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ และความเร็วสูง เช่น การมี คำสั่งพิเศษในการคูณ การบวกสะสม หรือการอ้างข้อมูลแบบ circular buffer เป็นต้น บางชนิดยัง สามารถทำการประมวลผลหลายๆ ส่วนได้พร้อมกันในตัวเดียวกันด้วย การใช้ชิพ DSP นั้น ทำได้ โดยการเขียนเป็น โปรแกรมภาษาแอสเซมบลี หรือภาษาซีแล้วใช้คอมไพเลอร์แปลเป็น แอสเซมบลี ข้อดีของการเขียนเป็นภาษาแอสเซมบลีโดยตรง คือ สามารถควบคุมการทำงานของชิพ ได้เต็มที่ ทำให้สามารถออกแบบโปรแกรมให้ทำงานได้เร็วกว่า และมีขนาดโปรแกรมเล็กกว่าการ ใช้ภาษาซี แต่ข้อเสียก็คือ ภาษาแอสเซมบลีเขียนยากกว่าและไม่สามารถโอนย้ายโปรแกรมไป ทำงานได้ในชิพต่างตระกูลกัน หรือต่างผู้ผลิตกันได้

ทางเลือกสุดท้ายคือ การใช้ฮาร์ดแวร์ หรือ ไอซีที่ออกแบบเฉพาะงาน ฮาร์ดแวร์ในที่นี้ก็หมายถึง วงจรดิจิทัลซึ่งสามารถออกแบบให้การประมวลผล เราอาจสามารถหาซื้อได้ทั่วไปเป็นไอซีสำเร็จรูปที่ทำเฉพาะฟังก์ชันนั้นๆ แต่ถ้าต้องการอัลกอริทึมที่เฉพาะมากขึ้น ก็อาจต้องทำการออกแบบเป็นไอซีเฉพาะงาน ซึ่งแน่นอนว่าต้นทุนในการออกแบบสำหรับทางเลือกนี้ค่อนข้างสูง ทางเลือกอีกทางหนึ่ง คือ การใช้ไอซีดิจิทัลประเภทโปรแกรมได้ หรือ FPGA(Field Programmable Gate Array) ซึ่งปัจจุบันมีขนาดใหญ่มากพอที่จะมาใช้ในการประมวลผลได้ การใช้ FPGA จะมีต้นทุนในการออกแบบที่ต่ำกว่า ASIC (Application Specific IntegratedCircuits) การเลือกใช้ตัวประมวลผลแต่ละแบบก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ความเร็วที่ต้องการ และต้นทุน ถ้าต้องการทำอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลแบบเวลาจริง โดยทั่วไปการใช้ชิพ DSP จะดีที่สุด แต่ถ้าหากการประมวลผลไม่ซับซ้อนหรืออัตราข้อมูลไม่สูงมากจนสามารถใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ธรรมดาได้ การใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ก็จะทำให้ต้นทุนต่ำลงได้ ในกรณีที่ต้องการอัตราการประมวลผลสูงมากๆ เราก็อาจต้องใช้ฮาร์ดแวร์ในการประมวลผล ซึ่งโดยทั่วไปก็มีต้นทุนที่สูงขึ้น

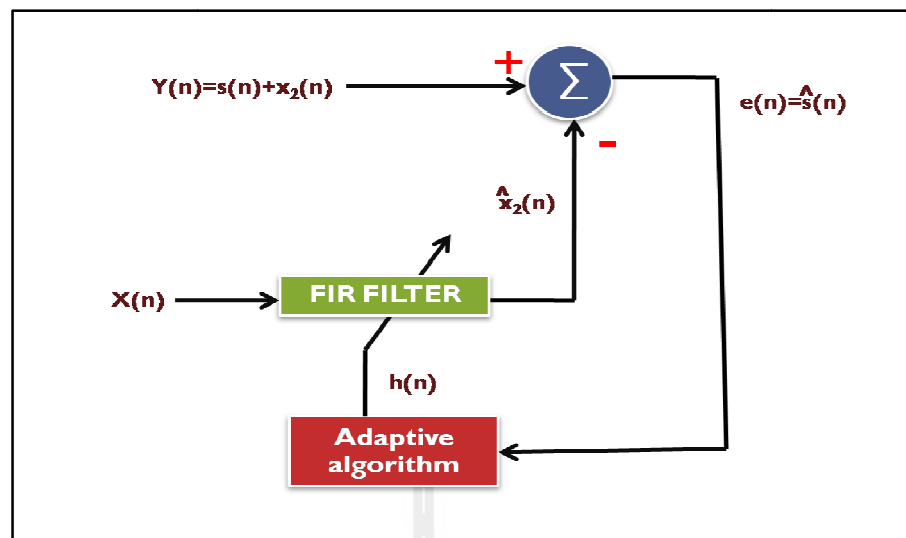
2.5.2.3 การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลโดยใช้ตัวกรองปรับตัวได้

จะเห็นได้ว่าตัวกรองความถี่ต่างๆ ไป เป็นตัวกรองแบบมีสัมประสิทธิ์คงที่ หรือ เป็นแบบไม่แปรตามเวลา สำหรับตัวกรองแบบปรับตัวได้จะเป็นตัวกรองแบบที่มีสัมประสิทธิ์ปรับเปลี่ยนตลอดเวลา โดยอาศัยเงื่อนไขทางสถิติของสัญญาณ และของโมเดลของสิ่งแวดล้อมที่สร้างขึ้นในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ ตัวกรองแบบปรับตัวได้นี้ทำให้ขอบเขตของการประยุกต์ใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขยายวงออกไปกว้างมาก ซึ่งจะให้ผลที่ดีขึ้นได้ถ้าใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้ เช่น เมื่อสัญญาณรบกวน และสัญญาณที่เราต้องการอยู่ในย่านความถี่เดียวกัน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.16 ซึ่งค่อนข้างชัดเจนว่าถ้าตัวกรองความถี่แบบธรรมดากรอง และต้องการให้สัญญาณรบกวนส่วนใหญ่หมดไป จะทำให้พลังงานส่วนใหญ่สัญญาณที่ต้องการสูญหายไปด้วย เมื่อไม่รู้ลักษณะที่แน่นอนของสัญญาณรบกวน เช่น ไม่รู้ว่าสัญญาณรบกวนอยู่ในย่านความถี่ใด หรือไม่รู้ว่าสัญญาณรบกวนเข้ามาในทิศทางใดในกรณีของสายอากาศอะเรย์ เป็นต้น ในขณะที่สัญญาณที่ต้องการมีความถี่ที่ไม่รู้ลักษณะที่แน่นอน เช่น กรณีของโทรศัพท์มือถือ ที่มีการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณที่ตัวรับได้รับจะถูกทำให้ผิดเพี้ยนไปด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่รู้ค่าแน่นอน และอาจมีค่าแปรตามเวลาด้วย ซึ่งเราต้องการใช้ตัวกรองเพื่อกรองเอาความผิดเพี้ยนนี้ออกไป



รูปที่ 2.16 สเปกตรัมของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในย่านเดียวกับสัญญาณที่ต้องการ

จากรูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับได้ ซึ่งประกอบด้วยตัวกรองแบบ FIR ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนได้ โดยรับค่าสัมประสิทธิ์มาจากการประมวลผลของอัลกอริทึมในการปรับตัว (adaptive algorithm) ซึ่งก็มีด้วยกันหลากหลายวิธีในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์นี้ การศึกษาถึงอัลกอริทึมเหล่านี้ รวมอยู่ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูง โดยสถานการณ์แวดล้อมของโครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองปรับได้เป็นดังนี้ เราสามารถวัดสัญญาณมาได้สองสัญญาณคือ $x(n)$ และ $y(n)$ โดยที่ $y(n)$ เป็นสัญญาณที่ผสมกันระหว่างสัญญาณ $s(n)$ กับสัญญาณ $x_2(n)$ โดยมีวัตถุประสงค์ของตัวกรองก็คือ ต้องการแยกสัญญาณ $s(n)$ ออกจากสัญญาณ $x_2(n)$ โดยไม่จำเป็นต้องรู้ย่านความถี่ หรือลักษณะทางสถิติของสัญญาณทั้งสองล่วงหน้า เงื่อนไขที่จำเป็นคือ $s(n)$ นั้นต้องไม่มีความสัมพันธ์กับ $x_2(n)$ ในทางสถิติ หรือสัมพันธ์กันน้อยมาก เช่น เป็นสัญญาณเสียงที่มีแหล่งกำเนิด 2 แหล่งกำเนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ส่วน $x(n)$ ซึ่งเป็นสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่วัดได้นั้นต้องสัมพันธ์กับ $x_2(n)$ เราจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $x(n)$ กับ $x_2(n)$ ว่ามีความสัมพันธ์กันด้วยฟังก์ชันถ่ายทอดโดยตัวกรอง FIR ตัวหนึ่งที่ไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์ ไม่ทราบค่าอันดับ และสัมประสิทธิ์อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้อย่างช้าๆ โดยที่ $x(n)$ เป็นสัญญาณขาเข้าของตัวกรองนี้ และ $x_2(n)$ เป็นขาออก



รูปที่ 2.17 โครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับตัวได้

เราจะนำ $x(n)$ ผ่านตัวกรอง FIR ที่สร้างขึ้นซึ่งมีสัมประสิทธิ์ $h(n)$ และอันดับเท่ากับ N ให้สัญญาณขาออกของตัวกรอง คือ $\hat{x}_2(n)$ ถ้าหากว่าเราสามารถปรับสัมประสิทธิ์ $h(n)$ ให้ใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์ที่เป็นแบบจำลองระหว่าง $x(n)$ ได้ $\hat{x}_2(n)$ ก็จะเป็นสัญญาณที่ใกล้เคียงกับ $x_2(n)$ และเมื่อนำ $\hat{x}_2(n)$ ลบออกจาก $y(n)$ สัญญาณที่เหลืออยู่ซึ่งเรียกว่า สัญญาณความคลาดเคลื่อน $e(n)$ ก็ใกล้เคียงกับ $s(n)$ นั่นคือเราสามารถแยก $\hat{x}_2(n)$ ออกจาก $s(n)$ ได้สำเร็จ ตัวที่จะต้องคำนวณหาสัมประสิทธิ์ $h(n)$ ก็คือ อัลกอริทึมปรับตัวได้ ซึ่งรับค่า $e(n)$ และ $x(n)$ จากนั้นคำนวณ $h(n)$ ป้อนให้กับตัวกรอง FIR และปรับค่า $h(n)$ ไปเรื่อยๆ ทุกๆ ขึ้นเวลา จนกระทั่ง $h(n)$ เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง

อัลกอริทึม LMS และเงื่อนไขการทำงานเมื่อพิจารณาสัญญาณความคลาดเคลื่อน $e(n)$ จากรูปที่ 2.17 จะได้ว่า

$$e(n) = y(n) - \hat{x}_2(n) = s(n) + x_2(n) - \hat{x}_2(n) \quad (2.1)$$

พิจารณาว่าทุกสัญญาณเป็นสัญญาณสุ่ม เมื่อหาค่าคาดหวังของกำลังสองของทั้งสมการจะได้ว่า

$$E[e^2(n)] = E[(s(n) + x_2(n) - \hat{x}_2(n))^2] \quad (2.2)$$

เมื่อละตัวชี้เวลา n เพื่อให้สมการง่ายต่อการพิจารณา ดังนี้

$$E[e^2] = E[(s + x_2 - \hat{x}_2)^2] \quad (2.3)$$

กระจายเทอมกำลังสองด้านขวามือของสมการออกมาจะได้

$$\begin{aligned} E[e^2] &= E[s^2 + 2s(x_2 - \hat{x}_2) + (x_2 - \hat{x}_2)^2] \\ E[e^2] &= E[s^2] + 2E[sx_2] - 2E[s\hat{x}_2] + E[(x_2 - \hat{x}_2)^2] \end{aligned} \quad (2.4)$$

เนื่องจาก s กับ x_2 และ s กับ $\hat{x}_2$ ไม่มีความสัมพันธ์กัน จากทฤษฎีทางสถิติที่ว่าค่าคาดหวังของผลคูณของสองสัญญาณที่ไม่สัมพันธ์กันจะเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า เทอมที่สอง และสามของฝั่งขวาของสมการเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ 2.4 จะลดเหลือเพียง

$$E[e^2] = E[s^2] + E[(x_2 - \hat{x}_2)^2] \quad (2.5)$$

ใช้ความรู้ที่ว่า ค่าคาดหวังของกำลังสองของสัญญาณ ก็คือ ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณ สมการนี้จะตีความได้ว่า กำลังเฉลี่ยของสัญญาณ $e(n)$ เท่ากับกำลังเฉลี่ยของสัญญาณ $s(n)$ บวกกับกำลังเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง $x_2(n)$ กับ $\hat{x}_2(n)$ เราต้องการให้เทอมสุดท้ายนี้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะนั่นหมายความว่า สัญญาณ $x_2(n)$ กับ $\hat{x}_2(n)$ มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และก็จะทำให้ตัวกรองทำงานได้ตามต้องการ สัญญาณ $\hat{x}_2(n)$ นั้นขึ้นกับค่า $h(n)$ เป็นขาออกของตัวกรอง FIR โดยสมมติว่า อันดับของตัวกรองเท่ากับ N จะได้

$$\hat{x}_2(n) = h_0(n)x(n) + h_1(n)x(n-1) + \dots + h_{N-1}(n)x(n-N+1) \quad (2.6)$$

ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของตัวกรองปรับตัวได้ นิยมเขียนสัญญาณให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ และเมตริกซ์เพื่อให้มองดูกระชับ ดังนั้น ขอนิยามเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ที่เวลา n คือ $\bar{h}(n)$ และเวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้าที่เวลา n คือ $\bar{x}(n)$ ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$\bar{h}(n) = \begin{bmatrix} h_0(n) \\ h_1(n) \\ \vdots \\ h_{N-1}(n) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \bar{x}(n) = \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-N+1) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ทั้งสองเวกเตอร์มีขนาด N แถว 1 คอลัมน์ สังเกตว่า $\bar{x}(n)$ คือ เวกเตอร์ที่ประกอบขึ้นจากสัญญาณขาเข้าปัจจุบัน และสัญญาณขาเข้าที่ย้อนหลังไป N ตัว เมื่อเราได้นิยามดังนี้แล้ว จะสามารถเขียนสมการที่ (2.7) ได้ใหม่ในรูปแบบการคูณของเวกเตอร์ดังนี้

$$\hat{x}_2(n) = \bar{h}(n)^T \bar{x}(n) \quad (2.8)$$

สำหรับสัญญาณ $e(n)$ ก็ขึ้นกับ $h(n)$ เพราะเป็นผลต่างของ $y(n)$ กับ $\hat{x}_2(n)$ ส่วนสัญญาณ $s(n)$ นั้นเป็นขาเข้าที่ไม่ขึ้นกับ $h(n)$ ดังนั้นสมการที่ 2.6 มีเฉพาะเทอม $E[e^2]$ และเทอม $E[(x_2 - \hat{x}_2)^2]$ เท่านั้นที่ขึ้นกับค่า $h(n)$ ดังนั้น ถ้ารู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบทั้งหมด เราสามารถแก้สมการ หาค่า $h(n)$ ที่จะทำให้ $E[(x_2 - \hat{x}_2)^2]$ มีค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งก็คือจุดเดียวกับทำ $E[e^2]$ มีค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับการแก้สมการเพื่อหาค่า $h(n)$ โดยใช้เงื่อนไขว่าเป็น $h(n)$ ที่ทำให้ค่า $E[e^2]$ ต่ำสุด จะง่ายกว่าใช้เงื่อนไขว่า ให้ค่า $E[(x_2 - \hat{x}_2)^2]$ ต่ำสุด ซึ่งผลตอบของสมการนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อว่า ตัวกรองวินเนอร์ (Wiener Filter) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงสมการนี้ และผลตอบที่ได้ ตัวกรองวินเนอร์นี้จะใช้ค่า $h(n)$ ที่ดีที่สุดทุกๆ ค่าเวลา n แต่ปัญหาของตัวกรองวินเนอร์ก็คือ ค่า $h(n)$ นี้มีการคำนวณที่ยุ่งยาก และจำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณ $x(n)$ และ $y(n)$ ด้วย ซึ่งทางปฏิบัติมักจะไม่ทราบค่าแน่นอน ด้วยเหตุผลนี้ ทำให้ตัวกรองวินเนอร์แทบจะไม่มีที่นำมาใช้งานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม ตัวกรองวินเนอร์นี้มีประโยชน์มากในแง่ทฤษฎี เพราะมันคือ เป้าหมายที่ตัวกรองปรับตัวได้แบบอื่นๆ ต้องการไปถึง อัลกอริทึมปรับตัวได้ที่เป็นที่นิยมได้แก่ LMSRLS และ Kalman ล้วนแล้วแต่มีผลตอบที่สามารถพิสูจน์ได้ว่า ลู่เข้าสู่ผลตอบของตัวกรองวินเนอร์ทุกๆ ขึ้นเวลา แต่ถ้าถูกใช้ในสภาวะที่ลักษณะทางสถิติของสัญญาณขาเข้าเปลี่ยนแปลงไม่เรื้อรัง เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะหนึ่งมันจะสามารถให้ผลตอบที่ลู่เข้าสู่ผลตอบของตัวกรองวินเนอร์ได้

ลักษณะสำคัญของการคำนวณสัมประสิทธิ์ด้วยอัลกอริทึมเหล่านี้ ที่ปรับปรุงจากตัวกรองวินเนอร์ คือ

- 1) ไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณขาเข้า
- 2) มีการคำนวณที่สามารถปรับไปใช้ในการคำนวณแบบเวลาจริงได้

ยกตัวอย่างอัลกอริทึมแบบ LMS (Least Mean Square) ที่ถูกคิดค้นเมื่อปี ค.ศ. 1960 โดยวิโดรว์ และฮอฟฟ์ (Widrow and Hoff) มีที่มาโดยตรงจากตัวกรองวินเนอร์ และการแก้สมการโดยวิธี steepest descent ซึ่งทำโดยการสมมติผลตอบ เริ่มต้นขึ้นมาเป็นค่าอะไรก็ได้จากนั้นทุกๆ ขั้นตอน เมื่อได้สัญญาณขาเข้าใหม่ ก็จะคำนวณหาทิศทางที่เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์นั้นให้เข้าใกล้กับผลตอบที่ถูกต้อง แล้วเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ตามทิศทางนั้น ซึ่งวิธีนี้ ปรากฏว่าทำให้การคำนวณง่ายกว่าการคำนวณหาสัมประสิทธิ์โดยตรงมาก ซึ่งทิศทางที่ดีที่สุดที่จะใช้เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ตามวิธี LMS นี้คือ

$$\bar{\Delta} = 2e(n)\bar{x}(n) \quad (2.9)$$

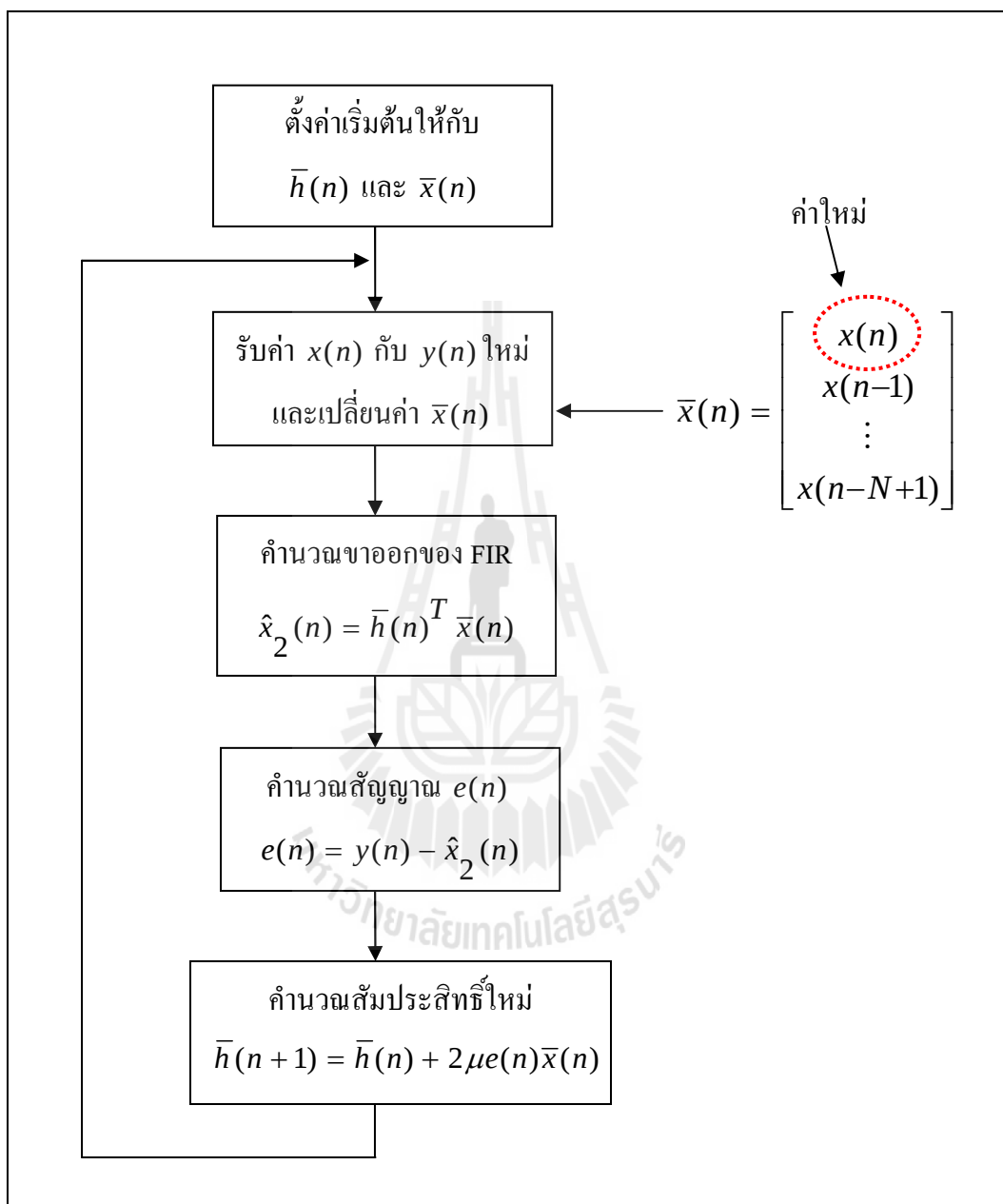
เราจะหาค่าสัมประสิทธิ์ใหม่สำหรับเวลา $n + 1$ จากค่าสัมประสิทธิ์ปัจจุบัน และเวกเตอร์ทิศทางได้ด้วยการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ดังนี้

$$\bar{h}(n+1) = \bar{h}(n) + \mu \bar{\Delta} \quad (2.10)$$

โดยที่ค่า μ คือ ตัวที่ความคุมว่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวกเตอร์ทิศทางเร็วมากน้อยแค่ไหนโดยทั่วไป μ มีค่าประมาณ 0.001 ถึง 0.1 ถ้าค่า μ มีค่าน้อยเกินไปก็จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องช้า แต่ถ้าค่า μ มีค่ามากเกินไปก็อาจทำให้สัมประสิทธิ์ไม่สามารถเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้ หรือถึงแม้จะรู้ได้แต่ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงไปมา ไม่คงตัวอยู่ที่สภาวะที่ดีที่สุด ดังนั้นการเลือกค่า μ ที่เหมาะสมมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบมาก เมื่อนำเอาสมการที่ 2.9 และ 2.10 รวมเข้าด้วยกันก็จะได้สมการสำหรับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เวลาใดๆ ดังนี้

$$\bar{h}(n+1) = \bar{h}(n) + 2\mu e(n)\bar{x}(n) \quad (2.11)$$

เราสามารถสรุปกระบวนการทำงานของตัวกรองปรับตัวได้ ที่ใช้ LMS เป็นตัวคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังรูปที่ 2.18

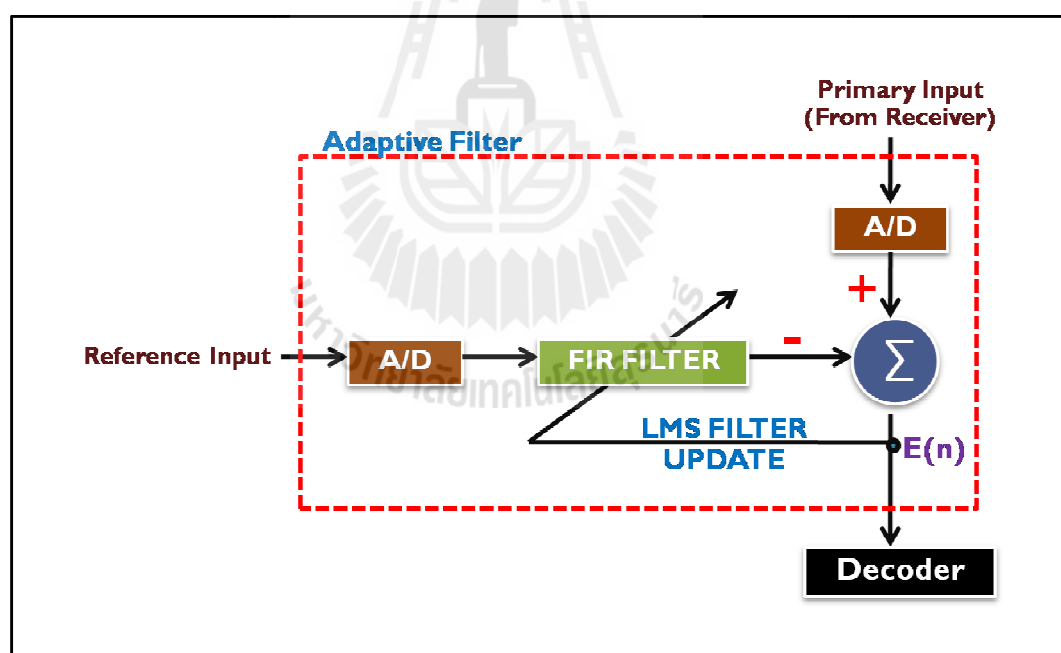


รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงการทำงานของตัวกรองปรับตัว

2.5.2.4 ปรัชณัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบด้วยดิจิทัล

การออกแบบการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยสัญญาณดิจิทัลในระบบการสื่อสารที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ได้เสนอแนวคิดคือ การนำอัลกอริทึม LMS (Least meansquare) มาช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนภายในระบบอัลกอริทึม LMS จะช่วยในการปรับแก้ค่าความผิดพลาดแบบเชิงเส้น และทนทานต่ออินพุตที่มีความไม่แน่นอน โดยที่จะมีการปรับค่าน้ำหนักสัญญาณอย่างเป็นสัดส่วนกับผลต่างระหว่างเอาต์พุตของสัญญาณที่ต้องการ

ปัจจุบันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานจริงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วๆ ไปที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นหูฟังสำหรับฟังเพลง การกำจัดสัญญาณรบกวนในห้องผู้โดยสารของยานพาหนะ เป็นต้น โดยที่สัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่เข้ามาแทรกสอดในระบบสื่อสารจะถูกส่งออกมาจากภาคส่ง พร้อมกับถูกป้อนให้กับตัวกรองเชิงปรับตัวในเส้นทางสัญญาณอ้างอิง พารามิเตอร์ในตัวกรองเชิงปรับตัวจะถูกปรับเพื่อให้ระบบมีสัญญาณค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด ในระบบที่ใช้งานจริง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ตัวกรอง



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลโดยใช้ LMS Filter

2.5.2.5 ข้อดีของการใช้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล

ข้อดีของการใช้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลมาใช้ต่อจากการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุในขั้นต้นแล้ว จะเห็นว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบค่อนข้างมาก ซึ่งมีข้อดีดังนี้

- ความสามารถในการโปรแกรมได้ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ เปลี่ยนแปลงแก้ไขและทดสอบระบบ
- ความถูกต้องแม่นยำและความถูกต้องขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้แทนสัญญาณและพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีความยืดหยุ่นและควบคุมได้ง่าย
- สามารถทำงานได้กับฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนที่ไม่สามารถทำได้ด้วยวงจรแอนะล็อกหรือทำได้ยากมาก เช่น ตัวกรองแบบปรับตัวได้ตามสถานะของสัญญาณรบกวน เป็นต้น
- มีเสถียรภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ

2.5.2.6 ข้อจำกัดของการใช้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล

ทุกอย่างที่มีข้อดี ก็มักจะมีข้อจำกัดด้วยกันเสมอ การใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลก็เช่นกันที่มีข้อดีต่างๆ มากมายตามที่กล่าวมาข้างต้น ข้อจำกัดของการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลพอจะแจกแจงได้ดังนี้ ไม่สามารถใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างมากๆ เนื่องจากจะต้องอาศัยอัตราการสุ่มที่สูงมากและตัวประมวลผลที่เร็วมากๆ ด้วยซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการนำมาใช้งาน และงานที่ต้องการการใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำมากๆ

2.5.3 สรุปงานที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการสื่อสาร ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนการกำจัดสัญญาณแทรกสอดในงานปริทัศน์วรรณกรรมที่สำรวจ

ชื่อนักวิจัย	จำนวน สายอากาศ	เทคนิคการกำจัดสัญญาณ ด้วยแอนะล็อก	เทคนิคการ กำจัดสัญญาณ ด้วยดิจิทัล (dB)	การลดทอน รวม (dB)
Melissa D. et al.	2	-Antenna cancellation 39-45 dB -Analog cancellation 31-35 dB	10	80-90
Steven Hong et al.	2	-Antenna separation 26 dB -Balun cancellation 45 dB	20	91
Mayank Jain et al.	2	-Antenna separation 20-30 dB -Balun cancellation 45 dB	10	75-85
Edwaed A.	2	- Antenna placement 20 dB - Analog cancellation 15 dB	25	60
Yingbo Hua et al.	2	-Balun cancellation 20-45 dB -Antenna cancellation 30 dB	-	50-75
Na Li et al.	2	-Balun cancellation 45 dB -Antenna separation 26 dB	20	91
Jung II Choi et al.	3	-Noise canceller 20 dB -Analog cancellation 35 dB	10	65
Michael E. Knox	1	-circulator 35-40 dB -balanced feed network 20 dB	-	55-60

2.6 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงองค์ความรู้ของระบบสื่อสารแบบสองทาง โดยจะกล่าวถึงระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้สองช่องสัญญาณในการสื่อสาร ระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสาร ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าข้อดีของการออกแบบระบบการสื่อสารสำหรับช่องสัญญาณเดียว คือ ลดปัญหาความล่าช้าที่ปลายทาง การจัดวางสายอากาศ และปัญหาการรับสัญญาณจากสถานีที่เราไม่ทราบ จากแนวทางพื้นฐานที่ได้ศึกษาเราจะออกแบบและพัฒนาาระบบดังจะกล่าวในบทถัดไป



บทที่ 3

การพัฒนาระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียว

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนากระบวนด้วยและการจำลองแบบ โดยมีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร อาทิเช่น อัตราความผิดพลาดบิต ค่าวิสัยสามารถการส่งข้อมูล หรือ Throughput เทียบกับระยะทาง โดยอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบคือความเข้มของสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบและเทคนิคที่เหมาะสมในการนำมาออกแบบและพัฒนาระบบ เทคนิคที่จะนำมาช่วยในการออกแบบเพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนระบบนั้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันดังนี้ ส่วนแรกคือ ส่วนที่พิจารณาการกำจัดสัญญาณที่อยู่ในรูปสัญญาณที่เป็นแอนะล็อก หรือสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ส่วนที่สองคือ ส่วนที่ต้องพิจารณาสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบของสัญญาณเชิงดิจิทัล และการเปรียบเทียบระหว่างระบบการสื่อสารเดิมกับระบบสื่อสารแบบสองทางที่ได้นำเสนอขึ้น โดยการจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองแบบพร้อมทั้งสรุปผลที่ได้รับจากการศึกษา

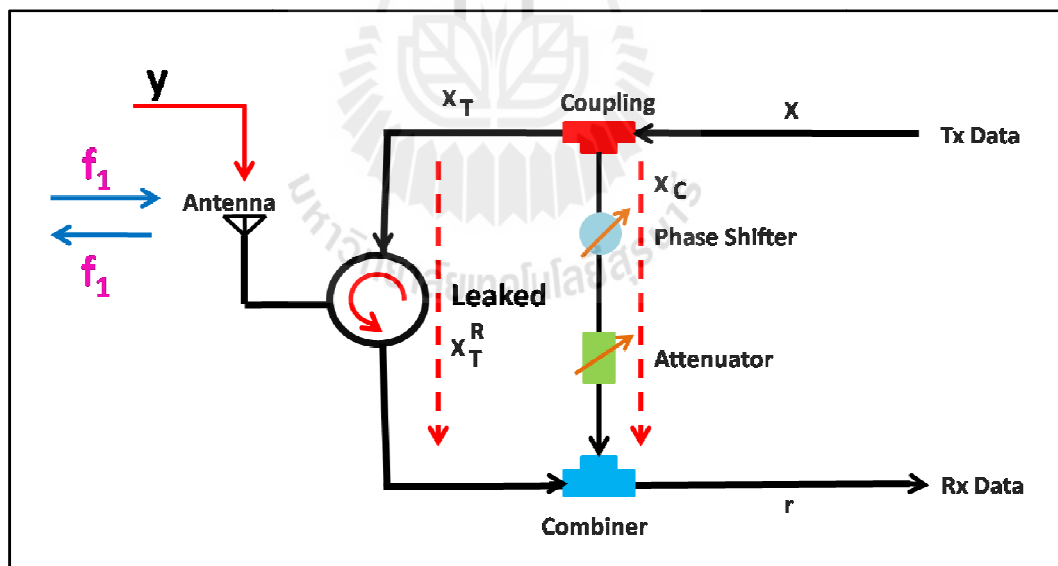
3.2 การออกแบบชุดทดสอบ

ในการออกแบบชุดทดสอบ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ พารามิเตอร์ที่ต้องการวัดได้แก่ ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูล ค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูล ที่สอดคล้องกับทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่ได้ศึกษา ชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบเลือกใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้เป็นชุดอุปกรณ์ที่มีขีดความสามารถในการทำงานที่ดี มีข้อดีหลาย ๆ ด้านที่น่าสนใจ อาทิเช่น อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่วนที่เป็นแอนะล็อกที่ใช้ตัวเลื่อนเฟสที่สามารถทำการปรับค่าเฟสที่เหมาะสมโดยการป้อนแรงดันในการควบคุม และอุปกรณ์ทางด้านดิจิทัลที่เลือกใช้ซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลเป็นซอฟต์แวร์ที่มีการเปิดเผยโค้ดและรูปแบบการเขียน โปรแกรมเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบซึ่งทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu ที่เป็นระบบปฏิบัติการที่ไม่มีลิขสิทธิ์ ชุดอุปกรณ์ที่ให้มานั้นมีทั้งชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณเบสแบนด์หรือ FPGA ที่มีขีดความสามารถสูง อีกทั้งยังให้ชุดอุปกรณ์ความถี่วิทยุมาพร้อมกันด้วยหรือที่เรียกว่า daughter board ที่ส่วนสำคัญ อุปกรณ์ชุดนี้รองรับการทำงานในระบบการสื่อสารที่มีความหลากหลาย ย่อยต่อการออกแบบ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถออกแบบระบบให้สามารถรองรับการทำงานเป็นระบบสื่อสารแบบสองทางได้ โดย

ระบบที่ทำการออกแบบแยกการจัดการออกได้สองส่วนด้วยกันได้แก่ ส่วนที่ต้องจัดการโดยการออกแบบส่วนที่เป็นแอนะล็อก และส่วนที่ต้องจัดการในส่วนที่เป็นดิจิทัล ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การออกแบบในส่วนแอนะล็อก

การออกแบบในส่วนนี้ถือได้ว่ามีความสำคัญมากเนื่องจากสามารถทำให้สัญญาณแทรกสอดที่เราต้องการกำจัดถูกหักล้างออกไปมากพอสมควร ข้อดีของระบบสื่อสารที่ออกแบบคือ สัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนในระบบเป็นสัญญาณที่เราทราบและสามารถออกแบบพัฒนาระบบให้สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวได้โดยง่าย จากงานปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้สำรวจทำให้ทราบถึงการออกแบบและแนวทางในการพัฒนาเพื่อลดความซับซ้อนของวงจรและขนาดของระบบ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในส่วนนี้คือ ต้องออกแบบวงจรให้สามารถปรับเฟสและขนาดของสัญญาณในเส้นทางหลักหรือสัญญาณอ้างอิงที่ทราบกับเส้นทางรองหรือเส้นทางที่สัญญาณรบกวนเข้ามาให้มีเฟสและขนาดของสัญญาณที่ใกล้เคียงหรือคล้ายกันมากที่สุด เพราะจะทำให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบถูกหักล้างออกไปอย่างสมบูรณ์ทำให้สัญญาณที่ต้องการรับเข้ามาในระบบนำไปประมวลผลสัญญาณได้ความถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 3.1 แผนภาพเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.1 ได้แสดงถึงภาพรวมของเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self interference) ที่ได้ออกแบบสำหรับระบบสื่อสารแบบสองทางที่ใช้ช่องความถี่เดียวกันช่วงเวลาเดียวกันในการสื่อสาร สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การปรับค่าเฟสและขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเฟสและขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณนั้นอาศัย ตัวเลื่อนเฟสและตัวลดทอนสัญญาณเป็นหลัก พารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาดังนี้

$$x = A_1 e^{-j(\omega t + \phi_1)} \quad (3.1)$$

เมื่อ x คือ สัญญาณที่ถูกส่งออกอากาศ
 A_1 คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ
 ϕ_1 คือ เฟสของสัญญาณ

เมื่อภาคส่งทำการส่งสัญญาณออกอากาศสัญญาณจะถูกส่งแยกออกเป็นสองทางดังสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3)

$$x_T = \alpha_{C1} A_1 e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_{C1})} \quad (3.2)$$

$$x_C = \alpha_A \alpha_{C2} A_1 e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_{C2} + \phi_{PS})} \quad (3.3)$$

เมื่อ x_T คือ สัญญาณที่ถูกส่งออกไปในเส้นทางหลัก
 x_C คือ สัญญาณที่ถูกส่งออกไปในเส้นทางรองหลังจากผ่าน Coupling
 α_{C1} คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณในเส้นทางหลักเมื่อไหลผ่าน Coupling
 α_{C2} คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณในเส้นทางรองเมื่อไหลผ่าน Coupling
 α_A คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณในเส้นทางรองเมื่อไหลผ่าน
 ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator)
 ϕ_{C1} คือ เฟสของสัญญาณในเส้นทางหลักเมื่อไหลผ่าน Coupling
 ϕ_{C2} คือ เฟสของสัญญาณในเส้นทางรองเมื่อไหลผ่าน Coupling
 ϕ_{PS} คือ เฟสของสัญญาณในเส้นทางรองเมื่อไหลผ่านตัวเลื่อนเฟส (Phase Shifter)

เมื่อสัญญาณที่ต้องการส่งออกไปหรือ x_T ถูกส่งออกไปในเส้นทางหลักเพื่อออกอากาศแต่ขณะผ่านเซอร์คิวเลเตอร์ก็จะมีสัญญาณบางส่วนที่รั่วไหลกลับเข้ามาในระบบสื่อสารหรือเรียกว่า สัญญาณแทรกสอดของตนเอง การรั่วไหลของสัญญาณนี้ส่งผลกระทบต่อภาครับในโหนดเดียวกันโดยตรงเนื่องจากอาจเกิดการชนกันของข้อมูลที่ต้องการรับเข้ามาแม้ว่าสัญญาณที่รั่วไหลเข้ามาจะมีไม่มากก็ตาม ปัญหาดังกล่าวข้างต้นจะทำให้ภาครับไม่สามารถประมวลผลสัญญาณออกมาได้หรือไม่สามารถถอดรหัสสัญญาณที่ต้องการได้ โดยสมการสัญญาณที่รั่วไหลเข้ามานี้ที่จะนำมาพิจารณาเพื่อแก้ไขปัญหาดังแสดงในสมการที่ (3.4)

$$x_T^R = \alpha_L \alpha_{C1} A_1 e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_{C1} + \phi_L)} \quad (3.4)$$

เมื่อ	x_T^R	คือ สัญญาณที่รั่วไหลเข้ามาจากเซอร์คิวเลเตอร์
	α_L	คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณที่รั่วไหลเมื่อผ่านเซอร์คิวเลเตอร์
	ϕ_L	คือ เฟสที่เปลี่ยนไปของสัญญาณที่รั่วไหลเมื่อผ่านเซอร์คิวเลเตอร์

สำหรับเส้นทางรองซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากที่ต้องคำนึงถึงคือ การปรับเฟสและระดับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ ให้มีเฟสของสัญญาณในเส้นทางหลักและเฟสของสัญญาณในเส้นทางรองต่างกับที่ π และทำให้ขนาดของสัญญาณมีขนาดที่ใกล้เคียงกันหรือเท่ากันเมื่อนำมารวมกันดังแสดงในสมการที่ (3.5) จะทำให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองเป็นไปอย่างสมบูรณ์

$$r = y + x_T^R + x_C \quad (3.5)$$

เมื่อ	r	คือ สัญญาณที่ภาครับ
	y	คือ สัญญาณที่ต้องการรับเข้ามา

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.5) จะเห็นว่าการที่จะทำให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองเป็นไปอย่างสมบูรณ์นั้น ต้องกำหนดให้เฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณในเส้นทางหลักและสัญญาณในเส้นทางรองเพื่อให้ $r = y$ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณและเฟสของสัญญาณต้องเป็นไปตามสมการที่ (3.6)

$$\alpha_L \alpha_{C1} A_1 e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_{C1} + \phi_L)} = -\alpha_A \alpha_{C2} A_1 e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_{C2} + \phi_{PS})} \quad (3.6)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.6) เราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณดังแสดงในสมการที่ (3.7) และค่าการเลื่อนเฟสของสัญญาณดังแสดงในสมการที่ (3.8)

$$\alpha_A = \frac{\alpha_L \alpha_{C1}}{\alpha_{C2}} \quad (3.7)$$

$$\phi_{PS} = \phi_{C1} + \phi_L - \phi_{C2} + \pi \quad (3.8)$$

3.2.2 การออกแบบในส่วนดิจิทัล

การออกแบบการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล จะทำการออกแบบโดยใช้ตัวกรองอิมพัลส์จำกัดช่วยในการกรองสัญญาณที่เราต้องการเพื่อนำไปกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เราทราบ

3.2.2.1 การออกแบบตัวกรอง FIR (Finite Impulse Response)

สำหรับตัวกรองแบบ FIR นั้น ในการออกแบบสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ค่าของผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ หรือ $h(n)$ ของระบบ สำหรับตัวกรอง FIR ที่มี $h(n)$ ยาว N จุดเราเรียกว่า ตัวกรองนี้มีอันดับเท่ากับ $N-1$ เหตุผลก็คือ มีการใช้สัญญาณขาเข้าในอดีตย้อนหลังไป $N-1$ ตำแหน่ง หรือ ตัวกำลังสูงสุดที่อยู่ในฟังก์ชัน $H(z)$ ก็คือ $z^{-(N-1)}$ โดยที่ตัวกรอง FIR มีคุณสมบัติเฟสแบบเชิงเส้น (linear phase) คือ สมบัติที่สำคัญมากของระบบที่มีผลตอบสนองทางเฟสมีลักษณะเป็นเชิงเส้น คุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัตินี้ที่สำคัญมากของระบบ และเฉพาะตัวกรองแบบ FIR เท่านั้นที่สามารถมีคุณสมบัตินี้ได้อย่างสมบูรณ์ การมีเฟสเป็นแบบเชิงเส้นของระบบหมายความว่า ระบบสามารถมีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่จัดให้อยู่ในรูปได้ ดังนี้

$$H(e^{j\omega}) = A(e^{j\omega})e^{j\theta(e^{j\omega})} \quad (3.9)$$

เมื่อ A คือ อัตราขยายหรือลดทอนของระบบ
 θ คือ เฟสของสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไปจากสัญญาณขาเข้า

จากสมการที่ 3.9 กำหนดให้ค่าของสัญญาณแปรตามความถี่ โดยที่ระบบจะมีเฟสเป็นเชิงเส้นโดยสมบูรณ์ นั้นต่อเมื่อ θ เป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้นของ ω' หรือเขียนได้ดังสมการที่ 3.10

$$\theta = -a\omega' \quad (3.10)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่ที่ไม่แปรตามความถี่

จากสมการที่ 3.10 เฟสของสัญญาณขาออกมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเชิงเส้นกับความถี่ของสัญญาณขาเข้า ปรากฏการณ์นี้จะทำให้สัญญาณขาออกมีความล่าช้าทางเฟส (phase delay) ที่คงที่ตลอดทุกๆ ความถี่ ซึ่งความล่าช้าทางเฟสมีสมการคือ

$$T_p = \frac{-\theta}{\omega} \quad (3.11)$$

ในที่นี้จะได้ T_p คงที่กับ a การที่ระบบเฟสเชิงเส้นมีผลดี คือ ทำให้ไม่เกิดความผิดเพี้ยนทางเฟส หรือเรียกว่า Phase distortion ความผิดเพี้ยนมีผลเสียมากในงานหลายๆ อย่างเช่น การสื่อสารข้อมูล เสียงดนตรี วิดีโอ และชีวภาพการแพทย์ เป็นต้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพยายามทำให้ส่วนต่างๆ ในระบบ ไม่ว่าจะเป็นตัวกรอง การขยายหรือลดทอนสัญญาณ และสายส่งสัญญาณ มีผลการตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในงานบางอย่าง ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการล่าช้าทางเฟสคงที่ แต่ต้องการเพียงแค่มีการล่าช้าของกลุ่มคงที่ ซึ่งความล่าช้าของกลุ่มมีสมการคือ

$$T_{group} = \frac{d\theta}{d\omega'} \quad (3.12)$$

เงื่อนไขนี้เป็นเงื่อนไขที่เบากว่า และระบบใดที่มีการล่าช้าทางเฟสคงที่ก็จะมีการล่าช้าของกรุปคงที่ด้วย เรากล่าวว่า ระบบที่มีความล่าช้าของกรุปที่เป็นระบบที่มีเฟสเชิงเส้น ซึ่งจะสามารถทั่วไปของผลตอบสนองทางเฟสของระบบที่มีเฟสเชิงเส้นคือ

$$\theta = -a\omega' + b \quad (3.13)$$

เมื่อ a และ b คือ ค่าคงที่ที่ไม่แปรตามความถี่

ตัวกรอง FIR ที่จะให้ผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้นตามสมการ 3.13 นั้นจะต้องมีเงื่อนไขสมมาตรสำหรับ $h(n)$ หนึ่งใน 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

ชนิดที่ 1 $h(n)$ มีความสมมาตรปกติ (symmetric) และ N เป็นเลขคี่ ความสมมาตรนี้ เขียนเป็นเงื่อนไขของ $h(n)$ ได้ดังนี้

$$h(n) = h(N-1-n), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (3.14)$$

ชนิดที่ 2 $h(n)$ มีความสมมาตรปกติ (symmetric) และ N เป็นเลขคู่ มีสมการเงื่อนไขเช่นเดียวกับชนิดที่ 1

ชนิดที่ 3 $h(n)$ มีความสมมาตรแบบตรงข้าม (anti-symmetric) และ N เป็นเลขคี่ ความสมมาตรนี้ เขียนเป็นเงื่อนไขของ $h(n)$ ได้ดังนี้

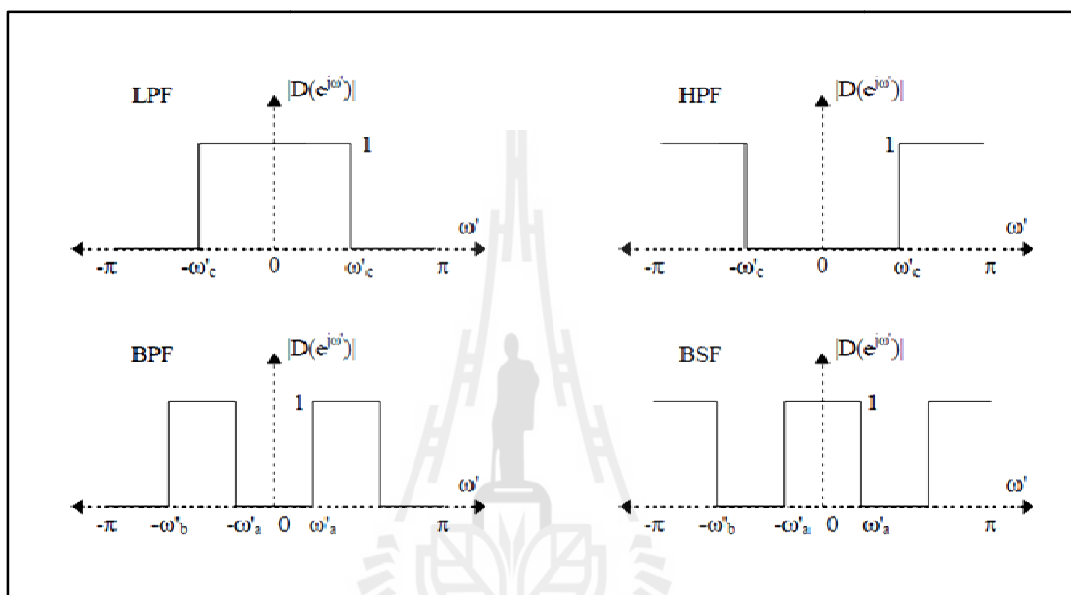
$$h(n) = -h(N-1-n), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (3.15)$$

ชนิดที่ 4 มีความสมมาตรแบบตรงข้าม (anti-symmetric) และ N เป็นเลขคู่ มีสมการเงื่อนไขของความสมมาตรเช่นเดียวกับชนิดที่ 3

ตัวกรอง FIR ที่มีความสมมาตรชนิดที่ 3 และ 4 เหมาะสำหรับออกแบบตัวกรองอนุพันธ์ และตัวกรอง Hilbert เนื่องจากมีการกลับเฟส $\frac{\pi}{2}$ หรือ 90 องศาอยู่ในผลตอบสนองทางเฟสด้วย

สำหรับการออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง (Window Method) จะต้องกล่าวถึง การหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง FIR เมื่อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของตัวกรองมา ซึ่งคุณลักษณะนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นการกำหนดลักษณะของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการ ได้แก่ ความถี่ตัด ความคมของตัวกรอง การลดทอนในแถบหยุด และอื่นๆ เราจะทำการออกแบบโดยคำนึงถึงความถี่ดิจิทัล ω' ที่มีย่านความถี่ที่สนใจในช่วง $-\pi$ ถึง π หรือ f' ในช่วง -1 ถึง 1 วิธีหน้าต่างเป็นวิธี

พื้นฐานที่สุดวิธีหนึ่งที่จะใช้การหาสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง เป็นวิธีที่ง่ายต่อการออกแบบ และสามารถใช้ออกแบบตัวกรองแบบต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นแบบผ่านต่ำ (LPF) ผ่านสูง (HPF) ผ่านแถบความถี่ (BPF) หรือตัดแถบความถี่ (BSF) เราจะเริ่มออกแบบโดยใช้ต้นแบบจากตัวกรองอุดมคติ ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองอุดมคติทั้ง 4 แบบ โดยมีความถี่ตัด (cutoff frequency) เท่ากับ ω'_c สำหรับแบบและ ω'_b ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองอุดมคติ

สมมติให้ $d(n)$ แทนผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ และ $D(e^{j\omega'})$ แทนผลตอบสนองเชิงความถี่ สำหรับตัวกรองผ่านต่ำอุดมคติ ดังรูปที่ 3.2 ในทำนองเดียวกันสามารถหา $d(n)$ สำหรับตัวกรองอื่นๆ ได้ดังตารางสรุป สำหรับตัวกรองแบบต่างๆ เพื่อใช้อ้างอิงในการออกแบบต่อไป

ตารางที่ 3.1 ผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติต่างๆ

ชนิดของตัวกรอง	$d(n), -\infty < n < \infty$	$d(0)$
ผ่านต่ำ (LPF)	$\frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$	$\frac{\omega'_c}{\pi}$
ผ่านสูง (HPF)	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega'_c}{\pi}$
ผ่านแถบความถี่ (BPF)	$\frac{\sin(\omega'_b n) - \sin(\omega'_a n)}{\pi n}$	$\frac{\omega'_b}{\pi} - \frac{\omega'_a}{\pi}$
ตัดแถบความถี่ (BSF)	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_b n) - \sin(\omega'_a n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega'_b}{\pi} + \frac{\omega'_a}{\pi}$

ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่จะออกแบบซึ่งมีรูปร่างดังรูปที่ 3.2 ค่าที่จะใช้กำหนดเป็นคุณลักษณะเฉพาะของวิธีของวิธีหน้าต่างได้แก่

ความพลีวของแถบผ่าน (pass-band ripple, δ_{pass}) คือ ค่าสูงสุดที่ขนาดของแถบผ่านแกว่งออกจากค่า 1 บางครั้งวัดเป็น db โดยใช้

$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \text{ (dB)} \quad (3.16)$$

การลดทอนของแถบหยุด (stop-band attenuation, A_{stop}) คือ จำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลงจากค่า 1 วัดเป็น dB โดยมีความสัมพันธ์กับความพลีวของแถบหยุดคือ

$$A_{stop} = -20 \log \delta_{stop} \text{ (dB)} \quad (3.17)$$

ความกว้างของแถบเปลี่ยน (Transition band width, $\Delta f'$)

ความถี่ตัด (Cutoff frequency, f_c) คือ ค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 หรืออยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของแถบเปลี่ยน นิยามนี้ต่างจากความถี่ตัดของตัวกรองแอนะล็อก และตัวกรอง IIR ซึ่งความถี่ตัดหมายถึง ความถี่ที่ลดทอนลงเท่ากับ 3 dB

การออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ใช้ค่าความพลีวของแถบผ่าน หรือการลดทอนของแถบหยุดอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อเลือกชนิดของหน้าต่างที่สามารถใช้ได้จากตารางที่ 3.1 ถ้ามีข้อกำหนดทั้งสองอย่างให้เปลี่ยน A_{stop} เป็น δ_{stop} ก่อน แล้วเปรียบเทียบ δ_{pass} กับ δ_{stop} ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน

ถ้า δ_{pass} น้อยกว่าให้ใช้ δ_{pass} เป็นตัวเลือกหน้าต่าง แต่ถ้า δ_{stop} น้อยกว่าให้ใช้ A_{stop} เป็นตัวเลือกหน้าต่าง โดยมีหลักการว่า δ_{pass} ในตารางต้องน้อยกว่าที่ต้องการ และ A_{stop} ในตารางต้องมากกว่าที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ค่าความกว้างของแถบเปลี่ยนค่าอันดับของตัวกรองที่ต้องใช้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta f'$ กับ N คำนวณฟังก์ชันหน้าต่างที่ต้องใช้ จะได้

$$w(n), n=0,1,\dots,N-1 \quad (3.18)$$

จากตารางจะสังเกตได้ว่า อันดับของตัวกรองจะเป็นสัดส่วนผกผันกับ $\Delta f'$ นั่นคือ สามารถปรับปรุง $\Delta f'$ ให้แคบลงได้ โดยการเพิ่มค่า N แต่เราไม่สามารถปรับปรุงค่า δ_{stop} และ A_{pass} ให้ดีขึ้นได้ เพราะค่า δ_{stop} และ A_{pass} จะมีขนาดคงที่สำหรับหน้าต่างแบบหนึ่งๆ ยกเว้นหน้าต่างแบบ Kaiser

ขั้นตอนที่ 3 ใช้ชนิดของตัวกรอง (LPF, HPF, ...) และความถี่ตัดที่เราต้องการที่จะเลือกผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ ที่ถูกต้องจากตารางที่ 3.1

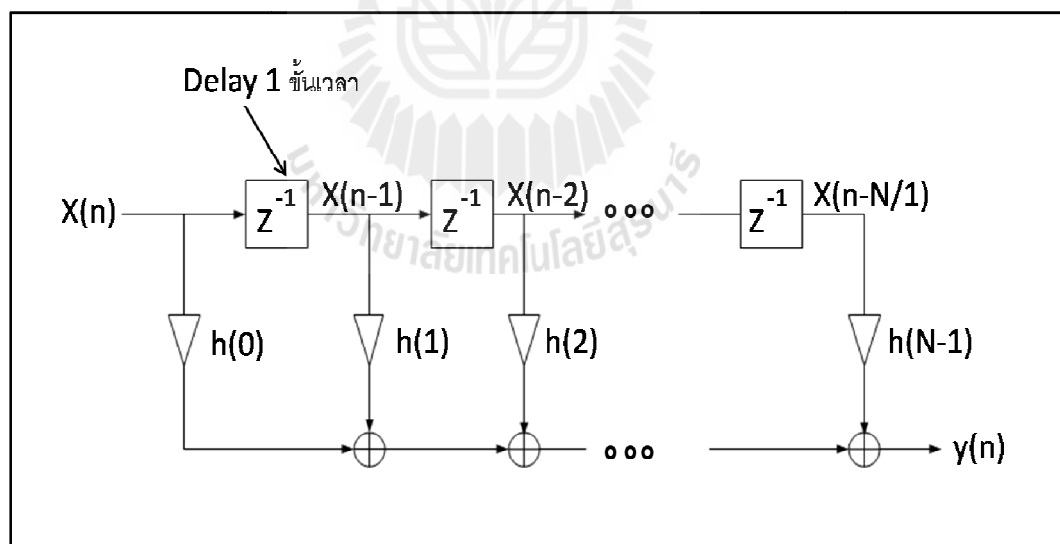
ขั้นตอนที่ 4 การเลื่อน $d(n)$ ให้ล้าหลังลง M ตำแหน่ง โดย $M = \frac{(N-1)}{2}$ จะได้สัญญาณเป็น $d(n-M)$ จากนั้นคูณเข้ากับฟังก์ชันหน้าต่าง $w(n)$ ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งจะได้เป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่มีความยาว N จุด และเป็นแบบคอชล์ ดังนี้

$$h(n) = d(n-M)w(n), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (3.19)$$

การออกแบบนี้จะต้องใช้ N เป็นจำนวนคู่ ซึ่งจะได้เป็นตัวกรอง FIR ที่มีเฟสเชิงเส้น และมีสมมาตรชนิดที่ 1 เพราะทั้ง $d(n)$ และ $w(n)$ มีสมมาตรรอบจุดกึ่งกลางทั้งคู่ สำหรับการออกแบบโดยที่ N เป็นจำนวนคี่ก็ทำได้เช่นกัน

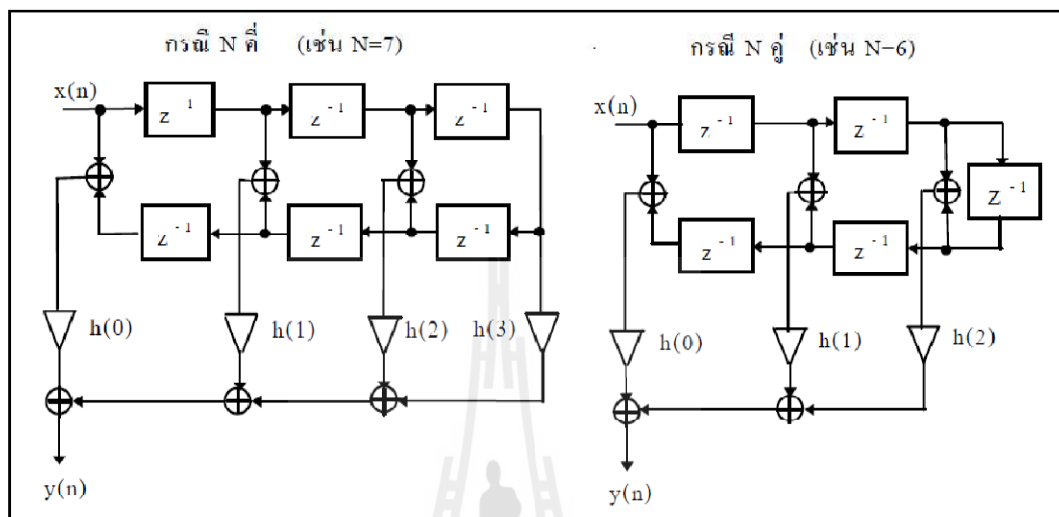
ตารางที่ 3.2 หน้าต่างแบบต่างๆ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

หน้าต่าง	δ_{pass}	A_{stop} (dB)	$\Delta f'$ (normalized)	$w(n), n = 0, 1, \dots, N-1$ $(M = \frac{N-1}{2})$
สี่เหลี่ยม (rectangular)	8.9%	21	$\frac{2}{N}$	1
ฮานนิง (Hanning)	0.63%	44	$\frac{4}{N}$	$0.5 - 0.5 \cos(\frac{2\pi n}{N-1})$
แฮมมิง (Hamming)	0.22%	53	$\frac{4}{N}$	$0.54 - 0.46 \cos(\frac{2\pi n}{N-1})$
แบล็กแมน (Blackman)	0.02%	74	$\frac{6}{N}$	$0.42 - 0.5 \cos(\frac{2\pi n}{N-1}) + 0.08 \cos(\frac{4\pi n}{N-1})$
ไคเซอร์ (Kaiser)	ปรับ ได้	ปรับ ได้	$\frac{A-7.95}{14.36(N-1)}$	$\frac{I_0(\alpha \sqrt{1-(n-M)^2/M^2})}{I_0(\alpha)}$



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการสร้างตัวกรองอิมพัลส์จำกัดโดยคอนโวลูชันปกติ

จากรูปที่ 3.3 ได้แสดงถึงโครงสร้างของตัวกรอง FIR ซึ่งเราจะใช้ค่าของผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ หรือ $h(n)$ เพื่อสร้างตัวกรองสำหรับกระบวนการของการประมาณค่าของตัวกรองดังกล่าวจะใช้การทำคอนโวลูชันระหว่าง $h(n)$ และสัญญาณขาเข้า $x(n)$ นั้นเอง



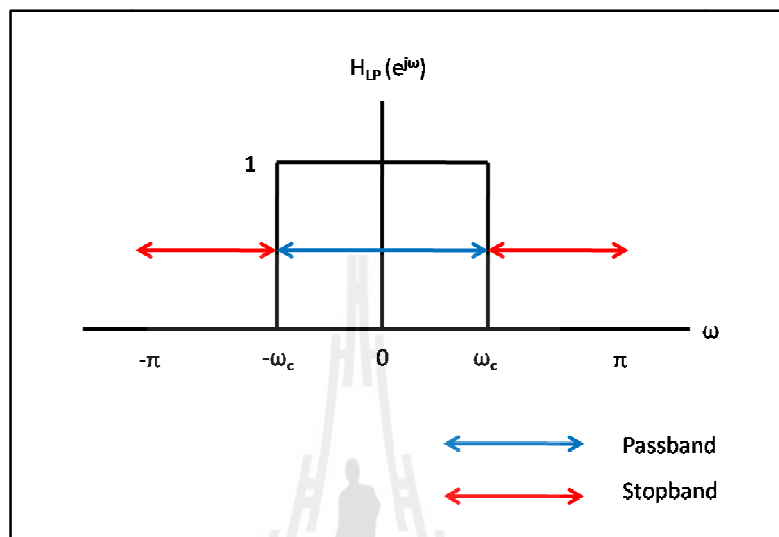
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการสร้างตัวกรองอิมพัลส์จำกัดเมื่ออาศัยคุณสมบัติการสมมาตร

จากรูปที่ 3.4 แสดงการประยุกต์การออกแบบตัวกรองอิมพัลส์จำกัดในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือทำเป็นฮาร์ดแวร์ชนิดพิเศษ เพื่อทำหน้าที่ตัวกรองแบบอิมพัลส์จำกัดโดยตรง ในกรณีที่ตัวกรองเป็นแบบเฟสเชิงเส้น ซึ่งหมายถึง $h(n)$ จะมีความสมมาตร ณ จุดกึ่งกลาง สำหรับคุณสมบัตินี้สามารถลดโครงสร้างตัวกรองอิมพัลส์จำกัดให้เล็กลงได้

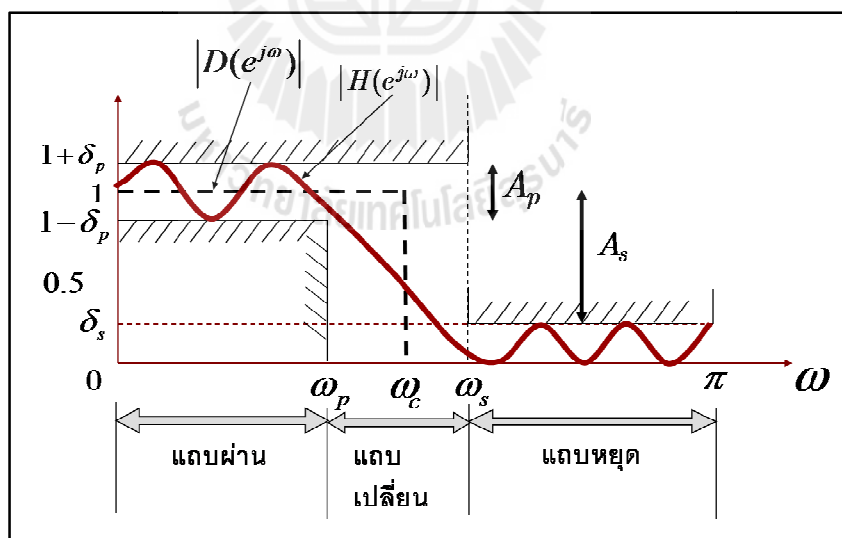
3.2.2.2 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ตามลักษณะเฉพาะของวิธีหน้าต่าง ต่อการออกแบบวงจรกรองความถี่ เช่น ความถี่ตัด อัตราการลดทอน ความพริ้วหรือริบเบิลของแถบผ่าน และความกว้างของแถบเปลี่ยน โดยรูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองต่ำผ่านโดยสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ สำหรับการออกแบบตัวกรองชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านก็คือค่าความถี่คัตออฟ ω_c ที่ต้องการใช้งานโดยพิจารณาตามรูปที่ 3.6 ดังนี้ ความถี่ตัด หมายถึงจุดตัดของความถี่ที่ให้สัญญาณผ่านหรือไม่ผ่านไปยังพอร์ตเอาต์พุตของตัวกรอง สำหรับตัวกรองความถี่ของ FIR กำหนดความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 ใช้นิยามเดียวกันกับตัวกรองแบบแอนะล็อก คือที่ขนาดลดลงประมาณ 0.707 โดยที่การลดทอนของแถบหยุด คือจำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลง ซึ่งการลดทอน

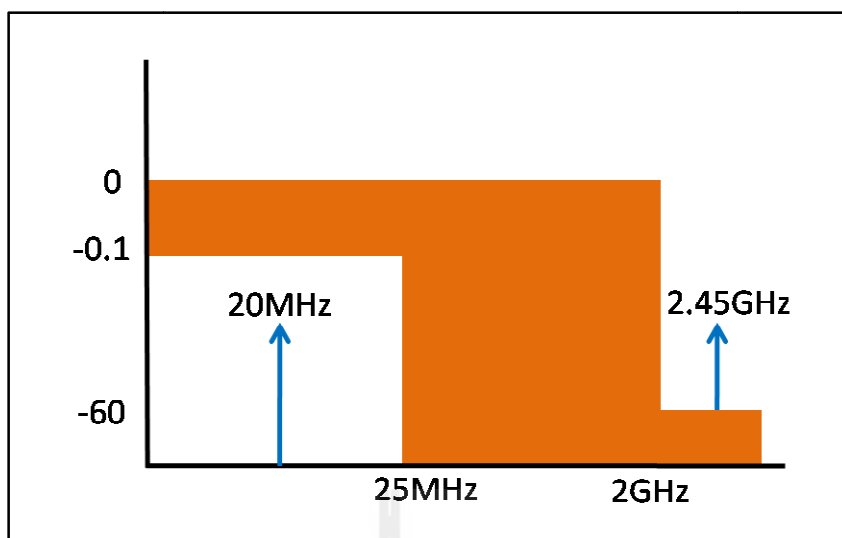
ของแถบหยุดมีความสัมพันธ์กับความพริ้วของแถบหยุด ขณะที่ความพลีวหรือริบเปิ้ลของแถบหยุด หมายถึงค่าสูงสุดที่ขนาดแถบผ่านแกว่งออกห่างจากค่า 1 ตามรูปที่ 3.6 ความกว้างของแถบเปลี่ยน คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดเทียบกับช่วงความถี่



รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองต่ำผ่าน



รูปที่ 3.6 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR



รูปที่ 3.7 ตัวกรองสัญญาณต่ำผ่านที่ออกแบบ

จากรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างของตัวกรองสัญญาณต่ำผ่านที่ได้ทำการออกแบบโดยทำการกรองสัญญาณคลื่นพาหะซึ่งเป็นสัญญาณความถี่สูงออกและให้สัญญาณ IF ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นความถี่ต่ำผ่านเพื่อนำไปหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนในระบบในรูปแบบของสัญญาณต่อไปซึ่งในการออกแบบตัวกรองดิจิทัลจะใช้ชุดโปรแกรมซอฟต์แวร์ของ GNU Radio เข้ามาช่วยในการออกแบบตัวกรองสัญญาณต่ำผ่านซึ่งมีพารามิเตอร์และโปรแกรมที่ออกแบบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

#create the channel filter coefficients

Chan_taps = optfir.low_pass(

1.0, #Filter gain

1e6, #Sample Rate

25e6, #one sided modulation BW (edge of passband)

2e9, #one sided channel BW (edge of stopband)

0.1, #Passband ripple

60) #Stopband Attenuation

#creates the channel filter with the coef found above

chan = gr.freq_xlating_fir_filter_ccf(

1, #Decimation rate

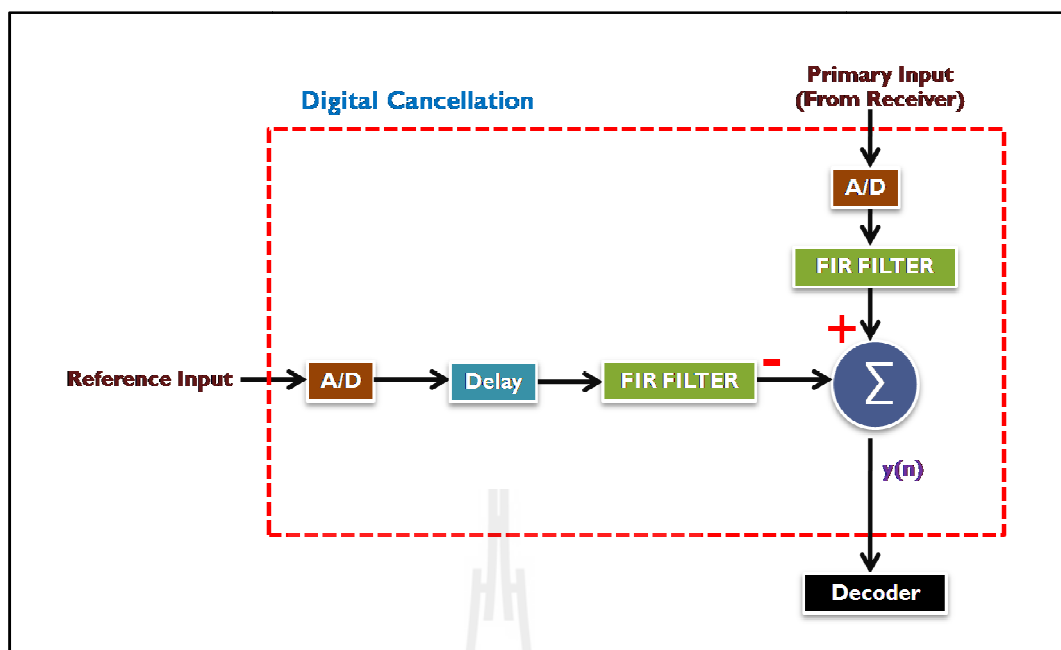
Chan_taps, #coefficients

0, #offset frequency – could be used to shift
 1e6) #incoming sample rate

3.2.2.3 รูปแบบการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลที่นำเสนอ

สำหรับระบบสื่อสารที่นำเสนอได้ออกแบบและพัฒนาแบบการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนในระบบสื่อสารดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยที่สัญญาณแทรกสอดที่รบกวนเข้ามาในระบบจากเซอร์คิวเลเตอร์นั้นจะเข้ามาในเส้นทางหลักโดยสัญญาณจะไหลผ่านตัวกรอง FIR เข้ามาในเส้นทางหลัก ส่วนสัญญาณอ้างอิงจะถูกส่งเข้ามาในเส้นทางรองโดยผ่านตัวกรอง FIR เช่นเดียวกันเราจะทำการหน่วงเวลาให้กับสัญญาณอ้างอิงในเส้นทางรองเพื่อปรับให้สัญญาณทั้งในเส้นทางหลักและสัญญาณในเส้นทางรองมารวมสัญญาณที่จุดเริ่มต้นเดียวกันเพื่อให้สัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์

จากเทคนิคการกำจัดสัญญาณดิจิทัลแบบเดิมที่ใช้อัลกอริทึม LMS ซึ่งจะมีการปรับค่าตลอดเวลาเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดสัญญาณให้น้อยที่สุดจะพบว่าอัลกอริทึมดังกล่าวจะมีหลักการการทำงานที่มีความซับซ้อนและในเวลาพอสมควรในการประมวลผลสัญญาณ แม้จะมีความยืดหยุ่นในการทำงานและสามารถปรับค่าสัญญาณได้ตามสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน แต่ระบบที่เราได้ทำการออกแบบแม้จะดูง่ายไม่ซับซ้อนแต่ก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ในระบบสื่อสาร สาเหตุที่วงจรกรองที่ได้ออกแบบกำจัดสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์เนื่องจากเราทราบสัญญาณที่ต้องการกำจัดที่แน่นอนเพราะเป็นสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจากโหนดเดียวกับภาครับและย้อนกลับเข้ามาในระบบ และสัญญาณแทรกสอดได้ถึงกำจัดไปแล้วบางส่วนโดยการกำจัดสัญญาณในส่วนที่ใช้คลื่นวิทยุในการหักล้าง ดังนั้นจึงเหลือสัญญาณที่อยู่ในระบบไม่มากวงจรกรองในส่วนของระบบดิจิทัลที่เราแนะนำเสนอจึงสามารถที่จะช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่รบกวนเข้ามาในระบบเป็นไปอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ภาครับรับสัญญาณที่ต้องการเข้ามาและนำไปประมวลผลเพื่อถอดรหัสสัญญาณที่เราต้องการได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลที่นำเสนอ

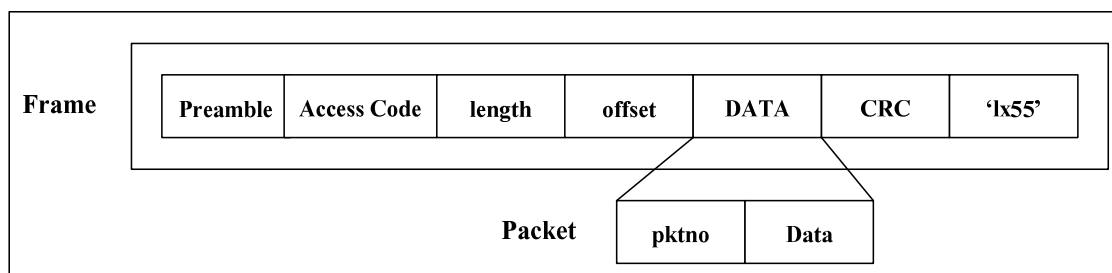
ในการออกแบบชุดทดสอบ เราจะต้องกำหนดอัตราการส่งข้อมูลของภาคส่งและภาครับให้ตรงกันเนื่องจากมีความสำคัญมากเพราะถ้าไม่เท่ากันจะส่งผลให้ภาครับไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ ซึ่งอัตราเร็วในการส่งข้อมูลแสดงได้ดังสมการ

$$Tx_bitrate = \frac{Dr}{Ipr} \quad (3.20)$$

เมื่อ Dr คือ อัตราการแซมปลิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 64 MS/sec.

Ipr คือ พารามิเตอร์ที่ใช้บอกอินเตอร์โพลเตอร์ของ FPGA ในการอินเตอร์โพลตสัญญาณด้วยค่าที่เรากำหนดโดยมีค่าอยู่ระหว่าง [4-512]

• โครงสร้างเฟรมข้อมูล



รูปที่ 3.9 โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ภาคส่ง

เฟรมข้อมูลที่ถูกขึ้นมาจากภาคส่งเพื่อทำการส่งออกอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 สามารถสร้างเฟรมข้อมูลได้จากผู้ใช้งานโดยตรงหรือสามารถสร้างเฟรมข้อมูลได้ในตัวโปรแกรม ซึ่งโครงสร้างเฟรมมีส่วนที่สำคัญนั่นคือแพ็คเกจข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังภาครับประกอบไปด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

pktno คือ เลขประจำตัวแพ็คเกจ หรือ packet number มีขนาด 2 ไบต์

Data คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

ขนาดแพ็คเกจข้อมูล (pkt_size) คือ 1500 ไบต์ ซึ่ง 2 ไบต์แสดงเลขของแพ็คเกจ ดังนั้นในแต่ละเฟรมจะบรรจุข้อมูลที่มีขนาด $\text{pkt_size} - 2$ ซึ่งในแต่ละเฟรมนั้นจะมีส่วนที่แสดงจุดสิ้นสุดของเฟรมนั่นคือ 0x55 เมื่อภาครับตรวจเจอตัวเลขชุดนี้ก็จะหยุดรับข้อมูลทันที และในส่วนที่แสดงให้ภาครับรับรู้ว่าการส่งเฟรมข้อมูลมาใหม่นั้นคือ preamble รูปที่ 3.10 แสดงถึงโปรแกรมในการสร้างเฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง ฟังก์ชัน struct มีหน้าที่ในการสร้างแพ็คเกจตาม รูปที่ 3.10 *struct.pack()* มีหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่ถูกสร้างออกมาให้อยู่ในรูปของแพ็คเกจข้อมูลและ *struct.unpack()* มีหน้าที่ในการถอดข้อมูลออกจากแพ็คเกจข้อมูลซึ่งจะมีการใช้งานฟังก์ชันนี้ที่ภาครับ

```

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

```

รูปที่ 3.10 โปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างเฟรมข้อมูล

สำหรับโปรแกรมสำหรับใช้ในส่วนของภาครับได้ทำการเขียนโปรแกรมชื่อว่า FD_send_rx.py ที่อยู่ใน /usr/share/gnuradio/FD_transceiver มาพัฒนาให้สอดคล้องกับระบบการสื่อสารแบบสองทาง โดยที่ภาครับนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจข้อมูลที่ได้รับ จะทำการตรวจสอบหมายเลขแพ็กเกจหากมีหมายเลขแพ็กเกจที่ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับก็จะนับแพ็กเกจนั้นเป็นแพ็กเกจที่ถูกต้อง รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างของส่วนที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจที่ภาครับ หากแพ็กเกจที่ได้รับได้ที่ภาครับมีความถูกต้องจะแสดงสถานะใน command line คือ True หากแพ็กเกจที่ได้รับได้มีความผิดพลาดและเลขแพ็กเกจไม่ตรงกันระหว่างภาคส่งและภาครับสถานะใน command line จะแสดงเป็น False

```

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

```

รูปที่ 3.11 โครงสร้างโปรแกรมในส่วนที่ตรวจสอบความถูกต้องของแพ็กเกจ

ในส่วนของภาครับมีพารามิเตอร์ที่สำคัญเหมือนกันกับภาคส่งนั่นคืออัตราการรับข้อมูลเข้ามาประมวลผล หากมีค่าไม่ตรงกันกับอัตราการส่งข้อมูลออกมาจากภาคส่ง จะทำให้ไม่สามารถรับแพ็กเกจข้อมูลที่ภาครับได้เลย สมการที่ 3.22 แสดงความสัมพันธ์ในการหาอัตราเร็วในการรับข้อมูลที่ภาครับ

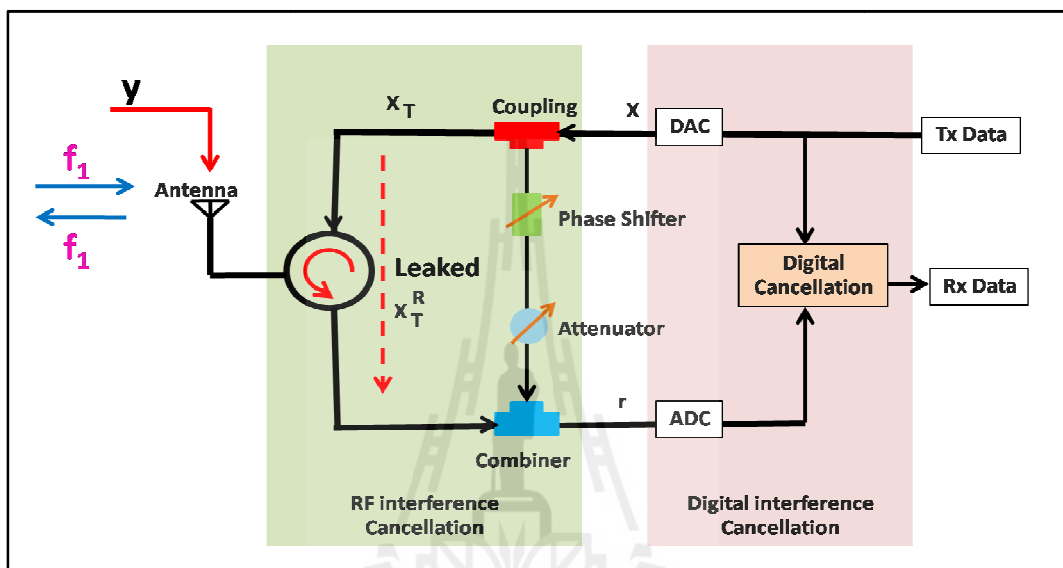
$$Rx_bitrate = \frac{Ar}{Dcr} \quad (3.21)$$

เมื่อ Ar คือ อัตราการแซมปลิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกซึ่งมีค่าเท่ากับ 128 MS/sec.

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

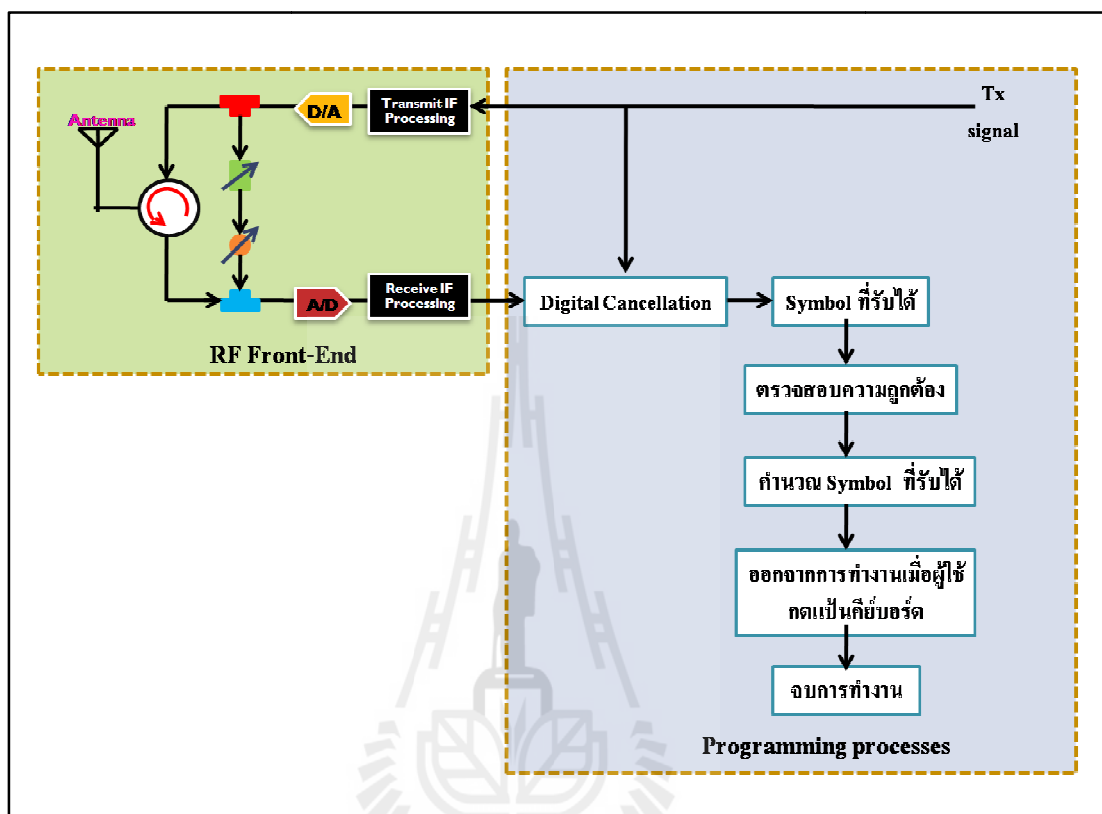
3.2.3 ภาพรวมของการออกแบบทั้งระบบ

จากรูปที่ 3.12 ได้แสดงภาพรวมระบบที่ได้ทำการออกแบบทั้งระบบเพื่อให้การสื่อสารแบบสองทางโดยใช้สายอากาศชุดเดียวและทำการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณเดียวกันในการทั้งรับและส่งพร้อมๆ กันทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเราจะแยกการทำงานออกได้เป็นสองส่วน ซึ่งหลักการทำงานและการออกแบบได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้



รูปที่ 3.12 แผนภาพรวมระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ได้นำเสนอ

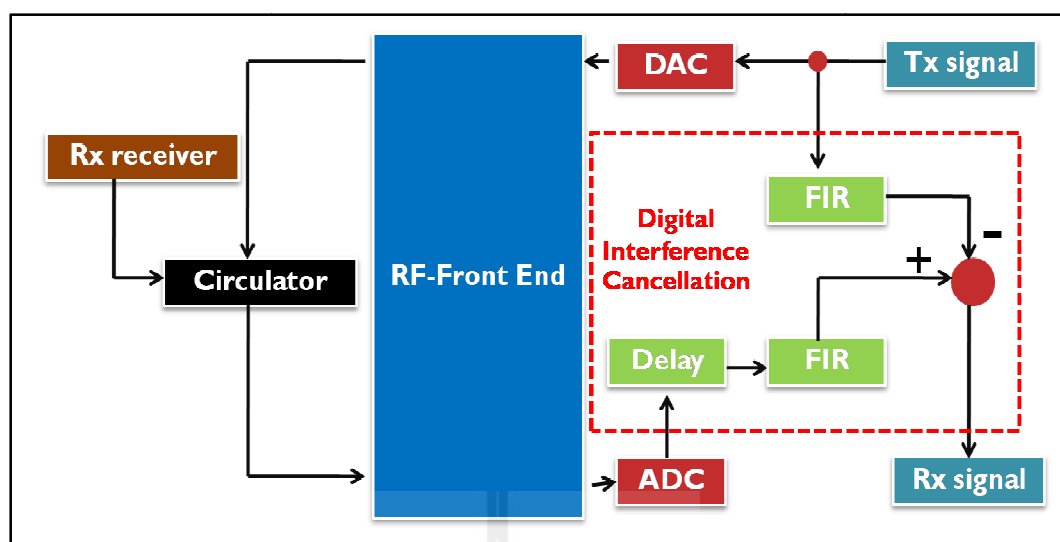
จากรูปที่ 3.13 ได้แสดงแผนภาพหลักการทำงานทั้งหมดของระบบการสื่อสารที่ได้ ออกแบบและนำเสนอ



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงกระบวนการทำงานระบบสื่อสารแบบสองทางที่ได้นำเสนอ

3.3 การทดสอบระบบสื่อสารแบบสองทางด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

การจำลองแบบระบบสื่อสารสำหรับระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้สายอากาศชุดเดียวและใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการสื่อสารรับและส่งนั้นมีปัจจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลัก ๆ ดังนี้ ประการแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ สัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณหรือสัญญาณแทรกสอดของตนเอง ประการที่สองคือ การปรับเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณ และประการสุดท้ายคือ ผลลัพธ์จากการทดสอบโดยการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับระบบเดิม ซึ่งในการจำลองแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

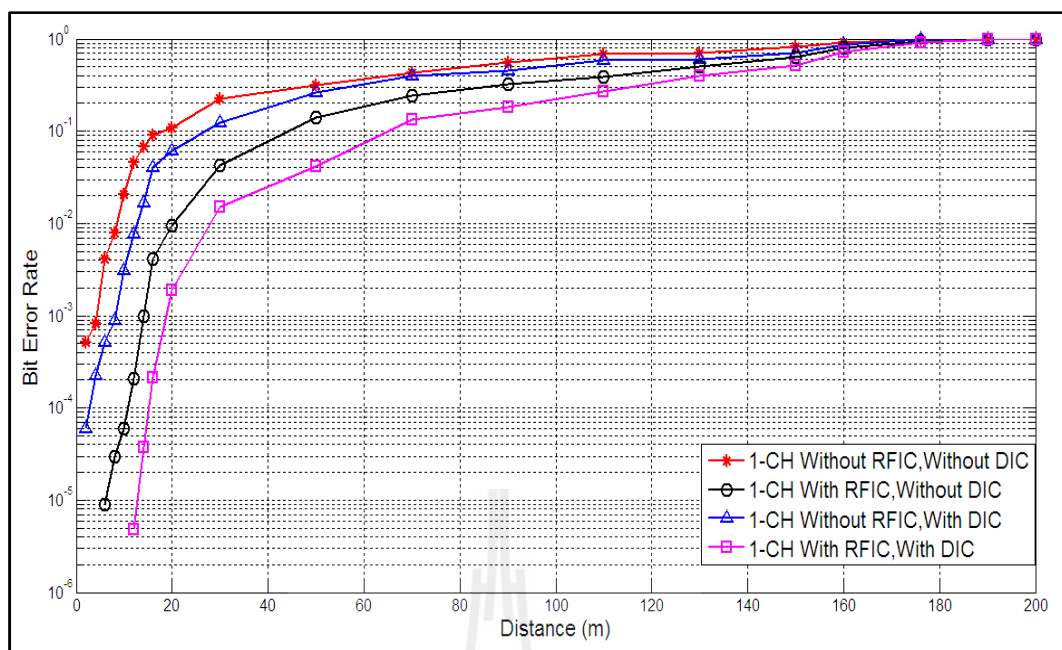


รูปที่ 3.14 บล็อกแสดงการทดสอบด้วยการจำลองในโปรแกรม MATLAB

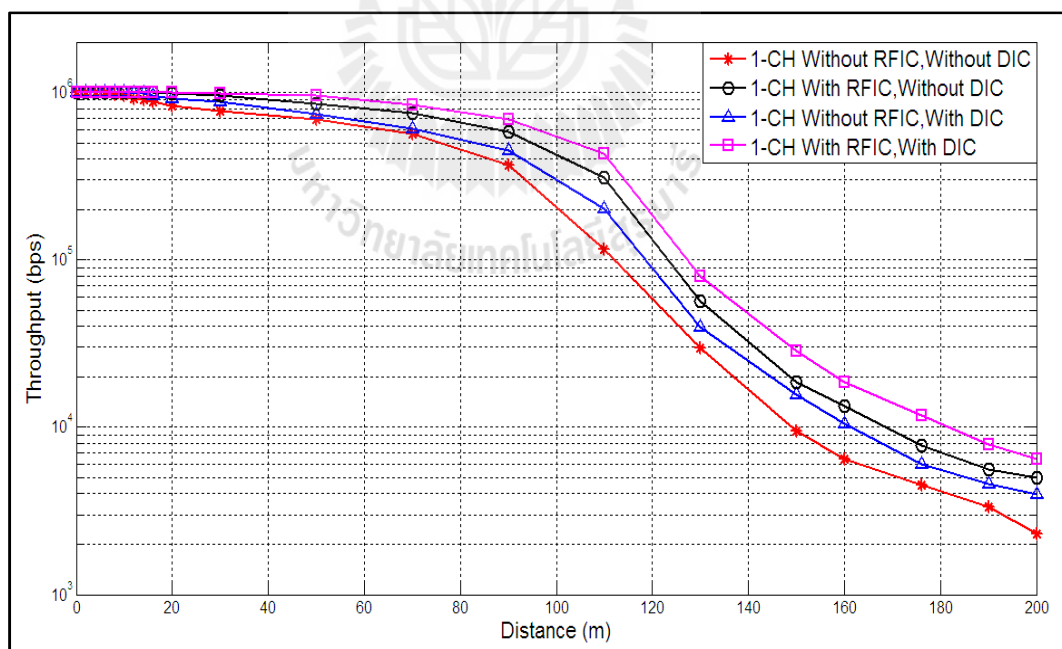
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Frequency band	2.45 GHz
Modulation type	BPSK
Data rate	1 Mbps
Power	20dBm or 100mW

ลำดับแรกเราจะทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงขึ้นมาก่อนและสัญญาณที่ต้องการรับเข้าจากระบบโดยพิจารณาตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1.2 และหัวข้อที่ 3.2.2.2 โดยระบบที่ทำการทดสอบโดยการจำลองผลการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB นั้น เราจะพิจารณาค่าความผิดพลาดบิต โดยการนำสัญญาณที่ถอดรหัสออกมาได้นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่เราต้องการรับเข้าเพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.15 หลังจากนั้นก็จะนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ค่าวิสัยความสามารถของการส่งผ่านข้อมูลดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบการวัดประสิทธิภาพความผิดพลาดบิตข้อมูล
เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ



รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบการวัดประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูล
เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

3.4 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้หลังจากที่ได้อ่านแล้วจะได้ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องรับส่งที่เสนอขึ้น การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของระบบกล่าวถึงกระบวนการในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้รองรับการทำงานที่ตรงต่อเป้าหมายในการใช้งาน ตลอดจนเรียนรู้ถึงหลักการออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้สายอากาศต้นเดียว จากนั้นเมื่อพิจารณาลงลึกถึงผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า เมื่อมีการนำระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นดังกราฟที่แสดงให้เห็นศักยภาพของระบบ



บทที่ 4

เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ Software Defined Radio (SDR) ซึ่งจะได้อธิบายถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องตลอดจนกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

4.2 เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

Software Defined Radio (SDR)

Software Defined Radio (SDR) คือ ระบบสื่อสารที่มีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงมาจากระบบการสื่อสารแบบดั้งเดิมที่จะต้องมี การดำเนินการและคำนึงถึงการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ในส่วนของอุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ ได้แก่ mixers filters amplifiers modulator demodulator detector ไว้ในระบบ แต่ระบบ SDR (เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์) ได้มีการออกแบบและดำเนินการของระบบสื่อสารโดยการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังกล่าวมาข้างต้นด้วยในรูปแบบของโปรแกรมทางด้านซอฟต์แวร์ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรืออุปกรณ์ embedded computing devices ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการลดปัญหาความซับซ้อนจากอุปกรณ์หรือวงจรทางด้านฮาร์ดแวร์ไปสู่ปัญหาทางด้านโปรแกรมซอฟต์แวร์แทน คุณลักษณะเบื้องต้นของเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์คือ มีการใช้โปรแกรมทางด้านซอฟต์แวร์ในการกำหนดรูปแบบของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการส่งสัญญาณ และทำการคิ่มอดูเลตสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับด้วยโปรแกรมทางด้านซอฟต์แวร์ ในทางตรงกันข้ามแล้วระบบสื่อสารแบบดั้งเดิมได้มีการใช้วงจรแอนะล็อกที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนทางด้านการออกแบบ แต่เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ได้นำข้อดีของวงจรแอนะล็อกมาปรับใช้ให้รวมเข้ากับข้อดีของวงจรเชิงดิจิทัลเพื่อสร้างเป็นระบบสื่อสารโดยใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์เป็นการพัฒนาการออกแบบระบบสื่อสารที่มีสมรรถนะความสามารถในการสร้างสัญญาณคลื่นวิทยุสื่อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงในอากาศ เป็นการเพิ่มทางเลือกอีกรูปแบบหนึ่งแก่ผู้ใช้งาน ในทางทฤษฎีเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์นั้นสามารถทำงานได้เหมือนกันกับระบบสื่อสารแบบดั้งเดิมแต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี

กำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์นี้ก็ยังมีความยืดหยุ่นสูง เหมาะแก่นักออกแบบและพัฒนา ระบบสื่อสารให้สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการออกแบบสร้างและพัฒนา ระบบสื่อสารที่มีความซับซ้อน ในแบบดั้งเดิมให้สามารถออกแบบได้ง่ายขึ้นและลดความซับซ้อนทางด้านออกแบบ และพัฒนาลงยังสามารถนำไปปรับใช้ในการพัฒนาระบบสื่อสารให้มีความหลากหลายได้มากขึ้น ด้วยการที่ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบสื่อสารผ่านทางเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ และยังง่ายต่อการใช้งานระบบสื่อสารซึ่งถือว่าเป็นทางเลือกอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจและเป็นที่ดึงดูดความสนใจของเหล่านักออกแบบและพัฒนา ระบบสื่อสาร ในการสร้างงานวิจัย หรือพัฒนาแอปพลิเคชันใหม่ ๆ ที่มีคุณภาพออกมาสู่ผู้บริโภคในท้องตลาดต่อไป

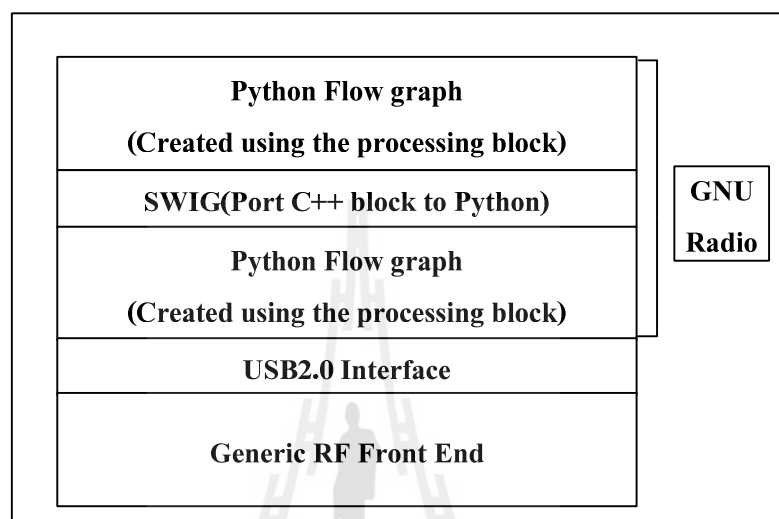
4.3 GNU Radio Software package

GNU Radio คือ ซอฟต์แวร์ที่เป็นเครื่องมือที่นำมาปรับใช้กับเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์และใช้ในการเรียนรู้ การสร้างและการใช้งานเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ GNU Radio มีการให้ไลบรารีของบล็อกการประมวลผลสัญญาณสำหรับใช้ในการศึกษาเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบสื่อสารมาให้มากมาย ซึ่ง GNU Radio นี้เป็น โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ไม่มีลิขสิทธิ์สามารถใช้งานได้ฟรีซอฟต์แวร์นี้ได้ให้ซอฟต์แวร์ที่มีความสมบูรณ์แบบ สำหรับการทดลองสร้างระบบสื่อสารโดยไม่มีการปิดบังรายละเอียดของโค้ดโปรแกรมแม้แต่ชนิดเดียว ในการใช้งาน GNU Radio วิศวกรผู้ออกแบบระบบสื่อสารจะต้องมีพื้นฐานความรู้ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. การเขียนโปรแกรมแบบ Objected-oriented programming ซึ่งเป็น โปรแกรมที่ทำงานกับข้อมูลมากกว่าตรรกะ โดยนำเข้าข้อมูลมาประมวลผลและแสดงผลลัพธ์
2. การเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาไพธอน (Python) และภาษาซี C++
3. ทักษะในการใช้งานระบบปฏิบัติการลินุกซ์ โดยใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ อุบนตุ (Ubuntu)
4. ในลำดับสุดท้ายจะต้องมีพื้นฐานความรู้ในด้านการออกแบบและพัฒนา ระบบการสื่อสารไร้สาย เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ฮาร์ดแวร์เบื้องต้น และการออกแบบวงจรไฟฟ้าทุกข้อที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ใช้งาน GNU Radio ทุกคนจะต้องมี

ซอฟต์แวร์ GNU Radio นี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วน ดังรูปที่ 4.1 โดยที่บล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ ประมวลผลประสิทธิภาพของระบบทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นมาจากการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษา C++ ในส่วนที่สูงขึ้นไปคือ การบริหารจัดการระบบ การเชื่อมต่อและการไหลผ่านข้อมูลระหว่างบล็อกระบบสื่อสารที่ได้สร้างไว้แต่ละบล็อกที่ใช้

ในการประมวลผลสัญญาณตลอดจนใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณนั้นสร้างขึ้นมาจากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาไพธอน บล็อกสำหรับใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่มีการใช้งานอยู่เป็นประจำหรือที่มีการพบเห็นว่ามีการใช้งานอยู่บ่อย ๆ ตัวโปรแกรมซอฟต์แวร์จะมีมาให้พร้อมอยู่แล้ว ซึ่งจะอยู่ในส่วนของตัวโปรแกรม GNU Radio



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของ GNU Radio

โครงสร้างดังรูปที่แสดงข้างต้นนี้จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับโครงสร้างของแบบจำลองเครือข่าย OSI-7 Layer โดยชั้นล่างสุดจะเป็นส่วนที่ให้บริการแก่ชั้นสูงสุด ชั้นสูงสุดจะเป็นที่บรรจุตัวโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณของระบบสื่อสารโดยการใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ ในการพัฒนาโปรแกรม ภายในบล็อกที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณในแต่ละบล็อกจะเป็นตัวแทนของการประมวลผลสัญญาณของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบสื่อสาร โดยแต่ละบล็อกสามารถเชื่อมต่อเข้ากับการทำงานด้วยกันได้ผ่านทาง flow graph จะเห็นได้ว่าตัวบล็อกที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณและตัวบล็อกที่เป็นแอปพลิเคชันนั้นถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยภาษาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีความแตกต่างกัน การที่จะทำให้ทั้ง 2 บล็อก คือ บล็อกในการประมวลผลสัญญาณและ บล็อกของแอปพลิเคชัน สามารถติดต่อสื่อสารเข้าด้วยกันได้นั้นต้องใช้ SWIG ซึ่ง SWIG เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างคลาสต่างๆ ของโปรแกรมที่ถูกเขียนด้วยภาษา C++ กับ Flow graph ที่ถูกพัฒนาด้วยภาษาไพธอน หรือหากมองให้เป็นเรื่องง่าย ๆ SWIG จะทำการแปลงคลาสของ C++ ให้อยู่ในรูปที่คล้ายคลึงกับคลาสของภาษาไพธอนนั่นเอง ไม่ว่าจะด้วยเหตุใดๆ ก็ตามโค้ดโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษาไพธอนนั้นมีข้อดีที่โค้ด

โปรแกรมสั้น แต่ทำงานมีความยืดหยุ่นในการทำงานได้ดี อีกทั้งยังเหมาะสมในการนำมาปรับใช้งานเข้ากับเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ ส่วนที่ยากที่สุดสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีนี้คือ การสร้างตัวประมวลสัญญาณด้วยภาษา C++ ที่มีกลไกอยู่อย่างหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งมีความน่าสนใจว่า “สำหรับการสร้างแอปพลิเคชันใด ๆ นั้น ก่อนที่จะสร้างเราต้องทราบวัตถุประสงค์ในการสร้าง ซึ่งในระดับของภาษาไพธอนนั้น จะทำการแสดงไดอะแกรมทิศทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณจากต้นกำเนิดไปยังจุดรับสัญญาณ ในบางครั้งก็ยังสนับสนุนการทำงานแบบ GUI ด้วย”

ฉะนั้นแล้วการเรียนรู้ภาษาไพธอนจึงจำเป็นอย่างมากในการก้าวเข้ามาสู่โลกแห่งการเรียนรู้ของชุดโปรแกรม GNU Radio ข้อดีของภาษาไพธอน อาทิเช่นเป็นภาษาที่มีประสิทธิภาพ เป็นภาษาที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นสำหรับการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาระบบสื่อสาร อีกทั้งหากเรามีความชำนาญด้านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ อยู่แล้วก็ยังทำให้โลกของเทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ดูง่ายขึ้นและง่ายต่อการเรียนรู้ในการพัฒนาระบบต่อไป

4.3.1 โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน

ในส่วนโครงสร้างของโปรแกรมนี้อาจแยกออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ ดังที่จะอธิบายเนื้อหาในส่วนถัดไปนี้

```
#!/usr/bin/env python
#ส่วนนี้เป็นการประกาศให้ตัวแปลภาษาไพธอนให้ประมวลผลคำสั่งที่ถูกเขียน
ด้วยโปรแกรมภาษาไพธอนนี้ได้
#ส่วนนี้เป็นการนำเข้าโปรแกรมเชิงวัตถุที่ต้องการใช้งานจากโมดูล โดยที่แต่ละ
ส่วนนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบงานที่ต้องการใช้
```

```
from gnuradio import gr, gru
from gnuradio import usrp
from gnuradio import eng_notation
#โค้ดเทียมต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่า Gnu Radio แยกการทำงานออกเป็น 3 ส่วน
###ส่วนที่ 1 Radio Class###
# 'gr.top_block' รับช่วงต่อจาก class ที่เราสร้างขึ้นคือ 'digital_radio'
class digital_radio(gr.top_block):
#เป็นการเริ่มทำงานของฟังก์ชันและการตั้งค่าระบบสื่อสารวิทยุ
def __init__(self):
#เริ่มการทำงานของ parent class
gr.top_block.__init__(self)
```

```

#ตั้งค่า block สำหรับระบบสื่อสารวิทยุ
self.source = setup_source()

self.sink = setup_USRP()
#เชื่อมต่อบล็อกใน Flow graph
Self.connect(self.source, self.sink)
### ส่วนที่ 2 Main function ###
#ฟังก์ชันนี้จะถูกเรียกไปใช้งานเมื่อผู้ใช้งานทำการสั่งงานผ่านทาง command line

def main():
    #สร้างระบบที่เราต้องการสร้าง ฟังก์ชัน __init__ จะถูกเรียกขึ้นมาใช้งานอย่าง
    อัตโนมัติ

    #ในส่วนนี้ เราจะต้องสร้างพารามิเตอร์เพื่อส่งไปยัง class
    radio = digital_radio()
    #เริ่มการทำงานของ Flow graph
    radio.start()
    #บริเวณนี้เราสามารถใส่โค้ดของระบบที่เราต้องการสร้างหรืองานที่ผู้ใช้งาน
    ต้องการพัฒนาขึ้นมาใช้งาน

    #รอจนSource ส่งข้อมูลเสร็จ
    radio.Wait()
### ส่วนที่ 3 โปรแกรมเริ่มทำงาน ###
    #ตรวจสอบว่า module ที่ใช้นั้นสามารถรันด้วยตนเองได้ไหม หรือว่าต้องรับ
    ด้วย moduleอื่น

    if __name__ == '__main__':
        #หากสามารถรันด้วยตนเองได้ ก็ให้ try ทำการรันฟังก์ชัน main ทันที
        try:
            main()

        #หากมีการรบกวนโดย keyboard โปรแกรมจะหยุดการทำงานทันทีโดยออก
        จาก mainฟังก์ชัน

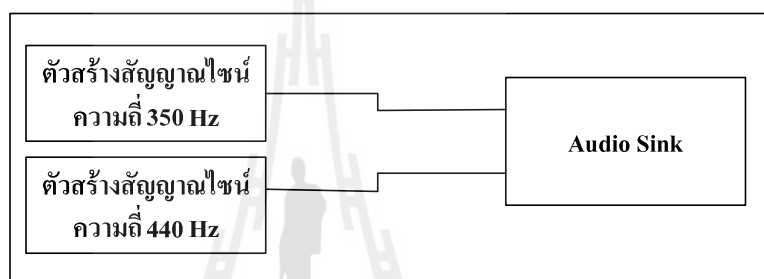
    except KeyboardInterrupt:
        #pass' นี่เป็นตัวหลักโดยที่จะถูกใช้งานเมื่อส่วนของโปรแกรมบางส่วนไม่ทำงาน
        Pass

```

ตัวอย่างการใช้ภาษาไพธอนพัฒนาแอปพลิเคชัน

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงโครงสร้างโปรแกรมภาษาไพธอนที่ใช้สำหรับการสร้างแอปพลิเคชันของระบบสื่อสาร ในที่นี้จะยกตัวอย่างการสร้างระบบสัญญาณโทรศัพท์แบบ Dial tone โดยเริ่มต้นที่การออกแบบบล็อกหรือที่เรียกว่า Flow graph ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แสดงทิศทางการเดินทางของสัญญาณ จุดเชื่อมต่อของสัญญาณในระบบดังกล่าวที่จำเป็นจะต้องมีในระบบที่ต้องการสร้าง ในระบบโทรศัพท์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยตัวสร้างสัญญาณ 2 ตัวเพื่อใช้ใน

การสร้างสัญญาณ 2 ความถี่ และเชื่อมต่อไปยังการ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลอง Flow graph ของระบบ โทรศัพท์แบบ dial tone

ในตัวอย่างนี้เริ่มต้นบรรทัดแรก เป็นการประกาศให้ตัวแปรภาษาไพธอนสามารถประมวลผลคำสั่งโปรแกรมได้ จากนั้นจะเป็นการเรียกใช้โมดูลจากแพ็คเกจ GNU radio และเรียกใช้ฟังก์ชันจากโมดูลในบรรทัดที่ 2 และ 3 ในบรรทัดที่ 4 เป็นการสร้างคลาสสำหรับระบบที่เราต้องการสร้างชื่อคลาสว่า my_top_block ในบรรทัดที่ 5 เป็นการสร้างฟังก์ชันชื่อ init และส่วนถัดไปตั้งแต่บรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 11 เป็นการสร้างระบบตามที่ผู้ใช้งานได้ออกแบบไว้และในบรรทัดที่ 12 และบรรทัดที่ 13 เป็นการเชื่อมต่อ connect เข้ามาสร้าง flow graph ให้สัญญาณที่ถูกสร้างเดินทางจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังปลายทางที่ต้องการนั่นคือการการ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้

```

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          amnl = 0.1
9
10         src0 = gr.sig_source_f(sample_rate, gr.GR_SIN_WAVE, 350, amnl)
11         src1 = gr.sig_source_f(sample_rate, gr.GR_SIN_WAVE, 440, amnl)
12         dst = audio.sink(sample_rate, "")
13         self.connect(src0, (dst, 0))
14         self.connect(src1, (dst, 1))
15
16     if __name__ == '__main__':
17         try:
18             my_top_block().run()
19         except KeyboardInterrupt:
20             pass

```

4.3.2 การสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณสำหรับ GNU Radio

แพ็คเกจของ GNU Radio ที่ให้มานั้นประกอบไปด้วยบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณที่หลากหลาย อาทิเช่น การมอดูเลตสัญญาณ การดีมอดูเลตสัญญาณ การสร้างแพ็คเกจข้อมูล เป็นต้น แต่สำหรับการสร้างระบบสื่อสารของผู้ใช้งานนั้น ยังมีบางบล็อกประมวลผลสัญญาณที่ไม่มีในแพ็คเกจ GNU radio ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ใช้งานจะต้องเรียนรู้ถึงการสร้างและใช้งานบล็อกในการประมวลผลสัญญาณขึ้นมาเอง โดยการสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณนี้สามารถทำภายนอกแพ็คเกจหลักของ GNU Radio ได้แล้วค่อยเพิ่มเข้าไปในส่วนของไลบรารีของแพ็คเกจGNU Radio จากนั้นจึงประกาศให้ทั้งแพ็คเกจรู้ว่าผู้ใช้งานมีการสร้างบล็อกขึ้นมาใหม่ในแพ็คเกจซึ่งการเรียกใช้บล็อกที่สร้างขึ้นมาใหม่นั้นสามารถเรียกใช้ได้โดยส่งผ่านทางเมธอด import แต่ข้อควรคำนึงถึงนั่นคือ บล็อกในการประมวลผลสัญญาณนี้จะต้องถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยการเขียนโปรแกรมภาษา C++ แต่การพัฒนาแอปพลิเคชันกลับพัฒนาผ่านทางด้านการเขียน

โปรแกรมด้วยภาษาไพธอน เครื่องมือสำคัญในการทำให้ทั้ง 2 ภาษาสามารถเชื่อมต่อและสื่อสารกันได้นั้นคือ Simplified Wrapper and Interface Generator (SWIG)

gr_block เป็นคลาสแรกพื้นฐานของทุก ๆ คลาสที่ประกอบอยู่ใน GNU Radio แพ็กเกจ ซึ่งในการสร้างบล็อกในการประมวลผลสัญญาณนั้นจะต้องเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ และจะต้องสร้างขึ้นมาทั้งหมด 3 ส่วนประกอบได้แก่

1. .h เป็นการสร้างไลบรารีให้กับโค้ดโปรแกรม
2. .cc เป็นการกำหนดชื่อคลาสใหม่และยอมให้ภาษาไพธอนสามารถเรียกไปใช้งานได้
3. .i เป็นตัวบอก SWIG ว่าจะสร้างการเชื่อมต่อกับบล็อกต่าง ๆ อย่างไร

เนื้อหาในส่วนถัดไปนี้จะได้อธิบายถึงตัวอย่างการสร้างบล็อกสำหรับการประมวลผลสัญญาณเพื่อใช้ในการหาขนาดของสัญญาณขาเข้าที่เป็นจุดทศนิยม ในการสร้างบล็อกประมวลผลสัญญาณจะต้องทำการสร้างทั้งหมด 3 ไฟล์ .cc ,.h และ .i สำหรับตัวอย่างนี้บล็อกในการประมวลผลสัญญาณมีชื่อว่า how_to_square_ff



ส่วนที่ 1 สำหรับไฟล์

ชื่อ `how_to_square_ff.h`

```

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

```

บรรทัดที่ 1 และ 2 ในโค้ด เป็นการป้องกันหากมีบล็อกนี้มากกว่า 1 บล็อก บรรทัดที่ 3 รวม `gr_block.h` ลงไปในไลบรารี และ บรรทัดที่ 4 กำหนดชื่อคลาส `howto_make_square_ff` ส่วนบรรทัดที่ 5 เป็นการใ้การกำหนดในการเข้าใช้งานของ `gr_block.h` ส่วนบรรทัดที่ 6 กำหนดให้ `howto_make_square_ff` เป็นตัวอินเตอร์เฟสทั่วไป บรรทัดที่ 10 เป็นการประกาศให้ `howto_make_square_ff` ให้เข้าใช้งานตัวสร้างโปรเวทหลักได้ บรรทัดที่ 11 กำหนดให้ `howto_square_ff` เป็นตัวสร้างโปรเวท บรรทัดที่ 13 `~howto_square_ff` ถูกกำหนดเป็นตัวสร้างงานให้แก่ตัวแปรโปรเวทบรรทัดที่ 14-17 สร้างเมธอด `general_work` ที่กำหนดการทำงานของ `gr_block.h` ส่วนสุดท้าย บรรทัดที่ 19 เป็นส่วนสุดท้ายของบล็อก `INCLUDED_HOWTO_SQUARE_FF_H`

ส่วนที่ 2 สำหรับไฟล์ชื่อ how_to_square_ff.cc

```

1  #ifndef 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 บรรจุผลที่ถูกรวบรวมขึ้นมานี้ โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ส่วนในบรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 10 นั้นเป็นการสร้าง howto_square_ff และ

ส่วนที่ใช้ส่งค่า `shared_ptr` กลับคืนมา บรรทัดที่ 11 ถึงบรรทัดที่ 14 นั้นถูกกำหนดไว้สำหรับค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของการส่งผ่านข้อมูลขาเข้าและการส่งผ่านข้อมูลขาออก สำหรับตัวอย่างนี้มีเพียง 1 การส่งผ่านข้อมูลทั้งขาเข้าและการส่งผ่านข้อมูลขาออก บรรทัดที่ 15 ถึง บรรทัดที่ 18 เป็นการกำหนดการสร้างข้อมูลหลัก และบรรทัดที่ 19 ถึงบรรทัดที่ 31 เป็นการคำนวณค่าการถอดรหัาสองออกมาเป็นจำนวนที่มีจุดเป็นเลขทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง บรรทัดที่ 32 และบรรทัดที่ 33 เป็นการแจ้งให้ระบบสื่อสารทราบว่าจำนวนข้อมูลขาเข้าของแต่ละสายข้อมูลเป็นจำนวนเท่าใด

ส่วนที่ 3 สำหรับไฟล์ชื่อ `how_to_square_ff.i`

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

บรรทัดที่ 6 ถูกเขียนขึ้นมาเพื่อกำหนดให้รายงานความผิดพลาดในการประมวลผลคำสั่งของตัวโปรแกรม บรรทัดที่ 8 แสดงถึงจำนวนอาร์กิวเมนต์ที่ต้องการของ `howto` ได้แก่ `packetprefix` และ `square_ff` คือ ชื่อของคลาส

ยังมีอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ ไฟล์ `howto.i` ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการเชื่อมต่อในส่วนของการบอก SWIG ให้สามารถใช้เรียกใช้งานบล็อกแต่ละบล็อกเพื่อนำมาประมวลผลคำสั่งที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณที่สร้างขึ้นมาได้

ในส่วนที่ 2 ไฟล์ `config.h` ในบรรทัดที่ 2 บรรจุผลที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ส่วนในบรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 10 นั้นเป็นการสร้าง `howto_square_ff` และส่วนที่ใช้ส่งค่า `shared_ptr` กลับคืนมา บรรทัดที่ 11 ถึงบรรทัดที่ 14 นั้นถูกกำหนดไว้สำหรับ

ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของการส่งผ่านข้อมูลขาเข้าและการส่งผ่านข้อมูลขาออก สำหรับตัวอย่างนี้ มีเพียง 1 การส่งผ่านข้อมูลทั้งขาเข้าและการส่งผ่านข้อมูลขาออก บรรทัดที่ 15 ถึง บรรทัดที่ 18 เป็นการกำหนดการสร้างข้อมูลหลัก และบรรทัดที่ 19 ถึงบรรทัดที่ 31 เป็นการคำนวณค่าการถอดรหัสดูสองออกมาเป็นจำนวนที่มีจุดเป็นเลขทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง บรรทัดที่ 32 และบรรทัดที่ 33 เป็นการแจ้งให้ระบบสื่อสารทราบว่าจำนวนข้อมูลขาเข้าของแต่ละสายข้อมูลเป็นจำนวนเท่าใด

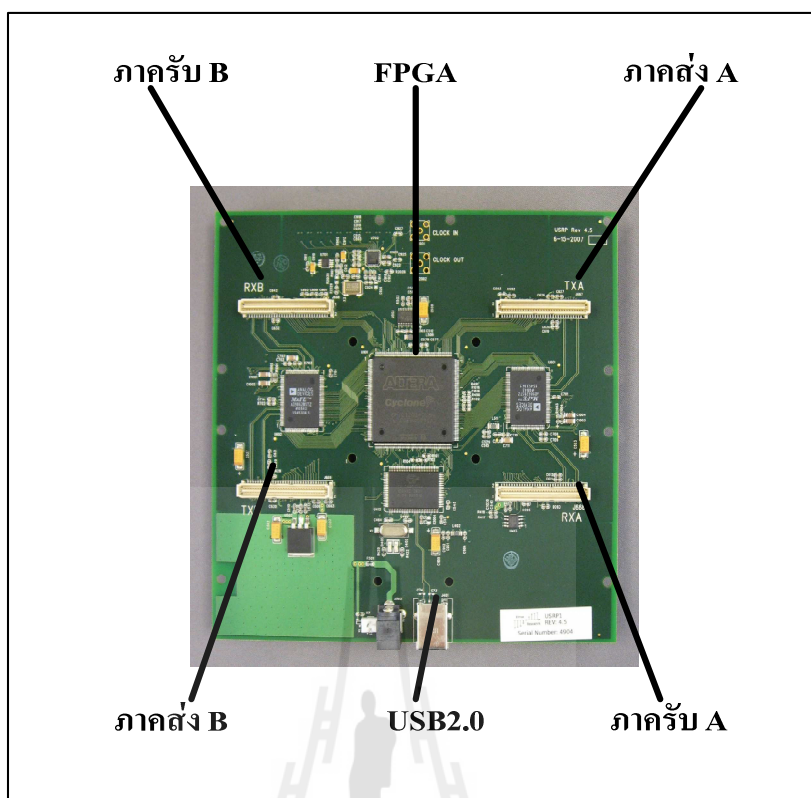
4.4 ชุดอุปกรณ์ Universal software radio peripheral

ชุดอุปกรณ์บอร์ด USRP ถูกออกแบบขึ้นมาให้รองรับการใช้งานตามความต้องการของผู้ใช้งานโดยที่สามารถใช้ออกแบบระบบรับส่งสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ได้ที่แบนด์วิดท์สูง กล่าวคือตัวบอร์ด USRP ถูกออกแบบให้มีทั้งส่วนของสัญญาณดิจิทัลอนาล็อกและสัญญาณความถี่กลางเพื่อรองรับการออกแบบระบบสื่อสารโดยการใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์

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)

4.4.1 ส่วนประกอบหลักของ USRP Board

ชุดอุปกรณ์ USRP Board ชุดหนึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ อยู่สองส่วนคือ USRP Mother Board 1 ตัว และ Daughter Board ซึ่งรองรับได้ทั้งหมด 4 ตัว USRP Mother Board 1ตัว จะประกอบไปด้วยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลความเร็วสูง (ADCS) จำนวน 4 ตัว และตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความเร็วสูง (DACs) อีก 4 ตัว ซึ่งเป็นทางเดินของสัญญาณขาเข้าจำนวน 4 ชุด และเป็นทางเดินของสัญญาณขาออกจำนวน 4 ชุด เชื่อมต่อไปยัง FPGA Altera Cyclone EPIC12 โดยเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมชุดอุปกรณ์ผ่านทางพอร์ตเชื่อมต่อแบบ USB2.0 ในตัวFPGA นั้นจะมีชุดอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมคือ Cypress FX2 USB2.0 แต่ข้อควรคำนึงคือชุดอุปกรณ์นี้จะไม่รองรับการทำงานโดยการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวบอร์ด USRP ด้วยพอร์ตเชื่อมต่อแบบ USB 1.1 รูปที่ 4.3 แสดงถึงตัวบอร์ด USRPและส่วนประกอบต่าง ๆ ของบอร์ด



รูปที่ 4.3 บอร์ด USRP

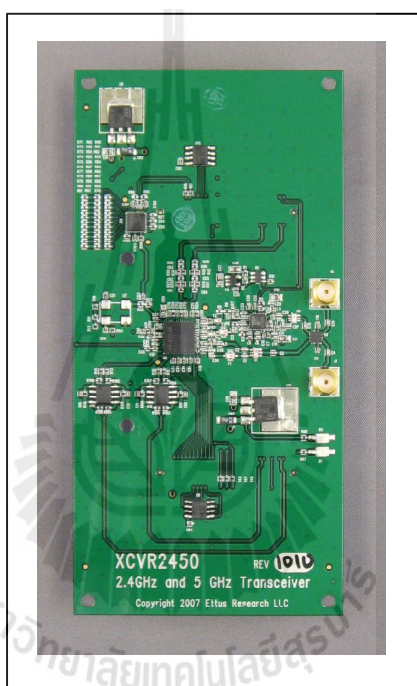
- ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (AD/DA Converters)

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

● Daughter Board

ชุดอุปกรณ์ Daughter Board XCVR2450 ดังรูปที่ 4.4 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 DaughterBoard ได้ 2 ชุดเช่นกัน คือ ภาครับ RXA และ RXB



รูปที่ 4.4 ชุดอุปกรณ์ Daughter boards

แต่ละสล็อตของ Daughter Board สามารถใช้งานตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกได้อย่างละ 2 ตัว คือ ส่วนของสัญญาณขาออกของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ภาคส่งและส่วนสัญญาณขาเข้าของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ภาครับด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ตัวบอร์ด USRP สามารถใช้งานในการส่งสัญญาณออกไปพร้อม ๆ กันได้ที่สายอากาศทั้ง 2 ด้าน และรองรับการทำงานที่หลากหลายด้วยประสิทธิภาพหน้าที่การทำงานของ daughter board จะทำการ

รับสัญญาณที่ถูกประมวลผลแล้วจาก บอร์ด USRP ซึ่งจะทำการประมวลผลสัญญาณเบสแบนด์ และส่งสัญญาณดังกล่าวไปยัง daughter board



รูปที่ 4.5 ชุดอุปกรณ์ USRP

รูปที่ 4.5 แสดงชุดอุปกรณ์ USRP ที่ประกอบเข้าไปยังกล่องเก็บอุปกรณ์ จากรูปประกอบไปด้วยตัวบอร์ด USRP และ Daughterboard

- **ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC)**

ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล หน้าที่คือทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณเชิงเลข โดยผ่านกระบวนการดิจิทัลสัญญาณ ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะถูกติดตั้งอยู่ในภาครับของ USRP มีจำนวนทั้งหมด 4 ตัว ความละเอียดในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอยู่ที่ 12 บิต อัตราการแซมปลิง 64 MS/Second โดยปกติแล้วตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะสามารถดิจิทัลสัญญาณได้กว้างถึง 32 MHz ดังนั้นสัญญาณที่อยู่นอกเหนือแบนด์วิธ 32 MHz นี้ ตัวแปลงสัญญาณจะไม่สามารถแปลงสัญญาณได้ ซึ่งแบนด์วิธ 32 MHz สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของไนควิสต์

- **ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (DAC)**

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

ของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะอยู่ที่ 64 MHz แต่อย่างไรก็ตามจะต้องให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณต่ำกว่านี้เพื่อให้ภาครับสามารถกรองสัญญาณได้ง่าย ซึ่งย่านที่ทำงานได้คืออยู่ที่ประมาณ 44 MHz สำหรับการส่งสัญญาณ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะถูกบรรจุอยู่ในชิป AD9862 CODEC ซึ่งในภาคส่งนี้มีอุปกรณ์ที่สำคัญอีกอย่างคือ Digital Up Converter (DUC) ซึ่งมีหน้าที่ในการประมาณค่าช่วงของสัญญาณที่ทำการสื่อสาร (interpolation) จากนั้นจะทำการแปลงสัญญาณไปสู่ความถี่กลางและสุดท้ายส่งสัญญาณไปที่ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

- **FPGA**

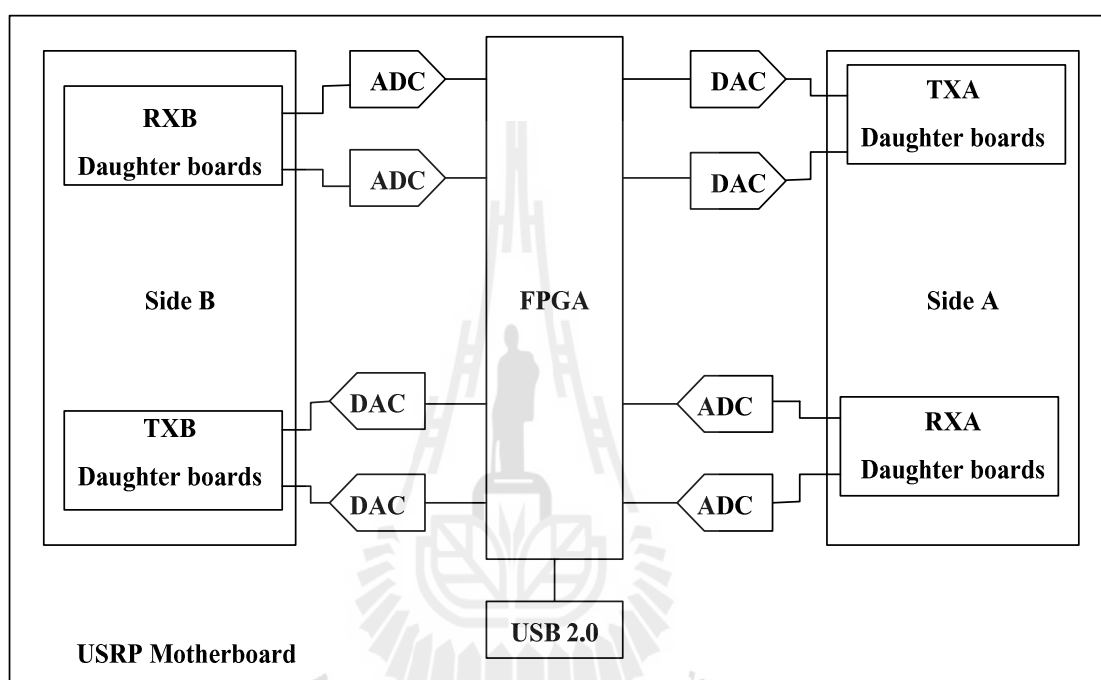
FPGA เป็นหัวใจหลักของชุดอุปกรณ์ USRP ซึ่ง FPGA ที่บรรจุอยู่ในชุดอุปกรณ์ USRP คือ Altera Cyclone EP1C2Q240C8 ซึ่งชุดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกทุกตัวจะเชื่อมต่อกับ FPGA โดยที่ FPGA สามารถรองรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยแบนด์วิดท์สูง ประสิทธิภาพในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยแบนด์วิดท์สูงนี้ถูกเรียกว่า Digital Down Converter (DDC) ซึ่ง DDC จะทำการแปลงสัญญาณจากความถี่วิทยุลงมาเป็นสัญญาณที่ความถี่กลาง จากนั้นก็จะทำการดีโมเดมสัญญาณต่อไป

- **USB2.0**

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

4.5 ทิศทางการไหลของสัญญาณใน USRP Board

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการศึกษาเข้าไปถึงภายในของชุดอุปกรณ์เพื่อดูว่า ทิศทางการไหลของสัญญาณภายใน USRP Board นั้นเป็นอย่างไร หลังจากศึกษาส่วนนี้แล้วผู้ใช้งานจะต้องทำการศึกษาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลต่อไป ซึ่งทิศทางการไหลของสัญญาณในตัว USRP Board นั้นสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 4.6 ได้แก่



รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบภายในบอร์ด USRP

4.5.1 ภาครับ

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

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

คล้าย ๆ กันกับเราที่เตอร์หรือวงจรสลับสัญญาณ ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ในการมัลติเพล็กซ์ (MUX) นี้มีหน้าที่กำหนดเส้นทางว่า ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ DDCS ตัวไหนผู้ใช้งานสามารถควบคุมชุดอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ได้โดยใช้ `usrp.set_mux()` ซึ่งเป็นเมธอดหนึ่งที่อยู่ในไพธอน

จากนั้นพิจารณาที่ชุดอุปกรณ์ DDCS ในอันดับแรกอุปกรณ์นี้จะทำการแปลงจากความถี่กลางเป็นความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ ลำดับที่สองทำการ Decimate สัญญาณเพื่อส่งผ่านพอร์ต USB2.0 เข้าไปสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมชุดอุปกรณ์ รูปที่ 4.4 แสดงชุดอุปกรณ์ DDCs สัญญาณขาเข้าเชิงซ้อนที่ความถี่กลางจะถูกคูณด้วยสัญญาณเอ็กโปเนนเชียลที่มีความถี่คงที่ หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณเชิงซ้อนที่ตั้งอยู่ที่ความถี่ศูนย์ และเราจะทำการ Decimate สัญญาณด้วยแฟลคเตอร์ M ต่อไป

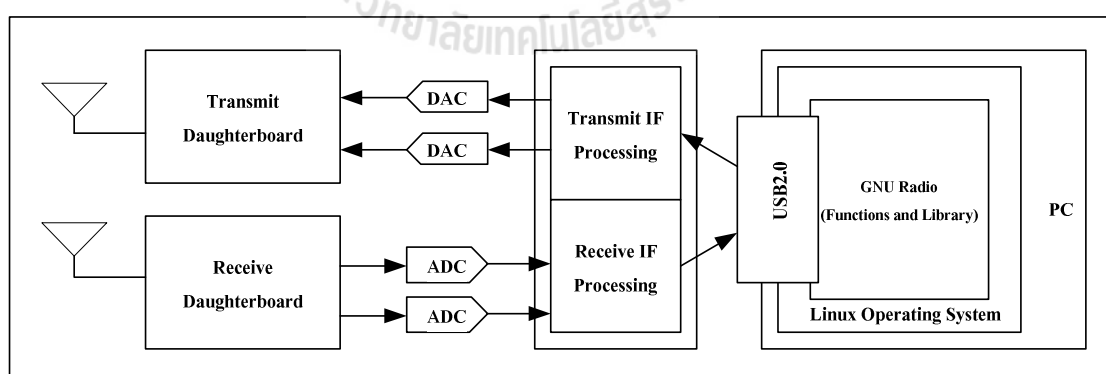
4.5.2 ภาคส่ง

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

ข้อแตกต่างระหว่าง DDC และ DUC คือ DUC นั้นจะอยู่ในชิป AD9862 CODEC ไม่ได้อยู่ใน FPGA เหมือน DDC ในภาคส่งนี้ FPGA จะทำเพียงแค่การ Interpolate สัญญาณเพียงเท่านั้น สิ่งที่น่ารู้อีกอย่างคือ ช่องสัญญาณของภากรับทุกช่องจะมีอัตราเร็วของข้อมูลเท่ากัน และที่ภาคส่งก็เหมือนกันคือ อัตราเร็วในการส่งข้อมูลต้องมีค่าเท่ากันทุกช่อง เมื่อผู้ใช้งานมีการเรียนรู้ถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบแล้ว ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ หลังจากนั้นก็จะเป็นการนำความรู้ทั้งสองส่วนดังกล่าวเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานวิจัย ซึ่งเมื่อนำทั้งสองส่วนมาประกอบรวมกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

4.6 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 แต่จะให้ผู้ใช้งานสามารถติดตั้งตัวโปรแกรมผ่านทาง Linux command line กับตัวแพ็คเกจที่อยู่ใน SVN ได้



รูปที่ 4.7 ภาพรวมของ GNU Radio และ USRP

4.6.1 Install dependencies

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

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

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

หากผู้ใช้งานเลือกใช้ระบบปฏิบัติการ 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
```

4.6.2 Install an SVN Client

SVN เซิร์ฟเวอร์นั้นมีการเปิดการใช้การควบคุมเวอร์ชันของตัวโค้ดโปรแกรมหากโค้ดโปรแกรมมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ที่เซิร์ฟเวอร์จะยอมให้มีการกลับไปใช้โค้ดโปรแกรมเวอร์ชันเดิมที่ไม่มีความผิดพลาด เนื่องจาก SVN server มีลักษณะที่สามารถใช้งานได้สะดวกและคล่องตัวแถมยังมีการปรับปรุงฐานข้อมูลของโค้ดโปรแกรมให้ทันสมัยและใหม่อยู่เสมอ ๆ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้งานเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเมื่อผู้ใช้งานมีการติดตั้งตัวโปรแกรม GNU radio ลงไปในเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว หากต้องการที่จะปรับปรุงฐานข้อมูลของโค้ดโปรแกรมย่อก็สามารถเลือกอัปเดตข้อมูลนั้น ๆ ได้ จากนั้น GNU radio ก็จะทำการติดตั้งแพ็คเกจใหม่อีกครั้งเพื่อปรับปรุงโค้ดให้ใหม่อยู่เสมอๆ เช่นกัน ในขั้นตอนเริ่มต้น สิ่งผู้ใช้งานจะต้องจัดเตรียมไว้ คือ ดาวน์โหลด Smart SVN มาจาก www.syntevo.com/smartsvn/download.html จากนั้นทำการ unzip ตัว smart svn ที่โหลดมาแล้วทำการย้ายไปยัง `/usr/share` ทางที่ง่ายที่สุดในการทำขั้นตอนนี้คือ เปิด file browser ด้วยสิทธิ์การใช้งานแบบ root

4.7 ระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ซึ่งทั้ง 2 ส่วนเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง ซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ หากใช้ระบบปฏิบัติการไม่เหมาะสมกับคุณลักษณะฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ก็จะทำให้การใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ ปัจจุบันนี้มีซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการมากมายเป็นตัวเลือกให้กับผู้ใช้งาน และที่เป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลกได้แก่ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ของไมโครซอฟท์ ทุกคนต่างรู้ดีว่าราคาลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์มีราคาสูงอีกทั้งผู้ใช้งานได้เพียงแค่ว่าสามารถใช้แต่ไม่สามารถพัฒนาตัวซอฟต์แวร์ได้ เมื่อไม่นานมานี้มีระบบปฏิบัติการหนึ่งที่ถูกกล่าวถึงและเป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลก ระบบปฏิบัตินั้นคือลินุกซ์ ซึ่งมีการพัฒนามาหลากหลายเวอร์ชัน ด้วยข้อดีที่ไม่มีลิขสิทธิ์ ไม่ต้องจ่ายเงินแพงในการใช้ระบบปฏิบัติการ อีกทั้งยังสามารถเข้าไปแก้ไขระบบปฏิบัติการเชิงลึกได้ด้วย จึงทำให้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์เป็นที่นิยมใช้ไปทั่วโลกและเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานที่จะเลือกระบบปฏิบัติการให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งานเอง

ในการใช้งานระบบปฏิบัติการลินุกซ์บนคอมพิวเตอร์เบื้องต้นนั้น ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจถึงโครงสร้างพื้นฐานของระบบปฏิบัตินี้ สิทธิ์ในการเข้าใช้ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ ตลอดจนพื้นฐานในการใช้งานคอมมานด์ไลน์ เป็นต้น

4.7.1 ระบบปฏิบัติ Linux Ubuntu เบื้องต้น

1) ระบบไฟล์ของระบบปฏิบัติการ

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

ในระบบปฏิบัติการวินโดวส์

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

ข้อควรระวัง ทุก ๆ ครั้งที่ใช้งาน เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่อง ในบางครั้งจะไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากสิทธิ์ในการใช้งานของผู้ใช้ยังไม่เป็น root จึงเป็นที่มาที่ต้องเพิ่มคำสั่งsudo เข้าไปในการสั่งงานผ่านทางคอมมานด์ไลน์ทุกครั้ง



4.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น

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

4.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

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

4.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

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

4.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

Process Management	Compression
ps – display your currently active processes top – display all running processes kill <i>pid</i> – kill process id <i>pid</i> killall <i>proc</i> – kill all processes named <i>proc</i> * bg – lists stopped or background jobs; resume a stopped job in the background fg – brings the most recent job to foreground fg <i>n</i> – brings job <i>n</i> to the foreground	tar cf <i>file.tar files</i> – create a tar named <i>file.tar</i> containing <i>files</i> tar xf <i>file.tar</i> – extract the files from <i>file.tar</i> tar czf <i>file.tar.gz files</i> – create a tar with Gzip compression tar xzf <i>file.tar.gz</i> – extract a tar using Gzip tar cjf <i>file.tar.bz2</i> – create a tar with Bzip2 compression tar xjf <i>file.tar.bz2</i> – extract a tar using Bzip2 gzip <i>file</i> – compresses <i>file</i> and renames it to <i>file.gz</i> gzip -d <i>file.gz</i> – decompresses <i>file.gz</i> back to <i>file</i>
File Permission	Network
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: ● 4 – read (r) ● 2 – write (w) ● 1 – execute (x) Examples: chmod 777 – read, write, execute for all chmod 755 – rwx for owner, rx for group and world	ping <i>host</i> – ping <i>host</i> and output results whois <i>domain</i> – get whois information for <i>domain</i> dig <i>domain</i> – get DNS information for <i>domain</i> dig -x <i>host</i> – reverse lookup <i>host</i> wget <i>file</i> – download <i>file</i> wget -c <i>file</i> – continue a stopped download

4.7.2 รวมคำสั่งในการใช้งานระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu เบื้องต้น (ต่อ)

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

4.8 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความหมายของเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ อธิบายถึงแพ็คเกจ GNU Radio ชุดอุปกรณ์ USRP ที่ประกอบไปด้วยบอร์ดหลักคือ USRP Motherboard และบอร์ดรอง Daughterboard ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของผู้ใช้งานผ่านทาง USB 2.0 จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงองค์ประกอบภายในของชุดอุปกรณ์ เมื่อผู้ใช้งานมีความเข้าใจในองค์ประกอบของอุปกรณ์แล้ว ต้องมาเรียนรู้ถึงตัวแพ็คเกจ GNU Radio ซึ่งมีการใช้ภาษาไพธอนเป็นตัวเชื่อมบล็อกในการประมวลผลสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากภาษา C++ โดยทั้งสองภาษาจะสามารถเชื่อมต่อหรือสามารถสื่อสารกันได้ผ่านทาง SWIG Wrapper จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงระบบปฏิบัติการลินุกซ์เบื้องต้นซึ่งผู้ใช้งานจะต้องเรียนรู้ถึงโครงสร้างของระบบไฟล์และสิทธิในการเข้าใช้งานโปรแกรมต่าง ๆ ในระบบปฏิบัติการหลังจากที่ผู้ใช้งานได้รับความรู้จากเนื้อหาในบทนี้ผู้ใช้งานจะสามารถเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการทำงานตลอดจนทิศทางการไหลของสัญญาณเมื่อมีการใช้งานเทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์



บทที่ 5

ผลการทดสอบระบบสื่อสารรับส่งแบบสองทางที่ได้พัฒนา

5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการทดสอบวัดสัญญาณจริง โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงของระบบสื่อสารที่ได้นำเสนอ อาทิเช่น อัตราความผิดพลาดบิต ค่าวิสัยสามารถการส่งข้อมูลหรือ Throughput เทียบกับระยะทาง โดยแบ่งการทดสอบวัดสัญญาณออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นส่วนการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ ส่วนที่สองคือ ส่วนการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัล ซึ่งผลที่ได้จากชุดทดสอบ ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมที่ใช้การสื่อสารสองช่องสัญญาณ โดยใช้ช่องสัญญาณความถี่สองช่องสัญญาณด้วยกัน จากการทดสอบวัดค่าแสดงให้เห็นว่าระบบการสื่อสาร โดยใช้ช่องสัญญาณเดียวที่ได้นำเสนอจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากัน ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลทั้งผลที่ได้จากชุดทดสอบพร้อมทั้งสรุปผลที่ได้รับจากการศึกษาและออกแบบระบบต่อไป

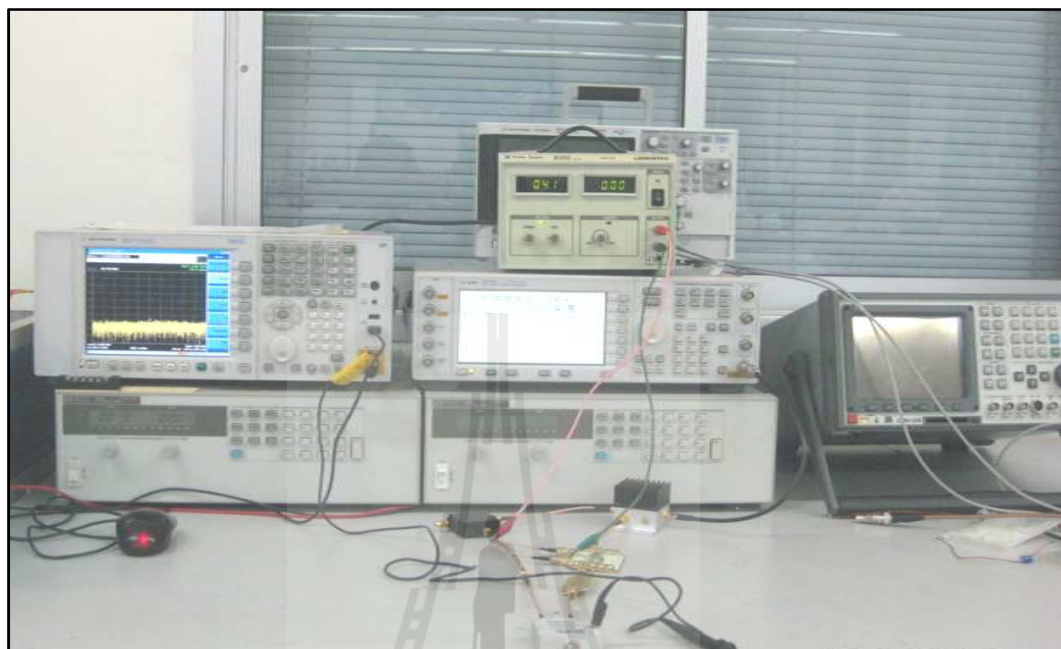
5.2 ผลการทดสอบ

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 3 ในขั้นตอนการออกแบบและการทดสอบระบบสื่อสารที่ได้ออกแบบไว้ ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบสื่อสารสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการสื่อสารข้อมูล โดยค่าพารามิเตอร์ที่สนใจในการวัดประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูล อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล และค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูล โดยการทดสอบแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบด้วยการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุหรือส่วน Front-end และส่วนที่สองเป็นการทดสอบด้วยการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

5.2.1 การทดสอบกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ

จากรูปที่ 5.1 แสดงภาพรวมถึงการจัดวางชุดอุปกรณ์ สำหรับทดสอบสัญญาณการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุหรือส่วน RF-Front End โดยในส่วนนี้สิ่งที่ต้องคำนึงในการทดสอบการกำจัดสัญญาณคือ การปรับเฟสและขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้สัญญาณรบกวนที่เราไม่ต้องการถูกกำจัดออกไปให้ได้มากที่สุด ดังนั้น ในส่วนนี้จึงสามารถจะแบ่งการทดสอบออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบโดยการปรับค่าเฟสที่

เหมาะสม และส่วนที่สองเป็นการปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่รั่วไหลผ่านเซอร์คูเลเตอร์เข้ามาให้มีระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกันหรือเท่ากันให้มากที่สุด



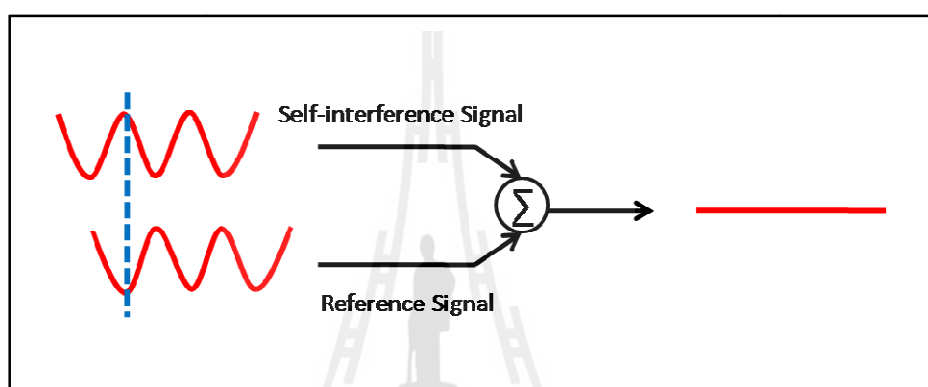
รูปที่ 5.1 การจัดวางชุดอุปกรณ์การทดสอบการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ

5.2.1.1 การทดสอบด้วยการปรับเฟส

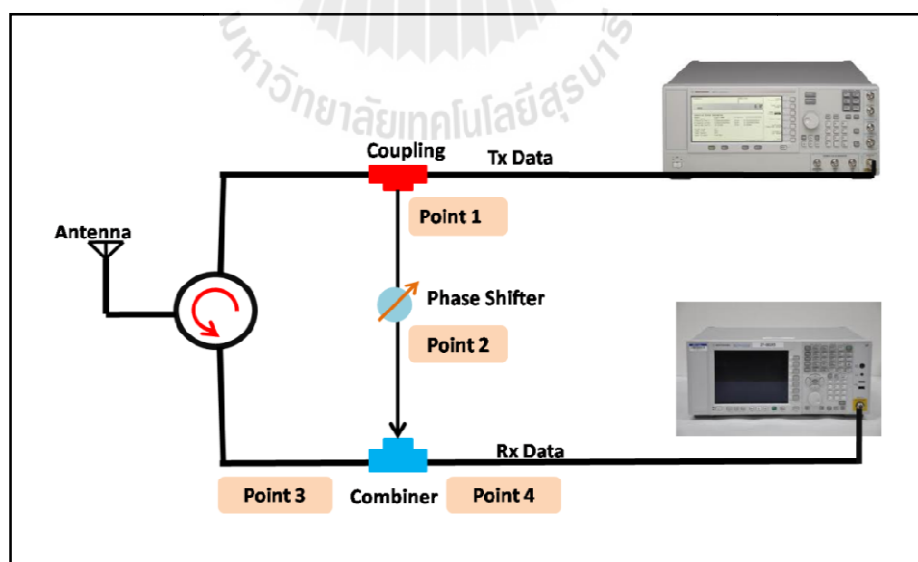
การปรับเฟสสัญญาณถือได้ว่าเป็นส่วนที่มีสำคัญมาก เพราะเราจะต้องปรับค่าเฟสของสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณที่ส่งออกมาจากภาคส่งที่ทราบกับเฟสของสัญญาณที่รั่วไหลออกมาจากเซอร์คูเลเตอร์ให้มีค่าความต่างเฟสกัน π หรือ 180 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เพื่อให้สัญญาณแทรกสอดของตนเองที่เข้ามาในระบบถูกหักล้างหรือกำจัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์หรือให้คงเหลือสัญญาณที่เข้ามาแทรกสอดในระบบน้อยที่สุด ดังที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3

จากรูปที่ 5.3 แสดงแผนภาพการทดสอบวัดสัญญาณจริงโดยการ ใช้ Generator ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณและใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในการวัดค่าของสัญญาณแทรกสอดเพื่อสังเกตระดับของสัญญาณที่ถูกลดทอน เมื่อมีการปรับเฟสโดยการป้อนแรงดันให้กับตัวเลื่อนเฟสโดยป้อนแรงดันตั้งแต่ 1 โวลต์ ไปจนถึง 15 โวลต์โดยทำการวัดสัญญาณ 4 จุดด้วยกันคือ จุดแรกเป็นการวัดสัญญาณที่ถูก coupling ออกมา จุดที่สองวัดสัญญาณที่ผ่านตัวเลื่อนเฟส จุดที่สามวัดสัญญาณที่รั่วไหลออกมาจากเซอร์คูเลเตอร์ และจุดสุดท้ายคือ วัดค่าระดับสัญญาณที่ถูกหักล้างหลังจากที่นำสัญญาณจากสองเส้นทางมารวมกันโดยเส้นทางแรก

คือ เส้นทางในจุดที่สามซึ่งเป็นเส้นทางของสัญญาณอ้างอิงและเส้นทางที่สองคือ เส้นทางที่รั่วไหลออกมาจากเซอร์กิวเลเตอร์ และทำการวิเคราะห์ค่าสัญญาณที่ถูกลดทอนลงจากสัญญาณในระดับเดิมว่าสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองให้ลดลงได้มากแค่ไหน เพื่อที่จะได้นำไปปรับปรุงแก้ไขวงจรเพิ่มเติมเพื่อให้การกำจัดสัญญาณเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์หรือสัญญาณแทรกสอดที่รั่วไหลเข้ามาในระบบแทบไม่มีเหลือ ระบบที่ได้ออกแบบจะได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและประมวลผลของสัญญาณที่ต้องการรับเข้ามาในระบบได้อย่างถูกต้องและตรงกับความต้องการของระบบที่รับเข้ามา



รูปที่ 5.2 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self interference)

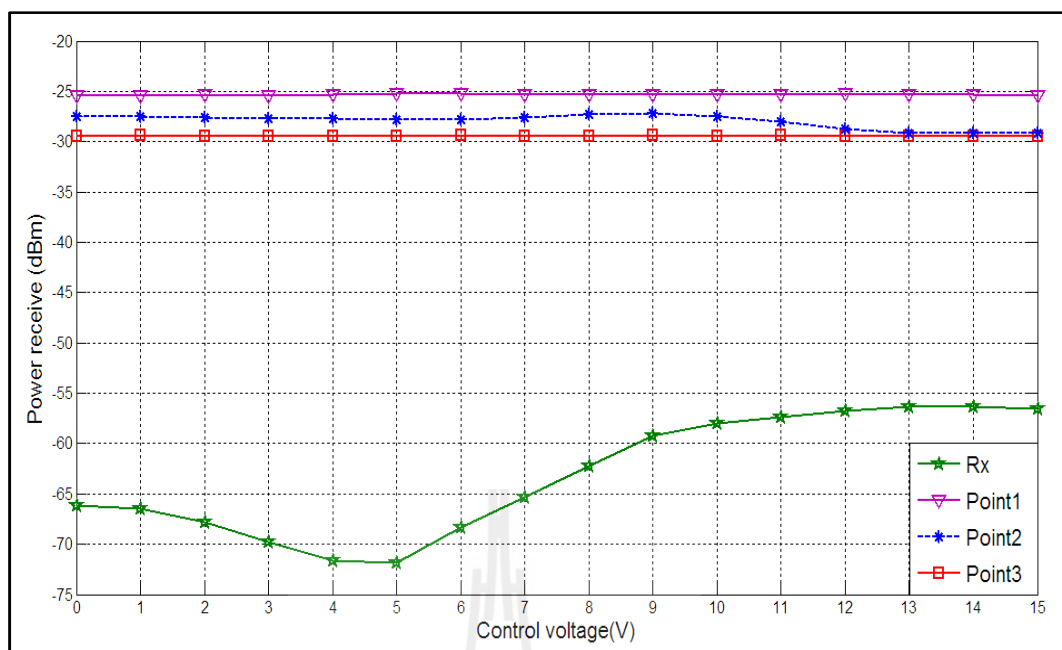


รูปที่ 5.3 แผนภาพทิศทางการทดสอบการวัดสัญญาณในส่วนการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ เมื่อทดสอบป้อนแรงดันให้กับตัวเลื่อนเฟส

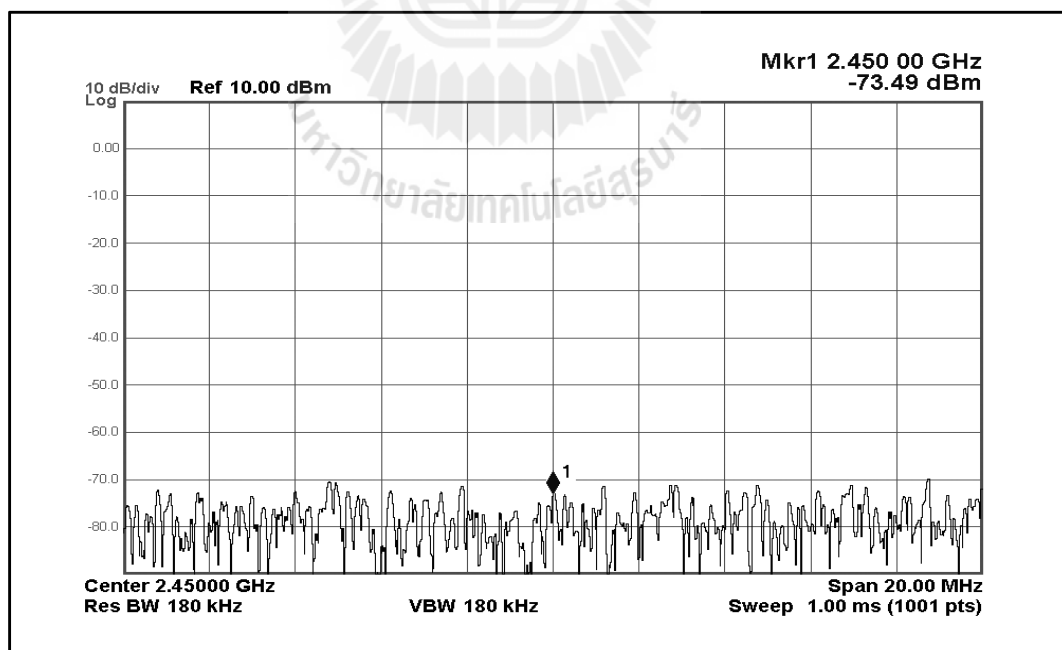
จากรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.6 แสดงการวัดค่าของสัญญาณจริงโดยการป้อนสัญญาณส่ง 0dBm และ 20dBm ตามลำดับ เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับตัวเลื่อนเฟสเพื่อทำให้สัญญาณในเส้นทางหลักหรือสัญญาณอ้างอิงที่เราทราบจากภาคส่งและเส้นทางรองหรือสัญญาณที่รั่วไหลเข้ามาจากเซอร์กิตเตอร์มีค่าความต่างเฟส π หรือ 180 องศา เพื่อที่จะทำให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในการทดสอบได้ทำการป้อนแรงดันให้กับตัวเลื่อนเฟสตั้งแต่ 1 โวลต์ ไปจนถึง 15 โวลต์ จากค่าที่วัดได้ทำให้ทราบว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันช่วงที่ 4 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ จะสังเกตเห็นได้จากเส้นกราฟว่าเป็นช่วงที่ระดับสัญญาณแทรกสอดถูกหักล้างมากที่สุด หมายความว่าค่าแรงดันที่เหมาะสมที่จะทำให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การป้อนแรงดันในช่วง 4 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.6 จากผลการทดสอบที่ได้ทำให้ทราบอีกอย่างว่าเมื่อทำการป้อนสัญญาณส่งที่ 0 dBm และ 20 dBm ตามลำดับค่าที่ได้จะมีความใกล้เคียงกัน เมื่อทราบช่วงที่จะใช้ในการป้อนแรงดันแล้ว เราก็จะมาทำการปรับค่าอย่างละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองในระดับที่ต่ำลงกว่าเดิม พบว่าค่าแรงดันที่เหมาะสมคือ 4.3 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่ดีที่สุดดังแสดงในกราฟสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 ได้แสดงระดับสเปกตรัมสัญญาณที่แทรกสอดภายในระบบที่ถูกกำจัดไปเมื่อทำการป้อนสัญญาณส่งที่ 0dBm และ 20dBm ตามลำดับและทำการกำหนดแรงดันที่ใช้ในการควบคุมตัวเลื่อนเฟสที่เท่ากันที่ 4.3 โวลต์ โดยทำการเก็บค่าที่ทำการวัดจำนวน 10 ค่า เพื่อนำมาเฉลี่ยค่าที่สามารถกำจัดได้ พบว่าสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองเฉลี่ยอยู่ที่ -73 dB และ -58 dB ตามลำดับ

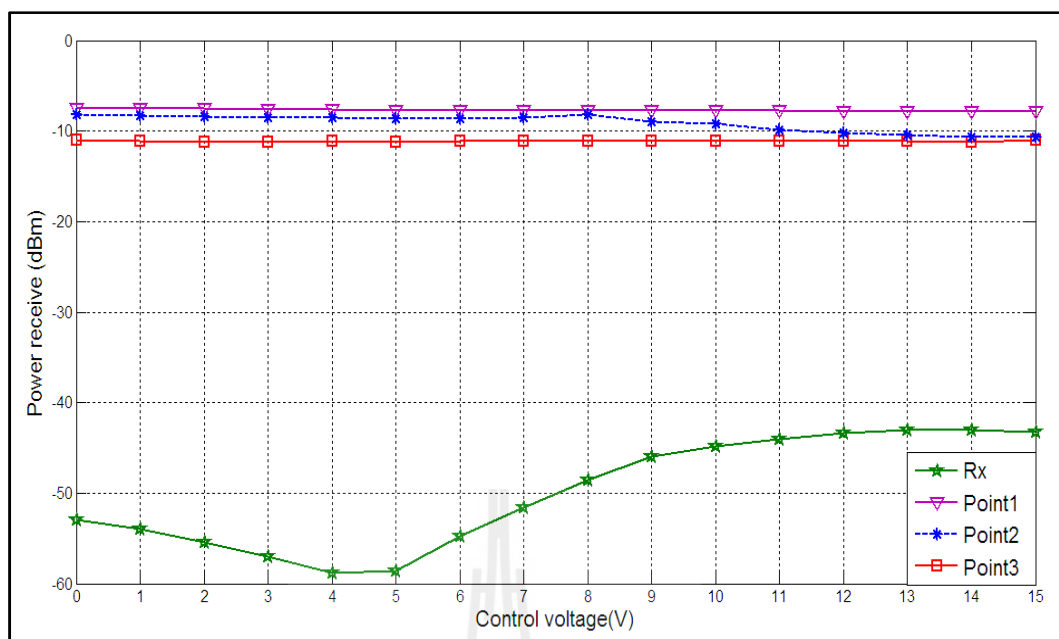
หลักจากการทดสอบค่าที่วัดได้ทำให้ทราบค่าแรงดันที่เหมาะสมที่จะใช้ป้อนแรงดันควบคุมให้กับตัวเลื่อนเฟสสำหรับปรับเฟสของสัญญาณ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อเรามาสังเกตระดับของสัญญาณของเส้นกราฟในจุดวัดที่ 2 และจุดวัดที่ 3 พบว่ามีระดับของสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันประมาณ -3dB ซึ่งเราจะต้องออกแบบเพื่อปรับให้ขนาดของสัญญาณมีความใกล้เคียงหรือเท่ากันมากขึ้น เพื่อผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้การกำจัดสัญญาณมากขึ้นตาม ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับถัดไป



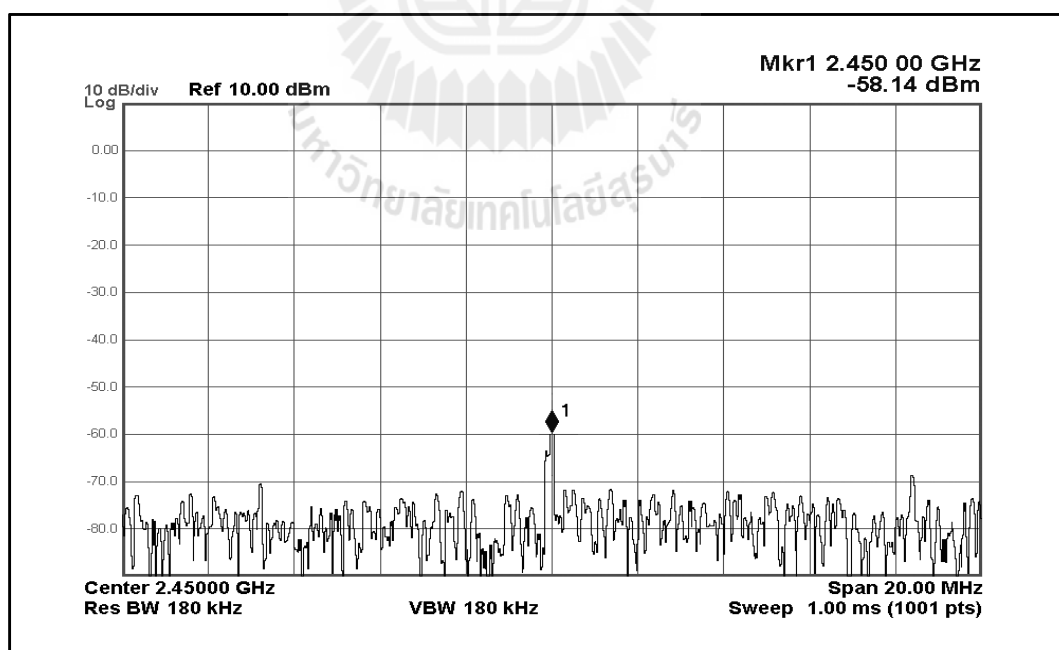
รูปที่ 5.4 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการการป้อนแรงดันเพื่อวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณแทรกสอดเมื่อมีการป้อนแรงดันจาก 0 โวลต์ ถึง 15 โวลต์ สำหรับกำลังส่ง 0 dBm



รูปที่ 5.5 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการการป้อนแรงดัน 4.3 โวลต์ สำหรับกำลังส่ง 0 dBm



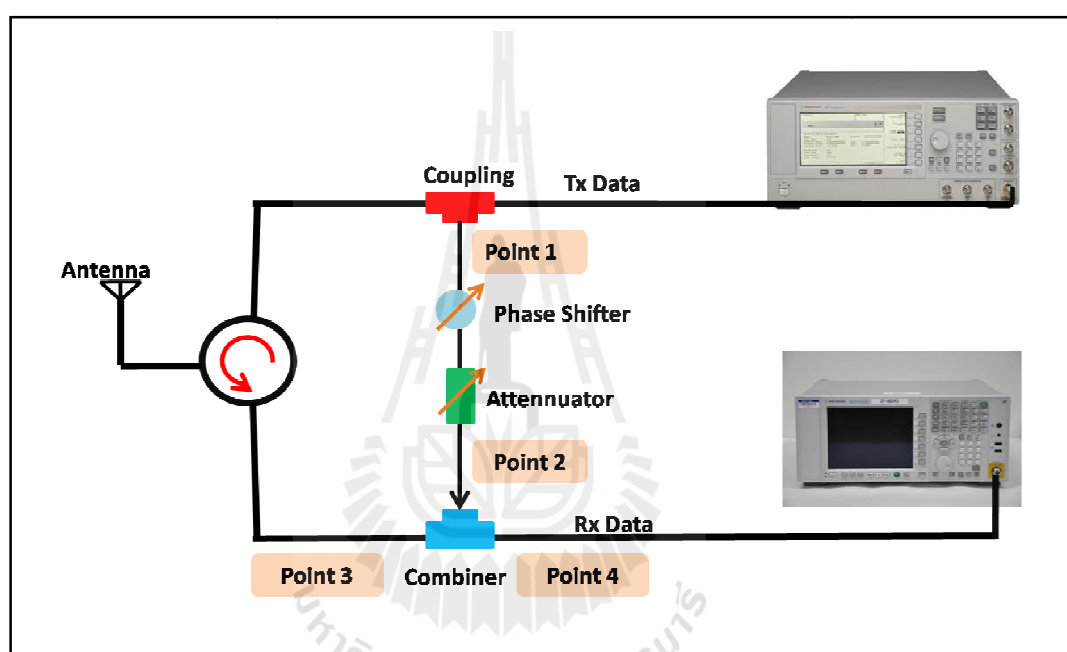
รูปที่ 5.6 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการการป้อนแรงดันเพื่อวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณแทรกสอดเมื่อมีการป้อนแรงดันจาก 0V ถึง 15V สำหรับกำลังส่ง 20 dBm



รูปที่ 5.7 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการการป้อนแรงดัน 4.3 โวลต์สำหรับกำลังส่ง 20 dBm

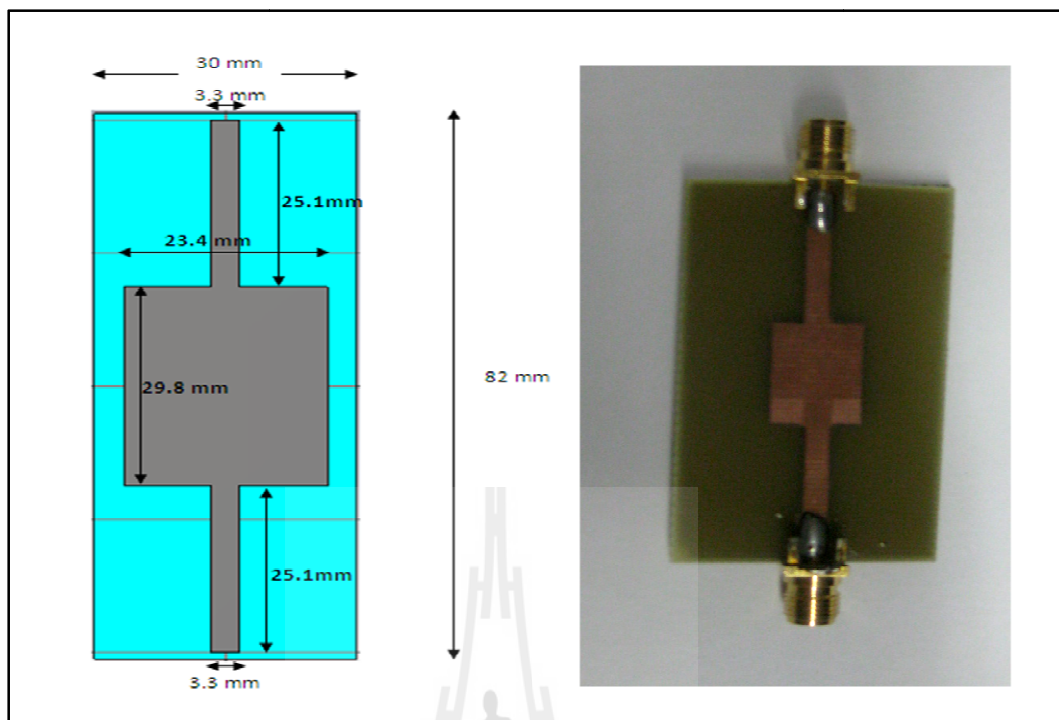
5.2.1.2 การปรับแอมพลิจูดของสัญญาณ

จากการทดสอบวัดค่าในหัวข้อที่ 5.2.1.1 ทำให้ทราบว่าเมื่อกำหนดให้ตัวเลื่อนเฟสต้องป้อนแรงดันที่ 4.3 โวลต์ ทำให้เราทราบว่าระดับของสัญญาณในเส้นทางหลักหรือเส้นทางของสัญญาณอ้างอิงที่เราทราบและเส้นทางรองหรือเส้นทางที่สัญญาณรั่วไหลเข้ามามีค่าของขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณต่างกันที่ 3dB ซึ่งเมื่อเราต่อเข้าไปในระบบสื่อสารที่ได้ออกแบบปรากฏว่าค่าสัญญาณเฟสที่เราต้องปรับค่าใหม่ เนื่องจากตัวลดทอนที่ออกแบบต่อเพิ่มเข้าไปนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 5.8

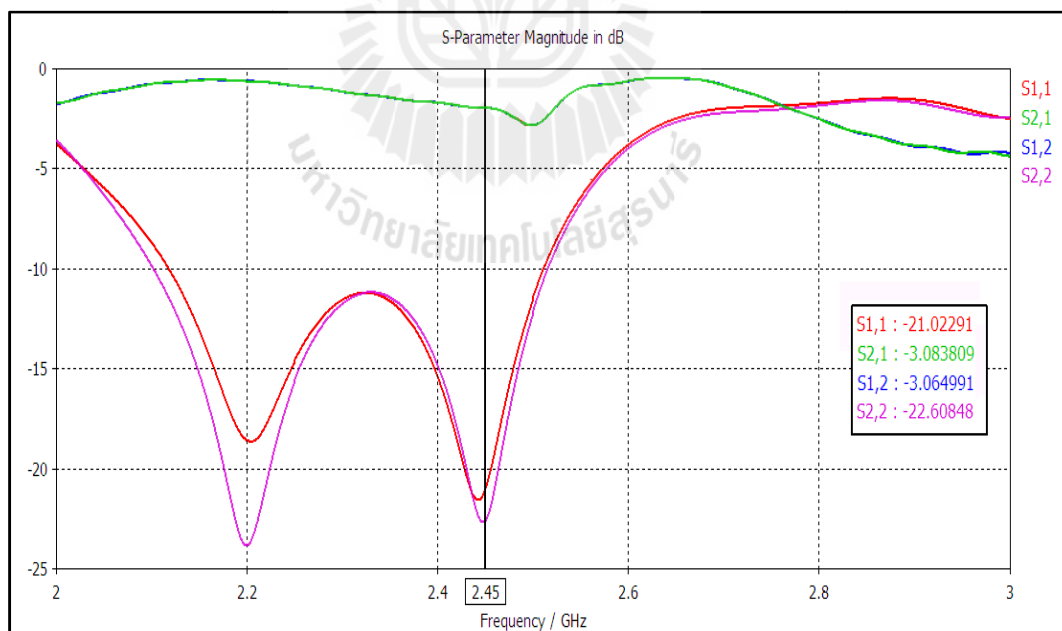


รูปที่ 5.8 แผนภาพทิศทางการทดสอบการวัดสัญญาณในส่วนการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ เมื่อทดสอบโดยการเพิ่มตัวลดทอนสัญญาณ

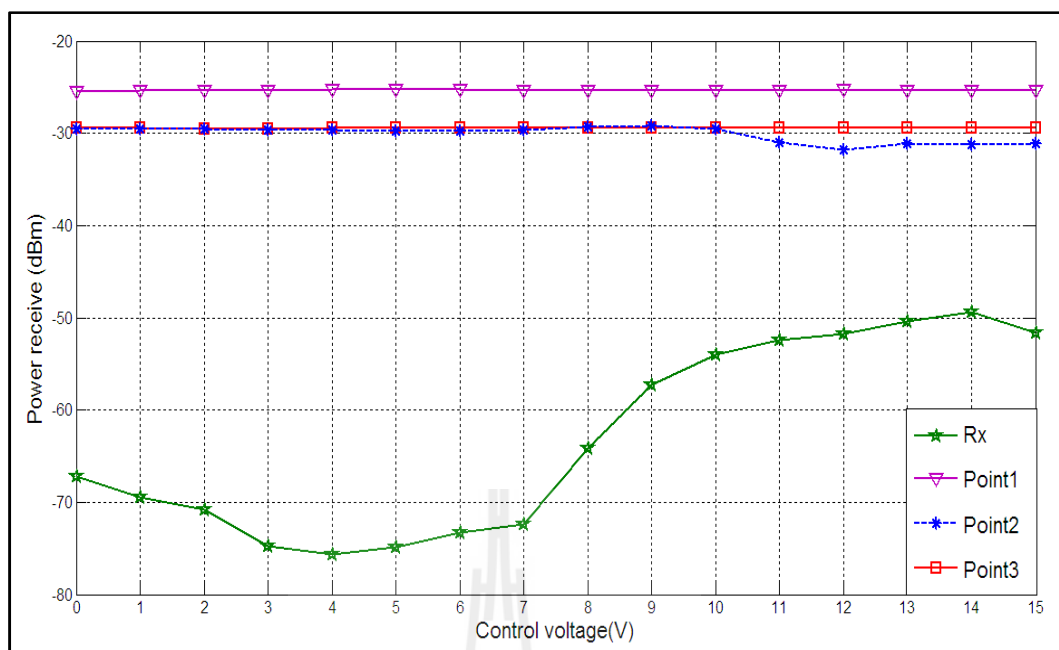
จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงลายวงจรที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม CST และลายแผ่นปรี้นที่นำไปทดสอบกับระบบที่นำเสนอ จะเห็นว่าจากรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเรามีการปรับตัวเลื่อนเฟสและการปรับขนาดของสัญญาณให้สัญญาณอ้างอิงที่เราทราบกับสัญญาณที่รั่วไหลเข้ามาในระบบจากเซอร์คูลเตอร์มีค่าที่ใกล้เคียงกันจะช่วยให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารมากพอสมควรแต่ยังไม่สมบูรณ์ แต่ก็ช่วยยืนยันได้ว่าแม้วงจรที่ได้ออกแบบจะไม่มี ความซับซ้อนแต่ก็ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ผลน่าพอใจระดับหนึ่ง



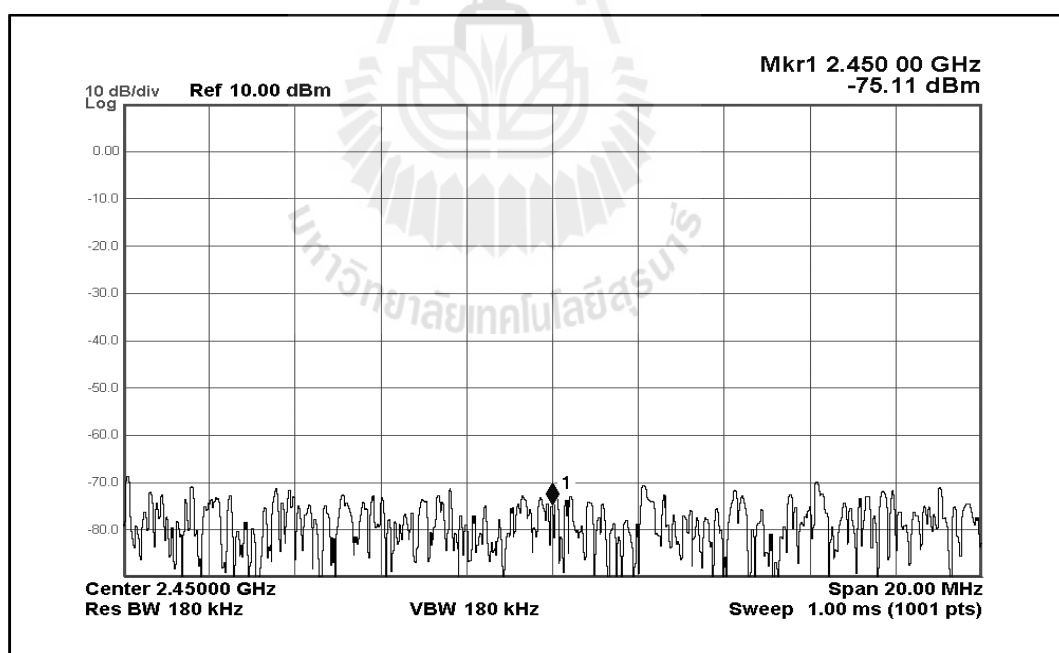
รูปที่ 5.9 แสดงลายวงจรตัวลวดทอนสัญญาณ -3 dB ที่ได้ออกแบบ



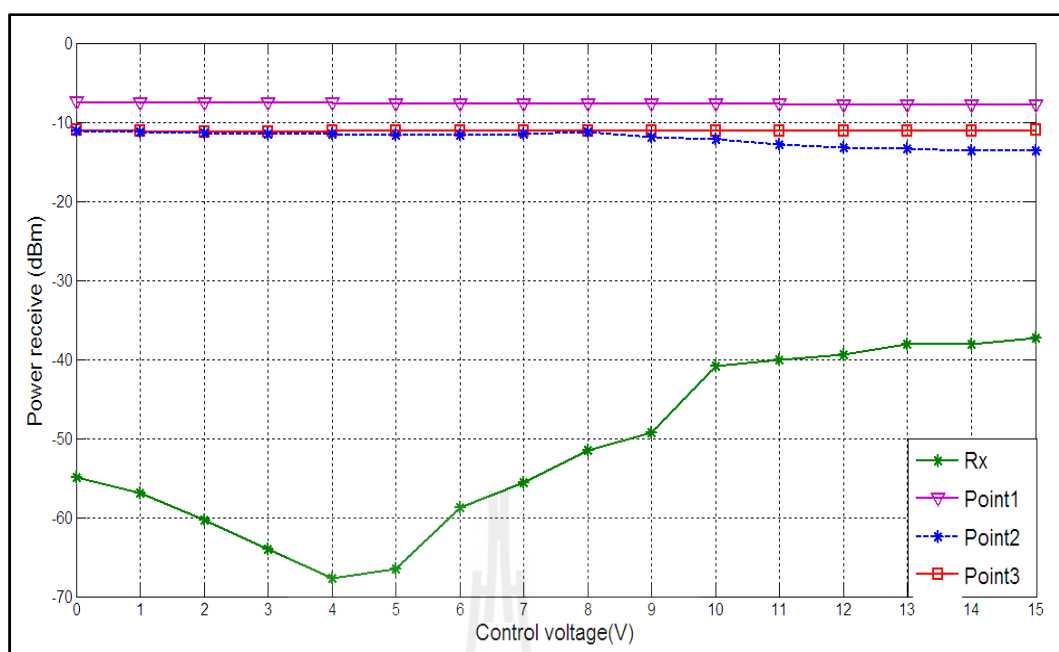
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองแบบตัวลวดทอนด้วยโปรแกรม CST



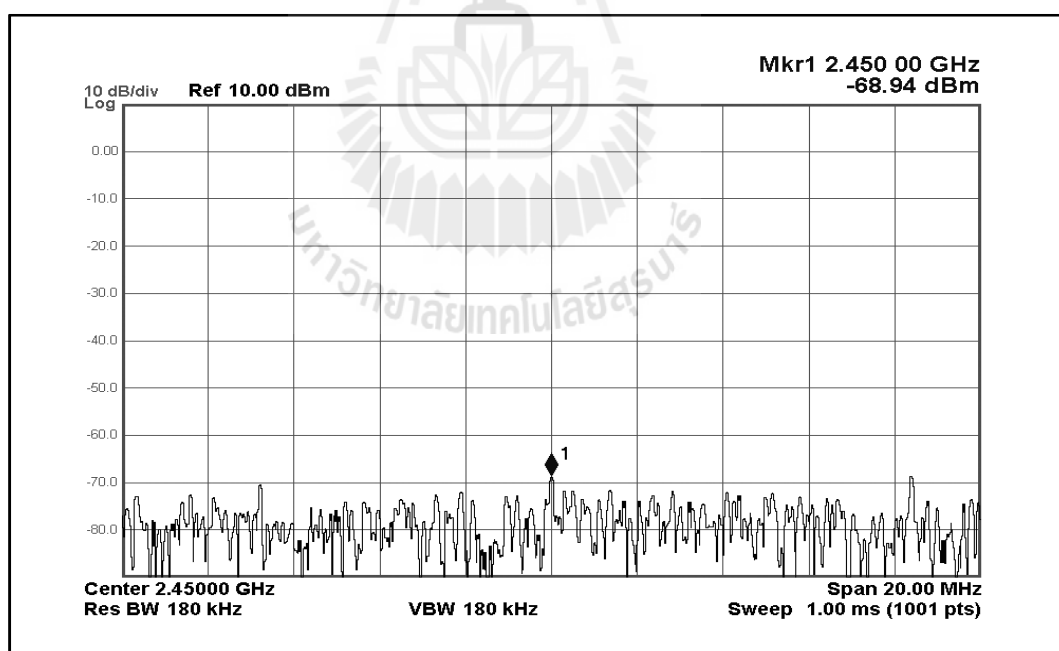
รูปที่ 5.11 การวัดค่าเมื่อนำตัวลดทอนเข้ามาต่อร่วมกับระบบ สำหรับกำลังส่ง 0 dBm



รูปที่ 5.12 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการการป้อนแรงดัน 4.1 โวลต์
และตัวลดทอน -3 dB สำหรับกำลังส่ง 0 dBm



รูปที่ 5.13 การวัดค่าเมื่อนำตัวลดทอนเข้ามาต่อร่วมกับระบบ สำหรับกำลังส่ง 20 dBm



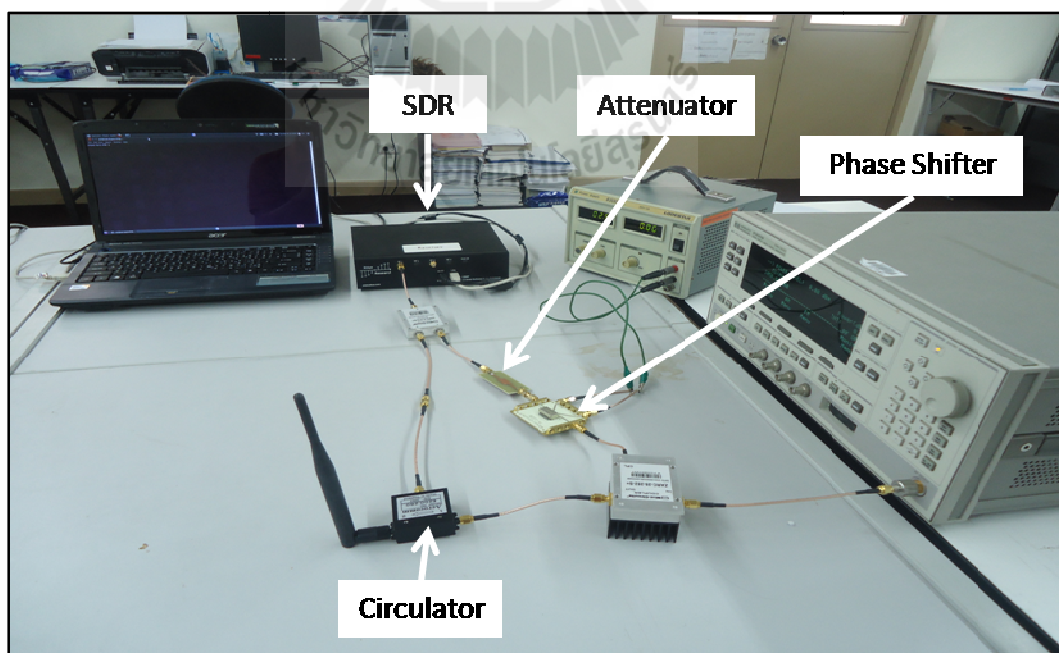
รูปที่ 5.14 การปรับเฟสโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำการการป้อนแรงดัน 4.1 โวลต์
และตัวลดทอน -3 dB สำหรับกำลังส่ง 20 dBm

5.2.1.3 สรุปผลการทดสอบภาควิทยุ

จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าต้องทำการป้อนแรงดันให้กับตัวเลื่อนเฟสเท่ากับ 4.1 โวลต์ และเชื่อมต่อตัวเลื่อนเฟส -3 dB เข้ากับระบบเมื่อต่ออุปกรณ์และตั้งค่าดังกล่าวจะทำให้การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองมีค่าลดทอนหรือค่าสัญญาณที่กำจัดได้มีค่ามากที่สุดประมาณ 75 dB

5.2.2 การทดสอบกำจัดสัญญาณแทรกสอดเมื่อนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุรวมเข้ากับการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัล

จากรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดสอบทั้งระบบโดยมีการรวมเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองด้วยคลื่นวิทยุและการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลเข้าด้วยกัน ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาการทดสอบวัดค่ามีดังนี้ ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูล แพ็คเก็ตที่ผิดพลาด ค่าวิสัยความสามารถส่งผ่านข้อมูล โดยจะทำการทดสอบวัดค่าในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกัน โดยเริ่มจากกรณีที่ยังไม่มีการใช้เทคนิคใดๆ นำมากำจัดสัญญาณแทรกสอด การใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ การใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัล และการใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุรวมกับการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัล เมื่อทำการทดสอบวัดค่าดังกล่าวข้างต้นแล้วจะนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบเข้ากับระบบการสื่อสารแบบเดิม



รูปที่ 5.15 ภาพรวมของชุดทดสอบทั้งระบบ

5.2.2.1 พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการทดสอบ

ในการวัดประสิทธิภาพของระบบทดสอบ สามารถวัดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- อัตราความผิดพลาดแพ็กเกจ

อัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจสามารถวัดผลได้ด้วยค่าต่างๆ ได้แก่

$pktno$ คือ เลขแพ็กเกจ

n_rcvd คือ จำนวนแพ็กเกจที่รับได้

n_right คือ จำนวนแพ็กเกจที่รับได้ถูกต้อง

ในการตรวจสอบเลขแพ็กเกจ หากแพ็กเกจนั้นมีความถูกต้องจะนับ n_right เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนแพ็กเกจที่ถูกต้อง ส่วนจำนวนแพ็กเกจที่รับได้นั้นก็จะเพิ่มจำนวนไปเรื่อยจนหมดจำนวนตามที่ภาคส่งส่งมา สมการที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดกับพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น

$$PER = \left(1 - \left(\frac{n_right}{pktno} \right) \right) \times 100\% \quad (5.1)$$

- อัตราความผิดพลาดบิต

หลังจากที่สามารถหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจได้แล้ว พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับอัตราความผิดพลาดแพ็กเกจสามารถแสดงได้ดังสมการ 5.2

$$1 - PER = (1 - BER)^L \quad (5.2)$$

เมื่อ PER คือ อัตราความผิดพลาดแพ็กเกจ
 BER คือ อัตราความผิดพลาดบิต
 L คือ จำนวนแพ็กเกจที่ใช้

5.2.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างชุดอุปกรณ์ มีวัตถุประสงค์ในการหาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างชุดอุปกรณ์ภาคส่งกับชุดอุปกรณ์ภาครับ และหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ โดยการทดสอบสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ภาคส่ง
- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและล็อกอินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่งsudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปสู่ที่อยู่ของโปรแกรม FD_send_tx.py
- ตั้งค่าสคริปที่ภาคส่งดังต่อไปนี้

```
sudo ./FD_send_tx.py -tx-freq=2450000000 -m bpsk -i 128 -tx-  
amplitude=7000 -s=400
```

ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้

- tx-freq คือ ค่าความถี่ที่ใช้
- m คือ รูปแบบการมอดูเลต
- S คือ ตั้งขนาดความยาวของแพ็กเกจ
- i คือ การตั้งค่า interpolation rate ของภาคส่ง
- tx-amplitude คือ การตั้งค่า Transmitter Digital Amplitude ที่ภาคส่งมี ค่าตั้งแต่ [0-32768]
- ภาครับ
- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมและล็อกอินเข้าสู่โหมด root หรือ ใช้คำสั่งsudo นำหน้า script ที่ต้องการคอมไพล์
- จากนั้นเข้าไปสู่ที่อยู่ของโปรแกรม FD_send_rx.py
- ตั้งค่าสคริปที่ภาคส่งดังต่อไปนี้

```
sudo ./FD_send_rx.py -rx-freq=2450000000 -m bpsk -d 64
```

ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งค่าได้ดังนี้

- rx-freq คือ ค่าความถี่ที่ใช้
- m คือ รูปแบบการมอดูเลต
- S คือ ตั้งขนาดความยาวของแพ็กเกจ
- d คือ การตั้งค่าDecimationrate ของภาครับ

จากการตั้งค่า Interpolation rate และ Decimation rate สามารถแสดงอัตราการส่งข้อมูลและรับข้อมูลได้ดังนี้

$$Tx_rate = \frac{Dr}{Ipr} = \frac{128 \times 10^6}{128} = 1Mbps \quad (5.3)$$

$$Rx_rate = \frac{Ar}{Dcr} = \frac{64 \times 10^6}{64} = 1Mbps \quad (5.4)$$

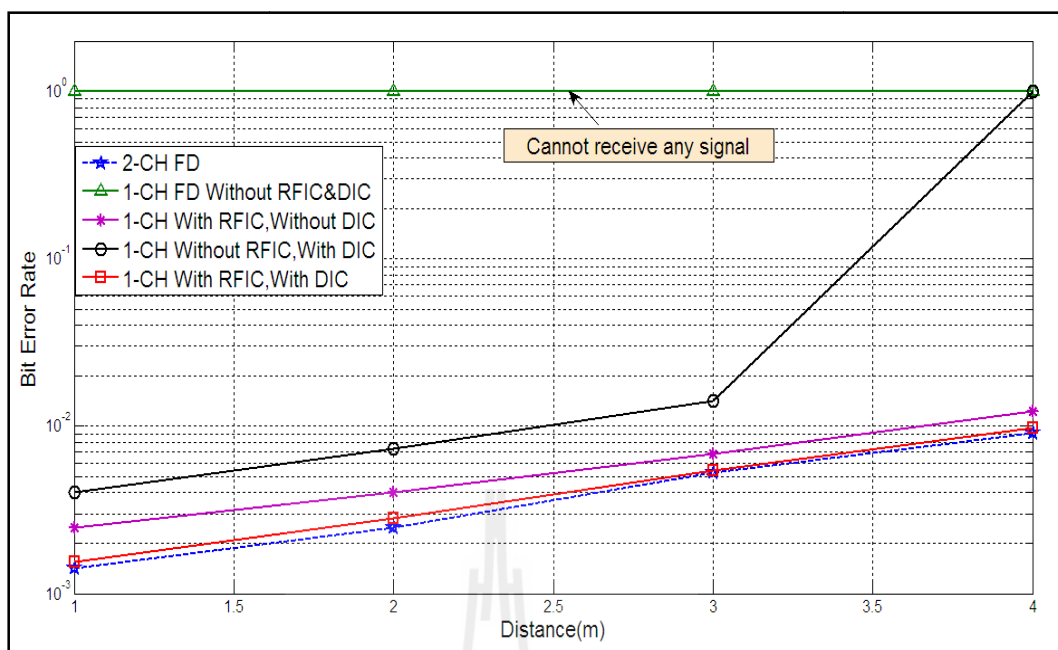
ซึ่งการตั้งค่าอัตราการส่งข้อมูลและรับข้อมูลนี้จะต้องมีค่าเท่ากันเพื่อให้สามารถรับแพ็กเกจและวิเคราะห์แพ็กเกจข้อมูลได้ ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงระยะทางไปเรื่อย ๆ จาก 1 เมตร จนถึง 4 เมตร โดยที่ค่าระยะทาง 1 ค่า จะทำการเก็บค่ารับส่งข้อมูลกันทั้งหมด 10 ครั้ง พารามิเตอร์ที่ต้องการจะถูกเก็บไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ภาครับ จากนั้นเมื่อทำการทดลองครบทุกค่าแล้ว ก็จะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการถอดแพ็กเกจข้อมูลนำค่า pktno, n_rcvd และ n_right มาทำการวิเคราะห์หาอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูล ซึ่งค่าระยะทาง 1 ค่า จะมีค่าอัตราความผิดพลาดของข้อมูล 10 ค่า จากนั้นจึงนำค่าดังกล่าวไปหาค่าเฉลี่ยและทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดของแพ็กเกจข้อมูลเทียบกับระยะทางต่อไป

จากการวัดค่าสัญญาณที่ทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อการใช้เทคนิคการจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุอย่างเดียวนั้น แม้จะสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้จำนวนมาแต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบทำงานได้มีประสิทธิภาพ เพราะสัญญาณรบกวนที่ยังอยู่ในระบบแม้ว่าจะยังคงเหลืออยู่น้อยหรือมีความแรงของสัญญาณไม่มากแต่ก็สามารถทำให้สัญญาณที่รับเข้ามามีประมวลผลมีความผิดพลาดอยู่บ้างเช่นเดียวกับการออกแบบโดยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองโดยใช้เทคนิคการจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลอย่างเดียว

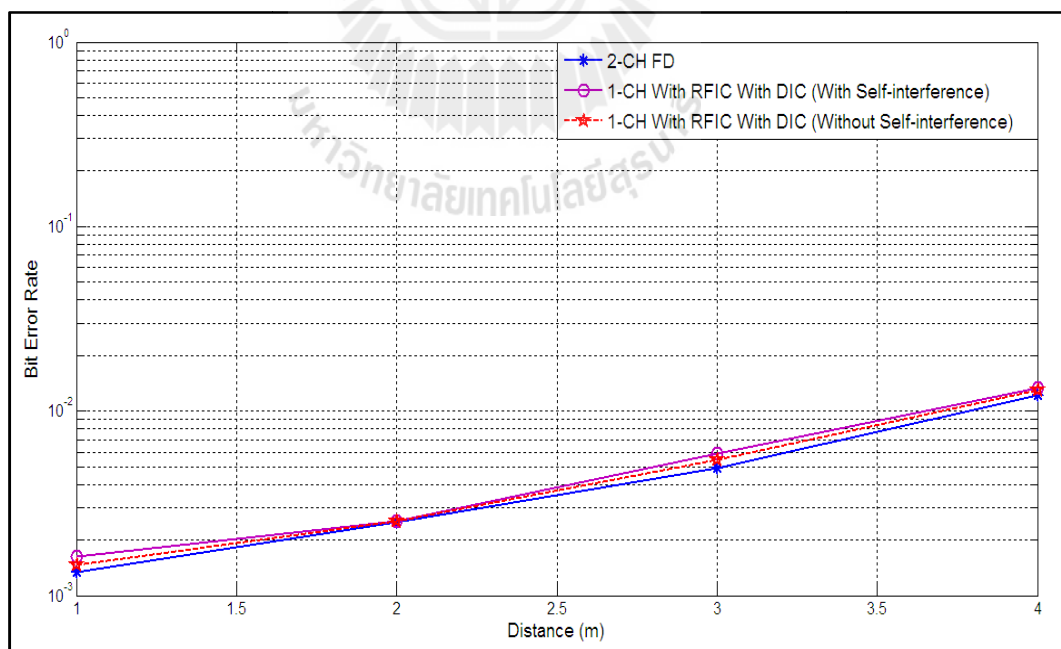
เมื่อนำเทคนิคการจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุร่วมด้วยการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล จะเห็นได้ว่าเทคนิคทั้งสองเมื่อทำงานร่วมกันแล้วสามารถทำให้การจัดสัญญาณแทรกสอดมีความสมบูรณ์มาก หรือ ทำให้ภาครับสามารถทำการประมวลผลสัญญาณที่รับเข้ามามีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิมที่ใช้สองช่องสัญญาณในการสื่อสารเทียบกับระบบสื่อสารที่ได้นำเสนอคือการใช้ช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสารปรากฏว่ามีสมรรถนะความใกล้เคียงกับแต่สามารถรับสัญญาณได้ในระยะทางเพียง 4 เมตรเท่านั้น เนื่องจากสายอากาศที่ได้นำมาใช้ในการทดสอบระบบมีกำลังขยายของสายอากาศต่ำ

จากรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบวัดประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลในระยะทางต่างๆ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดบิตที่เกิดขึ้นเมื่อตรวจสอบข้อมูลที่วัดได้จากภาครับโดยทำการเปรียบเทียบกรณีต่างๆ ดังนี้เมื่อทำการทดสอบระบบสื่อสารรับและส่งข้อมูลพร้อมๆ กัน โดยยังไม่ได้มีการใช้เทคนิคใดที่นำมาช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบปรากฏว่าภาครับไม่สามารถถอดรหัสสัญญาณได้เนื่องจากผลของสัญญาณที่เข้ามาในระบบมีจำนวนมากและสัญญาณที่รับต้องการที่จะรับเข้ามาเพื่อนำมาประมวลผลของขนาดของสัญญาณที่น้อยเกินไป หรือเกิดปัญหาการชนกันของสัญญาณทำให้สัญญาณที่รับเข้ามาขาดๆ หายๆ จนส่งผลให้ที่ภาครับไม่สามารถนำสัญญาณที่รับเข้ามาประมวลผลของสัญญาณได้ ต่อมาเมื่อทำการออกแบบการกำจัดสัญญาณโดยใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุเข้ามาช่วยปรากฏว่ามีค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่ต่ำซึ่งสามารถรับสัญญาณเข้ามาและนำมาประมวลผลข้อมูลได้ แม้ว่าการรับสัญญาณจะสามารถนำมาถอดรหัสของสัญญาณได้แต่ก็ยังคงเหลือสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนระบบสื่อสารอยู่บ้าง ต่อมาเมื่อทำการทดสอบระบบโดยใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณโดยใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณดิจิทัลเข้ามาช่วยปรากฏว่าภาครับสามารถนำสัญญาณที่ได้รับเข้ามาประมวลผลได้ดังเช่นเทคนิคก่อนหน้านี้ แต่มีความผิดพลาดบิตค่อนข้างมากเมื่อทำการรับและส่งในระยะทางที่มากกว่า 3 เมตร ถ้าทำการรับและส่งพร้อมๆ กัน โดยในเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลมาช่วยอย่างเดียวจะทำให้สามารถรับข้อมูลสัญญาณเข้ามาประมวลผลได้ระยะที่ไม่เกิน 3 เมตรมากกว่านั้นจะไม่สามารถนำสัญญาณที่ได้มาประมวลผลได้เลย ลำดับสุดท้ายเมื่อนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลมารวมเข้ากับเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุเข้ามาช่วย พบว่ามีประสิทธิภาพการประมวลผลสัญญาณมากขึ้นและมีจำนวนบิตผิดพลาดที่น้อยลง เนื่องจากจากก่อนที่จะนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลมากำจัดสัญญาณแทรกสอดนั้นยังคงมีสัญญาณแทรกสอดหรือสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารอยู่น้อยเนื่องจากถูกกำจัดมาแล้วส่วนหนึ่งด้วยเทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ

สรุปได้ว่าเมื่อไม่มีการใช้เทคนิคใดๆ เข้ามาช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองจะทำให้ไม่สามารถถอดรหัสสัญญาณวิทยุที่รับเข้ามาที่ภาครับได้เลย เนื่องจากเกิดการชนกันของสัญญาณที่เราต้องการรับเข้ามากับสัญญาณแทรกสอดที่มีอยู่ในระบบ ระบบที่ได้ทำการออกแบบขึ้นสามารถทำการทดสอบได้ระยะทางไม่เกิน 4 เมตรเนื่องจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ อาทิเช่น สายอากาศที่มีอัตราขยายที่ต่ำ อุปกรณ์ที่ด้านฮาร์ดแวร์ และสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบเมื่อนำระบบสื่อสารที่ได้นำเสนอมาเปรียบเทียบกับระบบแบบดั้งเดิมจะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน



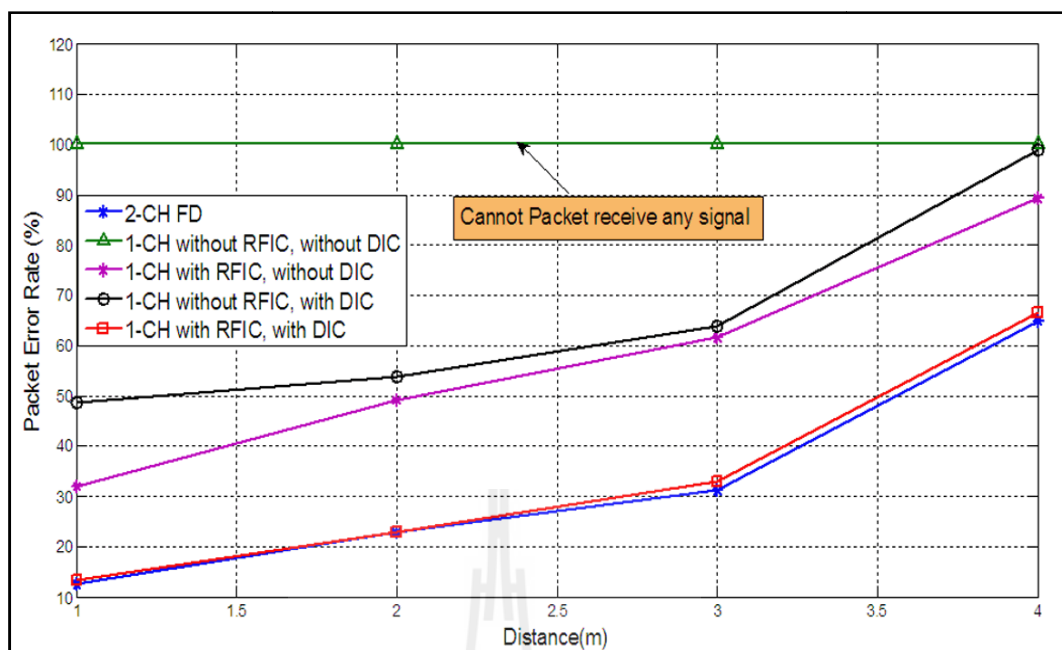
รูปที่ 5.16 แสดงอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบกับเทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง
ทั้งก่อนและหลังการกำจัดสัญญาณแทรกสอด



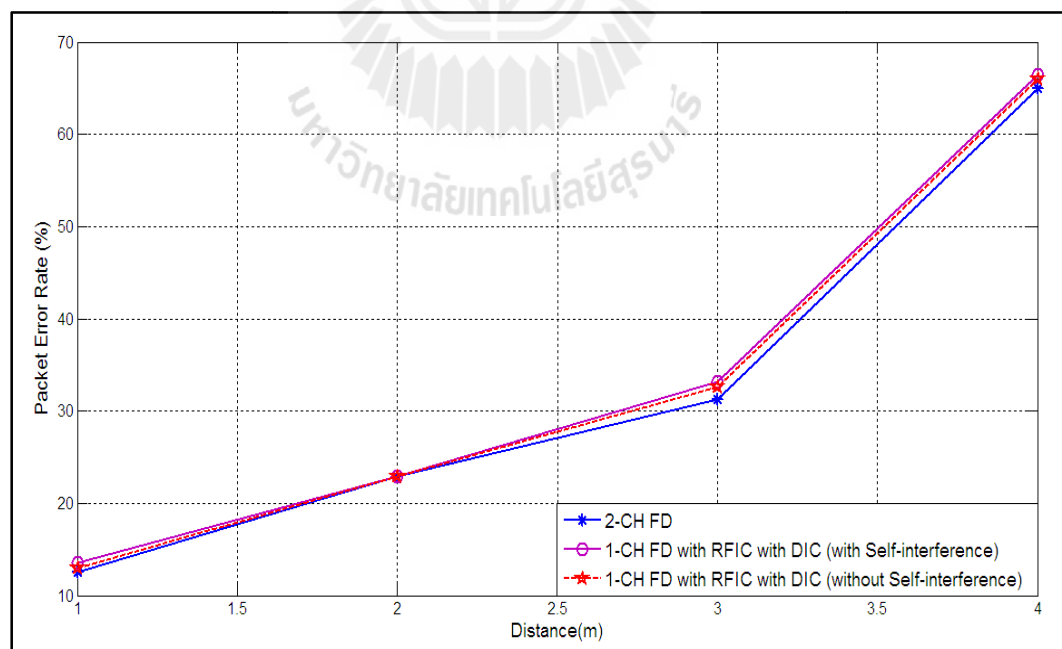
รูปที่ 5.17 แสดงอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเทียบกับระยะทางรับส่งในขณะที่มีสัญญาณ
แทรกสอดของตนเองในระบบและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองในระบบ

จากรูปที่ 5.17 ได้ทำการวัดทดสอบประสิทธิภาพค่าบิดผิดพลาดเปรียบเทียบระหว่างการทำการส่งสัญญาณแทรกสอดเข้ามาในระบบสื่อสารที่ได้ทำการออกแบบโดยการส่งสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) เพื่อทำการวิเคราะห์การทดสอบที่ได้ขณะมีสัญญาณเข้ามาในระบบและไม่มีสัญญาณเข้ามาในระบบจะสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดบิดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงเมื่อมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาในระบบซึ่งส่งออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพบว่าจะมีค่าความผิดพลาดบิดมากกว่าระบบที่ไม่มี การรบกวนหรือยังไม่ได้ทำการส่งสัญญาณออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบเราไม่สามารถทำการกำจัดสัญญาณได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ เพราะเนื่องจาก ค่าความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งไม่สามารถปรับให้สัญญาณอ้างอิงทั้งสองสัญญาณมีค่าที่เท่ากันได้ ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เป็นต้น เช่นเดียวกับค่าการทดสอบวัดประสิทธิภาพความผิดพลาดการรับแพ็คเกจในรูปที่ 5.19

จากรูปที่ 5.18 แสดงประสิทธิภาพของการรับแพ็คเกจว่าขณะทำการรับและส่งสัญญาณวิทยุมีความผิดพลาดการรับแพ็คเกจเท่าไร จะพบว่าเมื่อทำการรับและส่งข้อมูลโดยที่ไม่ได้ใช้เทคนิคใดๆ เข้ามาช่วยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดในระบบสื่อสารจะสังเกตได้จากกราฟข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบว่าระบบสื่อสารจะไม่สามารถทำการรับแพ็คเกจใดๆ ได้เลยด้วยปัญหาสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นมาในระบบสื่อสารที่ส่งผลกระทบทำให้ภาครับไม่สามารถรับแพ็คเกจข้อมูลที่ต้องการได้ ลำดับต่อมาเมื่อมีการทดสอบวัดสัญญาณขณะที่มีการนำเข้าเทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ และการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัล ตามลำดับพบว่าภาครับสามารถรับสัญญาณเข้ามาได้ส่วนหนึ่งแต่ก็มีความผิดพลาดไม่มาก และสามารถทำการรับและส่งข้อมูลได้ประมาณ 3 เมตร สุดท้ายเมื่อนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุมาใช้ร่วมกับเทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลจะพบว่าประสิทธิภาพการรับแพ็คเกจข้อมูลที่ได้มีความเทียบเคียงหรือใกล้เคียงกับระบบสื่อสารแบบดั้งเดิมที่เคยได้มีการเสนอมาและระบบสามารถทำการรับและส่งแพ็คเกจข้อมูลได้ในระยะทาง 4 เมตร จากการทดสอบเสนอให้เห็นได้ว่าระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ได้นำเสนอขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพและสามารถทำการรับส่งข้อมูลได้พร้อมๆ กันและมีอัตราการรับและส่งจำนวนแพ็คเกจที่เกิดความผิดพลาดใกล้เคียงกับระบบเดิม



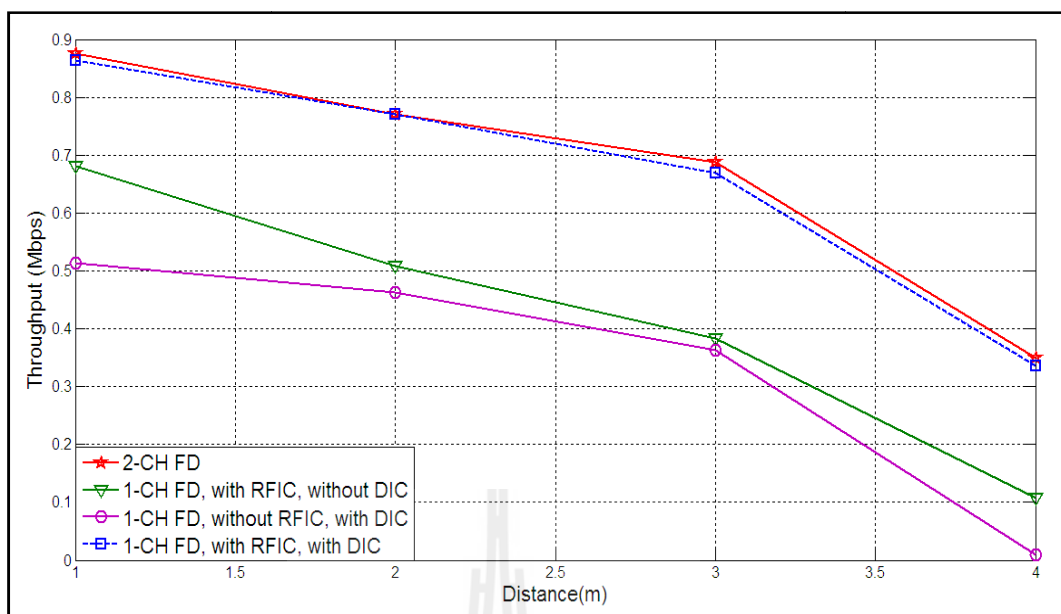
รูปที่ 5.18 แสดงอัตราความผิดพลาดเพื่อกำหนดข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบกับเทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองทั้งก่อน
และหลังการกำจัดสัญญาณแทรกสอด



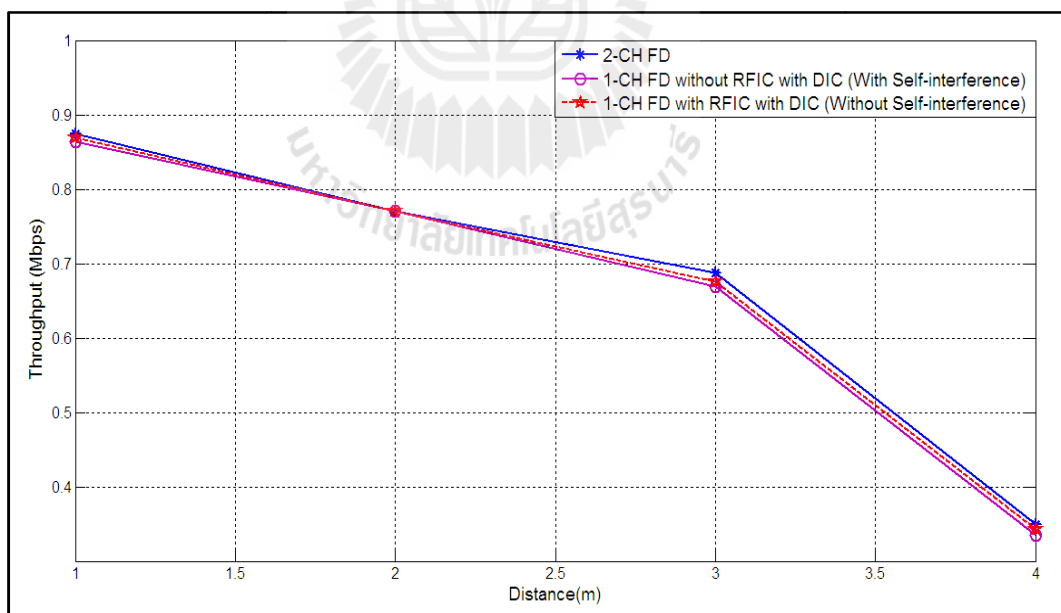
รูปที่ 5.19 แสดงอัตราความผิดพลาดเพื่อกำหนดข้อมูลเทียบกับระยะทางในในขณะที่มีสัญญาณ
แทรกสอดของตนเองในระบบและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองในระบบ

เมื่อนำผลการทดสอบในทางปฏิบัติดังแสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการวัดค่าความผิดพลาดบิตกับระยะทางในการรับส่งข้อมูลสำหรับการสื่อสาร ซึ่งเมื่อเอากราฟดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการจำลองแบบในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบในทางปฏิบัติและผลที่ได้จากการจำลองแบบมีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากหลายๆ ปัจจัยที่เราไม่สามารถจะกำหนดในการใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรมแมทแลบ อาทิเช่น ค่าที่เกิดจากการสูญเสียในสาย ออณหภูมิ เฟสของสัญญาณที่รบกวนไหลเข้ามาในระบบ ผลกระทบจากคลื่นสัญญาณวิทยุที่มีความถี่ใกล้เคียงกันในสภาพแวดล้อมที่เราไม่สามารถประมาณค่าได้ จากขีดจำกัดข้างต้นที่เราไม่สามารถที่จะนำไปจำลองแบบได้ และข้อจำกัดในตัวอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ทดสอบ ดังนั้น เราจึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองแบบในอุดมคติ ในทางกลับกันจะพบว่าเมื่อนำกราฟที่ได้จากการทดสอบการส่งผ่านข้อมูลในทางปฏิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ซึ่งแสดงการความผิดพลาดบิตกับระยะทางในการรับส่งระบบสื่อสารก็พบว่ามีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ

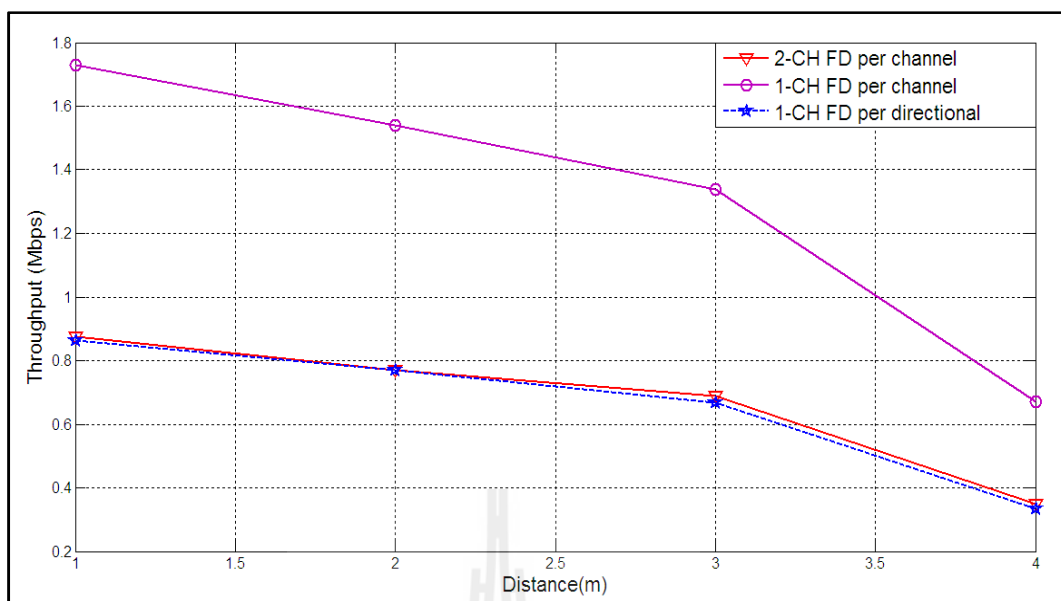




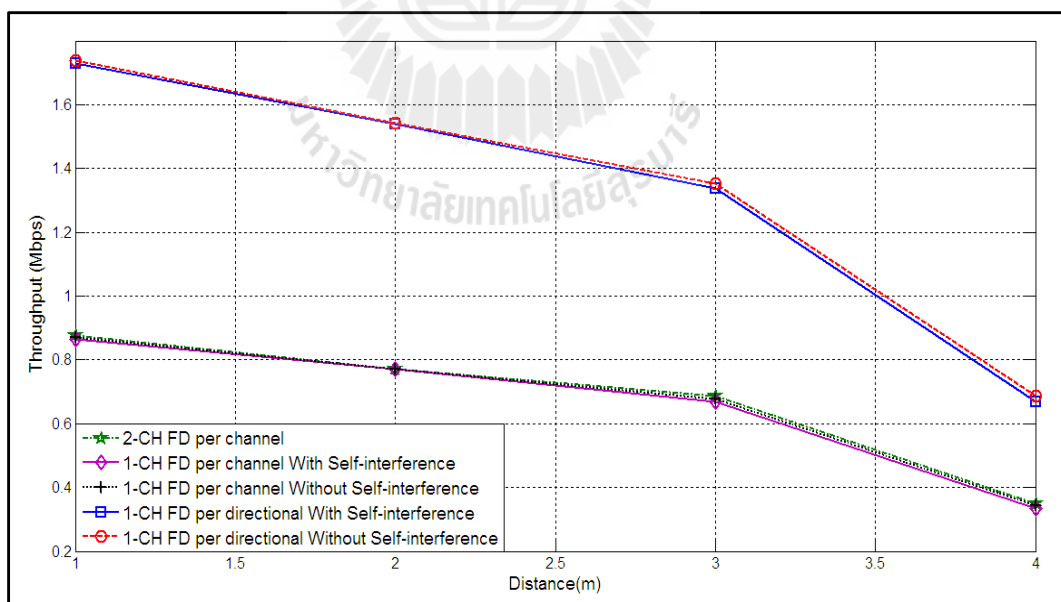
รูปที่ 5.20 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด
ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps



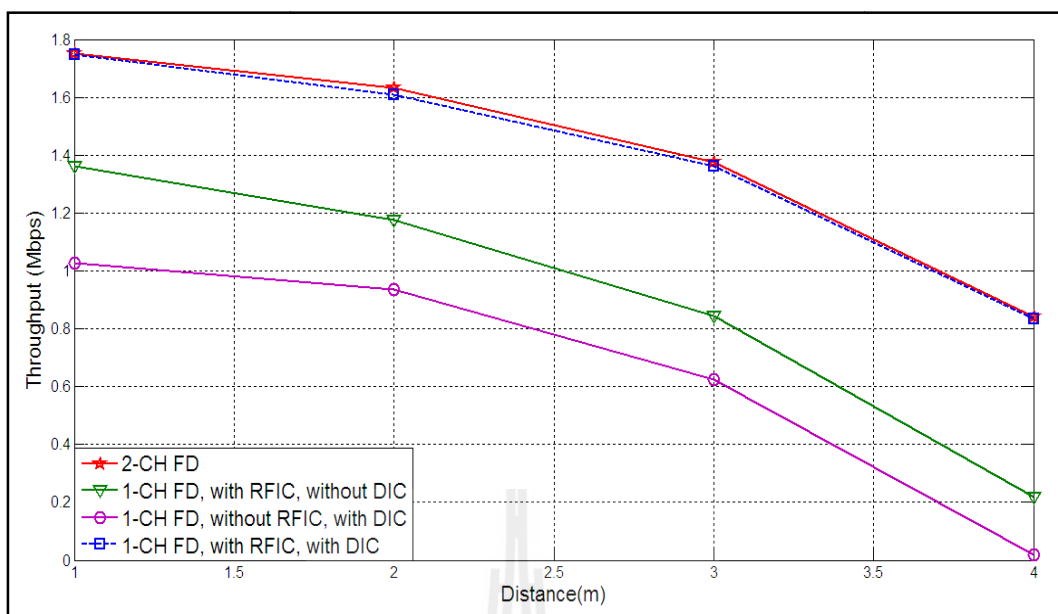
รูปที่ 5.21 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี
สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps



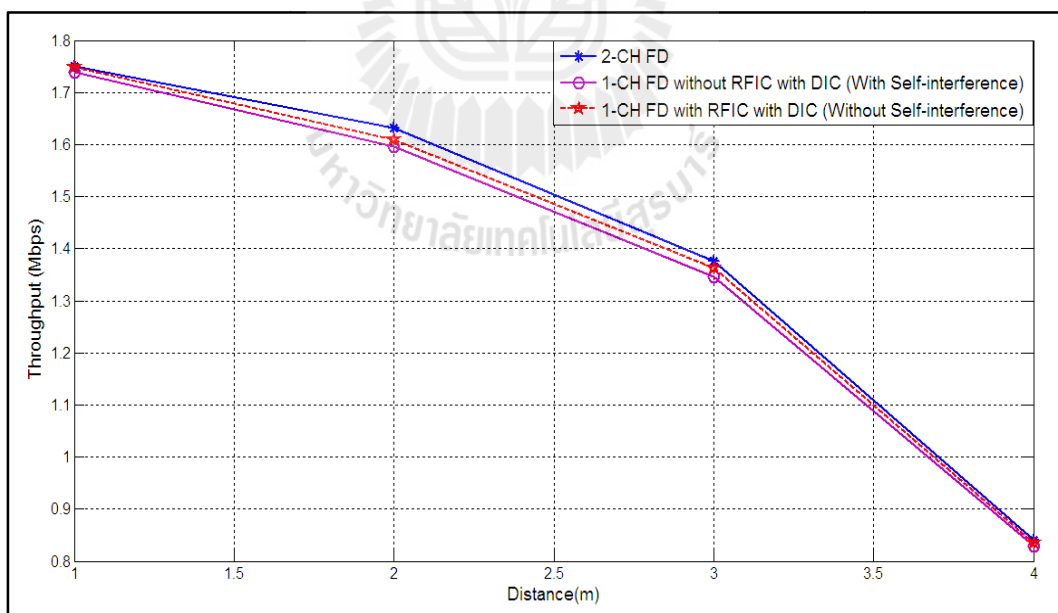
รูปที่ 5.22 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบ
ดั้งเดิมที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล
1 Mbps



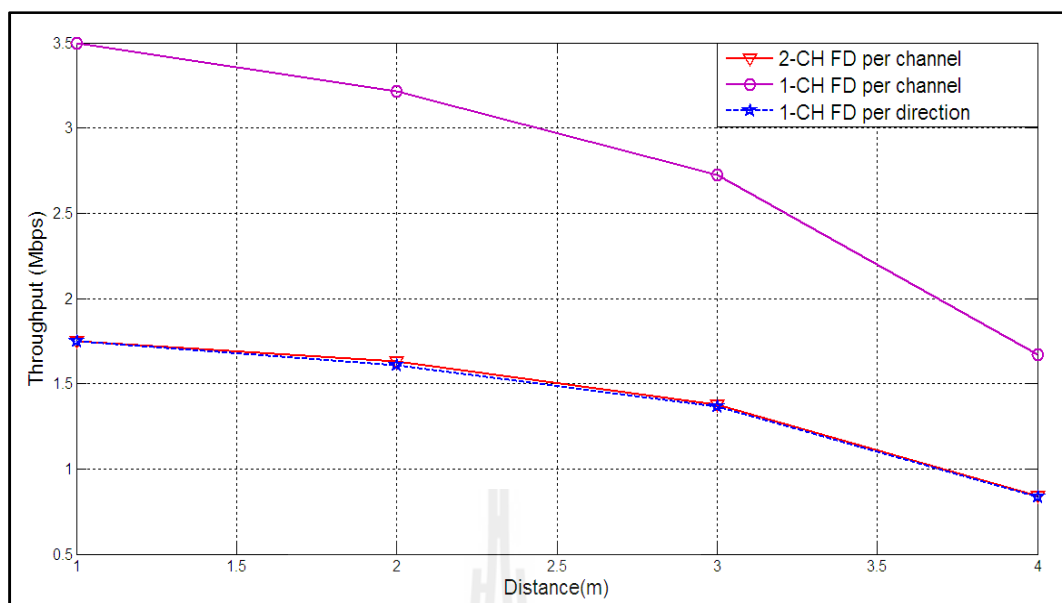
รูปที่ 5.23 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทาง โดยเปรียบเทียบระหว่าง
กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง
เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 1 Mbps



รูปที่ 5.24 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรก
สอด ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps



รูปที่ 5.25 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี
สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps

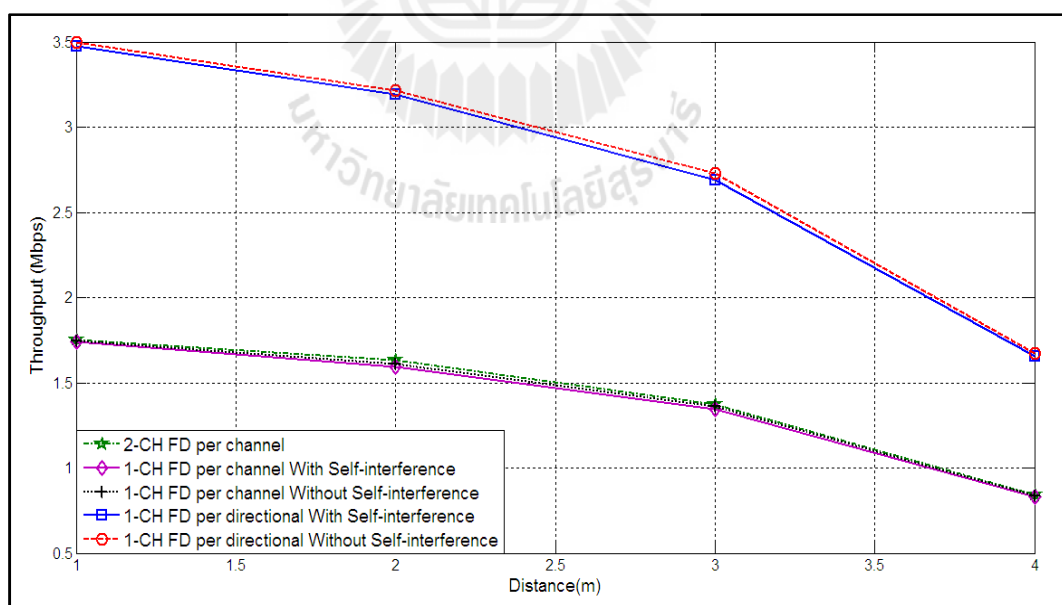


รูปที่ 5.26 แสดงค่าวิสัยความสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล

เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบ

ดั้งเดิมที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล

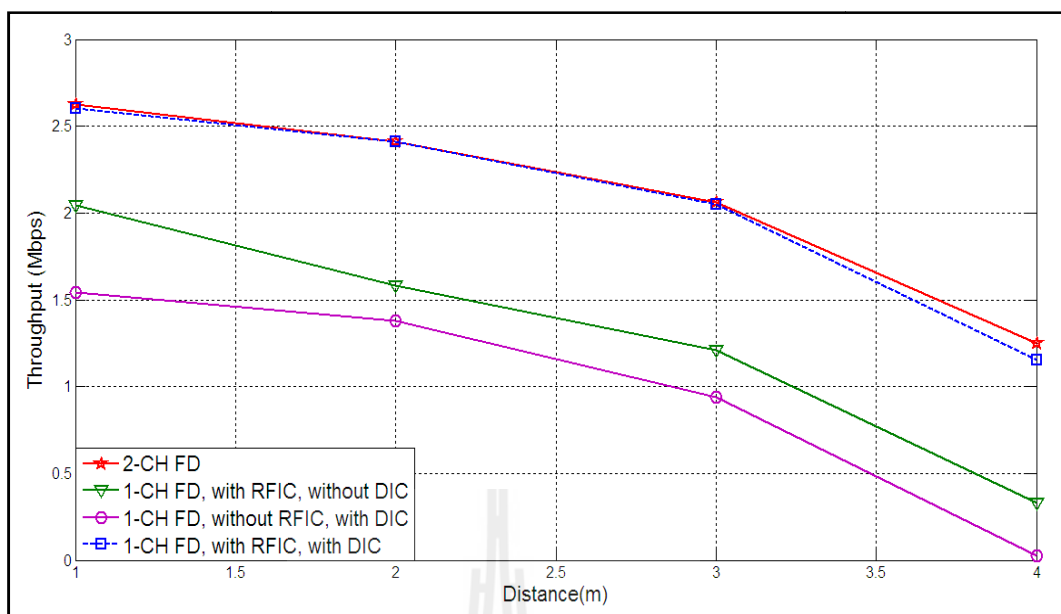
2 Mbps



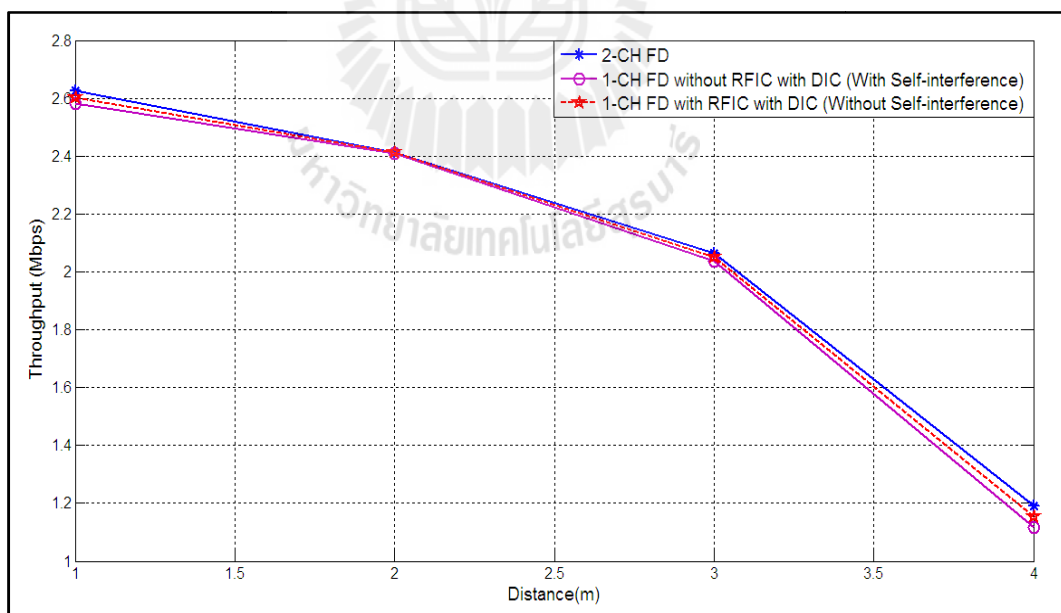
รูปที่ 5.27 แสดงค่าวิสัยความสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง

กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง

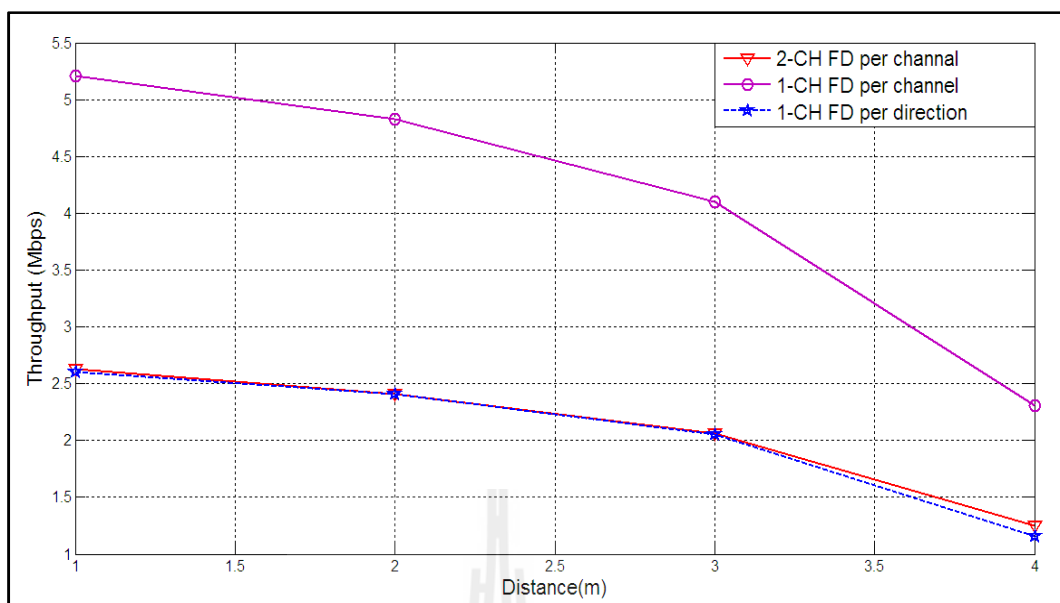
เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 2 Mbps



รูปที่ 5.28 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด
ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps

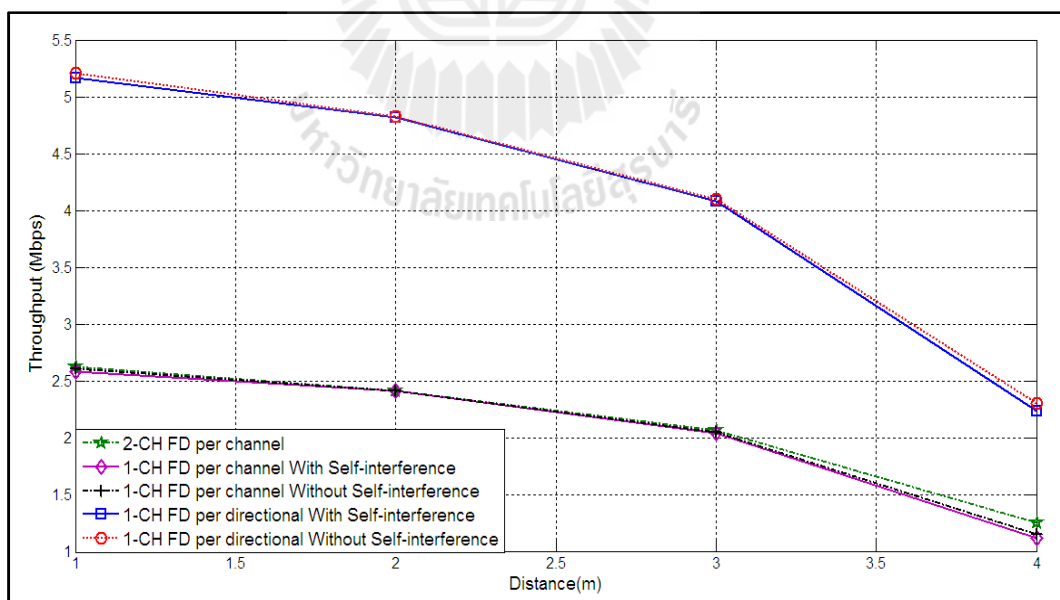


รูปที่ 5.29 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี
สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps

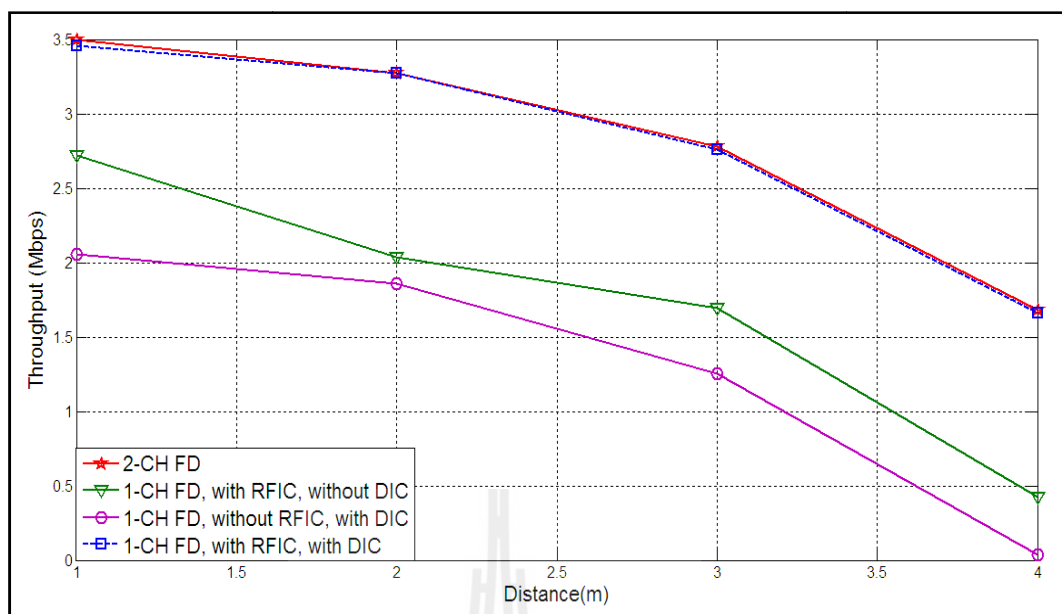


รูปที่ 5.30 แสดงค่าวิสัยความสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบ
ดั้งเดิมที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล

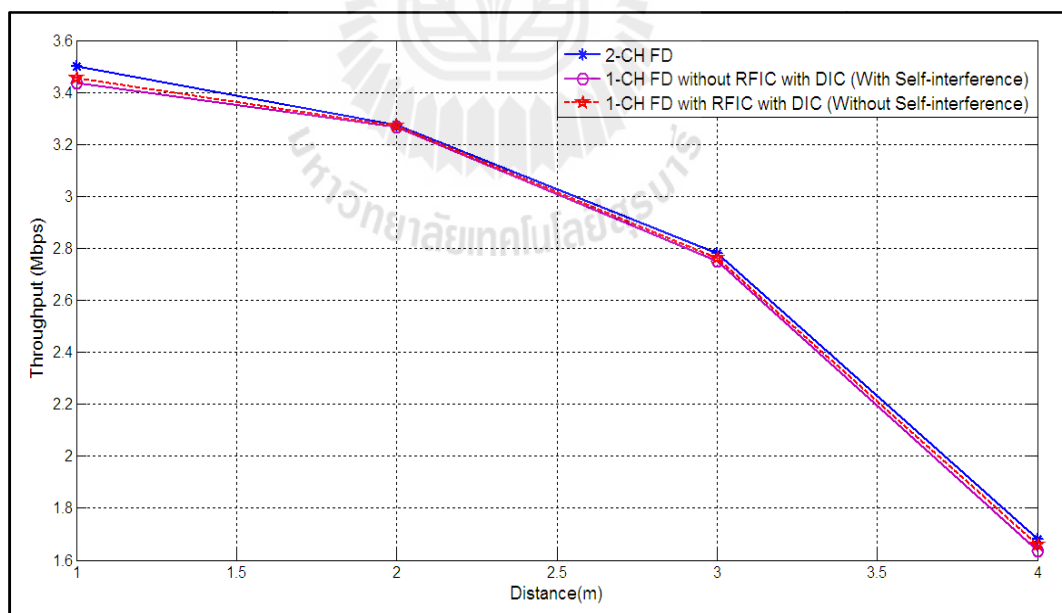
3 Mbps



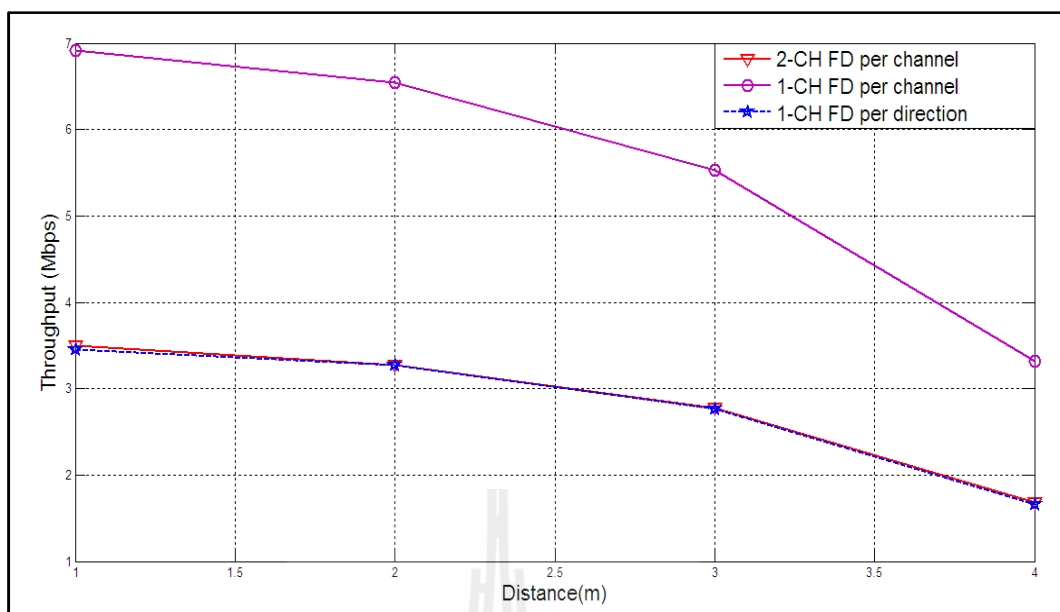
รูปที่ 5.31 แสดงค่าวิสัยความสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง
กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง
เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 3 Mbps



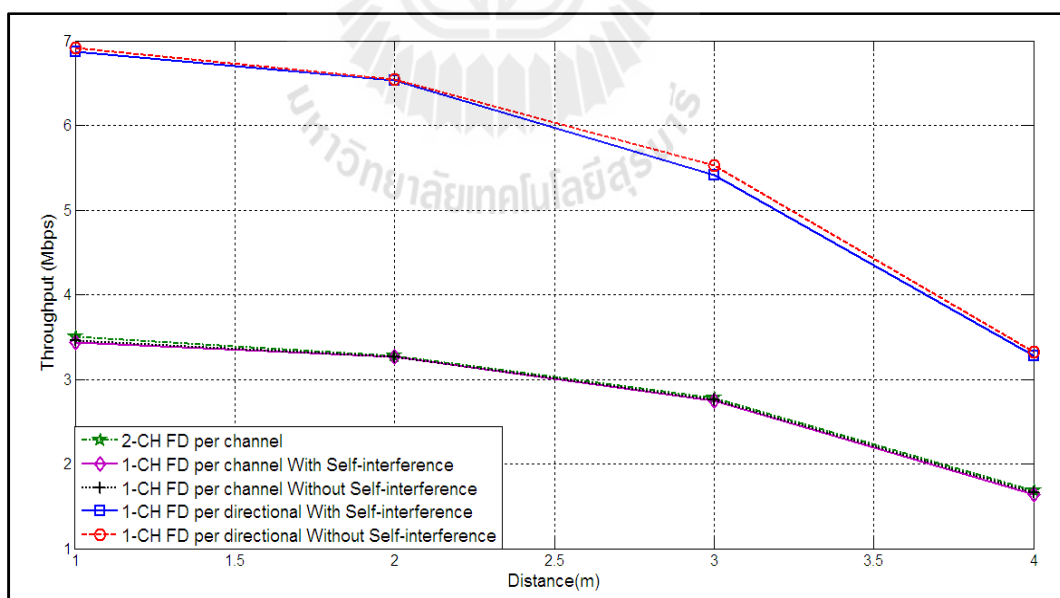
รูปที่ 5.32 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด
ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps



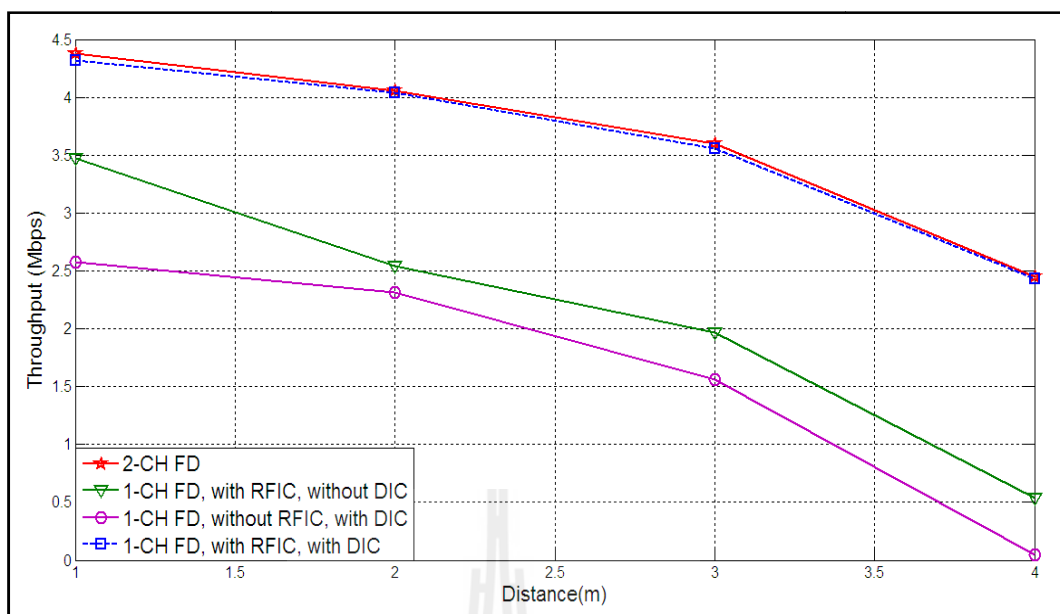
รูปที่ 5.33 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี
สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps



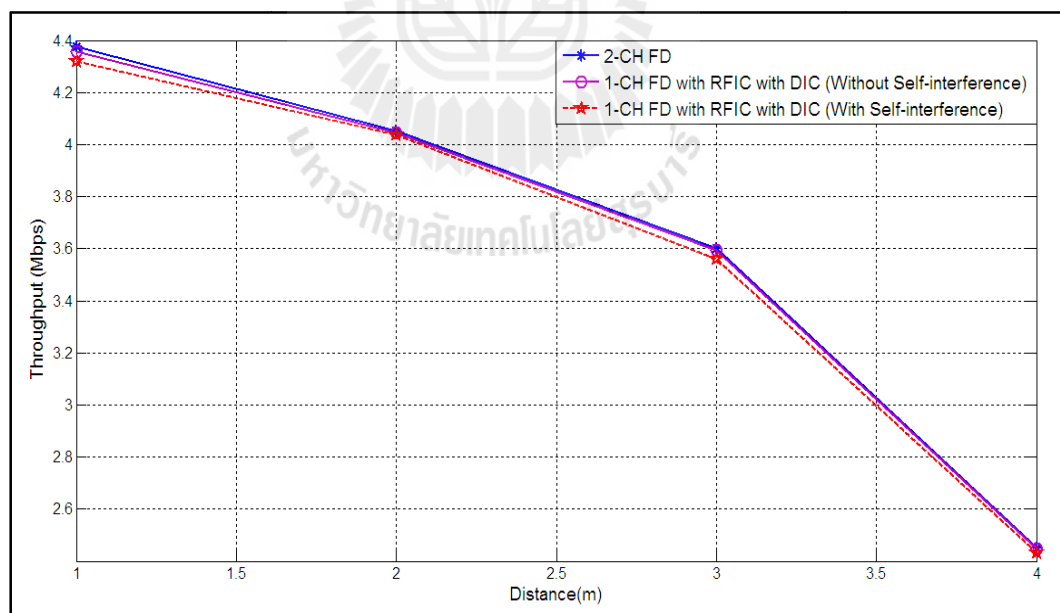
รูปที่ 5.34 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบ
ดั้งเดิมที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล
4 Mbps



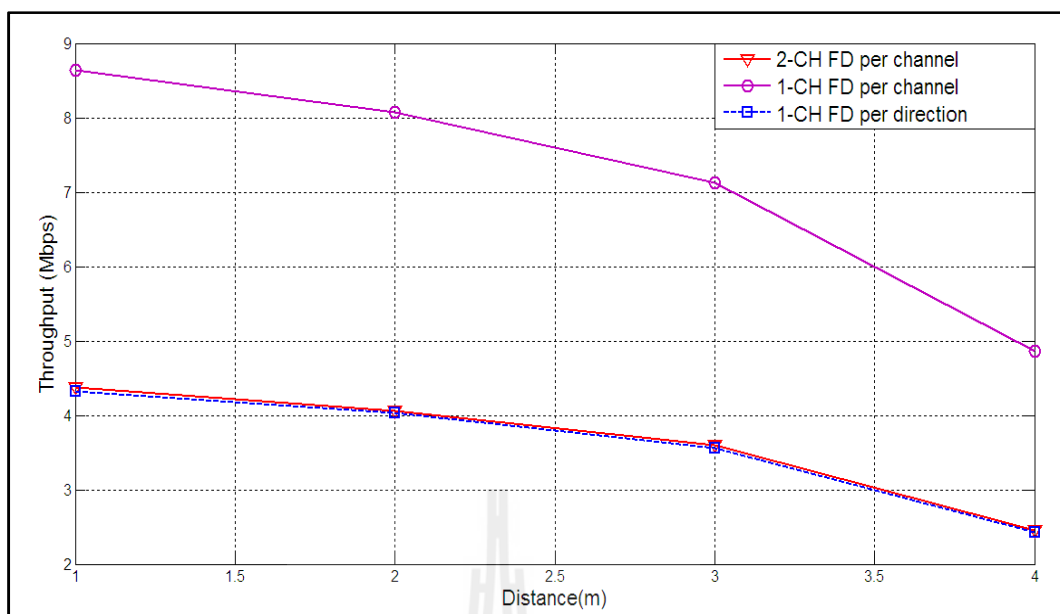
รูปที่ 5.35 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง
กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง
เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 4 Mbps



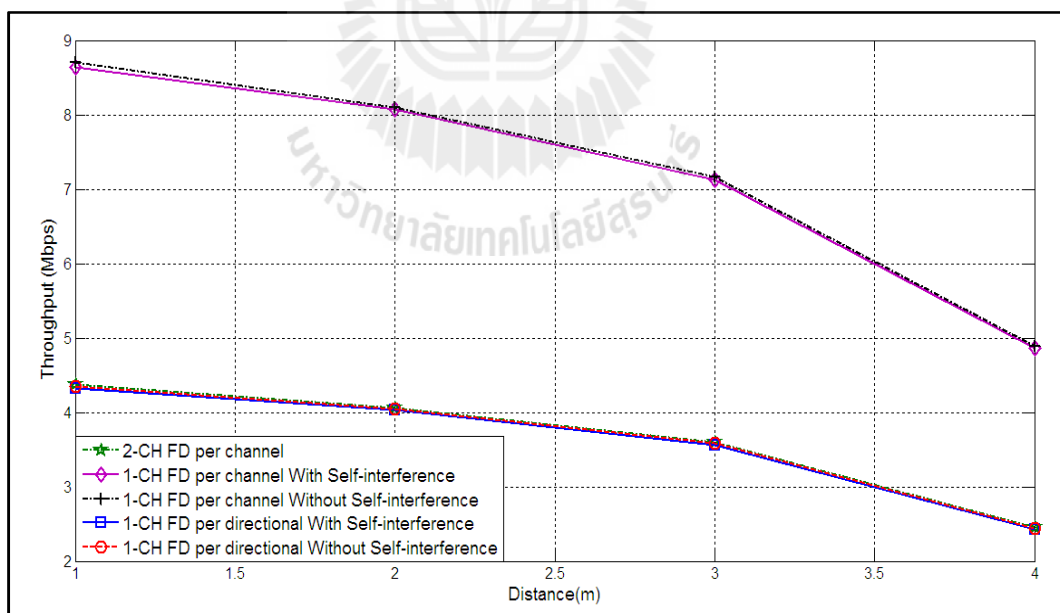
รูปที่ 5.36 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด
ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps



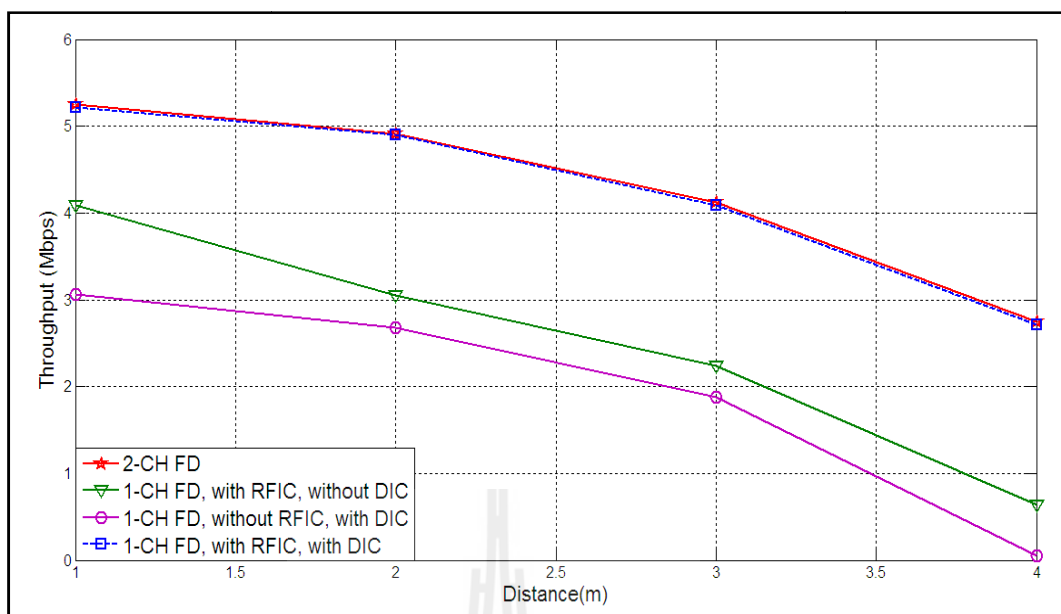
รูปที่ 5.37 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี
สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps



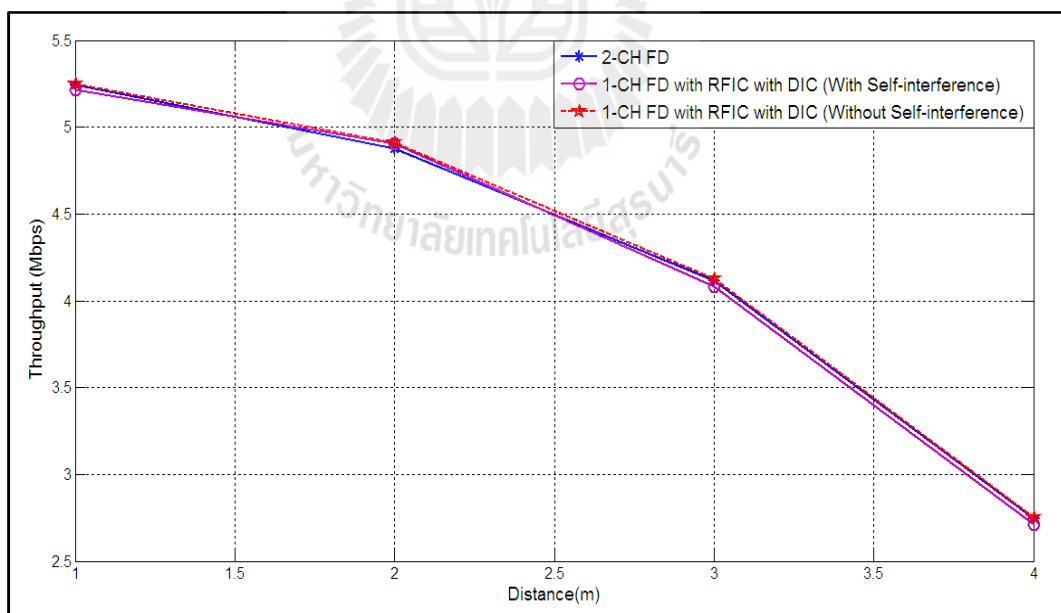
รูปที่ 5.38 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม
ที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps



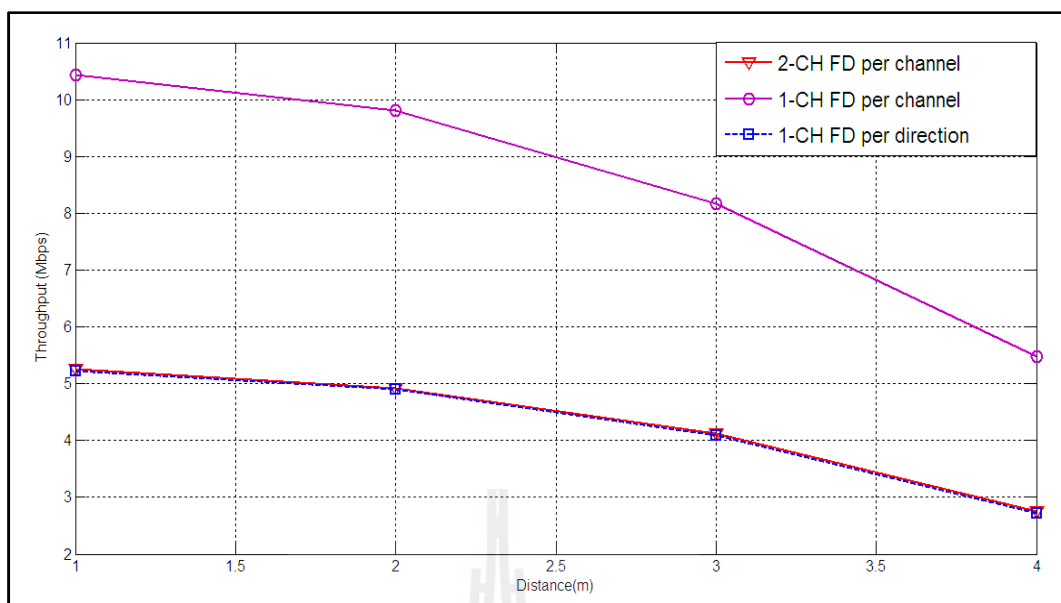
รูปที่ 5.39 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง
กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง
เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 5 Mbps



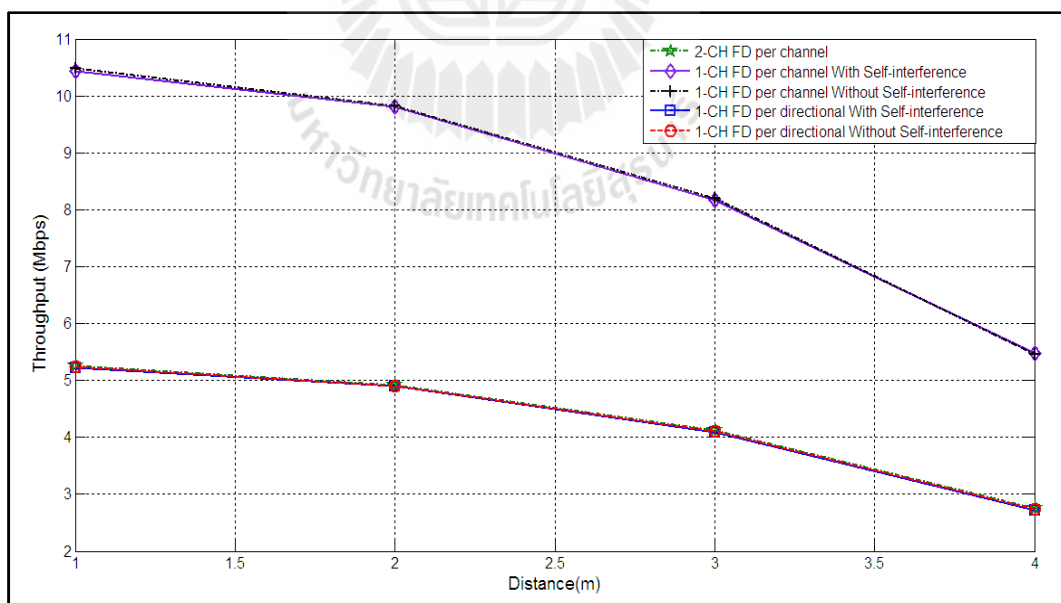
รูปที่ 5.40 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคต่างๆ ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด
ของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps



รูปที่ 5.41 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มี
สัญญาณแทรกสอดของตนเอง สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps



รูปที่ 5.42 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางในการรับส่งข้อมูล
เปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณเดียวกับระบบการสื่อสารสองทางแบบ
ดั้งเดิมที่ใช้สองช่องสัญญาณ ในการรับและส่งข้อมูล สำหรับอัตราเร็วข้อมูล
6 Mbps



รูปที่ 5.43 แสดงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเทียบกับระยะทางโดยเปรียบเทียบระหว่าง
กรณีที่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเองและไม่มีสัญญาณแทรกสอดของตนเอง
เทียบกับประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 6 Mbps

จากก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวถึงการทดสอบในทางปฏิบัติโดยการวัดประสิทธิภาพค่าความผิดพลาดบิตและการทดสอบการวัดค่าความผิดพลาดแพ็คเกจข้อมูล ลำดับต่อไปจะอธิบายถึงการวัดประสิทธิภาพค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.20 ถึง 5.43 จะสังเกตได้จากกราฟการวัดค่าข้อมูล เมื่อวิเคราะห์ถึงค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูล เนื่องจากทำการใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุร่วมกับการใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลผลลัพธ์ที่ได้พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลต่อทิศทางทางไหลของสัญญาณในระบบที่ได้แนะนำและค่าเทียบเคียงหรือใกล้เคียงกับระบบสื่อสารแบบสองทางที่ได้แนะนำก่อนหน้านี้แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณพบว่าระบบที่ได้แนะนำขึ้นมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิมที่เคยแนะนำมา แต่เมื่อพิจารณาการทดสอบด้วยการใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุหรือเทคนิคการกำจัดสัญญาณด้วยดิจิทัลอย่างใดอย่างหนึ่งพบว่าผลจากการทดสอบวัดสัญญาณจริงที่ได้สามารถส่งผ่านข้อมูลประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราเร็วของการส่งสัญญาณ สรุปได้จากผลการทดสอบวัดระบบจริงในการวัดประสิทธิภาพค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลระบบที่ได้แนะนำมีประสิทธิภาพการส่งสัญญาณมากกว่าระบบเดิมเป็นสองเท่าต่อช่องสัญญาณในการส่งผ่านข้อมูล

5.3 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้หลังจากที่ได้อ่านแล้วจะได้ความรู้จากผลที่ได้วัดจากสัญญาณจริงว่าประสิทธิภาพของระบบที่ได้แนะนำขึ้นมีประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลที่เหนือกว่าระบบการสื่อสารแบบดั้งเดิมเมื่อเปรียบเทียบการส่งผ่านค่าข้อมูลจากค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลในการช่องผ่านช่องสัญญาณเดียวกัน ตลอดจนเรียนรู้ถึงการปรับตั้งค่าเพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่ภาครับ โดยที่มีข้อควรระวังคือที่ภาครับเมื่อผู้ใช้งานสั่งให้มีการเก็บข้อมูล จะก่อให้เกิดปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ของหน่วยเก็บข้อมูล จากนั้นเมื่อพิจารณาลงลึกถึงผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า ระบบที่ได้แนะนำช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารระบบแบบสองทางให้ระบบสื่อสารมีคุณภาพที่ดีขึ้นดังกราฟที่แสดงให้เห็นศักยภาพของระบบที่ได้แนะนำเปรียบเทียบกับระบบเดิมแล้ว

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางโดยการใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับและส่งสัญญาณพร้อมๆ กันและใช้สายอากาศต้นเดียวในการทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับในชุดเดียวกัน ประเด็นที่น่าสนใจในการออกแบบระบบสื่อสารที่ได้นำเสนอคือ การออกแบบให้สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่มารบกวนในระบบ โดยขั้นต้นได้ทำการศึกษาปรัทศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางในระบบเดิม และเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด พบว่าระบบการสื่อสารแบบดั้งเดิมส่วนใหญ่ได้ออกแบบโดยใช้สายอากาศอย่างน้อยสองต้นขึ้นไป ส่วนเทคนิคที่นำมาช่วยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดนั้นสามารถแบ่งออกไปเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นเทคนิคที่กำจัดสัญญาณที่ใช้คลื่นวิทยุเข้ามาช่วยในการหักล้างสัญญาณแทรกสอดหรือเรียกว่าส่วนแอนะล็อก ส่วนที่สองคือเทคนิคที่กำจัดสัญญาณที่ใช้สัญญาณดิจิทัลเข้ามาช่วยในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดหรือส่วนที่ต้องเขียนโปรแกรมในการควบคุมการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามารบกวนในระบบ ในส่วนเทคนิคที่สำรวจพบว่ามีปัญหาที่น่าสนใจหลายประการดังนี้ ประการแรกคือเรื่องการจัดวางตำแหน่งของสายอากาศหากมีสายอากาศตั้งแต่สองต้นขึ้นไปการมีสายอากาศหลายต้นนั้นจะส่งผลให้ตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศถูกเปลี่ยนแปลงไปเสมอเมื่อใช้ความถี่ในการทดสอบเปลี่ยนไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีตำแหน่งระยะห่างการจัดวางสายอากาศจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ตาม ประการที่สองคือ ปัญหาการชนกันของข้อมูลเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ ประการสุดท้ายคือประสิทธิภาพค่าวิสัยความสามารถของการส่งผ่านข้อมูลเมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ใช้สายอากาศสองต้นจะมีประสิทธิภาพเป็นสองเท่าแต่เทียบกับระบบที่ได้แนะนำให้ใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวแต่จะมีค่าวิสัยสามารถในการส่งผ่านข้อมูลมีค่าเท่ากัน ประการสุดท้ายคือ ความเข้มของสัญญาณที่เข้ามาแทรกสอดในระบบถ้าเป็นระบบเดิมจะไม่สามารถทราบสัญญาณที่แน่นอนได้ เนื่องจากสัญญาณที่ย้อนกลับเข้ามาในระบบนั้นเป็นสัญญาณที่ถูกส่งออกอากาศไปแล้ว ดังนั้นสัญญาณที่สะท้อนกลับเข้ามาในระบบจึงขึ้นอยู่กับระยะที่สัญญาณสะท้อนกลับเข้ามาด้วยซึ่งสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบก็จะมีความมากน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับารับสัญญาณที่สะท้อนเข้ามาในระบบ

สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบได้ใช้เซอร์คูเลเตอร์ในการทำหน้าที่แยกภาครับและภาคส่งออกจากกันสำหรับระบบสื่อสารแบบสองทางที่ใช้สายอากาศต้นเดียวในการออกแบบและในส่วนการออกแบบส่วนของแอนะล็อกได้ใช้หลักการคือ การปรับเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณในเส้นทางหลักและเส้นทางรองให้มีเฟสที่ต่างกัน π และมีระดับของสัญญาณที่เท่าๆ กันเพื่อเวลาที่สัญญาณทั้งเส้นทางหลักและสัญญาณในเส้นทางรองมารวมกันจะทำให้ถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์หรือคงเหลือสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาจนในระบบเพียงเล็กน้อยเพื่อที่จะนำไปกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยดิจิทัลต่อไป จากวงจรที่ออกแบบจะเห็นว่าไม่มีความซับซ้อนและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อดีคือ เราทราบสัญญาณที่เข้ามาจนในระบบที่แน่นอนและสัญญาณที่เข้ามาจนในระบบเป็นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากภาคส่งที่เราทราบโดยภาคส่งดังกล่าวได้ส่งสัญญาณออกจากโหนดเดียวกับภาครับ

จากการทดสอบชุดทดสอบที่ได้นำเสนอพารามิเตอร์ที่สนใจในการนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบคือ ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูล ค่าแฟคเคจผิดพลาด และค่าวิสัยสามารถในการส่งผ่านข้อมูล จากผลการทดสอบสัญญาณจริงพบว่าค่าที่ทดสอบได้มีค่าใกล้เคียงกับระบบสื่อสารแบบเดิม ในส่วนที่วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูล และค่าแฟคเคจผิดพลาด เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพค่าวิสัยสามารถเมื่อเทียบการส่งในทิศทางเดียวจะพบว่าระบบการสื่อสารที่ได้ออกแบบมีค่าใกล้เคียงกับระบบการสื่อสารแบบสองทางแบบดั้งเดิม แต่เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณในหนึ่งช่องสัญญาณพบว่าระบบการสื่อสารที่ได้ออกแบบมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าคือ มีค่าวิสัยสามารถการส่งผ่านข้อมูลเป็นสองเท่าของระบบการสื่อสารสองทางแบบดั้งเดิม ดังนั้นวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงดีกว่าระบบเดิมและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ตารางที่ 6.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหา	ข้อเสนอแนะ
1. ปัญหาด้านการเก็บปริมาณข้อมูลที่ต้องการนำไปวิเคราะห์ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่มากและทำให้การประมวลผลข้อมูลช้า	ไม่ควรนำข้อมูลที่ทดสอบได้เก็บไว้ในหน่วยความภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เพราะจะทำให้เครื่องประมวลผลช้า และค้างได้
2. ปัญหาด้านการเขียนโปรแกรมคำสั่งในการควบคุมชุดอุปกรณ์เนื่องจากไม่มีชุดคู่มือตัวอย่างมาให้	ผู้ใช้งานจะต้องค้นหาข้อมูลและทำการศึกษาสังเคราะห์ข้อมูลที่ได้มานั้นเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยการช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสารรับส่งในเวลาเดียวกัน ซึ่งสามารถลดปัญหาการเกิดความล่าช้าในการรับส่งข้อมูล การชนกันของข้อมูลที่ถูกส่งพร้อมๆ กัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลให้มีความวิสัยความสามารถการส่งผ่านข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ในอนาคตจะต้องสามารถพัฒนาระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสารโดยการเขียนโปรแกรมเพื่อให้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ หรือ SDR สามารถทำงานได้ตรงกับมาตรฐานจริง และทำการรับส่งข้อมูลได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น



รายการอ้างอิง

เศรษฐวิทย์ ภูญาษา (2552) การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของการสื่อสารระยะใกล้สำหรับระบบ
ขนส่งอัจฉริยะโดยใช้เทคนิคโมโม รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Andrea, G. (2005) **Wireless Communications**, Stanford University, Chap. 10.

Berberidis, K., and Palicot, J. (1995) **A frequency-domain decision feedback equalizer for
multipath echo cancellation.** In Global Telecommunications Conference., IEEE, vol.1,
pp 98-102.

Chan, Y.K., Koo, V.C., Chung, B.K., and Chuah, H.T. (2009) **A cancellation network for full-
duplex front end circuit.** Progress In Electromagnetics Research Letters., pp 139 - 148.

Chen, S., Beach, M., and McGeehan, J.(1998) **Division-free duplex for wireless applications.**In
IEEE Electronics Letters, pp.147-148.

Choi, J., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P., and Katti, S.(2010) **Achieving single channel, full
duplex wireless communication.**In Proceedings of the sixteenth annual international
conference on Mobile computing and networking, pp 1-12.

Duarte, M., Dick, C., and Subharwal, A.(2012) **Experiment-driven characterization of full
duplex wireless system.**IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.11, pp
4296-4307.

Gheorma, I.L., and Gopalakrishnan, G.K.(2007) **RF photonic techniques for same frequency
simultaneous duplex antenna operation.**IEEE Photonics Letters..

Gollakola, S., and Katabi, D.(2008) **ZigZag decoding: combating hidden terminals in wireless
networks.**In Proceedings of the ACM., Conference on Data communication., pp 159-
170.

Halperin, D., Anderson, T., and Wetherall, D.(2008) **Taking the sting out of carrier sense:
interference cancellation for wireless lans.**In Proceedings of the 14th ACM
international conference on Mobile computing and networking., pp 339-350.

- Jain, M., Choi, J., Kim, T., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S., and Sinha, P.(2011) **Practical real-time full-duplex wireless**In Proceedinds of the seventeenth annual international conference on Mobile computing and networking.
- Katti, S., Gollakota, S., and Katabi, D.(2007) **Embracing wireless interference : analog network coding**.In Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures and protocols for computer communications,. pp 397-408.
- Kim, S.W., Chun, Y.J., and Kim, S.(2010) **Co-channel interference cancellation using single radio frequency and baseband chain**.Communications,. IEEE Transactions on,. pp 2169-2175.
- Melissa, D., and Ashutosh, S.(2010) **Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results**.In Forty-Fourth Asilomar Conference on Signals, Sytems, and Components.
- Michael, E.K.(2012) **Single antenna full duplex communications using a common carrier**.In Wireless and Microwave Technology Conference,. IEEE 13th Annual,. pp.1-6.
- Mueller, K.H.(1978) **Combining echo cancellation and decision feedback equalization**.In The Bell System Technical Journal,. Vol.58, pp 491-500.
- Na, L., Weihong, Z., and Haihua, H.(2012) **Digital interference cancellation in single channel full duplex wireless communication**.IEEE Conference Publications,. Wireless Communica-tions, Networking and Mobile Computing,. pp.1-4
- Ju, H., Oh, E., and Hong, D.(2009) **Improving efficieny of resource usage in two-hop full duplex relay systems based on resource sharing and interference cancellation**.IEEE Trans. Wireless Commun,. Vol.8, no.8pp 3933-3938.
- Paramvir, B., Ranveer, C., Thomas, M., Rohan, M., and Matt, W.(2009)**White space networking with wi-fi like connectivity**.SIGCOMM Comput,. Commun,. pp 27-38.

Radunovic, B., Gunawardena, D., Key, P., Proutiere, A., Singh, N., Balan, V., and Dejean, G.

(2010) **Rethinking indoor wireless mesh design: Low power, low frequency, full-duplex.**In Wireless Mesh Networks The Fifth IEEE Workshop on., pp 1-6.

Raghavan, A., Gebara, E., Tentzeris, E.M., and Laskar, J.(2005) **Analysis and design of an interference canceller for collocated radios.**IEEE Trans., Microwave Theory Tech., Vol.53, no.11



ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ณัฐวุฒิ ภูงามเงิน พิระพงษ์ อุฑารสกุล และ มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล(2556) การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ สำหรับระบบสื่อสารรับส่งแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวโดยใช้สายอากาศต้นเดียว, การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI-CARD 2013),หน้า 211-216

Nathawuth,P., Uthansakul, P., and Uthansakul, M.(2013) **Digital and RF Interference Cancellation for Single-Channel Full-duplex Transceiver Using a Single Antenna**, ECTI-CON 2013, Krabi, Thailand, 15-17 May.



การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุสำหรับระบบการสื่อสาร รับส่งแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวโดยใช้สายอากาศต้นเดียว

ณัฐพล ภูงามเงิน, พีระพงษ์ อุทราสกุล และ มนต์ทิพย์ภา อุทราสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา 3000

E-mail: m5440290@su.ac.th, {uthansakul, mtp}@su.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบการสื่อสารรับส่งแบบสองทางสำหรับช่องสัญญาณเดียวโดยใช้สายอากาศต้นเดียวเป็นทั้งภาครับและภาคส่ง ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือ ต้องมีวิธีการกำจัดสัญญาณแทรกสอดตัวเอง (Self-interference) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในระบบและจากการส่งรบกวนที่มีผลกระทบต่อระบบซึ่งไม่มีบทความใดได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศต้นเดียวสำหรับการสื่อสารรับส่งแบบสองทางเดียวไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำเสนอและมีการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตัวส่งด้วยการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ (RF interference cancellation) มาช่วยพบว่าผลการทดสอบสามารถลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตัวส่งได้ประมาณ 75dB เป็นผลที่น่าพอใจและดีกว่างานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องศึกษา

คำสำคัญ

ระบบการสื่อสารรับส่งแบบสองทาง, ช่องสัญญาณเดียว, สายอากาศต้นเดียว, สัญญาณแทรกสอดของตัวส่ง, การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ

Abstract

This paper presents how to design and test of a full-duplex transceiver system for a single channel using a single antenna for both transmitting and receiving paths based on principle of the self-interference cancellation. From literatures on RF interference cancellation, there have not been any suitable techniques to deal with a single antenna for a full-duplex transceiver under the condition of a single channel. So, this work initially proposes the technique to cancel the self-interference by RF interference cancellation for such a system. The measurement results show that the proposed system can reduce the level of self-interference about 75 dB, which is better than others in literatures.

Keywords: Full-duplex, Single channel, Single antenna, RF interference cancellation, Self-interference

1. บทนำ

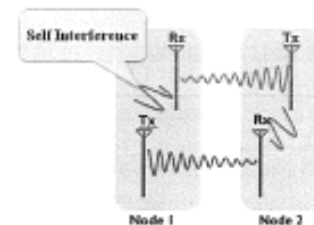
ระบบการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุในปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก เป็นระบบการสื่อสารที่มีความคล่องตัวสูง แต่ปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างภาครับและภาคส่ง อาทิเช่น ข้อจำกัดด้านความถี่ที่ใช้งานมีอยู่อย่างจำกัด ความล้มเหลวสภาพแวดล้อมรอบๆ บริเวณที่ตั้งของภาคส่งและภาครับ เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงกลายเป็นประเด็นปัญหาสำคัญที่นักวิจัยทั่วทุกมุมโลกให้ความสนใจเป็นอย่างมากที่จะคิดค้นแนวทางที่จะช่วยพัฒนาและออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุรูปแบบใหม่ขึ้นมาอย่างต่อเนื่องและมีความล้ำค่านวัตกรรมอื่นๆ โดยมีเป้าหมายคือ ต้องช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในระบบการสื่อสารที่สามารถรองรับให้ผู้ใช้งานทำการทั้งรับและส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุพร้อมๆ กันได้ในเวลาเดียวกัน สามารถรองรับการใช้งานที่หลากหลายสามารถอำนวยความสะดวกให้ผู้ใช้งานมีความน่าเชื่อถือลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในแง่อุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่ง แต่ความท้าทายในบทความนี้คือ การออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางที่สามารถวัดทำการรับและส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณเดียวกันแต่ใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวในการรับและส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันซึ่งต่างกับระบบสื่อสารแบบสองทางที่มีอุปกรณ์ที่ส่วนใหญ่ออกแบบให้มีสายอากาศอย่างน้อยสองต้นในการรับและส่งข้อมูล ซึ่งการใช้สายอากาศสองต้นจะมีข้อจำกัดด้านการจัดวางสายอากาศ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่งขนาดของสัญญาณรบกวนที่ไม่

มีความแน่นอน และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบมีด้วยกัน 3 ประเด็น คือ ประเด็นแรกเรื่องการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self-interference) เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาครับในโหนดเดียวกันซึ่งเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการออกไปเนื่องจากเป็นอุปสรรคสำคัญที่ส่งผลต่อการถอดรหัสสัญญาณที่ภาครับให้เกิดความผิดพลาดขึ้น และวิธีที่นำเสนอในบทความนี้คือ การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ (RF interference cancellation) ประเด็นที่สองคือ การออกแบบโดยใช้สายอากาศเพียงเส้นเดียวและใช้เซอร์คูลเตอร์ (Circulator) ในการทำหน้าที่ช่วยแยกสัญญาณภาครับและภาคส่งออกจากกันเพื่อให้สามารถทำการรับและส่งสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน ประเด็นสุดท้ายคือการใช้ความถี่เดียวกันในการรับและส่งสัญญาณวิทยุด้วยระบบสื่อสารแบบสองทางผ่านช่องสัญญาณเดียว (Single Channel) มีข้อดีคือ มีค่าวิสัยสามารถของการส่งข้อมูล (Throughput) เป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแบบกึ่งสองทาง ลดปัญหาการชนกันของข้อมูล ลดการหน่วงที่ปลายสาย (End-to-End Delay) ในข่ายงาน และเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยใช้สายอากาศ 2 ดันกับระบบโมโน 2x2 พบว่าในกรณีที่มีการออกแบบระบบการสื่อสารแบบสองทางโดยใช้สายอากาศเพียงเส้นเดียวที่ได้นำเสนอสามารถมีค่าวิสัยสามารถของการส่งข้อมูลได้สองเท่าเหมือนกัน ยังมีข้อจำกัดด้านแถบความถี่ (Bandwidth) ซึ่งสนับสนุนได้เพียงแถบความถี่กว้าง (Wideband) เท่านั้น ไม่สามารถรับและส่งสัญญาณแบบซัดในมิติได้ สุดท้ายคือ มีการกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้มีผลกระทบต่อกาบริบน้อยที่สุด ในกรณีวิธีที่ศึกษาเดิม ในขณะที่อยู่ภายใต้การแทรกสอดจากสัญญาณที่รั่วไหล (Leak) เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่มาจากภาคส่ง โดยคาดหวังว่าจะได้ระบบการติดต่อสื่อสารไร้สายที่สามารถสื่อสารแบบสองทางที่ดีขึ้นกว่าระบบเดิม

2. งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการสื่อสารแบบสองทาง

การสื่อสารรับส่ง (Duplex) คือสามารถทำการรับและส่งได้ในเวลาเดียวกันซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกันได้แก่



รูปที่ 1 สัญญาณการแทรกสอดของตนเองซึ่งเป็นความท้าทายในการดำเนินการโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในเวลาเดียวกันในการสื่อสารแบบสองทาง

ระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางและระบบสื่อสารแบบสองทาง โดยข้อแตกต่างของ 2 ระบบนี้คือ ระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางซึ่งเป็นระบบที่ใช้ความถี่เดียวกันในการรับหรือส่งสัญญาณวิทยุโดยจะทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเดียวกันแต่ใช้เวลาเดียวกัน หมายความว่าผู้ใช้งานจะต้องทำการสลับกันรับหรือส่งสัญญาณวิทยุ เนื่องจากระบบสื่อสารแบบกึ่งสองทางไม่สามารถทำหน้าที่ในการรับและส่งสัญญาณวิทยุพร้อมๆ กันได้ ดังนั้นสายอากาศที่ใช้จึงต้องทำหน้าที่เป็นทั้งสายอากาศภาครับและภาคส่งในต้นเดียวกัน ระบบที่ใช้งานรูปแบบนี้อาจเช่น วิทยุสื่อสาร การรับและส่งโทรสาร เป็นต้น ส่วนระบบสื่อสารแบบสองทาง ในระบบนี้เราจะต้องทำการแยกความถี่ในการรับและส่งสัญญาณวิทยุโดยการใช้สายอากาศอย่างน้อยสองต้นคือ ใช้สายอากาศหนึ่งต้นสำหรับเป็นสายอากาศภาคส่ง และใช้สายอากาศอีกต้นต้นสำหรับเป็นสายอากาศภาครับเพื่อให้แยกภาครับกับภาคส่งออกจากกันซึ่งจะช่วยให้ทำการสื่อสารเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง

2.2 ระบบการสื่อสารแบบสองทางที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวในการสื่อสาร

การออกแบบระบบสื่อสารแบบสองทางโดยใช้ช่องสัญญาณเดียวในการรับและส่งข้อมูลนั้นมีความท้าทายในการออกแบบด้วยกัน 3 ประเด็นคือ ประเด็นแรกเรื่องการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง (Self Interference) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาครับในโหนดเดียวกันซึ่งเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการออกไปซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญที่ส่งผลต่อการถอดรหัสสัญญาณที่ภาครับให้

ตารางที่ 1 สรุปการสำรวจการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ (RF INTERFERENCE CANCELLATION)

Reference	Number of Antennas	RF Interference Cancellation Techniques
[1]	2	1) based on Quellan QHx220 noise cancellers 2) a nulling transmit antenna.
[2]	3	antenna cancellation using two transmit and one receive antennas
[4]	2	based on a balanced/unbalanced (balun) transformer
[5]	1 (Specific antenna)	feed-forward cancellation with two feed on a specific antenna
Proposed	1 (General antenna)	combination of a variable attenuator and phase shifter with a general antenna.

เกิดความผิดพลาดขึ้น ประเด็นที่สองคือ การออกแบบ โดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวและใช้เซอร์คูลเลเตอร์ (Circulator) ในการทำหน้าที่ช่วยแยกสัญญาณมากรับและภาคส่งออกจากกัน เพื่อให้สามารถทำการรับและส่งสัญญาณได้ตลอดเวลาเดียวกัน โดยผ่านช่องสัญญาณที่เรียกว่าช่องสัญญาณไปหน้า (Forward Channel หรือ Downlink) ซึ่งจะถูกระหว่างที่ภาครับ จากนั้นจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณย้อนกลับ (Reverse Channel หรือ Uplink) ไปยังภาคส่ง ตามลำดับดังนี้ นอกจากจะมีการแบ่งแถบความถี่ให้แก่ผู้ใช้งานแต่ละคนแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการจัดสรรการใช้ช่องสัญญาณสำหรับการรับและส่งในเวลาเดียวกันนั้นสามารถทำได้สองแนวทางคือ การสื่อสารรับ-ส่งแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Duplex: FDD) ซึ่งผู้ใช้งานจะได้รับ การจัดสรรแถบความถี่ย่อยสองแถบ แถบความถี่หนึ่งอยู่ในกลุ่มช่องสัญญาณสำหรับภาครับและอีกความถี่หนึ่งอยู่ในกลุ่มช่องสัญญาณสำหรับภาคส่ง โดยส่วนของช่องสัญญาณไม่หนักและช่องสัญญาณย้อนกลับจะถูกแยกออกจากกันด้วยช่องสัญญาณกันชน (Guard Band) อีกชั้นหนึ่งซึ่งช่องสัญญาณกันชนจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน อีกแนวทางหนึ่งที่ใช้สำหรับจัดสรรช่องสัญญาณในการรับและส่งก็คือการสื่อสารรับ-ส่งแบบแบ่งเวลา (Time Division Duplex: TDD) วิธีนี้จะแบ่งช่องสัญญาณรับและส่งตามเวลาแทนที่จะเป็นตามความถี่ เนื่องจากระยะห่างทางเวลาระหว่างช่องสัญญาณรับและส่งนั้นสั้นมาก จึงทำให้สามารถส่งสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องเช่นกัน ประเด็นสุดท้ายคือการให้ความถี่เดียวกันในการรับและส่ง

สัญญาณวิทยุ ด้วยระบบสื่อสารแบบสองทางผ่านช่องสัญญาณเดียว (Single Channel)

2.3 สำนวนเทคนิคของการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ

การสำรวจประสิทธิภาพการที่เกี่ยวเนื่องกับการใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุ ดังแสดงในตารางที่ 1 สอดคล้องกับ [1] ซึ่งได้นำเสนอโดย Radunovic โดยใช้การออกแบบให้ใช้สายอากาศสองต้นวางห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร และใช้เทคนิคในการกำจัดสัญญาณแทรกสอด 2 เทคนิคด้วยกันคือ วิธีแรกใช้ชิปของ QHx220 มาช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวนโดยเชื่อมต่อกับสายอากาศภาครับ และวิธีที่สองจะอาศัยการส่งสัญญาณที่เราไม่ต้องการคือสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณแทรกสอดของคนที่สนใจนำไปรวมเพื่อกำจัดทิ้ง ในส่วนข้อ [2] ที่นำเสนอโดย Choi ได้นำเทคนิคการกำจัดด้วยสายอากาศมาช่วย แม้ว่าวิธีนี้พอจะมีหวัง แต่การกำจัดด้วยสายอากาศมีข้อจำกัดหลายประการด้วยกัน ในด้านการดำเนินการ สำหรับ [4] ซึ่งได้นำเสนอโดย Jain ในการนำรูปแบบการเทคนิคการยกเว้นสัญญาณมาช่วย มีการแยกภาครับและภาคส่งออกจากกันระยะห่างประมาณ 15-20 เซนติเมตร วิธีการนี้จะพบว่าจะมีปัญหาในเรื่องการจัดวางสายอากาศที่มีความไม่แน่นอน ส่วน [5] ในภาคนี้ได้นำเสนอโดย Michael ใช้เทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับสัญญาณจากสายอากาศที่สะท้อนกลับมาจากสายอากาศและสัญญาณที่วัดได้มาจากเซอร์คูลเลเตอร์มากำจัด จะเห็นได้ว่าเทคนิคที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ทุกเทคนิคที่ได้กล่าวถึงล้วนใช้สายอากาศอย่างน้อยสองต้นในการดำเนินการ

ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคที่ใช้กับสายอากาศทุกประเภท ซึ่งการออกแบบไม่ต้องการความพิเศษ มีการรวมตัวแปรของการลดทอนและตัวเลื่อนเฟสเข้ามาช่วย

3. รายละเอียดการพัฒนา

3.1 ภาพรวมของระบบ

ในการทดสอบเราต้องการออกแบบการสื่อสารแบบสองทาง โดยการใช้สายอากาศเดี่ยวในการรับและส่ง โดยในเซอร์คูลเตอร์ทำหน้าที่ในการแยกภาครับและภาคส่งออกจากกัน และเทคนิคที่ใช้ในการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบคือ การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุที่เราทราบสัญญาณภาคส่งที่เป็นสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่ต้องกำจัดในรูปของสัญญาณคลื่นวิทยุกับที่เราจะนำไปขอเป็นสัญญาณเชิงดิจิทัล ในส่วนของแนวคิดในการกำจัดสัญญาณด้วยแฉกแฉกจากสัญญาณทั้งสองเส้นทางที่ภาครับที่มีเฟสตรงกันของสัญญาณตรงข้ามกัน π ซึ่งจะใช้การปรับลดขนาดของสัญญาณโดยใช้ตัวลดทอนสัญญาณมาช่วย เนื่องจากเมื่อเรานำสัญญาณทั้งสองเส้นทางมารวมกันจะสามารถทำให้สัญญาณที่หัวโหลเข้ามามีระดับสัญญาณที่ต่ำลง และทำให้สัญญาณที่เราต้องการรับเข้ามาผ่านได้โดยปราศจากสัญญาณแทรกสอดที่มีมารบกวนหรือมีค่าที่ต่ำมาก

3.2 การออกแบบและพัฒนาระบบ

ในรูปที่ 2 ได้นำเสนอภาพรวมการกำจัดสัญญาณแทรกสอดในตนเอง ซึ่งจะต้องมีส่วนในการควบคุมคือ ตัวลดทอน และตัวเลื่อนเฟส ที่ใช้ในการปรับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้าป้อนเข้ามา โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ สัญญาณที่ป้อนเข้ามา $s(t)$ แอมพลิจูด A_1 และเฟส ϕ_1 สัญญาณที่ภาคส่งกำหนดดังนี้

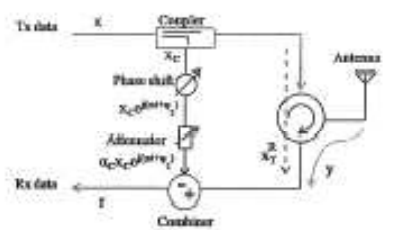
$$x = A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1)} \quad (1)$$

ที่ทิศทางคู่คู่ (directional coupler) สัญญาณคู่คู่ x_c และสัญญาณที่ผ่าน x_T อธิบายได้ดังนี้

$$x_T = (1 - \alpha_1) A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2)} \quad (2)$$

$$x_c = \alpha_1 A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2)} \quad (3)$$

เมื่อ α_1 คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นทางคู่คู่



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมที่นำเสนอการใช้เทคนิคการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยคลื่นวิทยุ



รูปที่ 3 ภาพรวมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ

แล้วเมื่อสัญญาณ x_T คือสัญญาณที่ต้องการส่งออกไปยังสายอากาศโดยผ่านเซอร์คูลเตอร์และยังคงมีสัญญาณอีกส่วนหนึ่งหัวโหลเข้ามายังภาครับในโหนดเดียวกันซึ่งกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดของตนเองกำหนดเป็นสมการดังนี้

$$x_T = \alpha_2 (1 - \alpha_1) A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2 + \phi_4)} \quad (4)$$

เมื่อ α_2 คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของเซอร์คูลเตอร์ในการแยกเส้นทางภาครับและภาคส่งออกจากกัน สำหรับเส้นทางคู่คู่สัญญาณควบคู่กันโดยใช้สัมประสิทธิ์การลดทอน α_c และเฟส ϕ_c การรวมสัญญาณที่ภาครับกำหนดดังนี้

$$r = y + x_T + \alpha_c x_c e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2)} \quad (5)$$

การกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่สมบูรณ์ กำหนดให้ $r = y$ ดังนี้

$$\alpha_2 (1 - \alpha_1) A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2 + \phi_4)} = -\alpha_c A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2 + \phi_c)} \quad (6)$$

แล้วเราจะได้ค่าการลดทอนและการเลื่อนเฟสแสดงดังสมการข้างล่าง

$$\alpha_c = (1 - \alpha_1) \alpha_2 / \alpha_1 \quad (7)$$

$$\phi_c = \phi_2 + \phi_4 - \phi_1 + \pi \quad (8)$$

3.3 ข้อจำกัดของระบบ

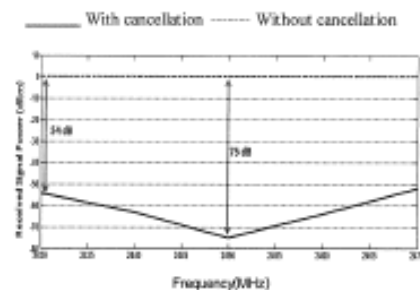
ระบบสามารถทำการติดต่อสื่อสารโดยการรับและส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่ไกลไม่เกิน 10 เมตร เนื่องจากอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบระบบมีค่าน้อย แต่ยังสามารถทำให้ระบบทำการส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นได้โดยการเปลี่ยนสายอากาศที่มีอัตราขยายที่สูงขึ้นได้

4. การทดสอบการใช้งาน

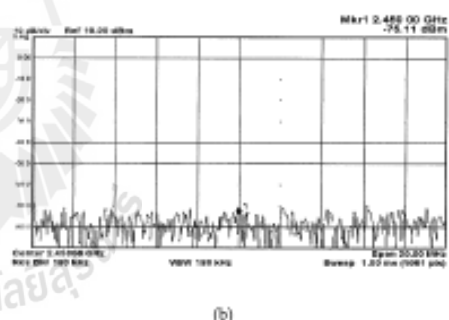
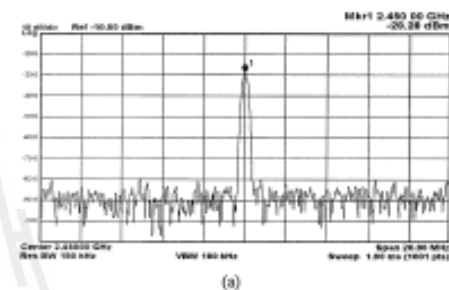
4.1 ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

ในการทดสอบจริงได้มีการออกแบบและจัดวางอุปกรณ์การทดสอบดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยใช้เครื่อง spectrum analyzer ช่วยในการวัดระดับสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับได้ทันที ภาควิธีเปรียบเทียบกับสัญญาณแทรกสอดที่รั่วไหล (Leak) เข้ามายังภาควิธีซึ่งเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการ และใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) ในการสร้างสัญญาณคลื่นพาหะซึ่งใช้กำลังส่งที่ 0dBm บทความนี้ได้ทดสอบโดยใช้ช่วงความถี่ 2.45GHz ซึ่งตรงกับช่องสัญญาณไร้สายบนมาตรฐาน 802.11 สำหรับตัวเลื่อนเฟสจะใช้แรงดันไฟฟ้าในการควบคุมเพื่อปรับค่าให้ตรงข้ามกับระดับสัญญาณอ้างอิง 5V เนื่องจากถ้าระบบสัญญาณอ้างอิงของเราไม่เฟสตรงข้ามกับระดับสัญญาณอ้างอิงที่เราต้องการกำจัดเมื่อนำทั้งสองสัญญาณมารวมกันแล้วจะทำให้ระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเองมีค่าต่ำที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งในตอนแรกเราต้องการทำการปรับค่าตัวเลื่อนเฟสให้ระดับสัญญาณแทรกสอดในตนเองมีค่าต่ำที่สุดที่เราจะคงค่านั้นไว้ เนื่องจากฮาร์ดแวร์จะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าใดๆ หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถทำการปรับค่าตัวเลื่อนเฟสได้ตลอดเวลา ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าในการเลื่อนเฟสที่เหมาะสมและสามารถทำให้สัญญาณแทรกสอดของตนเองมีค่าต่ำที่สุด สำหรับตัวลดทอนสัญญาณมีกระบวนการดำเนินการเช่นเดียวกับตัวเลื่อนเฟส

สำหรับผลการทดสอบจะพบว่าหลังจากการกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุสามารถลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเองได้ประมาณ -70dB ถึง -75dB บนแถบความถี่ 10MHz แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4 ที่ความถี่กลาง



รูปที่ 4 แสดงการลดระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเองโดยใช้เทคนิคที่นำเสนอ



รูปที่ 5 แสดงการวัดสเปกตรัมของสัญญาณแทรกสอดของตนเอง

5(a) ขณะยังไม่กำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเอง

5(b) เมื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองออกแล้ว

สามารถลดได้ประมาณ -75dB ซึ่งดีกว่าเทคนิคของบทความอื่นที่เสนอมานำ

รูปที่ 5 แสดงการวัดสเปกตรัมของระดับสัญญาณแทรกสอดของตนเอง ในรูป 5(a) แสดงระดับของกราวด์ของสัญญาณแทรกสอดในตนเองขณะที่ยังไม่ถูกกำจัดออกจะเห็น

ว่ามีระดับของสัญญาณที่สูง ในรูปที่ 5(b) แสดงการวัดสเปกตรัมของสัญญาณแทรกสอดของตนเองขณะที่ทำการกำจัดสัญญาณออกแล้วจะเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณรบกวนมีขนาดที่ต่ำมากจนเกือบจะไม่มีสัญญาณรบกวนเหลืออยู่เลยซึ่งเท่ากับว่าจะเหลือสวิตช์ที่เป็นอุปกรณ์ต่อภาครับน้อยมากต่อไปสามารถนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณเชิงดิจิทัลมาช่วยกำจัดสัญญาณที่เหลืออยู่เพิ่มเติมต่อไป

5. บทสรุป

จากการทดลองการศึกษากำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วยคลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสารรับส่งแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวโดยใช้สายอากาศคันเดียว พบว่าผลการทดลองที่ได้สามารถลดระดับสัญญาณการแทรกสอดของตนเอง (Self-interference) ประมาณ -75dB ซึ่งการลดลงในระดับนี้ดีพอที่จะทำให้เราสามารถทำการรับและส่งข้อมูลได้เหมือนกันได้ ณ ช่วงเวลาเดียวกัน

5.1 แนวทางการพัฒนาต่อ

ต่อขอโดยการนำเทคนิคการกำจัดสัญญาณเชิงดิจิทัลเข้ามาร่วมกับเทคนิคที่ได้นำเสนอสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของตนเองที่เกิดขึ้นในระบบที่ออกแบบโดยใช้สายอากาศคันเดียวในการรับและส่งข้อมูลแบบสองทาง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการสนับสนุนงบประมาณวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Radunovic, D. Gunawardena, P. Key, A. Proustiere, N. Singh, V. Balan and G. Dejean, "Rethinking Indoor Wireless Mesh Design: Low Power, Low Frequency, Full-Duplex," Fifth IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks, June 2010.
- [2] J.I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis and S. Katti, "Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication," The 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), September 2010.
- [3] N. Singh, D. Gunawardena, A. Proustiere, B. Radunovic, H.V. Balan and P. Key, "Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation," International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), May 2011, pp. 94-101.
- [4] M. Jain, J. I. Choi, T. M. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, and P. Sinha, "Practical, Real-time, Full Duplex Wireless," The 17th Annual

International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), September 2011.

- [5] M. E. Kozl, "Single Antenna Full Duplex Communications using a Common Carrier," in Wireless and Microwave Technology Conference (WAMCON), 2012 IEEE 13th Annual, April 2012.

Digital and RF Interference Cancellation for Single-Channel Full-duplex Transceiver Using a Single Antenna

N. Phungamgern, P. Uthasakul and M. Uthasakul

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology

Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Email: m5440290@g.sut.ac.th, {uthasakul, mtp}@sut.ac.th

Abstract — This paper presents a full-duplex transceiver system design operating with a single channel using a single antenna for both transmitting and receiving paths. To implement such a system, the self-interference is necessary to be eliminated. From literatures on RF interference cancellation, there has not been any suitable technique to deal with a single antenna. In this light, this work initially proposes the technique to cancel the self-interference by utilizing on-the-shelf components. The measurement results indicate that the proposed system can reduce the level of self-interference about 75 dB, which is better than others in literatures.

Index Terms — Full-duplex, single channel, single-antenna, self-interference, RF Interference cancellation.

I. INTRODUCTION

A wireless communication is increasingly pervasive in everyday life. A fundamental precept of wireless communication is that a radio cannot transmit and receive on the same frequency and at the same time. In a traditional wireless communication system, all nodes can simultaneously either transmit or receive. That is, a node cannot receive data transmitted from other nodes until its own packet transmission to another node is completed. If another packet is received at the node while it is transmitting a packet, a collision occurs. This one-way communication system is called a half-duplex wireless system. Wireless communication has become possible for nodes to transmit and receive a simultaneously through self-interference cancellation. This is called full-duplex wireless system. The inability to do both transmit and receive is the root of many of the open problems in wireless today.

Our design improves on all prior related work on a full-duplex wireless system that can transmit and receive at the same time in the same frequency band since they require at least two antennas [1-7] having one for TX and one for RX antenna. The key challenge in realizing such a system lies in addressing the self-interference generated by the TX antenna at the RX antenna. For example, one can implement the above self-interference cancellation idea completely in analog domain using noise cancellation circuits was reported by Radunovic et al. [2]. But practical noise cancellation circuits can only handle a dynamic range of at most ~30 dB. Another proposed technique [3] employs the antenna

cancellation using three antennas to create a beam forming null that cancels the self-interference at the receiver antenna, using antenna placement as an additional cancellation technique or antenna cancellation. Antenna cancellation, using two asymmetrically-placed transmits antennas and one receive antenna. This three antenna system can remove ~60 dB reduction of self-interference by RF interference cancellation results, for a 802.15.4 system. Although it looks promising; the antenna cancellation-based designs have three major limitations. The first is that they require three antennas having two transmit and one receive, which are very sensitive to the relative location of antennas and any material around them. Full-duplex doubles throughput, but with three antennas a MIMO system can triple throughput. The second limitation is a bandwidth constraint, a theoretical limit which prevent supporting wideband signal such as WiFi. Finally, Choi et al.'s design introduces a third, practical limitation e.g. it requires manual tuning. The proposed in [3] was modified in [6] in order to avoid null zones in the far field and to allow cancellation for more than three antennas per device. However, the design presented in [6] is practically challenging due to the complexity of the required antenna placement and to analog circuitry requirements which increase as a function of the number of transmit and receive antennas. More importantly, the distance between communicating devices was no more than three meters in the experiments reported in [6]. Similar systems presented by Jain et al. [5] use a balun (balanced/unbalanced) circuit and two separate antennas, one transmit and one receive. They can remove ~45 dB reduction of self-interference by RF interference cancellation results. Combined with digital cancellation, this allows a full-duplex wireless to cancel up to ~73 dB of self-interference for a 802.11 system. Recently, Michael [7] implemented a feed-forward technique to improve the Tx-Rx isolation of single patch antenna with balanced feed network, the measured isolation was reported as 40-45 dB. The feed-forward technique is achieved by sampling a portion of the transmitted signal using a directional coupler. Although the work in [6] claims to use a single antenna but it needs two feeds to virtually perform as two antenna which requires a specific design on antenna.

So far, there is still no technique to be suitable for full-duplex system with a general antenna. In this paper, the technique of RF interference cancellation for any single antenna is proposed. This system is implemented by using a circulator to isolate the transmitting and receiving paths. The self-interference signals can be eliminated by subtracting with the transmit signals which their amplitude and phase are suitably adjusted. With the proposed system, the benefits including potentially double the throughput, eliminate hidden terminals [4], reduce congestion and improve fairness are fully obtained.

II. SYSTEM OVERVIEW

This paper studies full-duplex wireless communication systems operating on the same frequency and at the same time. The simultaneous transmitting and receiving signals can be achieved via the cancellation of the self-interference signal. However, the problem is that the self-interference is billions of times stronger (60-90 dB) than a received signal e.g. for WiFi the self-interference would be nearly up to 80 dB stronger. Hence, the main key success is to eliminate the self-interference as much as possible. In this section, the overview of full-duplex system is grounded in order to understand the main problem of this work. Next, the survey of RF interference cancellation techniques is detailed.

A. Full-duplex wireless communication

Currently, full-duplex wireless systems achieve the isolation required between the two direction of communication using independence in either time or frequency. Accordingly, these duplexing are called Time Division Duplexing (TDD), or Frequency Division Duplexing (FDD). For TDD system is when nodes divide access in time. TDD is also commonly known as half-duplexing. Other full-duplex wireless systems separate the Tx and Rx function in the frequency domain, using Frequency Division Duplexing (FDD), and may operate using two different carrier frequencies for carrying transmissions. In this case, Nodes 1 and 2 can send data to each other at the same time, although using two different frequencies. The use of different frequencies prevents the two signals from interfering with each other, even though the two transmissions occur at the same time.

Using time division duplexing exacerbates the inconsistency in the channel views across nodes. Since only one node among a pair of communicating nodes can transmit at a given time, the wireless channel around the transmitting node may look occupied, while the wireless channel around the receiving node may look unoccupied. Such inconsistencies are the root cause of many of the problems with time division duplexing wireless networks, such as packet losses due to hidden terminal effects. On the other hand, frequency division duplexing requires a wireless node to use twice the frequency bandwidth for

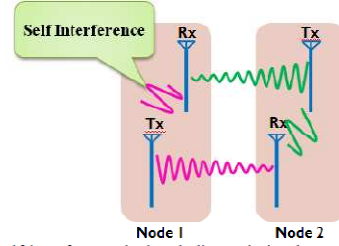


Fig.1. Self-interference is the challenge in implementing single channel on same time full-duplex wireless system communications.

sending and receiving signals of a given bandwidth. In some cases, this is expensive and infeasible.

The key challenge in implementing a full-duplex wireless system, where a device can simultaneously transmit and receive signals over-the-air at the same time and in the same frequency band, is the large power differential between the self-interference from a node's own transmissions and the signal of interest coming from a distant source.

B. Single channel full-duplex wireless communications

A basic precept of wireless communication is that a radio cannot transmit and receive on the same frequency and at the same time. As wireless signals attenuate quickly over distance, the signal from a local transmitting antenna is hundreds of thousands of times stronger than transmissions from other nodes. Fig.1. shows an example where Nodes 1 and 2 are trying to send data to each other simultaneously using the same frequency. Node 1's own transmission is much stronger at its receive antenna, compared to the signal it receives from Node 2. With such strong self-interference, the receiver of Node 1 is unable to decode any signals that Node 2 is trying to send to Node 1.

This example shows that the biggest challenge in designing a single channel full-duplex wireless communications is eliminating the self-interference signal from the receiver of the wireless node. In theory, this problem should be easy to solve. For a system with an antenna each for transmit and receive, since the system knows the transmit antenna's signal, it can subtract it from the receive antenna's signal and decode the remainder.

C. Survey of RF Interference cancellation techniques

Table I shows the survey of RF interference cancellation technique. According to [1], the proposed technique by Radunovic et al is designed using two antennas placed approximately 10 cm apart. They introduce two techniques in [1]. The first technique is implemented by using Quellan QHx220 noise cancellers

(noise canceling chips). They feed the signal from the transmit antenna via a wire to the QHx220 and connect to the receive antenna. The Quellan noise canceller subtracts the self-interfering signal from the received signal and recovers the useful signal. The second technique relies on the use of a nulling transmit antenna to achieve the additional cancellation. This is an implementation of a nulling antenna that gives an almost omni-directional radiation pattern excepting in the nulling direction.

In [2], the work proposed by Choi et al employs antenna cancellation. Although it is a promising technique but antenna cancellation has three major limitations as mentioned earlier. For [4], the work proposed by Jain et al performs a signal inversion based on a balanced/unbalanced (balun) transformer and two separate antennas. They use transmit and receive antenna that are separated by distances ranging from 15-20 cm, distant antenna placement is infeasible. In [5], the work proposed by Michael employs the feed-forward techniques with single antenna. This is done by using balanced feed network capable of simultaneously cancelling the antenna reflection and circulator leakage. This technique is expensive because they use two circulators and two quadrature hybrids. Also, the antenna is specially designed to have two feeds on single antenna. In this case, the input Tx power is split equally into two separate paths which is the same as the third antenna and two antenna ports. Instead of specific antenna, this paper presents technique that can be used with any general antenna. No special design of antenna is required. Only the combination of variable attenuator and phase shifter is employed.

III. PROPOSED RF INTERFERENCE CANCELLATION

In this section, we describe the design of full-duplex system that requires only one antenna using circulator to share the same antenna for transmitting and receiving paths. RF interference cancellation (RFIC) uses knowledge of transmission to cancel self-interference in the RF signal, before it is digitized. In an ideal analog cancellation scenario, the amplitudes from the two paths would be perfectly matched at the receiver and phase of

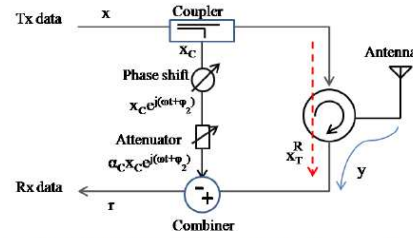


Fig. 2. Block diagram of proposed RF interference cancellation technique.

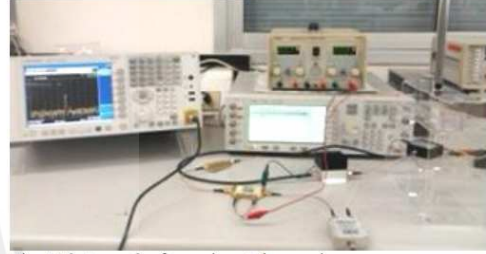


Fig. 3 Photograph of experimental scenario.

the two signals would differ by exactly π . To cancel self-interference, the best performing prior design is obtained. The authors gain the inverse of the transmitted signal using a phase shifter with attenuator, dynamically adjusting the attenuation and phase of the inverse signal to match the self-interference leaking from circulator. After combining both inverse and leak signals, the received signal can be passed through the processing unit with the minimum effect of self-interference.

Fig 2 presents the signal diagram of self-interference cancellation. The attenuator and phase shifter allow a modulator to control the angle and amplitude of a feed signal. By assuming the unit signal $s(t)$ with amplitude A_1 and phase ϕ_1 , then the transmitting signal is given by

$$x = A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1)} \quad (1)$$

At directional coupler, the coupling signal x_C and the pass-through signal x_T are expressed as

$$x_T = (1 - \alpha_1) A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2)} \quad (2)$$

TABLE I
SUMMARY OF RF INTERFERENCE CANCELLATION SURVEY

Reference	Number of Antennas	RF Interference Cancellation Techniques
[1]	2	1) based on Quellan QHx220 noise cancellers 2) a nulling transmit antenna.
[2]	3	antenna cancellation using two transmit and one receive antennas
[4]	2	based on a balanced/unbalanced (balun) transformer
[5]	1 (Specific antenna)	feed-forward cancellation with two feed on a specific antenna
Proposed	1 (General antenna)	Combination of a variable attenuator and phase shifter with a general antenna.

$$x_c = \alpha_1 A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_3)} \quad (3)$$

Where α_1 is the attenuation coefficient of coupling path.

Then, the signal x_T is sent to antenna via circulator. Some part of this signal has been absorbed inside circulator and some leaks to the isolation port which become the self-interference of the system defined as

$$x_T^R = \alpha_2 (1 - \alpha_1) A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2 + \phi_4)} \quad (4)$$

Where α_2 is the attenuation coefficient of circulator in the isolation path.

For coupling path, the coupling signal is adjusted by attenuation coefficient α_c and phase ϕ_c . The total received signal is then given by

$$r = y + x_T^R + \alpha_c x_c e^{-j(\omega t + \phi_c)} \quad (5)$$

To completely eliminate the self-interference, let $r = y$. Hence,

$$\alpha_2 (1 - \alpha_1) A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_2 + \phi_4)} = -\alpha_c \alpha_1 A_1 s(t) e^{-j(\omega t + \phi_1 + \phi_3 + \phi_c)} \quad (6)$$

Then we get the tunable value of attenuator and phase shifter as shown below

$$\alpha_c = (1 - \alpha_1) \alpha_2 / \alpha_1, \quad (7)$$

$$\phi_c = \phi_2 + \phi_4 - \phi_3 + \pi \quad (8)$$

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Fig.3. shows the photograph of this scenario for measuring the self-interference. The spectrum analyzer is used to measure the spectrum of received signal as well as interference signals. The signal generator (signal source) is used to generate the carrier signals with the power of 0 dBm. In this paper, the operating frequency band is on 2.45 GHz in order to match with a practical wireless channel as IEEE 802.11. For phase shifter, the control voltage is adjusted to the value that the minimum self-interference is achieved. Actually, this phase needs only one time to be adjusted because all hardware will not be changed after manufacturing. Hence, in practice, it is not necessary to be adjustable phase shifter. Instead, the specific phase shifting is good enough to minimize the self-interference. For attenuator, the same methodology as phase shifter can be implemented.

From measurements, it is clearly seen that the RF interference cancellation can provide a significant amount of self-interference reduction, -70dB to -75dB on 10MHz bandwidth shown in Fig.4. At center frequency, the reduction is about -75dB which is better than other techniques presented in literatures.

Fig.5 shows the measured spectrum of self-interference signal. In Fig.5(a), the spectrum of the self-interference leakage without cancellation is noticeably high. In Fig.5(b), the measured spectrum of self-interference signals with cancellation is very low and close to noise floor level.

At this stage, the self-interference is low enough to provide a little impact on the desirably received signals.

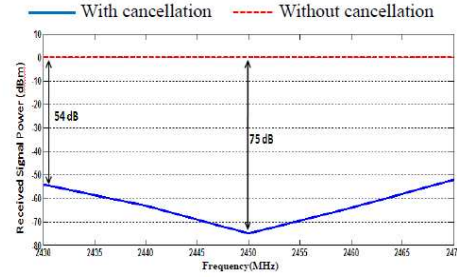


Fig.4. Self-interference reduction using proposed technique.

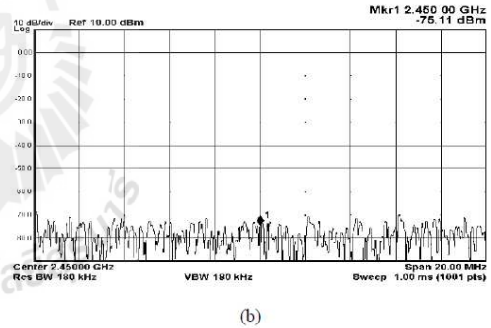
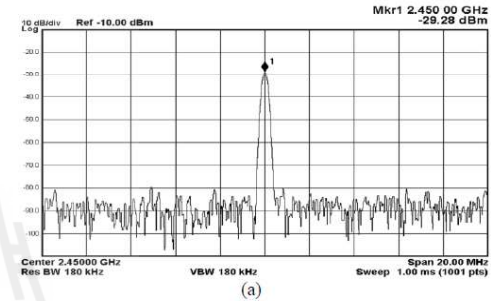


Fig.5. Measured spectrum of self-interference signal (a) without cancellation (b) with cancellation.

Also, there are many digital cancellation techniques to handle with the small amount of self-interference.

After measured signals, all data is processed offline in MATLAB program. The program performs the Digital Interference Cancellation (DIC) by using Least Mean Square (LMS) algorithm. Fig.6 shows the BER (Bit Error Rate) vs received power performance by using MATLAB program. We have noted that BER after the level of 85dBm is very high for all types of cancellers. However, the system with both RFIC and DIC can provide the best performance.

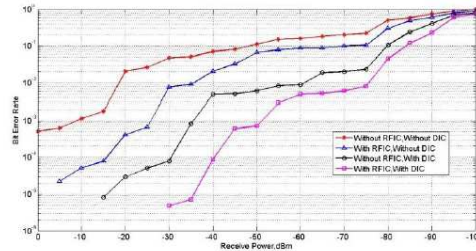


Fig.6. BER vs received power performance for different self-interference cancellers.

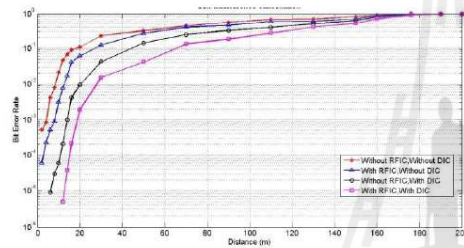


Fig.7. BER vs distance performance for different self-interference cancellers.

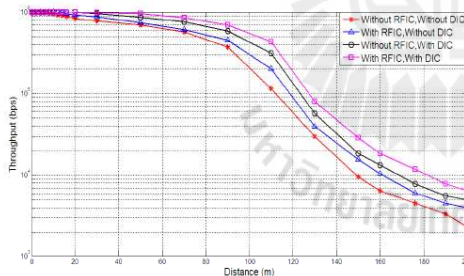


Fig.8. Throughput vs distance performance for different self-interference cancellers.

Fig.7 shows the BER vs distance performance, the simulations are performed by changing the distance between transmitters to receiver. The results indicate that the transmission distance is about 20 meters at 10^{-3} BER. Note that the distance in literature is ranged from 5-16 meters at the same transmitted power with this work.

Fig.8 shows the throughput vs distance performance. As noticed in the figure, the throughput is quickly decreased when the distance is more than 100 meters. The system with both RFIC and DIC can offer 0.7 Mbps higher than the system without any cancellation techniques. Hence,

the results reveal the good insight of using a proposed technique for a practical full-duplex system.

V. CONCLUSION

This paper has described the simple and practical technique of RF interference cancellation for a single-channel full-duplex wireless system using a single antenna. The measurement results support the success of proposed technique by reducing the self-interference about -75dB. This reduction is good enough to transmit and receive on the same frequency at the same time. Also the simulation results show that the combination of both RFIC and DIC promisingly increases the system performances. For the next work, the author will further prove this proposed technique by implementing the full-duplex single-channel system with a single antenna.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the financial support from Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

- [1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [2] B. Radunovic, D. Gunawardena, P. Key, A. Proutiere, N. Singh, V. Balan and G. Dejean, "Rethinking Indoor Wireless Mesh Design: Low Power, Low Frequency, Full-Duplex," *Fifth IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, June 2010.
- [3] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis and S. Katti, "Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication," *The 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2010.
- [4] N. Singh, D. Gunawardena, A. Proutiere, B. Radunovic, H.V. Balan and P. Key, "Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation," *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, May 2011, pp. 94-101.
- [5] M. Jain, J. I. Choi, T. M. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, and P. Sinha, "Practical, Real-time, Full Duplex Wireless," *The 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2011.
- [6] M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, X. Zhang, and S. Barghi, "The case for antenna cancellation for scalable full-duplex wireless communications," *In Proceedings of Hotnets*, November 2011, pp. 1-17.
- [7] M. E. Knox, "Single Antenna Full Duplex Communications using a Common Carrier," in *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 2012 IEEE 13th Annual, April 2012.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวุฒิ ภูงามเงิน เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2531 ที่จังหวัดอุบลราชธานี เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบุณฑริก ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบุณฑริกวิทยาคาร และสำเร็จ การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2553 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับทุนการศึกษาจากการให้ทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG)

ขณะศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ระดับชาติ 1 ฉบับ ในงานการประชุมวิชาการ งานวิจัย และการพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI-CARD 2013) ระหว่างวันที่ 8-10 พฤษภาคม 2556 ในหัวข้อ การกำจัดสัญญาณแทรกสอดด้วย คลื่นวิทยุสำหรับระบบการสื่อสารรับส่งแบบสองทางบนช่องสัญญาณเดียวโดยใช้สายอากาศต้น เดียว และผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติ 1 ฉบับในงาน ในหัวข้อ **Digital and RF Interference Cancellation for Single-Channel Full-duplex Transceiver Using a Single Antenna.** โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก.