



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านทางการ์ดเสียงบนคอมพิวเตอร์

Implementation of an OFDM Data Transmission over Personal Computer Soundcard

นามผู้วิจัย

นางสาวพิชชาภรณ์ ชูติวิสุทธิ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วชิระ จงบุรี, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์คุสิต ธนเพทาย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านทางการ์ดเสียงบนคอมพิวเตอร์

Implementation of an OFDM Data Transmission over Personal Computer Soundcard

โดย

นางสาวพิชชาภรณ์ ชูดีวิศุทธิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิชชาภรณ์ ชุตติวิสุทธิ 2555: การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านทางการ์ดเสียงบน
คอมพิวเตอร์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร จงบุรี, Ph.D. 59 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยเดิมที่มีลักษณะคล้ายกัน โดยเป็นการ
ออกแบบระบบสื่อสารผ่านช่องสัญญาณเสียง ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานเดิมที่มีอยู่แล้ว มาใช้
เพื่อให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น

ระบบสื่อสารเดิมเป็นการส่งข้อมูลโดยการกระจายเสียงในระบบเอฟ เอ็ม ซึ่งมีใช้อยู่แล้ว
อย่างแพร่หลาย สัญญาณ OFDM ที่ใช้ในการส่งข้อมูลสร้างโดยการ์ดเสียงบนคอมพิวเตอร์เพื่อให้
มีขนาดพอดีกับช่องสัญญาณเสียงขนาด 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการวิจัยที่ได้คือ ระบบที่ออกแบบ
สามารถส่งข้อมูลซึ่งเป็นภาพโดยการกระจายเสียงในระบบเอฟเอ็มได้

การพัฒนาในงานวิจัยนี้ ทำการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูล ด้วยการเลือกวิธีการกล้ำสัญญาณ
(Modulation) แบบ QPSK แทน แบบ BPSK ที่ใช้ในงานวิจัยเดิม และพัฒนาให้ใช้งานได้บน
ระบบปฏิบัติการ Windows โดยไม่ต้องใช้โปรแกรม MATLAB งานวิจัยนี้ครอบคลุมการ
ทดสอบการส่งข้อมูลด้วยสายสัญญาณ ไม่รวมการออกอากาศในระบบเอฟเอ็ม

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pichaporn Chutivisut 2012: Implementation of an OFDM Data Transmission over Personal Computer Soundcard. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wachira Chongburee, Ph.D. 59 pages.

This research is to improve the previous similar research which designs a communication link over an audio channel. The audio band is a part of the existing infrastructure, so this is to maximize its usage.

In the previous work, the data is sent over an existing FM broadcasting system. The OFDM transmit waveform is generated by a personal computer soundcard to fit 15 kHz bandwidth of the audio channel. It is shown that images can be sent over the FM broadcasting.

The goal in this research is to increase the transmission rate by replacing BPSK used in the previous by QPSK modulation for faster transmit rate. It is developed to work on Windows without using MATLAB platform. This research covers transmission by using audio signal cable without the FM broadcasting.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผศ.ดร.คูสิต ชนเพทาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจน การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกคนที่ได้ อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสถาบันพัฒนาและวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณห้องวิจัย Wire and Radio Communications (WRC Lab.) ห้องวิจัย Biomedical Electronics System and Technology (BEST Lab.) ห้องวิจัย Kasetsart Advanced RF and ElectromagNetics (KAREN Lab.) ห้องวิจัย Remote Sensing and Data Fusion (RSDFL Lab.) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ สถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่ได้อบรมและให้กำลังใจ ข้าพเจ้ามาตลอดในทุกเรื่อง หากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

พิชชาภรณ์ ชูติวิสุทธิ์
พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	59

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลแบบต่างๆ	12



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (ASK)	7
2	การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ (FSK)	8
3	การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (PSK)	9
4	แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ BPSK	9
5	แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ QPSK	10
6	แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ 4-QAM	11
7	แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ 8-QAM	11
8	ขั้นตอนการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (FDM)	13
9	ตัวอย่างการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (FDM)	14
10	หลักการของการส่งสัญญาณที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณ (Multi-carrier modulation, MCM)	15
11	เปรียบเทียบ ความกว้างของช่องสัญญาณ ในการส่งข้อมูล ระหว่างการส่งสัญญาณแบบ OFDM และ FDM	16
12	การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย	18
13	ขั้นตอนการทำงานของการทำงานของการส่งสัญญาณด้วยวิธี OFDM	20
14	ขั้นตอนการทำงานของการทำงานของการรับสัญญาณด้วยวิธี OFDM	21
15	การเสริมไซคลิก	22
16	ค่าความถี่ของแต่ละจุดในสัญญาณในทางความถี่	23
17	ตำแหน่งของสัญญาณที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณ	24
18	ขั้นตอนการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกในช่องสัญญาณเสียง	25
19	ขั้นตอนการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในช่องสัญญาณเสียง	25
20	เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ผลิตโดย GWINSTEK รุ่น SFG-1013	27
21	ออสซิลโลสโคป ผลิตโดย GWINSTEK รุ่น GDS-1022	27
22	การวางตำแหน่งของพาหะย่อยเพื่อหลีกเลี่ยงความถี่ใกล้สัญญาณไฟตรงและความถี่ตัดขาดย่านความถี่สูง	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ดัชนีของพาหะย่อยที่ใช้ในการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว	30
24	การจัดวางตำแหน่งของสัญญาณในการมอดูเลตแบบ QPSK	31
25	การเสริมไซคลิกและหน่วงเวลาของสัญญาณที่สร้างขึ้นในโดเมนเวลา	34
26	สัญลักษณ์ที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณของภาคส่ง	34
27	ลักษณะของกรอบสัญญาณ	35
28	กระบวนการหาความสัมพันธ์ของสัญญาณเพื่อหาจุดเริ่มต้นของสัญญาณ	36
29	ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัญญาณแสดงตำแหน่งเริ่มต้นของกรอบสัญญาณ	36
30	การเชื่อมต่อในการทดสอบรับส่งสัญญาณแบบใช้สาย	38
31	ขั้นตอนในการเขียน โปรแกรมส่งข้อมูลของภาคส่ง	39
32	ขั้นตอนในการเขียน โปรแกรมรับข้อมูลของภาครับ	40
33	กรอบสัญญาณสัญญาณข้อมูลจำนวน 32 สัญลักษณ์ ที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่มมพีเอส 45 องศา	41
34	กรอบสัญญาณสัญญาณข้อมูลจำนวน 32 สัญลักษณ์ ที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่มมพีเอส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา	41
35	สัญญาณคลื่นไซน์ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ในทางเวลาและทางความถี่แสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป	42
36	สัญญาณคลื่นไซน์ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ในทางเวลาและทางความถี่แสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป	43
37	สัญญาณคลื่นไซน์ที่สร้างจากความถี่ผสม 1 กับ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ในทางเวลาและทางความถี่แสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป	43
38	สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาคส่ง และออสซิลโลสโคป	44
39	สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาคส่ง และออสซิลโลสโคป	44
40	สัญญาณคลื่นไซน์ที่ใช้เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้เทียบจังหวะสัญญาณ แสดงด้วยโปรแกรมภาคส่ง และออสซิลโลสโคป	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ	46
42	สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 2 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ	46
43	สัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ	47
44	สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ	47
45	สัญญาณคลื่นรูปสามเหลี่ยมความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ	48
46	สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ที่ภาคส่งส่งออกมา แสดงด้วยโปรแกรมของภาคส่ง และออสซิลโลสโคป	48
47	สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ที่ภาครับรับได้	49
48	ผลลัพธ์จากการเทียบจังหวะสัญญาณเพื่อหาจุดเริ่มต้นของกรอบสัญญาณ ข้อมูลทางฝั่งภาครับ	49
49	กรอบของสัญญาณข้อมูลจำนวน 1 สัญลัักษณ์ ที่ภาครับรับได้	50
50	มูมเฟสที่ได้รับจากภาครับของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3 ถึง 35 เมื่อส่งค่ามูมเฟส 45 องศา	50
51	กราฟระหว่างค่ามูมเฟสที่เลื่อนกับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3 ถึง 35	51
52	ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมูมเฟส เมื่อส่งค่ามูมเฟส 45 องศาให้กับสัญญาณพาหะย่อย ดัชนีที่ 3 และ 35	51
53	มูมเฟสที่ได้รับจากภาครับของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35 เมื่อส่งค่ามูมเฟส 45 องศา	52
54	ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมูมเฟส เมื่อส่งค่ามูมเฟส 45 องศาให้กับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35	52
55	มูมเฟสที่เกิดจากค่าที่ได้รับจากภาครับของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35 เมื่อส่งค่ามูมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา	53
56	ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมูมเฟส เมื่อส่งค่ามูมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา ให้กับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35	53
57	ตัวเลขและสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านกระบวนการรับของภาครับแล้ว	54

การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านทางการ์ดเสียงบนคอมพิวเตอร์

Implementation of an OFDM Data Transmission over Personal Computer Soundcard

คำนำ

การสื่อสารเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นคู่มาับมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์ เป็นสัตว์สังคม ต้องอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม โดยมนุษย์ใช้ภาษาเป็นสื่อในการส่งข้อมูล แลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน โดยมีอากาศเป็นตัวกลาง ซึ่งในภาษาที่มนุษย์ใช้สื่อสารกันนั้น จะต้องมีข้อตกลงกันว่าแต่ละสัญลักษณ์ หรือคำพูด ใช้แทนหรือหมายถึงสิ่งใด มนุษย์ได้คิดค้นวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกันมาตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว ตัวอย่างเช่น การใช้สัญญาณควันไฟของชาวอินเดียนแดง หรือการใช้ม้าเร็วในการส่งสาร จนกระทั่งพัฒนามาเป็นการใช้โทรเลข วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ และอินเทอร์เน็ต ตัวอย่างในปัจจุบัน

การสื่อสารข้อมูล เกิดจากคำสองคำ คือ การสื่อสาร (Communication) ซึ่งหมายถึง การส่งสารหรือเนื้อหาจากผู้ส่งไปยังอีกผู้รับ และคำว่าข้อมูล (Data) หมายถึง ข้อเท็จจริง ซึ่งในที่นี้หมายถึงข้อมูลที่เกิดขึ้นจากเครื่องคอมพิวเตอร์ในรูปตัวเลข 0 หรือ 1 ต่อเนื่องกันไป ซึ่งเป็น ภาษาที่เครื่องคอมพิวเตอร์เข้าใจ ดังนั้น การสื่อสารข้อมูล จึงหมายถึง การส่งเนื้อหาที่อยู่ในรูปตัวเลขฐานสองที่เกิดจากอุปกรณ์หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสาร ตลอดจนแบ่งปันการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เทคโนโลยีการสื่อสาร สมัยก่อนเริ่มจากการสื่อสารข้อมูลเสียงอย่างง่าย และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมีความก้าวหน้า ในหลายรูปแบบ การสื่อสารที่ใช้สัญญาณไฟฟ้ามีทั้ง แบบแอนะล็อก เช่น การกระจายเสียงวิทยุ และแบบดิจิทัล เช่น การส่งรหัสมอด และแม้ว่าแนวโน้มของการสื่อสารในอนาคตจะเป็นระบบดิจิทัลทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ระบบแอนะล็อก เป็นโครงสร้างหลักของการสื่อสารมาอย่างยาวนานหลายทศวรรษ การสื่อสารข้อมูลดิจิทัลผ่านทางช่องทางการสื่อสารแบบแอนะล็อก ซึ่งเป็น โครงสร้าง ของการสื่อสารแบบ เดิม จึงเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์สูงสุด เมื่อการสื่อสารผนวกกับความก้าวหน้าทางสารสนเทศและคอมพิวเตอร์แล้ว นำไปสู่นวัตกรรมการสื่อสารยุคใหม่

การส่งสัญญาณข้อมูลดิจิทัลผ่านช่องทางสื่อสารแบบแอนะล็อกที่เราคุ้นเคยกัน เช่น การส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์ผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์สาธารณะ เครือข่ายโทรศัพท์นั้นได้รับการออกแบบมาเพื่อทำการสลับสวิตช์ และส่งสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งเป็นย่านความถี่ของเสียงหรือประมาณ 300-3400 เฮิรตซ์ โดยมีการส่งข้อมูล ภาพ วิดีโอไปพร้อมกับเสียงด้วยความเร็ว 64 -128 กิโลบิตต่อวินาที กับโมเด็ม (MODEM: MOdulator-DEModulator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกย่านความถี่เสียง โดยมีความเร็ว 56 กิโลบิตซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ในเวลาอันรวดเร็ว ต่อมาระบบเอดีเอสแอล (ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line) ได้รับความนิยมมากกว่า เพราะ มีสมรรถนะทางความเร็วที่ดีกว่าแบบแรกอย่างเห็นได้ชัด การประสบผลสำเร็จถ้าไม่ด้วยความ เรียบง่าย ก็ต้องมาพร้อมกับสมรรถนะที่เหนือชั้น ประสิทธิภาพของงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของความเรียบง่ายมากกว่าด้านสมรรถนะ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยเดิม ซึ่งเป็นการออกแบบระบบสื่อสารเพื่อให้สามารถใช้ โครงสร้างพื้นฐานเดิมที่มีอยู่แล้ว มาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ที่มากยิ่งขึ้น โดยคาดหวังว่าจะทำให้ นำไปใช้ได้จริงในเวลาอันรวดเร็ว ดังนั้น ระบบสื่อสาร โดยการ ออกอากาศผ่านคลื่นวิทยุเอฟเอ็มจึงเป็นการตอบ โจทย์ของปัญหาดังกล่าว วิทยุกระจายเสียงในระบบ เอฟเอ็ม ซึ่งมีใช้อยู่อย่างแพร่หลาย ได้นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้เพื่อส่งข้อมูลได้ โดยพยายาม ลดความจำเป็นในการสร้าง อุปกรณ์ขึ้นมาใหม่ ระบบนี้ผู้ใช้สามารถใช้เครื่องรับวิทยุเอฟเอ็มทั่วไป เพื่อรับข้อมูลที่ส่งมาเป็นลักษณะสัญญาณเสียง แล้วเปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณข้อมูล โดยให้คอมพิวเตอร์แสดงผลของข้อมูล เช่น ภาพวิดีโอรูปภาพ หรือข้อมูลอักขระต่าง ๆ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วย 4 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการตรวจสอบเอกสาร ซึ่งบรรยายเนื้อหาเกี่ยวกับเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล สำหรับคลื่นพาห้ที่เป็นสัญญาณไซน์ การรวมสัญญาณโดยใช้สัญญาณพาหะหลายตัว การสร้างสัญญาณ OFDM หลักการทำงานของการ์ดเสียง

ในส่วนที่สองจะเป็นเรื่องอุปกรณ์และวิธีการ ซึ่งกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนวิธีการพัฒนาและทดสอบ การออกแบบการส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ทางช่องสัญญาณเสียง การทดสอบโปรแกรม ภาคส่ง การทดสอบโปรแกรม ภาครับ การทดสอบการรับส่ง สัญญาณเบื้องต้น โดยใช้สายสัญญาณเสียง

ในส่วนที่สามเป็นผลและวิจารณ์ จะนำเสนอผลจากการทดลอง ของการทดสอบโปรแกรมภาคส่ง การทดสอบโปรแกรมภาครับ การทดสอบการรับส่ง สัญญาณเบื้องต้น โดยใช้สายสัญญาณเสียง

ในส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปและข้อเสนอแนะ โดยสรุปสาระสำคัญของการทดลองและผลการทดลองที่ได้ พร้อมทั้งกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา พร้อมทั้งการนำผลการวิจัยไปปรับใช้หรือนำไปพัฒนาแนวคิดในขั้นต่อไป



วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ ปรับปรุงและพัฒนาส่งข้อมูล ผ่านทางช่องสัญญาณเสียงจากระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว ให้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยโปรแกรม MATLAB และมีอัตราข้อมูลที่สูงขึ้น โดยมีขอบเขตการดำเนินงานดังนี้

1. การเพิ่มอัตราส่งข้อมูลให้เป็นสองเท่า
2. การให้สามารถใช้งานได้บนระบบปฏิบัติการ Windows แทนโปรแกรม MATLAB

การตรวจเอกสาร

แม้ว่าแนวโน้มการสื่อสารในอนาคตอันใกล้อาจกลายเป็นระบบดิจิทัลทั้งหมด แต่ระบบแอนะล็อกเป็นโครงสร้างหลักของการสื่อสารมาอย่างยาวนานหลายทศวรรษ การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการส่งข้อมูลดิจิทัลผ่านสื่อกลางที่เป็นแอนะล็อก ซึ่งเป็นการรวมกันของการสื่อสารทั้งสองแบบก็ มีมาเป็นเวลานานแล้วเช่นกัน

Casas *et al.* (1991) ได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับเรื่องนี้ โดยได้อธิบายถึงประสิทธิภาพการทำงานของ การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านทางคลื่นวิทยุซึ่งมีลักษณะการจางหายแบบ Rayleigh-fading การส่งข้อมูลด้วยวิธีนี้เป็น การลดอัตราความผิดพลาดบิต (BER) โดยการเฉลี่ยการลดทอนของสัญญาณ และในปีต่อมา ได้ทำการศึกษาต่อในเรื่องของการแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลด้วยวิธี Forward Error Correction (FEC) และวิธีการ Switching Diversity ได้ผลสรุปโดยรวมว่า การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบ Rayleigh-fading จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีการเพิ่ม Switching Diversity เพราะวิธี OFDM สามารถทำการหาค่าเฉลี่ยภาวะชั่วคราวของสัญญาณซึ่งเกิดจากการสลับสายอากาศ และวิธี FEC สามารถทำให้คาดเดาความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นไว้ล่วงหน้าได้

ในปีต่อมา Wittneben (1992) ได้คิดค้นเทคนิคในการแยกสัญญาณออกเป็นแถบความถี่ฐาน (baseband) เพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อส่งข้อมูลผ่านระบบเอฟเอ็มซึ่งมีใช้อยู่แล้ว โดยมีความกว้างของช่องสัญญาณที่ได้รับมากกว่าความกว้างของช่องสัญญาณที่ใช้ส่งจริง ทำให้ประสิทธิภาพลดลง เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลโดยการลดข้อผิดพลาดดังกล่าว โดยมีตัวกรอง (filter) ทำการประมาณสัญญาณรบกวน ที่เอาที่พูดเป็นสัญญาณรบกวนที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณพหุกับกำลังงานของสัญญาณรบกวน (CNR)

จากปริญาณิพนธ์ของพรทิพย์ (2549) ได้ศึกษาการส่งข้อมูลผ่านการออกอากาศแบบเอฟเอ็ม โดยได้ออกแบบโมเด็มที่สามารถทำงานได้ที่ 4800 บิตต่อวินาที เพื่อนำไปใช้ส่งข้อมูลและเสียงพร้อมกันผ่านระบบออกอากาศเอฟเอ็ม โดยใช้การกล้ำสัญญาณแบบ FSK ซึ่งสามารถประดิษฐ์ได้ง่าย ราคาถูก และสามารถใช้งานได้กับเครื่องรับวิทยุเอฟเอ็มทั่วไป พบว่าสามารถ ส่งข้อมูลอักษรจากคอมพิวเตอร์ภาคส่งไปยังภาครับได้

ในปีต่อมา กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (MICT) ได้สนับสนุนให้พัฒนาระบบทั้งซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ เพื่อส่งภาพถ่ายดาวเทียม ในลักษณะ การส่งภาพแบบ Slow Scan TV (Aarssen, 1996) โดยผ่านทางระบบเอฟเอ็มซึ่งมีหลักการทำงานตามปริยฐานิพนธ์ข้างต้น หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาต่อไป โดยได้นำวิธีการ กล้าสัญญาณ แบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) (Dasrath, 2002) ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยอาศัยหลักการของการทำ Fast Fourier Transform (FFT) และยังมีการเพิ่มการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding) โดยใช้การเข้ารหัส Golay (23, 12) ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสม (Morelos-Zaragoza, 2002) โปรแกรมประยุกต์มีความเร็วขนาด 14.4 กิโลบิตต่อวินาที สามารถส่งภาพและเสียงได้ ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการเปลี่ยนวิทยุเอฟเอ็มให้เป็นสถานีโทรทัศน์ขนาดเล็กได้

ในการวิจัยนี้จะมีการพัฒนาขั้นต่อไป โดยจะนำวิธีการ การกล้าสัญญาณ แบบ Quadrature phase-shift keying (QPSK) (Turbo blogsite, 2010) เพื่อเพิ่มอัตราในการส่ง ข้อมูล โดยที่ไม่ต้องมีการเพิ่มแบนด์วิดท์ ทั้งนี้จะพัฒนาบนระบบปฏิบัติการโดยตรง ทำให้คนทั่วไปสามารถใช้งานได้ง่าย และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดกับงานในลักษณะที่หลากหลาย และเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตประจำวันทั่วไป

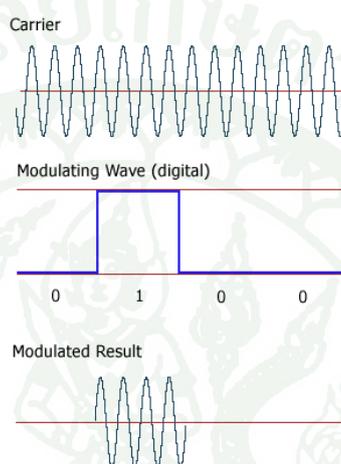
1. เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล (Digital Modulation) สำหรับคลื่นพาห์ที่เป็นสัญญาณไซน์

การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลเข้ากับคลื่นพาห์ ที่เป็นสัญญาณไซน์นั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณ ดิจิทัลเหล่านั้นสามารถส่งผ่านตัวกลางที่ ออกแบบมาสำหรับ สัญญาณแบบแอนะล็อกได้ เช่น โครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน โมโครเวฟ เป็นต้น การมอดูเลตที่ใช้กันทั่วไปได้แก่

- 1.1 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying, ASK)
- 1.2 การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ (Frequency Shift Keying, FSK)
- 1.3 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (Phase Shift Keying, PSK)
- 1.4 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดและเฟส (Quadrature carrier Amplitude Modulation, QAM)

1.1 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude shift keying, ASK)

การมอดูเลตวิธีนี้ ความถี่ของคลื่นพาห้ ซึ่งทำหน้าที่นำสัญญาณ แอนะล็อกผ่านตัวกลางสื่อสารนั้นจะคงที่ ลักษณะของสัญญาณ ที่มอดูเลตนั้น เมื่อค่าของบิตของสัญญาณข้อมูลดิจิทัลมีค่าเป็น 1 ขนาดของคลื่นพาห้จะสูงขึ้นกว่าปกติ และเมื่อบิตมีค่าเป็น 0 ขนาดของคลื่นพาห้จะต่ำลงกว่าปกติ ดังภาพที่ 1



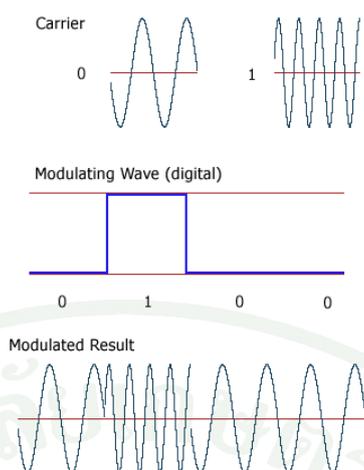
ภาพที่ 1 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (ASK)

ที่มา: Cpe.kmutt.ac.th (2007)

การมอดูเลต เชิงเลขทางแอมพลิจูด มักจะไม่ค่อยได้รับความนิยม เพราะจะถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย (ชนเทพ, 2552)

1.2 การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ (Frequency Shift Keying, FSK)

ในการมอดูเลต เชิงเลขทางความถี่ ขนาดของคลื่นพาห้จะคงที่ แต่ความถี่ ของคลื่นพาห้จะมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อค่าของบิตของสัญญาณข้อมูลดิจิทัล มีค่าเป็น 1 ความถี่ของคลื่นพาห้จะสูงกว่าปกติและเมื่อบิตมีค่าเป็น 0 ความถี่ของคลื่นพาห้ก็จะต่ำกว่าปกติ ดังภาพที่ 2



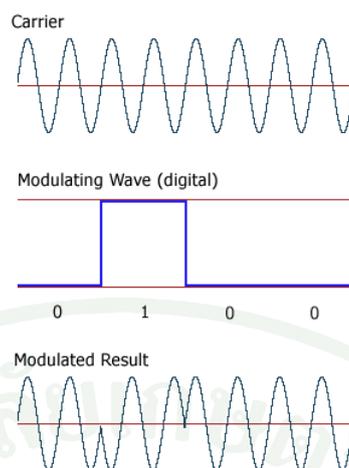
ภาพที่ 2 การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ (FSK)

ที่มา: Wiley (2010)

1.3 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (Phase Shift Keying, PSK)

หลักการของการมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส คือ แอมพลิจูดและความถี่ของคลื่นพาห้จะคงที่ แต่เฟสของคลื่นพาห้จะมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของบิตจาก 1 ไปเป็น 0 หรือเปลี่ยนจาก 0 ไปเป็น 1 เฟสของคลื่นจะเลื่อน (Shift) ไป 180 องศาด้วย ดังภาพที่ 3

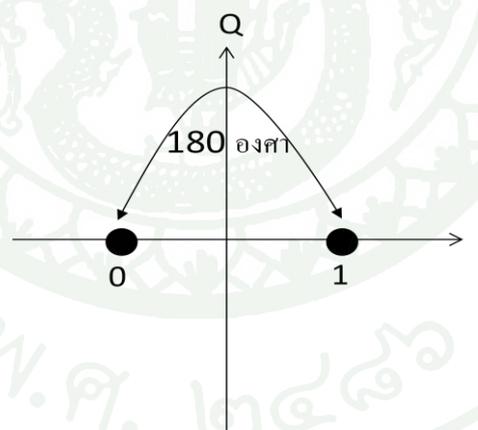
หลักการของPhase Keying (PSK) คือ ค่าของขนาดและความถี่ของคลื่นพาห้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่ที่เปลี่ยนคือ เฟสของสัญญาณกล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของบิตจาก 1 ไปเป็น 0 หรือเปลี่ยนจาก 0 ไปเป็น 1 เฟสของคลื่นจะเปลี่ยน (Shift) ไป 180 องศาด้วย



ภาพที่ 3 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (PSK)

ที่มา: Wiley (2010)

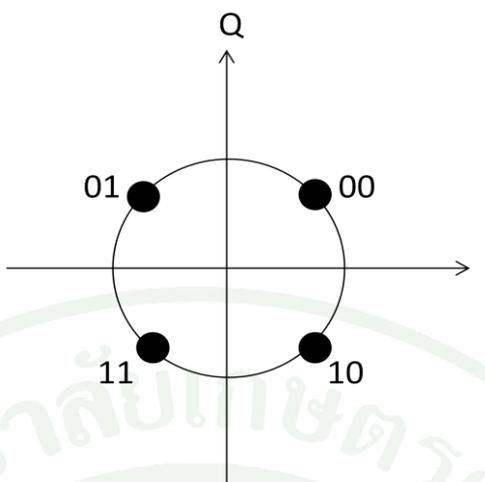
การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส สามารถทำได้ หลายแบบ เช่น แบบ 2 เฟส เรียกว่า Binary Phase Shift Keying (BPSK) โดยเฟสทั้งสองจะถูกแบ่งด้วยมุม 180 องศา ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ BPSK

อีกแบบหนึ่งที่นิยมทำเช่นกัน คือ แบบ 4 เฟส เรียกว่า Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) โดยเฟสทั้งสี่จะถูกแบ่งด้วยมุม 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา ดังภาพที่

5

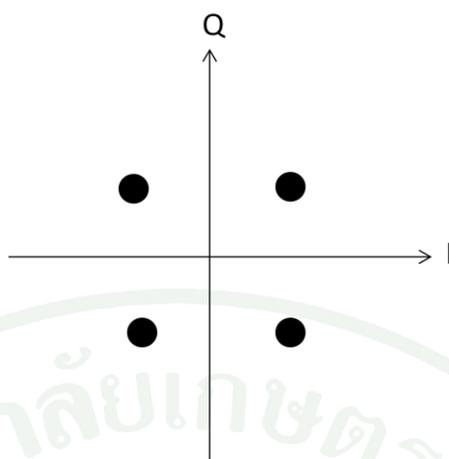


ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ QPSK

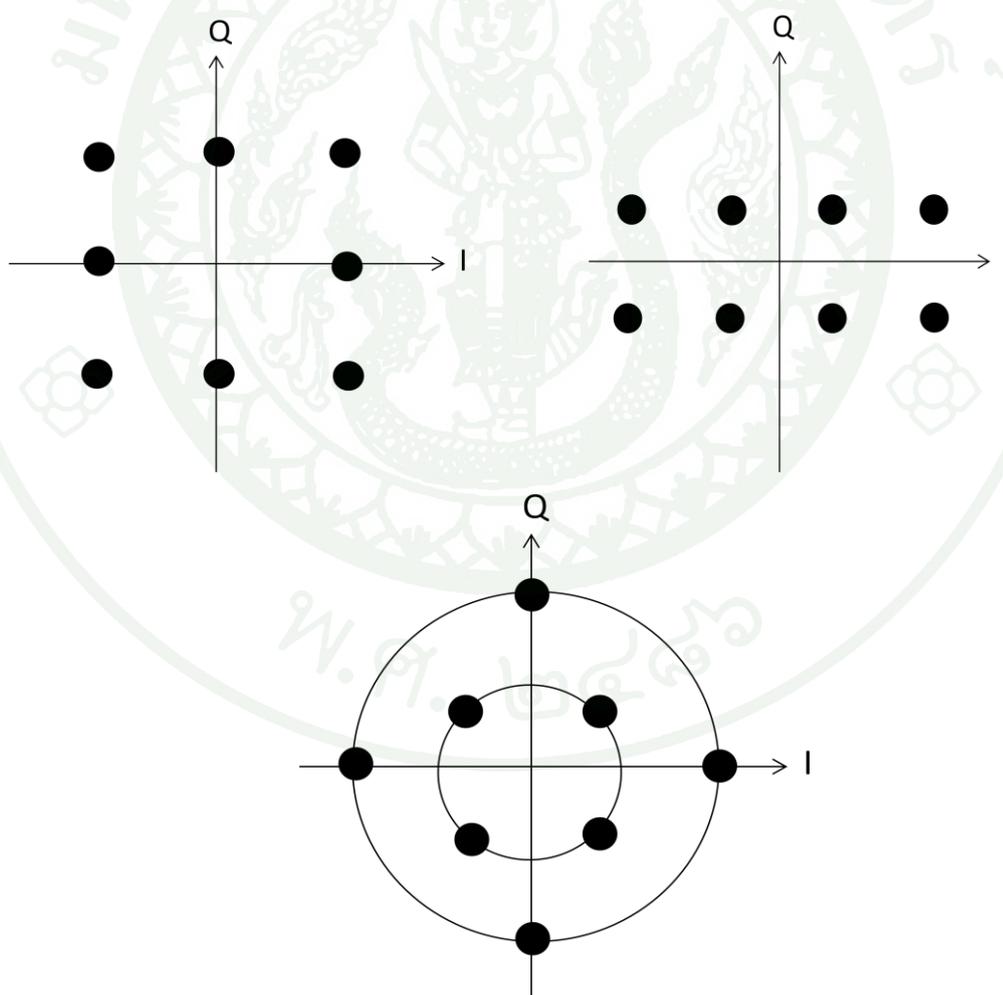
ในการมอดูเลตเพื่อเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลดิจิทัล ให้เป็นสัญญาณ แอนะ ล็อกทั้ง 3 แบบดังที่กล่าวมา ข้างต้น การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส จะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นน้อยที่สุด ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุด แต่วงจรการทำงานจะซับซ้อนกว่าและราคาอุปกรณ์แพงกว่า

1.4 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดและเฟส (Quadrature carrier Amplitude Modulation, QAM)

การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดและเฟส เป็นการนำเอาการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดและการ มอดูเลตเชิงเลข ทางเฟสมารวมกัน โดยการเปลี่ยนทั้งเฟสและความสูงของสัญญาณ โดยกำหนดให้แอมพลิจูดของสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง (High, H) และระดับต่ำ (Low, L) และกำหนดการแบ่งเฟส (Φ) สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น 4 เฟส เรียกว่า 4-QAM ได้แก่ 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา หรือ Φ 1-4 ดังภาพที่ 9 และ 8 เฟส เรียกว่า 8-QAM ได้แก่ 0 องศา 45 องศา 90 องศา 135 องศา 180 องศา 225 องศา 270 องศา และ 315 องศา หรือ Φ 1-8 ดังภาพที่ 10 เช่นเดียวกับการมอดูเลตเชิงเฟส (PM)



ภาพที่ 6 แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ 4-QAM



ภาพที่ 7 แผนภาพแสดงการกระจายเฟสของ 8-QAM

จากเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลแบบต่างๆ

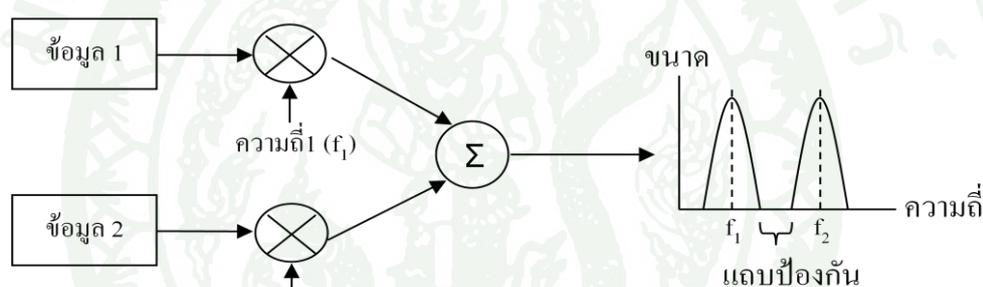
การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล	ข้อดี	ข้อเสีย
ASK	สามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราบิตสูงไปในช่องสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์แคบได้	ถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย
FSK	มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นน้อยกว่าการมอดูเลตแบบ ASK	การใช้หลายความถี่ในการแทนสัญลักษณ์ข้อมูลทำให้ใช้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น จึงนิยมใช้กันในการส่งสัญญาณที่มีอัตราบิตไม่สูงนัก
PSK	มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นน้อยที่สุด ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุด และ ไม่ทำให้ แบนด์ วิดท์ กว้างมากขึ้นเมื่อ เพิ่มระดับของ เฟส	วงจรการทำงาน ซับซ้อน ใช้ อุปกรณ์ ราคาแพง และ เมื่อเพิ่มระดับของเฟส จะทำให้ความแตกต างของแ ต่ ละส ัญลักษณ์ ข้อมูล ลดลง โอกาสที่จะเกิด ความผิดพลาดใน การรับและ ตีความข้อมูลผิดจะสูงขึ้น
QAM	มีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถส่งได้หลายสัญลักษณ์ ข้อมูลที่แตกต่างกันในคราว เดียว เพียงเปลี่ยนแอมพลิจูด และเฟส	เนื่องจากการส่งหลายสัญลักษณ์ ข้อมูลได้ในคราวเดียวกันทำให้ แ ต่ ละส ัญลักษณ์ข้อมูล มีความแตกต างกันน อยลง อาจทำให เกิดการผิดพลาดในการรับและ ตีความข้อมูล

ที่มา: ทรายดล (2547)

2. การรวมสัญญาณโดยใช้สัญญาณพาหะหลายตัว

การรวมสัญญาณ (Multiplexing) เป็น กระบวนการทางเทคนิค ที่สร้างขึ้นมานำมาใช้ในการส่งข้อมูลหลายตัวไปพร้อมกันในช่องสัญญาณเดียวกัน ซึ่งการรวมสัญญาณดังกล่าวมีหลายประเภท การรวมสัญญาณที่นำมาใช้งานวิจัยนี้เป็นการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่

ในการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing, FDM) เป็นเทคโนโลยีในการนำสัญญาณมากกว่าหนึ่งสัญญาณมาส่งออกไปพร้อมๆกัน โดยการแบ่งความถี่ของช่องสัญญาณออกเป็นช่องความถี่หรือเรียกว่าช่องสัญญาณย่อย โดยแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะถูกแบ่งด้วยแถบป้องกัน (guard band) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแทรกแซงสัญญาณระหว่างกัน ดังภาพที่ 8



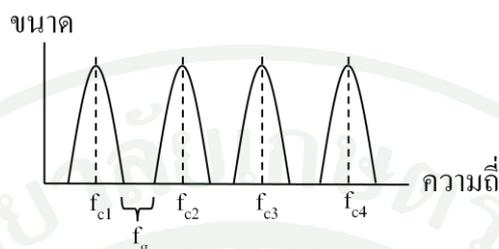
ภาพที่ 8 ขั้นตอนการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (FDM)

ตัวอย่างของการส่งสัญญาณแบบนี้คือ การกระจายสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ ซึ่งแต่ละสถานีจะส่งสัญญาณในความถี่หรือช่องสัญญาณตามที่ได้ขออนุญาตไว้

ถ้ากำหนดให้ช่องสัญญาณมีความกว้างเท่ากับค่าหนึ่ง สามารถส่งข้อมูลโดยใช้สัญญาณพาหะเดี่ยว (single carrier) หรือใช้สัญญาณพาหะหลายตัว (multi-carrier) ได้โดยที่การส่งข้อมูลแบบใช้สัญญาณพาหะเดี่ยว ถ้าจะส่งข้อมูลหลายๆตัวต้องใช้ในการรวมสัญญาณก่อนทำการส่ง แต่หากส่งข้อมูลแบบใช้สัญญาณพาหะหลายตัว จะต้องมีการใส่แถบป้องกัน อย่างไรก็ตาม การใส่แถบป้องกันจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองความกว้างของช่องสัญญาณ ดังตัวอย่างเช่น

กำหนดให้ f_c คือความถี่ของสัญญาณพาหะย่อยแต่ละตัว มีค่าเท่ากับ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

f_g คือความกว้างของแถบป้องกัน มีค่าเท่ากับ 5 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (FDM)

จากภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่า มีสัญญาณ ที่ต้องการส่งทั้งหมด 4 ชุด และมีแถบป้องกัน ทั้งหมด 3 ช่วง สามารถหาความกว้างของช่องสัญญาณได้ดังนี้

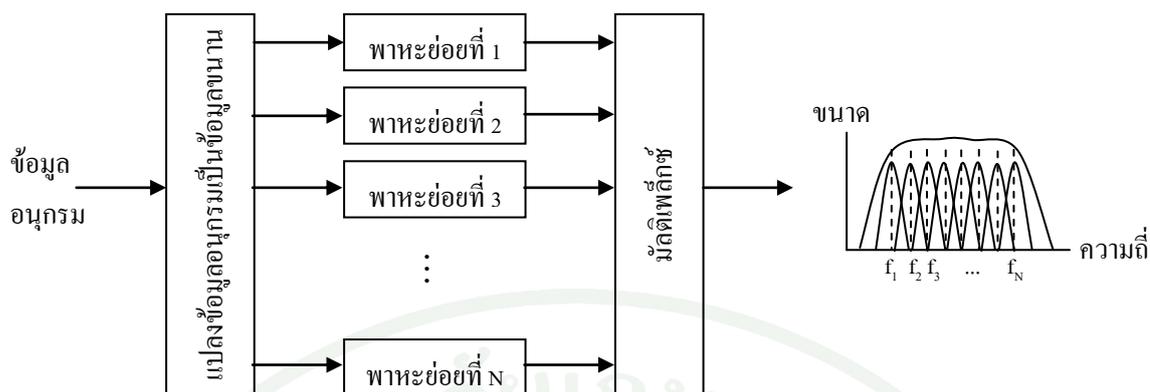
$$f_c \text{ ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ } 30 \text{ กิโลเฮิร์ตซ์} \times 4 = 120 \text{ กิโลเฮิร์ตซ์}$$

$$f_g \text{ ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ } 5 \text{ กิโลเฮิร์ตซ์} \times 3 = 15 \text{ กิโลเฮิร์ตซ์}$$

ดังนั้นการส่ง สัญญาณ โดยการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่นี้ ต้องใช้ความกว้างของ ช่องสัญญาณเท่ากับ $120 + 15 = 135$ กิโลเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่า ต้องใช้ความถี่ถึง 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งคิด เป็นร้อยละ 11.11 ของความกว้างของช่องสัญญาณทั้งหมด เพื่อใช้เป็นแถบป้องกัน โดยที่ไม่ สามารถใช้ความถี่ในส่วนนี้ส่งสัญญาณได้เลย

ดังนั้นการเลือกใช้สัญญาณ พาหะย่อยที่ใช้ในการส่ง สัญญาณ ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Orthogonal) จึงเป็นวิธีที่ดีกว่าการส่งสัญญาณแบบการรวมสัญญาณแบบแบ่งความถี่โดยทั่วไป

การ รวมสัญญาณ โดยการแบ่งความถี่ที่สัญญาณพาหะตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) เป็นการพัฒนาแนวคิดของ การรวม สัญญาณแบบแบ่งความถี่ เป็นเทคนิคการส่งสัญญาณ ที่ใช้สัญญาณพาหะหลาย ตัว (Multi-carrier modulation, MCM) ซึ่งเป็นการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นหลาย ๆ ความถี่ โดยแต่ละความถี่ที่แบ่ง นั้นอิสระจากกัน และเป็นรูปแบบของการสื่อสารโดยการส่งข้อมูลแบบขนาน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 หลักการของการส่งสัญญาณที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณ (Multi-carrier modulation, MCM)

2.1 ความตั้งฉากซึ่งกันและกันใน OFDM

ความตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Orthogonality) คือ การเกี่ยวข้งกันเป็นมุมฉากหรือมีส่วนประกอบเป็นมุมฉาก ดังนั้นสัญญาณที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน หมายความว่า สถานะของสัญญาณเป็นอิสระจากกัน เช่น การมอดูเลตสัญญาณทางความถี่ (FM) และทางขนาด (AM) บนสัญญาณพาหะเดียวกัน (ในระบบ FM สเตอริโอ) สามารถแยกสัญญาณทั้งสองออกจากกัน โดยปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกัน ซึ่งเราสามารถเรียกสัญญาณทั้งสองนี้ว่า “ความตั้งฉากซึ่งกันและกัน” ซึ่งคุณสมบัติของความตั้งฉากซึ่งกันและกัน สามารถพิจารณาได้ ดังสมการที่ 1

$$\int_0^T S_i(t)S_j(t)dt = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } i \neq j \\ \text{ค่าคงที่} & \text{เมื่อ } i = j \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ T คือ คาบของสัญญาณ
 $S_i(t), S_j(t)$ คือ ฟังก์ชันทางเวลาของสัญญาณทั้งสอง

จากสมการ เมื่ออินทิเกรตผลคูณของสองสัญญาณ ($S_i(t), S_j(t)$) แล้วได้ค่าเป็นศูนย์ หรืออินทิเกรตผลคูณของสัญญาณเดียวกัน น, $S_i(t)=S_j(t)$ แล้วได้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง สามารถบอกได้ว่า สัญญาณทั้งสองมีความเป็นอิสระต่อกัน หรือสามารถพิจารณาเงื่อนไขการตั้งฉากของความถี่สัญญาณรูปไปชนนี้ได้ดังสมการที่ 2

$$\int_0^{T_{\text{symbol}}} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \times \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) dt = 0 \quad (2)$$

โดยที่ T_{symbol} คือ คาบของสัญลักษณ์

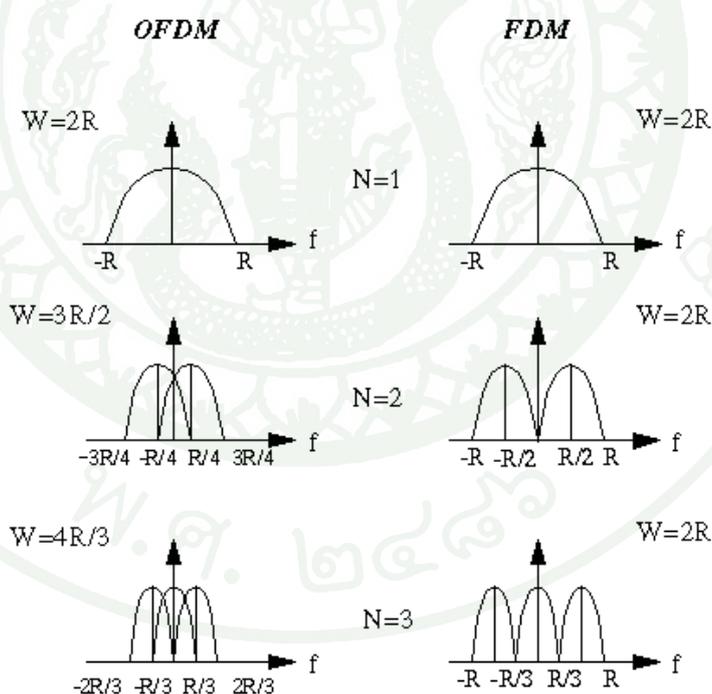
f_1, f_2 คือ ความถี่ของสัญญาณทั้งสอง ซึ่ง $f_1 = mf_0, f_2 = nf_0, f_0 = \frac{1}{T_{\text{symbol}}}$

ภายใต้เงื่อนไข m, n เป็นจำนวนเต็มบวก และ m ไม่เท่ากับ n

θ_1, θ_2 คือ มุมเฟสเริ่มต้นของสัญญาณทั้งสอง

จากสมการที่ 2 พบว่าค่าของมุมเฟสเริ่มต้นของสัญญาณทั้งสองไม่มีผลต่อสมการขึ้นกับค่าความถี่ของสัญญาณทั้งสองเท่านั้น

การส่งสัญญาณด้วยวิธี OFDM มีข้อได้เปรียบกว่าการส่งสัญญาณด้วยวิธี FDM ในแง่ของการใช้ความกว้างของช่องสัญญาณในการส่งข้อมูล โดยสามารถเปรียบเทียบได้ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบความกว้างของช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลระหว่างการส่งสัญญาณแบบ OFDM และ FDM

ที่มา: Tml.tkk.fi (1999)

โดยที่	W	คือ ความกว้างของช่องสัญญาณ (bandwidth)
	R	คือ อัตราบิตข้อมูล (bit rate)
	N	คือ จำนวนสัญญาณพาหะย่อยในการส่งข้อมูล

จากภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่า สำหรับการส่งข้อมูลที่ใช้สัญญาณพาหะย่อยจำนวนเท่ากัน การส่งสัญญาณแบบ OFDM จะกินความกว้างของช่องสัญญาณน้อยกว่าการส่งสัญญาณแบบ FDM สามารถสรุปได้ว่า สัญญาณ OFDM จะใช้ความกว้างของช่องสัญญาณ น้อยลงเมื่อมีการใช้สัญญาณพาหะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อพิจารณาในเชิงความถี่แล้ว พบว่าความหนาแน่น สเปกตรัมพลังงาน (Power Spectrum Density, PSD) ของแต่ละช่องสัญญาณจะมีการซ้อนทับกัน แต่ก็ไม่เกิดปัญหาการรบกวนกันของสัญญาณอื่นๆแต่อย่างใด เพราะสัญญาณแต่ละตัวมีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกันนั่นเอง ซึ่งลักษณะเด่นนี้ทำให้การส่งสัญญาณแบบ OFDM สามารถใช้สัญญาณพาหะย่อยที่มีความถี่ใกล้กัน ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ในทางทฤษฎี

ดังนั้นในการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ที่สัญญาณพาหะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้สามารถใช้สัญญาณพาหะย่อยที่มีความถี่ใกล้กันได้แม้ว่าสเปกตรัมของสัญญาณจะมีการซ้อนทับกันก็ตาม ด้วยเหตุนี้ หากจะเปรียบเทียบ ความกว้างของช่องสัญญาณ (bandwidth) ระหว่างใช้การรวมสัญญาณ โดยการแบ่งความถี่ (FDM) และใช้การรวมสัญญาณ โดยการแบ่งความถี่ที่สัญญาณพาหะตั้งฉากซึ่งกันและกัน (OFDM) ซึ่งใช้จำนวนของสัญญาณพาหะย่อยและอัตรา บิตข้อมูล (bit rate) ที่เท่ากัน จะพบว่าการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ที่สัญญาณพาหะตั้งฉากซึ่งกันและกัน (OFDM) จะใช้ความกว้างของช่องสัญญาณ ที่น้อยกว่า สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของสัญญาณพาหะย่อยกับความกว้างของช่องสัญญาณ ระหว่างใช้การส่งสัญญาณแบบ FDM และแบบ OFDM ได้ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$W_{\text{FDM}} = 2R \quad (3)$$

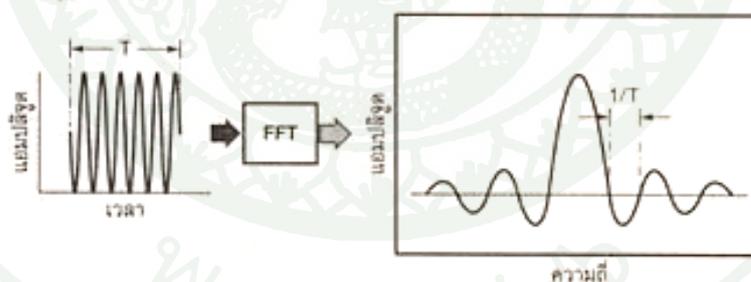
$$W_{\text{OFDM}} = (N+1)R/N \quad (4)$$

โดยที่	W	คือ ความกว้างของช่องสัญญาณ (bandwidth)
	R	คือ อัตราบิตข้อมูล (bit rate)
	N	คือ จำนวนสัญญาณพาหะย่อยในการส่งข้อมูล

จากสมการที่ 4 เมื่อใช้จำนวนพาหะจำนวนมาก จะทำให้ความกว้างของช่องสัญญาณลดลงจนกระทั่งเท่ากับ อัตราการส่งข้อมูล ซึ่งหมายถึงจะสามารถส่งข้อมูลได้โดยใช้เต็มความกว้างของช่องสัญญาณ

2.2 การแปลงฟูรีเยร์และการแปลงกลับฟูรีเยร์ของ OFDM

การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) ใช้สำหรับแยกสัญญาณออกเป็น ส่วนประกอบทางความถี่ ซึ่งใช้แก้ปัญหาได้หลากหลาย ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางความถี่ ของสัญญาณในระบบนั้นๆ การจัดการกับสัญญาณ ดิจิทัลในระบบ OFDM เป็นวิธีการหนึ่งในการ ประยุกต์ใช้งานของ การแปลงฟูรีเยร์ การแปลงฟูรีเยร์เป็นการแปลงสัญญาณจากแกนเวลาเป็น สัญญาณในแกนความถี่ ในทางกลับกัน ส่วนการแปลงกลับฟูรีเยร์ (Inverse Fourier Transform) เป็นกระบวนการที่ตรงข้ามกัน คือเป็นการแปลงสัญญาณจากแกนความถี่เป็นสัญญาณในแกนเวลา ส่วนการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) นั้น เป็นการทำให้การคำนวณการ แปลงฟูรีเยร์และการแปลงกลับฟูรีเยร์ทำได้รวดเร็วขึ้น เช่น สัญญาณ ไซน์จำกัดช่วงเวลา สามารถ แปลงเป็น สัญญาณซิงค์ (Sinc Pulse) โดยสัญญาณซิงค์คือสัญญาณ $\sin(x)/x$ บนแกนความถี่ ดัง แสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็วของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย

ที่มา: หนังสือ OFDM เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ในระบบสื่อสารยุคใหม่ (2545)

3. การสร้างสัญญาณ OFDM

สัญญาณ OFDM เกิดจากการนำสัญญาณจากการกล่าสัญญาณของแต่ละความถี่ซึ่งเป็นอิสระต่อกันมารวมกัน แต่การสร้างสัญญาณรวม ในทางเวลาที่เกิดจากการใช้เทคนิค OFDM ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงอาศัยวิธีการสร้างสัญญาณทางอ้อม ด้วยวิธีการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) ซึ่งจะเป็นการใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์จนกระทั่งได้สัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ที่ตั้งฉากกันออกมา จากนั้นการรบกวนเสียงจะเปลี่ยนจาก สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องในทางเวลาเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา แล้วส่งออกทางช่องสัญญาณเสียง ซึ่งวิธีนี้จะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้งานมีขนาดเล็ก ง่ายต่อการออกแบบ และประหยัดพลังงานมากกว่า จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้งานกันในปัจจุบัน

โดยพื้นฐานแล้ว OFDM เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ เมื่อช่องความถี่ถูกแบ่งออกเป็นความถี่ขนาดเล็กๆ โดยแต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของอัตราบิต (bit rate) ซึ่งทำให้สัญญาณพาหะย่อยเหล่านี้มีความตั้งฉากซึ่งกันละกัน ในการส่งสัญญาณ สัญญาณดิจิทัลจะถูกนำไปมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย แล้วจึงส่งออกไป รูปแบบในการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล มีอยู่หลายรูปแบบดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ในระบบ OFDM กลุ่มของข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปขนานกัน โดยการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย ซึ่งเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ในการแปลงกลับมาเป็นสัญญาณบนแกนเวลา ด้วยวิธีการแปลงกลับฟาสต์ฟูเรียร์ (IFFT) โดยที่สัญญาณทางแกนเวลาเหล่านี้จะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันเป็นสัญญาณ แบบอนุกรม และสัญญาณที่ได้จะถูกส่งบนความถี่ที่เหมาะสมในระบบสื่อสารสัญญาณ สัญญาณพาหะย่อย แต่ละสัญญาณในระบบ OFDM จะมีความตั้งฉากซึ่งกัน และกัน ด้วยวิธีการจัดการสัญญาณในลักษณะนี้ทำให้สัญญาณพาหะย่อยที่อยู่ใกล้กัน หรือแม้แต่ซ้อนทับกันก็ไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ดังนั้นในระบบนี้จึงไม่ต้องการแถบป้องกัน (guard band) ระหว่างแต่ละช่องสัญญาณย่อย ทำให้ช่องสัญญาณมีความแคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่ง ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้แถบความถี่สูงสุด

ความสัมพันธ์ระหว่างทุกสัญญาณพาหะย่อยในระบบ OFDM จะต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อรักษาให้มีลักษณะของความตั้งฉากซึ่งกันและกัน การแปลงกลับฟาสต์ฟูเรียร์เป็นการแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงมากและเป็นวิธีการขั้นต้นอย่างง่าย ๆ ที่สามารถทำให้มั่นใจได้ว่าสัญญาณพาหะที่สร้างขึ้นมามีความตั้งฉากซึ่งกัน และกัน ปัญหาที่สำคัญอีก ปัญหาหนึ่งคือ ปัญหา

ของสัญญาณรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference, ISI) ซึ่งเกิดจากสัญญาณคลื่นวิทยุได้วิ่งกระจายออกไปในหลายๆ เส้นทาง (multi-path) และเกิดการสะท้อน จนมารวมกันที่อุปกรณ์รับสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณขึ้น จึงต้องมีการ สอดแทรกช่วงแถบป้องกันแคบๆ เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น เรียกว่า การเสริม ไชคลิก (cyclic prefix)

ขั้นตอนการทำงานของ OFDM สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ภาคส่งและภาครับ โดยขั้นตอนของแต่ละส่วนจะทำงานกลับกัน

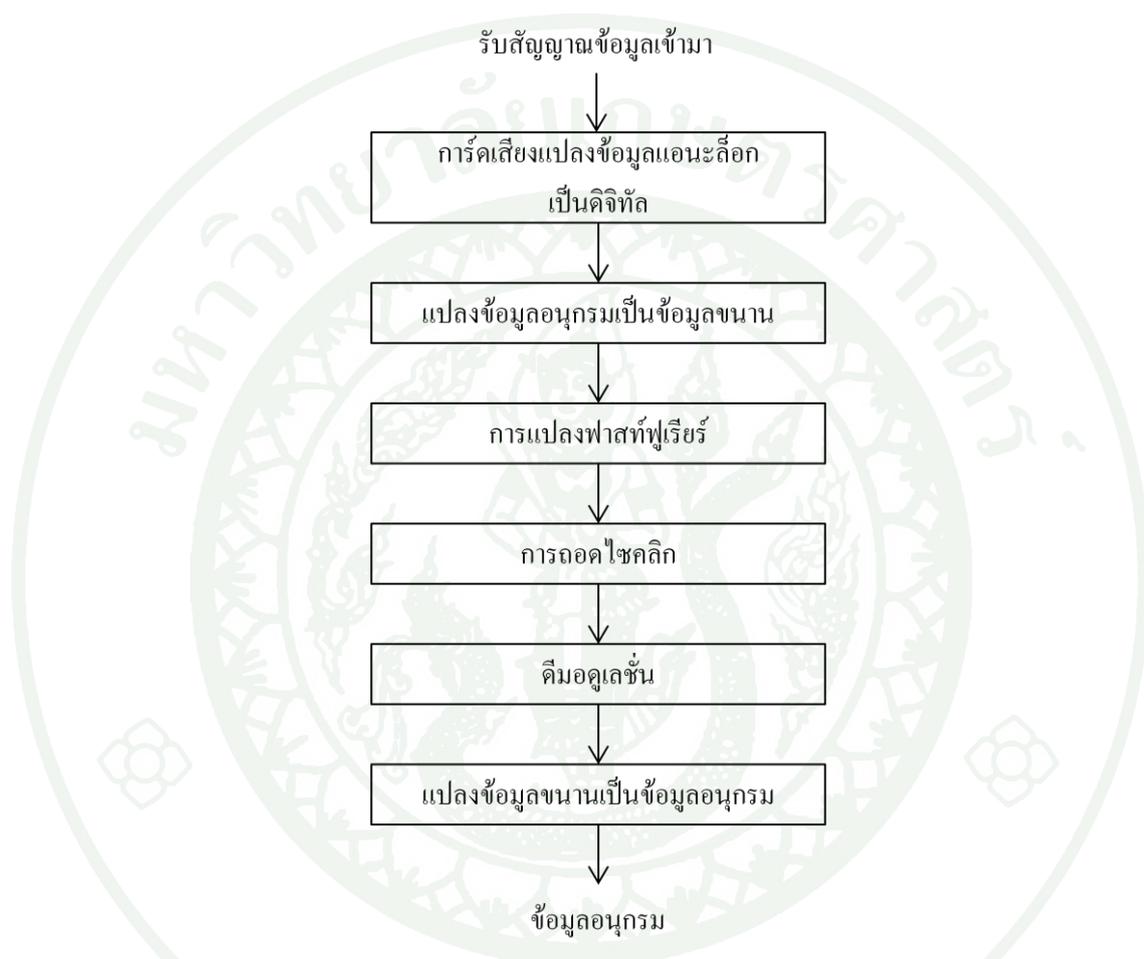
ทางภาคส่ง ข้อมูลที่เป็นดิจิทัลจะถูกนำไป เปลี่ยนเป็น จำนวนเชิงซ้อน จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) เพื่อให้ได้สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time waveform) เมื่อสัญญาณผ่านการ์ดเสียง (soundcard) จะได้สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา (continuous time waveform) แล้วจึงส่งสัญญาณ ออกไป ดังภาพที่

13



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการทำงานของภาคส่งสัญญาณด้วยวิธี OFDM

ทางภาครับจะทำขั้นตอนนี้ย้อนกลับจากทางภาคส่ง โดยสัญญาณที่ได้ทางภาครับ จะผ่านการคัดเสียง (soundcard) ซึ่งจะแปลงสัญญาณ แอนะล็อก เป็นสัญญาณ ดิจิทัล ซึ่งจะ ได้สัญญาณ ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time waveform) แล้วนำไปทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) และทำการคิมอดูเลต เพื่อให้ได้ข้อมูลกลับคืนมา ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการทำงานของ การรับสัญญาณด้วยวิธี OFDM

3.1 การเสริมไซคลิก (Cyclic Prefix)

การเสริมไซคลิกเป็นเทคนิคสำหรับแก้ไขคุณภาพที่ลดลงของสัญญาณในช่องสื่อสารอันเนื่องมาจากสัญญาณมีการเคลื่อนที่หลายเส้นทาง วิธีการคือ ถัดลอกส่วนสุดท้ายของสัญญาณให้มีความยาวเท่ากับหรือมากกว่าค่าหนึ่งช่วงเวลาสูงสุดอันเนื่องมาจากสัญญาณหลายเส้นทางมาใส่ไว้ที่ส่วนหน้าของสัญญาณ เพื่อทำหน้าที่เป็นแถบป้องกันการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ที่จะเกิดขึ้นระหว่างการส่งข้อมูล ดังภาพที่ 15 ทำให้ OFDM สามารถแก้ไขปัญหา การทับซ้อนของ

สัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเป็นการเสริมส่งข้อดีที่มีอยู่แล้วของ OFDM ให้น่าสนใจมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 15 การเสริมไซคลิก

ภาครับจะทำการกำจัด ส่วนของการเสริมไซคลิกและค่าหน่วงเวลาออกไป ทำให้การทับซ้อนของสัญญาณที่รับมาจากหลายเส้นทางของสัญลักษณ์จะถูกกำจัดออกไปด้วย ทำให้ได้รับเฉพาะสัญญาณที่ต้องการและคงความถี่จากซึ่งกันและกัน แม้กระบวนการนี้ทำให้ช่วงเวลาที่ทำการเสริมไซคลิกไม่สามารถส่งข้อมูลได้ แต่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมดีขึ้น

3.2 การสร้างสัญญาณรวม

ในการสร้างสัญญาณรวมด้วยวิธีการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (IFFT) จำเป็นที่จะต้องทราบค่าตัวแปรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณรวมคือ จำนวนจุดที่ใช้ในการทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยจำนวนจุดจะขึ้นอยู่กับจำนวนสัญญาณพาหะย่อยที่ใช้ในการส่งข้อมูล ซึ่งเป็นตัวกำหนดความละเอียดของสัญญาณในทางเวลาที่จะถูกสร้างขึ้นมา และ อัตราการ สุ่มตัวอย่าง (sampling rate) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณในทางเวลา ทั้งนี้ขึ้นกับจำนวนจุดที่ใช้ในการทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน

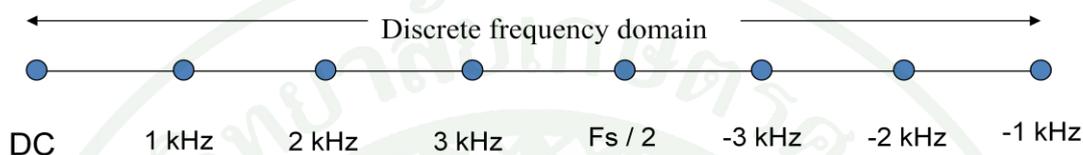
สำหรับจำนวนจุดที่ใช้ในการทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$N = 2^n \quad (5)$$

โดยที่ N คือ จำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว
 n คือ จำนวนเต็มบวก

ในที่นี้จะอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในการสร้างสัญญาณรวม ด้วยวิธีการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยการยกตัวอย่างได้ดังนี้

กำหนดให้จำนวนจุดที่ใช้ในการทำการ แปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเท่ากับ 8 จุด และอัตราการสุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 8 กิโลเฮิรตซ์ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ค่าความถี่ของแต่ละจุดในสัญญาณในทางความถี่

จุดแต่ละจุดแทนสัญญาณพาหะย่อยความถี่หนึ่ง โดยความถี่ของแต่ละจุด ขึ้นอยู่กับอัตราการสุ่มตัวอย่าง และจำนวนจุดที่ใช้ในการทำการ แปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สัญญาณทางเวลาที่สร้างขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่ของจุดนั้นๆ ที่ได้มีการใส่ค่าลงไป โดยค่าที่ใส่ลงไปในแต่ละจุดของความถี่ จะเป็นค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณพาหะย่อยที่ความถี่ นั้นๆ ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน

ค่าระดับไฟตรง (DC level) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการปรับระดับอ้างอิง (offset) ของสัญญาณที่สร้างขึ้นมา ทำให้สัญญาณมีระดับเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงขึ้นอยู่กับค่า ระดับอ้างอิงที่ใส่เข้าไป โดยกำหนดให้เป็นศูนย์ เพื่อให้ง่ายต่อการถอดรหัสข้อมูลคืนกลับมาที่ภาครับ ส่วนค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณพาหะย่อย ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน เพื่อลดความซับซ้อนในการรับส่งข้อมูลที่มีทั้งส่วนจริง (real) และส่วนจินตภาพ (imaginary) ไปควบคู่กัน จึงใช้วิธีการเพิ่มค่าสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน (complex conjugate) ของแต่ละสัญญาณพาหะย่อยเข้าไป ก่อนทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ ค่าของสัญญาณรวมที่ได้มีเฉพาะส่วนจริงเท่านั้น และเนื่องสัญญาณพาหะย่อยตัวกลาง ($F_s/2$) ไม่มีค่าสังยุคเชิงซ้อน จึงหลีกเลี่ยงการใส่ข้อมูลที่ตำแหน่งนี้ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 7

กำหนดให้เวกเตอร์ S มีขนาด 1 แถว และจำนวนหลักเท่ากับ N โดยแต่ละหลักเก็บค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณพาหะย่อยที่ความถี่ต่างๆ ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน โดยต้องทำการเพิ่มค่าสังยุคซึ่งตำแหน่งต่างๆ ดังสมการที่ 6

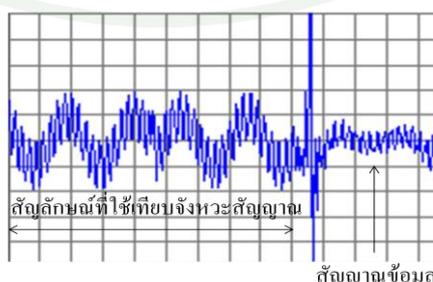
$$S = [X_0 \quad X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_{N/2} \quad \dots \quad X_{N-2} \quad X_{N-1}] \quad (6)$$

โดยที่ X_0	คือ ค่าระดับไฟตรง
X_1	คือ ค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณพาหะย่อยตัวที่ 1
X_2	คือ ค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณพาหะย่อยตัวที่ 2
$X_{N/2}$	คือ ค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณพาหะย่อยตัวที่ $N/2$
X_{N-2}	คือ ค่าสังยุคเชิงซ้อนของ X_2
X_{N-1}	คือ ค่าสังยุคเชิงซ้อนของ X_1
X_{N-Y}	คือ ค่าสังยุคเชิงซ้อนของ X_Y เมื่อ $0 \leq Y \leq N/2$

3.3 การเทียบจังหวะสัญญาณ (synchronization)

การเทียบจังหวะสัญญาณเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อระบบสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม เนื่องจากข้อมูลที่ภาคส่งต้องการส่งและ ข้อมูลที่ ภาครับได้รับต้องมีความสอดคล้องกัน และเพื่อให้ภาคส่งและภาครับทราบ ว่า เริ่มมีการส่งและหยุดส่งข้อมูลเมื่อใด ส่งผลให้ภาครับสามารถรับข้อมูลที่เข้ามาได้อย่างเป็นลำดับต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถแยกกลุ่มของข้อมูลในเฟรมข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงมีการส่งสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณก่อนที่จะส่งสัญญาณข้อมูลจริงออกไป

ในการเทียบจังหวะสัญญาณจำเป็น ต้องส่งสัญญาณที่ เป็นตัวบอกจุดเริ่ม ต้นของสัญลักษณ์ ข้อมูล โดย ในงานวิจัยนี้ใช้การส่งสัญลักษณ์พิเศษเพื่อเทียบจังหวะ (synchronization symbol) ซึ่งทุกสัญลักษณ์พิเศษนี้ต้องตั้งฉากกับสัญลักษณ์อื่นที่ใช้บรรจุข้อมูล เพื่อให้สามารถทำการเทียบจังหวะได้ง่าย ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 ตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณ

วิธีการหาสัญลักษณ์เทียบจังหวะ วิธีหนึ่ง ทำได้โดยการเปรียบเทียบความเหมือนกันของสัญญาณ (correlation) โดยที่ทางภาครับจะรับทราบรูปแบบของสัญลักษณ์พิเศษนี้อยู่แล้ว

4. การ์ดเสียง (Sound card)

ในการสร้างสัญญาณ ด้วยวิธีการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (IFFT) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วค่าที่ได้ทั้งหมดจะเป็นค่า ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time domain) และในการส่งสัญญาณ ที่เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลานั้น ผ่านทางช่องสัญญาณเสียง จึงต้องอาศัย การ์ดเสียง (soundcard) ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรูปแบบ ของสัญญาณจากสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ให้มีลักษณะเป็น สัญญาณที่มี รูปคลื่นที่ต่อเนื่อง (continuous waveform) โดยผ่านขั้นตอนการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกในช่องสัญญาณเสียง

สำหรับภาครับ สัญญาณที่เข้าช่องสัญญาณเสียง มีลักษณะเป็น สัญญาณที่มี รูปคลื่นที่ต่อเนื่อง และเช่นเดียวกับภาคส่ง การ์ดเสียงจะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านกระบวนการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Process) สัญญาณที่ได้จึงเป็นสัญญาณทางเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในช่องสัญญาณเสียง

ปัจจุบัน การ์ดเสียงได้รับการพัฒนาคุณภาพอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเสียงและความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด ความชัดเจนของเสียงจะมีประสิทธิภาพดีเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ อัตราการสุ่มตัวอย่าง และความแม่นยำของตัวอย่างที่ได้ ซึ่งความแม่นยำของตัวอย่างนั้นถูกกำหนด โดยความสามารถของ ส่วนแปลงสัญญาณ แอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

(Analog-to-Digital Converter, ADC) ว่ามีความละเอียดมากน้อยเพียงใด ซึ่งความละเอียด นี้ถูกกำหนดโดยจำนวนบิตของสัญญาณดิจิทัลทางด้านขาออก เช่น

- A/D Converter 8 bit จะสามารถแสดงค่าที่ต่างกัน ได้ 256 ระดับ
- A/D Converter 16 bit จะสามารถแสดงค่าที่ต่างกัน ได้ 65,536 ระดับ เป็นต้น

หากจำนวนระดับมากขึ้นจะทำให้ความละเอียดยิ่งสูงขึ้นและการผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงยิ่งน้อยลง นั่นคือประสิทธิภาพที่ของเสียง ที่ได้รับดีขึ้นนั่นเอง แต่ จำนวนบิตต่อหนึ่งตัวอย่างจะมากขึ้นด้วย



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 3, Intel Pentium Core2 Duo, 2 GB of RAM, 250 GB hard drive
2. โปรแกรม Microsoft Visual Studio 2008 Express
3. โปรแกรม Microsoft DirectX SDK (June 2010)
4. สายสัญญาณเสียง
5. เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ผลิตโดย GWINSTEK รุ่น SFG-1013



ภาพที่ 20 เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ผลิตโดย GWINSTEK รุ่น SFG-1013

6. ออสซิลโลสโคป ผลิตโดย GWINSTEK รุ่น GDS-1022



ภาพที่ 21 ออสซิลโลสโคป ผลิตโดย GWINSTEK รุ่น GDS-1022

วิธีการ

ขั้นตอน วิธีการพัฒนาและทดสอบประกอบด้วย

1. การออกแบบการส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ทางช่องสัญญาณเสียง
 2. การทดสอบโปรแกรมภาคส่ง
 3. การทดสอบโปรแกรมภาครับ
 4. การทดสอบการรับส่งสัญญาณเบื้องต้น โดยใช้สายสัญญาณเสียง
1. การออกแบบการส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ทางช่องสัญญาณเสียง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ในการสร้าง สัญญาณ OFDM ซึ่งเป็นสัญญาณที่สร้างขึ้นจากสัญญาณพาหะหลายๆ ความถี่ จำเป็นจะต้องกำหนดค่าให้กับตัวแปรในการเขียนโปรแกรมต่างๆ เช่น อัตราการสุ่มตัวอย่าง จำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องมีการเลือกรูปแบบในการมอดูเลตและรูปแบบการเทียบจังหวะสัญญาณอีกด้วย

1.1 อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate)

อัตราการสุ่มตัวอย่าง คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ สุ่มออกมาจากสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาใน 1 วินาที เพื่อให้กลายเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ โครงสร้าง ของข้อมูลในการเขียนโปรแกรมที่สามารถ กำหนดรูปแบบของสัญญาณเสียง ได้ โดยกำหนดให้เป็น สัญญาณแบบ PCM (Pulse Code Modulation) ซึ่งเป็นข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลสำหรับการส่งข้อมูลแบบแอนะล็อก สำหรับสัญญาณแบบ PCM นี้ มีค่าทั่วไปของอัตราการสุ่มตัวอย่างเป็น 8.0, 11.025, 22.05 และ 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราการสุ่มตัวอย่าง ที่มีค่าเท่ากับ 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นอัตราการสุ่มตัวอย่าง สูงสุดสำหรับสัญญาณแบบ PCM

1.2 จำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Number of FFT points)

ในการออกแบบ ระบบ นี้เลือกใช้จำนวน สัญญาณ พาหะย่อย 32 ตัว เนื่องจากสามารถบรรจุข้อมูลได้ครบ 4 ไบต์พอดี ดังนั้นจำนวนจุดที่ต้องใช้จะ ประกอบด้วย ค่าของสัญญาณ

พาหะย่อย 32 ค่า และค่าสังยุคเชิงซ้อนของสัญญาณพาหะย่อยอีก 32 ค่า รวมทั้งค่าระดับไฟตรงอีก 1 ค่า เพราะฉะนั้นจะต้อง มีอย่างน้อย 65 ค่า ในการหาจำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

จากสมการที่ 5 จะต้องหาจำนวนเต็มบวก (n) ที่ทำให้จำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (N) มีค่ามากกว่า 65 จุด

$$N = 2^n \text{ และ } N > 65$$

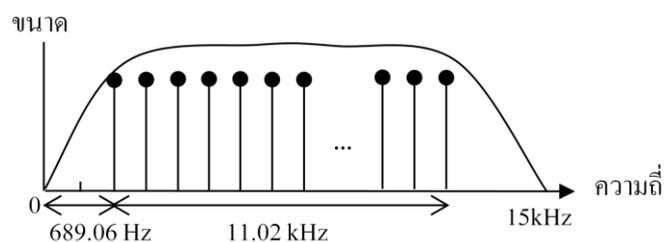
$$\text{จะได้ } 2^n > 65$$

$$\text{ดังนั้น } n \geq 7$$

ดังนั้น ในระบบที่ออกแบบนี้เลือก $n = 7$ ทำให้จำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (N) ทั้งหมดเท่ากับ $2^7 = 128$ จุด

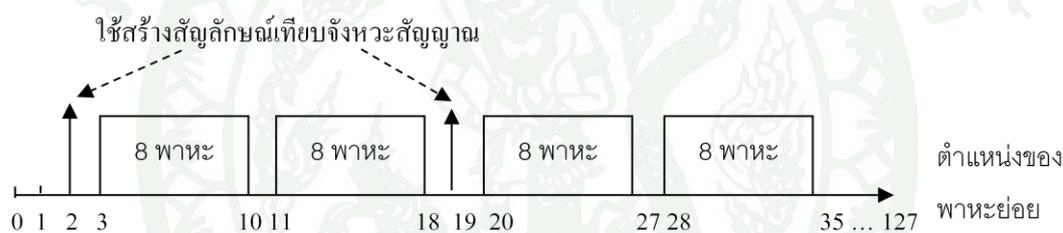
1.3 ดัชนีของพาหะย่อยที่ใช้ในการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

จากการคำนวณการหาจำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ได้ 128 จุด ในการออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงความถี่ใกล้สัญญาณไฟตรง (DC Cut-off) สามารถทำได้ด้วยการเลื่อนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของพาหะย่อยให้อยู่ห่างจาก จุดที่แทนค่าระดับไฟตรง โดยจะไม่ใช้สัญญาณพาหะย่อยที่ความถี่ใกล้สัญญาณไฟตรง ดังนั้นจึงเริ่มใช้สัญญาณพาหะย่อยตั้งแต่ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งมีค่าความถี่ตั้งแต่ 689.06 เฮิรตซ์เป็นต้นไป ซึ่งสำหรับระบบที่ออกแบบนี้ใช้สัญญาณพาหะย่อยตำแหน่งที่ 2 ในการสร้างสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณ อย่างไรก็ตาม สัญญาณพาหะย่อยตำแหน่งสุดท้ายไม่ควรอยู่ใกล้ความถี่ตัดขาดย่านความถี่สูง (High Frequency Cut-off) โดยในระบบที่ออกแบบนี้มีค่าเท่ากับความกว้างของ ช่องสัญญาณของการ์ดสี่ขงซึ่งมีค่าเท่ากับ 15 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นสามารถเริ่มใช้สัญญาณพาหะย่อยได้ตั้งแต่ดัชนีที่ 2 เป็นต้นไป



ภาพที่ 22 การวางตำแหน่งของพาหะย่อยเพื่อหลีกเลี่ยงความถี่ใกล้สัญญาณไฟตรงและความถี่ตัดขาดย่านความถี่สูง

ดังนั้นข้อมูลทั้ง 32 สัญลักษณ์จะใช้สัญญาณพาหะย่อย 32 ตัว ซึ่งจะถูกแบ่งเก็บในดัชนีที่ 3 ถึงดัชนีที่ 34 ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ดัชนีของพาหะย่อยที่ใช้ในการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

ส่วนดัชนีที่ใช้เก็บค่าสังยุคเชิงซ้อน ของสัญญาณพาหะย่อยแต่ละตัวนั้น จะถูกเก็บไว้ตรงข้ามกับสัญญาณพาหะย่อยของแต่ละตัว โดยมี สัญญาณพาหะย่อย ตัวกลางที่ไม่มีค่าสังยุคเชิงซ้อนเป็นตัวแบ่ง ตามที่ภาพที่ 17 ดังที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว

1.4 วิธีการมอดูเลต

การ กล้าสัญญาณ หรือการมอดูเลต เป็นการผสมข้อมูล ดิจิทัล เข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาหะ ซึ่งมีขนาดและความถี่ที่เหมาะสมที่จะสามารถส่งผ่านช่องสัญญาณได้ โดยรูปแบบการมอดูเลตนั้นมีอยู่หลายวิธีดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

ในระบบนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) แทนการมอดูเลตแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราบิตข้อมูลสัมฤทธิ์มากขึ้นถึง 2 เท่า โดยการมอดูเลตแบบ QPSK นี้จะใช้หลักการเปลี่ยนค่าเฟสของสัญญาณคลื่นพาห้ตามการเปลี่ยนแปลงบิตของข้อมูล ได้ดังสมการที่ 7 ถึง 10

$$S_{00}(t) = A \sin \left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4} \right) ; 0 < T < T_s \quad (7)$$

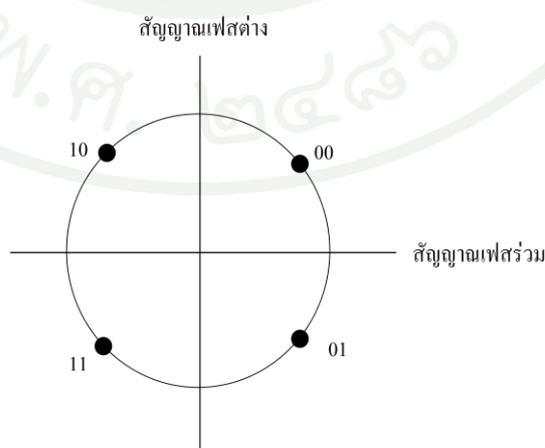
$$S_{01}(t) = A \sin \left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4} \right) ; 0 < T < T_s \quad (8)$$

$$S_{10}(t) = A \sin \left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4} \right) ; 0 < T < T_s \quad (9)$$

$$S_{11}(t) = A \sin \left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4} \right) ; 0 < T < T_s \quad (10)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ
 f_c คือ ความถี่ของสัญญาณพาหะ
 T_s คือ คาบของสัญลักษณ์

สามารถเขียนการจัดวางตำแหน่งของสัญญาณในการมอดูเลตแบบ QPSK บนกราฟการกระจายของเฟส ได้ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 24 การจัดวางตำแหน่งของสัญญาณในการมอดูเลตแบบ QPSK

สำหรับการมอดูเลต ในภาครับ เป็นกระบวนการที่ใช้แปลง ค่าข้อมูลที่เก็บในรูปแบบของคลื่นไซน์กลับคืนมา โดยค่ามมูเฟสที่ได้รับมาจากภาคส่งจะมีสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นจำนวนจริง และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ โดยมีการกำหนดค่าอ้างอิง (Threshold) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการตัดสินใจตัดสินค่าข้อมูล เพราะมีปัจจัยหลายประการที่ทำให้ค่ามมูเฟสที่ส่งมาจากภาคส่งผิดเพี้ยนไปจากค่าที่กำหนดไว้ให้ตอ นมอดูเลต ดังนั้นเพื่อป้องกันความผิดพลาดและช่วยในการตัดสินใจตัดสินค่าข้อมูลได้ง่ายขึ้นจึงได้กำหนดให้แกนสัญญาณเฟสรวม (แกน x) และแกนสัญญาณเฟสต่าง (แกน y) เป็นเสมือนเส้นแบ่งเขตของเฟสแต่ละเฟส

1.5 อัตราสัญลักษณ์ (Symbol Rate)

อัตราสัญลักษณ์คือ จำนวนสัญลักษณ์ที่ส่งได้ใน 1 วินาที ดังนั้นอัตราสัญลักษณ์จึงขึ้นอยู่กับคาบสัญลักษณ์ (symbol period) กล่าวคือ อัตราสัญลักษณ์เป็นส่วนกลับของคาบสัญลักษณ์ ดังสมการที่ 11

$$R_s = \frac{1}{T_s} \quad (11)$$

โดยที่ R_s คือ อัตราสัญลักษณ์
 T_s คือ คาบสัญลักษณ์

จากอัตราการสุ่มตัวอย่าง 44.1 กิโลเฮิรตซ์ และจำนวนจุดที่ใช้ทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว 128 จุด จะสามารถหาคาบสัญลักษณ์ได้เท่ากับ $128 \times \frac{1}{44.1 \text{ kHz}} = 2.9025$ มิลลิวินาที หรือกล่าวคือ 1 คาบสัญลักษณ์ ใช้เวลา 2.9025 มิลลิวินาที ดังนั้น จากสมการที่ 14 สามารถหาอัตราสัญลักษณ์ได้เท่ากับ $\frac{1}{2.9025 \text{ ms}} = 344.53$ สัญลักษณ์ต่อหนึ่งวินาที

1.6 อัตราบิตข้อมูลสัมฤทธิ์ (Bit Rate)

อัตราบิตข้อมูลคือ จำนวนบิตข้อมูลที่ส่งได้ใน 1 วินาที ในการหาอัตราบิตข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะย่อยของข้อมูลและวิธีการมอดูเลต ในระบบที่ออกแบบนี้ใช้วิธีการมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสแบบ QPSK ดังนั้น 1 สัญลักษณ์สามารถใช้แทนบิตข้อมูลได้ 2 บิต สามารถหาอัตราบิตข้อมูลได้ดังสมการที่ 12

$$R_b = n \times 2 R_s \quad (12)$$

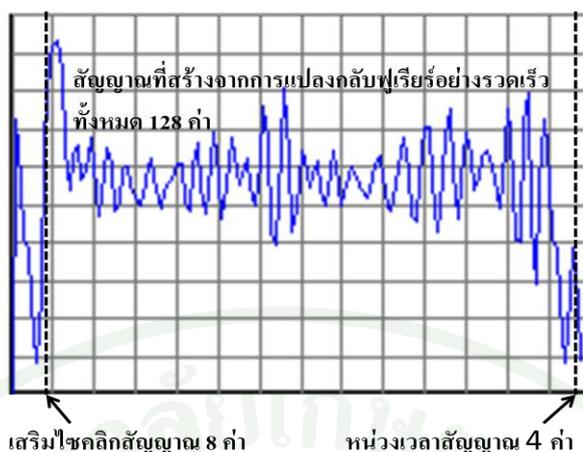
โดยที่	R_b	คือ อัตราบิตข้อมูล
	R_s	คือ อัตราสัญลักษณ์
	n	คือ จำนวนสัญญาณพาหะ

ดังนั้นในระบบที่ออกแบบโดย ไม่มีการเสริมไซคลิก และสัญลักษณ์เทียบจังหวะสัญญาณจะสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตรา บิตข้อมูล $32 \times 2 \times 344.53 = 22.05$ กิโลบิตต่อวินาที แต่ในทางปฏิบัติมีการเสริมไซคลิกและสัญลักษณ์เทียบจังหวะสัญญาณอยู่ โดยในระบบที่ออกแบบมีการเสริมไซคลิกเพิ่ม 12 จุดต่อ 1 สัญลักษณ์ และใช้สัญลักษณ์เทียบจังหวะสัญญาณ 2 สัญลักษณ์ เมื่อรวมกับสัญลักษณ์ของข้อมูลอีก 32 สัญลักษณ์ จะมีอัตราบิตข้อมูลสัมฤทธิ์ซึ่งมีค่าลดลง สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{อัตราบิตข้อมูลสัมฤทธิ์} = \frac{32 \times 128 \times 22.05 \text{ kbps}}{34 \times 140} = 18.97 \text{ kbps}$$

1.7 การเสริมไซคลิกและการหน่วงเวลาของสัญญาณที่สร้างขึ้น

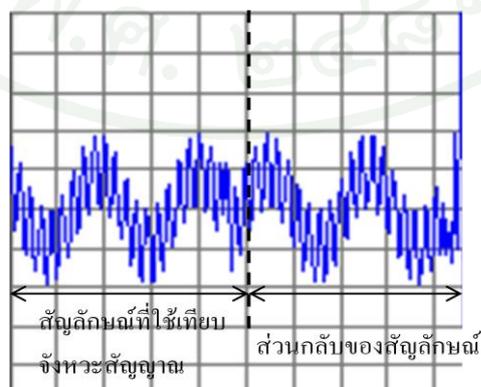
สัญญาณที่สร้างขึ้นเกิดจาก การแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีค่าที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ทั้งหมด 128 ค่า ในการเสริมไซคลิกของระบบ นี้จะทำการคัดลอก 8 ค่าสุดท้ายไปวางไว้ข้างหน้าสุดของสัญญาณ ที่สร้างขึ้น และคัดลอก 4 ค่าสุดท้าย ไปวาง ต่อท้ายสัญญาณที่สร้างขึ้นเพื่อ ไม่ให้เกิดการ บิดเบือน (distortion) ของสัญญาณ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ระหว่างสัญญาณที่ติดกัน ดังภาพที่ 25 ดังนั้นสัญญาณที่สร้างขึ้นจึงมีขนาดทั้งหมด 140 จุดต่อ 1 สัญลักษณ์ ทั้งนี้เพื่อ เป็นการ ป้องกันการเหลื่อมของสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference, ISI) ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างทำการส่งข้อมูล



ภาพที่ 25 การเสริมไซคลิกและช่วงเวลาของสัญญาณที่สร้างขึ้นในโดเมนเวลา

1.8 การสร้างสัญลักษณ์ที่ใช้เทียบจังหวะสัญญาณ

ในการส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับ เพื่อให้ภาครับรู้ว่า ภาคส่งกำลังทำการส่งสัญญาณออกไป จำเป็นต้องมีสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเทียบจังหวะ ซึ่งส่วนใหญ่สร้างขึ้นจากสัญญาณรูปไซน์ ที่สามารถสร้างได้จากกระบวนการ FFT อยู่แล้ว โดยทำการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ (Correlation) ของสัญญาณ กับสัญลักษณ์เดียวกันที่มีอยู่ที่ภาครับ ในระบบนี้ใช้สัญญาณรูปไซน์ ความถี่ผสมระหว่าง 2 และ 19 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยสร้างจากการนำสัญญาณพาหะย่อยตำแหน่งที่ 2 และ 19 มาทำการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว แล้วนำมาทำการเสริมไซคลิกและกำหนดช่วงเวลาดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อนำไปรวมกับส่วนกลับของสัญลักษณ์ที่สร้างขึ้น จะได้สัญลักษณ์ที่ใช้เทียบจังหวะสัญญาณของภาคส่ง ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณของภาคส่ง

สำหรับ ภาครับ จะมีการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในการตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณกับสัญญาณที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณของ ภาคส่ง โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจจับนี้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปไซน์ เหมือนกับสัญญาณที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณของภาคส่งทุกประการ

1.9 กรอบสัญญาณ (frame)

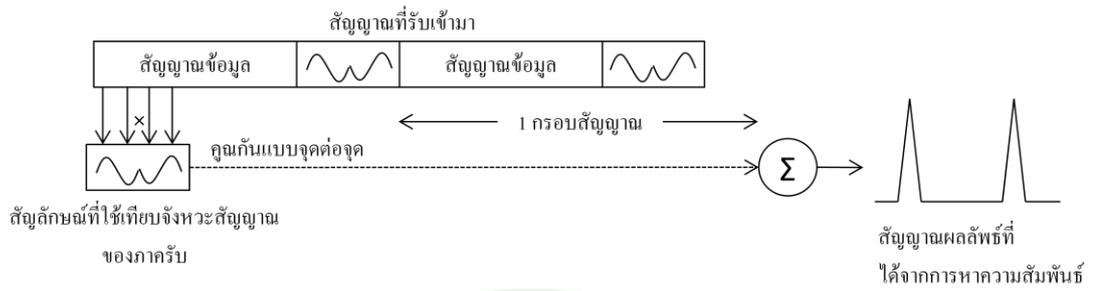
ใน 1 กรอบสัญญาณจะประกอบด้วย สัญญาณที่ใช้ เทียบจังหวะสัญญาณ 2 สัญญาณ และสัญญาณที่ใช้เป็นข้อมูลอีก 32 สัญญาณ โดยแต่ละสัญญาณจะประกอบด้วยค่าที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งมีความยาวเท่ากับ $140 \times$ คาบของการสุ่มสัญญาณ (Sampling period) ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ลักษณะของกรอบสัญญาณ

1.10 การตรวจสอบจุดเริ่มต้นของสัญญาณด้วยการเทียบจังหวะสัญญาณ

ขั้นตอนในการตรวจสอบจุดเริ่มต้นของสัญญาณ เริ่มจาก ภาครับรับสัญญาณเข้ามาซึ่งมีขนาดอย่างน้อย 2 กรอบสัญญาณ แล้วทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณ ที่ภาครับสร้างขึ้น กับสัญญาณที่ภาครับรับ เข้า โดยการคูณทีละค่าแล้ว ค่อยๆ เลื่อนสัญญาณที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณคูณไปที่ค่าของสัญญาณที่รับเข้ามา พร้อมทั้งหาผลรวมของผลคูณแบบจุดต่อจุดของสัญญาณในแต่ละช่วง ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 กระบวนการหาความสัมพันธ์ของสัญญาณเพื่อหาจุดเริ่มต้นของสัญญาณ

พิจารณาได้จากสมการที่ 13

$$Y[n] = \sum_{m=1}^{2 \times \text{Symbol Size}} S[m] \times X[n+m] ; n = 0, \dots, \text{ขนาด 2 ครอบสัญญาณ} \quad (13)$$

- โดยที่ Y คือ ค่าที่ได้จากการเทียบจังหวะสัญญาณ (Correlation)
- S คือ ค่าของสัญญาณลักษณะที่ใช้เทียบจังหวะสัญญาณของภาครับ
- X คือ ค่าของสัญญาณที่รับเข้ามา โดยมีขนาดไม่น้อยกว่า 2 ครอบสัญญาณ

สัญญาณ

โดยค่าผลรวมของผลคูณแบบจุดต่อจุดระหว่างสัญญาณทั้งสองจะให้ค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเริ่มต้นของสัญญาณที่ใช้ในการเทียบจังหวะสัญญาณของภาคส่ง หรือกล่าวได้ว่าตำแหน่งที่ให้ค่าสูงสุดคือตำแหน่งเริ่มต้นของกรอบสัญญาณ ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ผลลัพธ์ของการหาความสัมพันธ์ของสัญญาณแสดงตำแหน่งเริ่มต้นของกรอบสัญญาณ

2. การทดสอบโปรแกรมภาคส่ง

2.1 ทำการทดสอบภาคส่งเบื้องต้นว่า สามารถส่งสัญญาณออกมาได้จริงหรือไม่ การทดสอบทำโดยส่งสัญญาณออกจากภาคส่งโดย สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ ความถี่ต่างๆ ด้วยสมการที่เขียนไว้ในโปรแกรมของภาคส่ง โดยใช้สมการที่ 14

$$y(t) = A \sin\left(\frac{2\pi ft}{f_s}\right) \quad (10)$$

โดยที่ A คือแอมพลิจูดของคลื่นไซน์
 f คือความถี่ของคลื่นไซน์
 f_s คือความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง

ทำการสร้างคลื่นไซน์ความถี่ต่างๆลงในบัพเฟอร์สำหรับการส่งข้อมูล ได้แก่ คลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ และคลื่นไซน์ความถี่ผสม 1 กับ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นส่งเป็นสัญญาณเสียง ออกทางลำโพง แล้วทำการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป แล้วใช้ Math menu เพื่อทำการ FFT เพื่อดูสัญญาณในแกนความถี่ว่า ได้ความถี่ที่ถูกต้องหรือไม่

2.2 สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ต่างๆ ด้วยวิธี IFFT เพื่อดูว่าการทำงานของฟังก์ชัน IFFT สามารถคลื่นไซน์ได้ความถี่ที่ถูกต้อง โดยการใส่ค่าแอมพลิจูดและเฟสลงในโดเมนความถี่ เพื่อสร้างคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยมีค่ามุมเฟสเป็นศูนย์ แล้วทำ IFFT เพื่อแปลงให้เป็นสัญญาณในทางเวลา แล้ว ส่งเป็นสัญญาณเสียง ออกทางลำโพง แสดงผลเป็นกราฟบนโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นทำการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป

2.3 สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ ด้วยวิธี IFFT โดยการใส่ค่าแอมพลิจูดและเฟสลงในโดเมนความถี่ ของสัญญาณพาหะย่อย ดัชนีที่ 2 แล้วทำ IFFT จากนั้นทำการเสริมไซคลิกและค่าหน่วยเวลา เพื่อดูว่าโปรแกรมสามารถทำการตัดลอกค่าเพื่อเสริมไซคลิกและค่าหน่วยเวลาได้อย่างถูกต้องหรือไม่ แล้ว ส่งเป็นสัญญาณเสียง ออกทางลำโพง แสดงผลเป็นกราฟบนโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นทำการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป

3. การทดสอบโปรแกรมภาครับ

3.1 สร้างสัญญาณ คลื่นไซน์ความถี่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ และ 100 เฮิรตซ์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 10 เฮิรตซ์ และ 100 เฮิรตซ์ แล้วต่อสายสัญญาณเสียงส่งไปยังภาครับ เพื่อดูว่าภาครับสามารถรับสัญญาณได้จริงหรือไม่

3.2 สร้างสัญญาณ คลื่นรูปร่างต่างๆ โดยมีความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า แล้วต่อสายสัญญาณเสียงส่งไปยังภาครับ เพื่อดูว่าภาครับสามารถรับสัญญาณได้จริงหรือไม่

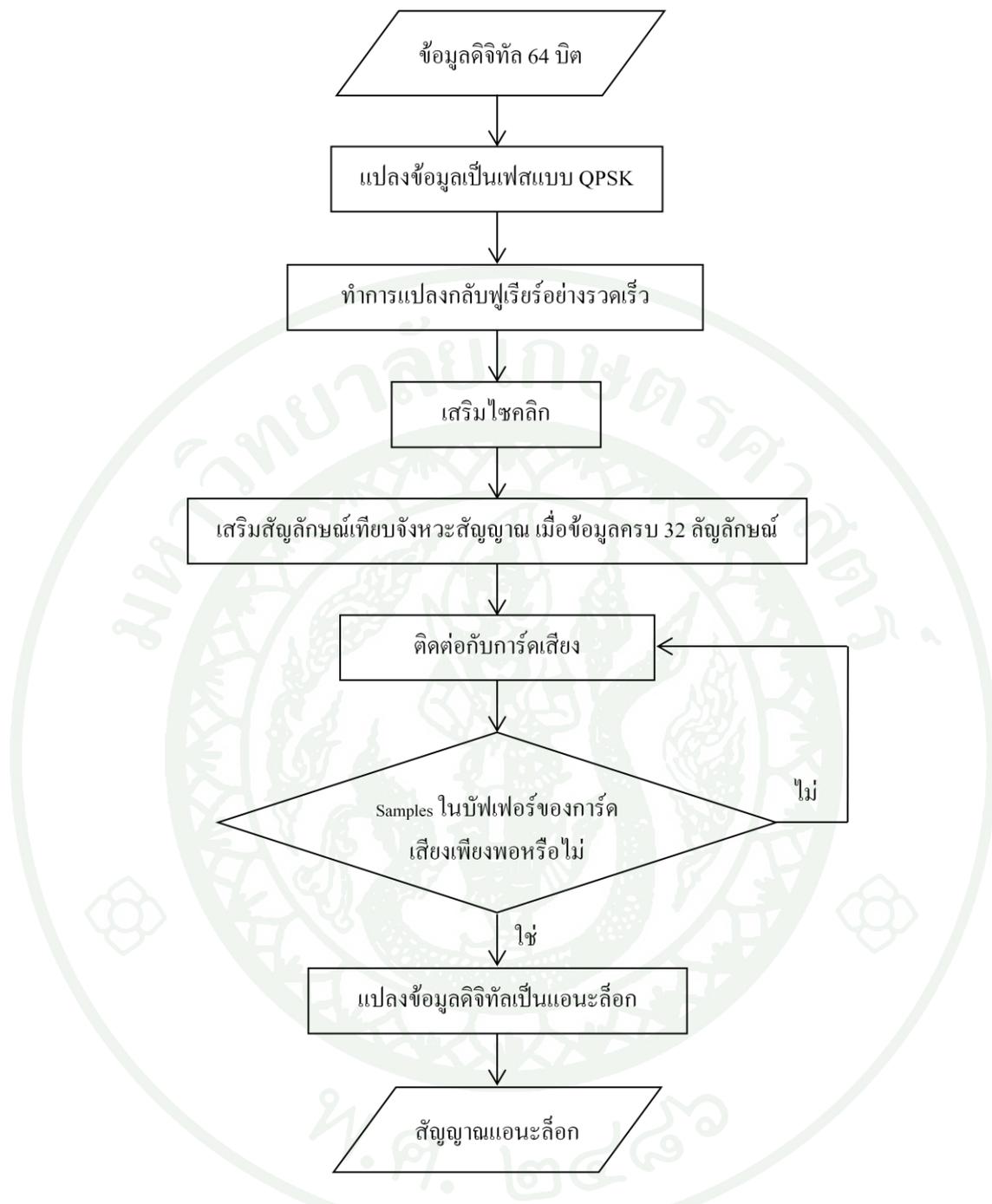
4. การทดสอบการรับส่งสัญญาณเบื้องต้น โดยใช้สายสัญญาณเสียง

ในการทดสอบการรับส่งสัญญาณเบื้องต้น ได้ทำการเขียนโปรแกรม เพื่อทำการส่งสัญญาณต่างๆ ระหว่างคอมพิวเตอร์สองเครื่องผ่านทางช่องสัญญาณเสียง โดยใช้สายสัญญาณเสียงในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ทั้งสองเครื่อง ดังภาพที่ 30

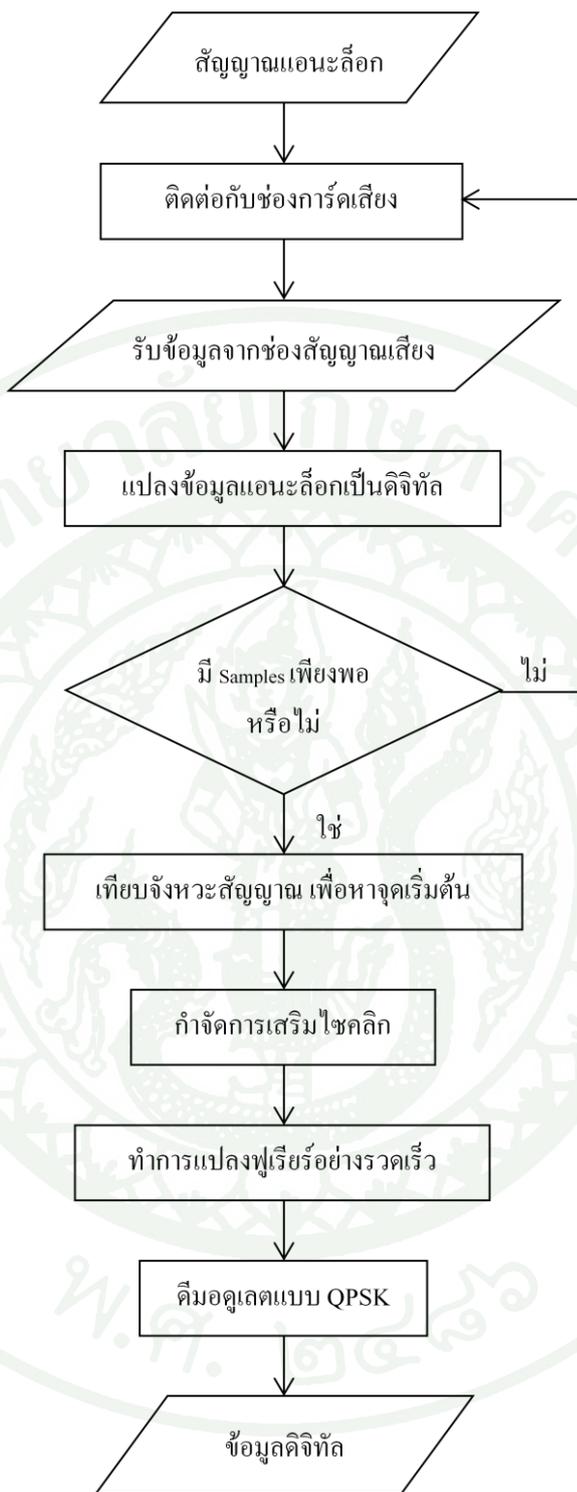


ภาพที่ 30 การเชื่อมต่อในการทดสอบรับส่งสัญญาณแบบใช้สาย

ในการสร้างสัญลักษณ์ของข้อมูลทำ โดยเริ่มจากการทำมอดูเลตแบบ QPSK ของข้อมูลดิจิทัล 64 บิต แปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้สัญญาณทางเวลาและเสริมไซคลิกตามลำดับ เมื่อครบ 32 สัญลักษณ์จะทำการเสริมสัญลักษณ์เทียบจังหวะสัญญาณ กลายเป็น 1 กรอบสัญญาณที่พร้อมจะส่งออกทางช่องสัญญาณเสียง ขั้นตอนในการเขียนโปรแกรมส่งข้อมูลและขั้นตอนในการเขียนโปรแกรมรับข้อมูล แสดงดังภาพที่ 31 และ 32 ตามลำดับ



ภาพที่ 31 ขั้นตอนในการเขียนโปรแกรมส่งข้อมูลของภาคส่ง



ภาพที่ 32 ขั้นตอนในการเขียนโปรแกรมรับข้อมูลของภาครับ

4.1 สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ที่สร้างขึ้นจากสมการในภาคส่งตามสมการที่ 14 แล้วรับด้วยโปรแกรมของภาครับ โดยไม่มีการเทียบจังหวะสัญญาณ การกำจัดไซคลิก การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว และการตีมอดูเลตแบบ QPSK เพื่อดูผลในเบื้องต้นว่าภาคส่งและภาครับสามารถส่งและรับสัญญาณได้จริง หรือไม่

4.2 ส่งสัญญาณข้อมูล ที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่มมเฟส 45 องศา โดยมีกรอบของสัญญาณดังภาพที่ 34 ด้วยโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นรับด้วยโปรแกรมของภาครับ

1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	...	32 nd	33 rd	34 th
		1+i	1+i	1+i	1+i		1+i	1+i	1+i

← 1 กรอบสัญญาณ →

ภาพที่ 33 กรอบสัญญาณในการส่งสัญญาณข้อมูลจำนวน 32 สัญลักษณ์ ที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่มมเฟส 45 องศา

4.3 ส่งสัญญาณข้อมูลที่สร้างขึ้นจาก โดเมนความถี่มมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา โดยมีกรอบของสัญญาณดังภาพที่ 35 ด้วยโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นรับด้วยโปรแกรมของภาครับ

1 st	2 nd	3 rd -10 th	11 th -18 th	20 th -27 th	28 th -35 th
		1+i	-1+i	-1-i	1-i

← 1 กรอบสัญญาณ →

ภาพที่ 34 กรอบสัญญาณในการส่งสัญญาณข้อมูลจำนวน 32 สัญลักษณ์ ที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่มมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา

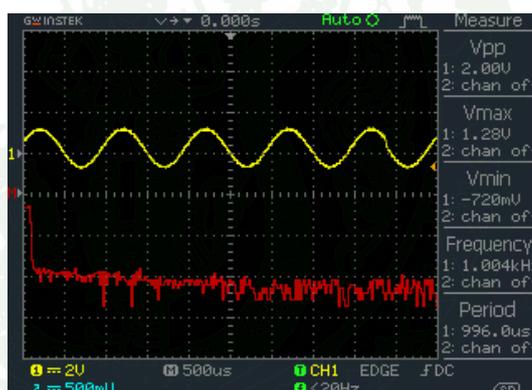
4.4 ส่งสัญญาณข้อมูล ที่สร้างขึ้นจากตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึง 32 ด้วยโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นรับด้วยโปรแกรมของภาครับ

ผลและวิจารณ์

1. ผลและวิจารณ์ผลการทดสอบโปรแกรมภาคส่ง

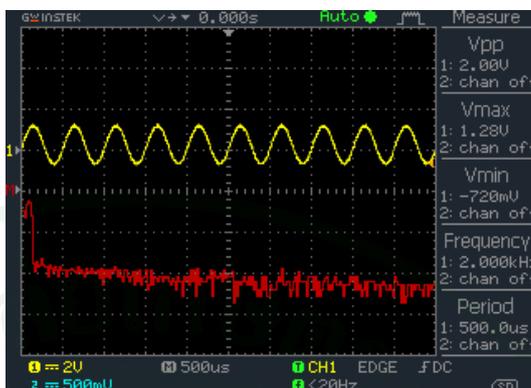
1.1 จากการทดสอบภาคส่ง เบื้องต้น ส่งสัญญาณออกจากภาคส่งโดย สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ผสม 1 กับ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยสมการที่เขียนไว้ในโปรแกรมของภาคส่ง โดยใช้สมการที่ 14 จากนั้นส่งเป็นสัญญาณเสียง ออกทางลำโพง แล้วทำการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป แล้วใช้ Math menu เพื่อทำการ FFT ซึ่งได้ผลที่แตกต่างกันตามความถี่ต่างๆดังนี้

ก. ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์



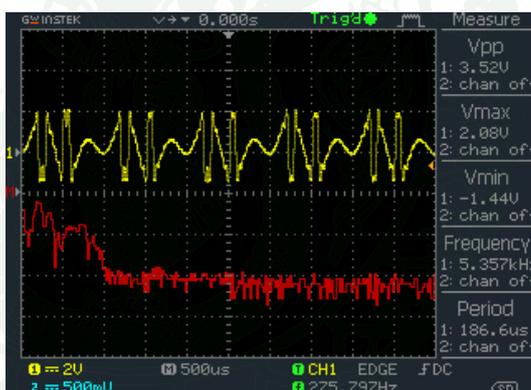
ภาพที่ 35 สัญญาณคลื่นไซน์ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ในทางเวลาและทางความถี่แสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป

ข. ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 36 สัญญาณคลื่นไซน์ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ในทางเวลาและทางความถี่แสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป

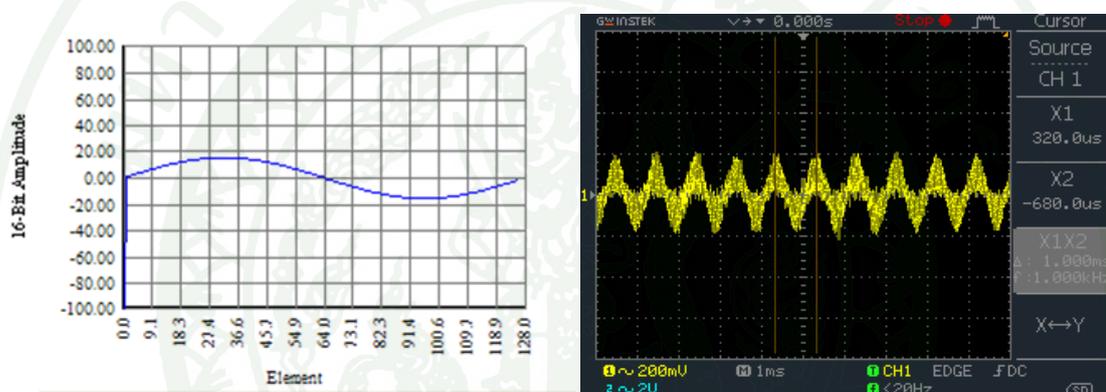
ค. ความถี่ผสม 1 และ 2 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 37 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ผสม 1 กับ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ในทางเวลาและทางความถี่แสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป

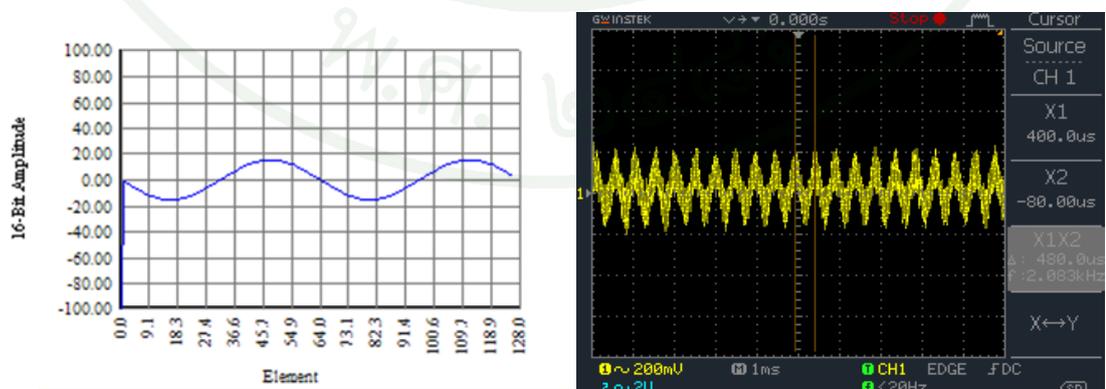
1.2 สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ต่างๆ ด้วยวิธี IFFT เพื่อดูว่าการทำงานของฟังก์ชัน IFFT สามารถคลื่นไซน์ได้ความถี่ที่ถูกต้อง โดยการใส่ค่าแอมพลิจูดและเฟสลงในโดเมนความถี่ เพื่อสร้างคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยมีค่ามุมเฟสเป็นศูนย์ แล้วทำ IFFT เพื่อแปลงให้เป็นสัญญาณในทางเวลา แล้ว ส่งเป็นสัญญาณเสียงออกทางลำโพง แสดงผลเป็นกราฟ บนโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นทำการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป ได้ผลที่แตกต่างกันตามความถี่ต่างๆดังนี้

ก. ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์



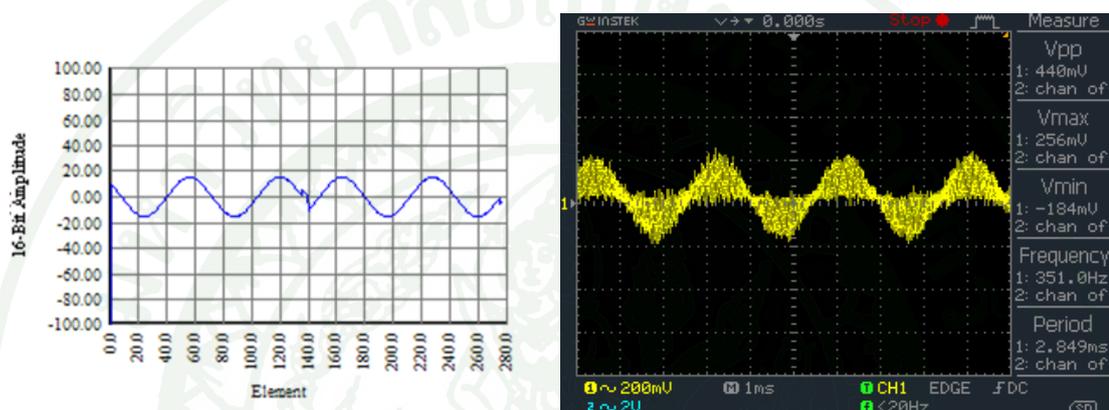
ภาพที่ 38 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาคส่ง และออสซิลโลสโคป

ข. ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 39 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาคส่ง และออสซิลโลสโคป

1.3 จากการทดสอบภาคส่ง ด้วยการ สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ ด้วยวิธี IFFT โดยการใส่ค่าแอมพลิจูดและเฟสลงใน โดเมนความถี่ของสัญญาณพาหะย่อย ดัชนีที่ 2 แล้วทำ IFFT จากนั้นทำการเสริมไซคลิกและค่าหน่วยเวลา เพื่อดูว่าโปรแกรมสามารถทำการคัดลอกค่าเพื่อเสริมไซคลิกและค่าหน่วยเวลาได้อย่างถูกต้องหรือไม่แล้ว ส่งเป็นสัญญาณเสียง ออกทางลำโพง แสดงผลเป็นกราฟบน โปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นทำการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป ได้ผลดังนี้

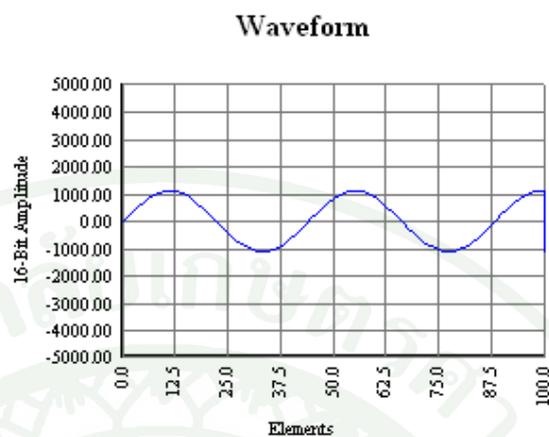


ภาพที่ 40 สัญญาณคลื่นไซน์ที่ใช้เป็นสัญญาณที่ใช่เทียบจังหวะสัญญาณ แสดงด้วยโปรแกรมภาคส่ง และออสซิลโลสโคป

2. ผลและวิจารณ์ผลการทดสอบโปรแกรมภาครับ

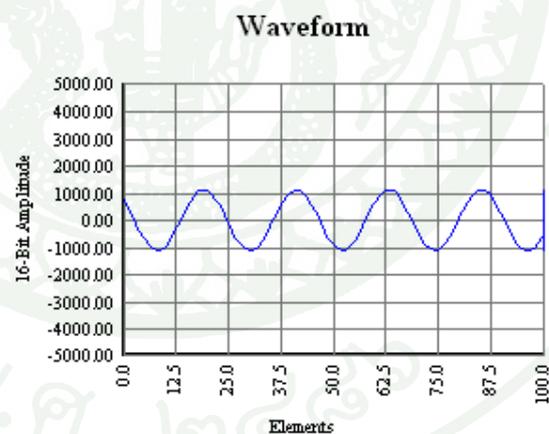
2.1 จากการสร้างสัญญาณคลื่นไซน์ขนาด 200 มิลลิโวลต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า แล้วต่อสายสัญญาณเสียงส่งไปยังภาครับ สามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟได้ดังนี้

ก. ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 41 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ

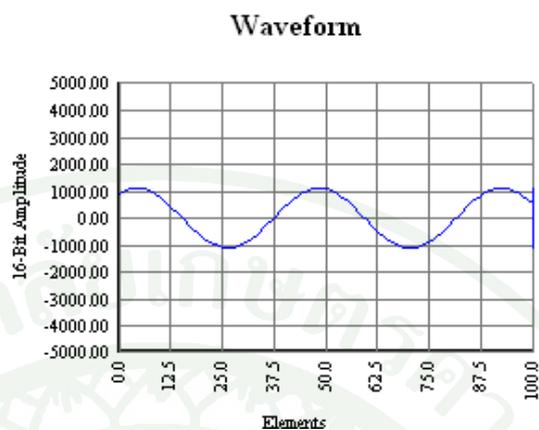
ข. ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 42 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ

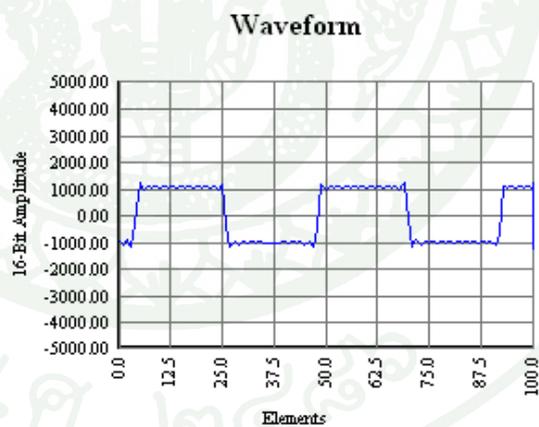
2.2 จากการ สร้างสัญญาณ คลื่นรูปร่างต่างๆ โดย ขนาด 200 มิลลิโวลต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า แล้วต่อสายสัญญาณเสียงส่งไปยังภาครับ สามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟได้ดังนี้

ก. คลื่นรูปไซน์



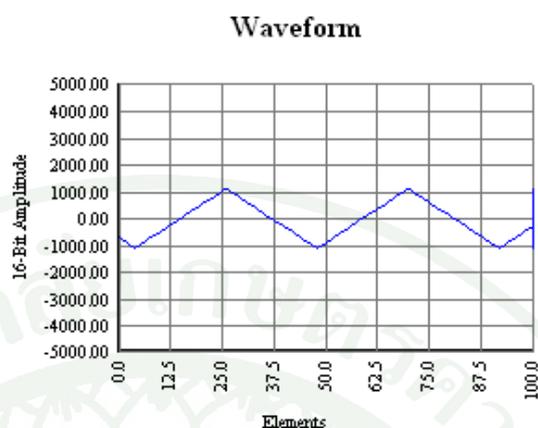
ภาพที่ 43 สัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ

ข. คลื่นรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 44 สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ

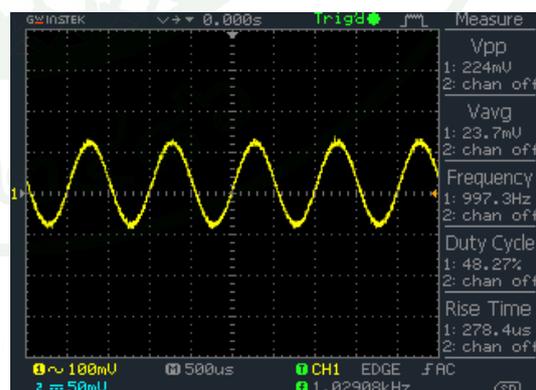
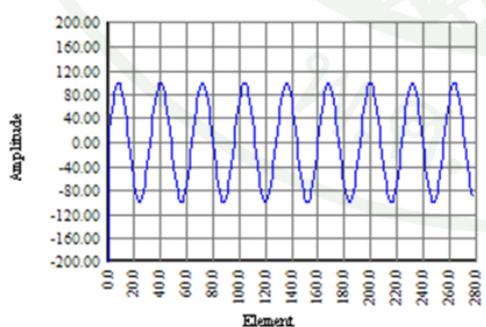
ค. คลื่นรูปสามเหลี่ยม



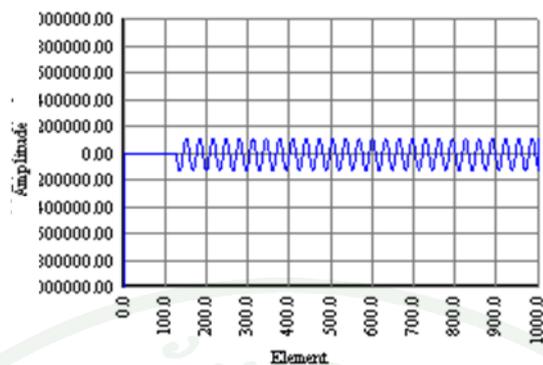
ภาพที่ 45 สัญญาณคลื่นรูปสามเหลี่ยมความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมภาครับ

3. ผลและวิจารณ์ผลทดสอบการรับส่งสัญญาณเบื้องต้นโดยใช้สายสัญญาณเสียง

3.1 จากการสร้างสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่สร้างขึ้นจากสมการในภาคส่งตามสมการที่ 14 แล้วรับด้วยโปรแกรมของภาครับ โดยไม่มีการเทียบจังหวะสัญญาณ การกำจัดไซคลิก การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว และการดิมอดูเลตแบบ QPSK ได้ผลดังนี้

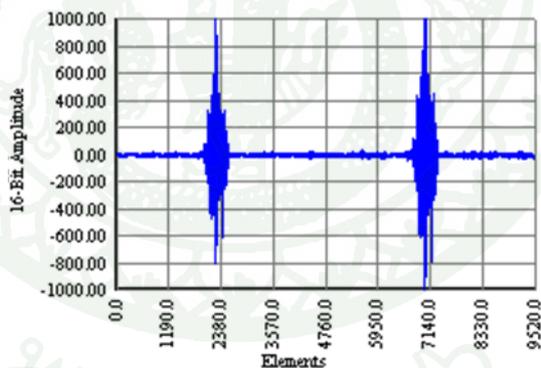


ภาพที่ 46 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงด้วยโปรแกรมของภาคส่ง และออสซิลโลสโคป

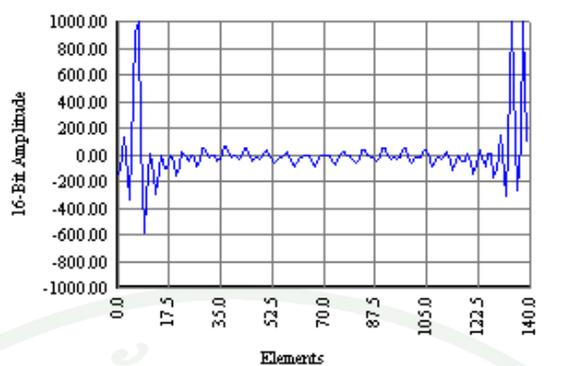


ภาพที่ 47 สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ที่ภาครับรับได้

3.2 จากการทดสอบ ส่งสัญญาณข้อมูลที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่มมเฟส 45 องศา โดยมีกรอบของสัญญาณดังภาพที่ 33 ด้วยโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นรับด้วยโปรแกรมของภาครับ ได้ผลดังนี้

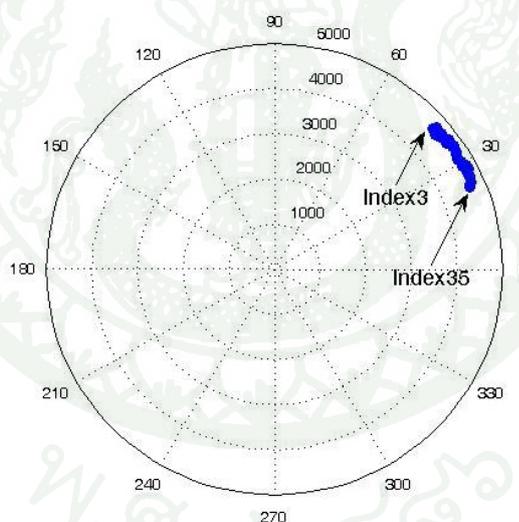


ภาพที่ 48 ผลลัพธ์จากการเทียบจังหวะสัญญาณเพื่อหาจุดเริ่มต้นของกรอบสัญญาณข้อมูลทางฝั่งภาครับ



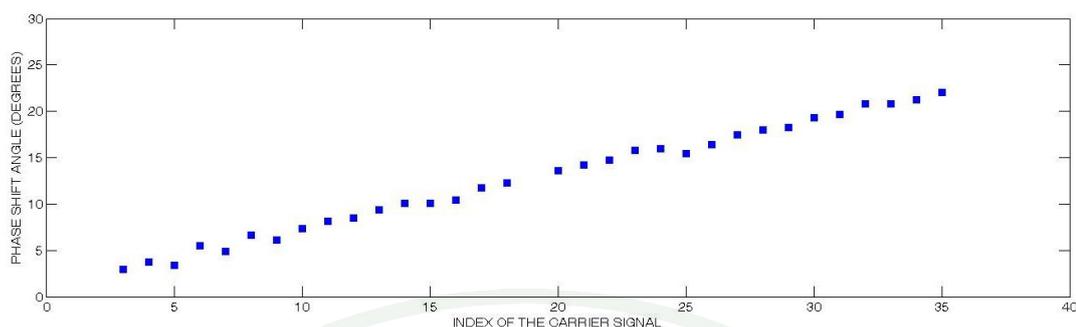
ภาพที่ 49 กรอบของสัญญาณข้อมูลจำนวน 1 สัญลักษณ์ ที่ภาครับรับได้

หากนำค่าที่ภาครับรับมาได้ทั้งส่วนจริง และส่วนจินตภาพ ของสัญญาณพาหะย่อย ดัชนีที่ 3 ถึง 35 จากสัญลักษณ์ตัวใดตัวหนึ่ง มาเขียนเป็นกราฟของเฟส จะได้ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 มุมเฟสที่ได้รับจากภาครับของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3 ถึง 35 เมื่อส่งค่ามุมเฟส 45 องศา

เมื่อนำค่ามุมเฟสที่เลื่อนกับสัญญาณพาหะย่อยที่ตำแหน่งต่างๆมาเขียนกราฟ จะพบว่า เฟสที่เลื่อนออกไปจากมุมเฟส 45 องศา มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น ดังภาพที่ 51

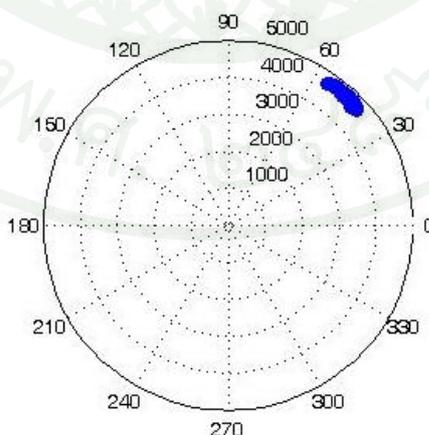


ภาพที่ 51 กราฟระหว่างค่ามุมเฟสที่เลื่อนกับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3 ถึง 35

เมื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้ตำแหน่งของสัญญาณพาหะย่อยที่ถูกรับเลื่อนออกไป เกิดจากการสุมชักรั่วอย่างทีถูกรับคลาดเคลื่อน สำหรับการแก้ปัญหา ต้องทำการเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณพาหะก่อน โดยหามุมเฟสที่เลื่อนจากการส่งค่าเฟส 45 องศาให้กับสัญญาณพาหะย่อยตัวที่ 3 และ 35 แล้วหามุมเฟสที่เลื่อนจากสมการที่ 15

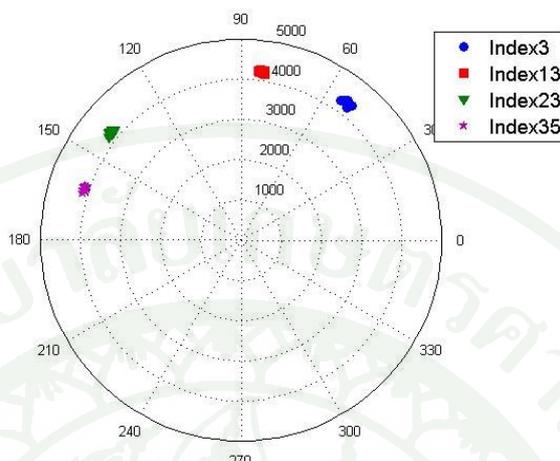
$$\text{มุมเฟสที่เลื่อน} = \frac{\text{มุมเฟสของสัญญาณพาหะย่อยที่ 35} - \text{มุมเฟสของสัญญาณพาหะย่อยที่ 3}}{35 - 3} \quad (15)$$

จากการคำนวณตามสมการที่ 15 จะได้ค่ามุมเฟสที่เลื่อนประมาณ 2 องศา ดังนั้นในการรับข้อมูลที่ถูกรับ จึงต้องมีการเลื่อนมุมเฟสคืนเท่ากับค่ามุมที่คำนวณได้ โดยผลจากการแก้ไขการเลื่อนมุมเฟสจะมีลักษณะดังภาพที่ 52



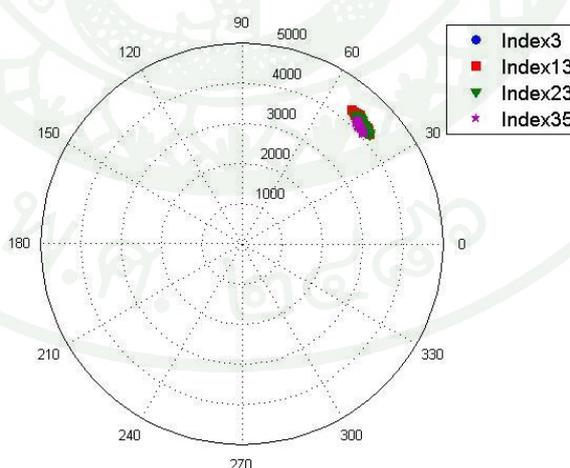
ภาพที่ 52 ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมุมเฟส เมื่อส่งค่ามุมเฟส 45 องศาให้กับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3 และ 35

หากนำค่าที่ได้รับจากภาครับทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35 ของทั้ง 32 สัญลักษณ์ข้อมูลมาเขียนเป็นกราฟ จะได้ดังภาพที่ 53



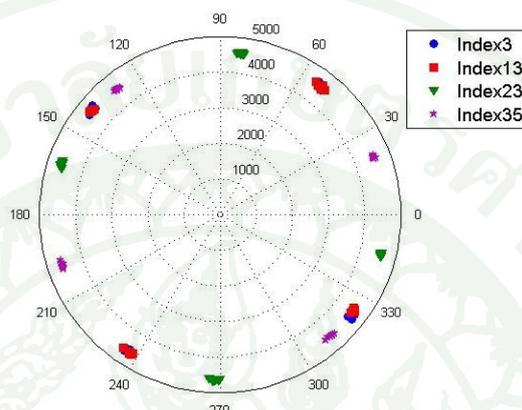
ภาพที่ 53 มุมเฟสที่ได้รับจากภาครับของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35 เมื่อส่งค่ามุมเฟส 45 องศา

เมื่อทำการเลื่อนมุมเฟสคืนเท่ากับค่ามุมที่คำนวณได้ตามสมการที่ 13 จะได้ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมุมเฟสจะมีลักษณะดังภาพที่ 54



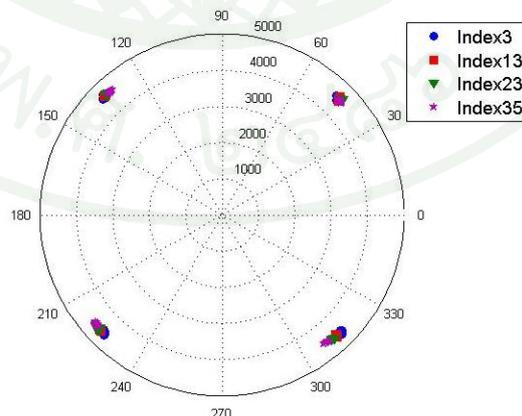
ภาพที่ 54 ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมุมเฟส เมื่อส่งค่ามุมเฟส 45 องศาให้กับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35

3.3 จากการทดสอบส่งสัญญาณข้อมูล ส่งสัญญาณข้อมูลที่สร้างขึ้นจากโดเมนความถี่ มุมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา ด้วยโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นรับด้วย โปรแกรมของภาครับ หากนำค่าที่ได้ทั้งส่วนจริง และส่วนจินตภาพของของสัญญาณพาหะย่อย ดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35 ของทั้ง 32 สัญลักษณ์ข้อมูลมาเขียนเป็นกราฟ จะได้ดังภาพที่ 55



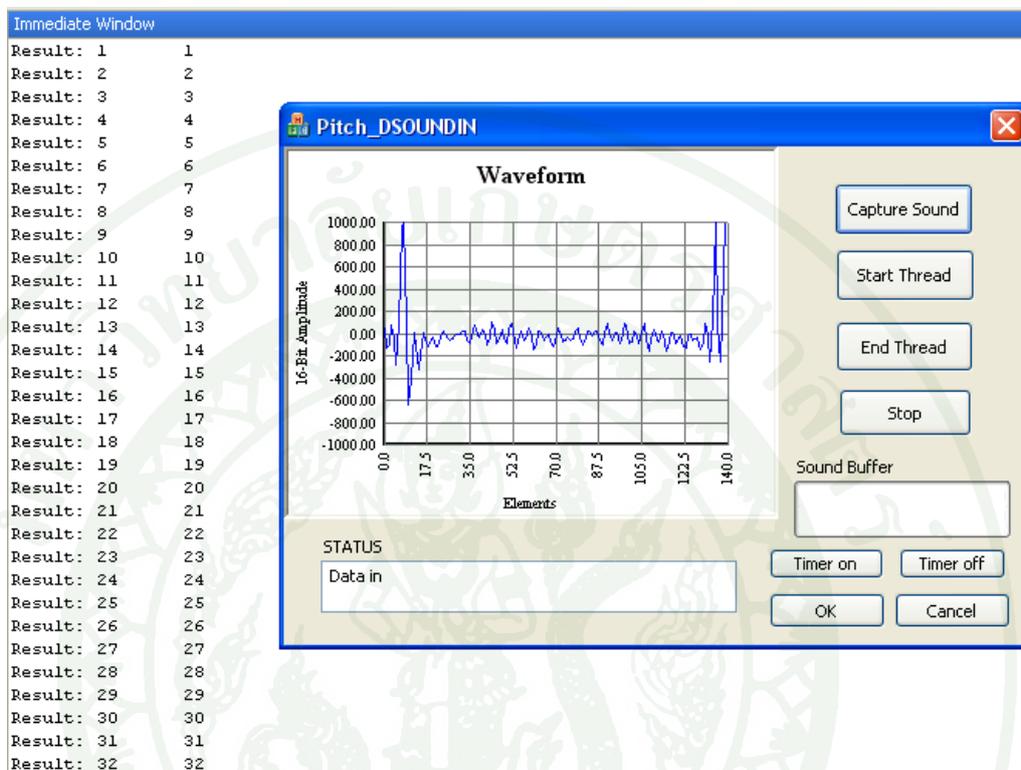
ภาพที่ 55 มุมเฟสที่เกิดจากค่าที่ได้รับจากภาครับของสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35 เมื่อส่งค่ามุมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา

เมื่อทำการเลื่อนมุมเฟสคืนเท่ากับค่ามุมที่กำหนดได้ตามสมการที่ 13 จะได้ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมุมเฟสจะมีลักษณะดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 ผลจากการแก้ไขการเลื่อนมุมเฟส เมื่อส่งค่ามุมเฟส 45 องศา 135 องศา 225 องศา และ 315 องศา ให้กับสัญญาณพาหะย่อยดัชนีที่ 3, 13, 23 และ 35

3.4 จากการทดสอบ ส่งสัญญาณข้อมูล ที่สร้างขึ้นจากตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึง 32 ด้วยโปรแกรมของภาคส่ง จากนั้นรับด้วยโปรแกรมของภาครับ ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 74



ภาพที่ 57 ตัวเลขและสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านกระบวนการรับของภาครับแล้ว

จากภาพที่ 74 จะเห็นได้ว่า โปรแกรมของภาครับสามารถรับข้อมูลดิจิทัลซึ่งคือตัวเลข 1 ถึง 32 มาได้อย่างถูกต้อง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การดำเนินงานวิจัยนี้ เป็นการปรับปรุงและพัฒนาการส่งข้อมูลผ่านทางช่องสัญญาณเสียงจากระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว การส่งข้อมูลในระบบเดิมใช้วิธีการมอดูเลตแบบ BPSK ซึ่งจากการทดลองส่งข้อมูลที่มีลักษณะเป็นภาพนิ่ง โดยส่งผ่านการกระจายเสียงระบบ FM ที่ความถี่ที่ใช้งานทั่วไปพบว่าสามารถรับส่งได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดและมีอัตราบิตข้อมูลสัมฤทธิ์อยู่ที่ 9.49 กิโลบิตต่อวินาที

สำหรับงานวิจัยนี้ ทำการเปลี่ยนวิธีการมอดูเลตจากแบบ BPSK เป็นแบบ QPSK ทำให้อัตราในการส่งข้อมูลเพิ่มเป็นสองเท่า ซึ่งมีค่าเป็น 18.97 กิโลบิตต่อวินาที และสามารถใช้งานได้บนระบบปฏิบัติการ Windows โดยไม่จำเป็นต้องใช้งานบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดกับงานในลักษณะที่หลากหลาย

งานวิจัยนี้ครอบคลุมการทดสอบการส่งข้อมูลด้วยสายสัญญาณ ไม่รวมการออกอากาศในระบบเอฟเอ็ม และมีข้อจำกัดคือ สามารถรับสัญญาณได้เพียงครั้งละ 1 กรอบสัญญาณ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในขั้นต่อไป คือ การนำโปรแกรมนี้ออกไปพัฒนาบนอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลง เช่น คอมพิวเตอร์แบบพกพา สมาร์ทโฟน หรืออุปกรณ์ระบบสมองกลฝังตัวอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานเทียบเท่าคอมพิวเตอร์ทั่วไป เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างแพร่หลาย และเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชนเทพ แซ่โก้ว. 2552. การมอดูเลตสัญญาณ (Signal Modulation). แหล่งที่มา: <http://tanathep014.blogspot.com/2009/11/signal-modulation-2-1-modulation.html>, 21 เมษายน 2553.
- ธราดล โกมลมิศร์. 2547. การสื่อสารดิจิทัลแบบแบนด์พาส. Principles of Communications. แหล่งที่มา: http://www.doe.eng.cmu.ac.th/~tharadol/teach/ee341/text/doc_4_4.pdf, 21 เมษายน 2553.
- พงษ์ศักดิ์ สุ่มพันธ์ไพบูลย์. 2544. หลักการวางแผนเครือข่าย Synchronization. Computers & Electronics World. แหล่งที่มา: <http://www.cewmedia.com/article/171/%CB%C5%D1%A1%A1%D2%C3%C7%D2%A7%E1%BC%B9%E0%A4%C3%D7%CD%A2%E8%D2%C2Synchronization.pdf>, 21 เมษายน 2553.
- พรทิพย์ จิตติเสถียรพร. 2549. การส่งข้อมูลดิจิทัลผ่านการออกอากาศแบบ FM. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วารดล วิภิญญะธนี. 2552. การส่งข้อมูลด้วยวิธี OFDM ผ่านทางช่องสัญญาณเสียง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุชาติ กังวารจิตต์. 2532. หลักการทำงานเครื่องส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอชเอนการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- Aarssen, R. 1996. ซอฟต์แวร์ของการส่ง Slow Scan TV (SSTV). Available Source: <http://www.kent.net/ve3rdn/software.html>, April 21, 2010.
- Casas, E.F. and C., Leung. 1991. OFDM for Data Communication Over Mobile Radio FM Channels-Part I: Analysis and Experimental Results, pp.783-793. **IEEE Transactions on Communications, Vol 39, No. 5**

- Casas, E.F. and C., Leung. 1992. OFDM for Data Communication Over Mobile Radio FM Channels-Part II: Performance Improvement, pp. 680-683. **IEEE Transactions on Communications, Vol 40, No. 4.**
- Dasrath, S. 2002. **Introduction to OFDM.** Available Source: <http://www.pages.drexel.edu/~sd65/ofdm/index/introduction.htm>, April 21, 2008.
- Lathi, B.P. 1998. **Modern Digital and Analog Communication systems.** 3rd Edition, Oxford University Press, New York.
- Morelos-Zaragoza, R.H. 2002. **Encoder/decoder for the binary (23,12,7) Golay code.** Available Source: <http://www.eccpage.com/golay23.c>, April 21, 2010.
- Chittisathainporn, P., P. Chutivisut and W. Chongburee. 2010 A Digital Image Broadcasting over Stereo FM System. **The International Conference on Information and Communication Technology for Embedded System.**
- T.Pattimaporn Nudee. 2010. **การมอดูเลตสัญญาณ (Signal Modulation).** Available Source: <http://kikkokjung.multiply.com/journal/item/8>, December 15, 2010.
- Turbo blogsite. 2010. **Quadrature phase-shift keying (QPSK) Modulation.** Available Source: <http://turboblogsite.com/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation.html>, April 22, 2010.
- Wang, C., D. Sklar and D. Johnson. **Forward Error-Correction Coding.** Available Source: <http://www.aero.org/publications/crosslink/winter2002/04.html>, April 22, 2010.
- Witnben, A.W. 1992. An Efficient Baseband Modem Technique for Data Transmission Over Analog FM Links, pp. 105-113. **IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 41, No. 2.**

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวพิชชาภรณ์ ชูติวิสุทธิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 26 สิงหาคม 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรพัฒนาโซลูชั่นบ้านและอาคาร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท เอสซีจี ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง จำกัด
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	Ekarat Award of Industrial Award for Outstanding Engineering Project in 2009
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-