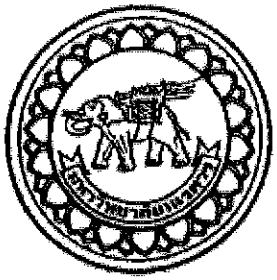


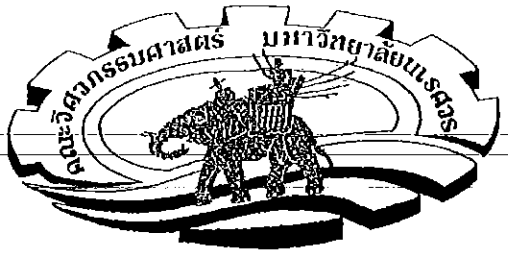
เครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย

WIRELESS DIGITAL SIGNAL TRANSMITTER AND RECEIVER DEVICES

นายอิสระพงศ์ สายดวงแก้ว รหัส 46380319

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 25 พ.ค. 2553
เลขทะเบียน 1500 4987
เลขเรียกหนังสือ วิ ว6ส ก 2551
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2551



ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน เครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย

ผู้ดำเนินโครงงาน นายอิสระพงศ์ สายดวงแก้ว รหัส 46380319

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2551

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ

(ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

.....กรรมการ

(ดร.ชัยรัตน์ พินทอง)

หัวข้อโครงงาน	เครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายอิสระพงศ์ สายดวงแก้ว รหัส 46380319
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ทำการทดลองส่งและรับสัญญาณดิจิตอลด้วยเครื่องส่งและรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สายโดยอาศัยโมดูลคลื่นวิทยุสำหรับเชื่อมโยงแบบไร้สาย ซึ่งระยะทางที่ส่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวโมดูล ตัวโครงงานจะทำการออกแบบเพื่อเข้ารหัสสัญญาณและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งและรับสัญญาณ โดยข้อมูลที่ส่งจะถูกลดความเร็วของข้อมูลลงครึ่งหนึ่งด้วยการแทนข้อมูลทีละ 2 บิตด้วยสัญญาณ 1 ระดับ เรียกว่าเป็นการมอดูเลตแบบ 4-ASK ซึ่งจะทำให้อัตราเร็วของข้อมูลที่ส่งนั้นสูงขึ้น 2 เท่า

Project Title	Wireless Digial Signal Transmitter and Receiver Devices
Name	Mr. Issarapong Saidoungkaew ID.46380319
Project Advisor	Dr.Ackraphan Wongkanghae
Major	Electrical Engineering
Department	Electrical and Computer Engineering
Academic Year	2008

.....

ABTRACT

This project is to test the transmitting and receiving of digital data via the wireless digital signal transmitter and receiver devices. By using the RF modules to operate the transmission, the distance for transmission depends on the performance of the module. The project will design to encode the data and increase the transmission efficiency. The speed of transmitting data can be reduced to half speed by substituting 2-bit data by one level known as 4-ASK modulation, thus increasing the speed of digital data to double.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากหลายๆท่านด้วยกัน ผู้จัดทำขอถือโอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณ

ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการสอบโครงงานทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในการทำโครงงานนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการทดลองตลอดจนคำปรึกษาชี้แนะแนวทางต่างๆ เกี่ยวกับโครงงานนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆนิสิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าชั้นปีที่ 4 และน้องๆนิสิตทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกด้านเสมอมา

ท้ายนี้ผู้จัดทำโครงงานขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยสนับสนุนในทุกๆด้านและให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ผู้จัดทำโครงงาน

นายอิสระพงศ์ สายดวงแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญ(ต่อ)..... จ
สารบัญตาราง..... ฉ
สารบัญรูป..... ช

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน..... 1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน..... 1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน..... 2
1.6 งบประมาณ..... 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน
2.1 การสื่อสารแบบดิจิตอล..... 4
2.2 การสื่อสารแบบอนาลอก..... 15

บทที่ 3 ขั้นตอนและการออกแบบเครื่องรับส่งสัญญาณ
3.1 แนวคิดในการออกแบบ..... 20
3.2 ลักษณะโดยรวมของโครงงาน..... 20
3.3 การออกแบบวงจรและการทำงานแต่ละส่วน..... 21

บทที่ 4 ผลการทดสอบ
4.1 ภาพรวมของการทดสอบ..... 30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาของภาคส่ง.....30
4.3 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ a-b.....32
4.4 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ.....32
4.5 การส่งและรับสัญญาณด้วยโมดูลสำหรับเชื่อมโยงแบบไร้สาย.....33
4.6 การทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....33
4.7 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ a-b ของภาครับ.....35
4.8 การสร้างสัญญาณนาฬิกาของข้อมูลทางด้านภาครับ.....35
4.9 การทดสอบวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ.....36

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทำโครงงาน.....37
5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการทำโครงงาน.....37
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาโครงงาน.....38

เอกสารอ้างอิง.....40
ภาคผนวก.....41
ประวัติผู้เขียนโครงงาน.....48

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 การแทนสัญญาณ a-b ด้วยระดับสัญญาณทั้ง 4 ระดับ.....26

3.2 การเปรียบเทียบสัญญาณและการเทียบกลับเป็นสัญญาณ a-b.....28

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ระบบการส่งและรับสัญญาณดิจิตอล.....5

2.2 ระบบการส่งและรับสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์.....5

2.3 สัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์แบบใช้ 1 สัญลักษณ์ แทน 1 บิต.....6

2.4 แพทเทินรูปดวงตาของสัญญาณไบโพล่าร์ NRZ.....7

2.5 แพทเทินรูปดวงตา.....7

2.6 สัญญาณพัลส์แบบ ASK และ 4-ASK.....9

2.7 สัญญาณพัลส์แบบ FSK และ 4-FSK.....10

2.8 สัญญาณพัลส์แบบ PSK และ 4-PSK.....11

2.9 กระบวนการ โคฮีเรนท์ดีเทคชันสัญญาณเอเอสเค.....12

2.10 ตัวอย่างการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอสเคด้วยวิธีเอ็นเวลโลปดีเทคชัน.....13

2.11 แมทช์ฟิลเตอร์ของกระบวนการ โคฮีเรนท์ดีเทคชันสัญญาณเอฟเอสเค.....13

2.12 แมทช์ฟิลเตอร์ของกระบวนการเอ็นเวลโลปดีเทคชันสัญญาณเอฟเอสเค.....14

2.13 กระบวนการคอร์รีเลชันดีเทคชันสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์.....14

2.14 กระบวนการดีเทคชันสัญญาณพีเอสเค.....14

2.15 กระบวนการสร้างสัญญาณนาฬิกาด้วยวงจรเฟสล็อกลูป.....15

2.16 สเปกตรัมและรูปคลื่นสัญญาณ DSB-LC.....16

2.17 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อค่าดัชนีการมอดูเลตมากกว่า 1.....17

2.18 การมอดูเลตแบบ DSB-LC ที่ค่าดัชนีการมอดูเลตต่างๆ.....17

2.19 การดีมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC.....19

2.20 การดีมอดูเลตแบบเอ็นเวลโลปดีเทคชัน.....19

3.1 กระบวนการรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบ 4-ASK.....21

3.2 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา.....22

3.3 แนวคิดในการสร้างสัญญาณ a-b.....23

3.4 ตัวอย่างของการสร้างสัญญาณ a-b จากข้อมูล.....24

3.5 วงจรสร้างสัญญาณ a-b.....24

3.6 การแปลงสัญญาณ a-b เป็นสัญญาณ 4 ระดับ.....25

3.7 วงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ.....25

3.8 การแปลงสัญญาณ 4 ระดับให้เป็นสัญญาณ.....28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	การสร้างข้อมูลจากสัญญาณ a-b	29
4.1	การสร้างสัญญาณพัลส์จากข้อมูล	31
4.2	การสร้างสัญญาณนาฬิกาของวงจรเฟสล็อกลูป	31
4.3	การสร้างสัญญาณ a-b	32
4.4	สัญญาณ 4 ระดับของภาคส่ง	33
4.5	สัญญาณ 4 ระดับของภาคส่งและภาครับ	34
4.6	สัญญาณ 4 ระดับของภาครับและสัญญาณ X	34
4.7	สัญญาณ Y และ Z	35
4.8	สัญญาณ a และสัญญาณ b ของภาครับ	36
4.9	สัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมวงจรเฟสล็อกลูป	36
4.10	สัญญาณนาฬิกาภาครับและสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์	37

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมได้มีการพัฒนาให้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การสื่อสารด้วยระบบดิจิตอลถูกนำมาใช้แทนการสื่อสารด้วยระบบอนาลอกด้วยข้อดีกว่าหลายประการ เช่น ข้อได้เปรียบเรื่องของสัญญาณรบกวน ความผิดพลาดในการสื่อสาร การทวนสัญญาณ และข้อได้เปรียบในเรื่องของอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูล

และเนื่องจากการสื่อสารแบบใช้สายส่ง ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณในการเดินสายและถูกจำกัดในเรื่องของขอบเขตพื้นที่เฉพาะที่สายไปถึงเท่านั้น จึงได้มีการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายขึ้นมาเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้สายและพัฒนาของระบบสื่อสารให้เป็นการสื่อสารไร้พรมแดน

ปัจจุบันการสื่อสารแบบไร้สายได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบสื่อสารและมีการประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันอย่างกว้างขวาง เช่น โทรศัพท์ไร้สาย อินเตอร์เน็ตไร้สาย เป็นต้น การพัฒนาระบบสื่อสารดังกล่าวในปัจจุบันจะมุ่งเน้นไปในเรื่องของความเร็วในการสื่อสารไร้สายและระยะทางในการรับส่งข้อมูล เพื่อให้ได้ความเร็วข้อมูลที่สูงขึ้นและระยะทางในการสื่อสารที่ไกลขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรในการสื่อสารซึ่งก็คือพลังงานในการส่งและแบนวิดธ์ที่มีจำกัด

โครงงานได้แนวคิดมาจากการพัฒนาการสื่อสารไร้สายดังกล่าว เพื่อสร้างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สายขึ้นมา เพื่อทดลองส่งและรับสัญญาณหรือข้อมูลแบบดิจิตอล สำหรับเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการสื่อสารแบบไร้สายซึ่งในปัจจุบันมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาระบบการสื่อสารแบบดิจิตอล
2. เพื่อศึกษาระบบการรับส่งสัญญาณวิทยุแบบไร้สาย
3. เพื่อสร้างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและสร้างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สายด้วยคลื่นวิทยุโดยมีขอบเขตของโครงงานดังนี้

1. สามารถสร้างเครื่องส่งและรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สายได้
2. โครงงานสามารถส่งและรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สายได้
3. สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาในการประยุกต์ใช้กับระบบการส่งข้อมูลด้วยสัญญาณควบคุมต่างๆได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

รายละเอียด	ปี 2550			ปี 2551								
	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย
1. รวบรวมข้อมูล	←	—	→									
2. ศึกษาการทำงานของเครื่องรับและเครื่องส่ง				←	—	—	→					
3.จัดทำอุปกรณ์และทำการทดลองเครื่องรับและเครื่องส่ง								←	—	→		
4. จัดทำรายงานและสรุปผลการทำงาน											←	→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1. เข้าใจถึงหลักการส่งและรับสัญญาณที่เป็นแบบดิจิตอล
2. เข้าใจถึงหลักการส่งและรับสัญญาณวิทยุแบบไร้สาย
3. เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนาระบบสื่อสารแบบไร้สายได้

1.6 งบประมาณ

1. ค่าอุปกรณ์ในการทำโครงงาน	9,000	บาท
2. ถ่ายเอกสารและค่าเข้าเล่มโครงงานฉบับสมบูรณ์	500	บาท
3. ค่าหนังสือ	300	บาท
4. ค่าพิมพ์เอกสาร	200	บาท
รวมเป็นเงิน (หนึ่งหมื่นบาทถ้วน)	10,000	บาท

หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

2.1 การสื่อสารในระบบดิจิตอล

การสื่อสารในระบบดิจิตอลคือ การใช้สัญญาณดิจิตอลในการสื่อสารซึ่งต่างจากการสื่อสารในระบบอนาลอกที่ใช้สัญญาณอนาลอก โดยการใช้สัญญาณดิจิตอลนั้นมีข้อได้เปรียบกว่าสัญญาณอนาลอก คือ

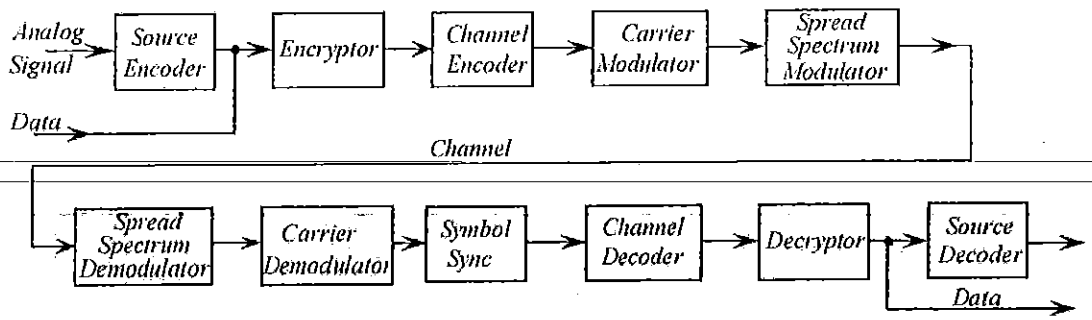
1. สัญญาณดิจิตอลมีระดับที่แน่นอน มีอัตราการได้สัญญาณกลับคืนที่ดีกว่า
2. สัญญาณดิจิตอลใช้กับวงจรดิจิตอลซึ่งมีราคาถูกได้
3. การทนต่อสัญญาณรบกวนที่ดีกว่า
4. การจัดการสัญญาณทำได้ง่ายกว่า

แต่การส่งสัญญาณในระบบดิจิตอลต้องการแบนด์วิดธ์สูงกว่าระบบอนาลอกและต้องการซิงโครไนซ์ระหว่างด้านส่งกับด้านรับรวมถึงข่าวสารที่ต้องการส่งต้องแปลงให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิตอลก่อนส่งและแปลงกลับทางด้านรับ

รูปแบบการส่งและรับสัญญาณดิจิตอลแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งส่งได้ทั้งสัญญาณอนาลอก และสัญญาณดิจิตอล โดยจะมีการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลก่อนในส่วนของ Source Encoder จากนั้นจะจัดการสัญญาณเพื่อความปลอดภัยหรือการเข้ารหัสในส่วนของ Encrypter แล้วผ่านสัญญาณเข้าสู่ Channel Encoder เพื่อเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณที่อาจเป็นการลดข้อมูลเพื่อให้ส่งสัญญาณได้รวดเร็ว หรือการเปลี่ยนสัญญาณให้มีความสามารถตรวจสอบความผิดพลาดได้รวมถึงการแก้ไขข้อผิดพลาดได้ ซึ่งการส่งลักษณะนี้เรียกว่า การส่งสัญญาณดิจิตอลแบบเบสแบนด์ และถ้ามีการแทนสัญญาณดิจิตอลด้วยสัญญาณอนาลอกหรือการมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลกับสัญญาณพาหะอนาลอกโดย Carrier Modulator จะเรียกว่า การส่งสัญญาณดิจิตอลแบบแบนด์พาส

สำหรับ Spread Spectrum Modulator เป็นการมอดูเลตเพื่อป้องกันการรับสัญญาณโดยที่ผู้ที่ไม่ประสงค์ให้รับ ทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัยสูงแต่ก็จะยุ่งยากมากขึ้น

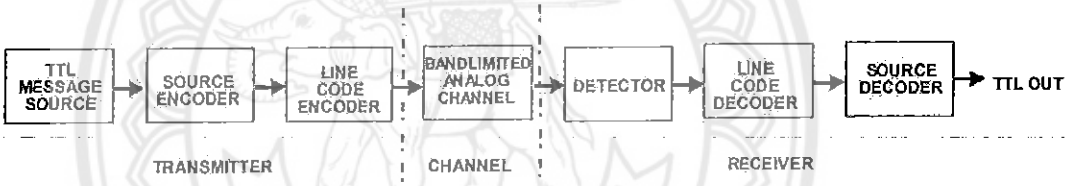
ในทางด้านรับจะเป็นกระบวนการย้อนกลับเพื่อที่จะสอดคล้องกับที่ส่งด้านส่งแต่ก็มีส่วนสำคัญที่เพิ่มขึ้นคือ Synchronization เพื่อให้การตรวจจับสัญญาณสอดคล้องกับด้านส่ง ส่วนนี้นับว่าเป็นส่วนที่สำคัญมากในระบบการส่งสัญญาณดิจิตอล



รูปที่ 2.1 ระบบการส่งและรับสัญญาณดิจิตอล

2.1.1 การส่งสัญญาณดิจิตอลแบบเบสแบนด์

การส่งสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์ คือ สัญญาณดิจิตอลที่ใช้สัญลักษณ์ไบนารี '0' และ '1' แทนข้อมูลที่ส่งไปในช่องสัญญาณในลักษณะขบวนพัลส์ ซึ่งข้อมูลในระบบดิจิตอลจะใช้คำว่า บิต (bit) ซึ่งมีรากศัพท์มาจาก binary digit และกลุ่มของข้อมูล 8 บิต เรียกว่า ไบต์ (byte) มีอัตราเร็วบิต $(R_B) = 1/T_B$ [bps] เมื่อ T_B เป็นคาบของบิต

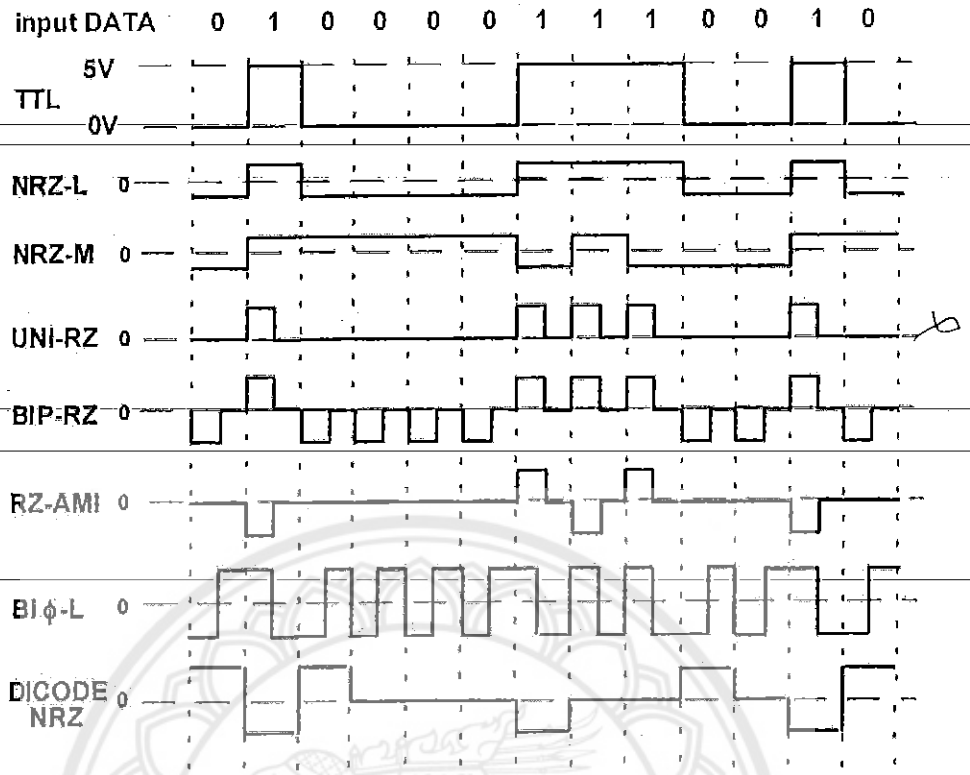


รูปที่ 2.2 ระบบการส่งและรับสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์

สัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์แบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยเป็นสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์แบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์ แทน 1 บิต

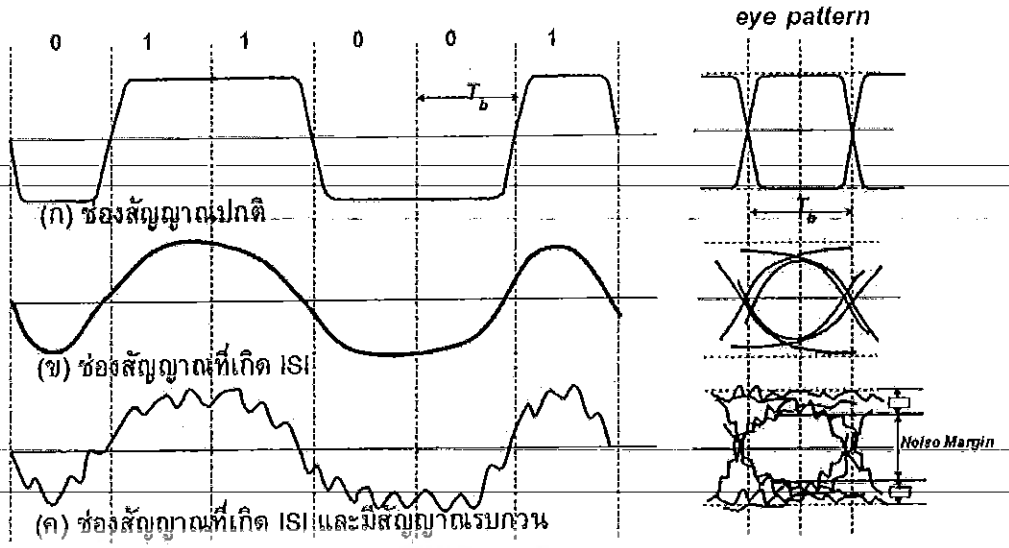
การสร้างสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์นี้เรียกว่า ไลน์ โค้ดดิง (line coding) ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์แทน 1 บิต และแบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์แทนหลายชนิด โดยสัญลักษณ์ หมายถึงสัญญาณที่มีค่าคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญลักษณ์เรียกว่า บอดเรต (baud rate) ซึ่งต่างจากอัตราการเปลี่ยนแปลงข้อมูลหรือบิตเรต (bite rate) ถ้าทำไลน์ โค้ดดิงแบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์แทน 1 บิต ก็จะได้บอดเรตเท่ากับบิตเรต แต่ถ้าทำไลน์ โค้ดดิงแบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์แทนหลายบิตก็จะได้บอดเรตน้อยกว่าบิตเรตเสมอ กรณีใช้สัญญาณที่มี L ระดับจะแทนข้อมูลได้เท่ากับ $\log_2(L)$ บิตและให้ D เป็นช่วงกว้างของ 1 สัญลักษณ์ บอดเรตจะเป็น 1/D และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างบิตเรต (R_B) และบอดเรต ดังสมการที่ 2-1

$$R_B = 1/D \log_2(L) = R \log_2 (L) \qquad \text{[bps]} \qquad \textbf{(2-1)}$$

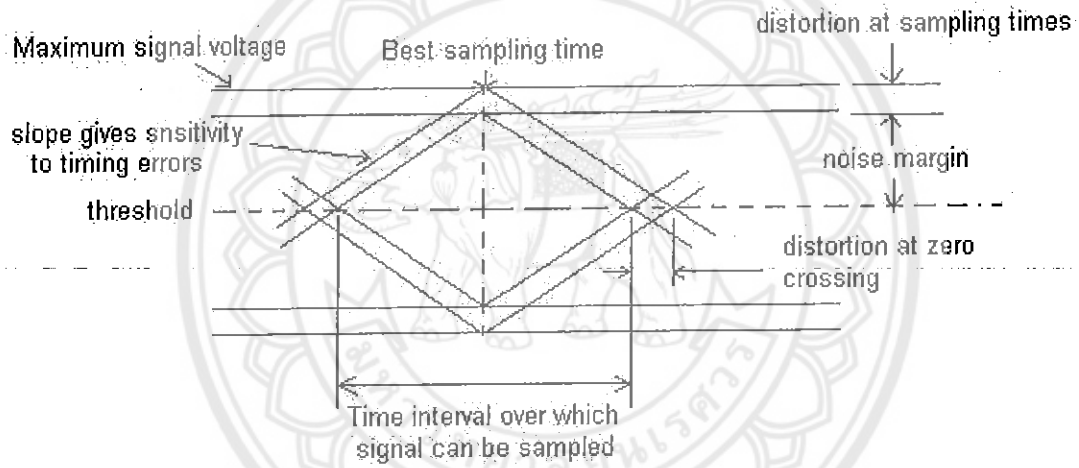


รูปที่ 2.3 สัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์แบบใช้ 1 สัญลักษณ์ แทน 1 บิต

ในกรณีการส่งสัญญาณดิจิตอลแบบเบสแบนด์ จะมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณจากการรบกวนกันระหว่างสัญลักษณ์และเฟสจิตเตอร์ ทำให้ขบวนพัลส์มาซ้อนๆกันให้เห็นเป็นแพทเทินรูปดวงตา (Eye Pattern) ขึ้นมาดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 ซึ่งเมื่อทำการเขียนขอบเขตบริเวณต่างๆ จะได้ตามรูปที่ 2.5 โดยบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นตรงนั้นเป็นบริเวณที่มีสัญญาณปรากฏอยู่ ส่วนที่เป็นแถบอยู่ด้านบนสุดและล่างสุดเป็นผลกระทบจากการรบกวนกันระหว่างสัญลักษณ์ (ISI: inter symbol interference) ส่วนที่เป็นแถบอยู่ตรงกลางเกิดจากเฟสจิตเตอร์ แพทเทินรูปดวงตาใช้บ่งบอกคุณสมบัติของช่องสัญญาณ โดยแพทเทินรูปดวงตาที่เปิดกว้างทั้งแนวตั้งและแนวนอนคือ คุณสมบัติที่ดีของช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.4 แพทเทินรูปดวงตาของสัญญาณไบโพล่าร์ NRZ



รูปที่ 2.5 แพทเทินรูปดวงตา

2.1.2 การส่งสัญญาณดิจิตอลแบบแบนด์พาส

การส่งสัญญาณดิจิตอลแบบเบสแบนด์ นั้นจะส่งผ่านสายนำสัญญาณแต่ถ้าต้องการส่งเข้าไปในช่องสัญญาณอื่นที่สัญญาณดิจิตอลนั้นผ่านไม่ได้ เช่น ชั้นบรรยากาศจึงต้องจัดการกับสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์นั้น โดยการมอดูเลตสัญญาณกับคลื่นพาหะที่เหมาะสม เรียกการส่งสัญญาณดิจิตอลแบบนี้ว่า การส่งสัญญาณดิจิตอลแบบแบนด์พาส ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้อย่างกว้างขวางในโครงข่ายสื่อสารโทรศัพท์ และการสื่อสารดาวเทียม

การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอล เป็นการนำสัญญาณดิจิตอลที่ต้องการส่งไปเปลี่ยนแปลงข่าวสารในคลื่นพาหะ ซึ่งอาจเป็นความถี่ ขนาด หรือเฟสของสัญญาณซึ่งสามารถใช้สัญญาณ 1 สัญญาณหรือ 1 สัญลักษณ์แทนข้อมูลดิจิตอล 1 บิต หรือมากกว่า 1 บิต ได้เช่นเดียวกับการส่ง

สัญญาณดิจิตอลแบบเบสแบนด์ โดยถ้าใช้สัญญาณข้อมูล N บิตรูปร่างหรือข่าวสารของคลื่นพาหะจะมีได้อย่างน้อย 2^N แบบ

การพิจารณาการมอดูเลตแบบไหนมีประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดธ์เท่าไหร่นั้นดูได้จากอัตราข้อมูลที่สามารถส่งได้ต่อแบนด์วิดธ์ 1 Hz โดยวัดในรูปของประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดธ์ (Bandwidth efficiency : ηB) ตามสมการที่ 2-2

$$\eta B = \frac{R_B}{B_T} \quad \text{[bps/Hz]} \qquad \textbf{(2-2)}$$

โดย R_B เป็นอัตราข้อมูลที่ส่งได้ในช่องสัญญาณแบนด์วิดธ์ B_T Hz ดังนั้นในการมอดูเลตแบบเดียวกันที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหรือ บอดเรต เท่ากันแบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์แทน N บิตจะมีอัตราข้อมูลหรือบิตเรตเร็วกว่าแบบที่ใช้ 1 สัญลักษณ์แทน 1 บิตอยู่ N เท่าและถ้าความต้องการแบนด์วิดธ์ของกรณีแรกมากกว่ากรณีหลังไม่ถึง N เท่า ก็จัดได้ว่าการมอดูเลตแบบแรกมีประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดธ์ดีกว่าแบบหลัง หรือ η_B ของแบบแรกมากกว่าของแบบหลัง

การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์เข้ากับคลื่นพาหะที่เป็นสัญญาณแบบไซน์นั้น มีการเปลี่ยนแปลงข่าวสารของคลื่นพาหะอยู่ 3 ลักษณะหรือแบ่งเป็นการมอดูเลตสัญญาณดิจิตอล 3 แบบ คือ

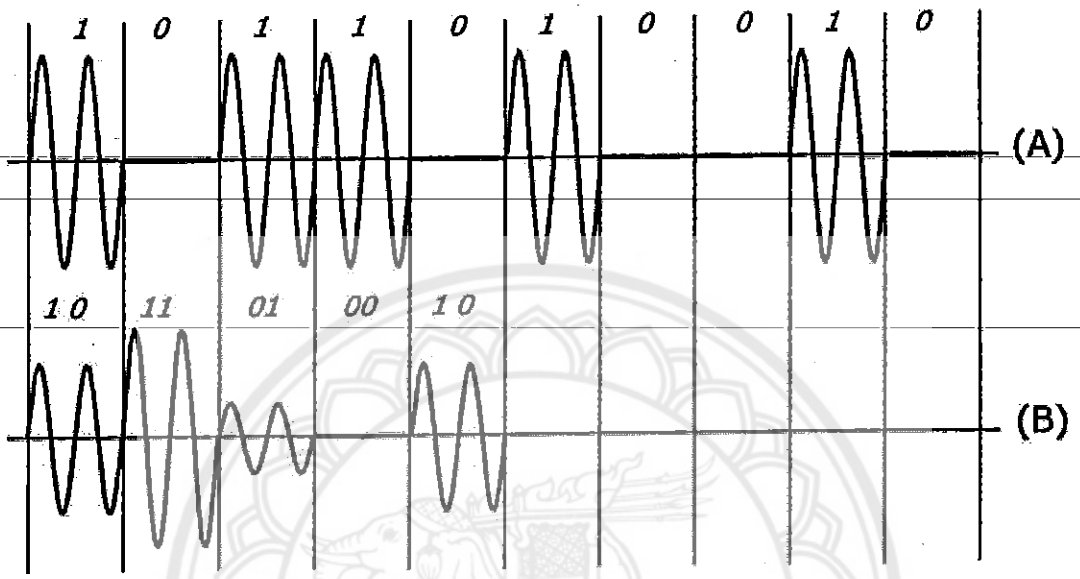
1. การมอดูเลตโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของคลื่นพาหะ (Amplitude Shift Keying : ASK)

การมอดูเลตแบบเอเอสเค เป็นการทำให้ขนาดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 ค่าหรือหลายๆค่าตามสัญญาณข้อมูลดิจิตอล ถ้าข้อมูลดิจิตอลเป็นแบบไบนารีอาจจะเรียกว่าโอโอเค (OOK : On Off Keying) ซึ่งขนาดของสัญญาณที่มอดูเลตแล้วจะเป็นพัลส์ของสัญญาณวิทยุ (RF) โดยรูปคลื่นของสัญญาณที่มอดูเลตแล้วสำหรับ 1 พัลส์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-3

$$\varnothing(t) = \begin{cases} A\sin\omega_c t & 0 < t \le T \\ 0 & other \end{cases} \qquad \textbf{(2-3)}$$

เมื่อพิจารณาเรื่องแบนด์วิดธ์ที่ใช้จะคล้ายกับสัญญาณเอเอ็ม (AM) ทั่วๆ ไป คือสเปกตรัมของการมอดูเลตแบบไบนารีเอเอสเค จะได้จากการย้ายสเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์ไปอยู่สองข้างของสเปกตรัมของคลื่นพาหะ ซึ่งแบนด์วิดธ์จะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณหรือบอดเรต (B_T=R=1/D) ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดธ์เท่ากับ 1 bps/Hz

กรณีของสัญญาณแบบเอ็มระดับ (M-ASK) คือการใช้ 1 สัญลักษณ์แทน $\log_2 M$ บิต จะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณคล้ายกับสัญญาณแบบ 2 ระดับมาก จึงประมาณแบนด์-วิดธ์ได้เท่ากัน ดังนั้นประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดธ์จึงเป็น $\log_2 M$ bps/Hz ซึ่งจะสูงกว่ากรณีของสัญญาณแบบ 2 ระดับ



รูปที่ 2.6 สัญญาณพัลส์แบบ ASK และ 4-ASK

2. การมอดูเลตโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาหะ (Frequency Shift Keying : FSK)

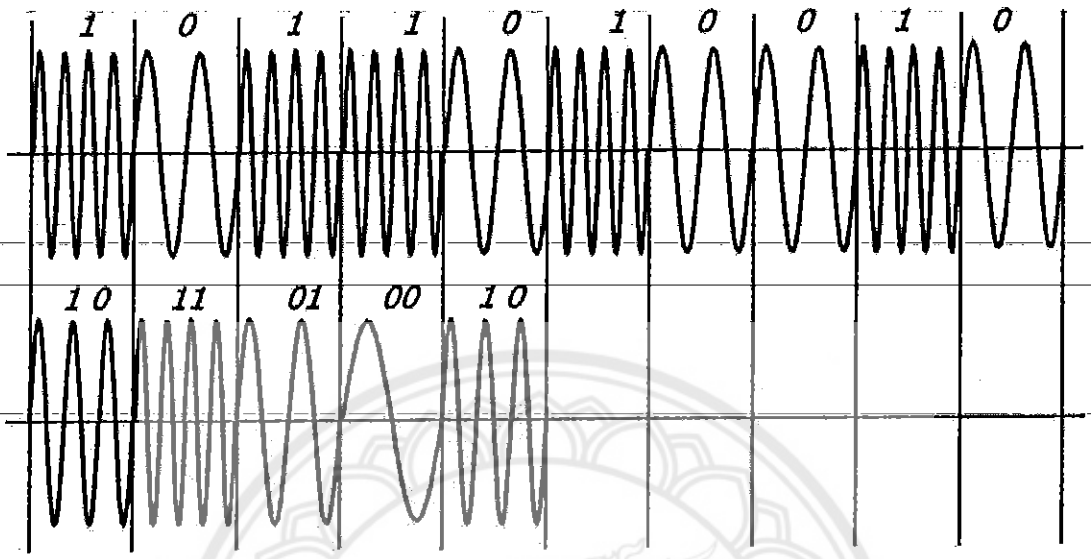
การมอดูเลตแบบเอฟเอสเค เป็นการทำให้ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 ค่าหรือหลายค่าตามสัญญาณข้อมูลดิจิตอลดังรูปที่ 2.7 ซึ่งในรูปที่ 2.7(a) เป็นรูปคลื่นสัญญาณ เอฟเอส-เคแบบอุดมคติโดยสามารถแยกพิจารณาว่าเป็นการรวมกันของสัญญาณเอเอสเค 2 สัญญาณที่มีความถี่พาหะต่างกันดังรูปที่ 2.7(b) และสามารถเขียนแทนสัญญาณเอฟเอสเคได้ดังสมการที่ 2-4

$$\varnothing(t) = \begin{cases} A\sin(n\omega_0 t) & 0 < t \le T \\ 0 & other \end{cases} \qquad \text{(2-4a)}$$

$$\varnothing(t) = \begin{cases} A\sin(n\omega_0 t) & 0 < t \le T \\ 0 & other \end{cases} \qquad \text{(2-4b)}$$

โดยที่แบนด์วิดธ์ของสัญญาณเอฟเอสเคเป็น $B_T \approx R_B$ เช่นเดียวกับกรณีของสัญญาณเอ-เอสเค ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์เป็น 1 bps/Hz ส่วนในกรณี M-FSK ซึ่งจะใช้

สัญญาณ M สัญญาณแทนข้อมูล $\log_2 M$ บิต จะมีค่าประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดธ์ที่สูงขึ้นเป็น $\frac{2\log_2 M}{M} bps/Hz$



รูปที่ 2.7 สัญญาณพัลส์แบบ FSK และ 4-FSK

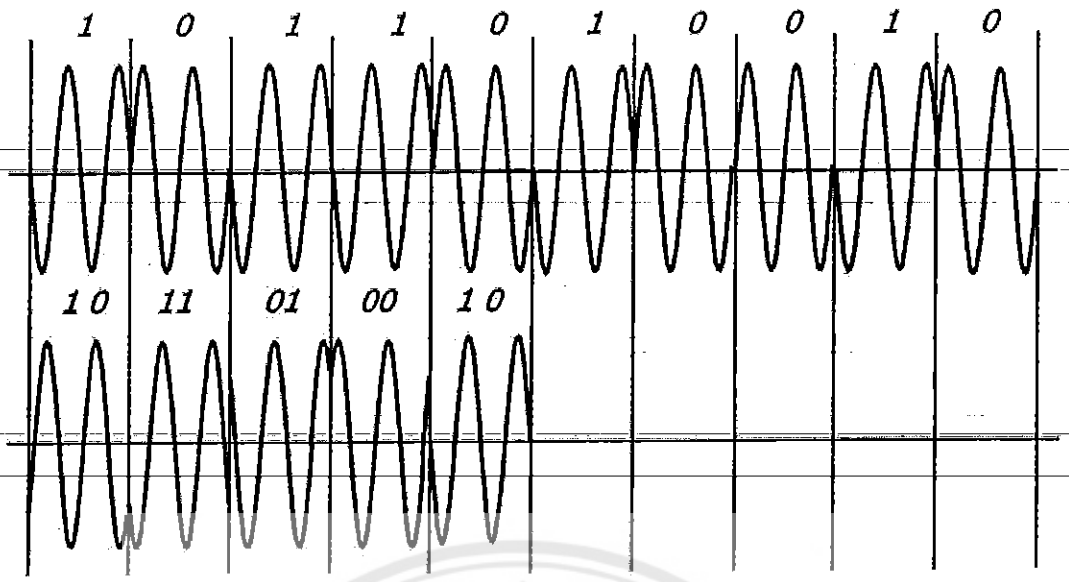
3. การมอดูเลตโดยการเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นพาหะ (Phase Shift Keying : PSK)

การมอดูเลตแบบพีเอสเค เป็นการทำให้เฟสของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 ค่า หรือหลายค่าตามสัญญาณข้อมูลดิจิตอล สำหรับแบบไบนารีสัญญาณจะมีเฟสเปลี่ยนไปมาระหว่าง 0 องศา และ 180 องศา เป็นวิธีการที่ง่ายและใช้บ่อย เรียกว่าพีอาร์เค (PRK : Phase Reversal Keying) สามารถเขียนแทนสัญญาณได้ตามสมการที่ 2-5

$$\varnothing_1(t) = A\sin\omega_c t \qquad (2\text{-}5a)$$

$$\varnothing_2(t) = -A\sin\omega_c t \qquad (2\text{-}5b)$$

ในกรณีของสัญญาณดิจิตอลแบบเอ็มระดับ เฟสของคลื่นพาหะจะถูกแบ่งออกเป็นเอ็มค่าเพื่อใช้แทนสัญญาณแต่ละระดับซึ่งอาจจะเป็น 4-PSK หรือ QPSK (Quaternary PSK) เฟสของพาหะจะถูกแบ่งเป็น 4 ค่าเป็นต้น



รูปที่ 2.8 สัญญาณพัลส์ PSK และ 4-PSK

เมื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณพีเอสเคจะเหมือนกับกรณีของสัญญาณเอเอสเค ยกเว้นตรงที่สัญญาณพีเอสเคไม่มีส่วนประกอบกระแสตรงหรือไม่มีสเปกตรัมของคลื่นพาหะ ดังนั้นแบนด์วิดธ์ที่ต้องการของสัญญาณพีเอสเคจึงเท่ากับสัญญาณเอเอสเคที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเท่ากันคือ $B_T \approx R$ และประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดธ์ก็จะเป็น $\log_2 M$ bps/Hz เช่นเดียวกัน แต่สัญญาณ M-PSK เมื่อ M มากขึ้น จะทำให้ระยะห่างระหว่างสัญญาณลดลง ซึ่งจะเป็นปัญหาในการตรวจจับสัญญาณเมื่อมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย

2.1.3 การดีมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลแบบแบนด์พาส

เมื่อทางภาคส่งทำการส่งสัญญาณดิจิตอลแบบแบนด์พาสไม่ว่าจะเป็นวิธีเอเอสเค เอฟเอสเคหรือพีเอสเค ทางภาครับจะต้องทำการดีเทคและดีมอดูเลตเอาสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์ออกจากคลื่นพาหะให้ได้และถูกต้องตามที่ทางภาคส่งส่งมาให้ ซึ่งการดีมอดูเลตนั้นโดยหลักการพื้นฐานแล้ววิธีการจะเหมือนกับกรณีของสัญญาณอนาลอก คือสามารถแยกกว้างออกได้เป็น 2 วิธีคือ การดีมอดูเลตแบบซิงโครนัสหรือโคฮีเรนท์ดีเทคชัน (Synchronous or coherence detection) กับการดีมอดูเลตแบบนอนโคฮีเรนท์หรือเอ็นเวลโลปดีเทคชัน (Non-coherence or envelope detection) ข้อแตกต่างของวิธีการทั้งสองคือ แบบโคฮีเรนท์ดีเทคชันจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าซึ่งทำให้ผลที่ได้ในเชิงของความน่าจะเป็นของการผิดพลาดที่ดีกว่า

การดีมอดูเลตแบบโคฮีเรนท์ดีเทคชัน

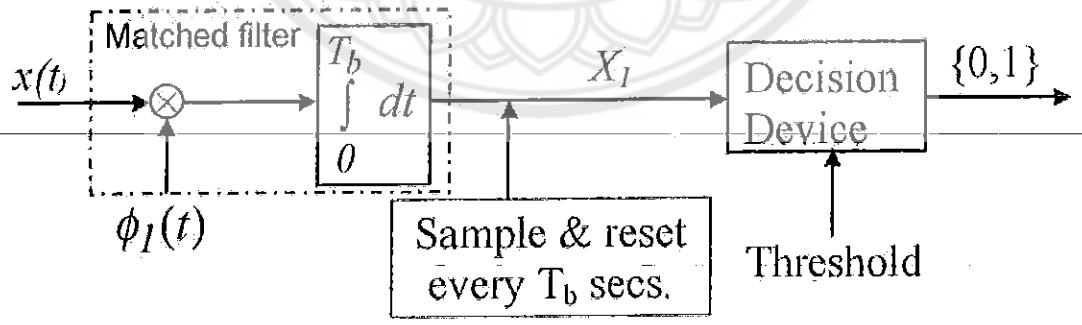
โคฮีเรนท์ดีเทคชันหรือซิงโครนัสดีเทคชันคือ วิธีการดีเทคสัญญาณโดยการใช้สัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์จะซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาหะทั้งทางความถี่และเฟส ซึ่งจากการที่ภาคส่งทำการมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลแบบเบสแบนด์มาแบบวิธีเอเอสเค เอฟเอสเค หรือ พีเอสเค นั้นในการดีเทคและดีมอดูเลตก็จะมีวิธีการเฉพาะลงไปตามวิธีการมอดูเลต

การดีมอดูเลตแบบนอนโคฮีเรนท์ดีเทคชัน

นอนโคฮีเรนท์ดีเทคชันหรือเอ็นเวลโลปดีเทคชัน ในกรณีของสัญญาณดิจิตอลนั้นโดยหลักการก็จะเหมือนกับกรณีของสัญญาณอนาลอกคือ มีการกรองเอาเอ็นเวลโลปของสัญญาณและนำไปผ่านวงจรตัดสินใจอีกครั้งว่าสัญญาณที่ได้เป็นข้อมูลดิจิตอลในลักษณะใด ซึ่งวิธีการดีมอดูเลตก็จะแตกต่างออกไปตามรูปแบบของการมอดูเลตเช่นเดียวกับกรณีโคฮีเรนท์ดีเทคชัน

การดีมอดูเลตสัญญาณเอเอสเค

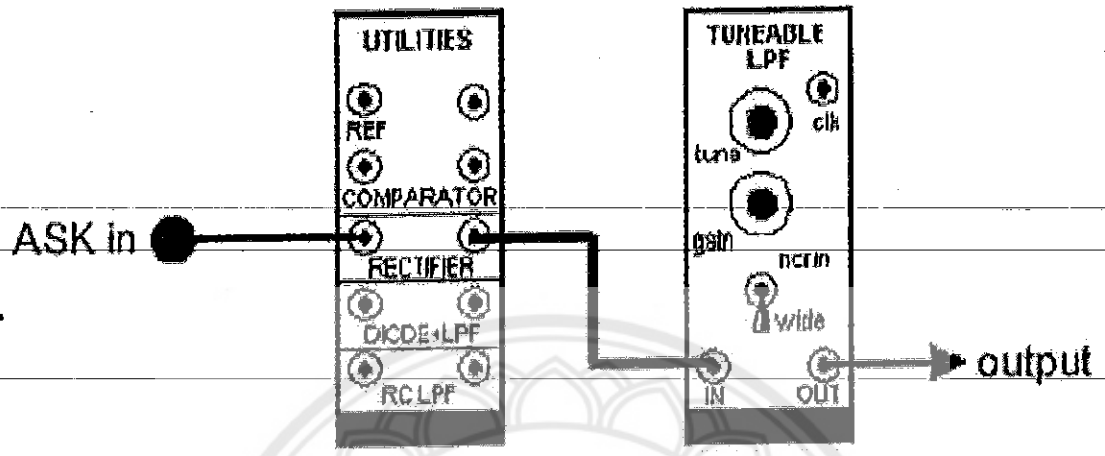
ในกรณีของโคฮีเรนท์ดีเทคชันจะใช้โลคอลออสซิลเลเตอร์ที่มีความถี่เท่ากับคลื่นพาหะโดยมีการจัดให้ซิงโครนัสกับสัญญาณที่เข้ามาและทำกระบวนการคอร์รีเลชันดีเทคชัน (Correlation detection) สัญญาณซิงโครไนซ์บิตจะกระตุ้นวงจรสุ่มตัวอย่างให้ทำงานและรีเซ็ทวงจรอินทิเกรตตามเงื่อนไขของการซิงโครไนซ์ระหว่างความถี่คลื่นพาหะกับอัตราข้อมูล สัญญาณซิงโครไนซ์บิตสามารถสร้างมาจากออสซิลเลเตอร์ตัวเดียวกับโลคอลออสซิลเลเตอร์ได้ กระบวนการโคฮีเรนท์ดีเทคชันแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการโคฮีเรนท์ดีเทคชันสัญญาณเอเอสเค

ในกรณีของเอ็นเวลโลปดีเทคชันจะใช้หลักการของแมทช์ฟิลเตอร์ (Match filter) ในการดีเทคสัญญาณโดยเฟสของสัญญาณไม่จำเป็นต้องตรงกับเฟสของคลื่นพาหะที่เข้ามาและเอ็นเวลโลปดีเทคชันจะสนใจเฉพาะเอ็นเวลโลปของสัญญาณเท่านั้นเฉพาะฉะนั้นในการสุ่มตัวอย่างเพื่อทำการ

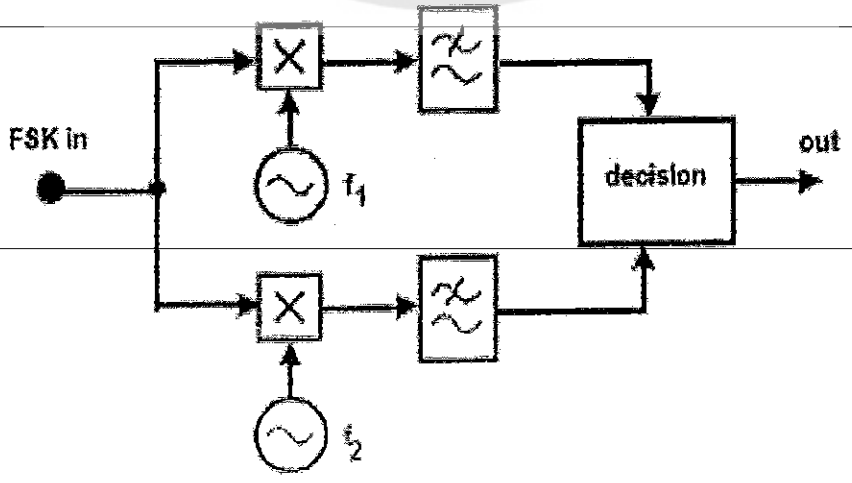
เปรียบเทียบจะต้องทำที่ค่าเอ็นเวลโลปสูงสุดแล้วต้องรีบดีสชาร์จวงจรทันทีหลังจากการสุ่มตัวอย่าง เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ ตัวอย่างกระบวนการเอ็นเวลโลปดีเทคชันแสดงดังรูปที่ 2.10



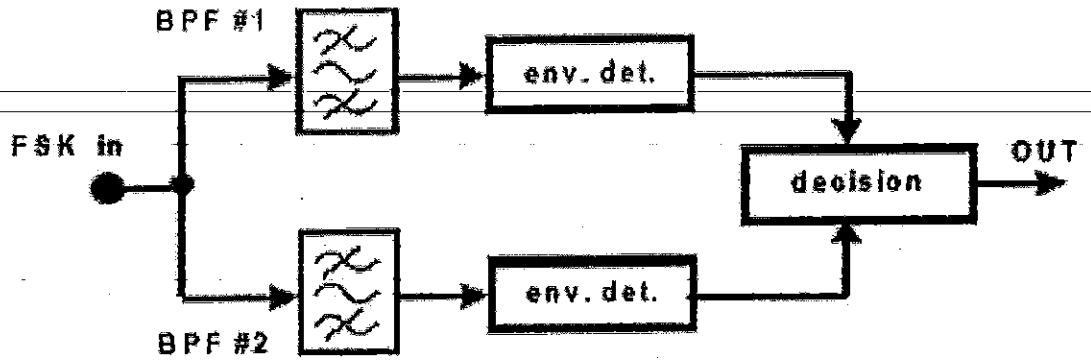
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอสเคด้วยวิธีเอ็นเวลโลปดีเทคชัน

การดีมอดูเลตสัญญาณเอฟเอสเค

การดีมอดูเลตสัญญาณเอฟเอสเคจะคล้ายกับการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอสเค ทั้งนี้เพราะสัญญาณเอฟเอสเคเกิดจากการรวมสัญญาณเอเอสเค 2 ความถี่เข้าด้วยกันดังนั้นในการดีมอดูเลตสัญญาณเอฟเอสเคจึงใช้วงจรของเอเอสเคได้โดยเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ชุด โดยจะใช้วิธีคอร์รีเลชันดีเทคชันในกรณีของโคฮีเรนท์ดีเทคชันและใช้หลักการของแมทช์ฟิลเตอร์ในกรณีของเอ็นเวลโลปดีเทคชัน โดยกระบวนการของแมทช์ฟิลเตอร์ทั้งของแบบโคฮีเรนท์ดีเทคชันและแบบเอ็นเวลโลปดีเทคชันแสดงดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ตามลำดับ



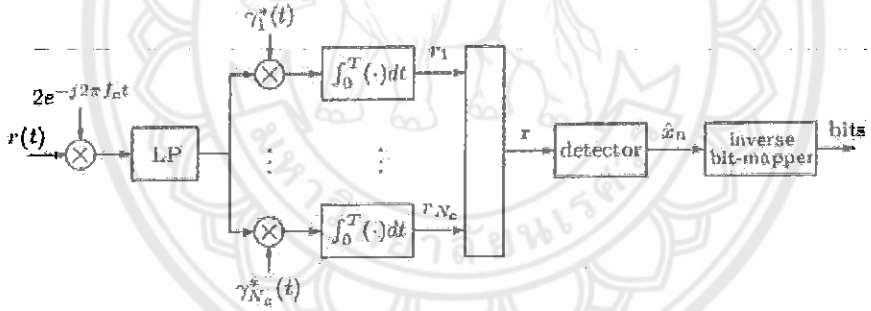
รูปที่ 2.11 แมทช์ฟิลเตอร์ของกระบวนการโคฮีเรนท์ดีเทคชันสัญญาณเอฟเอสเค



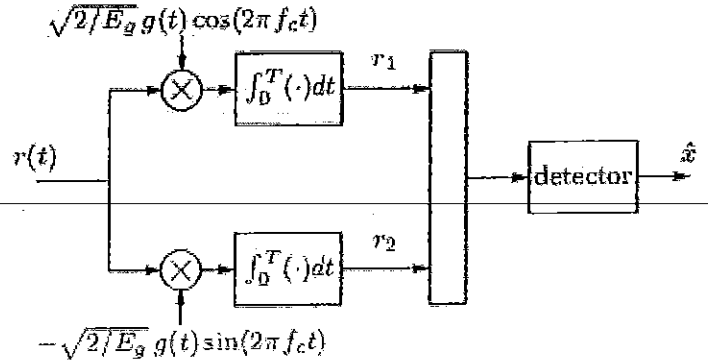
รูปที่ 2.12 แมทช์ฟิลเตอร์ของกระบวนการเอ็นเวลโลปดีเทคชันสัญญาณแอฟเอสเค

การดีมอดูเลตสัญญาณพีเอสเค

โดยกระบวนการคอร์รีเลชันแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งคล้ายกับการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอสเค และเอฟเอสเคดังกล่าวข้างต้นเพียงแค่สัญญาณที่นำมาคอร์รีเลชันนั้นแตกต่างกันออกไป ส่วนการดีมอดูเลตอีกวิธีหนึ่งที่นิยมแสดงดังรูปที่ 2.14



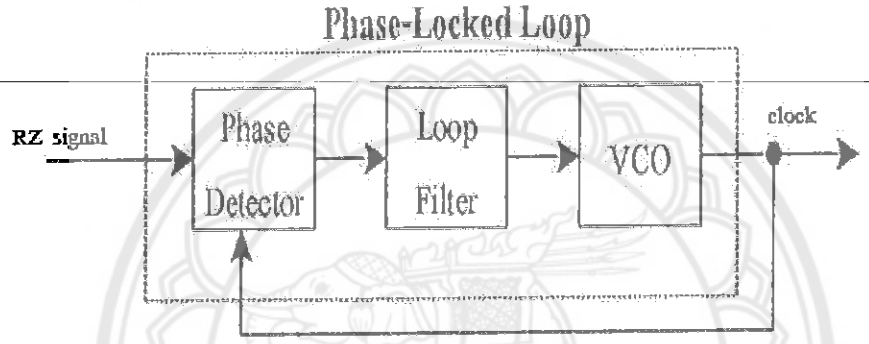
รูปที่ 2.13 กระบวนการคอร์รีเลชันดีเทคชันสัญญาณดิจิตอลเบสแบนด์



รูปที่ 2.14 กระบวนการดีเทคชันสัญญาณพีเอสเค

2.1.4 การสร้างสัญญาณนาฬิกา

การสร้างสัญญาณนาฬิกาจำเป็นในการสื่อสารแบบดิจิตอลมากหากสัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้นไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่เข้ามาการสื่อสารจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น การสร้างสัญญาณนาฬิกาจากข้อมูลที่เข้ามาอาศัยหลักการตามรูปที่ 2.15 โดยจะมีการสร้างสัญญาณพัลส์จากข้อมูลออกมาเพื่อดึงเฟสของสัญญาณนาฬิกาของวงจรเฟสล็อกลูปให้ตรงกับข้อมูล ซึ่งการดึงเฟสนี้จะอาศัยสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นแบบ RZ (Return to Zero) บังคับความถี่ของวงจรเฟสล็อกลูปให้ตรงกับข้อมูล โดยที่วงจรเฟสล็อกลูปจะเป็นแบบที่มีแบนด์วิดธ์แคบ เพื่อให้ความถี่ที่สร้างขึ้นไม่เปลี่ยนแปลงมากเกินไป สัญญาณนาฬิกาได้จากแรงดันขาออกของวงจร VCO



รูปที่ 2.15 กระบวนการสร้างสัญญาณนาฬิกาด้วยวงจรเฟสล็อกลูป

2.2 การสื่อสารในระบบอนาลอก

การสื่อสารในชีวิตประจำวันทุกชนิดเป็นการสื่อสารแบบอนาลอกคือ ใช้สัญญาณอนาลอกเป็นคลื่นพาหะถึงแม้ว่าจะเป็นระบบดิจิตอลแต่ก็จำเป็นต้องใช้การสื่อสารแบบอนาลอกเข้าช่วยในการส่งคลื่นผ่านอากาศ การสื่อสารในระบบอนาลอกแยกออกได้เป็น 2 วิธีการใหญ่ๆ คือ การสื่อสารในระบบเอเอ็ม (AM : Amplitude Modulation) และการสื่อสารในระบบเอฟเอ็ม (FM : Frequency Modulation)

2.2.1 การสื่อสารระบบเอเอ็ม (AM : Amplitude Modulation)

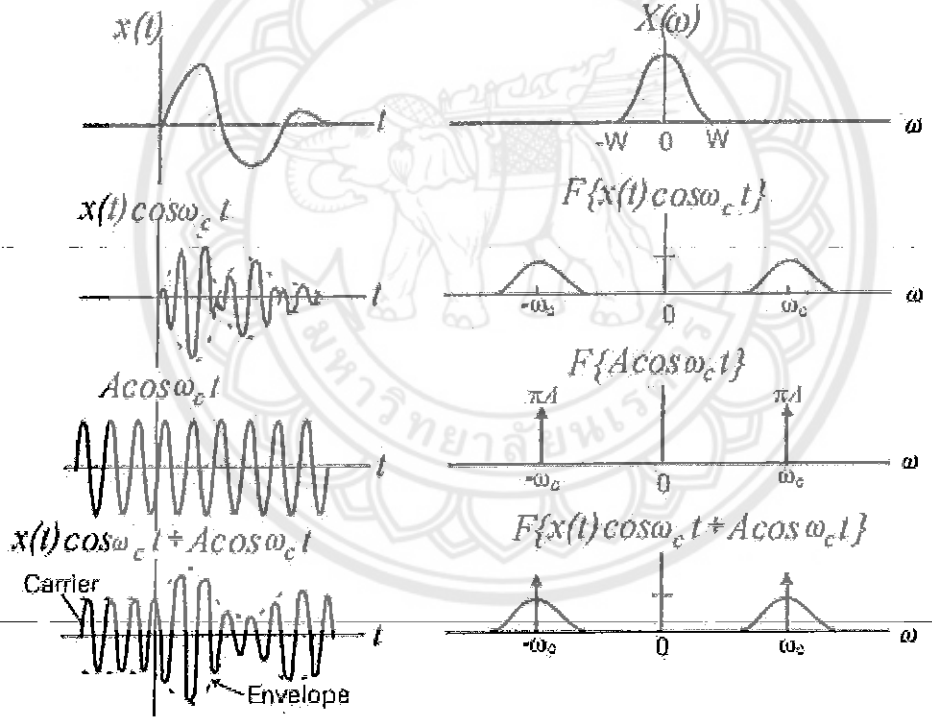
การสื่อสารระบบเอเอ็ม จะเป็นการนำสัญญาณที่ต้องการไปเปลี่ยนข่าวสารเชิงขนาดของคลื่นพาหะเพื่อส่งออกสู่อากาศซึ่งการมอดูเลตแบบเอเอ็มมีอยู่ 4 วิธีคือ DSB-LC (Double Sideband Large Carrier) DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier) SSB (Single Sideband) VSB (Vestigial Sideband)

DSB-LC (Double Sideband Large Carrier)

การมอดูเลตแบบ DSB-LC หรือที่รู้จักกันคือเอเอ็ม เป็นการนำคลื่นพาหะคูณเข้ากับสัญญาณและส่งคลื่นพาหะออกไปด้วยดังสมการคลื่นขาออกที่ 2-6 ซึ่งจะเห็นว่ามีการบวกคลื่นพาหะเข้าไปกับสัญญาณที่มอดูเลตแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของคลื่นพาหะและขนาดของสัญญาณที่มอดูเลตเรียกว่า ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index : m) ดังสมการที่ 2-7 โดยสเปกตรัมและรูปคลื่นสัญญาณ DSB-LC แสดงดังรูปที่ 2.16

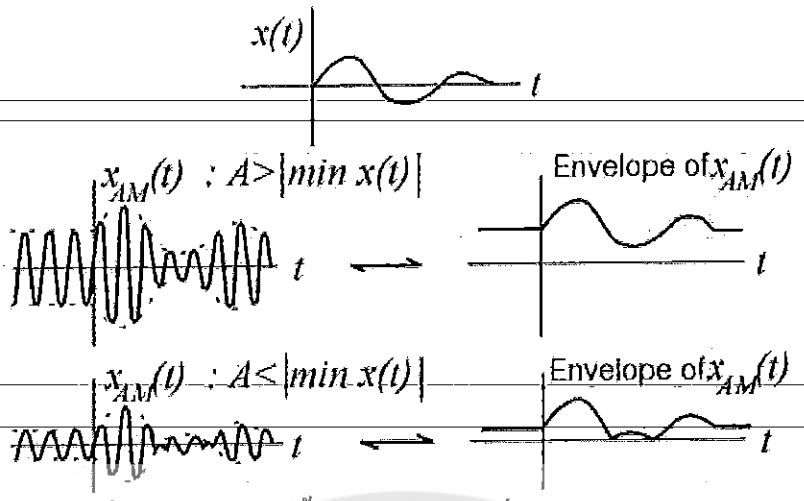
$$\varnothing_{AM}(t) = f(t)\cos\omega_c t + A\cos\omega_c t \qquad \textbf{(2-6)}$$

$$m = \frac{peak_DSB-SC_amplitude}{peak_carrier_amplitude} \qquad \textbf{(2-7)}$$

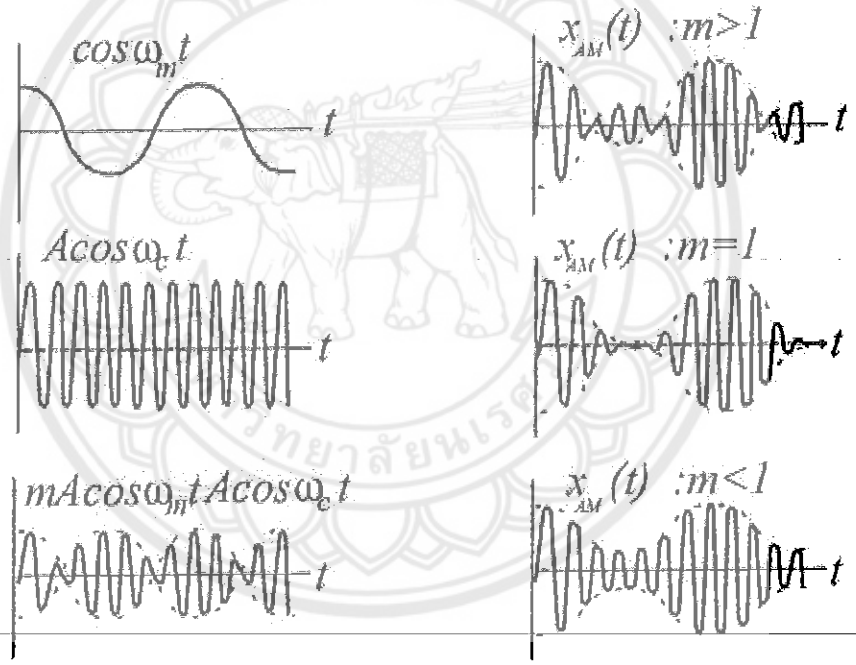


รูปที่ 2.16 สเปกตรัมและรูปคลื่นสัญญาณ DSB-LC

การมอดูเลตแบบ DSC-LC หากใช้ค่าดัชนีการมอดูเลตมากกว่า 1 แล้วเมื่อทำการดีมอดูเลตเอาสัญญาณเบสแบนด์กลับออกมาจะได้สัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าเมื่อค่าดัชนีการมอดูเลตมากกว่า 1 จุดตัดแกนเวลาคลื่นพาหะจะกลับเฟส 180 องศา ทำให้เมื่อใช้เอ็นเวลโลปดีเทคชันเกิดสัญญาณที่ผิดเพี้ยน



รูปที่ 2.17 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อค่าดัชนีการมอดูเลตมากกว่า 1



รูปที่ 2.18 การมอดูเลตแบบ DSB-LC ที่ค่าค่าดัชนีการมอดูเลตต่างๆ

DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)

การมอดูเลตแบบ DSB-SC เป็นการลดข้อเสียของการมอดูเลตแบบเอเอ็มหรือ DSB-LC เพราะว่าการมอดูเลตแบบ DSC-SC ไม่ได้ส่งคลื่นพาหะไปด้วยทำให้ไม่เปลืองพลังงานมากเหมือนการส่งแบบ DSB-LC แต่การดีมอดูเลตกลับจะยุ่งยากกว่า ดังนั้นจึงมีการส่งคลื่นพาหะไปด้วยเล็กน้อยเรียกว่า pilot carrier เพื่อให้ง่ายต่อการดีมอดูเลตเอาสัญญาณเบสแบนด์กลับคืน การมอดูเลตแบบ DSC-SC แสดงดังสมการที่ 2-8

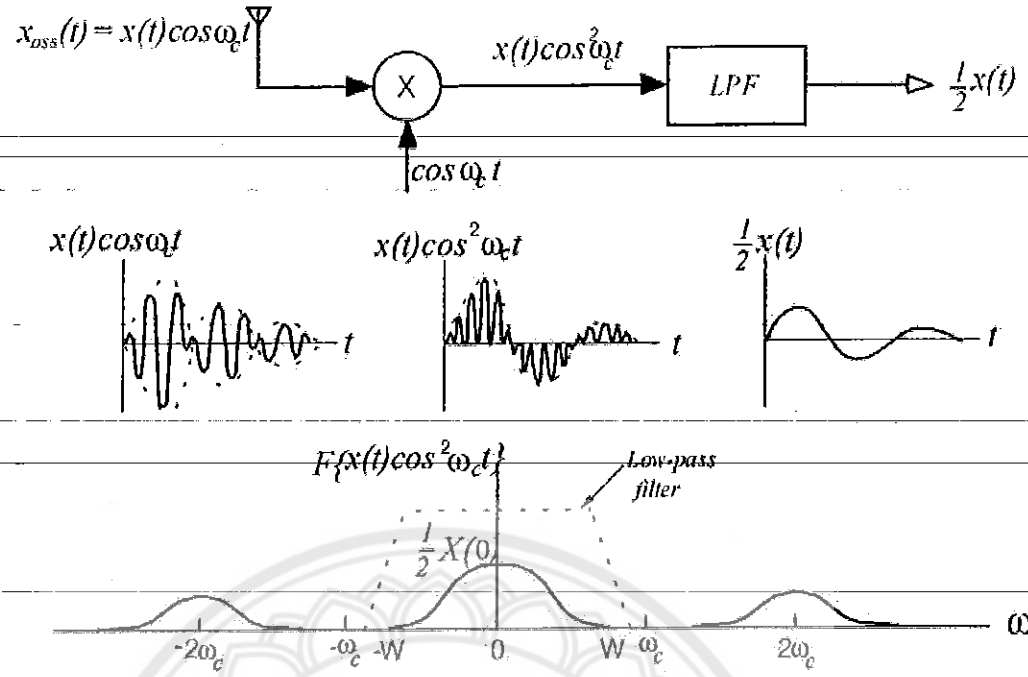
$$\varnothing(t) = f(t)\cos\omega_c t \qquad (2\text{-}8)$$

การสร้างสัญญาณ DSB-SC ดังกล่าวมาแล้วว่าเป็นการคูณสัญญาณกับคลื่นพาหะเข้าด้วยกัน รูปสัญญาณที่ได้จะเป็นการกลับเฟสของสัญญาณแล้วนำไปเป็นเอ็นเวลโลปของคลื่นพาหะ โดยสเปกตรัมของสัญญาณจะย้ายไปอยู่รอบๆ สเปกตรัมของคลื่นพาหะ

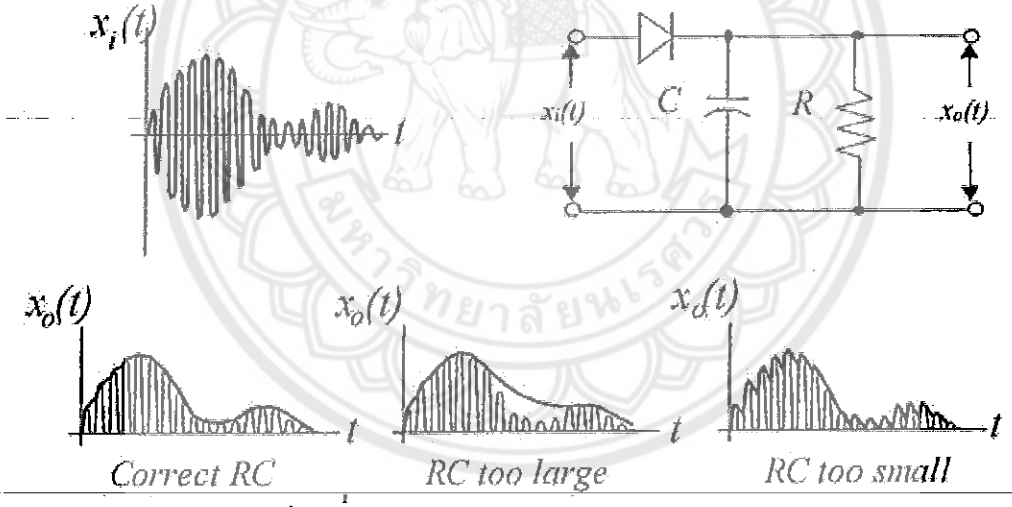
ส่วนการมอดูเลตแบบ SSB และ VSB เป็นการปรับปรุงในเรื่องของแบนด์วิดธ์ในการส่งสัญญาณกรณีที่มีแบนด์วิดธ์จำกัด จึงมีการกรองสัญญาณที่มอดูเลตแบบ DSB-LC หรือ DSB-SC ให้เหลือเพียงแค่ไซด์แบนด์เดียวแล้วจึงส่งไปทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณลดลงครึ่งหนึ่งเรียกการส่งแบบนี้ว่า SSB (Single Sideband) แต่การส่งแบบ SSB จะมีข้อจำกัดจากการใช้ฟิลเตอร์กรองเอาไซด์แบนด์เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของฟิลเตอร์ทำให้บางส่วนของข้อมูลด้านความถี่ต่ำหรือขอบๆ ของสเปกตรัมถูกฟิลเตอร์ตัดหายไป จึงมีการคิดค้นวิธีการใหม่โดยใช้ฟิลเตอร์ที่กว้างขึ้นทำให้ตัดรวมไปถึงอีกไซด์แบนด์หนึ่งทำให้บางส่วนของสัญญาณที่ขอบๆครบถ้วน เรียกการส่งแบบนี้ว่า VBS (Vestigial Sideband)

2.2.2 การดีมอดูเลตสัญญาณเอเอ็ม

การดีมอดูเลตสัญญาณเอเอ็ม จะใช้การคูณด้วยคลื่นพาหะเพื่อย้ายสเปกตรัมของสัญญาณกลับมาที่เบสแบนด์แล้วใช้ฟิลเตอร์กรองเอาส่วนที่เป็นความถี่สูงทิ้งไป ซึ่งเรียกว่าวิธีการแบบซิงโครนัส (Synchronous detection) ส่วนอีกวิธีหนึ่งจะเป็นการกรองเอาเฉพาะส่วนเอ็นเวลโลปของสัญญาณออกมาแล้วใช้ฟิลเตอร์กรองความถี่คลื่นพาหะทิ้งไป เรียกว่าวิธีการแบบเอ็นเวลโลป (Envelope dctection) ซึ่งกระบวนการเอ็นเวลโลปนั้นจะใช้ได้กับสัญญาณที่มอดูเลตแบบ DSC-LC เท่านั้นเพราะว่าถ้าใช้กับวิธีการมอดูเลตแบบ DSC-SC แล้วสัญญาณที่ดีมอดูเลตได้จะผิดเพี้ยนเนื่องจากมีการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณ วิธีการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอ็มแบบต่างๆแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 – 2.20



รูปที่ 2.19 การดีมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC



รูปที่ 2.20 การดีมอดูเลตแบบเอ็นเวลโลปดีเทคชัน

บทที่ 3

การออกแบบวงจรและขั้นตอนการทำงาน

หลังจากได้ศึกษาถึงหลักการรับส่งสัญญาณดิจิตอล และหลักการรับส่งสัญญาณแบบไร้สายแล้วในบทที่ผ่านมา ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจร จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับโครงงานนี้ เพื่อทำการประกอบวงจรเป็นเครื่องรับและส่งสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย

3.1 แนวคิดในการออกแบบ

แนวคิดในการออกแบบโครงงานนี้เป็นการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย โดยจะประพฤติตัวเหมือนไม่มีตัวของโครงงานอยู่ (Transparency) คือเมื่อทางภาคส่งส่งสัญญาณอะไรเข้าไปในช่องสัญญาณ แล้วสัญญาณจะไปปรากฏทางภาครับเหมือนกับที่ทางภาคส่งนั้นส่งมา ซึ่งสามารถเป็นไปได้ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้นย่อมมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

การส่งข้อมูลหรือสัญญาณดิจิตอลเข้าไปในช่องสัญญาณนั้น ทางภาคส่งจะส่งข้อมูลเข้ามาหนึ่งชุด จากนั้นจะสร้างสัญญาณนาฬิกาของข้อมูลขึ้นมาเพื่อจัดการกับข้อมูลที่ทางภาคส่ง ส่งเข้ามาแล้วส่งผ่านข้อมูลไปทางด้านรับให้ถูกต้องครบถ้วนเหมือนทางด้านส่ง

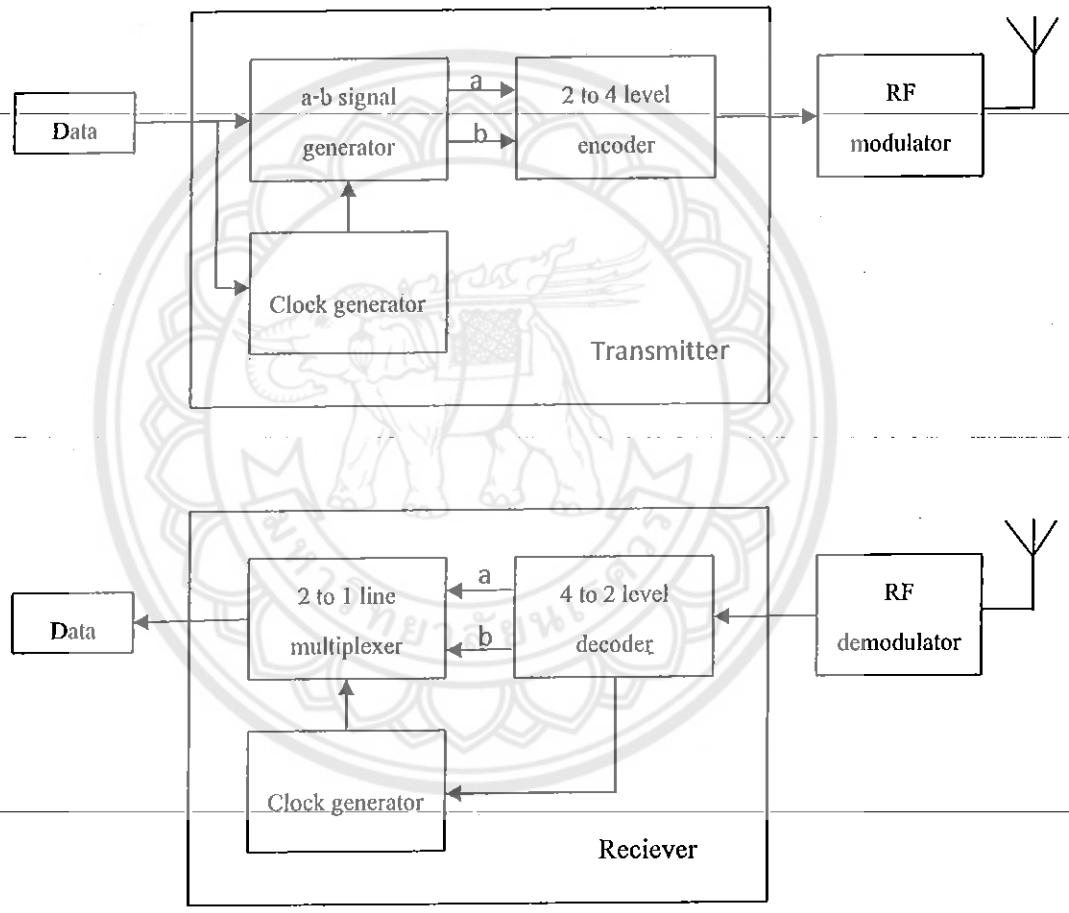
โครงงานนี้จะอาศัยโมดูลรับส่งสัญญาณวิทยุแบบไร้สาย เพื่อเป็นตัวมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณที่ส่งผ่านระหว่างภาคส่งและภาครับ ในตัวโครงงานจะเป็นการออกแบบด้วยวิธีเปลี่ยนขนาดแอมปลิจูดแบบ 4 ระดับ (4-level Amplitude Shift Keying) เพื่อให้ได้อัตราเร็วของข้อมูลหรือบิตเรต ที่ส่งได้เร็วขึ้นกว่าความเร็วของสัญญาณในช่องสัญญาณหรือบอดเรต

3.2 ลักษณะโดยรวมของโครงงาน

ลักษณะโดยรวมของโครงงานนี้แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยทางด้านส่งจะส่งข้อมูลมาหนึ่งชุด ตัวโครงงานจะสร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาใหม่จากข้อมูลที่ส่งเข้ามา จากนั้นจะสร้างสัญญาณ a-b ขึ้นมาเพื่อจัดการกับข้อมูล โดยสัญญาณ a และสัญญาณ b จะมีความเร็วต่ำกว่าข้อมูลที่ส่งมาครึ่งหนึ่ง จากนั้นนำสัญญาณ a-b ที่ได้แปลงเป็นสัญญาณ 4 ระดับ แล้วผ่านเข้าไปยังตัวโมดูล

รับส่งสัญญาณแบบไร้สาย เพื่อมอดูเลตสัญญาณและเชื่อมโยงแบบไร้สายกับทางภาครับ การส่งสัญญาณลักษณะนี้เรียกว่า การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลแบบ 4-ASK (4-level Amplitude Shift Keying)

ทางภาครับ ตัวโมดูลรับส่งสัญญาณแบบไร้สาย จะตรวจจับสัญญาณแล้วทำการดีมอดูเลตสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณ 4 ระดับที่ทางภาคส่ง ส่งเข้ามาแล้วผ่านวงจรขยายเพื่อให้มีการแยกระดับสัญญาณที่ชัดเจนขึ้น จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ผ่านวงจรแปลงสัญญาณ 4 ระดับให้เป็นสัญญาณ a-b เพื่อนำไปสร้างสัญญาณนาฬิกา และทำการมัลติเพล็กซ์ออกมาเป็นข้อมูลภาครับ



รูปที่ 3.1 กระบวนการรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบ 4-ASK

3.3 การออกแบบวงจรและการทำงานในแต่ละส่วน

จากลักษณะโดยรวมของโครงงานดังกล่าวในหัวข้อ 3.2 จะสามารถแบ่งการออกแบบการทำงานของวงจรเป็นส่วนๆดังนี้

3.3.1 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

3.3.2 วงจรสร้างสัญญาณ a-b

3.3.3 วงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ

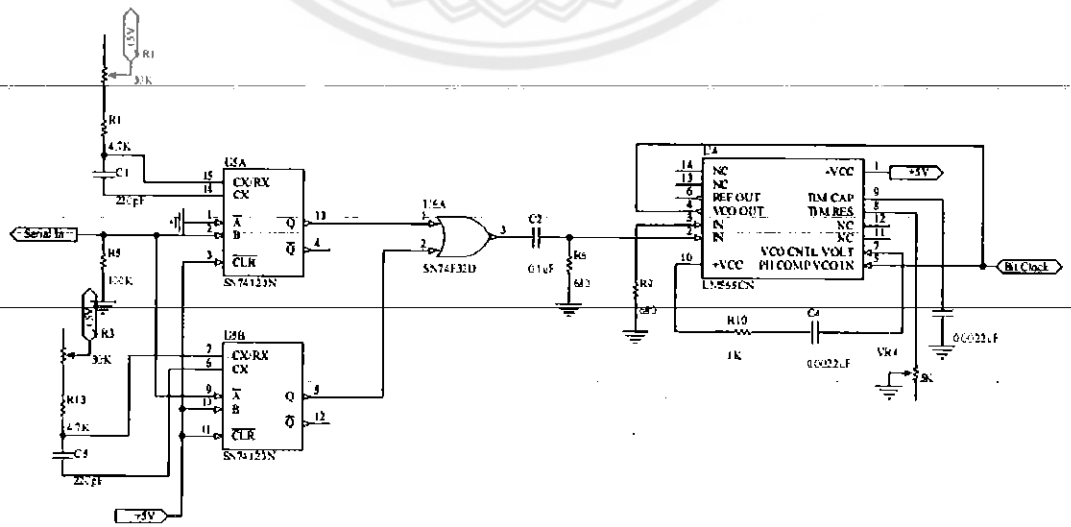
3.3.4 วงจรแปลงสัญญาณ 4 ระดับเป็นสัญญาณ a-b

3.3.5 วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

รายละเอียดการทำงานของแต่ละวงจรอธิบายตามลำดับดังนี้

3.3.1 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

เมื่อส่งสัญญาณดิจิตอลเข้ามาในตัวโครงงาน ตัวโครงงานจะทำการสร้างสัญญาณนาฬิกาของข้อมูลขึ้นมาเพื่อนำไปใช้จัดการกับข้อมูล เหตุผลที่ต้องมีวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกานี้ก็เพื่อสนับสนุนแนวคิดการประพฤติตัวเสมือนไม่มีอยู่ (Transparency) ของช่องสัญญาณ ซึ่งจากแนวคิดการสร้างสัญญาณดังกล่าวในหัวข้อที่ 2.1.4 นั้นจะใช้เป็นแนวทางการออกแบบโดยใช้ไอซีโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ 2 ตัว ในการสร้างสัญญาณ RZ (Return to Zero) จากข้อมูลทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลง โดยใช้ไอซีตระกูลทีทีแอล 74123 ซึ่งมีวงจรโมโนสเตเบิลอยู่ 2 ตัว โดยการออกแบบใช้วงจรโมโนสเตเบิลตัวแรกสร้างสัญญาณพัลส์บวกที่ขอบขาขึ้นของข้อมูล และให้วงจรโมโนสเตเบิลตัวที่สองสร้างสัญญาณพัลส์บวกที่ขอบขาลงของข้อมูล ความกว้างของสัญญาณทั้งสองจะต้องมีความกว้างน้อยกว่าความกว้างของบิตข้อมูล โดยความกว้างนี้สามารถปรับได้จากการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ VR1 และ VR3 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

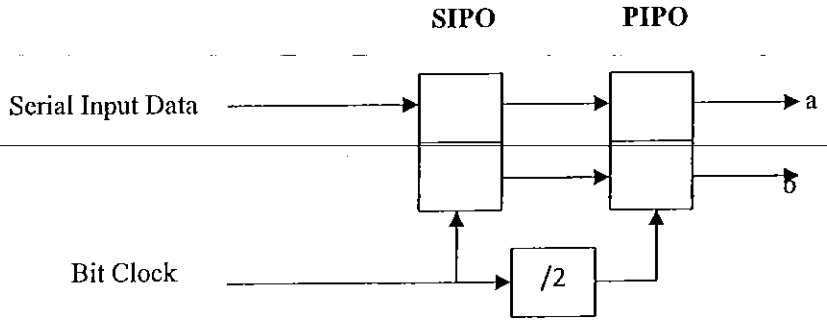
สัญญาณขาออกของวงจรโมโนสเตเบิลแต่ละตัวจะเป็นพัลส์บวกที่ขอบขาขึ้นและขอบขาลงของข้อมูล ดังนั้นต้องนำมารวมกันเพื่อสร้างสัญญาณ RZ ของข้อมูลโดยใช้ออร์เกตตระกูลทีทีแอล เบอร์ 7432 จากนั้นนำสัญญาณ RZ ที่ได้ป้อนเข้ามาเป็นสัญญาณควบคุมวงจรเฟสล็อกลูป เพื่อสร้างสัญญาณสัญญาณนาฬิกาให้สอดคล้องกับข้อมูล โดยใช้ไอซีเฟสล็อกลูป เบอร์ LM565 ซึ่งความถี่ของวงจรเฟสล็อกลูปสามารถกำหนดได้จากการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ VR4 ที่ขา 8 หรือเลือกค่าตัวเก็บประจุ C4 ให้สอดคล้องตามสมการกำหนดความถี่ของเฟสล็อกลูปดังสมการที่ 3-1

$$f_0 = \frac{0.3}{R_0 C_0} \qquad \textbf{(3-1)}$$

วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาทั้งทางภาคส่งและทางภาครับจะใช้วงจรในลักษณะเดียวกัน ต่างกันเพียงแค่สัญญาณที่ควบคุมวงจรเฟสล็อกลูปมาจากแหล่งที่ต่างกัน โดยภาคส่งใช้สัญญาณควบคุมจากข้อมูลที่จะส่ง แต่ภาครับจะใช้สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับสัญญาณและดีมอดูเลตออกมาเป็นตัวควบคุม

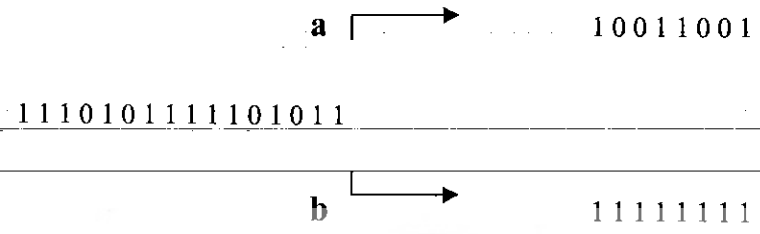
3.3.2 วงจรสร้างสัญญาณ a-b

การลดความเร็วของข้อมูลลงเป็นการช่วยให้จัดการกับข้อมูลได้ง่ายและสะดวกขึ้น การลดความเร็วของข้อมูลในโครงงานนี้จะใช้วิธีการส่งสัญญาณ a-b หรือการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองกลุ่ม ซึ่งจะทำให้อัตราเร็วของข้อมูลแต่ละกลุ่มลดลงครึ่งหนึ่งจากอัตราเร็วข้อมูลเดิม โดยสัญญาณ a จะเป็นชุดของบิตลำดับคี่และสัญญาณ b จะเป็นชุดของบิตลำดับคี่ในขบวนข้อมูลที่ส่งเข้ามา แนวคิดในการสร้างสัญญาณ a-b แสดงดังรูปที่ 3.3



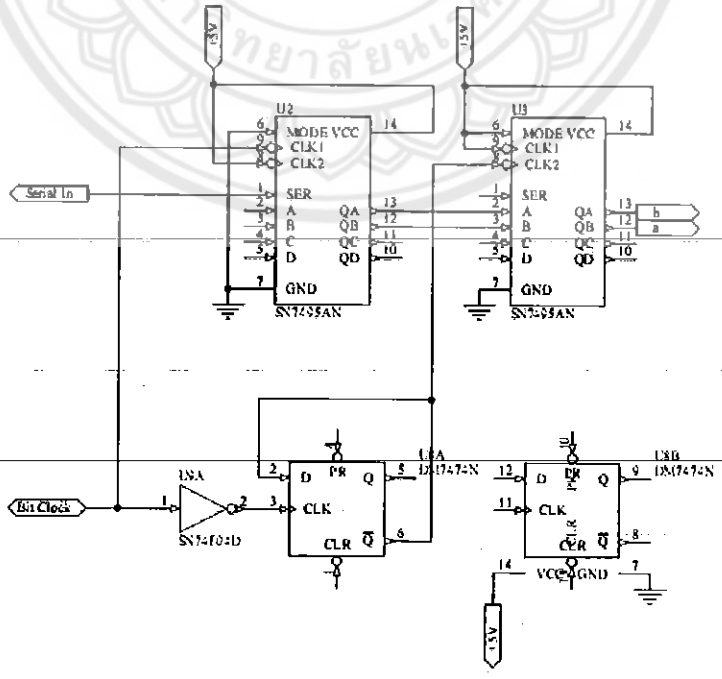
รูปที่ 3.3 แนวคิดในการสร้างสัญญาณ a-b

โดยข้อมูลที่เข้ามาจะถูกเลื่อนให้เป็น 2 บิตด้วยสัญญาณนาฬิกาของข้อมูล และข้อมูล 2 บิตนี้จะถูกส่งออกไปพร้อมๆกันโดยมีสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากการหารสัญญาณนาฬิกาลงครึ่งหนึ่งจากข้อมูลเดิม ซึ่งการสลับของข้อมูลเพื่อแบ่งเป็นกลุ่มแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของการสร้างสัญญาณ a-b จากข้อมูล

การออกแบบวงจรในส่วนของการสร้างสัญญาณ a-b นี้จะใช้ไอซีทีทีแอล ชิฟท์รีจิสเตอร์ เบอร์ 7495 ซึ่งมีการทำงานทั้งโหมด SIPO และ PIPO โดยการออกแบบให้ไอซีตัวแรกทำงานในโหมดของ SIPO เพื่อให้ข้อมูลเป็น 2 บิต จากนั้นหน่วงสัญญาณนาฬิกาไปหนึ่งรอบเพื่อเอาข้อมูลออกจากไอซี เบอร์ 7495 ตัวที่สองในโหมดของ PIPO ซึ่งจะได้สัญญาณ a-b ที่มีความเร็วลดลงจากข้อมูลเดิมครึ่งหนึ่ง วงจรสร้างสัญญาณ a-b แสดงดังรูปที่ 3.5

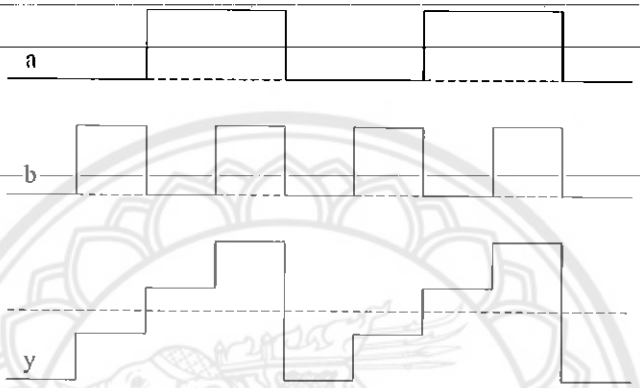


รูปที่ 3.5 วงจรสร้างสัญญาณ a-b

ว.
0764ค
2561
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 15004287

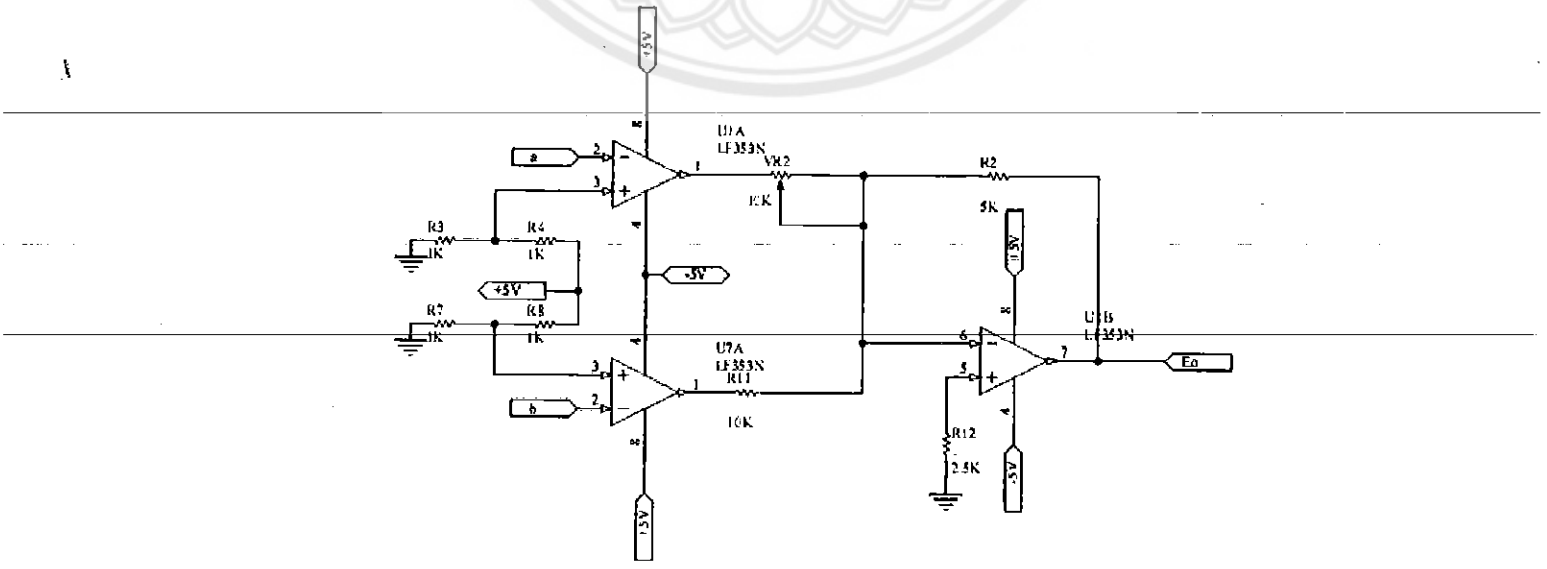
3.3.3 วงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ

จากสัญญาณ a-b ที่สร้างได้ในหัวข้อที่ 3.3.2 สามารถนำไปทำการเข้ารหัสข้อมูลได้หลายวิธีด้วยกันซึ่งก็มีวิธีการยุ่งยากซับซ้อนแตกต่างกันไปตามแต่ละวิธี ในโครงงานนี้จะใช้เทคนิคของการแปลงสัญญาณ a-b ให้เป็นสัญญาณ 4 ระดับและจากนั้นจึงทำการมอดูเลตแบบเอเอ็มโดยใช้ตัวมอดูเลตสัญญาณเพียงตัวเดียว เรียกวิธีการนี้ว่า การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลแบบ 4-ASK (4-level Amplitude Shift Keying)



รูปที่ 3.6 การแปลงสัญญาณ a-b เป็นสัญญาณ 4 ระดับ

การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับนี้ จะใช้ออปแอมป์ในลักษณะของวงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรรวมสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 วงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ

การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายได้ดังนี้ สมมติว่าสัญญาณ a เป็น "0" 8 คือ 0 โวลต์ ตัวต้านทาน R 4 ตัวต่อกันเป็นการสร้างระดับอ้างอิงให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดันของออปแอมป์ U1A และ U7A ไว้ที่ระดับอ้างอิง 2.5 โวลต์ เมื่อขาเข้าสัญญาณ a เป็น "0" เข้ามาที่อินพุตลบของ U1A มีระดับสัญญาณต่ำกว่าระดับอ้างอิง ทำให้สัญญาณขาออกของ U1A (E1) มีระดับเป็น 5 โวลต์ และเมื่อสัญญาณ b เป็น "1" เข้ามาที่ขาอินพุทลบของU7A มีระดับสัญญาณสูงกว่าระดับอ้างอิง ทำให้สัญญาณขาออกของ U7A (E2) มีระดับเป็น -5 โวลต์ สัญญาณ E1 และ E2ถูกนำมารวมกันผ่านวงจรบวกสัญญาณ (Summing Amplifier) โดยใช้ออปแอมป์ U1B ซึ่งจะได้สัญญาณขาออก E_0 เป็นดังสมการที่ 3-2

$$E_0 = -R_2\left(\frac{E_1}{VR_2} + \frac{E_2}{R_{11}}\right) \qquad [V] \qquad \textbf{(3-2)}$$

โดยการปรับตัวต้านทาน VR_2 จะเป็นการปรับระดับความแยกชัดของระดับทั้ง 4 ระดับในสัญญาณ จากตัวอย่างถ้าใช้ VR_2 = 5640 โอห์ม จะได้ค่า E_0 เป็น

$$E_0 = -5000\left(\frac{5}{5640} + \frac{-5}{10000}\right) \qquad [V]$$

$$E_0 = -1.933 \qquad [V]$$

การแทนสัญญาณ a-b ด้วยระดับสัญญาณทั้ง 4 ระดับแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การแทนสัญญาณ a-b ด้วยระดับสัญญาณทั้ง 4 ระดับ

a-b	สัญญาณ 4 ระดับ (โวลต์)
00	-6.933
01	-1.933
10	+1.933
11	+6.933

จะเห็นว่าที่ระดับ "00" และ "11" ออปแอมป์เกิดการอิ่มตัวขึ้นซึ่งสามารถลดระดับนี้ลงได้ โดยการปรับเพิ่มค่า VR_2 ให้สูงขึ้น หรือลดอัตราขยายของวงจรบวกสัญญาณลง โดยเปลี่ยนค่า R_2 ให้ต่ำลง

การเลือกใช้ออปแอมป์มีผลต่อการตอบสนองของวงจรอย่างมาก ถ้าหากใช้ออปแอมป์ที่มีค่า สลูเรต (SR: Slew Rate) ต่ำๆ การตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์แคบๆหรือที่ความเร็วข้อมูลสูงๆ จะเกิดการผิดพลาดขึ้นมา ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ออปแอมป์ที่มีค่า SR สูงๆ เพื่อให้วงจรตอบสนองต่อความเร็วข้อมูลที่สูงๆได้ ในโครงงานนี้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ LF 353 ซึ่งมีค่า SR = 16 V/?s

3.3.4 วงจรแปลงสัญญาณ 4 ระดับเป็นสัญญาณ a-b

ทางด้านภาครับจะมีโมดูลในการตรวจจับและดีมอดูเลตสัญญาณออกมา ซึ่งสัญญาณที่ผ่านการดีมอดูเลตแล้วจะมีระดับสัญญาณที่แตกต่างกัน 4 ระดับ การเปลี่ยนสัญญาณ 4 ระดับให้กลับมาเป็นสัญญาณ a-b นั้นทำได้โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบแรงดันและทำการคอมบิเนชั่นเพื่อให้ได้สัญญาณ a-b

สัญญาณ 4 ระดับเป็นสัญญาณแบบไบโพล่าร์ หรือแบบสองขั้ว ซึ่งมีจุดสมมาตรรอบแรงดันศูนย์โวลต์ ดังนั้นระดับอ้างอิงเปรียบเทียบ จะใช้ 3 ระดับอ้างอิงคือ 0 โวลต์ +1.5 โวลต์ และ -1.5 โวลต์ การออกแบบจะใช้ออปแอมป์เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันซึ่งแรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบแรงดันนี้จะเป็น ±5 โวลต์ โดยแรงดัน +5 โวลต์จะเทียบกับสถานะ "1" และ -5 โวลต์เทียบเป็นสถานะ "0"

การจะนำสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบแรงดันเชื่อมต่อกับวงจรคอมบิเนชั่น ซึ่งใช้ลอจิกเกตตระกูลทีทีแอลโดยตรงนั้นทำไม่ได้ ต้องแปลงสัญญาณแบบไบโพล่าร์หรือสองขั้วที่มีลักษณะเป็นบวกลบ ให้เป็นสัญญาณขั้วเดียวที่มีระดับสัญญาณเป็นบวกและศูนย์ โดยการใส่ตัวต้านทานและไดโอดเพื่อทำให้สัญญาณซีกลบของสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณถูกลัดวงจรผ่านไดโอดและตัวต้านทานลงกราวนด์ไป ทำให้ได้สัญญาณเฉพาะซีกบวกเท่านั้นสามารถนำไปเชื่อมต่อกับวงจรทีทีแอลได้

สัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมีอยู่ 3 สัญญาณ คือ X Y และ Z โดยเมื่อระดับสัญญาณต่ำกว่าระดับอ้างอิงที่ -1.5 โวลต์ สัญญาณ X Y Z จะมีสัญญาณเป็น "000" ซึ่งเทียบกลับมาเป็นสัญญาณ a-b คือ "00" และเมื่อนำสัญญาณขาเข้าของวงจรที่มีค่าต่างๆกันทั้ง 4 ระดับ สถานะของ X Y Z และการเทียบสัญญาณกลับเป็นสัญญาณ a-b แสดงได้ดังตารางที่ 3.2

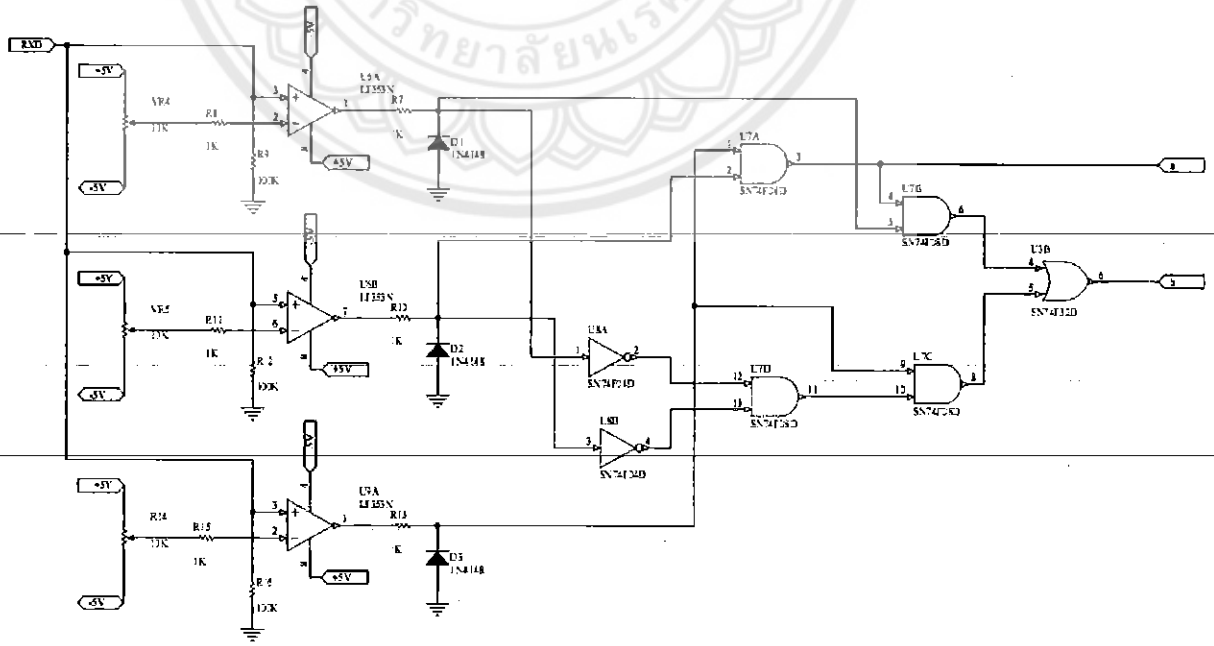
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบสัญญาณและการเทียบกลับเป็นสัญญาณ a-b

ระดับแรงดันขาเข้า (โวลต์)	X	Y	Z	a	b
C < -1.5	0	0	0	0	0
-1.5 < C < 0	0	0	1	0	1
0 < C < 1.5	0	1	1	1	0
C > 1.5	1	1	1	1	1

จากตารางที่ 3.2 นำสัญญาณ X Y และ Z ทำการคอมบิเนชั่นทางลอจิก เพื่อให้ได้สัญญาณ a-b มาโดยสมการคอมบิเนชั่น ดังสมการที่ 3-3

$$a = Y \cdot Z$$
$$b = \overline{X} \cdot \overline{Y} \cdot Z + XYZ \qquad \textbf{(3-3)}$$

การออกแบบวงจรในส่วนของการแปลงสัญญาณ 4 ระดับให้เป็นสัญญาณ a-b แสดงวงจรการออกแบบดังรูปที่ 3.8

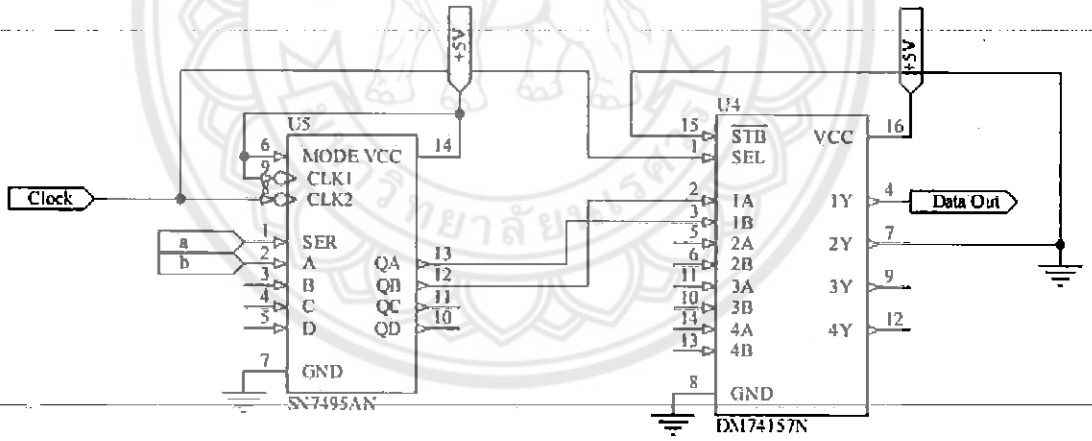


รูปที่ 3.8 การแปลงสัญญาณ 4 ระดับให้เป็นสัญญาณ a-b

3.3.5 วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

การสร้างข้อมูลกลับมาใหม่เป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับการส่งสัญญาณที่มีการจัดการกับข้อมูลก่อนส่ง สำหรับสัญญาณ a-b ที่สร้างกลับมาได้จะต้องมีการจัดเรียงให้เป็นกลุ่มเดียวกันหรือให้เป็นลำดับข้อมูลที่ถูกต้อง ซึ่งต้องมีการจัดสัญญาณ a และสัญญาณ b สลับกันออกไป โดยให้สัญญาณ a ออกไปก่อนและให้สัญญาณ b ตามออกมา และสลับกันโดยสัญญาณ a จะไปอยู่ในตำแหน่งบิตคี่ในข้อมูล และสัญญาณ b จะไปอยู่ในตำแหน่งบิตคู่ในข้อมูล แต่ในการสวิตช์เปลี่ยนตำแหน่งสัญญาณ a และสัญญาณ b นั้น ความเร็วจะต้องมากกว่าความเร็วข้อมูล ทั้งนี้เพราะว่าสัญญาณ a และสัญญาณ b เข้ามาพร้อมกันหากมีการสวิตช์ช้าจะทำให้ได้ข้อมูลที่ผิดพลาดได้

การออกแบบวงจรในส่วนนี้ จะใช้สัญญาณนาฬิกาของข้อมูลเป็นตัวสวิตช์เลือกสัญญาณซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่ขาออกมีความเร็วมากกว่าสัญญาณ a-b สองเท่า วงจรในส่วนนี้จะใช้ไอซีชิฟท์ รีจิสเตอร์ เบอร์ 7495 ทำงานในโหมด PIPO เพื่อทำให้สัญญาณ a-b มีความสอดคล้องกับสัญญาณนาฬิกาก่อน แล้วจึงนำไปมัลติเพล็กซ์ โดยใช้ไอซี มัลติเพล็กซ์ 2 สัญญาณให้เป็น 1 สัญญาณ ตระกูลทีทีแอล เบอร์ 74157 ซึ่งการสวิตช์เลือกจะใช้ระดับของขาควบคุมในการเลือกว่าจะเอาสัญญาณใดออกไปที่ขาออกของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การสร้างข้อมูลจากสัญญาณ a-b

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 ภาพรวมของการทดสอบ

เครื่องส่งและรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สายตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 นั้น จะใช้ตัว PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแหล่งกำเนิดข้อมูลให้กับเครื่องส่ง โดยได้ออกแบบโปรแกรมให้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งบิตข้อมูลหนึ่งชุดให้กับขา Serial Input Data ของเครื่องส่ง โดยที่ความเร็วของบิตข้อมูลสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับค่า Delay Time ของการส่งแต่ละบิตข้อมูล และเมื่อแหล่งกำเนิดส่งบิต "1" และ "0" เข้ามา จะได้ค่าแรงดันเป็น 5 โวลต์ และ 0 โวลต์ตามลำดับ นอกจากนี้ชุดส่งและรับสัญญาณยังประกอบไปด้วยวงจรจ่ายไฟกระแสตรง (DC) ±5 โวลต์ เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจร

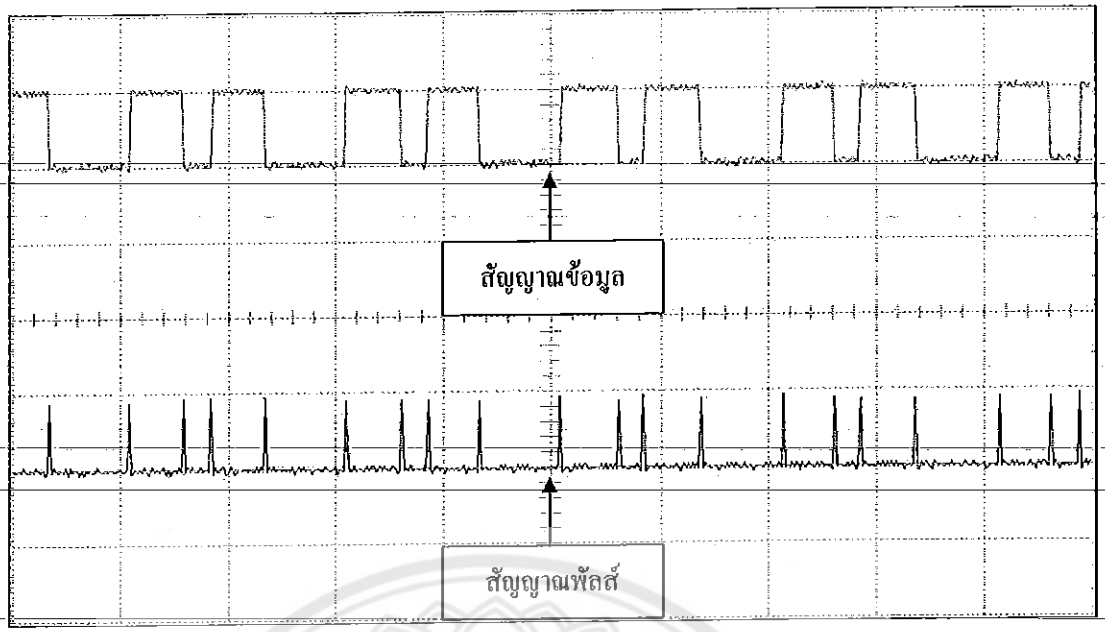
ในโครงงานนี้จะยังไม่คำนึงถึงระยะในการเชื่อมโยงแบบไร้สาย เนื่องจากระยะทางในการส่งและรับสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับตัวโมดูลสำหรับเชื่อมโยงแบบไร้สายที่นำมาใช้ สำหรับโครงงานนี้จะทดลองส่งและรับสัญญาณ 4 ระดับ ที่ระยะทาง 10-20 เมตร

การทดสอบจะทำการทดสอบการทำงานของวงจรทีละส่วนเพื่อทดสอบว่าทำงานได้จริง และตรวจสอบหาข้อผิดพลาด เพื่อปรับปรุงแก้ไขวงจรแต่ละส่วนให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

4.2 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณนาพิกาของภาคส่ง

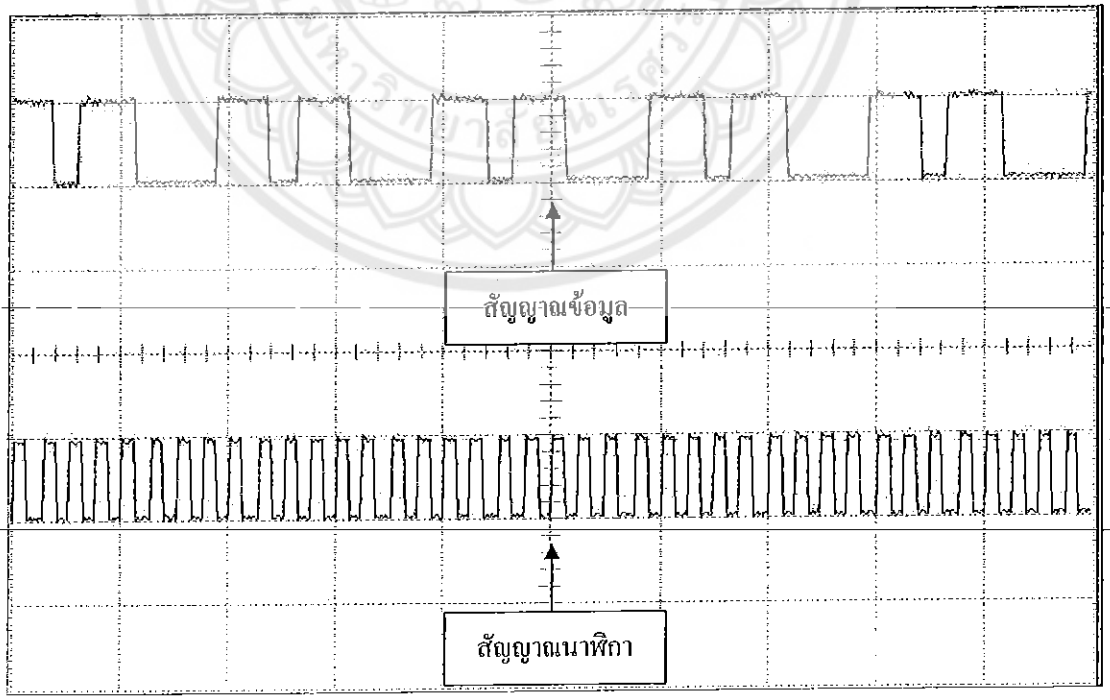
ในการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณนาพิกาของภาคส่งสัญญาณนั้น วงจรจะรับข้อมูลเข้ามาจากตัว PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีความเร็วข้อมูล 50 kbps โดยที่วงจรสร้างสัญญาณนาพิกาของโครงงานจะต้องทำการปรับความถี่ของวงจรเฟสล็อกลูปไว้ที่ 50 kHz เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ส่งเข้ามา

สัญญาณขาเข้าของวงจรในส่วนนี้คือข้อมูลที่จะทำการส่ง โดยจะผ่านวงจรโมโนสเตเบิลเพื่อสร้างสัญญาณ RZ ของข้อมูล โดยจะสร้างสัญญาณพัลส์บวกจากข้อมูล ทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณที่ส่งเข้ามา ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสร้างสัญญาณพัลส์จากข้อมูล

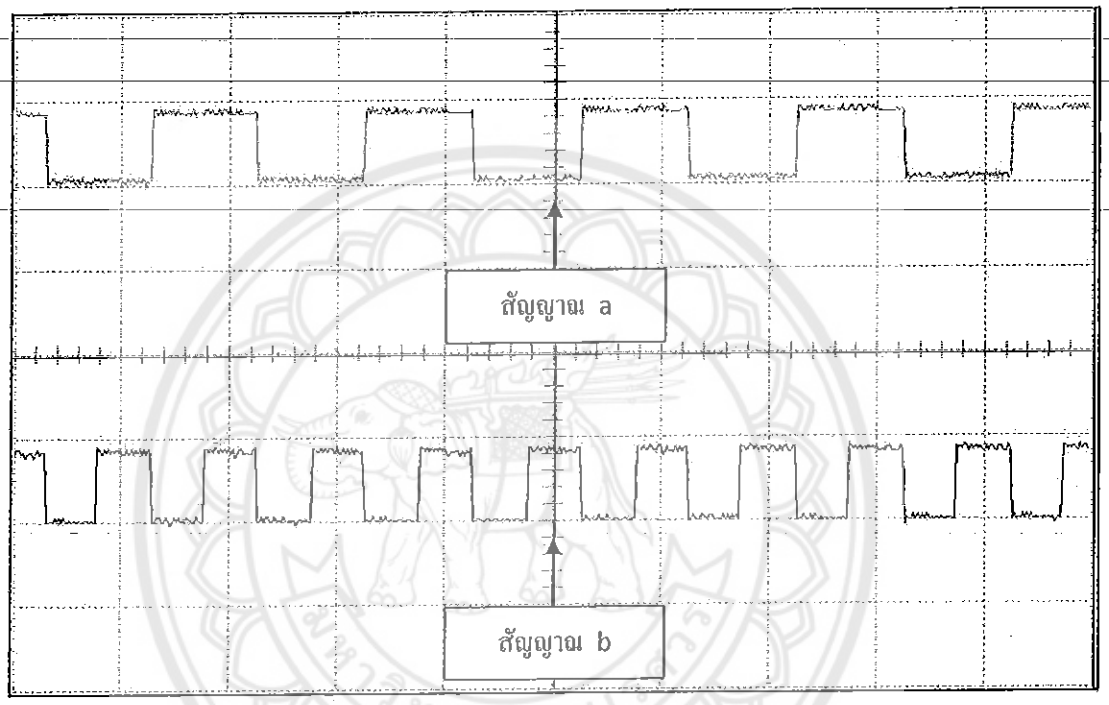
จากสัญญาณพัลส์ที่ได้นำไปป้อนเป็นสัญญาณควบคุมให้กับวงจรเฟสล็อกลูป เพื่อควบคุมให้วงจรเฟสล็อกลูปสร้างสัญญาณเนาพิกาให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ 50 kHz ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การสร้างสัญญาณเนาพิกาของวงจรเฟสล็อกลูป

4.3 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ a-b

การสร้างสัญญาณ a-b จากข้อมูลจำเป็นต้องใช้สัญญาณนาฬิกาจากวงจรเฟสล็อกลูปและนำสัญญาณนาฬิกาที่ได้ผ่านวงจรหารสอง เพื่อนำมาช่วยในการสร้างสัญญาณ a-b โดยความเร็วของสัญญาณ a และสัญญาณ b จะต่ำกว่าความเร็วข้อมูลอยู่ครึ่งหนึ่ง ซึ่งสัญญาณ a จะเป็นขบวนของบิตคี่ในข้อมูล และสัญญาณ b จะเป็นขบวนของบิตคู่ในข้อมูล ผลการทดสอบการสร้างสัญญาณ a-b แสดงดังรูปที่ 4.3

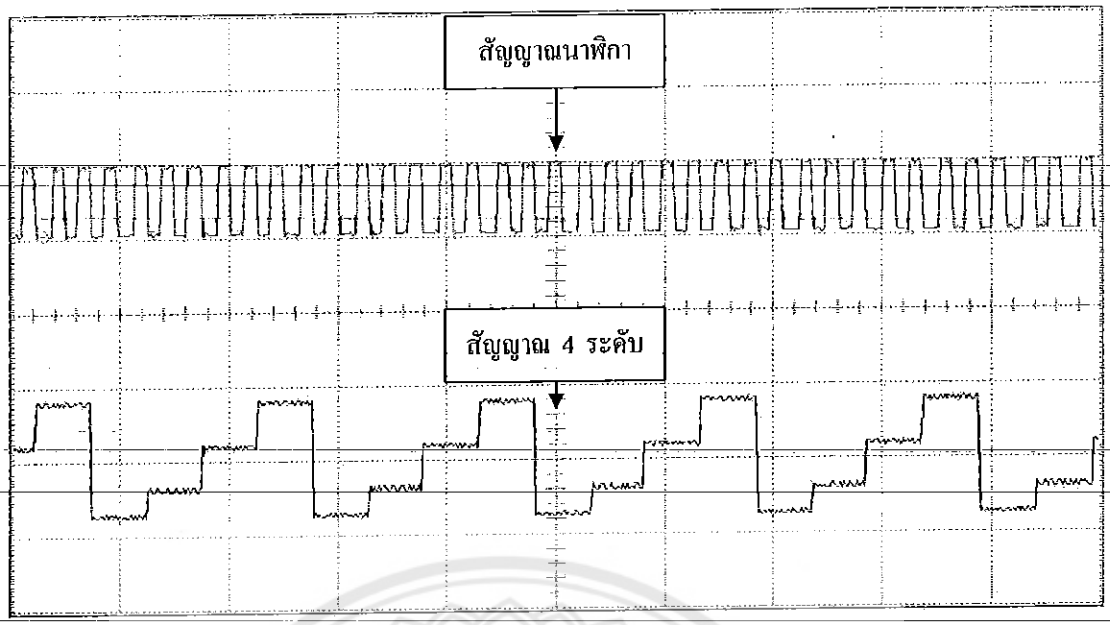


รูปที่ 4.3 การสร้างสัญญาณ a-b

สัญญาณด้านบนคือสัญญาณ a และสัญญาณด้านล่างคือสัญญาณ b โดยข้อมูลที่ส่งออกมาคือ "0001101100011011..." ดังนั้นสัญญาณ a จะเป็น "0011001100110011..." และสัญญาณ b จะเป็น "0101010101010101..." ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสัญญาณ a และสัญญาณ b จะใช้สัญญาณนาฬิกา 2 รอบต่อ 1 บิต เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

4.4 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ

จากสัญญาณ a-b ที่สร้างได้ในหัวข้อ 4.3 จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ ซึ่งสัญญาณ 4 ระดับเกิดจากการแปลงสัญญาณ a-b ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3



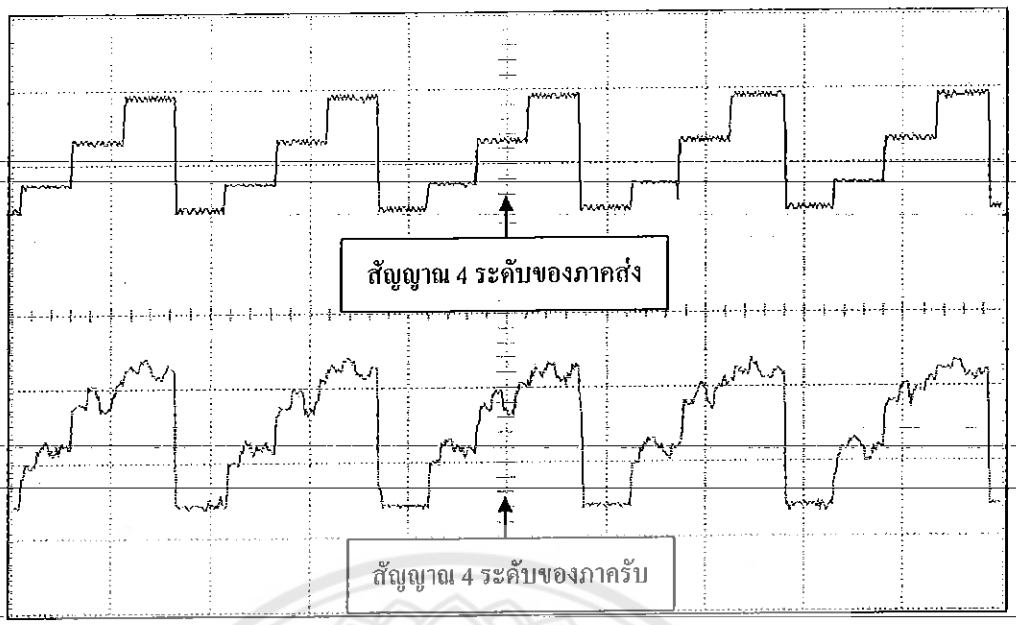
รูปที่ 4.4 สัญญาณ 4 ระดับของภาคส่ง

การรวมกันทางดิจิตอลดังแสดงในการทดลองนั้น สังเกตว่าจะเกิดสัญญาณอิมพัลส์เล็กๆ ขึ้นในสัญญาณ 4 ระดับ ซึ่งเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของออปแอมป์ทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณเกิดอิมพัลส์ขึ้นได้

4.5 การส่งและรับสัญญาณด้วยโมดูลสำหรับเชื่อมโยงแบบไร้สาย

สัญญาณ 4 ระดับที่ได้จะนำไปต่อกับขา Data Input ของตัวโมดูล ซึ่งจะมอดูเลตสัญญาณแล้วส่งผ่านสายอากาศของภาคส่ง เชื่อมโยงแบบไร้สายไปยังสายอากาศของภาครับ ซึ่งก็จะดีมอดูเลตสัญญาณออกเป็นสัญญาณ 4 ระดับ แล้วส่งผ่านไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดันของภาครับต่อไป

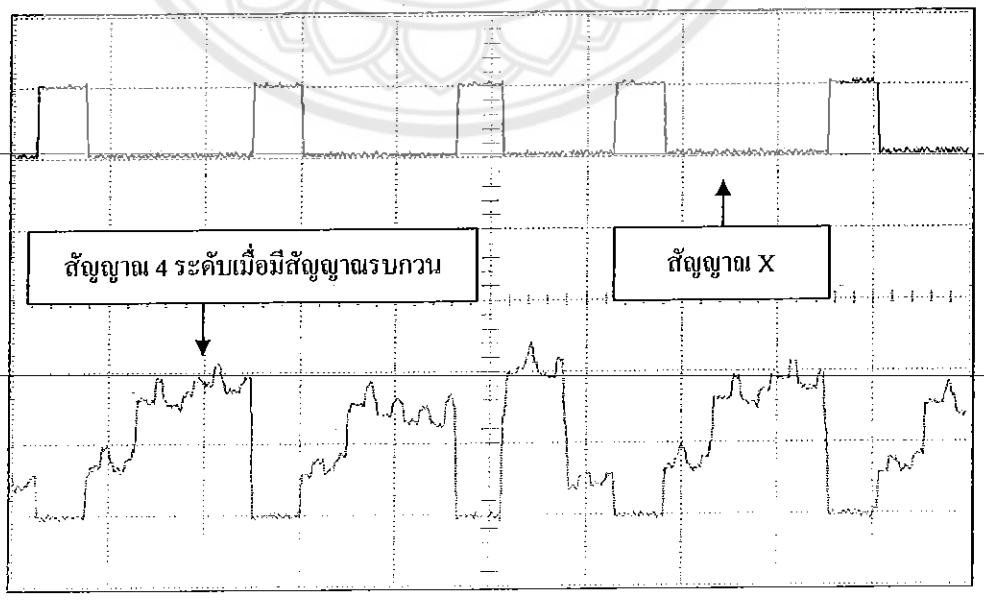
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณ 4 ระดับของภาคส่งเปรียบเทียบกับสัญญาณ 4 ระดับของภาครับ จากรูปจะเห็นว่าการส่งสัญญาณผ่านอากาศจะมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจจะทำให้ข้อมูลผิดพลาดได้หากสัญญาณรบกวนมีมากขึ้น



รูปที่ 4.5 สัญญาณ 4 ระดับของภาคส่งและภาครับ

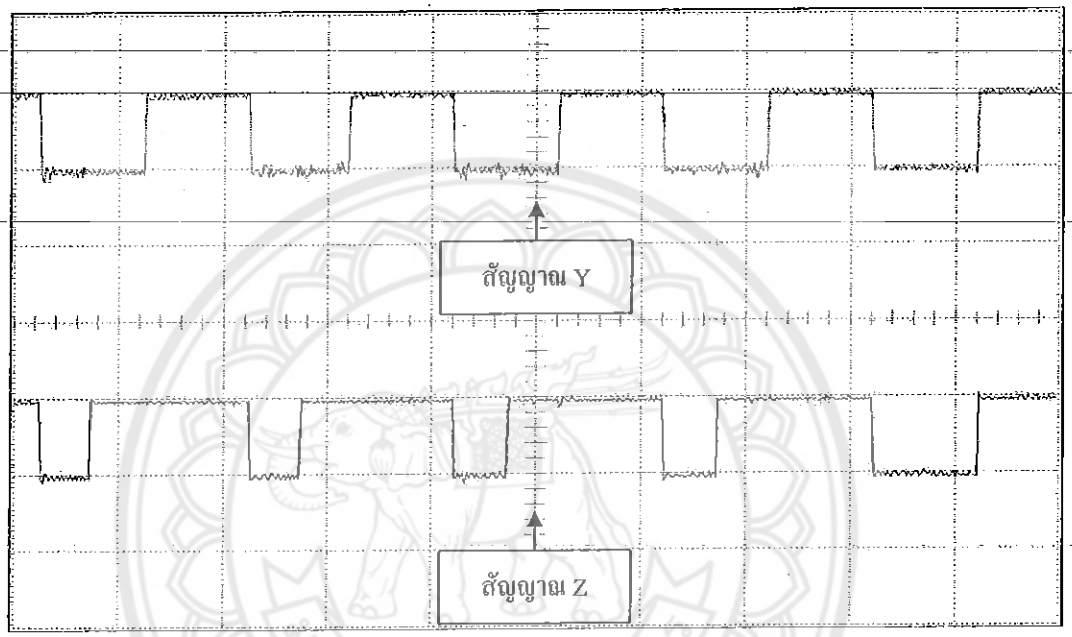
4.6 การทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

สัญญาณที่ดีมอดูเลตได้จะเป็นสัญญาณ 4 ระดับตามที่ส่งมา โดยจะขึ้อยู่บนแรงดัน 1 โวลต์ และจะนำไปผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ซึ่งใช้ออปแอมป์ 3 ตัวเป็นตัวแยกระดับสัญญาณ โดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิง 3 ระดับ ที่ +1.5 โวลต์ 0 โวลต์และ -1.5 โวลต์ ตามการออกแบบในหัวข้อ 3.3.4



รูปที่ 4.6 สัญญาณ 4 ระดับของภาครับและสัญญาณ X

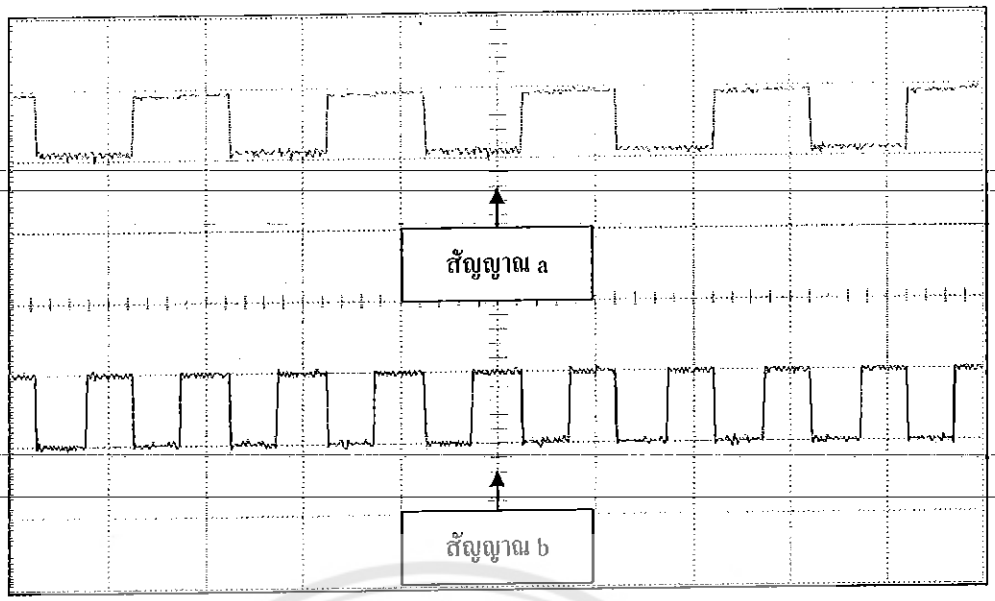
จากรูปที่ 4.6 สัญญาณ 4 ระดับเป็นสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตซึ่งจะนำไปป้อนให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน และสัญญาณด้านบนคือสัญญาณ X ที่ผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดันและผ่านไดโอด เพื่อที่จะได้เฉพาะสัญญาณซีกบวก ก่อนที่จะนำไปเข้าวงจรคอมบิเนชั่นทางลอจิกเพื่อสร้างสัญญาณ a-b ของภาครับ โดยรูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณ Y และ Z ที่ผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดันและไดโอด เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.7 สัญญาณ Y และ Z

4.7 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ a-b ของภาครับ

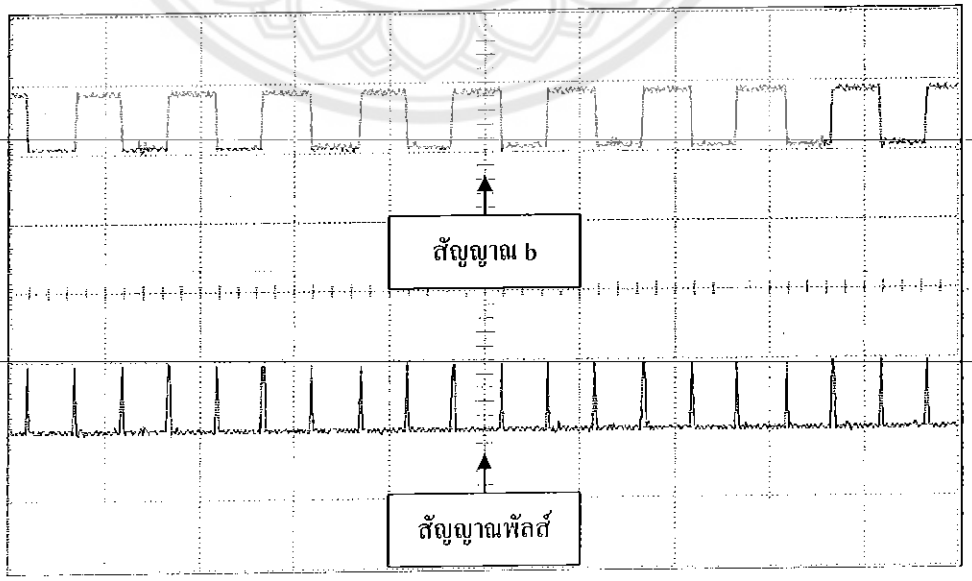
จากสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบแรงดันทั้งสามสัญญาณ นำมาผ่านวงจรคอมบิเนชั่นทางลอจิกตามสมการที่ 3-3 ซึ่งจะได้สัญญาณ a-b ตามผลลัพธ์ตามรูปที่ 4.8 โดยสัญญาณด้านบนคือ สัญญาณ a และสัญญาณด้านล่างคือสัญญาณ b



รูปที่ 4.8 สัญญาณ a และสัญญาณ b ของภาครับ

4.8 การสร้างสัญญาณนาฬิกาของข้อมูลทางด้านภาครับ

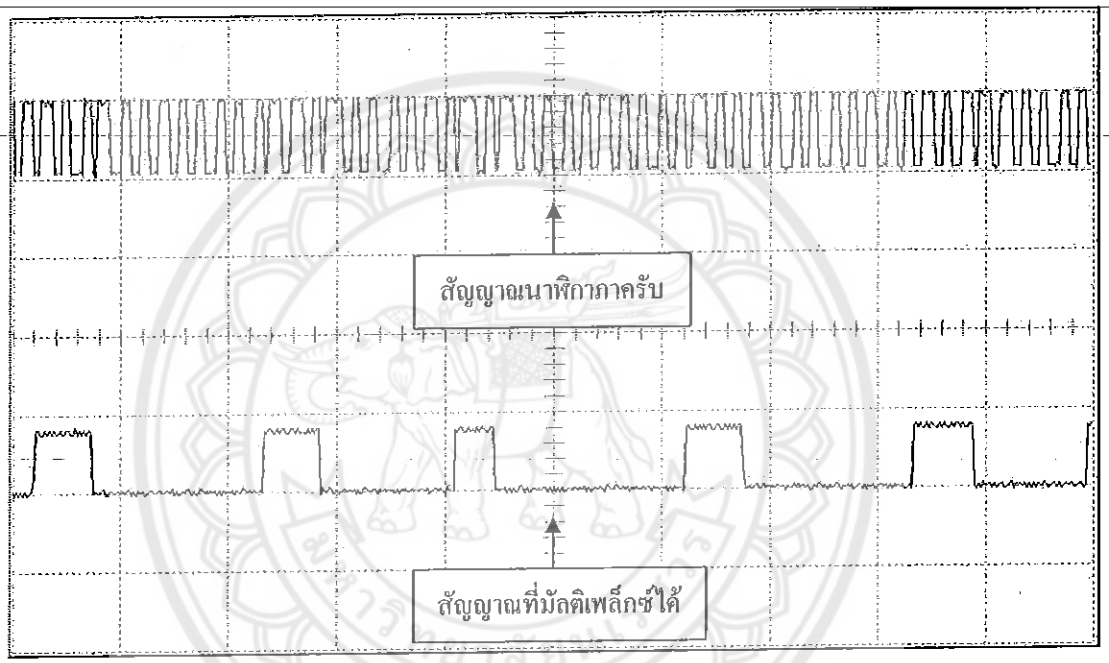
สัญญาณ a หรือสัญญาณ b ที่สร้างได้ จะนำมาสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อใช้เป็นสัญญาณควบคุมวงจรเฟสล็อกลูปของภาครับ ซึ่งจะสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับใช้ในการมัลติเพล็กซ์เอาข้อมูลกลับมาอีกครั้งหนึ่ง ในการทดลองนี้จะใช้สัญญาณ b เป็นสัญญาณควบคุม โดยในรูปที่ 4.9 สัญญาณด้านบนคือสัญญาณ b และสัญญาณด้านล่างคือสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมวงจรเฟส-ล็อกลูป



รูปที่ 4.9 สัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมวงจรเฟสล็อกลูปของภาครับ

4.9 การทดสอบวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

จากสัญญาณ a-b ที่ได้จะนำเข้าสู่วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ และใช้รับสัญญาณนาฬิกาที่สร้างได้เป็นตัวสวิตช์ว่าจะเอาสัญญาณใดออกมาก่อนหลังสลับกันไป ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ถ้าสัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้นนั้นไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่เข้ามา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยสัญญาณด้านบนคือสัญญาณนาฬิกาของวงจรเฟสล็อกลูป และสัญญาณด้านล่างคือสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 4.10 สัญญาณนาฬิกาภาครับและสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทำโครงงาน พร้อมเสนอแนะแนวทางในการนำโครงงานนี้ไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพให้มากยิ่งขึ้นได้ในอนาคต

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทำโครงงาน

โครงงานนี้ทำการออกแบบสร้างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย โดยตัวโครงงานจะประพฤติตัวเสมือนไม่มีอยู่ (Transparency) ระหว่างต้นทางและปลายทาง โดยการออกแบบเพื่อเพิ่มความเร็วของข้อมูลให้สูงกว่าการทำงานของวงจรสองเท่า ด้วยการเข้ารหัสและมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-ASK ซึ่งได้ประยุกต์ใช้ตัวโมดูลสำหรับมอดูเลตสัญญาณวิทยุเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างภาคส่งและภาครับ

โครงงานนี้ใช้แหล่งกำเนิดแรงดันบวกลบ 5 โวลต์ เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรทั้งทางภาคส่งและภาครับ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เป็นแหล่งกำเนิดข้อมูลให้กับภาคส่งโดยออกแบบให้จ่ายแรงดัน 5 โวลต์และ 0 โวลต์ เพื่อเทียบกับสัญญาณดิจิตอลซึ่งก็คือบิต “1” และบิต “0” ตามลำดับ

โครงงานนี้สามารถตอบสนองต่อข้อมูลที่ความเร็วสูงสุดประมาณ 80 kbps และระยะทางในการส่งและรับประมาณ 10 – 20 เมตร โดยที่ความผิดพลาดโดยรวมเกิดจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณอนาลอกซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้ทางภาครับไม่ชัดเจนและทำให้วงจรเปรียบเทียบแรงดันทำงานผิดพลาดและส่งผลให้ลำดับของข้อมูลผิดพลาดได้ และในกรณีที่สัญญาณนาฬิกาของภาครับและส่งไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่เข้ามาก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน

5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการทำโครงงาน

การทดสอบโครงงานนี้ในขั้นแรกได้ทดลองส่งสัญญาณดิจิตอลด้วยการต่อสายเชื่อมโยงระหว่างภาคส่งและภาครับ เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรในส่วนต่างๆและตัดปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนออกไป ซึ่งปัญหาในส่วนนี้ก็คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาจากวงจรสร้าง

สัญญาณนาฬิกาไม่คงที่และไม่สอดคล้องกับข้อมูลทำให้ลำดับข้อมูลผิดพลาด หลังจากทดลองแก้ไขวงจรแล้วจึงได้ประยุกต์ใช้โมดูลคลื่นวิทยุมาเป็นตัวเชื่อมโยงแบบไร้สาย หลังจากทดลองส่งและรับด้วยโมดูลหลายๆชนิดและส่งด้วยความถี่ต่างๆกัน ปัญหาที่พบก็คือสัญญาณที่ตรวจจับได้นั้นไม่ชัดเจน จึงทดลองลดความเร็วของข้อมูลให้ต่ำลงมาเหลือเพียง 1 kbps ซึ่งสัญญาณ 4 ระดับที่ตรวจจับได้นั้นดีขึ้น ดังนั้นระยะทางและความเร็วในการเชื่อมโยงแบบไร้สายนั้นจึงถูกจำกัดโดยโมดูลที่ใช้เชื่อมโยงแบบไร้สายด้วย

การมัลติเพล็กซ์เอาข้อมูลกลับมานั้น ในบางช่วงจะเกิดความผิดพลาดในลำดับข้อมูลขึ้นได้ถ้าสัญญาณนาฬิกาของภาครับและภาคส่งไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่เข้ามา ทำให้การทดลองส่งที่ความเร็วข้อมูลต่างๆกันนั้นต้องปรับความถี่ของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาด้วยเช่นกัน

ปัญหาในการแปลงสัญญาณ 4 ระดับให้เป็นสัญญาณ a-b ในส่วนของวงจรเปรียบเทียบแรงดันนั้นเกิดขึ้นได้ เมื่อระดับสัญญาณที่ดีมอดูเลตได้ไม่ชัดเจนเปลี่ยนไปตามระยะทางและจุดที่มีสัญญาณรบกวนมากๆซึ่งอาจทำให้วงจรเปรียบเทียบแรงดันทำงานผิดพลาดได้

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาโครงงาน

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในเรื่องของการสร้างสัญญาณนาฬิกาให้สอดคล้องกับข้อมูลนั้นหากสามารถหาวงจรที่มีเสถียรภาพในการสร้างสัญญาณนาฬิกา จะทำให้การรับส่งสัญญาณมีความผิดพลาดน้อยลง

ปัญหาเรื่องของการมัลติเพล็กซ์สัญญาณนั้น หากมีการออกแบบให้ใช้ขอบของสัญญาณนาฬิกาได้จะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องมากขึ้น

ความเร็วและระยะทางในการรับส่งของโครงงานยังคงถูกจำกัดด้วยประสิทธิภาพของโมดูลที่นำมาใช้ ดังนั้นการพัฒนาโครงงานนี้ต่อไปต้องสร้างตัวมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณวิทยุที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นขึ้นเพื่อใช้แทนโมดูลเชื่อมโยงแบบไร้สาย เพื่อรองรับการสื่อสารไร้สายที่ความเร็วสูงขึ้นและระยะทางที่ไกลขึ้น

สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมอื่นๆได้ เช่น สัญญาณเสียง ทำได้โดยการเปลี่ยนอินพุทเป็นสัญญาณเสียง ซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอก แล้วแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณแบบดิจิตอล จากนั้นส่งผ่านโครงงานเพื่อเข้ารหัสและมอดูเลตออกอากาศไปยังภาครับซึ่งจะดีมอดูเลตและถอดรหัสออกมา จากนั้นแปลงสัญญาณดิจิตอลกลับเป็นสัญญาณเสียง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงงานนี้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Robert G. Winch. **Telecommunication transmission systems.** First edition. Singapore : McGraw-Hill. 1993

[2] Vasudevan K. **Digital communication and signal processing.** Hyderabad : Universities Press. 2007

[3] Christopher Coleman. **An introduction to radio frequency engineering.** Cambridge : Cambridge University Press. 2004

[4] Theodore S. Rappaport. **Wireless communications : principles and practice.** Second edition. New Delhi : Prentice Hall. 2007

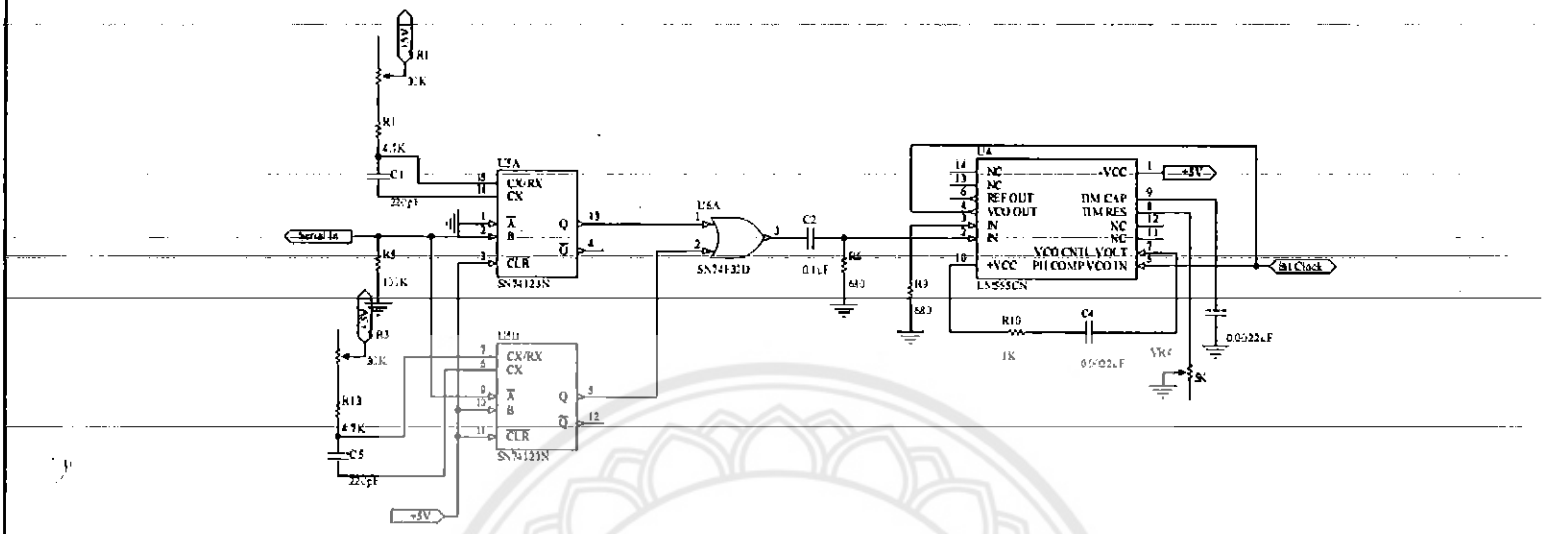
[5] สมบูรณ์ เนียมกล่ำ. **เรียนรู้และประยุกต์ใช้งาน PIC Microcontroller.** กรุงเทพมหานคร : เอดิสันเพรสโปรดักส์. 2547

[6] กองบรรณาธิการ. **คู่มือเทียบเบอร์ไอซี TTL.** กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2544

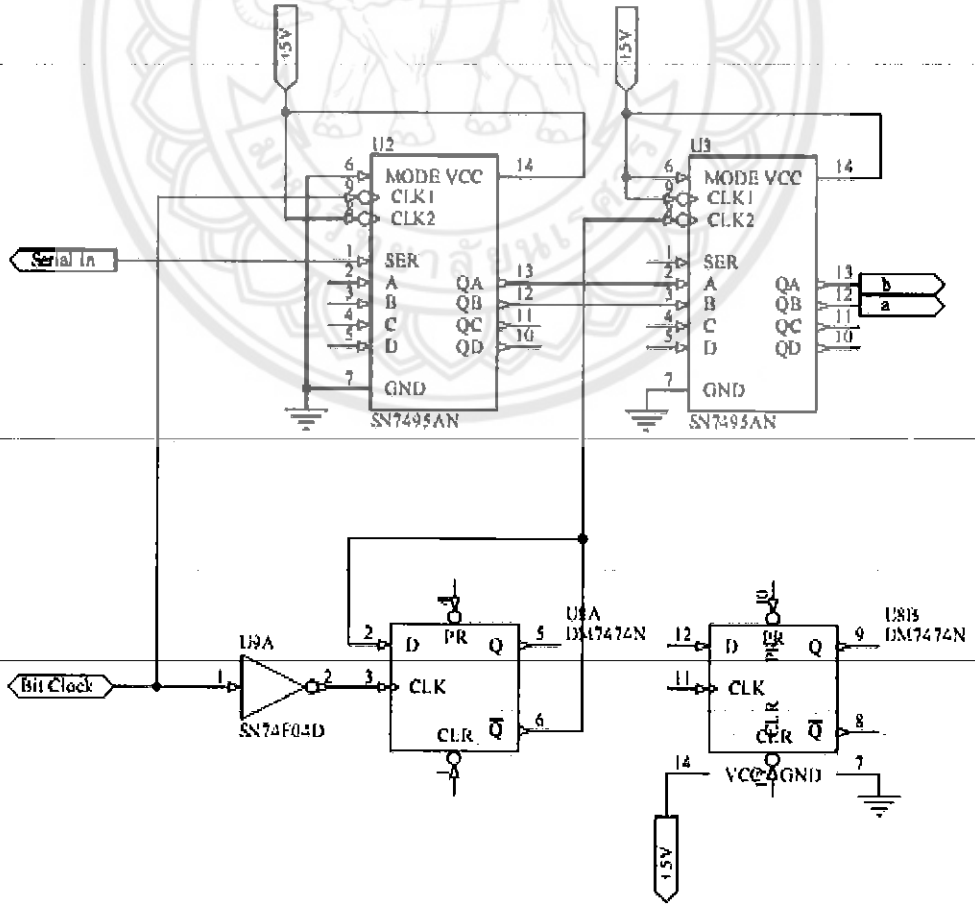
[7] http://www.electhai.com/

[8] http://www.doe.eng.cmu.ac.th/~tharadol/

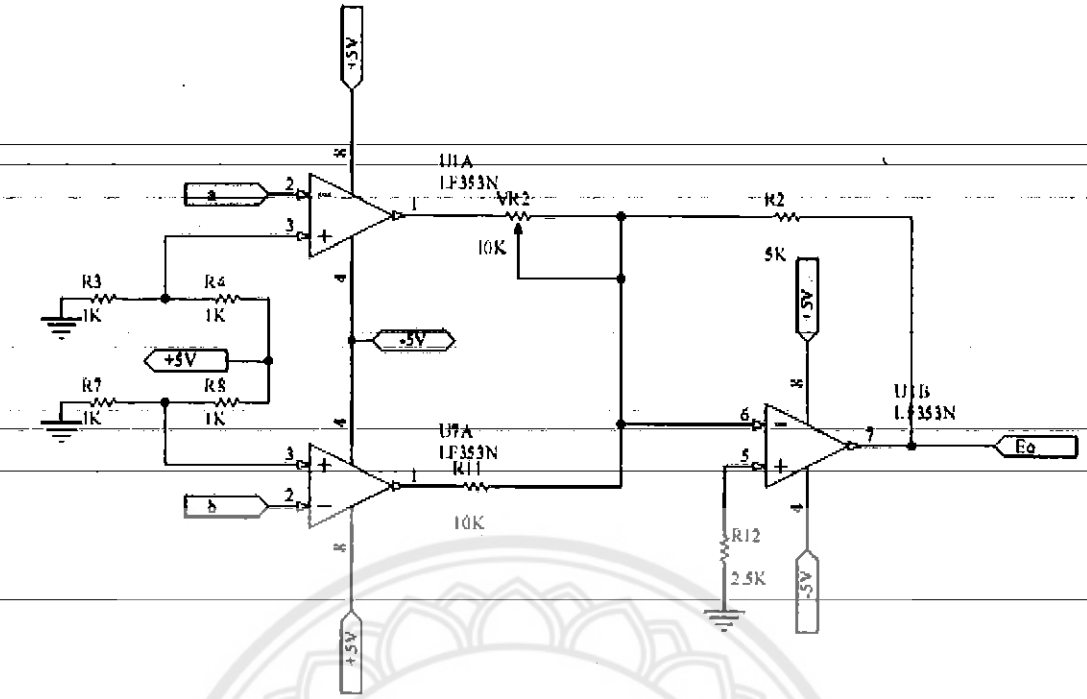
ภาคผนวก



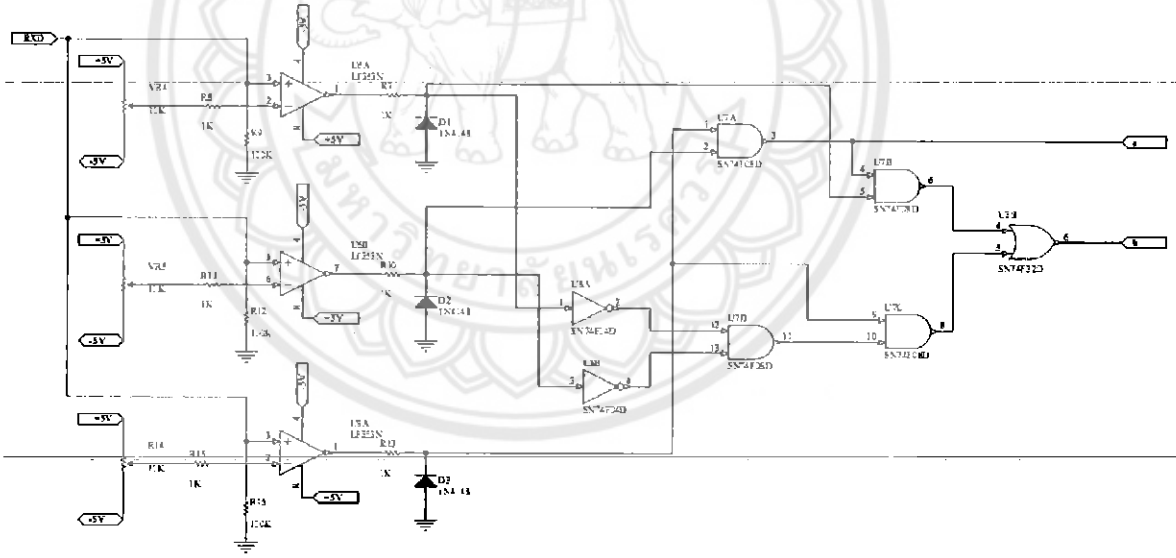
รูปที่ ผ1 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาภาคส่ง



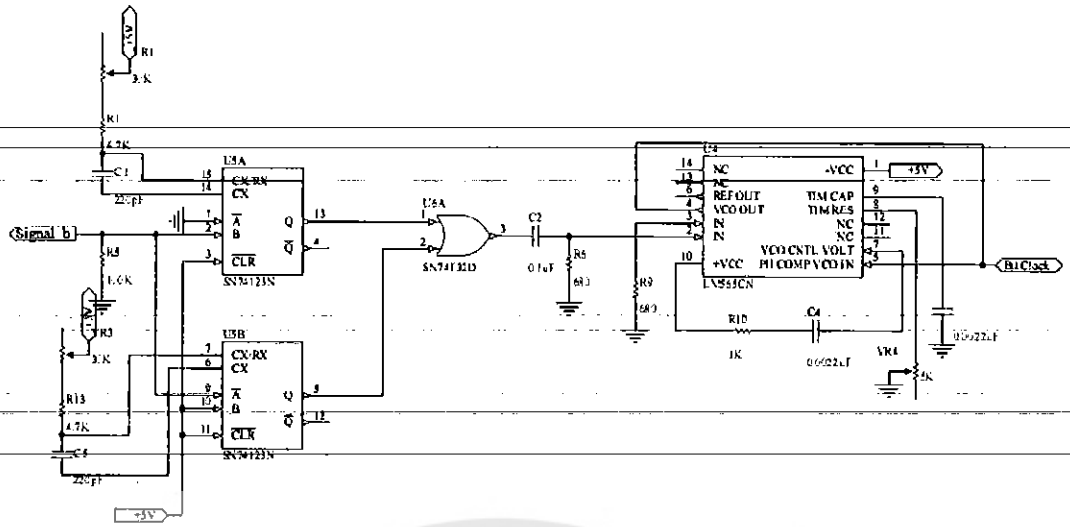
รูปที่ ผ2 วงจรสร้างสัญญาณ a-b



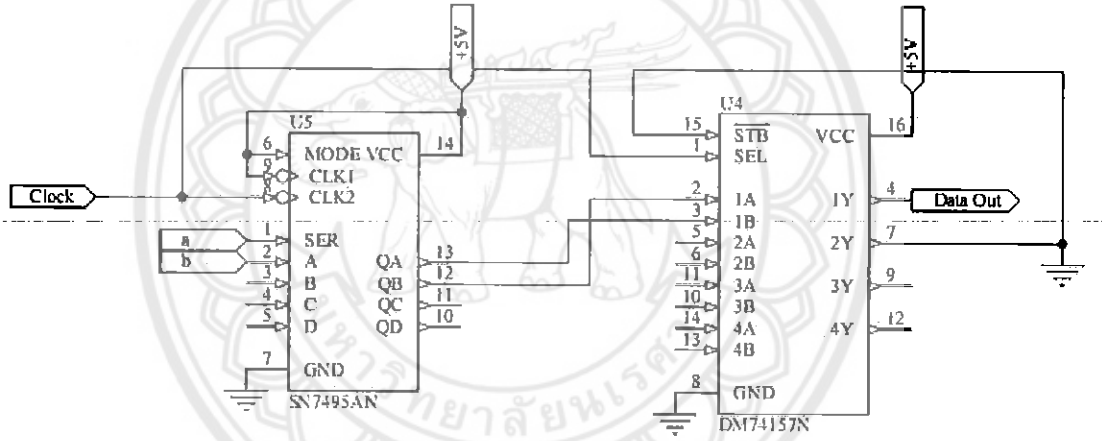
รูปที่ ผ3 วงจรสร้างสัญญาณ 4 ระดับ



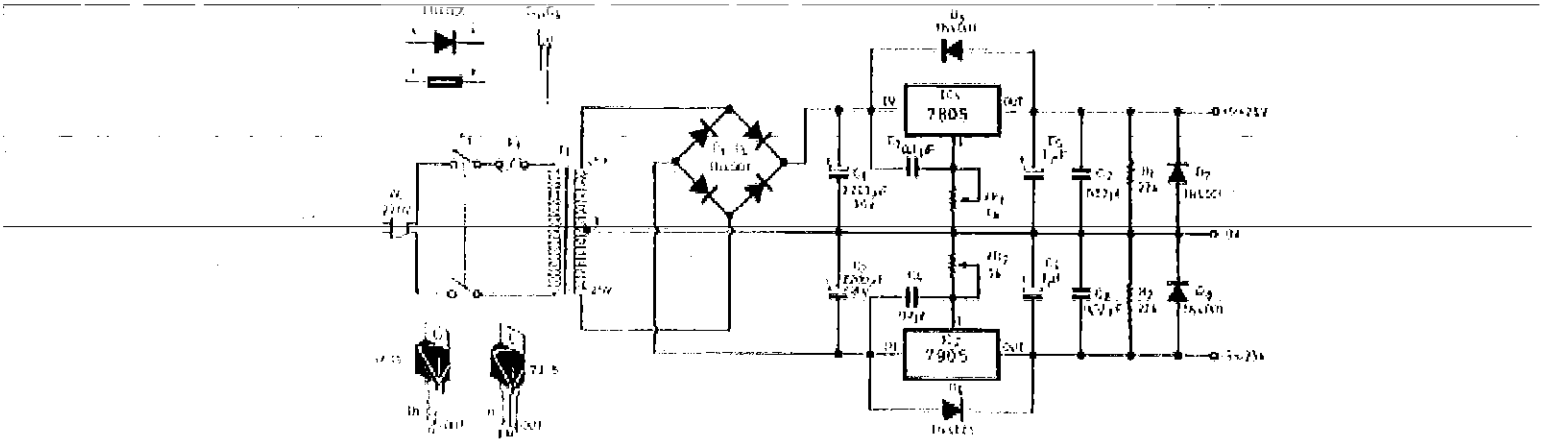
รูปที่ ผ4 วงจรเปรียบเทียบแรงดันและสร้างสัญญาณ a-b



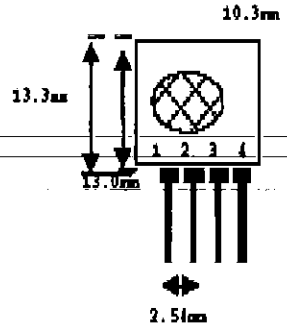
รูปที่ ผ5 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาภาครับ



รูปที่ ผ6 วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

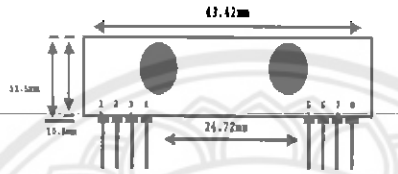


รูปที่ ผ7 วงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง



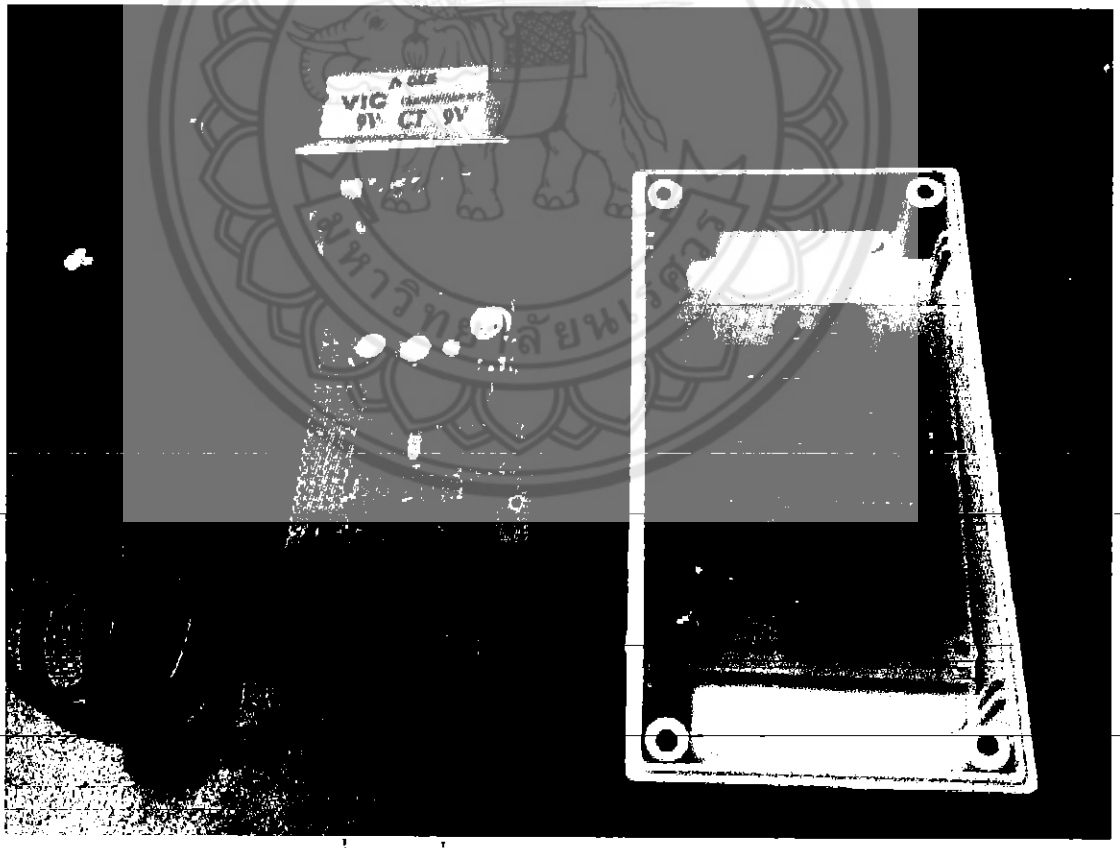
pin 1 : GND
pin 2 : Data In
pin 3 : Vcc
pin 4 : Antenna (RF output)

รูปที่ ผ8 โมดูลส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ

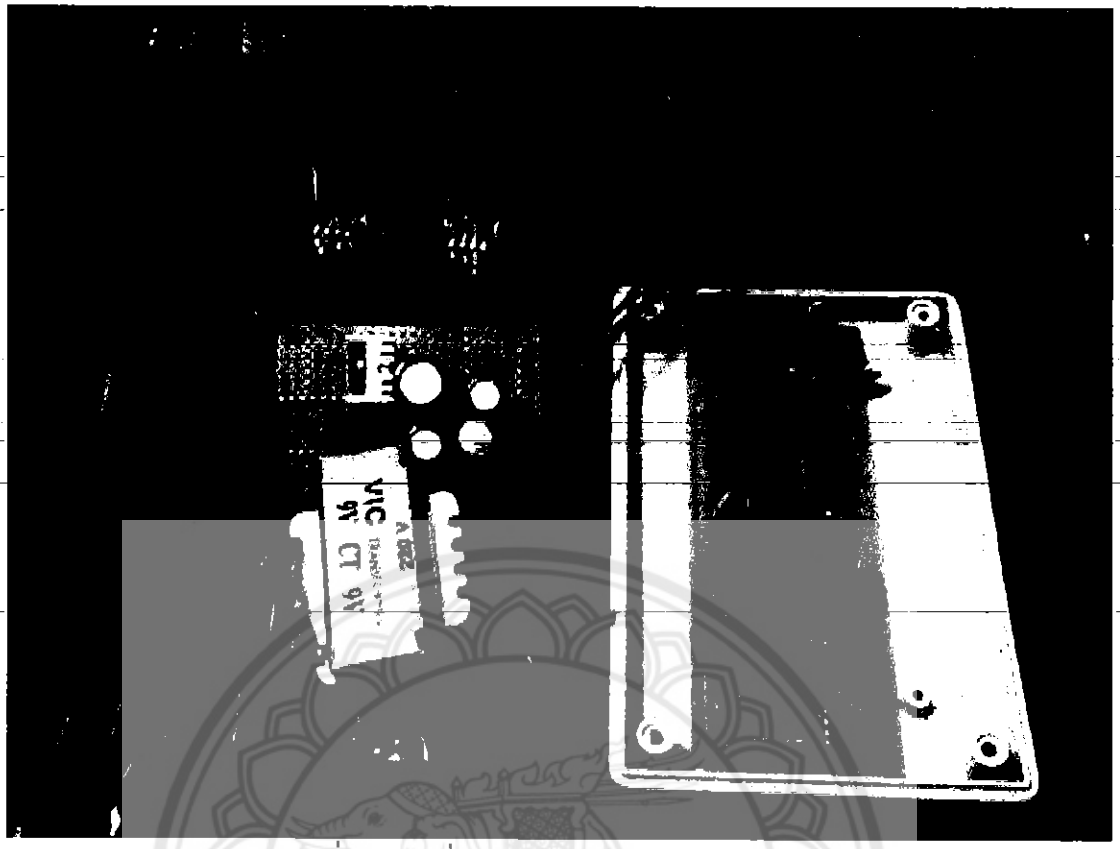


pin 1 : Gnd
pin 2 : Digital Data Output
pin 3 : Linear Output /Test
pin 4 : Vcc
pin 5 : Vcc
pin 6 : Gnd
pin 7 : Gnd
pin 8 : Antenna

รูปที่ ผ8 โมดูลรับสัญญาณคลื่นวิทยุ



รูปที่ ผ9 เครื่องส่งสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย



รูปที่ ผ10 เครื่องรับสัญญาณดิจิตอลแบบไร้สาย

โปรแกรมที่ใช้ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

```
#include <12F675.h>
#device adc=8

#FUSES NOWDT                    //No Watch Dog Timer
#FUSES HS                       //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOCPD                    //No EE protection
#FUSES NOPROTECT                //Code not protected from reading
#FUSES NOMCLR                   //Master Clear pin used for I/O
#FUSES PUT                      //Power Up Timer
#FUSES BROWNOUT                 //Reset when brownout detected
#FUSES BANDGAP_HIGH
#use delay(clock=12000000)
#ZERO_RAM
```

```
#use fast_io(A)

#define LED     PIN_A0
#define DATA_GEN  PIN_A1
#define DELAY_TIME  1

#int_RTCC
void RTCC_isr(void)
{
  output_toggle(LED);
}



void main()
{
  SET_TRIS_A( 0x00 );    // for output only
  setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);
  setup_adc(ADC_OFF);
  setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_256);
  setup_timer_1(T1_DISABLED);
  setup_comparator(NC_NC);
  setup_vref(FALSE);
  enable_interrupts(INT_RTCC);
  enable_interrupts(GLOBAL);


  while(true)
  {
    output_low(DATA_GEN);
    delay_ms(DELAY_TIME);
```

```
            output_low(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

            output_low(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

            output_high(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

            output_high(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

            output_low(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

            output_high(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

            output_high(DATA_GEN);
            delay_ms(DELAY_TIME);

        }

    }
```

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

ชื่อ นายอิสระพงศ์ สายดวงแก้ว

ภูมิลำเนา 39 ม.4 ต.ป่าตัน อ.แม่ทะ จ.ลำปาง 51250

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: top_toffee@hotmail.com