สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์

ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

PULSE CODE MODULATION EXPERIMENT SET

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...51033
วัน,เดือน,ปี 29 มิ.ย. 2547
.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

Pulse Code Modulation Experiment Set

ชื่อนักศึกษา

1. นายนพดล เอี่ยมพลับ	รหัสประจำตัว	45035264
2. นายมนตรี พยัควัลย์	รหัสประจำตัว	45035273
3. นายเสิน คงมี	รหัสประจำตัว	45035282
4. นายแสนชัย ไตรภูมิ	รหัสประจำตัว	45035283

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พงษ์เกียรติ เชษฐพิทักษ์สกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 1. อาจารย์อมรชัย ชัยชนะ

2. ผศ.กิติพงค์ มะโน

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
1. ผศ.วิสุทธิ์ อธิพรธรรม	
2. อาจารย์ไพบูลย์ พวงวงศ์ตระกูล	
3. อาจารย์พงษ์เกียรติ เชษฐพิทักษ์สกุล	
4. ผศ.กิติพงค์ มะโน	
5. อาจารย์อมรชัย ชัยชนะ	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันจันทร์ที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2547 เวลา 14.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.311 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

ภาควิชารับรองแล้ว

ลงนาม.....

(ผศ.สุรสิทธิ์ ราตรี)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

วันที่ 31 เดือน มีค. พ.ศ. 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

Pulse Code Modulation Experiment Set

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ PCM DPCM และ ADPCM
2. เพื่อออกแบบวงจรและโครงสร้างชุดทดลอง PCM DPCM และ ADPCM
3. เพื่อสร้างชุดทดลอง PCM DPCM และ ADPCM เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ
4. เพื่อทดลองหาคุณภาพของชุดทดลอง PCM DPCM และ ADPCM
5. เพื่อนำชุดทดลอง PCM DPCM และ ADPCM มาใช้ในห้องปฏิบัติการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของ PCM DPCM และ ADPCM
2. ได้รูปแบบวงจรและโครงสร้างชุดทดลอง PCM DPCM และ ADPCM
3. ได้ชุดทดลอง PCM DPCM และ ADPCM
4. ได้ผลการทดลองและชุดทดลองที่มีคุณภาพ
5. ได้ชุดปฏิบัติการทดลอง PCM DPCM และ ADPCM พร้อมใบงานประกอบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อ	ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	
นักศึกษา	นายนพดล	เอี่ยมพลับ
	นายมนตรี	พยัควัลย์
	นายเสิน	คงมี
	นายแสนชัย	ไตรภูมิ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์พงษ์เกียรติ	เชษฐพิทักษ์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์อมรชัย	ชัยชนะ
	ผศ.กิติพงศ์	มะโน
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม	
ปีการศึกษา	2546	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการออกแบบและสร้างชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ เป็นชุดทดลองที่สามารถทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ได้ 3 แบบคือ แบบที่หนึ่งเป็นชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบที่สองคือชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง และแบบที่สามเป็นชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

การหาคุณภาพของชุดทดลอง โดยการนำแบบแสดงความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิด้านเทคนิคการผลิตสื่อ มีความพึงพอใจต่อชุดทดลองอยู่ในระดับดีมากและแบบแสดงความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิด้านวิชาการที่มีต่อชุดทดลองและใบงานการทดลองมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Pulse Code Modulation Experiment Set	
Students	Mr.Noppadon	Eamplub
	Mr.Montri	Payakawan
	Mr.Sern	Khongmee
	Mr.Seanchai	Thaiphoom
Advisor	Mr.Pongkiat	Chedpitaksakul
Co-Advisors	Mr.Amornchai	Chaichana
	Asst.Prof.Kitipong	Mano
Education Level	Bachelor of Science in Industrial Education	
Program in	Telecommunication Engineering	
Academic Year	2003	

ABSTRACT

This thesis presents a design and implementation of Pulse Code Modulation Experiment Set. This project can test pulse code modulation system in three models, a pulse code modulation, a differential pulse code modulation, and an adapptive differential pulse code modulation. This experiment set helps the understanding of the principle and system of pulse code modulation.

The result of a quality evaluation of this experiment set by instruction media professional and academic professionals is very good and good respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้ลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกท่าน ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรมทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ รวมทั้งยังให้คำแนะนำแนวความคิดความรู้ต่างๆ แนวทางการแก้ไขปัญหาในการจัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องสมุดสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการค้นคว้าข้อมูล และที่ควรระลึกถึงอย่างยิ่งคือบิดามารดาที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ขีดความสามารถของโครงงาน	1
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ทฤษฎีการสร้างชุดทดลอง	4
2.1.1 หลักการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	4
2.1.2 การสร้างสื่อการเรียนการสอนประเภทชุดทดลอง	5
2.1.3 วิธีการสร้างชุดทดลองและใบงานการทดลอง	6
2.1.4 การสร้างแบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองและใบงานการทดลอง	6
2.2 การแสดงสัญญาณในรูปของดิจิตอล	7
2.3 การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูด	13
2.4 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	14
2.4.1 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ	15
2.4.2 การจัดระดับสัญญาณ	21
2.4.3 การคอมแพนดิง	23
2.4.4 การเข้ารหัส	29
2.4.5 การถอดรหัส	31
2.4.6 ระบบการซิงโครนัส	33
2.5 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	40
2.5.1 การทำนายค่าสัญญาณ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.2 การหาค่าสัญญาณผลต่าง	45
2.6 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	47
2.6.1 วงจรเข้ารหัส	49
2.6.2 วงจรถอดรหัส	52
2.6.3 การจัดระดับแบบปรับค่าได้	53
2.6.4 การทำนายค่าแบบปรับค่าได้	56
2.6.5 การแปลงสัญญาณ	62
2.6.6 การให้จังหวะสัญญาณที่กู้กลับคืนมา	62
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	64
3.1 วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	64
3.1.1 วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณ	64
3.1.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล	65
3.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก	66
3.2 วงจรซิงโคนัส	67
3.2.1 วงจรซิงโคนัสภาคส่ง	67
3.2.2 วงจรซิงโคนัสภาครับ	69
3.3 วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	70
3.3.1 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคเข้ารหัส	71
3.3.2 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัส	72
3.4 วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	73
3.4.1 การออกแบบและการสร้าง	74
3.4.2 การทำงาน	75
3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม	78
3.5 1 การออกแบบและการสร้าง	78
3.5.2 การทำงาน	78
3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์	81
3.6.1 การออกแบบและการสร้าง	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.6.2 การทำงาน	81
3.7 การออกแบบกล่องและการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ	82
3.7.1 กล่องชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	82
3.7.2 หน้าปัดชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	82
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	83
4.1 การทดลองและผลการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	83
4.1.1 ลำดับขั้นการทดลอง	83
4.1.2 ผลการทดลอง	83
4.2 การทดลองและผลการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	86
4.2.1 ลำดับขั้นการทดลอง	86
4.2.2 ผลการทดลอง	87
4.3 การทดลองและผลการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างแบบปรับค่า	92
4.3.1 ลำดับขั้นการทดลอง	92
4.3.2 ผลการทดลอง	93
บทที่ 5 บทสรุป	96
5.1 สรุป	96
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	96
5.3 แนวทางการพัฒนา	97
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ	99
ภาคผนวก ข วงจรและแผ่นวงจรพิมพ์	101
ภาคผนวก ค รายการอุปกรณ์	116
ภาคผนวก ง แผนผังการทำงานและรหัสต้นฉบับของโปรแกรม	125
ภาคผนวก จ ใบงาน	129
ภาคผนวก ฉ เฉลยใบงาน	161
ภาคผนวก ช คู่มือการใช้งาน	195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก ซ รายละเอียดและคุณสมบัติของอุปกรณ์	201
ภาคผนวก ฌ แบบประเมินคุณภาพชุดทดลอง	226
ภาคผนวก ญ หนังสือขอเชิญเป็นผู้ทรงวุฒิ	269
ภาคผนวก ฎ การวิเคราะห์ข้อมูล	271
ประวัติผู้แต่ง	278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รหัสเลขฐานสองแบบต่าง ๆ	29
2.2 คุณลักษณะที่ได้จากการจัดระดับ	53
2.3 สเกลของตัวคูณ	54
2.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชั่นน้ำหนัก	55
ค.1 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคเข้ารหัสพีซีเอ็ม	117
ค.2 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคถอดรหัสพีซีเอ็ม	117
ค.3 รายการอุปกรณ์ของวงจรซิงโครนัสด้านส่ง	118
ค.4 รายการอุปกรณ์ของวงจรซิงโครนัสด้านรับ	118
ค.5 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคเข้ารหัสดีพีซีเอ็ม	119
ค.6 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคการถอดรหัสดีพีซีเอ็ม	119
ค.6 (ต่อ) รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคการถอดรหัสดีพีซีเอ็ม	120
ค.7 รายการอุปกรณ์ของวงจรเข้ารหัสและถอดรหัสเอดีพีซีเอ็ม	120
ค.8 รายการอุปกรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม	121
ค.9 รายการอุปกรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์	122
ค.10 รายการอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง	122
ค.10 (ต่อ)รายการอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง	123
ค.11 รายการอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ	123
ค.12 รายการอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายไฟ	124
ช.1 ข้อมูลจำเพาะของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	199
ช.1 (ต่อ) ข้อมูลจำเพาะของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	200
ฎ.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง	272
ฎ.2 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 1	273
ฎ.3 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 2	274
ฎ.4 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 3	275
ฎ.5 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 4	276
ฎ.6 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อสื่อการสอน	277

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญญาณแอนะลอกและสัญญาณดิจิตอล	8
2.2 แผนผังการทำงานตามแนวความคิดของทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง	8
2.3 จุดการสุ่มตัวอย่างและค่าการสุ่มตัวอย่าง	9
2.4 ผลตอบสนองอิมพัลส์	12
2.5 หลักการมอดูเลตและดีมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูด	13
2.6 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	15
2.7 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ	16
2.8 สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่สุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ	18
2.9 สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่สุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะหนึ่ง	19
2.10 การพร่าเพี้ยนเกิดจากแถบคลื่นซ้อนกัน	20
2.11 การพร่าเพี้ยนเกิดจากการสอดแทรก	21
2.12 การจัดระดับสัญญาณ	22
2.13 การจัดระดับสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับ	23
2.13 (ต่อ) การจัดระดับสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับ	24
2.14 คุณลักษณะการจัดระดับด้วยคอมเพรสเซอร์และเอกซ์แพนเดอร์	25
2.15 คุณลักษณะคอมเพรสชั่นของไดโอด	26
2.16 แบบอย่างคุณลักษณะของคอมเพรสชั่น	26
2.17 คุณลักษณะของคอมแพนดิงเมื่อ A = 87.6	27
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับอินพุตต่อ S/N_Q เมื่อใช้คอมแพนดิงวิธีต่างๆ	28
2.19 หลักการของการเข้ารหัส	31
2.20 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก	32
2.21 การส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรม	33
2.22 การต่อเนื่องของข้อมูลที่ส่งแบบซิงโครนัส	34
2.23 รูปแบบการใช้สัญญาณซิงค์นำหน้ากลุ่มตัวอักษร	35
2.24 เปรียบเทียบอุปกรณ์รับข้อมูลตรวจหาสัญญาณซิงค์ในระบบซิงโครนัส	36
2.25 การตัดแถวของบิตออกกลุ่มละ 8 บิตในระบบการส่งผ่านแบบอะซิงโครนัส	36
2.26 การส่งข้อมูล 1 ตัวแบบอะซิงโครนัส	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 สัญญาณเวลาของข้อมูลอนุกรม 8 บิต	39
2.28 ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลที่ทำการส่งโดยใช้ยูอาร์ท	39
2.29 ลักษณะของไอซีที่เป็นยูอาร์ท	40
2.30 ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	41
2.31 แผนผังการทำนายค่าสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอก	43
2.32 แผนผังการทำนายค่าสัญญาณจากดิจิตอล	44
2.33 แผนผังการทำนายค่าสัญญาณจากดิจิตอลผลต่าง	45
2.34 วงจรลบแรงดัน	46
2.35 วงจรลบแรงดันที่มีการขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต	47
2.36 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างแบบปรับค่า	48
2.37 ตัวแปลงรหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	50
2.38 แผนผังการทำงานของวงจรเข้ารหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างแบบปรับค่า	51
2.39 ผังงานการทำงานของวงจรถอดรหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างแบบปรับค่า	52
2.40 รูปคลื่นของสัญญาณอินพุตที่เข้ารหัส	57
2.41 แผนผังการทำงานของการทำนายแบบไปข้างหน้า	58
2.42 แผนผังการทำงานของการทำนายแบบย้อนกลับ	59
2.43 ฟิลเตอร์อันดับที่ 6 ของฟิลเตอร์ชนิดซีโร่ทั้งหมด	59
2.44 ฟิลเตอร์อันดับที่ 2	60
3.1 วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณ	64
3.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล	65
3.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก	66
3.4 ผังการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านส่ง	67
3.5 วงจรซิงโครนัสด้านส่ง	68
3.6 ผังการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านรับ	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 วงจรซิงโครนัสด้านรับ	70
3.8 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคเข้ารหัส	71
3.9 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัส	73
3.10 วงจรเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบเอดีพีซีเอ็ม	75
3.11 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม	79
3.12 การกำหนดค่าจากสวิตช์ที่ใช้ในการกำหนดค่าอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม	80
3.13 วงจรผลิตความถี่สัญญาณไซน์	81
3.14 ขนาดกล่องชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	82
3.15 หน้าปัดชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	82
4.1 สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ที่จุด TP4	83
4.2 สัญญาณนาฬิกา CLK1 ที่จุด TP5	84
4.3 สัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP6	84
4.4 สัญญาณพีซีเอ็มที่จุด TP7	85
4.5 สัญญาณแอนะลอกที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิตอลที่จุด TP9	85
4.6 สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP4 และที่จุด TP11	86
4.7 สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ที่จุด TP12	87
4.8 สัญญาณนาฬิกา CLK1 และ CLK2 ที่จุด TP13 และที่จุด TP18	87
4.9 สัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณกับสัญญาณค่าทำนายที่จุด TP14 และที่จุด TP19	88
4.10 สัญญาณค่าผลต่างที่จุด TP15	88
4.11 สัญญาณค่าผลต่างที่แปลงจากสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP16	89
4.12 สัญญาณค่าทำนายภาคเข้ารหัสที่จุด TP17	89
4.13 สัญญาณดีพีซีเอ็มที่จุด TP20	90
4.14 สัญญาณค่าผลต่างภาคถอดรหัสที่จุด TP22	90
4.15 สัญญาณแอนะลอกภาคถอดรหัสที่ผ่านการสุ่มสัญญาณที่จุด TP24	91
4.16 สัญญาณค่าทำนายภาคถอดรหัสที่จุด TP25	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 สัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP12 และที่จุด TP11	92
4.18 สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ที่จุด TP27	93
4.19 สัญญาณเอาต์พุตพีซีเอ็มภาคเข้ารหัสที่จุด TP28	93
4.20 สัญญาณเอาต์พุตเอดีพีซีเอ็มภาคเข้ารหัสที่จุด TP29	94
4.21 สัญญาณเอาต์พุตพีซีเอ็มของภาคถอดรหัสเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31	94
4.22 สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP33	95
ก.1 ภาพด้านบนของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	100
ก.2 ภาพด้านหน้าของทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	100
ข.1 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคเข้ารหัส	102
ข.2 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคเข้ารหัส	102
ข.3 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคเข้ารหัส	102
ข.4 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคถอดรหัส	103
ข.5 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคถอดรหัส	103
ข.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคถอดรหัส	103
ข.7 วงจรซิงโครนัสด้านส่งและด้านรับ	104
ข.8 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรซิงโครนัสด้านส่งและด้านรับ	104
ข.9 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรซิงโครนัสด้านส่งและด้านรับ	105
ข.10 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคเข้ารหัส	105
ข.11 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคเข้ารหัส	106
ข.12 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างภาคเข้ารหัส	106
ข.13 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคถอดรหัส	107
ข.14 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคถอดรหัส	107
ข.15 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างภาคถอดรหัส	108
ข.16 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	108
ข.17 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.18 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ แบบผลต่างแบบปรับค่า	109
ข.19 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม	110
ข.20 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม	111
ข.21 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม	111
ข.22 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์	112
ข.23 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์	112
ข.24 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์	112
ข.25 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง	113
ข.26 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง	113
ข.27 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง	113
ข.28 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ	114
ข.29 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ	114
ข.30 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ	114
ข.31 วงจรแหล่งจ่ายไฟ	115
ข.32 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรแหล่งจ่ายไฟ	115
ข.33 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรแหล่งจ่ายไฟ	115
ง.1 ผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านส่ง	126
ง.2 ผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านรับ	126
จ.1 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	131
จ.2 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	131
จ.3 สัญญาณที่จุด TP4	132
จ.4 สัญญาณที่จุด TP5	132
จ.5 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP6	133
จ.6 สัญญาณที่จุด TP7	133
จ.7 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP9	134
จ.8 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP11	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.9 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	137
จ.10 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	138
จ.11 สัญญาณที่จุด TP12	138
จ.12 สัญญาณที่จุด TP13 และ TP18	139
จ.13 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP14	139
จ.14 สัญญาณที่จุด TP14 และ TP19	140
จ.15 สัญญาณที่จุด TP15	140
จ.16 สัญญาณที่จุด TP16	141
จ.17 สัญญาณที่จุด TP16 และ TP17	141
จ.18 สัญญาณที่จุด TP17 และ TP19	142
จ.19 สัญญาณที่จุด TP20	142
จ.20 สัญญาณที่จุด TP22	143
จ.21 สัญญาณที่จุด TP24	143
จ.22 สัญญาณที่จุด TP15 และ TP25	144
จ.23 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP11	144
จ.24 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	147
จ.25 สัญญาณที่จุด TP27	148
จ.26 สัญญาณที่จุด TP30	148
จ.27 สัญญาณที่จุด TP32	149
จ.28 สัญญาณที่จุด TP28	149
จ.29 สัญญาณที่จุด TP29	150
จ.30 สัญญาณที่จุด TP31	150
จ.31 สัญญาณที่จุด TP27 และ TP33	151
จ.32 แผนผังการทำงานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	154
จ.33 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP15	155
จ.34 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP20	155
จ.35 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP28	156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.36 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP28	156
จ.37 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP31	157
จ.38 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP31	157
จ.39 สัญญาณที่จุด TP9 และ TP25	158
จ.40 สัญญาณที่จุด TP11 และ TP33	158
จ.41 สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP11 และสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33	159
ฉ.1 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	163
ฉ.2 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	163
ฉ.3 สัญญาณที่จุด TP4	164
ฉ.4 สัญญาณที่จุด TP5	164
ฉ.5 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP6	165
ฉ.6 สัญญาณที่จุด TP7	165
ฉ.7 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP9	166
ฉ.8 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP11	166
ฉ.9 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	170
ฉ.10 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง	171
ฉ.11 สัญญาณที่จุด TP12	171
ฉ.12 สัญญาณที่จุด TP13 และ TP18	172
ฉ.13 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP14	172
ฉ.14 สัญญาณที่จุด TP14 และ TP19	173
ฉ.15 สัญญาณที่จุด TP15	173
ฉ.16 สัญญาณที่จุด TP16	174
ฉ.17 สัญญาณที่จุด TP16 และ TP17	174
ฉ.18 สัญญาณที่จุด TP17 และ TP19	175
ฉ.19 สัญญาณที่จุด TP20	175
ฉ.20 สัญญาณที่จุด TP22	176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ.21 สัญญาณที่จุด TP24	176
ฉ.22 สัญญาณที่จุด TP15 และ TP25	177
ฉ.23 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP11	177
ฉ.24 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า	181
ฉ.25 สัญญาณที่จุด TP27	182
ฉ.26 สัญญาณที่จุด TP30	182
ฉ.27 สัญญาณที่จุด TP32	183
ฉ.28 สัญญาณที่จุด TP28	183
ฉ.29 สัญญาณที่จุด TP29	184
ฉ.30 สัญญาณที่จุด TP31	184
ฉ.31 สัญญาณที่จุด TP27 และ TP33	185
ฉ.32 แผนผังการทำงานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	188
ฉ.33 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP15	189
ฉ.34 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP20	189
ฉ.35 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP28	190
ฉ.36 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP28	190
ฉ.37 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP31	191
ฉ.38 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP31	191
ฉ.39 สัญญาณที่จุด TP9 และ TP25	192
ฉ.40 สัญญาณที่จุด TP11 และ TP33	192
ฉ.41 สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP11 และสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33	193
ช.1 ส่วนประกอบและชุดควบคุมของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	197
ช.2 การกำหนดค่าจากดิปสวิตช์ที่ใช้ในการกำหนดค่าอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม	198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การสื่อสารดิจิตอลกลายเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญมากของระบบสื่อสารโทรคมนาคมมีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันได้ใช้กันอย่างกว้างขวางตามบ้านเรือนต่างๆ ใช้ในทางด้านการทหาร และในการติดต่อสื่อสารในห้วงอวกาศ จึงได้มีการพัฒนารูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่งในรูปแบบสัญญาณดิจิตอล

การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ (Pulse Code Modulation : PCM) เป็นกระบวนการแปลงสัญญาณแอนะลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอลที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากการส่งสัญญาณแบบดิจิตอลมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการส่งสัญญาณแอนะลอก ซึ่งการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์มีหลายรูปแบบ คือ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง (Differential Pulse Code Modulation : DPCM) และการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า (Adaptive Differential Pulse Code Modulation : ADPCM) เป็นการปรับปรุงคุณภาพจากการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ซึ่งให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่า

ในโครงงานนี้ คณะผู้จัดทำได้จัดทำชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาหลักการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้นักศึกษาและผู้สนใจเข้าใจหลักการของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ได้ง่ายขึ้น

1.2 ขีดความสามารถของโครงงาน

โครงงานนี้มีขีดความสามารถดังนี้

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์สามารถแสดงหลักการทำงานโดยแยกแต่ละภาคได้
2. มีทั้งภาครับและภาคส่งอยู่ในชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์
3. สามารถเลือกใช้สัญญาณอินพุตตั้งแต่ 0 ถึง 20 kHz
4. สามารถเลือกสัญญาณนาฬิกา 2 kHz 4 kHz 8 kHz 16 kHz และ 32 kHz
5. สามารถวัดทดสอบสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างและการคงค่าสัญญาณของ PCM DPCM และ ADPCM ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สามารถวัดทดสอบสัญญาณจากการเข้ารหัสแบบ PCM DPCM และ ADPCM ได้
7. สามารถวัดทดสอบสัญญาณจากการถอดรหัสแบบ PCM DPCM และ ADPCM ได้
8. มีใบงานการทดลอง 4 เรื่อง
   8.1 ใบงานที่ 1 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์
   8.2 ใบงานที่ 2 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง
   8.3 ใบงานที่ 3 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า
   8.4 ใบงานที่ 4 เรื่องความแตกต่างระหว่าง PCM DPCM และ ADPCM

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาภายในปริญญานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็นบทต่างๆ เพื่อความสะดวกต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ ในแต่ละบทจะประกอบไปด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์ ขีดความสามารถของโครงงาน และเนื้อหาในบทต่างๆ โดยสังเขป

บทที่ 2 ประกอบด้วยทฤษฎีการสร้างสื่อการเรียนการสอนประเภทชุดทดลอง ทฤษฎีต่างๆ เกี่ยวกับโครงสร้างของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ องค์ประกอบของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ และหลักการทำงานของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

บทที่ 3 กล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวกับแผนการทำงานของโครงงาน ผังวงจรต่างๆ ที่ใช้ในโครงงานตลอดจนการออกแบบและการสร้างส่วนประกอบต่างๆ เช่น วงจรการสุ่มตัวอย่างและการคงค่าสัญญาณ วงจรรวมของภาคการเข้ารหัส วงจรรวมของภาคการถอดรหัส โครงสร้างของชิ้นงานพร้อมการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ โดยละเอียด

บทที่ 4 ประกอบด้วยการทดลองและผลการทดลองวงจรการสุ่มและการคงค่าสัญญาณ วงจรการเข้ารหัสสัญญาณ วงจรการถอดรหัสสัญญาณ วงจรการทำนายค่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการจัดทำโครงงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งแนวทางในการพัฒนา

ภาคผนวก ก แสดงภาพเครื่องต้นแบบ

ภาคผนวก ข ประกอบด้วยผังรายละเอียดวงจรและแผ่นวงจรพิมพ์

ภาคผนวก ค แสดงรายการอุปกรณ์ที่ใช้งานในแต่ละวงจร

ภาคผนวก ง แสดงแผนผังการทำงานและรหัสต้นฉบับของโปรแกรมทั้งหมดที่สร้างขึ้นเพื่อประกอบการทำงานของโครงงาน

ภาคผนวก จ ประกอบด้วยใบงานประกอบการทดลองจำนวน 4 ใบงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ ประกอบด้วยเฉลยใบงานประกอบการทดลองจำนวน 4 ใบงาน

ภาคผนวก ช เป็นคู่มือการใช้งานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

ภาคผนวก ซ แสดงรายละเอียดและคุณสมบัติของอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในโครงงาน

ภาคผนวก ฌ แสดงตัวอย่างใบประเมิน

ภาคผนวก ญ หนังสือขอเชิญเป็นผู้ทรงคุณวุฒิ

ภาคผนวก ฎ การวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีการสร้างชุดทดลอง

ชุดสื่อการเรียนการสอนเป็นชุดสื่อที่ได้จากการรวบรวมสื่อการเรียนการสอน วัสดุและอุปกรณ์ประเภทต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อใช้หรือส่งเสริมการเรียนการสอน ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยการศึกษาข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ชุดสื่อการสอนแต่ละชุดจะประกอบด้วยหัวข้อย่อยหลายๆ หัวข้อสำหรับเนื้อหาวิชาใดวิชาหนึ่งและการออกแบบชุดสื่อการสอนแต่ละชุดควรยึดหลักสำคัญดังนี้

1) ให้สอดคล้องกับความต้องการของงานในสถานประกอบการ

2) ให้เหมาะสมกับสภาพการสอน

3) สามารถลดจินตนาการของผู้เรียนให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่ายและรวดเร็ว

4) ส่งเสริมให้นักศึกษามีกิจกรรมระหว่างบทเรียน

2.1.1 หลักการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

หลักการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งมี 8 หัวข้อ ผู้ทดลองนำมาใช้เป็นกรอบในการสร้างชุดทดลองจำนวน 4 หัวข้อ คือ

1) การกำหนดความคิดหลักและหน้าที่ในการใช้งานผลิตภัณฑ์ เป็นการกำหนดกรอบความคิดในการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีความทันสมัย มีความสามารถในเชิงนวัตกรรมสูง มีความเหมาะสมกับข้อกำหนดและมีการเลือกใช้วัสดุและกรรมวิธีการผลิต โดยคำนึงถึงสมรรถนะการใช้งานที่เหมาะสม

2) การวางแผนระยะเวลาสำหรับกิจกรรมการผลิต ในขั้นตอนนี้เป็นการวางแผนและประมาณระยะเวลาดำเนินการสำหรับการผลิต การวางแผนคือการระบุกิจกรรมหลักที่สำคัญและจัดลำดับเวลาในการดำเนินกิจกรรมเหล่านั้น

3) การเตรียมเครื่องต้นแบบและทดลองผลิตภัณฑ์เป็นการทำเครื่องต้นแบบ การผลิตนำร่องและการทดลองผลิตภัณฑ์ใหม่ในการทดสอบทางเทคนิคต่างๆ ขั้นตอนนี้ยังรวมไปถึงการออกแบบการจัดสร้างเครื่องมือและผลิตเครื่องต้นแบบเพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์

4) การปรับปรุงผลิตภัณฑ์และพัฒนาการผลิตเป็นการปรับปรุงสมรรถนะการใช้งาน มีการเพิ่มอุปกรณ์อำนวยความสะดวกหรืออุปกรณ์ทางด้านความปลอดภัยให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การสร้างสื่อการเรียนการสอนประเภทชุดทดลอง

แนวทางในการปรับปรุงขบวนการเรียนการสอนสาขาช่างอุตสาหกรรมคือ การมีสื่อการเรียนการสอนที่สอดคล้องกับหลักสูตรและผู้สอนได้นำไปใช้อย่างถูกวิธี ซึ่งเป็นผลให้คุณภาพการสอนดีขึ้น ในการผลิตสื่อเพื่อการสอนโดยเฉพาะวิธีการทดลอง นอกจากจะพิจารณาถึงระบบและวิธีที่ต้องใช้แล้วยังมีหลักอีก 3 ประการคือ

1) เทคนิคการผลิต

2) ความคิดสร้างสรรค์ในการผลิต

3) การออกแบบให้สอดคล้องกับขบวนการสอน จุดมุ่งหมายการสอนและลักษณะที่จะนำไปใช้

สำหรับแนวทางในการออกแบบสื่อการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพนั้นประกอบด้วยขบวนการ 5 ขั้นตอน คือ

1) กำหนดขอบข่ายเนื้อหาวิชาด้วยองค์ประกอบ 4 ประการที่ควบคู่กันคือ การศึกษาเชิงวิเคราะห์ เนื้อหาวิชา การเปรียบเทียบหลักสูตรจากการสำรวจโรงงานและสำรวจสถานศึกษา

2) การกำหนดเนื้อหาและวัตถุประสงค์จากขอบข่ายเนื้อหาที่ได้นำมาศึกษาเพื่อให้สามารถจำแนกเป็นส่วนต่างๆ เท่าที่จำเป็นกล่าวคือ ให้รู้ถึงจุดมุ่งหมายและหน้าที่ของชุดทดลองว่าทำอย่างไรจึงสามารถทำงานได้ตามต้องการ สามารถตอบสนองจุดมุ่งหมายของเนื้อหารายวิชาได้อย่างครบถ้วน

3) การออกแบบและการสร้างชุดสื่อการเรียนการสอน วัตถุประสงค์ของชุดทดลองที่ผ่านการวิเคราะห์และตรวจสอบ จึงนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การสอนหรือชุดทดลองที่ทำการออกแบบสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การสอนของครูและอุปกรณ์ในการกิจกรรมของนักศึกษา ชุดทดลองจึงมีความสำคัญมากต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาและความสามารถทำงานในด้านช่างอุตสาหกรรมเพื่อที่จะสามารถปฏิบัติงานได้อย่างดี การออกแบบและสร้างสื่อประเภทชุดทดลองนั้นจำเป็นต้องนำหลักการด้านการออกแบบทางด้านวิศวกรรมปฏิบัติมาประยุกต์กับงานที่ออกแบบสร้าง

4) การทดลองใช้ชุดสื่อการเรียนการสอนจะถูกนำไปใช้ในสถานศึกษาโดยผู้ทดลองเพื่อค้นหาข้อบกพร่องต่างๆ เช่น ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความยาก ความซับซ้อน ความทนทาน ความสะดวกในการใช้งานและการลอกเลียนแบบขึ้นมาทำใหม่

5) การปรับปรุงข้อมูลและประสบการณ์ที่ได้จากการทดลองข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงชุดสื่อการเรียนการสอนให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 วิธีการสร้างชุดทดลองและใบงานการทดลอง

วิธีการสร้างชุดทดลองและใบงานการทดลองมีลำดับขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

1) ขั้นการเตรียมเอกสารและข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) ขั้นการเตรียมหาอุปกรณ์ที่จะช่วยในการสร้างชุดทดลองและใบงานการทดลอง

3) ขั้นการดำเนินการประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

3.1) เลือกเนื้อหารายวิชา

3.2) กำหนดวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

3.3) จัดลำดับเนื้อหา

3.4) วางแผนวิธีการสอน สื่อที่ใช้ กิจกรรมการเรียน และรูปแบบการประเมินผล

3.5) การสร้างชุดทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.5.1) การสร้างชุดทดลองเป็นตัวเครื่องที่จะนำไปทดลอง การสร้างโดยทั่วไปใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อง่าย มีราคาถูกและคุณภาพดี

3.5.2) การสร้างใบงานการทดลองจะต้องมีรายละเอียดทั้งทฤษฎี การบรรยายประกอบรูป คำตอบ สรุป และแบบฝึกหัดท้ายการทดลอง

3.6) นำชุดทดลองและใบงานการทดลองไปทดลอง

3.7) นำกลับมาปรับปรุงแก้ไข (ถ้ามี)

3.8) ผลิตชุดทดลองและใบงานการทดลองที่สมบูรณ์

2.1.4 การสร้างแบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองและใบงานการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานสร้างแบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองและใบงานการทดลองมีดังนี้

1) จัดทำร่างเกณฑ์การประเมินตามคำอธิบายและวัตถุประสงค์รายวิชา การทดลองปฏิบัติการทางวิศวกรรมโทรคมนาคม โดยร่างเกณฑ์การประเมินของชุดทดลองและใบงานการทดลอง ใช้แบบวัดเจตคติของเบส (Best's Scale) ซึ่งเป็นข้อมูลชนิดเลือกตอบและกำหนดระดับความคิดเห็นเป็นค่าให้น้ำหนักคะแนน ระดับความคิดเห็นแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ

ระดับ 5	หมายถึง	เห็นด้วยมากที่สุด
ระดับ 4	หมายถึง	เห็นด้วยมาก
ระดับ 3	หมายถึง	เห็นด้วยปานกลาง
ระดับ 2	หมายถึง	เห็นด้วยน้อย
ระดับ 1	หมายถึง	เห็นด้วยน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การประเมินคุณภาพชุดทดลองจัดระดับค่าเฉลี่ย 5 ระดับ ดังนี้

คะแนนเฉลี่ย	4.50-5.00	หมายถึง ระดับคุณภาพดีมาก
คะแนนเฉลี่ย	3.50-4.49	หมายถึง ระดับคุณภาพดี
คะแนนเฉลี่ย	2.50-3.49	หมายถึง ระดับคุณภาพปานกลาง
คะแนนเฉลี่ย	1.50-2.49	หมายถึง ระดับคุณภาพพอใช้
คะแนนเฉลี่ย	1.00-1.49	หมายถึง ระดับคุณภาพควรปรับปรุง

โดยเกณฑ์การประเมินคุณภาพชุดทดลองต้องอยู่ในระดับค่าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3.50 จึงถือว่าสื่อการเรียนการสอนนั้นมีคุณภาพ

2) ปรึกษาอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์และอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ร่วมเพื่อตรวจสอบพร้อมทั้งนำข้อเสนอแนะต่างๆ มาทำการปรับปรุงแก้ไขจนได้เป็นเกณฑ์การประเมินคุณภาพของชุดทดลองและใบงานการทดลอง

3) หลังจากที่ได้เกณฑ์การประเมินโดยได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์และอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ร่วมแล้ว ผู้วิจัยนำเกณฑ์การประเมินดังกล่าวมาจัดทำเป็นแบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองและใบงานการทดลอง

4) นำแบบประเมินคุณภาพมาจัดทำเป็นแบบสอบถามเพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลจากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 คน

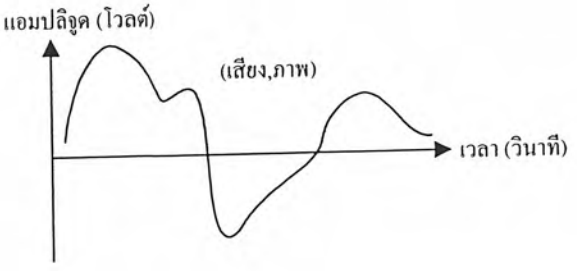
2.2 การแสดงสัญญาณในรูปของดิจิตอล

สัญญาณดิจิตอลที่ส่งออกไปนั้นจะเป็นแบบสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete signal) ทั้งเวลาและแอมปลิจูด ส่วนสัญญาณเดิมจะเป็นสัญญาณเสียงหรือสัญญาณภาพซึ่งเป็นสัญญาณแอนะลอก โดยที่สัญญาณนี้จะมีแอมปลิจูดเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องไปกับเวลา ถ้าแสดงความแตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองอย่างง่ายๆ จะเป็นตามรูปที่ 2.1

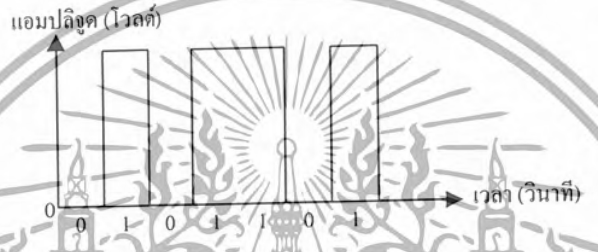
ในการที่จะส่งสัญญาณแอนะลอกในรูปของสัญญาณดิจิตอลนั้นจำเป็นต้องแปลงสัญญาณให้มีรูปร่างต่างกันไปโดยที่ยังรักษาข่าวสารเดิมไว้

กระบวนการเบื้องต้นที่จะแปลงสัญญาณแอนะลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอลนั้นจะอาศัยทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling theorem) โดยมีแนวความคิดเบื้องต้นตามรูปที่ 2.2 ขบวนพัลส์ที่เอาต์พุตของมอดูเลเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของสัญญาณอินพุต สำหรับด้านรับนั้นเมื่อองค์ประกอบความถี่สูงของขบวนพัลส์ถูกกำจัดออกโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter : LPF) แล้วจะได้รับสัญญาณเดิม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้าสุ่มตัวอย่างสัญญาณอินพุตด้วยระยะห่างที่เท่ากันแล้วก็สามารถจะทำให้เกิดสัญญาณเดิมได้อย่างสมบูรณ์ที่ด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



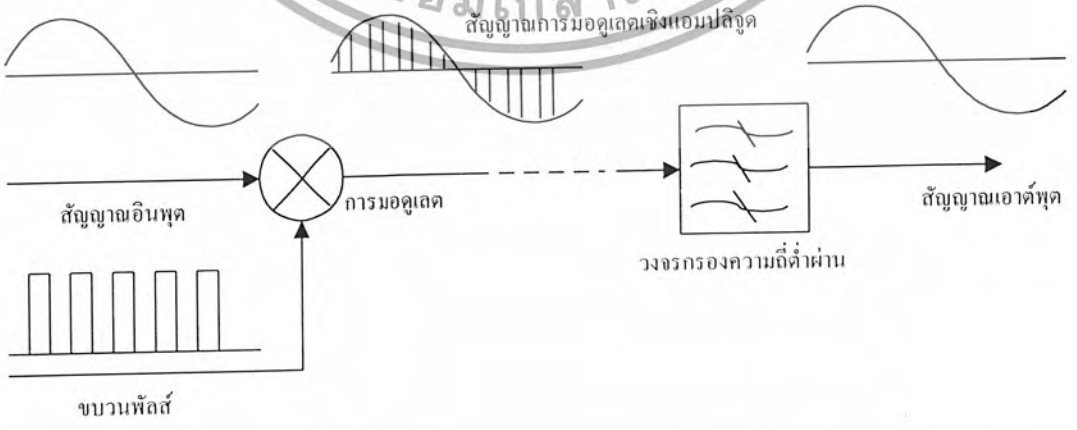
(ก) สัญญาณแอนะลอก



(ข) สัญญาณดิจิตอล

รูปที่ 2.1 สัญญาณแอนะลอกและสัญญาณดิจิตอล

ซึ่งตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างกล่าวว่า"ถ้าข่าวสารในสัญญาณถูกจำกัดให้มีความถี่สูงสุดเป็น f_m แล้ว หากใช้ขบวนพัลส์ที่มีความถี่เท่ากับหรือมากกว่า $2f_m$ ทำการสุ่มตัวอย่างก็สามารถจะเก็บข่าวสารได้อย่างสมบูรณ์"

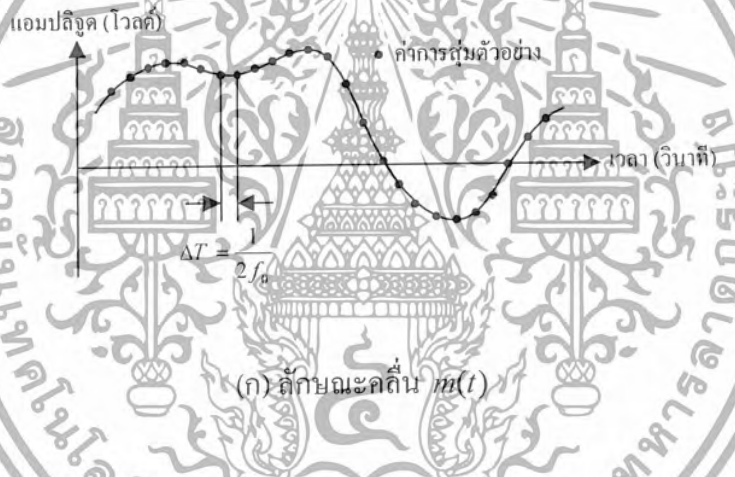


รูปที่ 2.2 แผนผังการทำงานตามแนวความคิดของทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง

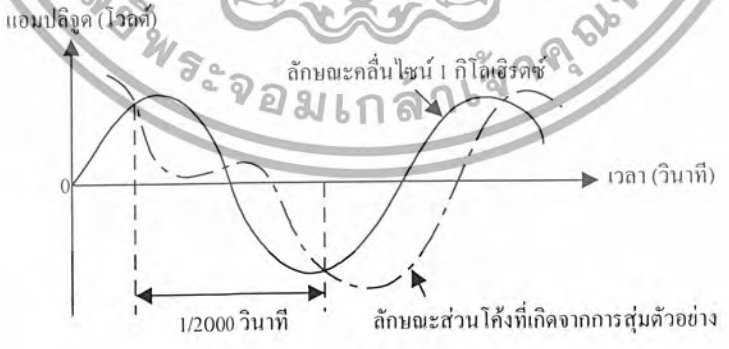
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่นถ้าลักษณะคลื่น $m(t)$ ตามรูปที่ 2.3 (ก) เป็นสัญญาณซึ่งถูกจำกัดแถบความถี่ให้มีเพียง f_m และถ้าแอมปลิจูดของลักษณะคลื่น (ค่าการสุ่มตัวอย่าง) ถูกกำหนดให้เป็นแบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องที่ทุกๆ $2f_m$ วินาทีแล้วที่ด้านรับจะได้รับสัญญาณ $m(t)$ อย่างแน่นอน สำหรับ "•"ในลักษณะคลื่นตามรูปที่ 2.3 (ก) นั้นแสดงค่าการสุ่มตัวอย่าง ระยะห่างของแต่ละจุดที่สุ่มตัวอย่าง คือ $1/2f_m$ ถูกเรียกว่า Nyquist interval

แม้ว่าจะเขียนส่วนโค้งผ่านจุดสุ่มตัวอย่างทั้งสองในระหว่างระยะห่างของแต่ละจุดที่สุ่มตัวอย่างได้หลายๆ แบบก็ตาม ถ้าเขียนตามใจชอบแล้วส่วนโค้งเหล่านั้นจะมีองค์ประกอบความถี่ f_m เพียงส่วนโค้งเดียวเท่านั้น สำหรับส่วนโค้งอื่นๆ จะมีองค์ประกอบความถี่สูงกว่า f_m ทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่นในการสุ่มตัวอย่าง คลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างทุกๆ 1/2000 วินาทีตามรูปที่ 2.3 (ข) แล้ว องค์ประกอบของความถี่ที่สูงกว่า 1 กิโลเฮิรตซ์จะปรากฏขึ้น



(ก) ลักษณะคลื่น $m(t)$



(ข) การสุ่มตัวอย่างคลื่นไซน์ 1 กิโลเฮิรตซ์

รูปที่ 2.3 จุดการสุ่มตัวอย่างและค่าการสุ่มตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ได้กล่าวมานี้เป็นการอธิบายทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างอย่างกว้างๆ และในขณะเดียวกันเพื่อทำให้เข้าใจทฤษฎีนี้มากยิ่งขึ้นจึงแสดงการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ไว้ดังต่อไปนี้

สมมติว่า $m(t)$ เป็นสัญญาณอินพุตซึ่งความถี่สูงสุดถูกจำกัดไว้เป็น fm และมีสเปคตรัมความถี่เป็น $G(f)$ แล้ว เมื่อใช้ฟูริเออร์อินเวอร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier inverse transform) จะได้

$$m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft}\,df \tag{2.1}$$

เนื่องจาก $G(f)$ ถูกจำกัดแถบความถี่ให้มีค่าระหว่าง $|f| \le f_m$ ดังนั้นจึงเขียนสมการ 2.1 ใหม่ได้ดังนี้

$$m(t) = \int_{-f_m}^{f_m} G(f)e^{j2\pi ft}\,df \tag{2.2}$$

ดังนั้นค่าของ $m(t)$ ที่ทุกๆ เวลา $t = \dfrac{n}{2f_m}$ คือ

$$m\left(\frac{n}{2f_m}\right) = \int_{-f_m}^{f_m} G(f)e^{j2\pi f\left(\frac{n}{2f_m}\right)}\,df \tag{2.3}$$

ตามที่ทราบกันดีว่า สามารถแสดง $G(f)$ ในรูปของอนุกรมฟูริเออร์ได้ดังนี้

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{-n}e^{-j2\pi f\left(\frac{n}{2f_m}\right)} \tag{2.4}$$

ในที่นี้

$$\begin{aligned} C_{-n} &= \frac{1}{2f_m}\int_{-f_m}^{f_m} G(f)e^{j2\pi f\left(\frac{n}{2f_m}\right)}\,df \\ &= \frac{1}{2f_m}m\left(\frac{n}{2f_m}\right) \end{aligned} \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ 2.5 ลงในสมการ 2.4 จะได้

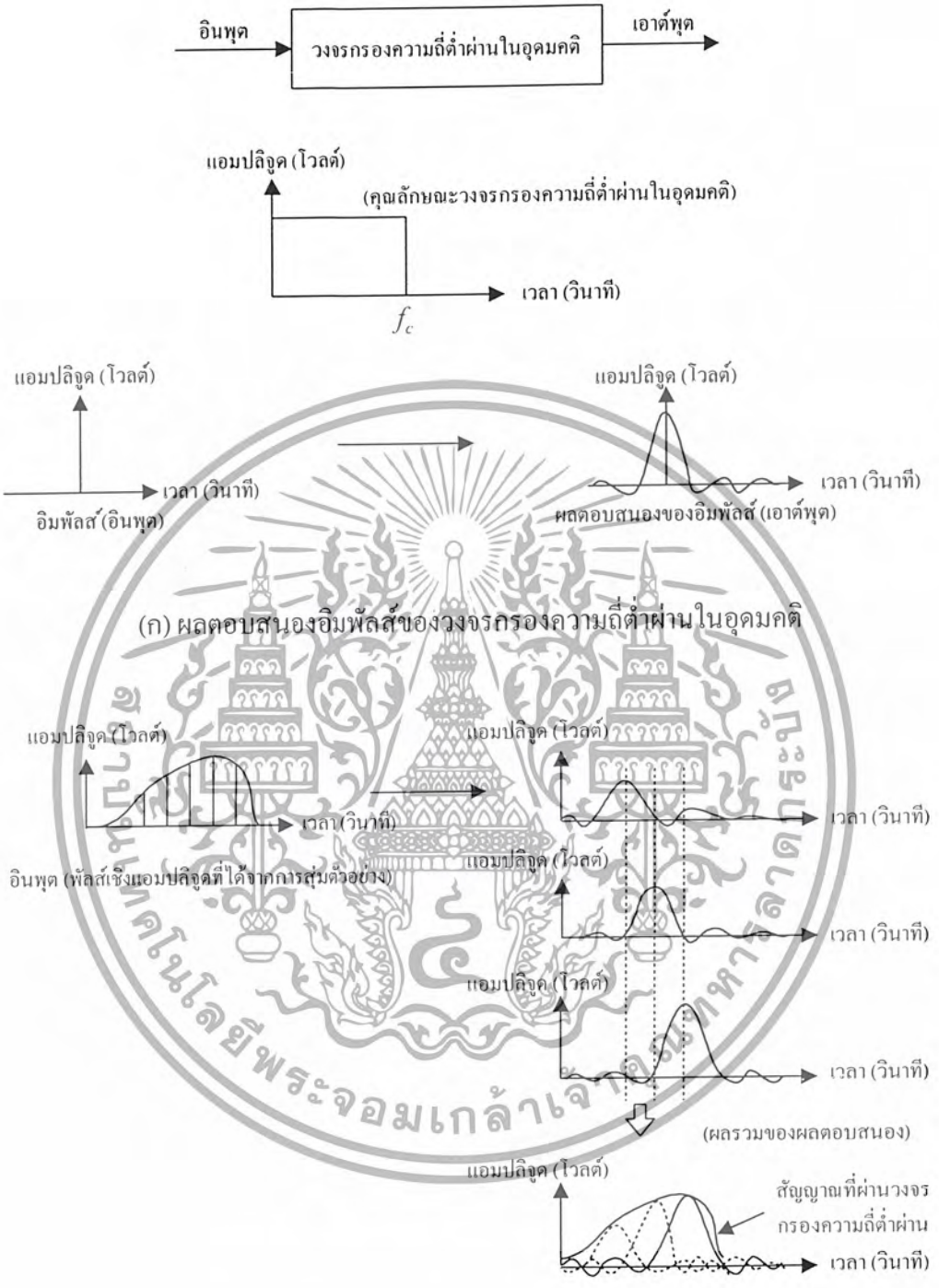
$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2f_m} m\left(\frac{n}{2f_m}\right) e^{-j\frac{2\pi nf}{2f_m}} \tag{2.6}$$

และแทนค่าสมการ 2.6 ลงในสมการ 2.1 แล้วคำนวณต่อไปจะได้

$$\begin{aligned} m(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft}\, df \\ &= \frac{1}{2f_m} \int_{-f_m}^{f_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} m\left(\frac{n}{2f_m}\right) e^{-j\frac{2\pi nf}{2f_m}} e^{j2\pi ft}\, df \\ &= \frac{1}{2f_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} m\left(\frac{n}{2f_m}\right) \int_{-f_m}^{f_m} e^{j2\pi f\left(t-\frac{n}{2f_m}\right)} df \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underbrace{m\left(\frac{n}{2f_m}\right)}_{\text{I}} \underbrace{\frac{\sin\pi(2f_m t - n)}{\pi(2f_m t - n)}}_{\text{II}} \end{aligned} \tag{2.7}$$

จากสมการที่ 2.7 เทอม I แสดงค่าแอมปลิจูดของสัญญาณเดิม $m(t)$ ที่สุ่มตัวอย่างทุกๆ $1/2f_m$ วินาที กล่าวคือเป็นขบวนพัลส์ของการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูด (Pulse Amplitude Modulation : PAM) ที่มีระยะห่างกันทุกๆ $1/2f_m$ วินาที สำหรับเทอม II แสดงคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ (Ideal Low Pass Filter : ILPF) ซึ่งมีความถี่จุดตัด (Cutoff frequency : f_c) ฟังก์ชั่นที่อยู่ในรูปของ sin x/x นี้ ถูกเรียกว่าฟังก์ชั่นการสุ่มตัวอย่าง (Sampling function) เมื่อกล่าวโดยสรุปแล้วสมการ 2.7 หมายความว่าถ้าสุ่มตัวอย่างสัญญาณแอนะลอก $m(t)$ ด้วยอัตรา 2 เท่าของความถี่สูงสุดของมันแล้วจะสามารถสร้างสัญญาณเดิมใหม่ได้อย่างสมบูรณ์หลังจากพัลส์ของการสุ่มตัวอย่างได้ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติไปแล้วดังแสดงไว้ตามรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



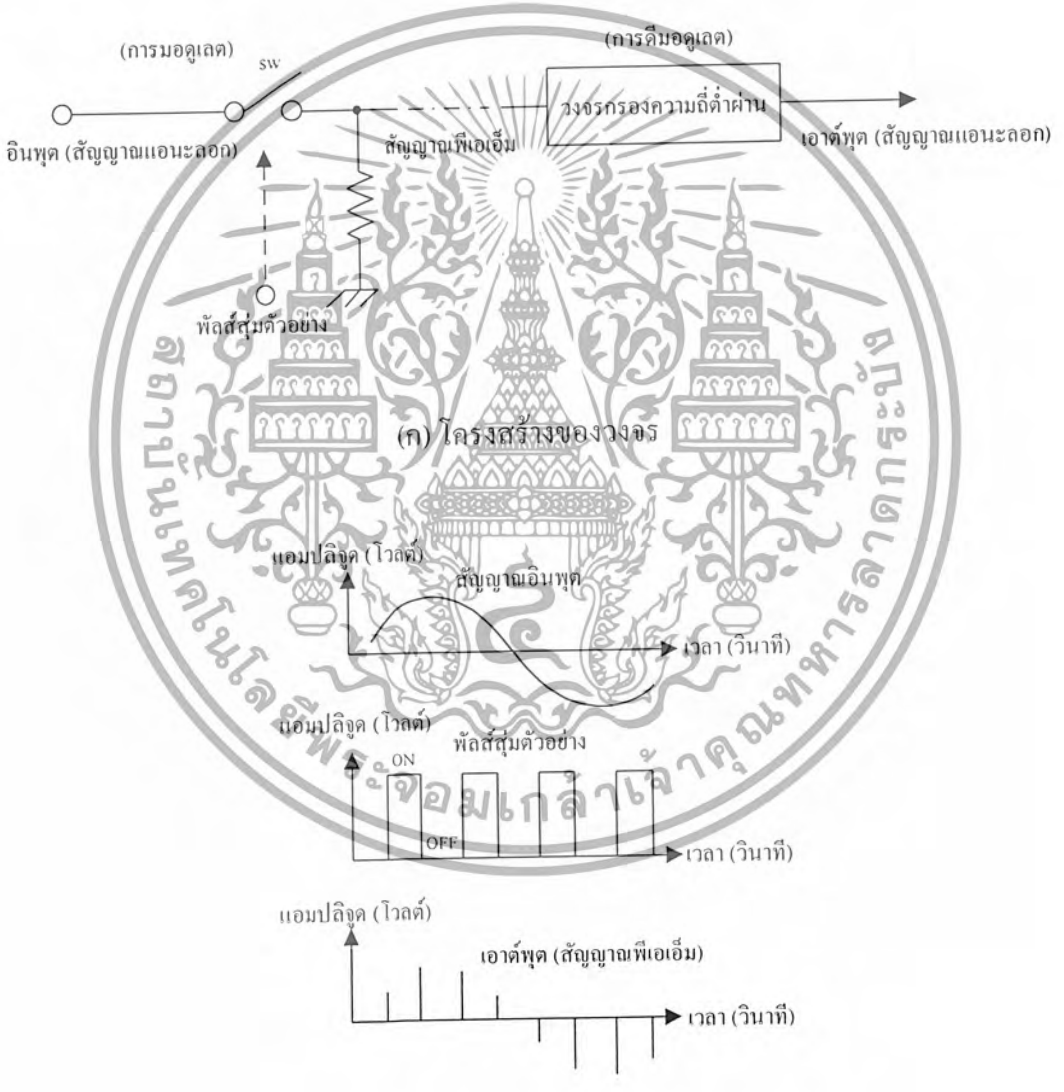
(ข) ผลตอบสนองของขบวนพัลส์เชิงแอมปลิจูด

รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูด

จากที่กล่าวมาแล้วในระบบการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดนั้น ค่าแอมปลิจูดของพัลส์ในขบวนพัลส์ที่มีความกว้างของแต่ละพัลส์คงที่นั้นจะถูกควบคุมให้แปรตามค่าความแรงของค่าตัวอย่างของสัญญาณข่าวสาร ซึ่งถูกสุ่มตัวอย่างออกมาตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างด้วยความถี่ที่เท่ากับความถี่ของการเกิดพัลส์ในขบวนพัลส์นั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ขบวนพัลส์ที่ใช้จะต้องมีการสัมพันธ์หรือซิงโครไนซ์ (Synchronize) กับจังหวะการสุ่มตัวอย่างสัญญาณข่าวสาร



(ข) กระบวนการมอดูเลต

รูปที่ 2.5 หลักการมอดูเลตและดีมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการเบื้องต้นของการมอดูเลตและดีมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ตามรูปสวิตช์จะเปิดเฉพาะเวลาการสุ่มตัวอย่างเท่านั้น ขนาดของพัลส์ที่ได้รับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมปลิจูดของสัญญาณเดิม

2.4 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

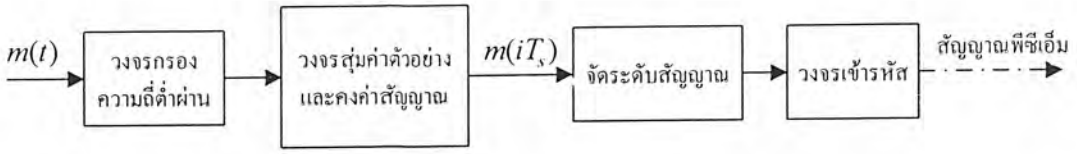
การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์เป็นการมอดูเลตที่ให้สัญญาณผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยสมบูรณ์จึงได้รับความนิยมใช้กันมาก ในปัจจุบันสัญญาณดิจิตอลมีความน่าใช้กว่าสัญญาณแอนะลอกก็เพราะว่าสัญญาณดิจิตอลมีภูมิต้านทานต่อสัญญาณรบกวนและความผิดเพี้ยนที่ดีกว่า ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของระบบดิจิตอล ก็คือสามารถที่จะใช้เครื่องทวนสัญญาณแบบสร้างพัลส์ใหม่ (Regenerative repeater) ได้จึงทำให้ไม่เกิดการสะสมความผิดเพี้ยนขึ้นในระบบสื่อสารนั้น ทำให้สามารถส่งข่าวสารได้ตลอดระยะทางไกลด้วยความถูกต้องสูง ซึ่งในระบบแอนะลอกจะไม่มีวิธีที่จะหลีกเลี่ยงการสะสมของสัญญาณรบกวนและความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นได้เลย ทำให้เกิดการสะสมความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้นในการสื่อสารระยะไกลจึงทำให้คุณภาพของสัญญาณเลวลง

ในระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์จะทำการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยกระบวนการสำคัญ 3 กระบวนการ คือ การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ การจัดระดับ (Quantization) สัญญาณ และการเข้ารหัสสัญญาณ (Encoding) ในลำดับแรกสัญญาณแอนะลอกจะถูกสุ่มตัวอย่างตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างที่ช่วงเวลาห่างเท่าๆ กันและจะนำค่าตัวอย่างนั้นไปประมาณเข้ากับระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงที่สุดในระดับที่เตรียมไว้แล้ว n ระดับที่อยู่ห่างกันแบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง ที่เรียกว่า ระดับของการจัดระดับสัญญาณ (Quantization level) กระบวนการประมาณค่าจัดแบ่งระดับสัญญาณเช่นนี้เรียกว่า การจัดระดับสัญญาณ จากนั้นก็จะเป็นการเข้ารหัสให้กับสัญญาณที่ได้รับการจัดระดับสัญญาณมาแล้วให้เป็นรหัสดิจิตอล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นรหัสเลขฐานสอง (Binary code) และรหัสดิจิตอลนี้ก็จะถูกแทนด้วยพัลส์ที่มีรูปแบบแน่นอนเพื่อใช้ส่งผ่านช่องสื่อสารต่อไป แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์โดยสังเขปมีดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งมีขั้นตอนที่สรุปอธิบายได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

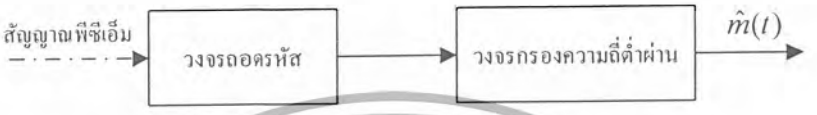
1) สัญญาณแอนะลอกอินพุต $m(t)$ จะถูกกรองด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อขจัดองค์ประกอบของสัญญาณที่มีค่าความถี่สูงกว่า f_m เฮิรตซ์ ที่เกินความจำเป็นในการสื่อสารออกเพื่อป้องกันการเคลือบแฝง (Aliasing) อันอาจจะเกิดขึ้นได้ในกระบวนการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ

2) สัญญาณที่มีย่านความถี่จำกัดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 จะถูกสุ่มตัวอย่างด้วยอัตราความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาคส่งสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์



(ข) ภาครับสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

3) ค่าตัวอย่างสัญญาณ $m(iT_s)$, $(i = 0, \pm 1, \pm 2, ...)$ จะถูกรักษาระดับในวงจรชักค่าและคงค่าระดับสัญญาณในระหว่างช่วงเวลา $T_s = \frac{1}{f_s}$

4) ในช่วงเวลา T_s ที่วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าระดับสัญญาณทำการรักษาค่าระดับของสัญญาณตัวอย่างอยู่นี้วงจรจัดระดับสัญญาณก็จะทำการแปลงค่าระดับของค่าตัวอย่างสัญญาณ ซึ่งเป็นค่าเชิงแอนะลอกให้เป็นค่าระดับเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง ในกระบวนการนี้อาจเกิดความแตกต่างของค่าเชิงแอนะลอกและค่าเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องบ้าง ค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะมีค่าลดลงหากระดับเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องกันของการจัดระดับสัญญาณมีจำนวนเพิ่มขึ้น สัญญาณที่มีค่าเฉพาะเท่ากับระดับเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องหรือระดับของการจัดระดับสัญญาณนี้เรียกว่าสัญญาณดิจิตอล

5) วงจรเข้ารหัสจะเปลี่ยนค่าแอมปลิจูดของสัญญาณจากการจัดระดับสัญญาณให้เป็นกลุ่มของรหัสพัลส์ ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าต้องการจะส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณแบบใด

6) วงจรถอดรหัสจะทำการเปลี่ยนรหัสพัลส์กลับมาเป็นระดับความแรงสัญญาณที่ถูกจัดระดับสัญญาณมาและจะส่งผ่านไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

7) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะขจัดองค์ประกอบที่สูงของสัญญาณที่ได้จากวงจรถอดรหัสออกทำให้ได้ค่าสัญญาณเอาต์พุต $\hat{m}(t)$ ซึ่งเป็นค่าประมาณของสัญญาณ $m(t)$ เดิมออกมา

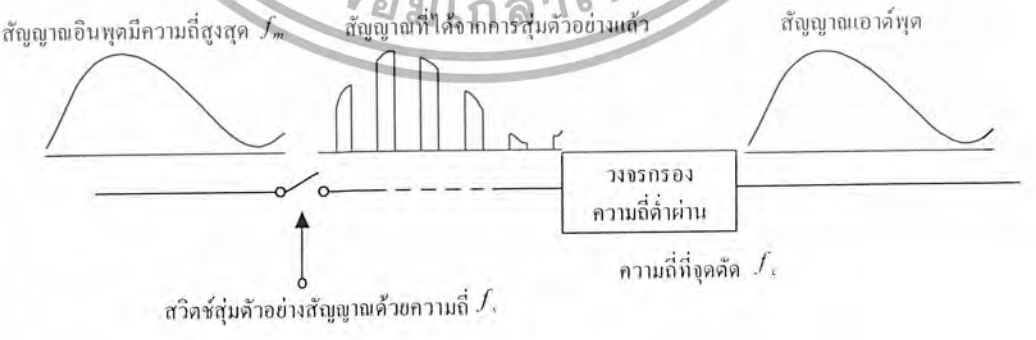
2.4.1 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ

ในการสื่อสารระบบดิจิตอลถ้าแหล่งกำเนิดสัญญาณนั้นให้เอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณดิจิตอลอยู่แล้วเช่น เอาต์พุตจากเครื่องคอมพิวเตอร์หรือจากโทรพิมพ์ ก็สามารถใช้สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นส่งผ่านระบบสื่อสารไปได้ทันทีโดยไม่มีปัญหาอะไร อย่างไรก็ตามในบางสถานการณ์นั้นทำให้เกิดความจำเป็นที่จะต้องส่งสัญญาณแอนะลอกผ่านระบบการสื่อสารที่เป็นระบบดิจิตอล ในกรณีเช่นนี้จำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนสัญญาณแอนะลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล (A/D : Analog to Digital transformation) เสียก่อนและเมื่อทำการส่งสัญญาณนั้นให้กับเครื่องรับแล้วจึงค่อยทำการเปลี่ยนสัญญาณนั้นกลับจากสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก (D/A : Digital to Analog transformation) อีกครั้งในภายหลัง

ในการที่จะเปลี่ยนสัญญาณแอนะลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอลได้นั้นขั้นตอนที่สำคัญระหว่างกลางนั้นก็คือจะต้องเปลี่ยนสัญญาณแอนะลอกมาเป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องก่อน แล้วจึงทำการเปลี่ยนสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องนั้นไปเป็นสัญญาณดิจิตอลอีกต่อหนึ่ง ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการจะเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณแอนะลอกก็ต้องเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องเสียก่อน แล้วจึงทำการเปลี่ยนสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องนั้นให้เป็นสัญญาณแอนะลอกในที่สุด กุญแจดอกสำคัญของเรื่องนี้อยู่ตรงเงื่อนไขในการเปลี่ยนสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอกให้กลายเป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยที่สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องที่เปลี่ยนมาแล้วนั้น สามารถที่จะเปลี่ยนกลับไปเป็นสัญญาณแอนะลอกได้ดังเดิม กุญแจดอกสำคัญที่ว่านี้คือ"ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ"ใจความสำคัญของทฤษฎีนี้มีดังต่อไปนี้ คือ สำหรับสัญญาณแอนะลอกที่มีสเปคตรัมอยู่ในย่านความถี่ที่จำกัด โดยมีความถี่สูงสุดคือ f_m นั้น เพียงแต่การอาศัยค่าที่ได้จากการเลือกสุ่มเอาค่าของสัญญาณนั้นที่ขณะเวลาต่างๆ ที่ห่างกันทุกๆ T วินาที มาใช้สร้างสัญญาณใหม่เท่านั้นก็สามารถที่จะสร้างสัญญาณใหม่ที่เหมือนกันทุกประการกับสัญญาณแอนะลอกเดิมนั้นกลับขึ้นมาใหม่ได้ เมื่อช่วงเวลา T ที่ใช้ในการสุ่มค่าสัญญาณนั้นมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า $1/2f_m$ วินาที



รูปที่ 2.7 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตามใจความของทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างสัญญาณดังกล่าวแล้ว เมื่อกล่าวอีกนัยหนึ่งเพื่อช่วยประกอบการทำความเข้าใจเพิ่มขึ้นจะกล่าวได้ว่า ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณแอนะลอกที่มีคุณสมบัติตามเงื่อนไขตามทฤษฎีเบื้องต้น ถ้าใช้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณนั้นเท่ากับ f_s ความถี่ f_s นี้จะต้องมากกว่าหรืออย่างน้อยที่สุดก็เท่ากับ 2 เท่าของความถี่สูงสุดที่มีประกอบอยู่ในสัญญาณแอนะลอกนั้น กล่าวคือ

$$f_s \geq 2f_m \tag{2.8}$$

สำหรับปัญหาที่ว่าถ้าต้องการจะสุ่มตัวอย่างสัญญาณของสัญญาณเสียงที่ใช้ในการสื่อสารในโทรศัพท์นั้น ควรจะใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเสียงนั้นสักเท่าไร คำตอบของปัญหานี้พิจารณาได้ว่า เนื่องจากในการสื่อสารโทรศัพท์นั้นสเปคตรัมแบนด์วิดธ์ของเสียงที่ใช้นั้นคือ 0.3-3.4 กิโลเฮิรตซ์ ปกติแล้วเสียงที่คนเราได้ยินมีสเปคตรัมที่กว้างกว่านี้ แต่สำหรับเสียงของคนนั้นถ้าใช้แบนด์วิดธ์ของระบบโทรศัพท์เพียง 0.3-3.4 กิโลเฮิรตซ์ เท่านี้ก็พอเพียงที่จะทำให้คู่สนทนาโทรศัพท์นั้นสามารถที่จะจำเสียงและเข้าใจกันได้ ดังนั้นในระบบโทรศัพท์จึงมีการใช้แบนด์วิดธ์ของสัญญาณเสียงเพียงแค่นี้เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกและประหยัดในการสร้างอุปกรณ์โทรศัพท์ต่างๆ ดังนั้นตามสมการที่ (2.8) ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณนี้ก็จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 6.8 กิโลเฮิรตซ์

ควรสังเกตว่า สัญญาณที่เกิดขึ้นจากผลของการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณนั้นเป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะว่าสัญญาณที่ได้จากผลของการสุ่มตัวอย่างนั้น จะเกิดมีค่าขึ้นก็เพราะเวลาที่ทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณนั้นออกมาเท่านั้น ในการที่จะแปลงสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณให้กลับเป็นสัญญาณแอนะลอกเหมือนอย่างเดิมนั้น ทำได้โดยเพียงแต่ทำการส่งสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องดังกล่าวนั้นผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและมีเงื่อนไขว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะต้องมีความถี่จุดตัด f_c ไม่ต่ำกว่าความถี่ f_m แต่ว่าจะต้องไม่สูงเกินกว่าความถี่ $f_s - f_m$ ก็จะได้สัญญาณแอนะลอกที่มีลักษณะเหมือนกับสัญญาณแอนะลอกเดิมกลับคืนมา กล่าวคือ f_m

$$f_m < f_c < f_s - f_m \tag{2.9}$$

จากเงื่อนไขตามสมการที่ (2.9) ย้อนกลับไปพิจารณาเรื่องการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเสียงที่ใช้ในการสื่อสารทางโทรศัพท์ ซึ่งได้กล่าวค้างไว้ว่าจะต้องใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่ เงสัญญาณไม่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

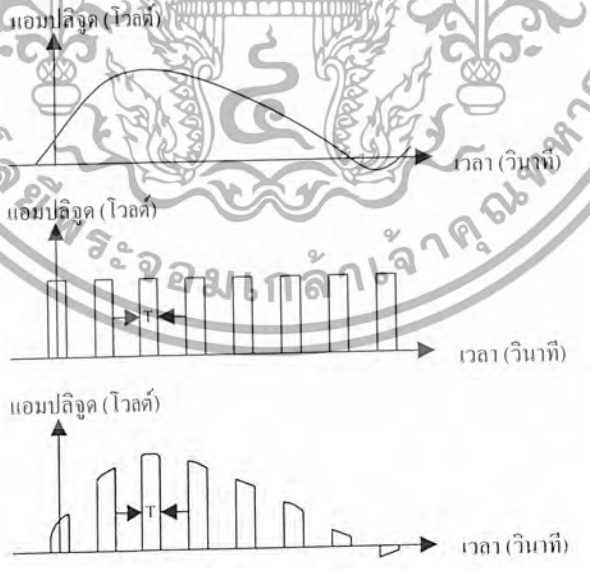
51033

กว่า 6.8 กิโลเฮิรตซ์อีกว่า ในทางปฏิบัติถ้าใช้ความถี่ f_s = 6.8 กิโลเฮิรตซ์ โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก็ต้องมีคุณสมบัติในการตัดแยกความถี่ของสัญญาณที่คมมากๆ (พิจารณาจากเงื่อนไขตามสมการที่ (2.9)) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วทำไม่ได้ ดังนั้นเพื่อที่จะให้การสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทำได้โดยง่าย จึงต้องใช้ความถี่ f_s ที่มีค่ามากกว่า 6.8 กิโลเฮิรตซ์ อย่างไรก็ดีถ้าใช้ความถี่ f_s ที่มีค่ามากเกินไปก็จะต้องทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะมากเกินความจำเป็น ดังนั้นในทางปฏิบัติจริงจึงเลือกใช้ค่าความถี่ f_s ที่สูงกว่า 6.8 กิโลเฮิรตซ์ แต่ไม่สูงมากจนเกินไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเลือกใช้ค่าความถี่ f_s เท่ากับ 8 กิโลเฮิรตซ์

ด้วยเหตุที่การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเสียงในระบบโทรศัพท์นิยมใช้ความถี่ f_s = 8 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงมีคำกล่าวอย่างง่ายๆ ว่าแบนด์วิดธ์ของช่องสัญญาณเสียงในระบบโทรศัพท์นั้นเท่ากับ 4 กิโลเฮิรตซ์ เพราะฉะนั้นถ้ามีเอกสารใดๆ กล่าวอ้างอิงเช่นนี้ ก็ขอให้เข้าใจด้วยว่าแบนด์วิดธ์ 4 กิโลเฮิรตซ์ ที่อ้างอิงถึงนั้นเป็นค่าโดยประมาณด้วยเหตุผลดังกล่าวแล้วนั้นเอง

1) การสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ

สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างแบบนี้จะง่ายต่อการสร้าง เพียงแค่ใช้สวิตซ์แอนะลอกก็สามารถทำได้ ลักษณะของสัญญาณจะเห็นได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่ได้มียอดของพัลส์เปลี่ยนไปตามสัญญาณแอนะลอก

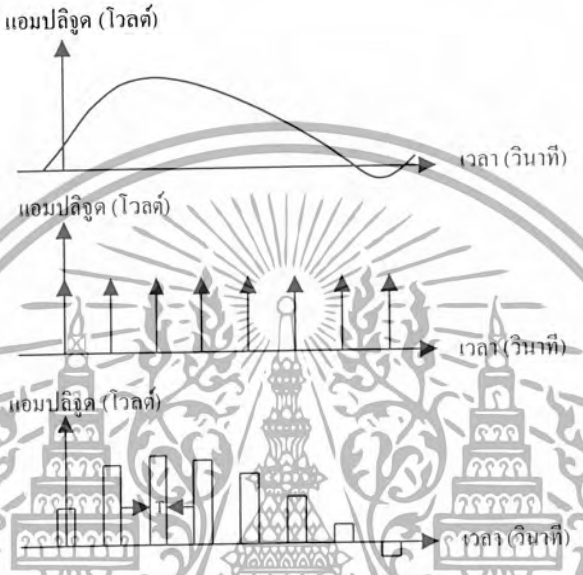


รูปที่ 2.8 สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่สุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ (Natural sampling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะหนึ่ง

สัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างนี้เรียกว่า Flat-Top PAM ซึ่งสัญญาณแอนะลอกจะถูกแปลงโดยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะหนึ่ง (Flat-Top sampling) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่ได้จะมียอดของพัลส์ที่เรียบตลอดทุกๆ พัลส์



รูปที่ 2.9 สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่สุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะหนึ่ง

การสุ่มตัวอย่างนี้จะแปลงสัญญาณแอนะลอกให้เป็นขบวนพัลส์ซึ่งเรียกว่าการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดและจะมีผลดีได้จะต้องมีเงื่อนไขต่อไปนี้

1) สัญญาณอินพุตต้องไม่มีองค์ประกอบเกินความถี่สูงสุด f_m

2) พัลส์ที่ใช้สำหรับสุ่มตัวอย่างจะต้องเป็นพัลส์มีความกว้าง 0 และมีแอมปลิจูดเป็นอนันต์

3) ทางด้านรับต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ ซึ่งยอมให้ความถี่ต่ำกว่าความถี่ f_m ผ่านได้ทั้งหมด

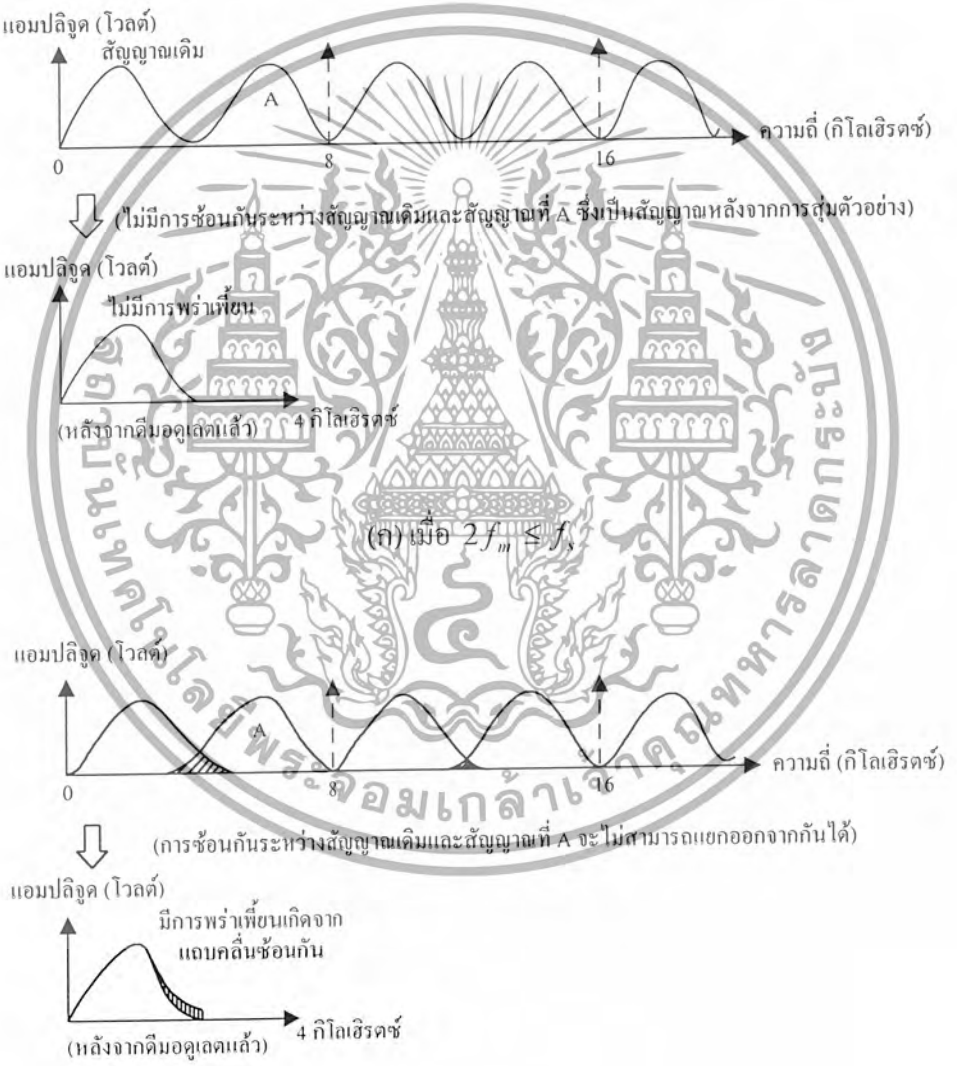
แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นได้อย่างสมบูรณ์

3) การพร่าเพี้ยนเกิดจากแถบคลื่นซ้อนกัน

ถ้าความถี่สูงสุดของสัญญาณอินพุตเป็น f_m และความถี่ที่ใช้การสุ่มตัวอย่างเป็น f_s เมื่อ $f_s \geq 2f_m$ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทางด้านรับจะขจัดองค์ประกอบความถี่ที่มากกว่าความถี่ f_m ออกทำให้ง่ายต่อการทำสัญญาณเดิมให้กลับคืนมาได้ ตามรูปที่ 2.10 (ก) แต่ถ้าสัญญาณอินพุตมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบความถี่สูงกว่า $f_s / 2$ รวมอยู่ด้วย ขบวนพัลส์การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่ได้รับจะมีสเปคตรัมเกิดขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 (ข) จะเห็นได้ว่ามีความถี่สเปคตรัมซ้อนกันระหว่างสัญญาณเดิมกับบิตที่มีค่านัยสำคัญน้อย (Least Significant Bit : LSB) จึงเป็นการลำบากที่จะทำให้สัญญาณเดิมกลับคืนมาได้อย่างสมบูรณ์ แม้ว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะกรองความถี่ที่สูงกว่าความถี่ f_m ออกแล้วก็ตามก็ยังคงเหลือสัญญาณรบกวนปนอยู่กับสัญญาณที่ได้ดีมอดูเลตแล้ว ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การพร่าเพี้ยนเกิดจากแถบคลื่นซ้อนกัน (Aliasing distortion)



รูปที่ 2.10 การพร่าเพี้ยนเกิดจากแถบคลื่นซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การพร่าเพี้ยนเกิดจากการสอดแทรก

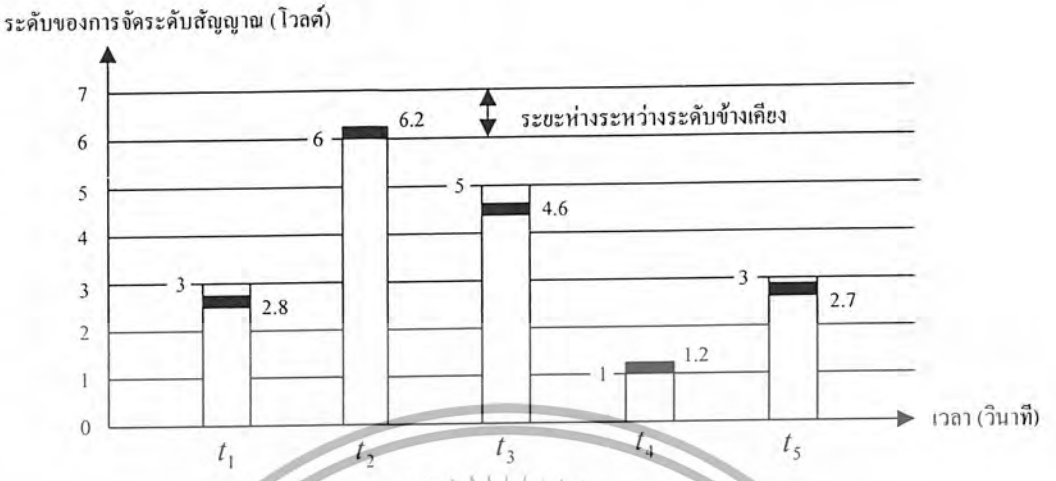
การดีมอดูเลตพัลส์การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดทางด้านรับนั้นจะได้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ในทางปฏิบัติไม่สามารถจะสร้างวงจรแบบนี้ได้จึงเพียงแต่สร้างให้มีคุณลักษณะใกล้เคียงกันเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่สามารถจะกำจัดความถี่ซึ่งสูงกว่าความถี่ f_m และฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ออกไปได้ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 สิ่งดังกล่าวเหล่านี้จะสอดแทรกเข้าไปปนกับสัญญาณที่ได้จากการดีมอดูเลต จึงเป็นผลทำให้เกิดการพร่าเพี้ยนซึ่งเรียกว่าการพร่าเพี้ยนเกิดจากการสอดแทรก (Interpolating distortion)

รูปที่ 2.11 การพร่าเพี้ยนเกิดจากการสอดแทรก

2.4.2 การจัดระดับสัญญาณ

ขบวนพัลส์การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างมาแล้ว ยังถือว่าเป็นสัญญาณแอนะลอกอยู่ คือจะมีแอมปลิจูดที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องไปกับเวลาที่เป็นช่วงๆ การจัดระดับคือกระบวนการที่เปลี่ยนแอมปลิจูดของการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดเหล่านั้นให้เป็นค่าตัวเลขแบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การจัดระดับสัญญาณ

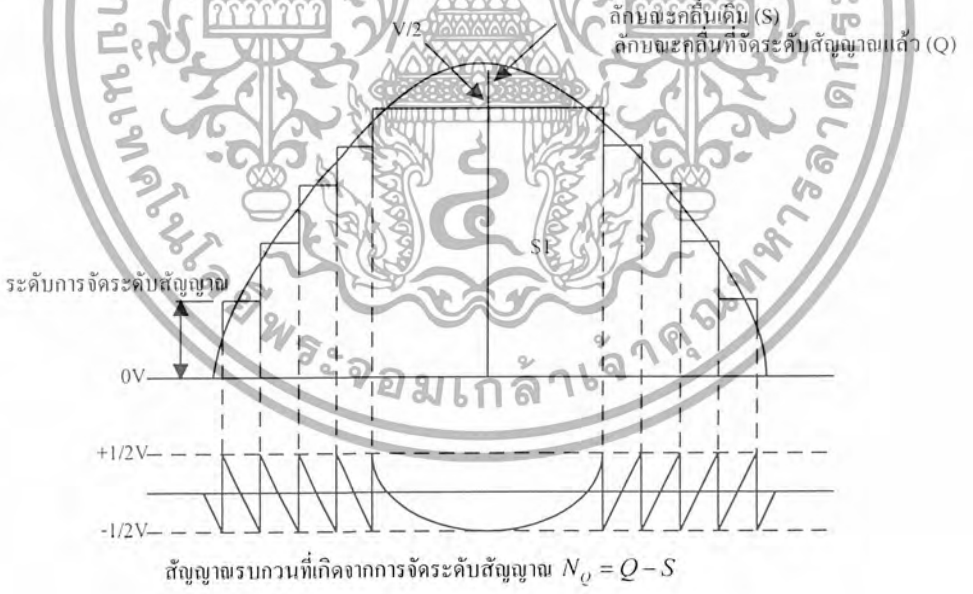
จากรูปที่ 2.12 แอมปลิจูดของการสุ่มตัวอย่างทุกตัวของการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดจะถูกจัดให้เป็นระดับ โดยมีระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียง (Quantizing interval) หรือขั้นการจัดระดับสัญญาณนั้นเท่ากัน กรณีนี้เรียกว่าการจัดระดับแบบเชิงเส้นหรือแบบสม่ำเสมอ (Uniform quantizing) ขนาดของการสุ่มตัวอย่างทุกตัวจะแสดงด้วยค่าระดับการจัดระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกันที่สุด เช่น ขนาดของการสุ่มตัวอย่างที่ $t = t_1$ คือ 2.8 จะจัดให้เป็นระดับ 3 หรือค่าการสุ่มตัวอย่างที่ $t = t_2$ มีขนาด 6.2 จะจัดให้เป็น 6 เป็นต้น จะเป็นได้ว่าสัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดที่ถูกจัดระดับแล้วนี้จะเป็นเพียงค่าโดยประมาณของสัญญาณแอนะลอกเท่านั้น ดังนั้นส่วนเกินและส่วนขาดจากการจัดกระดับจึงเป็นค่าผิดพลาดระหว่างสัญญาณเดิมและค่าที่ได้จัดระดับ ซึ่งค่าผิดพลาดนี้เรียกว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับ (Quantizing noise) หรือความพร่าเพี้ยนจากการจัดระดับสัญญาณ (Quantizing distortion)

อนึ่ง จากหลักการที่กล่าวมาแล้วนี้ ทางปฏิบัติจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับได้ แต่เพื่อรักษาคุณภาพของเสียงในการสนทนาให้ดีจึงจำเป็นต้องทำให้สัญญาณรบกวนนี้ลดลง ในเบื้องต้นคือการลดระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียงให้แคบลงอย่างพอเพียงก็สามารถจะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับได้ในระดับหนึ่ง อย่างเช่น ถ้าลดระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียงลงครึ่งหนึ่ง ปริมาณของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับจะลดลงเป็น 1/4 และการลดระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียงให้เหลือครึ่งหนึ่งนั้นจะสอดคล้องกับการเพิ่มจำนวนบิตอีก 1 บิต นั่นคือกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับจะลดลง 6 เดซิเบล ทุกๆ การเพิ่ม 1 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การคอมแพนดิง

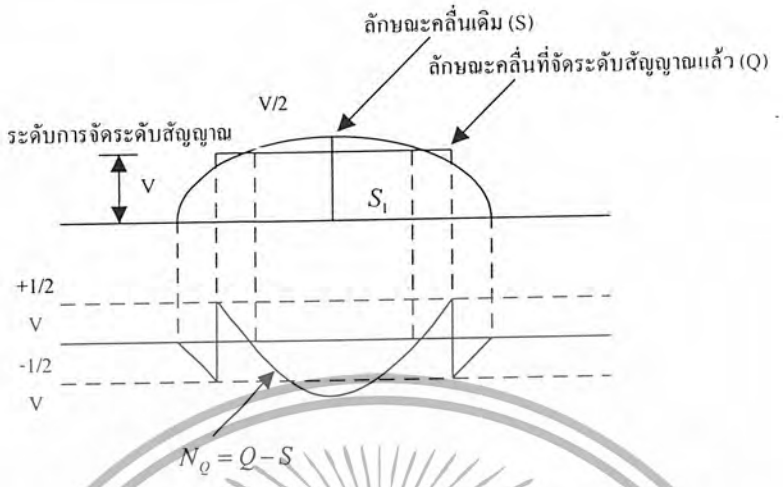
ตามที่ได้กล่าวมาจากตอนที่ 2.4.2 แล้วว่าไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับที่เกิดขึ้นได้ แต่จะต้องทำให้ลดลงโดยการลดระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียงหรือการเพิ่มจำนวนระดับนั้นเอง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนระดับขึ้นแล้วจำนวนบิตที่ใช้จะเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้ความเร็วในการส่งสัญญาณดิจิตอลให้สูงขึ้น ตามปกติสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในทุกระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียง โดยไม่เกี่ยวข้องกับแอมปลิจูดของสัญญาณเดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับเกือบจะคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับสัญญาณและในการวัดคุณภาพของการเข้ารหัสของสัญญาณเสียงจะใช้อัตราส่วนของสัญญาณ S ต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับ N_Q เมื่อเป็นเช่นนี้จะเข้าใจได้ว่าในกรณีที่สัญญาณมีระดับสูง S/N_Q จะดีกว่ากรณีของสัญญาณซึ่งมีระดับต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับในบริเวณที่สัญญาณมีระดับต่ำ อย่างเช่นตามรูปที่ 2.13 กรณีที่เป็นการจัดระดับแบบสม่ำเสมอจะเห็นได้ว่า เมื่อสัญญาณมีกำลังต่ำ สัญญาณรบกวนจะมีระดับสูงเมื่อเทียบกับระดับของสัญญาณจึงทำให้ S/N_Q ลดลง



(ก) กรณีที่แอมปลิจูดสูง

รูปที่ 2.13 การจัดระดับสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



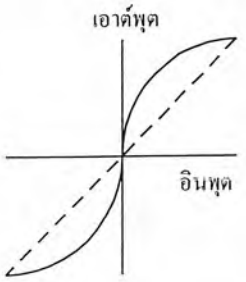
(ข) กรณีที่แอมปลิจูดต่ำ

รูปที่ 2.13 (ต่อ) การจัดระดับสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับ

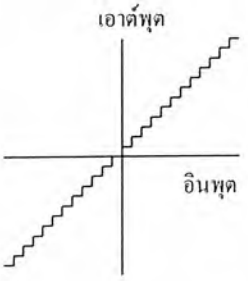
ด้วยเหตุนี้จึงใช้การจัดระดับโดยวิธีอื่น กล่าวคือแบบไม่เชิงเส้นหรือแบบไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform quantizing) คือบริเวณที่สัญญาณมีแอมปลิจูดต่ำจะใช้ขั้นการจัดระดับแคบๆ และในทางตรงกันข้ามบริเวณที่สัญญาณมี แอมปลิจูดสูงจะใช้ขั้นการจัดระดับกว้างๆ ซึ่งการทำให้เป็นแบบไม่สม่ำเสมอนั้นจะใช้หลักการของ การคอมแพนดิง (Companding) เข้าช่วย

คอมแพนดิงเป็นชื่อรวมของวงจรคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ซึ่งใช้สำหรับด้านส่งและวงจรเอกซ์แพนเดอร์ (Expander) ซึ่งใช้สำหรับด้านรับ คุณสมบัติของวงจรนี้จะกล่าวในภายหลัง อย่างไรก็ตามตัวอย่างการจัดระดับของการจัดระดับแบบไม่สม่ำเสมอได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ซึ่งมีขั้นตอนคือ ก่อนที่จะทำการจัดระดับจะผ่านสัญญาณไปยังวงจรคอมเพรสเซอร์ ซึ่งมีคุณลักษณะของอินพุตและเอาต์พุตตามรูปที่ 2.14 (ก) แล้วทำการจัดระดับแบบสม่ำเสมอตามรูปที่ 2.14 (ข) ก็จะได้การจัดระดับแบบไม่สม่ำเสมอตามรูปที่ 2.14 (ค) สำหรับทางด้านรับนั้นเมื่อสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ผ่านขั้นตอนการถอดรหัสแล้วก็จะผ่านไปยังวงจรเอกซ์แพนเดอร์ซึ่งมีคุณลักษณะตรงกันข้ามกับคอมเพรสเซอร์ตามรูปที่ 2.14 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คอมเพรสชั่น



(ข) การจัดระดับแบบสม่ำเสมอ

(ค) การจัดระดับแบบไม่สม่ำเสมอ

(ง) เอกซ์แพนชั่น

รูปที่ 2.14 คุณลักษณะการจัดระดับด้วยคอมเพรสเซอร์และเอกซ์แพนเดอร์

อนึ่ง กรณีที่จัดระดับแบบสม่ำเสมอนั้นจะใช้ประมาณ 2000 ระดับ จึงจะรักษาคุณภาพของเสียงให้ดีในการเข้ารหัสจะต้องใช้ถึง 11 บิตต่อการสุ่มอย่าง 1 ตัว แต่ถ้าใช้แบบไม่สม่ำเสมอจะใช้เพียง 7 บิต ซึ่งมีเพียง 128 ระดับเท่านั้น ก็เพียงพอที่จะทำให้ S/N_Q ใกล้เคียงกับการจัดระดับแบบสม่ำเสมอ CCITT กำหนดว่าให้ใช้ 8 บิตต่อการสุ่มอย่าง 1 ตัว และการจัดระดับสัญญาณ 256 ระดับ ก็จะเป็นการรับรองว่าเสียงพูดจะมีคุณภาพที่ดี

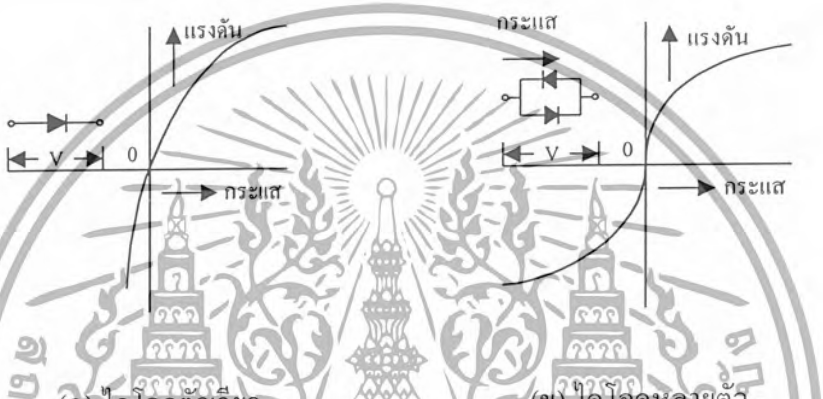
สำหรับคุณลักษณะของคอมเพรสเซอร์นั้นจะเป็นแบบลอการิทึม รูปแบบโดยทั่วไปจะใช้คุณสมบัติของ $V-I$ ของไดโอด ตามรูปที่ 2.15 กรณีที่ใช้เป็นคอมเพรสเซอร์จะมีกระแส i เป็นอินพุต แรงดัน v เป็นเอาต์พุต สำหรับกรณีที่ใช้เป็นเอกซ์แพนเดอร์จะมีแรงดัน v เป็นอินพุต และกระแส i เป็นเอาต์พุต

คุณลักษณะของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้สำหรับประกอบการเข้ารหัสสัญญาณเสียงในปัจจุบัน คือ $\mu-law$ ซึ่งใช้ใน Hierarchy ของระบบ 1.5 เมกะบิตต่อวินาที และ $A-law$ ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

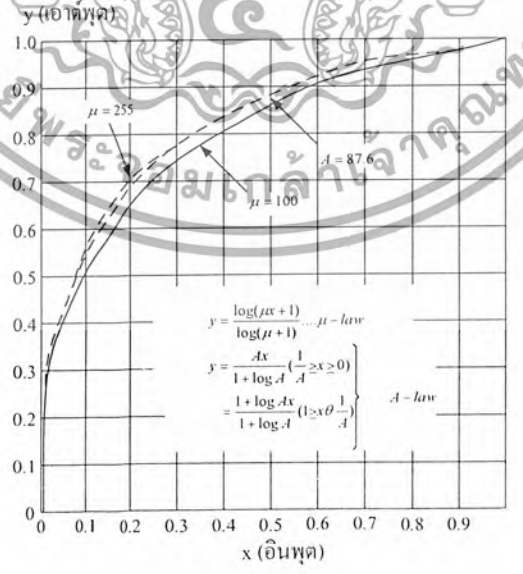
Hierarchy ของระบบ 2 เมกะบิตต่อวินาที คุณลักษณะทั้ง 2 แบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 เฉพาะกรณีของ $\mu = 100$, $\mu = 255$ และ $A = 87.6$

กรณีที่ $\mu = 100$ จะใช้วงจรคอมเพรสเซอร์ตามรูปที่ 2.15 แต่กรณี $\mu = 255$ และ $A = 87.6$ จะใช้วงจรคอมเพรสเซอร์ที่มีคุณลักษณะเป็นเส้นตรง โดยแยกเป็นส่วนๆ ซึ่งมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับในรูปที่ 2.16 ตามปกติในวงจรเข้ารหัสจะมีหน้าที่นี้ร่วมอยู่แล้วนำการกด (Compress) และเข้ารหัสไปพร้อมๆ กัน วงจรเข้ารหัสนี้ถูกเรียกว่า Broken line encoder



(ก) ไดโอดตัวเดียว (ข) ไดโอดหลายตัว

รูปที่ 2.15 คุณลักษณะคอมเพรสชั่นของไดโอด



รูปที่ 2.16 แบบอย่างคุณลักษณะของคอมเพรสชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนึ่ง กรณีที่ใช้ $\mu = 255$ จะประมาณด้วยเส้นตรง 15 เส้น สำหรับกรณีที่ใช้ $A = 87.6$ จะแบ่งเป็นเส้นตรง 13 ส่วน โดยส่วนที่ 1 จะเป็นเส้นตรงผ่านจุดเริ่มต้นไปทั้งทางบวกและทางลบ สำหรับคุณลักษณะของ $A-law$ นี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะด้านบวกเท่านั้น อินพุตแอมปลิจูดที่ขนาด 4096 จะสอดคล้องกับสัญญาณซึ่งมีกำลัง 3.14 dBm สำหรับเอาต์พุตนั้นจะถูกจัดให้เป็น 256 ระดับ (ทั้งด้านบวกและลบ) คือใช้ 8 บิตต่อการสุ่มอย่าง 1 ตัว

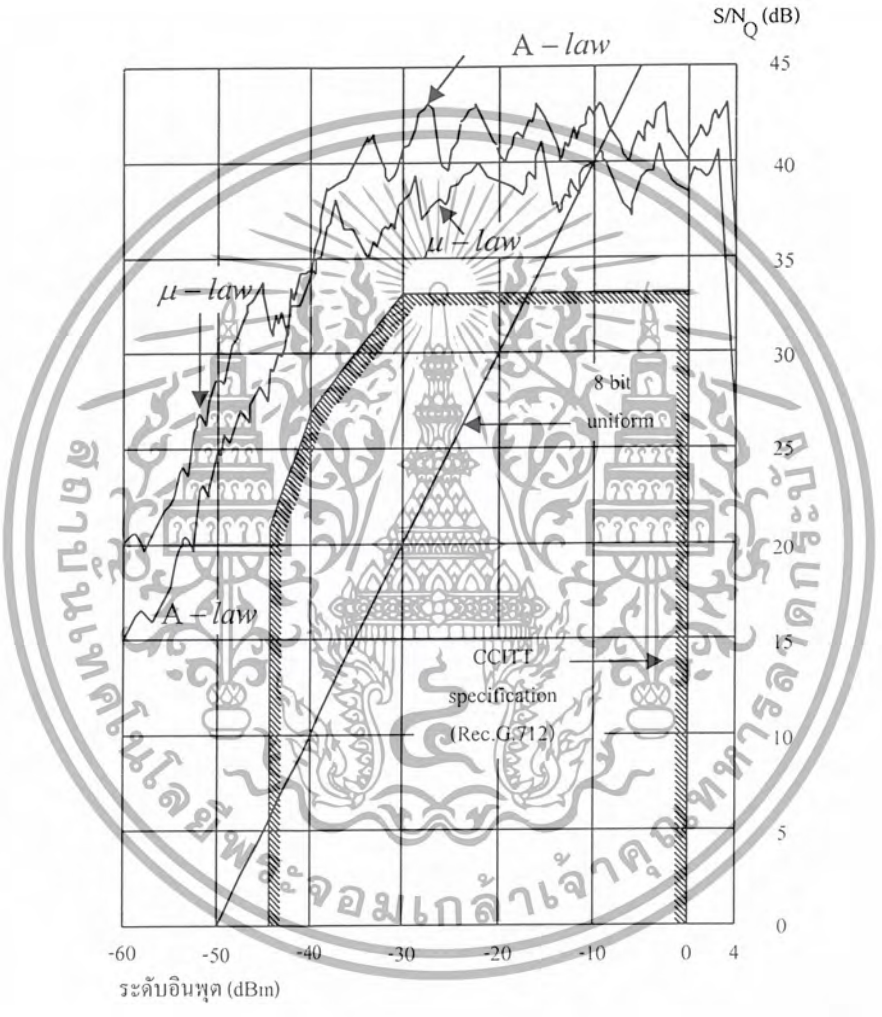
รูปที่ 2.17 คุณลักษณะของคอมแพนดิงเมื่อ A = 87.6

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของคอมเพรสเซอร์ระหว่าง $A-law$ และ $\mu-law$ ที่เกี่ยวข้องกับ S/N_Q แล้ว ตามรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่า คุณลักษณะของทั้ง $A-law$ และ $\mu-law$ จะเป็นแบบฟันเลื่อย เนื่องจากส่วนโค้งของคอมแพนเดอร์ถูกประมาณค่าให้เป็นเส้นตรงส่วนย่อยๆ และจะเห็นได้ว่าส่วนที่สัญญาณมีกำลังสูง $A-law$ จะมี S/N_Q ดีกว่า ในทางตรงกันข้ามส่วนที่สัญญาณมีกำลังต่ำจะมี S/N_Q ด้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากกรณีแรกระยะห่างระหว่างระดับข้างเคียงของ $A-law$ มีขนาดแคบกว่าของ $\mu-law$ สำหรับกรณีหลังของ $A-law$ จะกว้างกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามทั้ง $A-law$ และ $\mu-law$ นั้นพิจารณาได้ว่าจะมี S/N_Q สูง และเกือบคงที่แม้ว่าสัญญาณจะมีกำลังต่ำ

จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วนี้จะเข้าใจได้ว่า การปรับปรุง S/N_Q ในบริเวณสัญญาณซึ่งมีกำลังต่ำโดยใช้วิธีจัดระดับแบบไม่สม่ำเสมอจะมีผลดีกว่าแบบสม่ำเสมอเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับอินพุตต่อ S/N_Q เมื่อใช้คอมแพนดิงวิธีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การเข้ารหัส

หลังจากกระบวนพัลส์การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูดได้ผ่านขั้นตอนการจัดระดับมาแล้ว จะต้องเปลี่ยนขนาดเหล่านั้นให้เป็นรหัสเลขฐานสอง กรณีที่เป็นสัญญาณเสียงสำหรับการส่งทางโทรศัพท์จะถูกเปลี่ยนเป็นรหัส 8 บิต ซึ่งสามารถแสดงค่าแอมปลิจูดได้ 256 ระดับ ระบบการเข้ารหัสจะมีหลายๆ แบบ แต่ส่วนมากจะใช้กัน 3 แบบดังแสดงไว้ในตาราง 2.1 ซึ่งแสดงไว้เพียง 3 บิตเพื่อง่ายต่อการเข้าใจ

ตารางที่ 2.1 รหัสเลขฐานสองแบบต่าง ๆ

ระดับการจัดระดับสัญญาณ	รหัสเลขฐานสอง แบบธรรมดา	รหัสเลขฐานสอง แบบเกรย์	รหัสเลขฐานสอง แบบสมมาตร
0	000	000	011
1	001	001	010
2	010	011	001
3	011	010	000
4	100	110	100
5	101	111	101
6	110	101	110
7	111	100	111

รหัสเลขฐานสองแบบธรรมดา (Natural binary code) จะใช้สัมประสิทธิ์ $a_1, a_2, ..., a_n$ จากสมการแสดงขนาดของแอมปลิจูดของสัญญาณ m เป็นรหัสโดยตรง คือ

$$m = a_1 \times 2^{n-1} + a_2 \times 2^{n-2} + ... + a_n \times 2^0 \qquad (2.10)$$

รหัสเลขฐานสองแบบเกรย์ (Gray code) เป็นการเข้ารหัสโดยที่รหัสข้างเคียงซึ่งสอดคล้องกับระดับข้างเคียงจะมีบิตซึ่งแตกต่างกันเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น

รหัสเลขฐานสองแบบสมมาตร (Symmetrical binary code) ในรหัสนี้บิตแรกจะชี้ว่าสัญญาณจะเป็นลบหรือบวก บิตที่ 2 จนถึงบิตสุดท้ายจะแสดงค่าสมบูรณ์ของสัญญาณ แล้วนำมาจัดเรียงใหม่อย่างสมมาตรจากกึ่งกลางของระดับการจัดระดับสัญญาณไปถึงระดับสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือระดับต่ำสุด ดังนั้นการเข้ารหัสแบบนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้แสดงสัญญาณที่อยู่ในรูปของเชิงสองขั้ว (Bipolar)

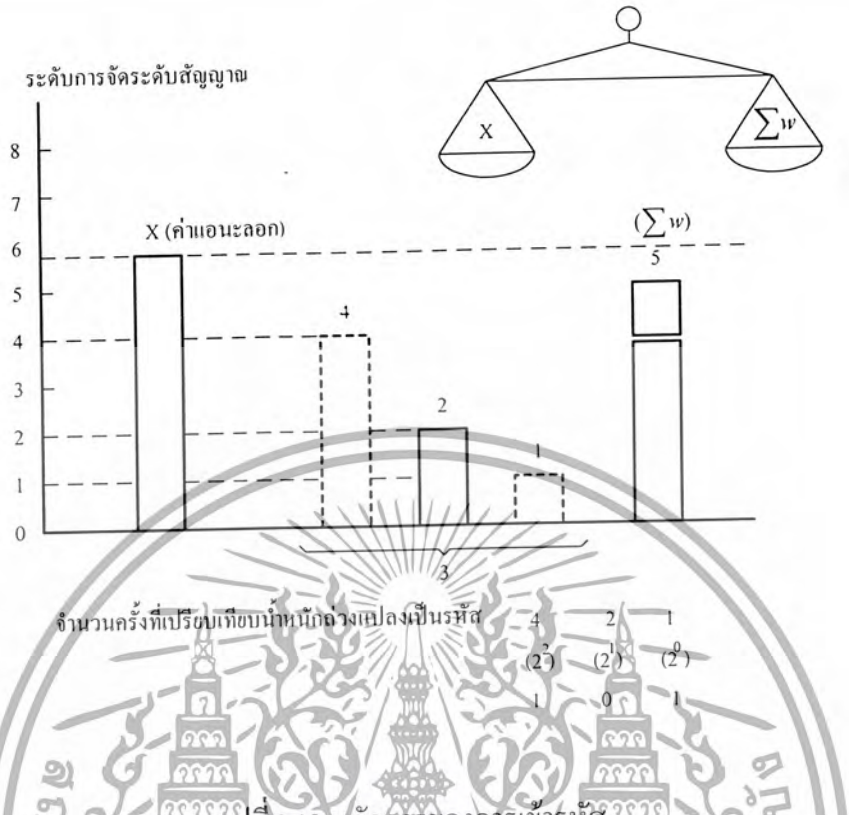
ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นไม่ว่าจะเป็นการเข้ารหัสแบบใดก็ตามเมื่อบิตใดๆ เกิดการผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณแล้ว เมื่อสัญญาณแอนะลอกถูกสร้างกลับมาใหม่ที่ด้านรับ S/N ซึ่งเลวลงอยู่แล้วจะมีค่าแตกต่างกันเป็นอย่างมากเมื่อบิตที่ผิดพลาดมีตำแหน่งต่างกัน

อนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผิดพลาด (Error rate) และ S/N จะแตกต่างกันเมื่อโครงสร้างของสัญญาณต่างกันและโดยทั่วไปแล้วการผิดพลาดของรหัสจะมีน้อยอย่างพอเพียงและผลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับจะมีมากกว่าผลที่เกิดจากการผิดพลาดของบิต

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า สัญญาณที่ผ่านการจัดระดับมาแล้วจะถูกเปลี่ยนให้เป็นรหัสเลขฐานสองแบบสมมาตร การทำงานของวงจรเข้ารหัสในเบื้องต้นจะคล้ายกับการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งซึ่งจะทราบขนาดของการสุ่มตัวอย่างจากการอ่านค่าของน้ำหนักถ่วง หลักการของการเข้ารหัสแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 ซึ่งการจัดระดับและการเข้ารหัสถูกกระทำไปพร้อมๆ กัน

ตามรูปที่ 2.19 สมมุติว่าต้องการชั่งของซึ่งมีน้ำหนักไม่เกิน 8 กรัม โดยมีน้ำหนักจริง 5.7 กรัม ในขณะนี้จะมีสเกลจาก 0-8 กรัม ซึ่งเป็นเสมือนระดับการจัดระดับสัญญาณและสมมุติว่าเครื่องชั่งมีน้ำหนักถ่วงเป็น 1, 2 และ 4 กรัม ซึ่งเป็นเสมือนจำนวนบิตคือ 3 บิตในระบบเลขฐานสอง ในการวัดน้ำหนักที่ต้องการทราบว่าจะมีค่าเป็นอย่างไรนั้น ตอนแรกลองนำน้ำหนักถ่วง 4 กรัม ใส่ลงไปก่อนเนื่องจากน้ำหนักที่ต้องการทราบยังคงหนักกว่าจึงต้องใส่น้ำหนักถ่วง 2 กรัมเพิ่มเข้าไปอีก (ถ้าเป็นไปในลักษณะตรงกันข้ามต้องเอาน้ำหนักถ่วง 4 กรัมออกแล้วเริ่มต้นใหม่ด้วยการใส่น้ำหนัก 2 กรัมลงไป) ขณะนี้จะทราบว่าน้ำหนักรวมจะหนักกว่าของที่นำมาชั่ง ดังนั้นจึงต้องเอาน้ำหนักถ่วง 2 กรัมออกแล้วนำ 1 กรัมใส่ลงไปก็เป็นอันสิ้นสุดการชั่ง จะเห็นได้ว่าน้ำหนักถ่วงที่ใช้อยู่ขณะนี้คือ 4 กรัมและ 1 กรัม จึงกำหนดให้เป็นลอจิก"1"สำหรับน้ำหนักถ่วง 2 กรัมนั้นไม่ได้ใช้จึงกำหนดให้เป็นลอจิก"0"เมื่อเรียงลำดับของการใส่น้ำหนักถ่วงแต่ละตัวแล้วจึงมีรหัสเป็น"101"แต่ก็ทราบกันดีว่ารหัส"101"คือหมายเลข 5 ซึ่งบอกให้ทราบว่าของที่นำมาชั่งจะมีน้ำหนักอย่างน้อยสุด 5 กรัม แต่น้อยกว่า 6 กรัม ผลต่างระหว่างน้ำหนักจริงและน้ำหนักที่ชั่งได้คือ 0.7 กรัมนั้น ในทางปฏิบัติจริงๆ สิ่งนี้ คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 หลักการของการเข้ารหัส

2.4.5 การถอดรหัส

สัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่งเข้าสู่เครื่องรับจะถูกถอดรหัสจากรหัสเลขฐานสองให้ได้แอมปลิจูดออกมาอยู่ในปริมาณ (Quantum) ต่างๆ ตามค่ารหัสที่ส่งมา ถ้าเป็นการส่งข้อมูลมา 8 บิต จะมีความสำคัญของแต่ละบิตดังนี้ คือ

MSB							*LSB*
2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0

ข้อมูลแต่ละชุดที่ส่งเข้ามาจะเป็นผลบวกของแต่ละบิต ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแต่ละบิตอีกทีหนึ่งว่าเป็น“1”หรือ“0”ดังตัวอย่างข้างล่างนี้

ข้อมูลที่ส่งมา : 10001011

ดังนั้นข้อมูลจะถูกถอดรหัสออกมามีค่าเป็น

$$(1\times 2^7)+(0\times 2^6)+(0\times 2^5)+(0\times 2^4)+(1\times 2^3)+(0\times 2^2)+(1\times 2^1)+(1\times 2^0)=139$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

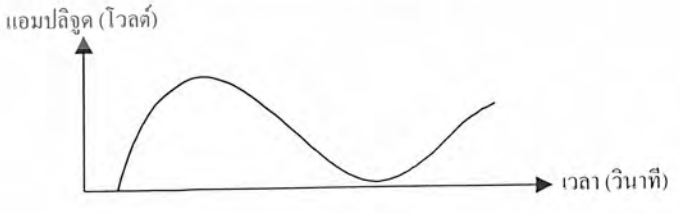
หมายความว่าข้อมูลชุดนี้อยู่ที่ระดับปริมาณ (Quantum level) ที่ 139 จะมีค่ากี่โวลต์ก็ขึ้นอยู่กับการจัดระดับปริมาณสูงสุดและต่ำสุดมีค่ากี่โวลต์

ดังนั้นข้อมูลแต่ละชุดจะมีค่าออกมาเป็นระดับแตกต่างกันไปแล้วแต่ว่าข้อมูลชุดไหนมีค่าเท่าไหร่ ข้อมูลที่ถูกแปลงออกมานี้จะคงอยู่ในระดับนั้นๆ ตราบเท่าที่มีบิตข้อมูลชุดนั้นป้อนให้ที่อินพุตอยู่จนกว่าจะมีบิตข้อมูลชุดใหม่หรือค่าใหม่เข้ามาแทนในเวลาต่อมา

โดยทางด้านรับเมื่อเครื่องรับได้สัญญาณดิจิตอลการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ก็จะแปลงกลับไปเป็นสัญญาณแอนะลอก (ดังในรูปที่ 2.20) โดยผ่านขั้นตอนการถอดรหัสและการกรองสัญญาณซึ่งเรียกขั้นตอนทั้งสองรวมกันว่า การเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก

(ก) สัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

(ข) สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมปลิจูด



(ค) สัญญาณแอนะลอก

รูปที่ 2.20 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถอดรหัสนั้นก็ตรงกันข้ามกับการเข้ารหัส โดยเริ่มต้นจากรหัสเลขฐานสองที่มาจากเครื่องรับสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์จะถูกนำมาคำนวณและสร้างเป็นระดับค่าตัวเลขและสัญญาณสุ่มค่าจะถูกสร้างขึ้นใหม่ซึ่งสอดคล้องกับระดับที่คำนวณได้จากข้อมูลฐานสองที่รับได้ สัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ที่ถูกแปลงเป็นตัวเลขแล้วที่ด้านส่งก็จะถูกสร้างขึ้นใหม่ที่ด้านรับ ซึ่งสัญญาณที่ได้ก็ยังคงมีสัญญาณรบกวนจากการแปลงเป็นตัวเลขเช่นเดียวกับทางด้านส่ง สัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ที่สร้างขึ้นใหม่ที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก็จะได้สัญญาณเสียงแอนะลอกต่อเนื่องตามกาลเวลา

2.4.6 ระบบการซิงโครนัส

ในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมจำเป็นจะต้องมีระบบที่ทำให้ภาครับและภาคส่งสามารถรับ-ส่งข้อมูลที่สัมพันธ์กัน ระบบที่ว่านี้คือ ระบบการซิงโครนัสซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) การซิงโครนัส (Synchronization) ซึ่งยังสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1.1) การซิงโครนัสของบิต (Bit synchronization)

1.2) การซิงโครนัสของตัวอักษร (Character synchronization)

2) การอะซิงโครนัส (Asynchronization) หรืออาจเรียกว่าการส่งผ่านข้อมูลแบบเริ่มต้นและหยุดซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

รูปที่ 2.21 การส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรม

1) การซิงโครนัส

1.1) การซิงโครนัสของบิต

ในการส่งผ่านข้อมูลนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ทางด้านรับตรวจสอบและตีความรูปแบบของบิตที่ส่งมาจากด้านส่งได้ถูกต้อง โดยด้านรับจะต้องตรวจสอบดูว่าเมื่อใดที่บิตเข้ามาตามสายหรือไม่มีบิตเข้ามา โดยจะมีสัญญาณนาฬิกาทั้งสองด้านพิจารณาสัญญาณนาฬิกาที่ทางด้านส่งจะเป็นตัวบอกว่าถ่ายเทข้อมูลเป็นบิตลงในสายด้วยความถี่เท่าไรและสัญญาณนาฬิกาทางด้านรับจะเป็นตัวบอกว่ามีข้อมูลเป็นบิตวิ่งมาตามสายส่งด้วยความถี่เท่าไร

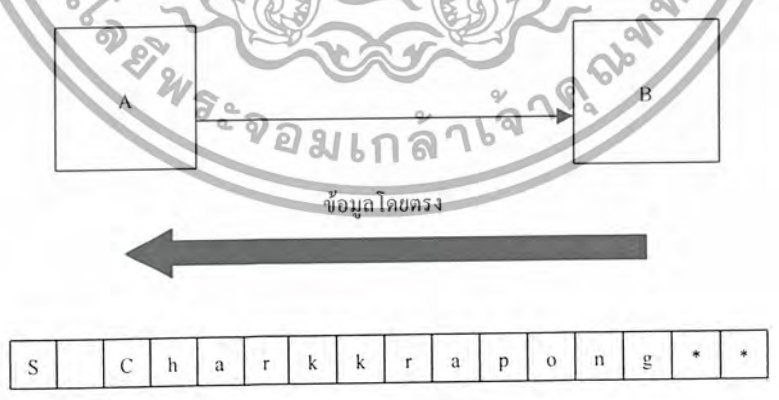
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2) การซิงโครนัสของตัวอักษร

จากขบวนการแบบบิตเมื่อมีขบวนบิตวิ่งมาตามสายส่งจะรู้ได้อย่างไรว่าบิตไหนเป็นบิตแรกของตัวข้อมูลหรือเป็นบิตสุดท้ายของข้อมูล ซึ่งการทำซิงโครนัสแบบตัวอักษรจะแก้ไขได้เมื่อด้านรับได้รับทราบถึงบิตแรกของข้อมูลและรู้ว่าในหนึ่งข้อมูลมีกี่บิตและรู้ความเร็วของบิตที่วิ่งมาตามสายส่งก็จะสามารถแยกกลุ่มของบิตเพื่อแทนตัวข้อมูลได้

การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสจะทำการจัดกลุ่มข้อมูลเป็นกลุ่มและทำการส่งข้อมูลทั้งกลุ่มไปในพร้อมกันทีเดียว เรียกกลุ่มข้อมูลนี้ว่า"Block of data"และช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งจะใช้เวลาเดียวกันข้อมูลตัวแรกและตัวถัดไปจะไม่มีอะไรมากั้น

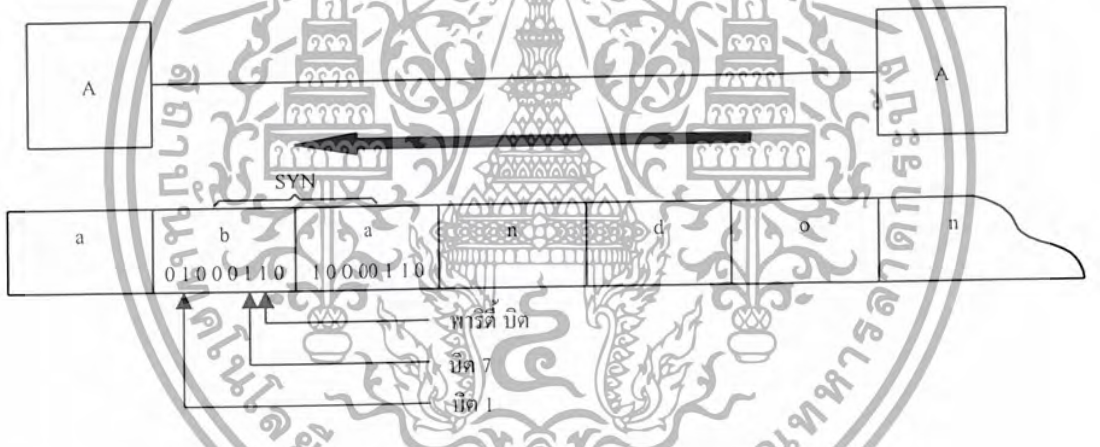
ในรูปที่ 2.22 แสดงถึงการนำข้อมูลมาเรียงต่อกันแล้วทำการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัส พบว่าข้อมูลจะอยู่ต่อชิดกัน โดยไม่มีช่องว่างอยู่เลย ทางด้านรับจะต้องทราบว่าบิตใดคือบิตแรกของข้อมูล ขนาดของข้อมูล ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล และจะทำการจัดกลุ่มของบิตเป็นกลุ่มๆ เพื่อแทนค่ากลับเป็นข้อมูล สำหรับการที่จะรู้ว่าบิตใดคือบิตแรกของข้อมูลจากกลุ่มของข้อมูลส่วนต้นของกลุ่มจะทำการใส่ตัวซิงโครนัส Syn เพื่อใช้ในการควบคุมการส่งผ่านข้อมูลโดยจะมีรูปแบบของข้อมูลที่แน่นอน ที่ด้านรับจะตรวจดูว่ามีข้อมูลตัวใดตรงกันกับซิงโครนัสบ้างและเมื่อพบแล้วอุปกรณ์รับข้อมูลจะทราบได้ทันทีว่าถึงจุดเริ่มต้นที่จะตัดกลุ่มของบิตกลุ่มละ 8 บิต เพื่อแทนเป็นข้อมูลได้และข้อมูลหลายๆ ตัวที่ตีความได้ก็คือข้อความที่ส่งมาในแต่ละกลุ่ม แต่การใช้ตัวซิงโครนัสเพียงตัวเดียวใส่ไว้ที่ส่วนต้นของกลุ่มยังเป็นวิธีการที่ไม่ถูกต้องเพราะในบางกรณีขบวนพัลส์บิตที่แทนข้อมูลมีบางช่วงที่ไปตรงกับรูปแบบของบิตซิงโครนัสได้



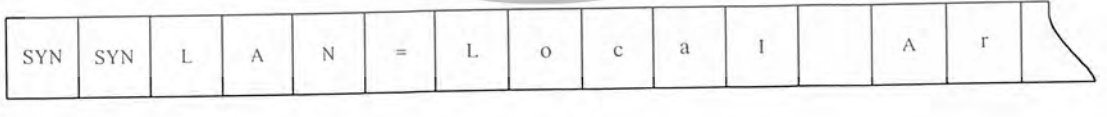
รูปที่ 2.22 การต่อเนื่องของข้อมูลที่ส่งแบบซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าถ้าส่งข้อความที่มีตัวอักษร b และ a ติดกัน 4 บิตท้ายของตัวอักษร b จะต่อกันกับ 4 บิตแรกของตัวอักษร a จะตรงกับซิงโครนัสพอดีจึงทำให้อุปกรณ์ด้านรับตีความผิดได้ ดังนั้นวิธีการแก้ข้อผิดพลาดที่เกิดในกรณีนี้ทำได้โดยการใช้ตัวซิงโครนัสสองตัวใส่ไว้ที่ส่วนต้นของกลุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ข) และอุปกรณ์ทางด้านรับก็ต้องทราบข้อตกลงนี้เป็นอย่างดีโดยทันทีที่ตรวจพบตัวซิงโครนัสจะดูอีก 8 บิตถัดไปว่าเป็นตัวซิงโครนัสด้วยหรือไม่ถ้าใช่จะเริ่มต้นรับว่าทุกๆ บิตที่ตามมาคือข้อมูลแต่ละตัว กรณีไม่ใช่ก็จะเริ่มตรวจหาตัวซิงโครนัสต่อไปหรืออาจกล่าวได้ว่าทางด้านรับจะปรับตัวเข้าสู่ภาคการค้นหาตัวซิงโครนัสและเมื่อพบตัวซิงโครนัสอย่างน้อยสองตัวก็จะเริ่มเข้าสู่ขบวนการจัดกลุ่มบิตกลุ่มละ 8 บิต แทนข้อมูลที่ได้รับดังรูปที่ 2.24 และ 2.25 ขบวนการรับข้อมูลที่ส่งผ่านมาในระบบซิงโครนัส ในบางระบบการใส่ตัวซิงโครนัสนำหน้ากลุ่มข้อมูลอาจใช้ตัวซิงโครนัส 3 ถึง 4 ตัวก็ได้เพื่อความแน่นอนในการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัสที่สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้น



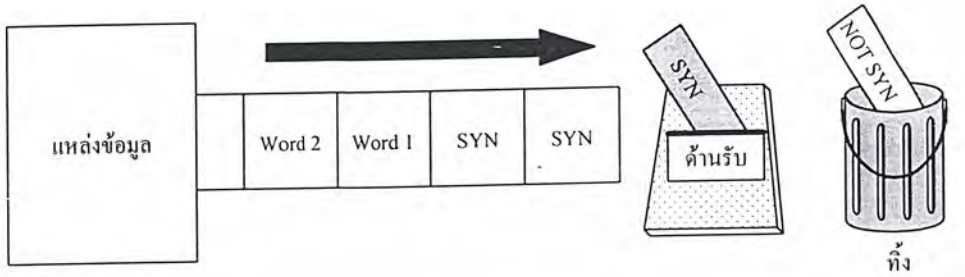
(ก) กลุ่มบิตที่เกิดแล้วตรงกับตัวสัญญาณซิงค์



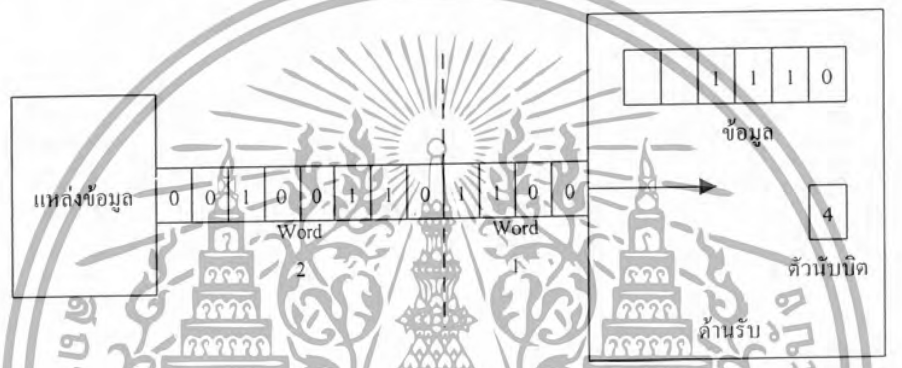
(ข) การใช้ตัวสัญญาณซิงค์ 2 ตัวหน้าบล็อกข้อมูล

รูปที่ 2.23 รูปแบบการใช้สัญญาณซิงค์นำหน้ากลุ่มตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบอุปกรณ์รับข้อมูลตรวจหาสัญญาณซิงค์ในระบบซิงโครนัส



รูปที่ 2.25 การตัดแถวของบิตออกกลุ่มละ 8 บิตในระบบการส่งผ่านแบบอะซิงโครนัส

ถ้าจะกล่าวถึงการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัสนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายหัวข้อที่จะต้องกล่าวถึง ในบางกรณีจะใช้ตัวซิงโครนัสที่ต่างกันสองตัวเป็นรูปแบบการส่งแบบซิงโครนัส ดังนั้นด้านรับข้อมูลจะต้องจำลักษณะของตัวซิงโครนัสตัวแรกซึ่งมีลักษณะเป็นเอกลักษณ์ไว้หนึ่งตัวก่อน จากนั้นจะต้องเตรียมตรวจดูกลุ่มของบิตกลุ่มต่อไปเพื่อให้รู้ว่าเป็นตัวซิงโครนัสอะไร ในระบบการส่งผ่านข้อมูลที่เป็นบิตล้วนๆ รูปแบบของซิงโครนัสจะถูกเรียกว่าแฟลก (Flag) สรุปได้ว่าหลักของการส่งสัญญาณแบบซิงโครนัสนั้นจะต้องให้ด้านรับข้อมูลที่ปลายทางเข้าใจถึงลักษณะของบิตพิเศษที่ส่งมาเพื่อให้รู้ว่านั้นคือจุดเริ่มต้นของกลุ่มข้อมูลที่กำลังส่งเรียงกันเข้ามา

2) การอะซิงโครนัส

การส่งผ่านข้อมูลแบบอะซิงโครนัสนี้เป็นระบบในการจัดส่งข้อมูลตัวใดตัวหนึ่งไปในทันทีทันใดซึ่งจะเป็นเวลาใดๆ ก็ได้โดยไม่จำเป็นต้องกำหนดความสัมพันธ์กับข้อมูลตัวอื่นๆ อาจจะส่งข้อมูลเรียงติดกันไปเลยโดยไม่มีที่ว่างระหว่างข้อมูลคล้ายกันกับกรณีการส่งสัญญาณแบบซิงโครนัสก็ได้หรืออาจส่งแบบมีที่ว่างก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ด้านรับจะต้องสร้างลักษณะของซิงโครนัสขึ้นมาใหม่สำหรับข้อมูลแต่ละตัว เครื่องรับปลายทางจะต้องรู้ว่าสิ่งที่ส่งมานั้นมีบิตแรกของตัวอักษร

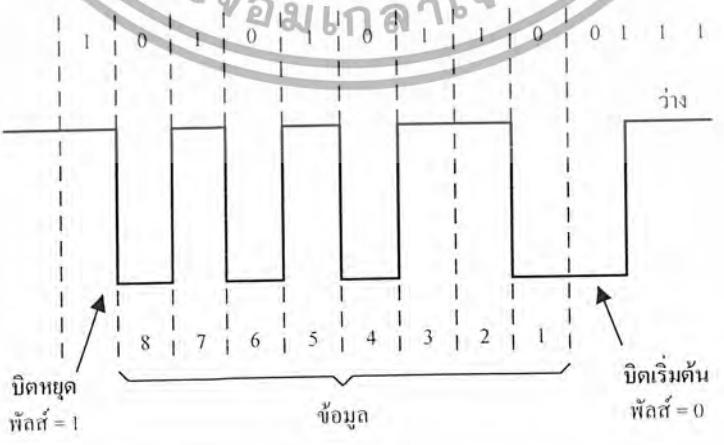
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่ใด ดังนั้นหน้าข้อมูลแต่ละตัวจะใส่บิตที่มีลักษณะพิเศษเพื่อถือเป็นจุดเริ่มต้น (Start pulse) ซึ่งเมื่อด้านรับพบบิตแบบนี้จะทราบได้ทันทีว่านี้คือจุดเริ่มต้นของข้อมูล

ด้านรับปลายทางจะตรวจพบแสดงบิตจุดเริ่มต้นได้โดยตรวจสภาวะทางไฟฟ้าของสายส่งว่ามีสภาวะเป็นหนึ่งหรือเป็นศูนย์ ในขณะที่สายส่งรักษาระดับไฟคงที่โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าไม่มีการส่งข้อมูลมาเลย สายส่งในลักษณะนี้จะเรียกว่าสายว่าง (Idle line) และเพื่อความสะดวกจะให้สภาวะของสายว่างมีระดับทางไฟฟ้าเป็นหนึ่ง ในบางระบบจะเรียกสภาวะสายว่างนี้ว่า Mark condition สำหรับสภาวะทางไฟฟ้าที่ตรงข้ามกับสภาวะสายว่างคือสภาวะที่เป็นศูนย์ ในบางระบบจะเรียกว่า สภาวะว่างเปล่า (Space condition) จะสังเกตได้ว่าสภาวะสายว่างนี้เป็นสภาวะที่ตัวส่งสัญญาณส่งค่าบิตเป็นหนึ่งติดกันมาโดยตลอด

เมื่อมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลด้านส่งจะใส่บิตศูนย์มาหน้ากลุ่มของบิตที่แทนข้อมูลนั้น ซึ่งบิตที่ใส่นำหน้านี้จะทำหน้าที่เพื่อบอกว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการส่งข้อมูล ถ้าพิจารณาในแง่ของลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.26 ด้านส่งจะสร้างบิตเริ่มต้นโดยการสับเปลี่ยนสภาวะของสายส่งจากหนึ่งเข้าสู่สภาวะศูนย์โดยใช้เพียงบิตเดียว พร้อมกันนี้ข้อมูลที่ต้องการส่งก็จะตามบิตเริ่มต้นเข้าสู่ด้านรับต่อไป

เมื่อด้านรับตรวจพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะจากหนึ่งเป็นศูนย์ก็จะมีการเทียบกับสัญญาณนาฬิกาทันที ภายหลังจากผ่านพ้นไปได้ครึ่งบิตสัญญาณนาฬิกาจะเป็นตัวบอกด้านรับให้ตรวจสอบสภาวะของสายส่งถ้ายังคงอยู่ในสภาวะศูนย์ ถ้าตรวจสภาวะของสายส่งแล้วได้บิตศูนย์อยู่เครื่องก็จะเริ่มตรวจรับรหัสของข้อมูลนั้น แต่ถ้าในจุดเริ่มต้นนี้ด้านรับพบว่าบิตที่เข้ามาทีแรกมีสภาวะเป็นหนึ่ง ด้านรับจะวิเคราะห์ว่าจุดเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงหนึ่งเป็นศูนย์นี้เป็นสัญญาณรบกวนช่วงสั้นๆ และจะหยุดตรวจสภาวะสายส่งเพราะไม่ต้องการรวมบิตเป็นข้อมูลต่อไป



รูปที่ 2.26 การส่งข้อมูล 1 ตัวแบบอะซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสัญญาณนาฬิกาที่ด้านรับจะทำให้เกิดการซิงโครนัสที่ตอนต้นของข้อมูลที่กำลังเข้ามา โดยอาจทำให้เกิดการแตกต่างกันไปได้เล็กน้อยระหว่างความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลกับสัญญาณนาฬิกาที่ด้านรับใช้ ณ ที่จุดสิ้นสุดของแต่ละตัวอักษรที่ส่งมากับขบวนของบิตสิ้นสุดจะถูกส่งมาทางด้านรับเพื่อทำให้เกิดสภาวะคงที่ก่อนที่ข้อมูลอื่นจะตามมาดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.26 จะเห็นว่ากลุ่มบิตที่แทนค่าของข้อมูลจะถูกปิดหัวปิดท้ายไว้ด้วยบิตเริ่มต้นและบิตสุดท้าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงมีการเรียกการส่งผ่านข้อมูลแบบอะซิงโครนัสนี้ว่า การส่งผ่านข้อมูลแบบเริ่มต้น/หยุด (Start/Stop transmission)

โดยทั่วไปการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสจะพิจารณาถึงเรื่องของอัตราความเร็วในการรับส่งบิตเป็นอันดับแรก ซึ่งจะระบุกันในหน่วยของจำนวนบิตข้อมูลภายในเวลาหนึ่งวินาที เรียกว่า อัตราบอด (Baud rate) เช่นถ้าทำการส่งข้อมูล 8 บิตด้วยความเร็ว 2400 บอด จะใช้เวลาในการส่งข้อมูลหนึ่งบิตเท่ากับ 1/2400 หรือ 416 ไมโครวินาทีและเวลาในการส่งข้อมูลทั้ง 8 บิตจะมีค่าเท่ากับ 8×416 หรือ 3328 ไมโครวินาที

วิธีการที่จะทำให้การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัสมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จะทำการสร้างรูปแบบของข้อมูลโดยการเพิ่มเติมบิตบางอย่างร่วมไปกับการส่งข้อมูลจริงได้แก่

1) บิตเริ่มต้น

บิตเริ่มต้นมีหน้าที่สำหรับบอกให้ทางด้านรับทราบถึงตำแหน่งจุดเริ่มต้นของบิตข้อมูลเพื่อทำการปรับจังหวะของการรับส่งข้อมูลให้ตรงกัน ซึ่งจะถูกเพิ่มเข้าไปก่อนที่จะมีการส่งข้อมูลจริง โดยส่วนมากหากสภาวะของสายเมื่อไม่มีข้อมูลจะมีลอจิกสูง ดังนั้นบิตเริ่มต้นจะมีระดับลอจิกต่ำ

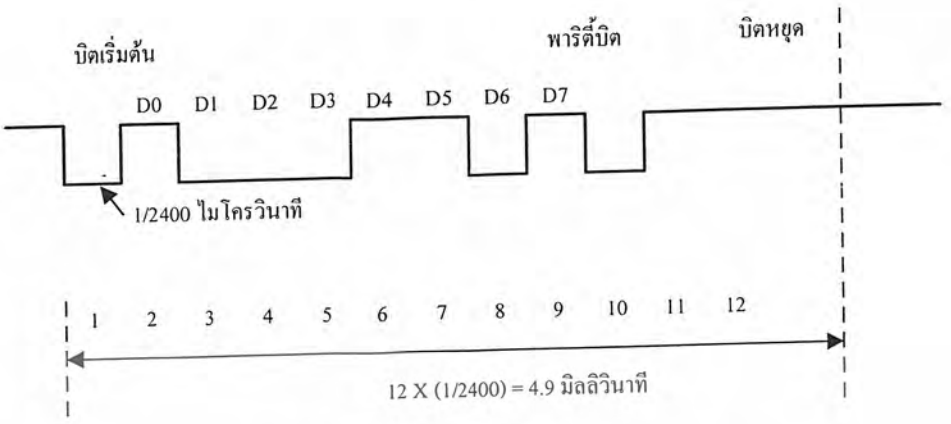
2) บิตแสดงสภาวะความเป็นเลขคู่หรือเลขคี่

บิตนี้จะมีหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยจะนำไปแทรกต่อท้ายบิตข้อมูล ค่าของบิตนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนค่าของบิตข้อมูลที่เป็นหนึ่ง ซึ่งจะเป็นไปได้สองลักษณะคือ พาริตี้คู่ (Even parity) หรือพาริตี้คี่ (Odd parity)

3) บิตสุดท้าย

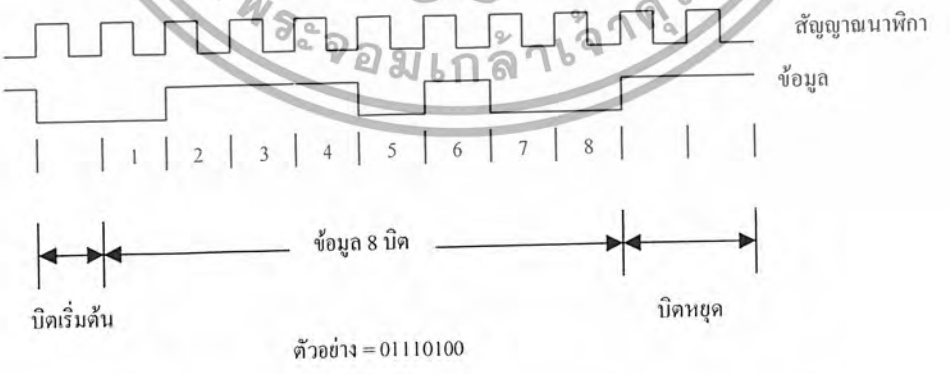
บิตสุดท้ายมีหน้าที่ระบุถึงขอบเขตการสิ้นสุดของกลุ่มบิตข้อมูล บิตสุดท้ายนี้อาจจะมีจำนวนมากกว่าหนึ่งบิตได้ ดังนั้นกรณีของการส่งข้อมูล 8 บิต พร้อมบิตที่เพิ่มเติมเข้าไปโดยสมบูรณ์คือบิตเริ่มต้น บิตพาริตี้และบิตสุดท้ายรวมทั้งสิ้น 12 บิตตามรูปที่ 2.27 หากข้อมูลถูกส่งออกไปด้วยอัตราเร็ว 2400 บอด เวลาโดยรวมในการส่งข้อมูล 1 ไบต์จะมีค่าเป็น 12×416 ไมโครวินาทีหรือ 4.99 มิลลิวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 สัญญาณเวลาของข้อมูลอนุกรม 8 บิต

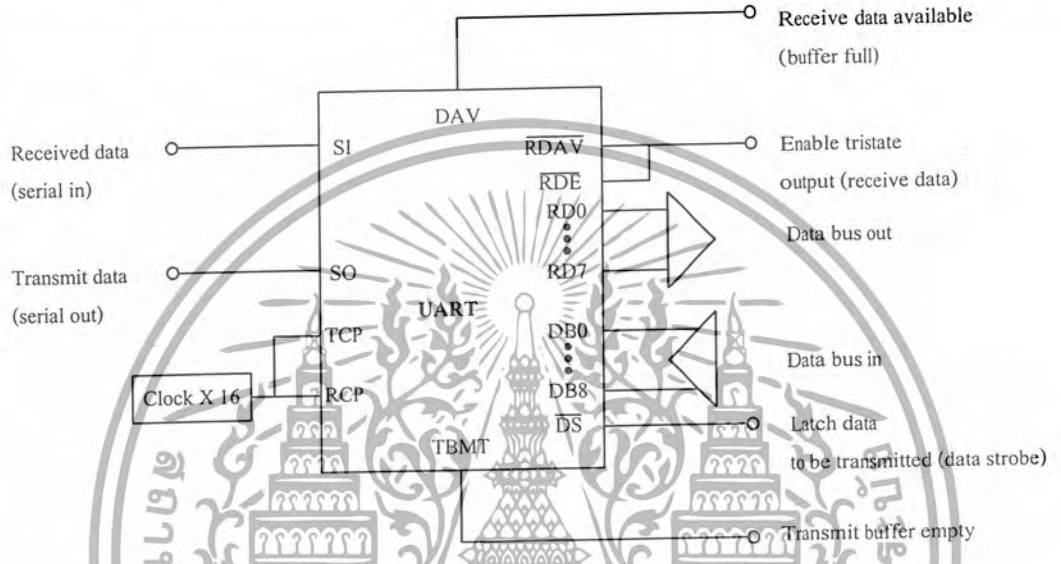
สัญญาณข้อมูลที่ทำการส่งโดยใช้ยูอาร์ท (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter : UARTS) โดยมากจะอยู่ในรูปของไอซี ซึ่งสามารถทำการเข้ารหัสข้อมูลจากขนานเป็นอนุกรม เพื่อส่งไปตามสายส่งสัญญาณเพียงเส้นเดียว ซึ่งไอซีตัวเดียวกันนี้สามารถทำงานในลักษณะที่กลับกันได้คือใช้ในการรับข้อมูลกลับคืนมาได้ โดยให้ยูอาร์ททำงานในโหมดของการรับข้อมูล รูปแบบการส่งข้อมูลจะเป็นแบบอนุกรมข่าวสารจะถูกเพิ่มบิตเริ่มต้นและบิตสุดท้ายเข้าไปในข้อมูล เพื่อให้ด้านรับสามารถรับข้อความได้ถูกต้อง ดังนั้นสัญญาณนาฬิกาจึงไม่มีความจำเป็นที่จะส่งไปทางด้านรับ กระบวนการส่งข้อมูลแบบนี้จะเรียกว่าเป็นแบบอะซิงโครนัส สัญญาณนาฬิกาทางด้านส่งและด้านรับไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน แต่จะต้องมีค่าที่ไม่ต่างกันมากจนเกินไป อัตราการส่งข้อมูลจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลที่ทำการส่งโดยใช้ยูอาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.28 จะพบว่าในการส่งข้อมูลหนึ่งครั้งจะใช้รหัสดิจิตอลทั้งหมด 11 บิตซึ่งจะประกอบไปด้วย 1 บิตเริ่มต้นตามด้วยข้อมูล 8 บิต และปิดท้ายด้วย 2 บิตสุดท้าย ที่ทางด้านรับจะทำการตรวจหาบิตเริ่มต้นและเมื่อพบก็จะทำการนำข้อมูล 8 บิตถัดมาส่งออกไปทางเอาต์พุตแบบขนาน บิตเริ่มต้นสามารถปรากฏหรือไม่ปรากฏแบบทันทีทันใดหลังจากบิตสุดท้ายก็ได้



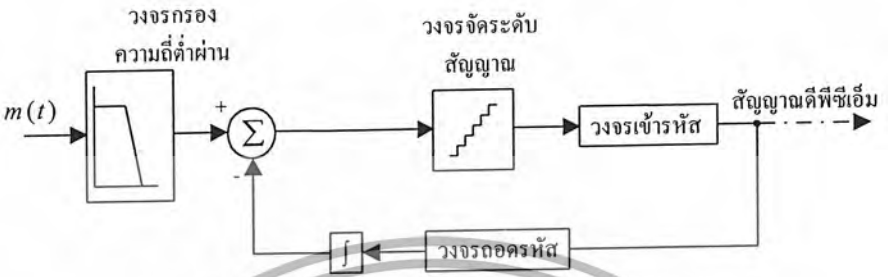
รูปที่ 2.29 ลักษณะของไอซีที่เป็นยูอาร์ท

2.5 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

สำหรับสัญญาณซึ่งมีความฟุ่มเฟือยหรือความซ้ำซ้อนของข้อมูลมาก เช่นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความแรงของสัญญาณช้า เมื่อเทียบกับอัตราการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณอาทิเช่น สัญญาณเสียงและสัญญาณภาพ ค่าตัวอย่างของสัญญาณที่สุ่มออกมาตามอัตราการสุ่มตัวอย่างจะมีความแรงไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงสามารถที่จะพยากรณ์ คือคาดเดาค่าความแรงของสัญญาณที่จะสุ่มตัวอย่างออกมาในเวลาถัดไปได้โดยมีความผิดพลาดไม่มากนัก ดังนั้นมันจึงเป็นไปได้ที่จะลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลในการเข้ารหัสสัญญาณลงได้ โดยอาศัยการเข้ารหัสของระดับความแตกต่างของค่าความแรงของสัญญาณที่ได้พยากรณ์ไว้ก่อนกับค่าความแรงของสัญญาณจริงที่เกิดขึ้นในปัจจุบันแทนการใช้ค่าความแรงของสัญญาณจริงในปัจจุบันเพียงอย่างเดียวมาทำการเข้ารหัส ค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลจะลดลงได้เพราะค่าความแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงของความแรงที่เกิดจากความแตกต่างของสัญญาณที่ใช้จะมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนของค่าความแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณจริง เทคนิคการกระทำดังกล่าวนี้เมื่อนำมาใช้กับการสื่อสารที่มอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ได้ทำให้เกิดระบบที่เรียกว่า การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง



(ก) ภาคส่ง

(ข) ภาครับ

รูปที่ 2.30 ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างมีดังแสดงในรูปที่ 2.30 โดยเริ่มแรกสัญญาณอินพุตจะถูกกรองเอาความถี่ต่ำที่สูงเกินไปออกโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าความถี่จุดตัดไม่เกินครึ่งหนึ่งของความถี่ f_s ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อทำสัญญาณอินพุตให้มีช่วงความถี่อยู่ในแบนด์วิดธ์ที่จำกัดถูกต้องแน่นอน เพื่อป้องกันการเคลือบแฝงค่าพยากรณ์ของสัญญาณอินพุตจะถูกนำมาหักออกจากค่าสัญญาณอินพุต $m(t)$ และค่าผลต่างที่เกิดขึ้นจะถูกสุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปทำการจัดระดับสัญญาณและเข้ารหัสเพื่อส่งต่อไป ค่าพยากรณ์ของสัญญาณอินพุตในที่นี้หามาได้จากการอินทิเกรตสัญญาณซึ่งคือการรวมค่าผลต่างที่ได้จากการถอดรหัสสัญญาณเอาต์พุตตามรูปที่ 2.30 (ก)

เครื่องรับจะมีวงจรถอดรหัสสัญญาณและวงจรอินทิเกรตสัญญาณเหมือนกับส่วนป้อนกลับที่ใช้พยากรณ์สัญญาณทางเครื่องส่งและจะมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้กรองความถี่สูงทิ้งเพื่อที่จะทำให้สัญญาณราบเรียบเป็นสัญญาณแอนะลอกเหมือนสัญญาณอินพุตที่ใช้ส่งให้กลับคืนมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างนั้นเป็นการพัฒนามาจากระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ซึ่งสามารถแยกการทำงานออกมาได้เป็นดังนี้

1) การสุ่มตัวอย่างสัญญาณและคงค่าสัญญาณ

2) การเปรียบเทียบขนาดสัญญาณที่ได้กับระดับสัญญาณอ้างอิง

3) การนำระดับสัญญาณที่ได้นั้นไปทำการเข้ารหัส

4) การหาค่าสัญญาณผลต่าง

5) การนำสัญญาณผลต่างมาหาค่าทำนาย

จะเห็นได้ว่าการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างจะมีลักษณะคล้ายกันกับระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ซึ่งจะต่างกันที่ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างนั้นจะใช้ค่าสัญญาณผลต่างมาทำการเข้ารหัสและที่ด้านถอดรหัสจะนำสัญญาณผลต่างนี้มาหาค่าทำนายเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมกลับคืนมา

ข้อดีของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างนี้จะอยู่ที่การนำสัญญาณค่าผลต่างมาเข้ารหัสเนื่องจากว่าขนาดของสัญญาณค่าผลต่างนี้มีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต ดังนั้นการเข้ารหัสสัญญาณจะสามารถลดจำนวนบิตที่ใช้ในการเข้ารหัสได้หรือถ้าจำนวนบิตในการเข้ารหัสเท่าเดิมแล้วสัญญาณที่ได้จะมีความผิดพลาดน้อยลง จากข้อดีนี้ทำให้ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างมีประสิทธิภาพในการใช้งานดีกว่าระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

สำหรับหลักการทำงานของวงจรกรองความถี่ไปจนถึงการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ การจัดระดับสัญญาณ การคอมแพนดิง การเข้ารหัส การถอดรหัส และระบบซิงโครนัสนั้นหลักการจะเหมือนกับการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ในข้างต้น ดังนั้นจึงไม่ขอกล่าวในที่นี้ จะกล่าวในส่วนที่แตกต่างจากระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์เท่านั้น

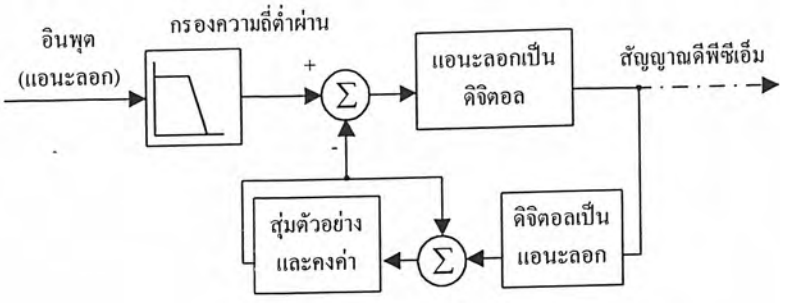
2.5.1 การทำนายค่าสัญญาณ

ค่าสัญญาณแอนะลอกที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิจิตอลเป็นแอนะลอกกลับคืนมานั้นจะเป็นสัญญาณค่าผลต่างซึ่งจะนำค่าผลต่างนี้มาทำการแปลงกลับให้เป็นสัญญาณอินพุต ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่าตัวทำนายค่าสัญญาณ ซึ่งรูปแบบที่ใช้ในการทำนายนั้นแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1) การทำนายค่าสัญญาณจากแอนะลอก

จากรูปที่ 2.31 แสดงถึงระบบของการใช้สัญญาณค่าผลต่างและการรวมค่าสัญญาณ สัญญาณค่าผลต่างจะถูกทำการแปลงจากแอนะลอกเป็นดิจิตอลและทันใดนั้นจะถูกทำการแปลงกลับเป็นแอนะลอกอีกครั้ง ซึ่งสัญญาณแอนะลอกนี้ก็คือสัญญาณค่าผลต่างซึ่งจะทำการรวมและสะสมสัญญาณ ซึ่งจะนำไปผ่านการสุ่มและคงค่าสัญญาณ สัญญาณที่ได้นี้จะใช้เป็นสัญญาณค่าทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาคการเข้ารหัส

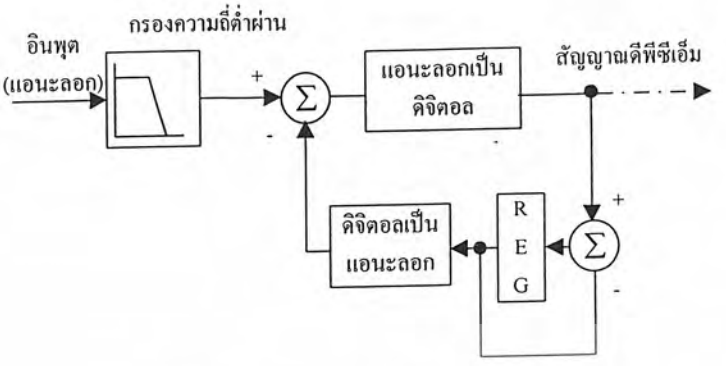
(ข) ภาคการถอดรหัส

รูปที่ 2.31 แผนผังการทำนายค่าสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอก

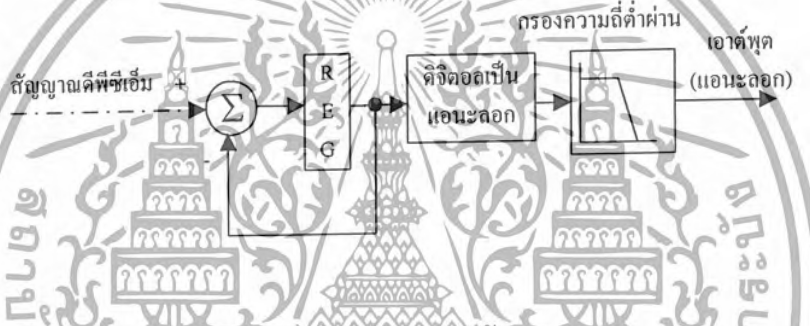
2) การทำนายค่าสัญญาณจากดิจิตอล

จากรูปที่ 2.32 แสดงถึงระบบของการใช้สัญญาณดิจิตอลในการสร้างค่าทำนายแทนที่จะทำการแปลงกลับเป็นสัญญาณแอนะลอกค่าผลต่างในทันทีทันใดจะทำการรวมสัญญาณดิจิตอลผลต่างและเก็บข้อมูลไว้ในรีจิสเตอร์ เพื่อจะใช้ในการสร้างเป็นสัญญาณดิจิตอลของอินพุตตัวเดิม จากนั้นจึงจะทำการแปลงกลับเป็นสัญญาณแอนะลอกอีกครั้งหนึ่ง โดยในกรณีนี้ค่าสูงสุดของตัวแปลงข้อมูลจากดิจิตอลเป็นแอนะลอกเท่ากับสัญญาณอินพุต แต่ในขณะที่ตัวแปลงข้อมูลจากดิจิตอลเป็นแอนะลอกของแบบแรกจะมีค่าสูงสุดเท่ากับสัญญาณค่าผลต่างก็เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาคการเข้ารหัส



(ข) ภาคการถอดรหัส

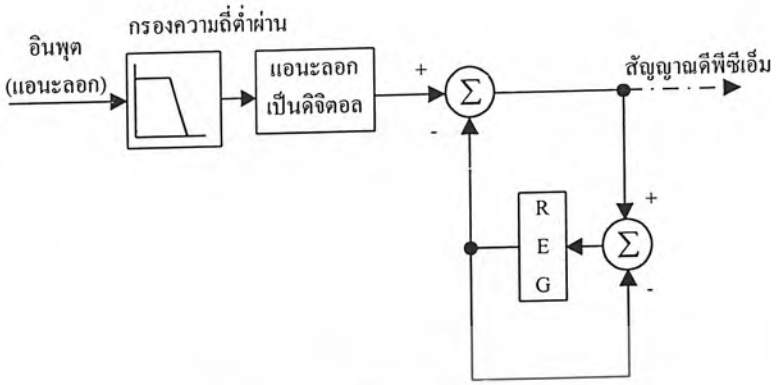
รูปที่ 2.32 แผนผังการทำนายค่าสัญญาณจากดิจิตอล

3) การทำนายค่าสัญญาณจากดิจิตอลผลต่าง

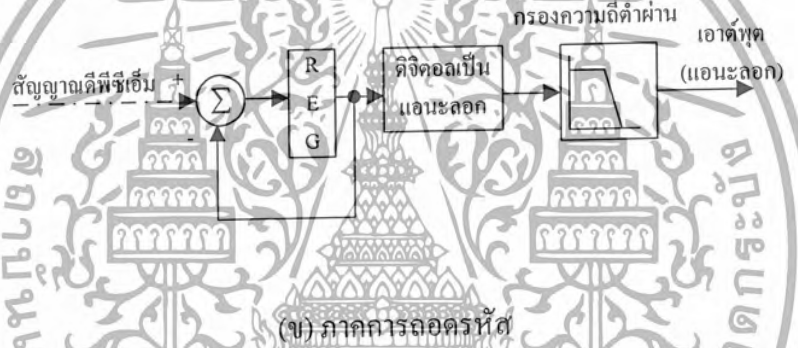
ในรูปที่ 2.33 แสดงถึงระบบที่ทำงานโดยใช้วงจรแบบดิจิตอล ตัวแปลงข้อมูลจากแอนะลอกเป็นดิจิตอลจะทำการแปลงข้อมูลจริงที่ได้จากตัวอย่างแล้วทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณดิจิตอลที่ได้ประมาณค่าเป็นสัญญาณก่อนหน้า จะสังเกตได้ว่าตัวแปลงข้อมูลจากแอนะลอกเป็นดิจิตอลแบบนี้จะต้องทำการแปลงรหัสสัญญาณจริงของอินพุต แต่ในขณะที่สองแบบที่ผ่านมาจะทำการแปลงค่าผลต่าง ในการทำนายค่าสัญญาณแบบแอนะลอกจะนำหลักการของวงจรอินทิเกรเตอร์มาใช้ในการทำหน้าที่นี้

วงจรอินทิเกรเตอร์คือวงจรที่สามารถทำการอินทิเกรตสัญญาณที่ป้อน ณ ขั้วอินพุตหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ วงจรนี้จะสะสมสัญญาณที่ป้อนเข้าจากอินพุตอย่างต่อเนื่อง ภายในช่วงเวลาหนึ่ง และแสดงผลของการสะสมนี้ออกทางเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาคการเข้ารหัส



(ข) ภาคการถอดรหัส

รูปที่ 2.33 แผนผังการทำนายค่าสัญญาณจากดิจิตอลผลต่าง

2.5.2 การหาค่าสัญญาณผลต่าง

การหาค่าสัญญาณผลต่างนั้นจะนำสัญญาณอินพุตมาทำการลบกับสัญญาณค่าทำนายโดยวงจรที่ทำหน้าที่การหาค่าสัญญาณผลต่างนั้นจะใช้วงจรลบแรงดัน

จากรูปที่ 2.34 แสดงการใช้ออปแอมป์เป็นวงจรลบแรงดัน ซึ่งหลักการของวงจรลบแรงดันนี้จะเป็นการรวมวงจรชนิดขยายแบบกลับเฟสและขยายแบบไม่กลับเฟสเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้เกิดผลคือเกิดการหักล้างกันที่เอาต์พุตขึ้น (เนื่องจากเฟสของวงจรแต่ละชนิดจะตรงข้ามกัน) และสามารถวิเคราะห์สมการสำหรับหาค่าแรงดัน V_{out} ได้ โดยแรงดันที่ขั้วอินพุตบวกจะเท่ากับ

$$V^{+} = \frac{RG}{R2 + RG} V2 \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการวิเคราะห์วงจรแบบกลับเฟสทั่วไป โดยมี V^+ เป็นแรงดันอ้างอิงที่ขั้วอินพุตบวกจะได้

$$\frac{V1-V^+}{R1}=-\frac{(VO-V^+)}{RF} \tag{2.12}$$

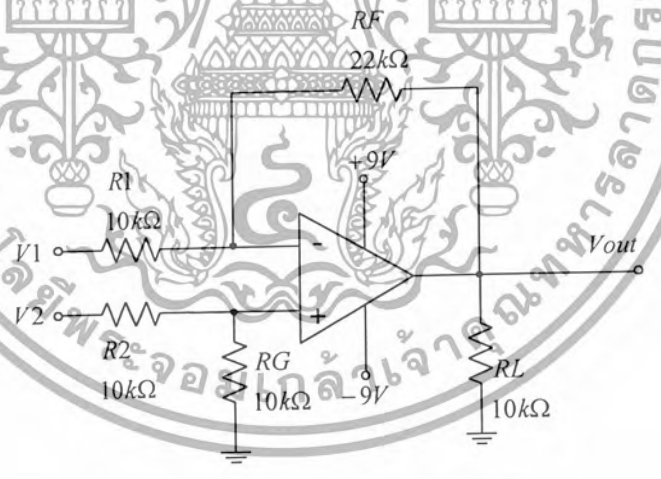
$$VO=-\frac{RF}{R1}V1+\left(\frac{RF}{R1}+1\right)V^+ \tag{2.13}$$

ทำการแทนค่า V^+

$$VO=-\frac{RF}{R1}V1+\left(\frac{RF}{R1}+1\right)\left(\frac{RG}{R2+RG}\right)V2 \tag{2.14}$$

และหาก $R1=R2=RF=RG$ จะได้ว่า

$$VO=V2-V1 \tag{2.15}$$

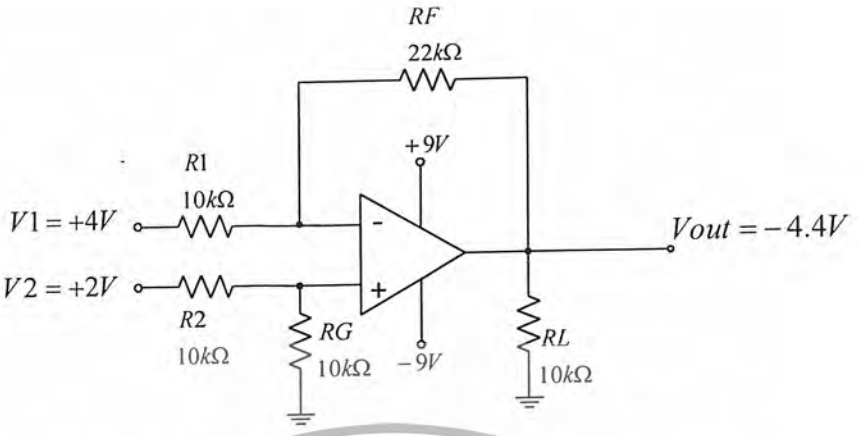


รูปที่ 2.34 วงจรลบแรงดัน

ส่วนวงจรรูปที่ 2.35 แสดงวงจรลบแรงดันซึ่งมีการขยายสัญญาณที่เอาต์พุตด้วย ซึ่งยังสามารถนำสมการของวงจรลบแรงดันมาใช้ได้และเมื่อ $R2=R1$ จะได้ว่า

$$VO=\frac{RF}{R1}(V2-V1) \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 วงจรลบแรงดันที่มีการขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต

จะสังเกตว่าวงจรนี้ทำหน้าที่คล้ายวงจรเปรียบเทียบค่าแต่ต่างกันที่สามารถขยายสัญญาณผลต่างได้ (ในขณะที่วงจรเปรียบเทียบค่าเพียงแต่สามารถตรวจจับความแตกต่างเท่านั้น) อย่างไรก็ตามวงจรนี้มีข้อเสียที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์ค่อนข้างต่ำ ในบางครั้งจึงอาจจำต้องใช้วงจรตามแรงดันเป็นตัวกั้นกลางก่อนเข้าวงจรลบแรงดัน

2.6 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

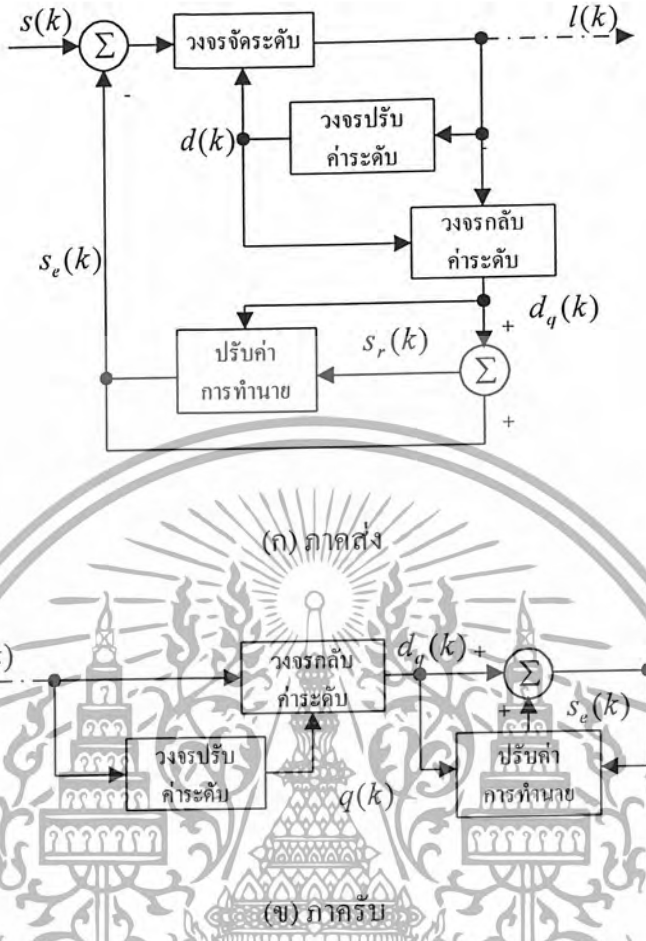
การเข้ารหัสสัญญาณเสียงด้วยอัตราส่งที่ต่ำนั้น การใช้งานการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์มีอัตราการส่งมาตรฐาน 64 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งต้องการของสัญญาณในการส่งที่มีขนาดแบนด์วิดธ์กว้างในการนำไปใช้งาน เช่น งานเกี่ยวกับความปลอดภัยของสัญญาณเสียงในการส่งไปในสายส่งบนช่องสัญญาณวิทยุซึ่งมีความจุต่ำ การประยุกต์ใช้งานแบบนี้จะเป็นที่ต้องการสำหรับการเข้ารหัสสัญญาณเสียงที่มีอัตราการส่งต่ำในขณะที่สามารถดูแลการรับส่งและได้สัญญาณเสียงที่มีคุณภาพกลับออกมา สำหรับการเข้ารหัสสัญญาณที่มีอัตราการส่งต่ำการเข้ารหัสสัญญาณต้องอาศัยสถิติของคุณลักษณะของรูปคลื่นของสัญญาณเสียงและคุณสมบัติการได้ยิน การออกแบบนี้เพื่อจุดประสงค์ 2 ประการ คือ

1) เพื่อเคลื่อนสัญญาณเสียงไปในระยะทางที่ไกลเท่าที่จะทำได้

2) เพื่อกำหนดบิตในการเข้ารหัสสัญญาณเสียงให้สามารถเข้าใจได้เมื่อถอดรหัส

วิธีการที่ถูกเสนอเข้ามาแก้ปัญหานี้วิธีหนึ่งคือการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ที่มีอัตราการส่งข้อมูล 32 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งสามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณเป็น 2 เท่าเมื่อเทียบกับเทคนิคการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 64 กิโลบิตต่อวินาทีในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

รูปที่ 2.36 แสดงถึงการรวมกันของหลักการความแตกต่างและหลักการการปรับค่าในระบบ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ทั้งการปรับการจัดระดับ และการหาความแตกต่างของสัญญาณซึ่งต้องการการจัดเก็บค่าของการสุ่มตัวอย่างสัญญาณค่าหนึ่งหรือมากกว่านั้นในหน่วยความจำทั้งในเครื่องส่งและเครื่องรับ นอกจากนี้จะต้องใช้วิธีการที่ทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับทำงานสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เพียงสัญญาณที่ถูกส่งไป $l(k)$ เท่านั้น โดยนำไปหาการปรับระดับในวงจรจัดระดับและวงจรจัดระดับแบบย้อนกลับและนำไปทำนายค่าของสัญญาณประมาณค่าถัดไป ด้วยวิธีนี้วงจรของเครื่องรับจึงต้องมีในเครื่องส่งด้วย นอกจากนี้เทคนิคการปรับค่าที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะก็จะช่วยให้หาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งได้เร็วขึ้น

ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าที่ใช้ในโทรศัพท์ดิจิตอลนั้นไม่ได้ใช้ระบบการเข้ารหัสโดยตรง แต่ใช้วงจรแปลงรหัส (Transcoder) ซึ่งทำการแปลงรหัสระหว่างการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมกับการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ในปัจจุบันนี้ระบบจำนวนมากจะใช้การส่งด้วยการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึม ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าจะประกอบด้วยวงจรจัดระดับแบบปรับค่าได้และวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้ (Adaptive quantizer and adaptive predictor) วงจรจัดระดับแบบปรับค่าได้นั้นจะประกอบด้วยการควบคุมความเร็วและการปรับขนาด (Speed control and scale-factor adaptation) การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความแตกต่างนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วการปรับขนาดนั้นทำเพื่อปรับสัญญาณความแตกต่างให้เหมาะสมกับระดับของการจัดระดับเพื่อให้ได้ค่า S/N ที่มากที่สุด ด้วยการควบคุมความเร็วทำให้ระบบสามารถทำได้ทั้งการปรับค่าอย่างรวดเร็วและการปรับค่าอย่างช้า ซึ่งทำให้ใช้ได้ดีกับทั้งสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณข้อมูล ในวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้นั้นการปรับค่าจะนำมาใช้ปรับปรุงการทำงานของวงจรทำนายค่าสำหรับสัญญาณที่ไม่คงที่ (เช่น เสียงพูด)

การทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่านั้นจะมีเครื่องรับฝังอยู่ในเครื่องส่งซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากสัญญาณป้อนกลับนั้นจะใช้ในการหาสัญญาณประมาณและสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้วเหมือนกับการทำงานของวงจรถอดรหัส ดังนั้นการชดเชยค่าความผิดพลาดจากการจัดระดับสามารถทำได้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณของผลต่างที่ตามมา

2.6.1 วงจรเข้ารหัส

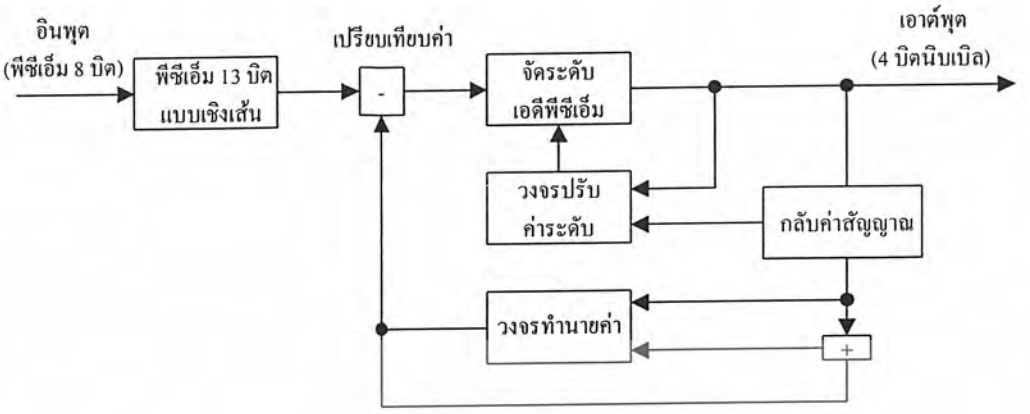
หน้าที่ของวงจรเข้ารหัสหรือเครื่องส่ง คือรับสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึม 64 กิโลบิตต่อวินาทีแล้วแปลงเป็นการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า 32 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) เมื่อสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ขนาด 8 บิตเข้ามานั้นก็จะเปลี่ยนให้กลายเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบเชิงเส้นขนาด 13 บิต

2) ขั้นตอนต่อไปคือวงจรเปรียบเทียบค่าซึ่งจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณใหม่ที่เข้ามากับสัญญาณที่เครื่องมือได้กำหนดไว้ ค่าความแตกต่างระหว่างทั้ง 2 ส่งต่อให้กับวงจรจัดระดับการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

3) วงจรจัดระดับการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่ามี 7 ระดับและเอาต์พุตที่ออกก็จะเป็น 4 บิตนิบเบิล บิตแรกจะแสดงขั้วของสัญญาณและอีก 3 บิตต่อมาก็แสดงค่าของระดับ ถ้าไม่มีความแตกต่างระหว่างทั้ง 2 สัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า จะออกมาเป็น 111 และสัญญาณสูงสุดที่เป็นไปได้ (Positive) คือ 0111 และสัญญาณทางลบ (Negative) ที่มีค่ามากสุดคือ 1000 จะส่งสัญญาณ 0 ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 ตัวแปลงรหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

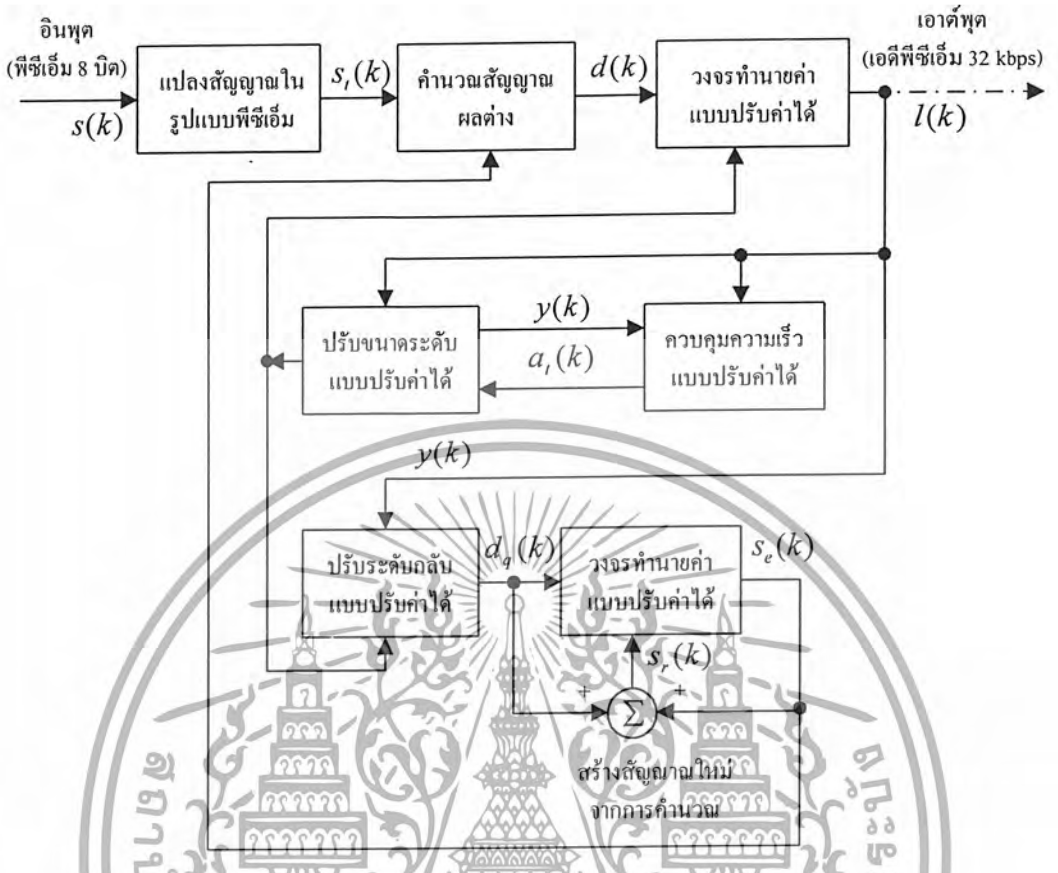
4) ที่จุดนี้ 4 บิตนิบเบิลจะส่งให้กับอีก 3 ส่วน คือส่งออกเป็นเอาต์พุตของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าและอีก 2 ส่วนก็ส่งให้กับวงจรกลับค่าสัญญาณกับวงจรปรับค่าระดับ วงจรกลับค่าสัญญาณจะเปลี่ยน 4 บิตนิบเบิลให้เป็น 13 บิต (สัญญาณที่มีค่าคงที่) และที่วงจรกลับค่าสัญญาณก็จะส่งสัญญาณนั้นให้วงจรทำนายค่าและวงจรปรับค่าระดับ

5) วงจรปรับค่าระดับจะล็อคค่าระดับของการจัดระดับเมื่อส่วนรับเสียง เช่น สัญญาณข้อมูล (Data signal) และ Unlocking the quantizer ก็คือส่วนนี้มีการเปลี่ยนแปลงของระดับของการจัดระดับตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ

6) สุดท้ายวงจรทำนายค่าทำหน้าที่เดาว่าสัญญาณถัดไปน่าจะเป็นอะไร เป็นวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบพื้นฐาน

การเข้ารหัสสัญญาณที่เป็นลอการิทึมจะได้ค่า S/N มากกว่าสัญญาณที่เป็นเชิงเส้นและการปรับค่านี้จะขึ้นอยู่กับการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสไปก่อนหน้านี้แล้ว การปรับค่านี้จะถูกควบคุมด้วย 2 ลักษณะ คือควบคุมด้วยการปรับค่าอย่างเร็ว (Fast adaptation factor) สำหรับสัญญาณที่มีการแกว่งของแอมปลิจูดอย่างมาก (เช่น เสียงพูด) ค่าควบคุมความเร็ว $a_1(k)$ (Speed control factor) จะวัดค่าการปรับค่าอย่างเร็วและการปรับค่าอย่างช้าเพื่อนำมาสร้างค่าของการจัดระดับ $y(k)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.38 แผนผังการทำงานของวงจรเข้ารหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

วงจรจัดระดับแบบย้อนกลับจะนำสัญญาณ $l(k)$ มาทำการสร้างสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้ว $d_q(k)$ ขึ้นมาใหม่โดยใช้คุณลักษณะของการจัดระดับแบบปรับค่าได้เช่นเดียวกับวงจรจัดระดับในตอนแรก

สัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว $d_q(k)$ จะเข้าสู่วงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้เพื่อทำการสร้างสัญญาณประมาณ $s_e(k)$ ซึ่งจะถูกนำไปรวมกับสัญญาณความแตกต่าง $d_q(k)$ เพื่อสร้างสัญญาณที่กู้กลับคืนมา $s_r(k)$ ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจรถอดรหัส เอาต์พุตนี้จะนำไปหักออกจากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่เข้ามาตัวถัดไป ทำให้เป็นการป้อนกลับที่สมบูรณ์

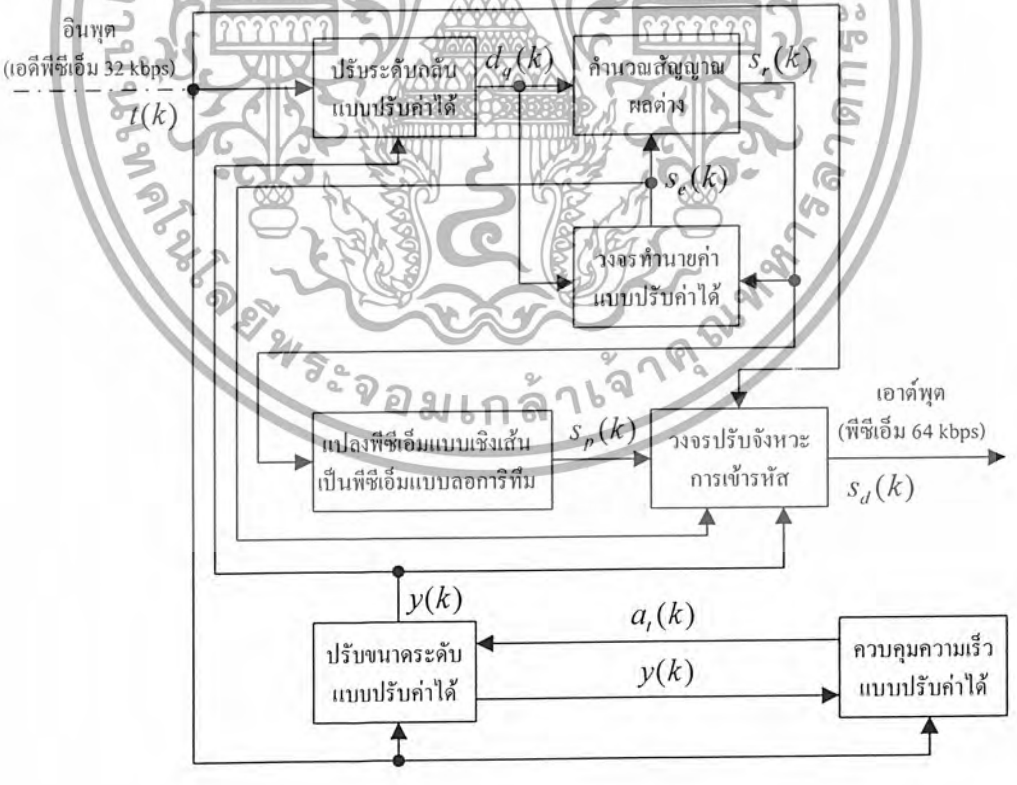
วงจรการทำนายแบบปรับค่าได้นั้นจะใช้ทั้งฟิลเตอร์แบบโพลทั้งหมดและแบบซีโร่ทั้งหมด ฟิลเตอร์แบบโพลทั้งหมดเป็นฟิลเตอร์อันดับสองซึ่งจะบังคับค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับค่าที่ออกแบบมาให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ของเสียงพูด เนื่องจากการทำงานของวงจรทำนายค่าที่ใช้ฟิลเตอร์แบบโพลทั้งหมดจะมีความไวต่อความผิดพลาดจึงนำฟิลเตอร์แบบซีโร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดอันดับ 6 มาใช้ร่วมเพื่อรักษาเสถียรภาพของสัญญาณจากความผิดพลาดของระบบการสื่อสาร

2.6.2 วงจรถอดรหัส

หน้าที่ของวงรถอดรหัสหรือเครื่องรับดังแสดงในรูปที่ 2.39 คือ การรับสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า 32 กิโลบิตต่อวินาที มาแปลงเป็นสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึม 64 กิโลบิตต่อวินาที สัญญาณที่รับมา $I(k)$ จะผ่านวงจรปรับระดับกลับแบบปรับค่าได้ซึ่งเหมือนกับในวงจรเข้ารหัส เมื่อหาสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้ว $d_q(k)$ จากนั้นนำสัญญาณความแตกต่างที่ได้ผ่านเข้าวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้พร้อมกับสัญญาณที่กู้กลับคืนมา $s_r(k)$ ก่อนหน้านี้เพื่อที่จะสร้างสัญญาณประมาณ $s_e(k)$ โดยสัญญาณประมาณนี้จะนำไปรวมกับสัญญาณความแตกต่างเพื่อสร้างสัญญาณที่กู้กลับคืนมา $s_r(k)$ แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้มาทำการแปลงจากสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบเชิงเส้นมาเป็นสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึม $s_p(k)$ ซึ่งจะถูกส่งผ่านเข้าวงจรปรับจังหวะการเข้ารหัส (Synchronous coding adjustment) เพื่อเป็นการจำกัดความผิดพลาด



รูปที่ 2.39 ผังงานการทำงานของวงจรถอดรหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การจัดระดับแบบปรับค่าได้

การจัดระดับแบบปรับค่าได้นี้ใช้การหาค่าของการจัดระดับและค่าควบคุมความเร็ว เพื่อนำมาใช้ควบคุมอัตราเร็วในการปรับค่าของการจัดระดับ การจัดระดับจะเป็นแบบ 4 บิต (บิตเครื่องหมาย 1 บิตและบิตแสดงขนาด 3 บิต) ซึ่งสัญญาณ 4 บิตนี้จะถูกส่งออกเป็นเอาต์พุตของวงจรแปลงรหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ส่วนของวงจรจัดระดับแสดงในรูปที่ 2.38

สัญญาณความแตกต่าง $d(k)$ ซึ่งเป็นอินพุตของการจัดระดับได้มาจากการนำสัญญาณประมาณ, $s_e(k)$ มาหักออกจากสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบเชิงเส้น $s_l(k)$

$$d(k) = s_l(k) - s_e(k) \tag{2.17}$$

สัญญาณความแตกต่างนี้จะถูกปรับค่าด้วยการแปลงเป็นลอการิทึมฐาน 2 และหักออกด้วยค่าของการจัดระดับ $y(k)$

$$|I(k)| \leftarrow \log_2|d(k)| - y(k) \tag{2.18}$$

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะที่ได้จากการจัดระดับ

ย่านการจัดระดับแบบนอร์แมลไลซ์ (อินพุต) $\log_2\|d(k)\| - y(k)$	$\|I(k)\|$	ย่านการจัดระดับแบบนอร์แมลไลซ์ (เอาต์พุต) $\log_2\|d_q(k)\| - y(k)$
(3.15 $-\infty$)	7	3.34
(2.78 3.16)	6	2.95
(2.42 2.78)	5	2.59
(2.04 2.42)	4	2.23
(1.58 2.04)	3	1.81
(0.96 1.58)	2	1.29
(-0.05 0.96)	1	0.53
($-\infty$ -0.05)	0	-1.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดของผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดระดับ $|l(k)|$ โดยใช้อินพุตที่ผ่านการปรับค่านี้ บิตเครื่องหมายของเอาต์พุตการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า $l(k)$ คือเครื่องหมายของสัญญาณความแตกต่าง $d(k)$

ค่าของการจัดระดับ $y(k)$ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ $y_l(k)$ และ $y_u(k)$ ซึ่งได้จากค่าควบคุมความเร็ว $a_1(k)$ สำหรับสัญญาณเสียงพูดค่า $a_1(k)$ จะมีค่าเป็น 1 และสำหรับสัญญาณข้อมูลย่านความถี่เสียง ค่า $a_1(k)$ จะมีค่าเป็น 0

$$y(k) = a_1(k)y_u(k-1) + [1 - a_1(k)]y_1(k) - 1 \quad ;0 \le a_1(k) \le 1 \tag{2.19}$$

ค่า $y_u(k)$ จะสามารถปรับค่าได้อย่างรวดเร็วตามสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (เช่น เสียงพูด) ค่า $y_u(k)$ จะสามารถแสดงได้ในเทอมของค่าของการจัดระดับ $y(k)$ และฟังก์ชั่นเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง $W(l)$

$$y_u(k) = [1 - 2^{-5}]y(k) + 2^{-5}W[l(k)] \quad ;1.06 \le y_u(k) \le 10.00 \tag{2.20}$$

ค่า $W(l)$ ที่แสดงที่ในตารางที่ 2.3 จะเป็นฟังก์ชั่นของ l ซึ่งเป็นเหตุให้ค่า $y_u(k)$ ปรับค่าขนาดระดับขั้นขนาดให้มีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับค่า l ที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งทำให้ค่า $y_u(k)$ เป็นอิสระจากค่าของสัญญาณที่มักเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก

ตารางที่ 2.3 สเกลของตัวคูณ

l	7	6	5	4	3	2	1	0
$W(l)$	69.25	21.25	11.50	6.12	3.12	1.69	0.25	-0.75

ส่วนค่า $y_1(k)$ จะปรับค่าอย่างช้าๆ ตามสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ (เช่น ข้อมูลในย่านความถี่เสียง) ค่านี้จะประกอบด้วย $y_u(k)$ ที่ผ่านการกรองสัญญาณย่านความถี่ต่ำผ่าน ด้วยเหตุนี้ค่า $y_l(k)$ จึงถูกจำกัดค่าให้อยู่ในช่วงเดียวกับ $y_u(k)$ โดยปริยาย นอกจากนี้ค่า $a_1(k)$ ที่มีค่าสูงสุดเป็น 1 ก็จะทำให้ค่าของ $y(k)$ อยู่ในช่วงเดียวกับ $y_l(k)$ และ $y_u(k)$ เช่นกัน

$$y_l(k) = [1 - 2^{-6}]y_l(k+1) + 2^{-6}y_u(k) \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าควบคุมความเร็ว $a_1(k)$ จะปรับค่าตามน้ำหนักของค่าของการจัดระดับทั้ง 2 ค่า โดยการใช้ค่าเฉลี่ยเทอมสั้นและเทอมยาวของเอาต์พุตที่ผ่านการเข้ารหัส $d_{ms}(k)$ และ $d_{ml}(k)$ เพื่อหาความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ผลรวมของค่าของการจัดระดับ $y(k)$ จะมีค่าน้อยกว่า $y_l(k)$ และ $y_u(k)$ เสมอดังนั้นค่า $a_1(k)$ จึงมีค่าสูงสุดที่ 1 เสมอแม้ว่าค่าควบคุมความเร็วทำนายได้ (Predicted speed control) $a_p(k)$ จะมีค่ามากกว่า 1

$$a_1(k) = \begin{cases} 1 & ;a_p(k-1) > 1 \\ a_p & ;a_p(k-1) \le 1 \end{cases} \tag{2.22}$$

ค่า $a_p(k)$ นี้จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2 เมื่อค่าควบคุมความเร็วมาจากการรวมค่าของการจัดระดับ 2 ค่า ที่แต่ละค่ามีค่าเป็น 1 ในการหาค่าของ $a_p(k)$ ในแต่ละครั้งที่ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเทอมสั้นและค่าเฉลี่ยเทอมยาวมีค่ามากเกินไป (เช่น $|d_{ms}(k) - d_{ml}(k)| \ge 2^{-3} d_{ml}(k)$) หรือมีช่องสัญญาณว่าง ($y(k) < 3$) จะมีการบวกค่า 1/8 เพิ่มเข้าไปด้วย

$$a_p(k) = \begin{cases} \left[1-2^{-4}\right]a_p(k-1) + 2^{-3} & ;|d_{ms}(k) - d_{ml}(k)| \ge 2^{-3} d_{ml}(k) \\ \left[1-2^{-4}\right]a_p(k-1) + 2^{-3} & ;y(k) < 3 \\ \left[1-2^{-4}\right]a_p(k-1) & ;\text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \tag{2.23}$$

ค่าเฉลี่ยเทอมสั้นและเทอมยาวของสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าที่ถูกส่งมา $l(k)$ จะสามารถหาได้จากการเฉลี่ยฟังก์ชั่นน้ำหนัก (Weighted function) ของสัญญาณที่ถูกส่งมา l ดังแสดงค่าในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชั่นน้ำหนัก

$\|l\|$	7	6	5	4	3	2	1	0
$F(l)$	7	3	1	1	1	0	0	0

ค่าของการจัดระดับและค่าควบคุมอัตราเร็วจะอยู่ทั้งในส่วนของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสและวงจรถอดรหัสส่วนของการจัดระดับแบบปรับค่าได้นั้นแสดงในรูปที่ 2.38 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรถอดรหัสนั้นวงจรจัดระดับจะอยู่ในส่วนของการปรับจังหวะเพื่อช่วยลดการเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเข้ารหัสอย่างต่อเนื่อง

การจัดระดับแบบปรับค่าได้มี 2 วิธี คือ

1) การจัดระดับแบบไปข้างหน้า (Adaptive quantization with forward estimation)

2) การจัดระดับแบบย้อนกลับ (Adaptive quantization with backward estimation)

1) การจัดระดับแบบไปข้างหน้า

ในแต่ละการสุ่มตัวอย่างสัญญาณอินพุตซึ่งยังไม่ผ่านการจัดระดับ จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าแบบไปข้างหน้า การจัดระดับแบบไปข้างหน้านั้นระดับของสัญญาณข่าวสารจะส่งไปยังวงจรถอดรหัสปลายทาง โดยใช้ 5-6 บิตต่อขนาดของแต่ละระดับ และแปลงให้เป็นข้อมูลข้างเคียงซึ่งเป็นสัญญาณที่จะส่งไปให้ผู้รับ การจัดระดับแบบไปข้างหน้าเป็นวิธีรักษาระดับของแต่ละขั้นในการส่งสัญญาณ เพราะข่าวสารนี้เป็นเพียงส่วนเล็กน้อยของอัตราการส่งทั้งหมด การประมาณแบบนี้จะมีปรากฏอยู่ในการเข้ารหัส การหน่วงเวลาของการเข้ารหัสจะมีค่าประมาณ 16 มิลลิวินาที สำหรับสัญญาณเสียงสุดท้ายการจัดระดับแบบไปข้างหน้าต้องการตัวกั้นกลางสำหรับอินพุตที่ยังไม่ได้มีการจัดระดับ ผลของการจัดระดับแบบไปข้างหน้าจะทำการจัดระดับด้วยตัวของมันเอง

2) การจัดระดับแบบย้อนกลับ

เป็นการนำสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า 4 บิต $l(k)$ มาหาสัญญาณความแตกต่างแบบลอการิทึมจากตารางที่ 2.1 ผลที่ได้คือสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้ว $d(k)$ ซึ่งได้จากการรวมค่าของการจัดระดับ $y(k)$ เข้ากับค่าที่ระบุในตารางที่ 2.2 แล้วนำผลรวมที่ได้มาทำการแปลงลอการิทึมย้อนกลับ

$$d_q(k) = \log_2^{-1}\left[\left\{\log_2\left|d_q(k)\right| - y(k)\right\} + y(k)\right| \tag{2.24}$$

สำหรับทั้งวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้วนั้นจะเป็นอินพุตของวงจรกู้สัญญาณกลับคืนมาและวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.38 และรูปที่ 2.39

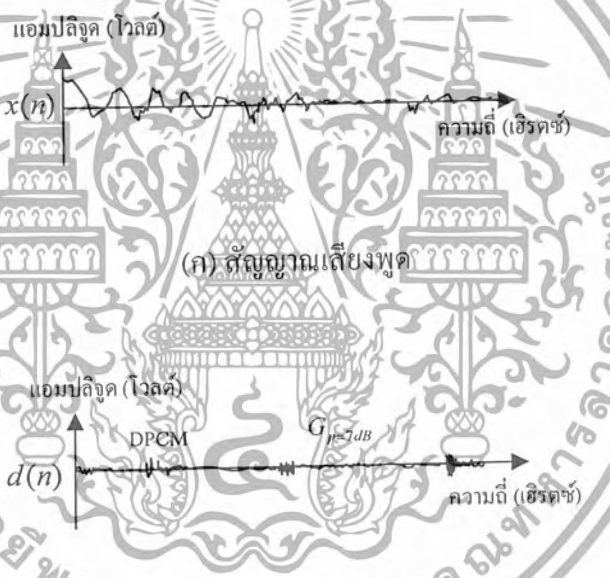
2.6.4 การทำนายค่าแบบปรับค่าได้

ในกระบวนการทำนายค่ามีการทำงานโดยใช้ลำดับการทำนายค่าลำดับ ซึ่งจะกล่าวถึงลำดับ 3 และ 4 อัตราการขยายสูงสุดของการทำนายค่าสัญญาณข้อมูลที่เป็นสัญญาณเสียงพูด 10 เดซิเบล การเข้ารหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง สำหรับสัญญาณเสียงที่มีคุณภาพในระยะทาง

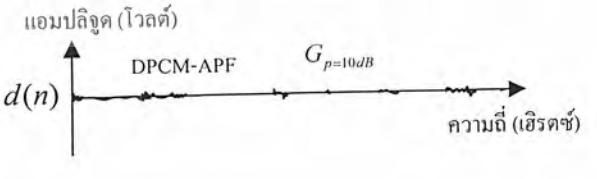
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไกลๆ ด้วยอัตรา R = 4 บิตต่อหนึ่งการสุ่มตัวอย่างซึ่งระบบนี้ขึ้นอยู่กับการทำนายค่าแบบปรับค่าได้ การเข้ารหัสด้วยอัตราการเข้ารหัสต่ำๆ เรียกว่า การเข้ารหัสด้วยการทำนายแบบปรับค่าได้

สัญญาณอินพุตซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามเวลาในกรณีที่เป็นสัญญาณที่ไม่คงที่นำไปสู่ตัวทำนายที่ถูกออกแบบเฉพาะสำหรับสัญญาณอินพุตดังกล่าว การทำนายค่าของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง เนื่องจากความไม่สัมพันธ์กันของภาครับและภาคส่งจะทำเกิดการสูญเสีย ซึ่งอาจแสดงในค่าที่ต่ำกว่าอัตราการขยายของความเป็นไปได้ของการทำนายค่า แสดงว่าการทำนายค่าแบบปรับค่าได้จะมีการสูญเสียน้อยจากรูปที่ 2.40 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณอินพุตที่เข้ารหัสแล้ว $x(n)$ และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d(n)$ ของสัญญาณเสียง ซึ่งจะได้รูปคลื่นที่เปรียบเทียบระหว่างการทำนายที่เป็นแบบปรับค่าได้และปรับค่าไม่ได้



(ข) สัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง



(ค) สัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

รูปที่ 2.40 รูปคลื่นของสัญญาณอินพุตที่เข้ารหัส

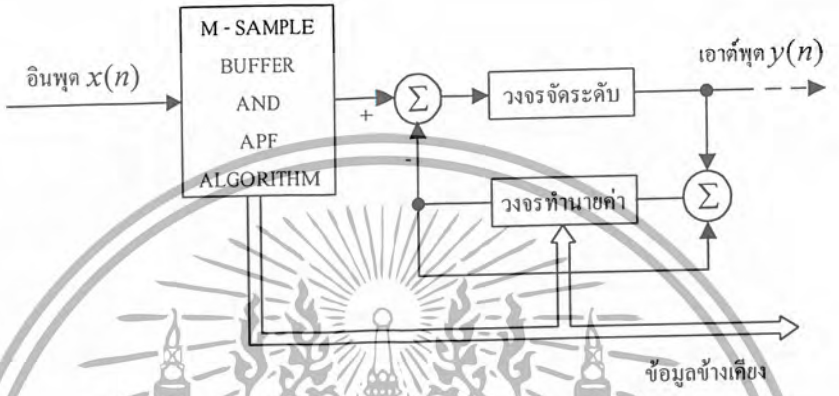
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำนายค่าสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ

1) การทำนายค่าแบบไปข้างหน้า (Forward Adaption : APF)

2) การทำนายค่าแบบย้อนกลับ (Backward Adaption : APB)

1) การทำนายค่าแบบไปข้างหน้า



รูปที่ 2.41 แผนผังการทำงานของการทำนายแบบไปข้างหน้า

จากแผนผังการทำงาน จะเห็นว่าอัตราการขยายของการทำนายที่ให้ค่าสูงๆ จะใช้ฟังก์ชั่นของการทำนายลำดับสูง ลำดับของ N ที่เป็นทางเลือกที่ดีของ N ควรจะสัมพันธ์กับค่าอัตราการขยาย ซึ่งรวมถึงข้อมูลข้างเคียงด้วย สามารถพิจารณาได้ 2 ข้อคือ

1) ความถี่ของการทำนายแต่ละตัวจะต้องเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาก่อนส่ง

2) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอินพุตจะมีสถิติที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

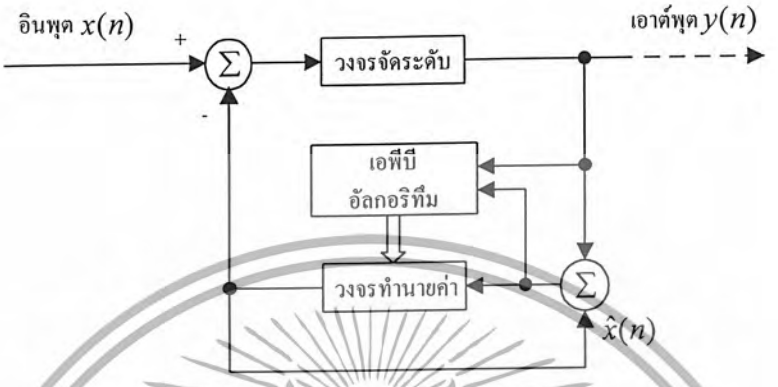
คุณสมบัติโดยทั่วไปของกระบวนการการทำนายค่าแบบไปข้างหน้า จะมีการหน่วงเวลาในการเข้ารหัส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบ

2) การทำนายค่าแบบย้อนกลับ

จากการทำนายค่าแบบไปข้างหน้าซึ่งต้องการช่วงเวลาในการเข้ารหัสข้อมูลกั้นกลาง (Data buffer) และความจุของช่องสัญญาณที่มากเป็นพิเศษสำหรับสัญญาณข้อมูลข้างเคียงความต้องการเหล่านี้อาจไม่สำคัญสำหรับชนิดของการสื่อสารบางอย่าง เช่น ในแพ็คเก็ตสวิตช์เน็ทเวิร์ค (Packet switch network) โดยเฉพาะในกรณีที่หน่วงเวลาและสัญญาณข้อมูลข้างเคียงจะถูกจำกัดอีกทางหนึ่งถ้าสัมประสิทธิ์ของการทำนายสูงสุดสามารถจะประมาณโดยการจัดระดับและส่งข้อมูล $y(n)$ มีความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงข้อมูลตลอดเวลาหรืออย่างบ่อยๆ เท่าที่ต้องการเกิดขึ้น

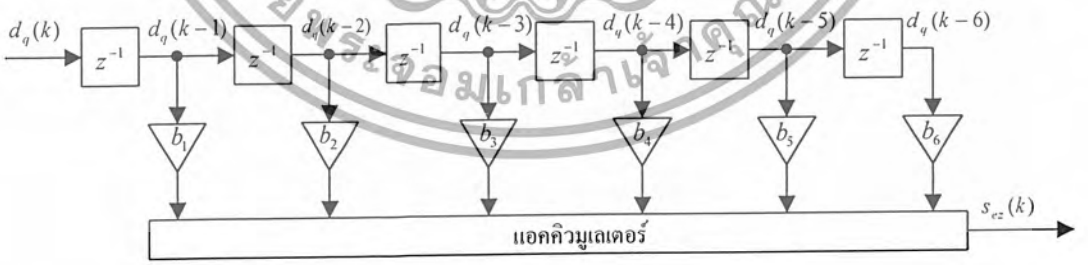
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น เกิดขึ้นทุกการสุ่มอย่างกระบวนการต่างๆ ที่ไม่ซ้ำกันของการทำนายของตัวทำนายเป็นการประมาณค่า



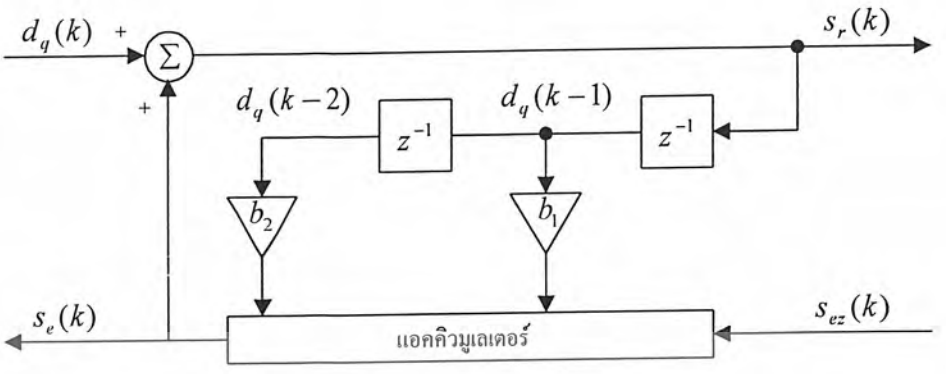
รูปที่ 2.42 แผนผังการทำงานของการทำนายแบบย้อนกลับ

ในการทำงานของการทำนายค่าแบบย้อนกลับนั้น ฟิลเตอร์ที่ใช้ในการทำนายค่า คือ ฟิลเตอร์ชนิด 2 โพล 6 ซีโร่ซึ่งใช้ในการหาสัญญาณประมาณ จากผลรวมของทั้งโพลและซีโร่จะทำให้ฟิลเตอร์มีประสิทธิภาพสูง สำหรับสัญญาณอินพุตปกติใดๆ ส่วนของซีโร่อันดับ 6 จะช่วยรักษาเสถียรภาพของฟิลเตอร์และป้องกันฟิลเตอร์จากการแกว่งของสัญญาณ ค่าสัมประสิทธิ์ของโพล $a_i(k)$ และของซีโร่ $b_i(k)$ จะถูกปรับค่าตามสัญญาณอินพุตที่เข้ามา



รูปที่ 2.43 ฟิลเตอร์อันดับที่ 6 ของฟิลเตอร์ชนิดซีโร่ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.44 ฟิลเตอร์อันดับที่ 2

สัญญาณประมาณ $s_e(k)$ แสดงได้ด้วยผลรวมของฟิลเตอร์ชนิดโพลและฟิลเตอร์ชนิดซีโร่ทั้งหมด เมื่อผลรวมของฟิลเตอร์ชนิดซีโร่ทั้งหมดนำไปช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของโพล โดยแยกไปเป็นค่าผลรวมต่างหาก $s_{ez}(k)$ สัญญาณที่กู้กลับคืนมาใหม่ซึ่งเป็นเอาต์พุตของเครื่องรับสามารถหาได้จากผลรวมของสัญญาณประมาณ $s_e(k)$ และสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้ว $d_q(k)$

$$s_e(k) = \sum_{i=1}^{2} a_i(k-1)s_r(k-i) + s_{ez}(k) \tag{2.25}$$

$$s_{ez}(k) = \sum_{i=1}^{6} b_i(k-1)d_q(k-i) \tag{2.26}$$

$$s_r(k-i) = s_e(k-i) + d_q(k-i) \tag{2.27}$$

การปรับค่าของสัมประสิทธิ์ของโพล $a_i(k)$ แสดงดังสมการข้างล่าง สัญญาณ $p(k)$ คือสัญญาณที่กู้กลับคืนมาลบด้วยค่าที่ได้จากเอาต์พุตของฟิลเตอร์ สำหรับเสถียรภาพของฟิลเตอร์นั้นจะมาจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกจำกัดค่าโดยปริยาย

$$a_1(k) = \left[1 - 2^{-8}\right]a_1(k-1) + 3\times 2^{-8}\,\mathrm{sgn}\left[p(k)\right]\mathrm{sgn}\left[p(k-1)\right] \tag{2.28}$$

โดยที่ $|a_1(k)| \le 1 - 2^{-4} - a_2(k)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_2(k) = \left[1 - 2^{-7}\right] a_2(k-1) + 2^{-7}\left\{\text{sgn}\left[p(k)\right]\text{sgn}\left[p(k-2)\right] - f\left[a_1(k-1)\right]\text{sgn}\left[p(k)\right]\text{sgn}\left[p(k)\right]\right\} \quad (2.29)$$

โดยที่ $|a_1(k) \le 0.75|$

$$p(k) = d_q(k) + s_{ez}(k) \quad (2.30)$$

$$f(k) = \begin{cases} 4a_1 & ;|a_1| \le 1/2 \text{ และ } \text{sgn}(0) = +1 \\ 2\text{sgn} & ;|a_1| > 1/2 \text{ และ } \text{sgn}(0) = +1 \end{cases} \quad (2.31)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ $b_i(k)$ ของฟิลเตอร์ชนิดซีโร่ทั้งหมดอันดับ 6 ขั้นตอนการปรับค่าจะอยู่นำนองเดียวกันแต่ค่าจะถูกจำกัดอยู่ในช่วง ± 2 ซึ่งจะหาค่าได้จากสัญญาณความแตกต่างในปัจจุบัน $d_q(k)$ และสัญญาณความแตกต่างที่สัมพันธ์กับฟิลเตอร์ $d_q(k-i)$

$$b_i(k) = \left[1 - 2^{-8}\right] b_i(k-1) + 2^{-7}\,\text{sgn}\left[d_q(k0\right]\text{sgn}\left[d_q(k)\right] \quad (2.32)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \ldots, 6$ และ $-2 \le bi(k) \le +2$

3) ข้อเปรียบเทียบระหว่างการทำนายค่าแบบไปข้างหน้าและการทำนายค่าแบบย้อนกลับ

การทำนายค่าแบบย้อนกลับจะให้อัตราขยายของการทำนายน้อยกว่าของการทำนายค่าแบบไปข้างหน้าเพียง 1 เดซิเบล ในการทำนายลำดับเดียวกัน ส่วนในการส่งสัญญาณจะมีข้อมูลข้างเคียง (Side Information) รวมอยู่ด้วย ซึ่งในการทำนายค่าแบบไปข้างหน้าจะมีค่าการสูญเสียอัตราส่วนของสัญญาณเสียงต่อสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกันในลำดับเดียวกัน เพราะถ้าความถี่การสุ่มตัวอย่าง 8 กิโลเฮิรตซ์จะมีค่า S/N เป็น 6 เดซิเบล อัตราการส่งของการทำนายค่าแบบย้อนกลับและการทำนายค่าแบบไปข้างหน้าจึงมีลักษณะใกล้เคียงกันและในการทำนายค่าแบบไปข้างหน้าจะให้รูปสัญญาณที่ดีกว่าการทำนายค่าแบบย้อนกลับที่มีอัตราส่งต่ำๆ ซึ่งอัตราขยายของการทำนายค่าแบบย้อนกลับจะถูกจำกัดด้วยปรากฏการณ์ที่เกิดจากการจัดระดับ การออกแบบการทำนายค่าแบบย้อนกลับจะควบคู่ไปกับการจัดระดับแบบย้อนกลับและการเกิดผลของทั้งคู่จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวจัดระดับที่มีคุณภาพและสัมประสิทธิ์การทำนายต้องจำกัดที่ค่า 4 ถึง 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 การแปลงสัญญาณ

การแปลงสัญญาณประกอบด้วยการแปลงจากสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมขนาด 8 บิตเป็นสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบเชิงเส้นขนาด 13 บิต หรือในทางกลับกันในวงจรเข้ารหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึม $s(k)$ จะขยายเพื่อสร้างค่าของสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบเชิงเส้น $s_l(k)$ ส่วนวงจรถอดรหัสจะอัดค่าสัญญาณที่กู้คืนมาได้เป็นสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึม $s_p(k)$

2.6.6 การให้จังหวะสัญญาณที่กู้กลับคืนมา

เพื่อหลีกเลี่ยงการผิดเพี้ยนแบบสะสมในการเข้ารหัสอย่างต่อเนื่อง การปรับในสัญญาณที่กู้คืนมาได้จึงเป็นสิ่งจำเป็น ส่วนของการปรับนี้แสดงในรูปที่ 2.39 มีการประมาณการจัดระดับของวงจรเข้ารหัส โดยการหาสัญญาณความแตกต่างและคำนวณค่าของการจัดระดับ ผลของการจัดระดับจะได้ค่าโดยประมาณของสัญญาณที่ได้รับ $l(k)$

สัญญาณความแตกต่าง $d_x(k)$ หาได้จากการนำสัญญาณประมาณ $s_e(k)$ ไปหักออกจากสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบเชิงเส้น $s_{lx}(k)$ ซึ่งได้มาจากการขยายสัญญาณแบบลอการิทึม $s_p(k)$

$$d_x(k) = s_{lx}(k) - s_e(k) \tag{2.33}$$

ขั้นตอนการจัดระดับจะให้ค่าโดยประมาณของค่าการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า $l_d(k)$ ถ้าค่าประมาณแสดงว่าสัญญาณความแตกต่างมีค่าต่ำกว่าช่วงของระดับที่รับได้ รหัสการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมจะถูกเปลี่ยนเป็นลัดไปที่สูงขึ้น แต่ถ้าแสดงว่าสัญญาณความแตกต่างมีค่าสูงกว่าค่าการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมจะต้องลดลงมาอยู่ในขั้นถัดไปที่น้อยกว่า นอกจากนี้ค่าของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมสามารถอธิบายในรูปของ $s_d(k)$ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$s_d(k) = \begin{cases} s_p^{+}(k) & ; d_x(k) \text{ ค่าขอบล่างของระดับ} \\ s_p^{-}(k) & ; d_x(k) \geq \text{ค่าขอบบนของระดับ} \\ s_p(k) & ; \text{ในกรณีอื่น} \end{cases} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $s_d(k)$ คือ เอาต์พุตการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ของวงจรถอดรหัส

$s_d^+(k)$ คือ ระดับถัดไปของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ที่มีค่าสูงขึ้น (ถ้า $s_p(k)$ เป็นค่าระดับสูงสุดแล้วจะได้ว่า $s_d^+(k) = s_p(k)$)

$s_d^-(k)$ คือ ระดับถัดไปของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ที่มีค่าลดลง (ถ้า $s_p(k)$ เป็นค่าระดับต่ำสุดแล้วจะได้ว่า $s_d^-(k) = s_p(k)$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างวงจรต่างๆ ที่ใช้ในชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ซึ่งแยกออกเป็น 6 ส่วนคือ วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ วงจรซิงโครนัส วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม และวงจรผลิตความถี่คลื่นไซน์ ซึ่งเนื้อหาและรายละเอียดในแต่ละวงจรได้รวบรวมไว้ดังต่อไปนี้

3.1 วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

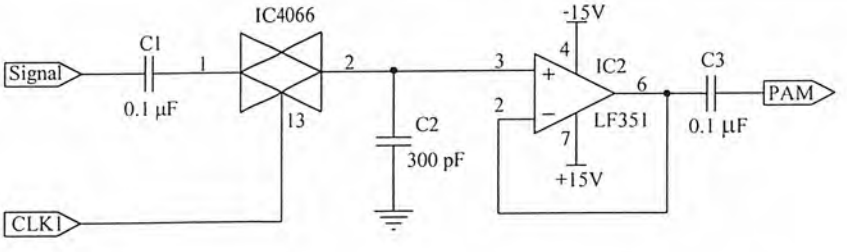
วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ประกอบด้วยวงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล และวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก

3.1.1 วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณ

วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณ เป็นวงจรภาคแรกของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ โดยสัญญาณที่จะนำมาทำการสุ่มตัวอย่างต้องผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน โดยมีรายละเอียดการออกแบบ การสร้างและการทำงานดังนี้

1) การออกแบบและการสร้าง

ในส่วนของวงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณจะประกอบไปด้วยไอซี CD4066 ซึ่งเป็นไอซี Analog Voltage Switch เป็นตัวสุ่มสัญญาณ โดยมีสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวควบคุมสวิตซ์ในการสุ่มและ ไอซี LF351 โดยจะต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ 300 pF เพื่อใช้ในการคงค่าสัญญาณ



รูปที่ 3.1 วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทำงาน

จากรูปที่ 3.1 สัญญาณอินพุตที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะถูกนำมาผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณเอาไว้โดยใช้ไอซี CD4066 ทำการเปิดปิดสวิตซ์ตามสัญญาณที่ขาควบคุมโดยจะนำสัญญาณนาฬิกา CLK1 มาควบคุมการทำงานของสวิตซ์ในไอซี CD4066 เพื่อใช้ในการสุ่ม โดยตัวเก็บประจุ C2 จะทำการคงค่าสัญญาณที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างจากไอซี CD4066 เอาไว้โดยมีไอซี LF351 เป็นบัฟเฟอร์ของวงจรและ C3 เป็นตัวยกระดับสัญญาณที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณก่อนที่จะส่งไปภาคต่อไป

3.1.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล เป็นการนำสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณมาทำการจัดระดับสัญญาณ และนำมาเข้ารหัสเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยมีรายละเอียดการออกแบบ การสร้าง และการทำงานดังนี้

1) การออกแบบและการสร้าง

วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลใช้ไอซี ADC0800 ซึ่งเป็นไอซีเข้ารหัสขนาด 8 บิต ใช้แรงดันอ้างอิงบวก 5 โวลต์และลบ 5 โวลต์ โดยใช้สัญญาณนาฬิกา CKLR ควบคุมการทำงานของไอซี ADC0800

รูปที่ 3.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

2) การทำงาน

การทำงานวงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยไอซี ADC0800 จะรับสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณมาทำการจัดระดับสัญญาณโดยเปรียบเทียบกับแรงดันที่อ้างอิงที่ตั้งไว้ 5 โวลต์ ซึ่งจะทำการเข้ารหัสให้อยู่ในรูปสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

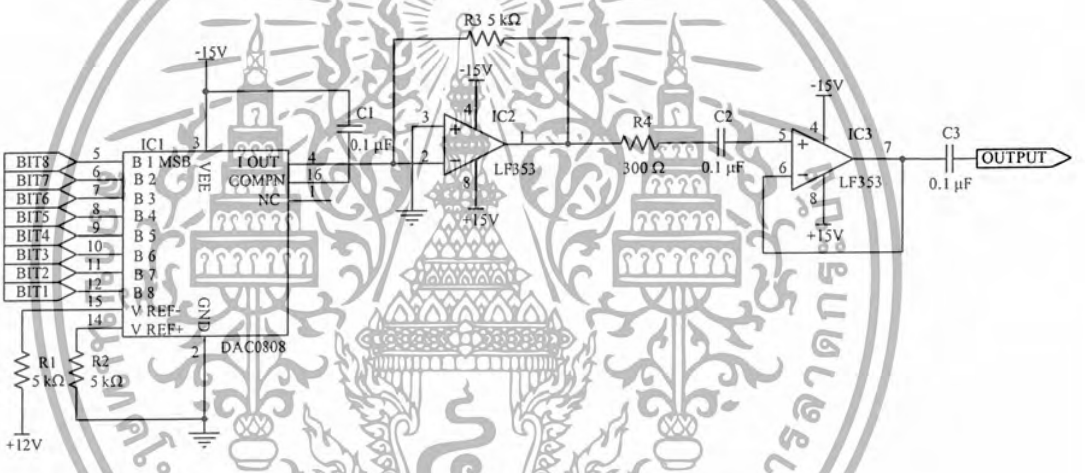
ดิจิตอลออกมาทางเอาต์พุตขนาด 8 บิต โดยมีระดับแรงดันตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์และส่งสัญญาณดิจิตอลไปยังภาคซิงโครนัสต่อไป

3.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก เป็นวงจรที่รับข้อมูลจากวงจรแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นขนานเข้ามาและทำการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก

1) การออกแบบและการสร้าง

จากรูปที่ 3.3 เป็นวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกจะใช้ไอซี DAC0808 ซึ่งไอซี DAC0800 จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก โดยจะต่อใช้งานร่วมกับไอซี LF353



รูปที่ 3.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก

2) การทำงาน

จากรูปที่ 3.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกข้อมูล 8 บิตที่ได้จากการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นขนานที่เข้ามาในอินพุตไอซี DAC0808 จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง 12 โวลต์และจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตของไอซี DAC0808 จะอยู่ในรูปกระแสที่ขา I OUT จึงต้องใช้ออปแอมป์มาต่อใช้ร่วมด้วย เพื่อที่จะเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันแล้วนำสัญญาณแอนะลอกที่ได้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรซิงโครนัส

วงจรซิงโครนัสของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์จะประกอบไปด้วยวงจรซิงโครนัสด้านส่งและซิงโครนัสด้านรับโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1. การซิงโครนัสด้านส่ง

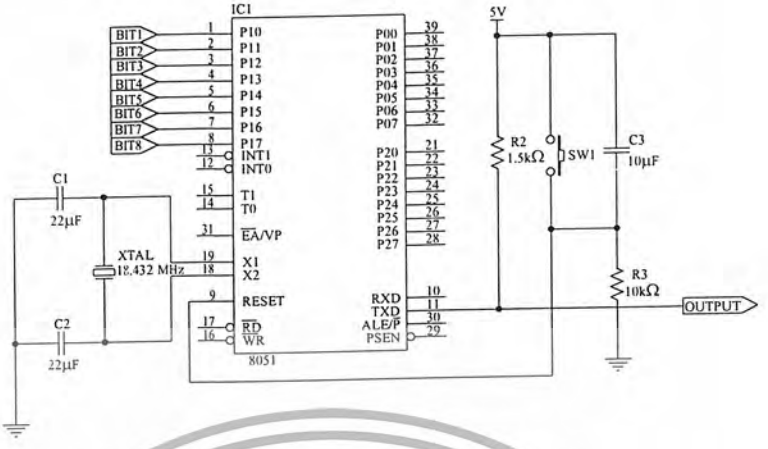
ในการส่งสัญญาณพีซีเอ็มจากด้านส่งไปยังด้านรับนั้นทางด้านรับจะสามารถรับข้อมูลได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อทางด้านรับและด้านส่งมีการทำงานที่เป็นจังหวะเดียวกัน

1) การออกแบบและการสร้าง

วงจรซิงโครนัสด้านส่งนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51 ซึ่งอยู่ในตระกูล MCS-51 ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิตอลจากขนานเป็นอนุกรมเพื่อส่งไปยังด้านรับ ซึ่งหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส โดยทำการแทรกบิตเริ่มต้นจำนวน 1 บิตและบิตจบจำนวน 3 บิตไว้ที่ส่วนต้นและส่วนท้ายของข้อมูลตามลำดับ ก่อนที่จะนำมาใช้งานต้องทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยมีผังการทำงานดังนี้

รูปที่ 3.4 ผังการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรซิงโครนัสด้านส่ง

2) การทำงาน

ในขั้นแรกจะกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพอร์ตอนุกรม (SINIT) จะเป็นการกำหนดอัตราการส่งข้อมูล ซึ่งมีการกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

TMOD : Timer/Counter Mode Control Register ซึ่งมีไทม์เมอร์อยู่ 2 ตัวในกรณีนี้ใส่ค่า #21H ซึ่งเป็นการใช้ไทม์เมอร์ 1 เป็นตัวจับเวลาในโหมดสองซึ่งทำงานเป็น 8 บิตออโต้รีโหลด

THI : 8 Bit Register ทำการป้อนค่า #0FFH เมื่อเกิดการรีโหลดจะโหลดค่านี้เข้าไป

SCON : Serial Port Control Register ทำการป้อนค่า #52H เพื่อให้มีการทำงานเป็น 8 บิต UART และยอมให้มีการรับข้อมูล

PCON : Power Control Register ทำการป้อนค่า #80H เพื่อให้การส่งเป็นแบบทวีคูณของอัตราบอดปกติ

เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นเรียบร้อยแล้วก็พร้อมที่จะทำการส่งข้อมูลเมื่อมีการอินเตอร์รัพต์ด้วยสัญญาณ CLK1

หลังจากทำการเขียนโปรแกรมการทำงานเรียบร้อยแล้ว ลักษณะการต่อใช้งานจะเป็นดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจะมีการใช้คริสตอลที่ 18.432 เมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจะสามารถหาอัตราการส่งข้อมูลได้ดังนี้

$$\text{อัตราการส่งข้อมูล} = \frac{2^{SMOD}}{32} \times \frac{CRYSTAL}{12 \times (256 - TH1)}$$

$$= \frac{2^{SMOD}}{32} \times \frac{18.432MHz}{12 \times (256 - 255)}$$

$$= 96000 \text{ บิตต่อวินาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2. การซิงโครนัสด้านรับ

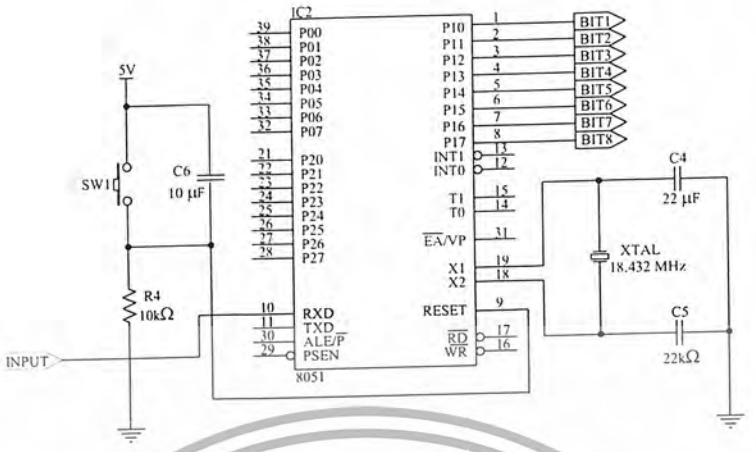
ในส่วนของด้านรับนั้นการซิงโครนัสนั้นได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51 ซึ่งอยู่ในตระกูล MCS-51 มาใช้ในการทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิตอลจากอนุกรมเป็นขนานที่รับมาจากด้านส่ง

1) การออกแบบและการสร้าง

หลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส ซึ่งข้อมูลที่เข้ามาจะมีการแทรกบิตเริ่มต้นจำนวน 1 บิตและบิตจบจำนวน 3 บิตไว้ที่ส่วนต้นและส่วนท้ายของข้อมูลตามลำดับ โดยตรวจหาส่วนที่เป็นบิตเริ่มต้นและบิตจบก่อน เมื่อทำการหาเจอแล้วข้อมูล 8 บิตถัดไปจะเป็นข้อมูลที่ต้องการ และก่อนที่จะนำไปใช้งานนั้นจะต้องทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยมีผังการทำงานดังนี้

รูปที่ 3.6 ผังการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรซิงโครนัสด้านรับ

2) การทำงาน

ในขั้นแรกจะกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพอร์ตอนุกรม (SINIT) จะเป็นการกำหนดอัตราการส่งข้อมูล โดยมีการกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญก็คือจะเหมือนกับด้านส่ง เพื่อให้เกิดการรับส่งข้อมูลที่ตรงกัน โดยจะมีส่วนที่ต่างกันดังนี้

TMOD : Timer/Counter Mode Control Register ซึ่งมีไทม์เมอร์อยู่ 2 ตัวในกรณีที่ใส่ค่า #22H ซึ่งเป็นการใช้ไทม์เมอร์ 1 และไทม์เมอร์ 0 เป็นตัวจับเวลาในโหมดสองซึ่งทำงานเป็น 8 บิตออโต้รีโหลด

TH0 : 8 Bit Register ทำการป้อนค่า #0F4H เมื่อเกิดการรีโหลดจะโหลดค่านี้เข้าไป โดยไทม์เมอร์ 0 ที่ใช้เพิ่มขึ้นมานี้เพื่อที่จะทำการสร้างสัญญาณที่ใช้ในการสุ่มทางด้านรับเมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นเรียบร้อยแล้วก็พร้อมที่จะทำการรับข้อมูลเมื่อมีการรับข้อมูลแบบอนุกรมเข้ามาและเมื่อพบบิต RI เป็นหนึ่งก็จะทำการส่งข้อมูลออกเป็นแบบขนาน 8 บิต นอกจากนี้ยังทำการสร้างสัญญาณที่ใช้ในการสุ่มขึ้นมาให้กับทางด้านรับด้วย หลังจากทำการเขียนโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ลักษณะการต่อใช้งานจะเป็นดังรูปที่ 3.7 จะใช้คริสตอล 18.432 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งต้องเป็นค่าเดียวกับทางด้านส่งเพื่อให้สามารถทำการรับส่งกันได้

3.3 วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง ในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก จะเหมือนกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

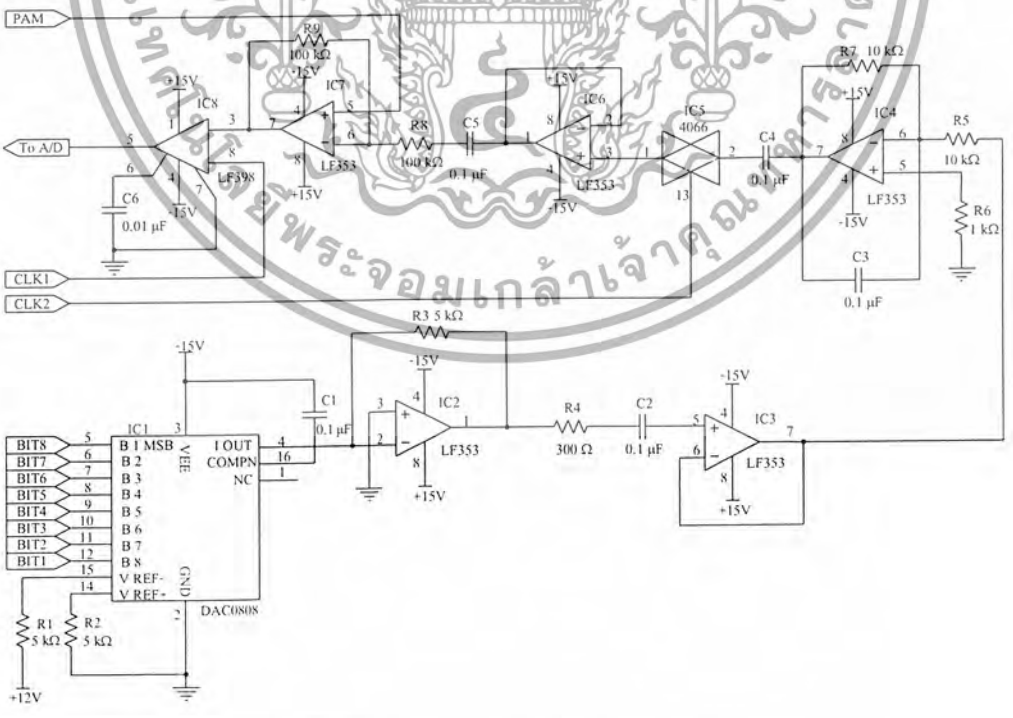
วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ที่เพิ่มเข้ามาคือ วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคเข้ารหัสและวงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัส

3.3.1 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคเข้ารหัส

วงจรทำนายค่าสัญญาณหลักการของการเข้ารหัสแบบดีพีซีเอ็มนั้นมีส่วนที่สำคัญคือการสุ่มค่าและคงสัญญาณใช้ในการเก็บตัวอย่างค่าของสัญญาณแอนะลอกที่เข้ามา ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการสุ่มแล้วจะถูกส่งเข้าไปในส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล และสัญญาณดิจิตอลที่ได้นี้จะถูกป้อนกลับเข้าไปในส่วนของการทำนายค่าสัญญาณ ซึ่งค่าทำนายที่ได้นี้จะถูกนำไปสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยนำสัญญาณตัวเดิมกลับคืนมา เพื่อใช้ในการหาสัญญาณค่าผลต่างกับอินพุตที่เข้ามาใหม่ และสัญญาณค่าผลต่างที่ได้จะนำมาแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งสัญญาณที่ได้คือสัญญาณดีพีซีเอ็ม

1) การออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบและการสร้างวงจรทำนายค่าสัญญาณ หลักการของเข้ารหัสแบบดีพีซีเอ็มจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่จะใช้ในการทำนายค่าสัญญาณของภาคเข้ารหัส ส่วนที่เป็นวงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ส่วนที่สองเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ และส่วนที่สามจะเป็นวงจรสุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทำงาน

จากรูปที่ 3.8 สัญญาณดิจิตอลจะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณแอนะลอกอีกครั้ง โดยใช้ไอซี DAC0808 ร่วมกับไอซี LF353 มาทำการออกแบบร่วมกัน ซึ่งจะพบว่าในการแปลงข้อมูลจากไอซี DAC0808 นั้นจะกลับเฟส 180 องศา กับสัญญาณอินพุตของไอซี ADC0800 และการแปลงกลับนี้จะมีการเลื่อนออกไปเท่ากับค่าเวลาที่ใช้ในการแปลงจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งสัญญาณที่ได้ตรงนี้จะถูกส่งไปยังของวงจรบัฟเฟอร์ โดยใช้ไอซี LF353 และสัญญาณเอาต์พุตจากบัฟเฟอร์นี้จะถูกส่งเข้าไปในส่วนของการทำนายค่าสัญญาณ โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เพื่อให้ได้สัญญาณอินพุตเดิมกลับคืนมา จากนั้นจะนำค่าทำนายที่ได้นี้มาทำการสุ่มอีกครั้งหนึ่งโดยใช้สัญญาณควบคุม CLK2 มาทำการควบคุมการทำงานของไอซี CD4066 ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้เรียกว่าสัญญาณค่าทำนาย

สัญญาณอินพุตที่เข้ามาใหม่นี้จะถูกนำมาหาค่าสัญญาณผลต่างกับสัญญาณค่าทำนายที่ได้โดยใช้ไอซี LF353 มาทำการออกแบบเป็นวงจรขยายผลต่าง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้ามาใหม่กับสัญญาณค่าทำนายแล้วจะพบว่าสัญญาณทั้งสองมีรูปร่างและขนาดที่เท่ากัน แต่สัญญาณอินพุตที่เข้ามาใหม่จะนำหน้าสัญญาณทำนายค่าอยู่ 125 ไมโครวินาที จากสัญญาณค่าผลต่างที่ได้จะนำไปทำการสุ่มและคงค่าสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้สัญญาณควบคุม CLK1 ในการสุ่มและคงค่าสัญญาณนี้ใช้ไอซี LF398 จากนั้นจึงนำไปเข้าตัวแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งสัญญาณดิจิตอลที่ได้ออกมานี้คือสัญญาณดีพีซีเอ็มแล้วจึงนำไปต่อเข้ากับวงจรซิงโครนัสด้านส่ง

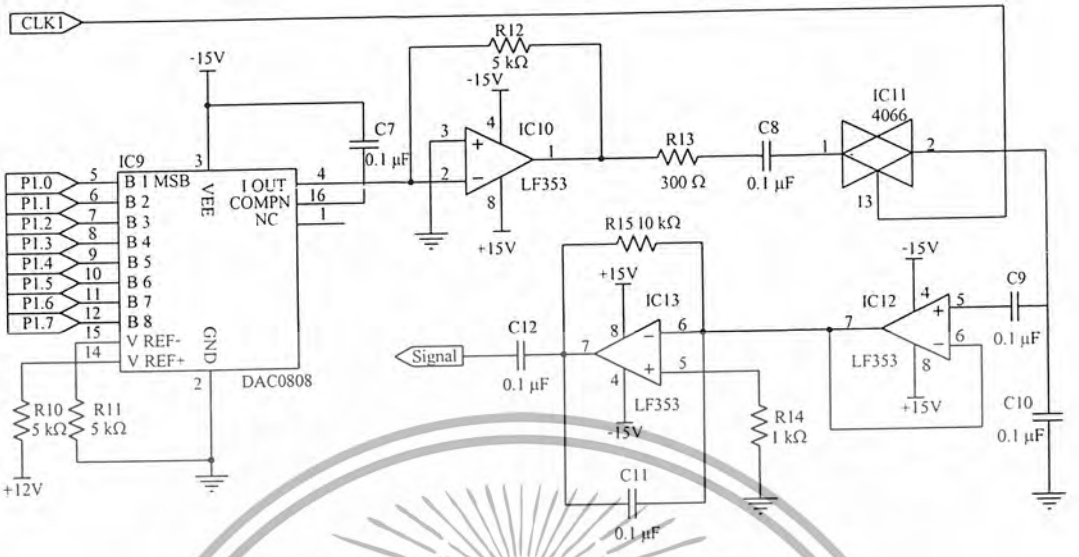
3.3.2 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัส

วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัส ซึ่งหลักการทำงานของภาคการถอดรหัสนั้นจะทำการแปลงข้อมูลสัญญาณดิจิตอลกลับออกมาเป็นสัญญาณแอนะลอก ซึ่งเป็นสัญญาณค่าผลต่าง โดยจะนำสัญญาณค่าผลต่างมาทำการทำนายค่าสัญญาณให้เหมือนกับสัญญาณอินพุตทางด้านเข้ารหัส ซึ่งสัญญาณค่าทำนายจะถูกนำไปผ่านตัวกรองความถี่ผ่าน เพื่อให้ได้รูปร่างสัญญาณที่ดีขึ้น

1) การออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบและการสร้างวงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัสของดีพีซีเอ็มจะใช้หลักการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณแอนะลอก ที่ถูกแปลงจากสัญญาณดิจิตอลแล้วมาทำการสุ่มโดยใช้ไอซี CD4066 และวงจรอินทิเกรเตอร์ซึ่งใช้ไอซี LF353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัส

2) การทำงาน

จากรูปที่ 3.9 เป็นวงจรทำนายค่าสัญญาณภาคถอดรหัสสัญญาณดิจิตอล 8 บิตที่ได้จากวงจรแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นขนานในส่วนของด้านรับจะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณแอนะลอก โดยใช้ไอซี DAC0808 ร่วมกับไอซี LF353 มาทำการออกแบบรวมกัน ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ตรงนี้จะเป็นสัญญาณค่าผลต่าง โดยจะนำสัญญาณค่าผลต่างนี้ไปทำการสุ่มด้วยสัญญาณนาฬิกา CLK1 สัญญาณที่ถูกทำการสุ่มแล้วจะถูกส่งไปยังส่วนของการทำนายค่าสัญญาณ โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เพื่อให้ได้สัญญาณอินพุตเดิมกลับคืนมา จากนั้นจะนำค่าทำนายที่ได้นี้มาทำการผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เอาต์พุตที่ได้นี้จะมีรูปร่างเหมือนกับอินพุตเดิม

3.4 วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

วงจรเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณเอดีพีซีเอ็มนี้ไม่ได้เป็นการเข้ารหัสสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มโดยตรง แต่เป็นการเข้ารหัสโดยการเข้ารหัสให้เป็นสัญญาณพีซีเอ็มเสียก่อนแล้วจึงทำการแปลงสัญญาณพีซีเอ็มเป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มตามที่ต้องการ โดยเลือกไอซี MC145480 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณพีซีเอ็มมาทำงานร่วมกับไอซี MC145532 ซึ่งเป็นไอซีแปลงรหัสสัญญาณพีซีเอ็มเป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มมาใช้ในการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การออกแบบและการสร้าง

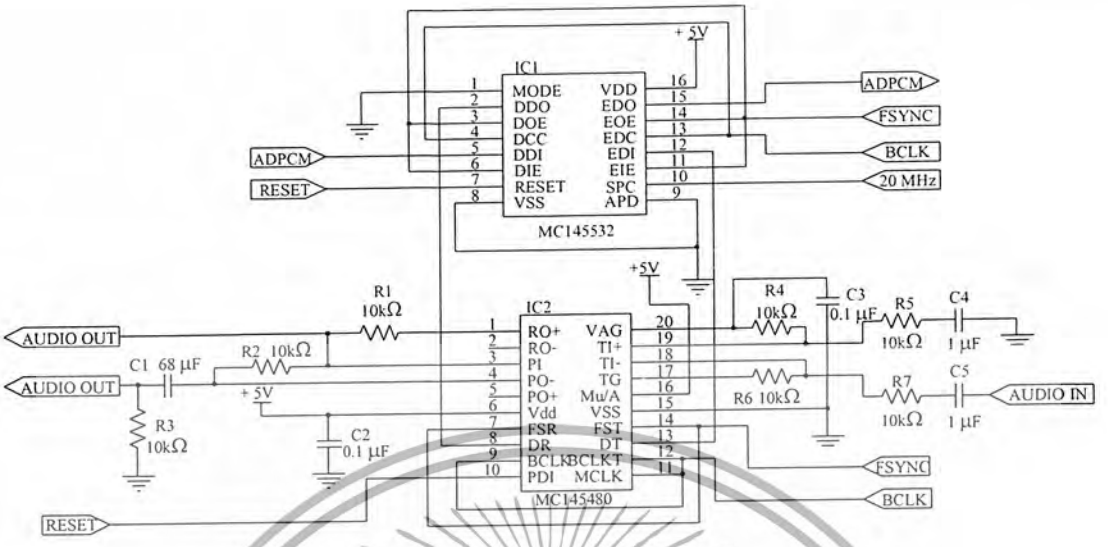
วงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าจะใช้ไอซี MC145480 เป็นตัวเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณพีซีเอ็ม โดยทำการรับสัญญาณเสียงที่อยู่ในช่วงความถี่ 200 ถึง 3400 เฮิรตซ์ มาทำการแปลงสัญญาณพีซีเอ็ม 8 บิตต่อการสุ่มตัวอย่างหรือมีอัตราการส่ง 64 กิโลบิตต่อวินาทีและรับสัญญาณพีซีเอ็มมาทำการถอดรหัสกลับเป็นสัญญาณเสียงสามารถเลือกรูปแบบการคอมแพนดิงได้ระหว่าง A - law และ μ - law โดยในวงจรนี้กำหนดให้มีการคอมแพนดิงแบบ μ - law โดยรูปแบบการรับสัญญาณนาฬิกาจะเป็นแบบช่วงสัญญาณนาฬิกายาว

ไอซี MC145532 เป็นตัวแปลงรหัสสัญญาณพีซีเอ็มเป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มและในทางกลับกัน ซึ่งสามารถที่จะกำหนดอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มให้มีค่าเป็น 16, 24, 32 และ 64 กิโลบิตต่อวินาที โดยการกำหนดความกว้างของสัญญาณ EIE ที่มีความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ ขณะที่มีสถานะสูงโดยเทียบกับจำนวนขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกา EDC

สำหรับวงจรนี้กำหนดให้มีการคอมแพนดิงแบบ μ - law และรูปแบบการรับสัญญาณนาฬิกาจะเป็นแบบช่วงความยาวสัญญาณซิงโครนัส เพื่อที่จะสามารถกำหนดอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มได้ ซึ่งการกำหนดอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม กระทำได้โดยการกำหนดดิปสวิตซ์ในวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ทำการสร้างสัญญาณนาฬิกาต่างๆ ให้ตรงกับเงื่อนไขทั้งหมดที่ได้กำหนดไว้ นอกจากสัญญาณนาฬิกาเหล่านั้นแล้วไอซี MC145532 ยังต้องการสัญญาณนาฬิกา 20 เมกะเฮิรตซ์มาใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาหลักสำหรับวงจรภายในอีกด้วย

เพื่อให้การรับส่งข้อมูลระหว่างไอซี MC145480 และไอซี MC145532 รวมทั้งการรับส่งข้อมูลภายในของไอซี MC145480 และไอซี MC145532 มีความสัมพันธ์กันและถูกต้องจึงกำหนดให้ EDC, DDC ของไอซี MC145532 และ MCLK, BCLKT, BCLKR ของไอซี MC145480 เป็นค่าเดียวกัน โดยอาจมีค่าเป็น 256, 512, 1024 และ 2048 กิโลเฮิรตซ์ การเลือกค่าความถี่นี้สามารถเลือกได้จากวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา EIE, EOE, DIE, DOE ของไอซี MC145532 และ FST, FSR ของไอซี MC145480 เป็นสัญญาณเดียวกัน คือเป็นสัญญาณ 8 กิโลเฮิรตซ์ ที่มีความกว้างของค่าลอจิก 1 ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาและอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่กำหนดโดยการกำหนดดิปสวิตซ์ วงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณเอดีพีซีเอ็มนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของวงจรเข้ารหัสถอดรหัสและส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบเอดีพีซีเอ็ม

3.4.2 การทำงาน

จากรูปที่ 3.10 เป็นวงจรเข้ารหัสและถอดรหัสของวงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าดังได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้วว่าการเข้ารหัสไม่ได้ใช้การเข้ารหัสด้วยการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มโดยตรง ซึ่งเป็นการเข้ารหัสด้วยการเข้ารหัสสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณพีซีเอ็มเสียก่อนแล้วจากนั้นจึงทำการแปลงสัญญาณพีซีเอ็มให้เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มตามที่ต้องการ และในทำนองเดียวกันสำหรับการถอดรหัสจะทำการแปลงสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม ให้เป็นสัญญาณพีซีเอ็มก่อนแล้วจากนั้นจึงทำการถอดรหัสสัญญาณพีซีเอ็มกลับมาเป็นสัญญาณเสียงดังเดิม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวงจรการทำงานในส่วนนี้สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1) การเข้ารหัสสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณพีซีเอ็ม การทำงานขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนแรกของการเข้ารหัสสัญญาณเสียง โดยมีการนำไอซี MC145480 มาใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณพีซีเอ็ม แบบ μ - law ที่มีอัตราการส่งเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาทีในการทำงานจะทำการป้อนสัญญาณเสียงเข้าสู่ขา TG (ขา 17) โดยทำการส่งสัญญาณเสียงผ่านตัวเก็บประจุ เพื่อทำการตัดสัญญาณ DC ออกและจากนั้นสัญญาณจะผ่านตัวต้านทานก่อนผ่านเข้าสู่ขา TG สัญญาณเสียงที่ผ่านเข้าขา TG นี้จะผ่านวงจรกรองความถี่ภายในเพื่อป้องกันการเหลื่อมซ้อนของสัญญาณ และทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ 200 ถึง 3400 เฮิรตซ์ แล้วจึงผ่านเข้าส่วนของการเข้ารหัสเสียงเป็นสัญญาณพีซีเอ็ม ส่งออกที่ขา DT (ขา 13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการส่งสัญญาณพีซีเอ็มออกนั้นการส่งสัญญาณจะเกิดขึ้นที่ค่าลอจิก 1 ของสัญญาณ FST กับสัญญาณ BCLKT โดยขา DT นี้จะอยู่ในสภาวะอิมพีแดนซ์ต่ำเป็นระยะเวลา 8 รอบ ของสัญญาณ BCLKT และการส่งออกของสัญญาณพีซีเอ็มจะเป็นไปตามจังหวะของสัญญาณ BCLKT และเนื่องจากสัญญาณ FST นี้เป็นสัญญาณความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นสัญญาณพีซีเอ็มเอาต์พุตที่ได้จึงเป็นสัญญาณข้อมูลขนาด 8 บิต ที่มีจังหวะการส่งออกตามสัญญาณ BCLKT ทุกๆ ช่วงเวลา 125 ไมโครวินาที นั่นคือเป็นสัญญาณพีซีเอ็มที่มีอัตราการส่ง 64 กิโลบิตต่อวินาที

โดยสัญญาณ FST และสัญญาณ BCLKT นี้ได้มาจากวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป และเพื่อกำหนดให้ไอซี MC145480 ทำการเข้ารหัสเป็นสัญญาณพีซีเอ็ม แบบ μ - law จึงทำการป้อนไฟบวก 5 โวลต์ ให้กับขา Mu/A (ขา 16)

2) การแปลงรหัสสัญญาณพีซีเอ็ม ให้เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการเข้ารหัส ด้วยการนำไอซี MC145532 มาใช้ในการแปลงรหัสสัญญาณ โดยรับค่าสัญญาณพีซีเอ็มที่ส่งออกจากขา DT ของไอซี MC145480 ซึ่งทำการแปลงเป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม ซึ่งสามารถกำหนดอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มให้มีค่าเป็น 64, 32, 24 และ 16 กิโลบิตต่อวินาที ด้วยการเลือกดิปสวิตซ์ที่อยู่ในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา เนื่องจากดิปสวิตซ์จะเป็นตัวกำหนดสัญญาณนาฬิกาให้มีลักษณะตรงกับเงื่อนไขของการกำหนดอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการกำหนดความเร็วนี้ได้แก่ EIE, EOE, DIE และ DOE ซึ่งการทำงานในส่วนนี้นั้นก็ได้กำหนดให้เป็นการเข้ารหัสเป็นแบบ μ - law เช่นเดียวกันกับสัญญาณพีซีเอ็มที่ได้จากไอซี MC145480 ด้วยการป้อนไฟ 0 โวลต์ เข้าที่ขา MODE (ขา 1) และนอกจากนี้ไอซี MC145532 ยังต้องการสัญญาณนาฬิกาความถี่ 20 เมกะเฮิรตซ์ เข้าที่ขา SPC (ขา 10) เพื่อใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาหลักภายในไอซี MC145532 โดยไอซี MC145532 จะทำการรับสัญญาณพีซีเอ็ม 64 กิโลบิตต่อวินาที มาจากไอซี MC145480 เข้าที่ขา EDI (ขา 12) โดยการรับสัญญาณพีซีเอ็มเข้ามายังไอซี MC145532 นั้นจะเริ่มขึ้นที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณ EIE ที่มีความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ และจัดทำการรับสัญญาณพีซีเอ็มตามจังหวะของสัญญาณ EDC เป็นช่วงเวลา 8 รอบ ของสัญญาณนาฬิกา EDC นั่นคือทุกๆ 125 ไมโครวินาที จะรับข้อมูลเข้ามา 8 บิต และจะมีการรับข้อมูลอีกครั้งที่ขอบขาขึ้นครั้งต่อไปจากนั้นสัญญาณพีซีเอ็มที่รับได้จะถูกส่งไปเก็บค่าไว้ในรีจิสเตอร์แบบอนุกรมก่อนที่หน่วยประมวลผลที่อยู่ภายในไอซี MC145532 จะทำการประมวลผลโดยอาศัยหลักการของการจัดระดับแบบปรับค่าได้และการทำนายแบบปรับค่าได้เพื่อแปลงเป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม ซึ่งในขั้นตอนนี้จำนวนบิตของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มต่อสัญญาณพีซีเอ็ม 8 บิต จะมีค่าเป็น 2, 3, 4 และ 8 บิต ตามอัตราเร็วที่ได้กำหนดจากสัญญาณ EIE คือ 64, 32, 24 และ 16 กิโลบิตต่อวินาที สัญญาณเอดีพีซีเอ็มนี้จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์แบบอนุกรมก่อนถูกส่งออกที่ขา EDO (ขา 15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการส่งสัญญาณเอดีพีซีเอ็มออกจากขา EDO นั้นจะมีการส่งออกเมื่อสัญญาณ EOE ซึ่งมีความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าเป็น 1 โดยจะมีการส่งออกตามจังหวะของ EDC เนื่องจากช่วงเวลาที่สัญญาณ EOE มีค่าเป็น 1 จะสัมพันธ์กับจำนวนขอบขาลงของสัญญาณ EDC เช่นเดียวกันกับสัญญาณ EIE ดังนั้นเอาต์พุตของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ได้จึงมีอัตราเร็วในการส่งตรงกับที่ได้ กำหนดไว้ เพื่อให้การรับสัญญาณพีซีเอ็มที่จะทำการเข้ารหัสตรงกับการส่งสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ได้จึงกำหนดให้สัญญาณ EIE และสัญญาณ DIE เป็นค่าเดียวกันและเพื่อให้การรับข้อมูลสัญญาณของไอซี MC145480 จึงให้ FST และ EIE เป็นสัญญาณเดียวกันและสัญญาณ BLCKT และ EDC ให้เป็นสัญญาณเดียวกัน

3) ส่วนของการแปลงสัญญาณเอดีพีซีเอ็มเป็นสัญญาณพีซีเอ็มการทำงานในขั้นตอนนี้จะใช้ไอซี MC145532 โดยทำการป้อนสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ต้องการถอดรหัสเข้าที่ขา DDI (ขา 5) ไอซี MC145532 จะทำการรับข้อมูลเมื่อสัญญาณ DIE มีค่าเป็น 1 ตามจังหวะของสัญญาณนาฬิกา DDC โดยสัญญาณ DIE นี้จะเป็นสัญญาณขนาด 8 กิโลเฮิรตซ์ ที่มีช่วงของสัญญาณที่มีค่าเป็น 1 สัมพันธ์กับอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็มจากนั้นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มจะถูกทำการแปลงกลับเป็นสัญญาณพีซีเอ็มด้วยหน่วยประมวลผลที่อยู่ภายใน MC145532 และส่งออกที่ขา DDO (ขา 2) การส่งจะเริ่มต้นที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณ DOE ตามจังหวะของสัญญาณนาฬิกา DDC เป็นระยะเวลา 8 รอบ สัญญาณนาฬิกา DDC นั่นคือทุกๆ 125 ไมโครวินาที จะได้สัญญาณพีซีเอ็มเอาต์พุตขนาด 8 บิต ส่งออกมาจากขา DDO หรือเป็นสัญญาณพีซีเอ็มที่มีอัตราการส่งเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาที

4) ส่วนของการถอดรหัสสัญญาณพีซีเอ็ม ให้เป็นสัญญาณเสียงการทำงานในส่วนนี้เป็นการทำงานของไอซี MC145480 โดยทำการป้อนสัญญาณพีซีเอ็ม 64 กิโลบิตต่อวินาทีที่ได้จากไอซี MC145532 เข้าที่ขา DR (ขา 8) ซึ่งไอซี MC145480 จะทำการรับข้อมูลพีซีเอ็มด้วยค่าลอจิก 1 ของ FSR และ BCLKR โดยจะทำการรับค่าเป็นช่วงระยะเวลา 8 รอบ ของสัญญาณ BCLKR ซึ่งสัญญาณพีซีเอ็มที่ได้นี้จะถูกส่งเข้าสู่วงจรถอดรหัสโดยจะแปลงสัญญาณพีซีเอ็มเป็นสัญญาณเสียงจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งเข้าสู่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 3400 เฮิรตซ์ เพื่อกรองความถี่สูงที่เกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนออกก่อนที่จะทำการปรับกระแสให้เรียบ เอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณเสียงส่งออกที่ขา RO+ (ขา 1) แล้วทำการขยายสัญญาณที่ได้ด้วยวงจรขยายภายในไอซี MC145480 โดยป้อนสัญญาณเสียงที่เข้าสู่ขา PI (ขา 3) สัญญาณเสียงที่ได้รับการขยายแล้วจะออกที่ขา PO- (ขา 4) สัญญาณที่ได้จะผ่านตัวเก็บประจุเพื่อทำการกำจัดสัญญาณ DC ที่อาจเกิดขึ้นจากการปรับสัญญาณให้เรียบและการขยายสัญญาณสุดท้ายที่ได้หลังจากผ่านตัวเก็บประจุ ทำให้ได้สัญญาณเสียงเอาต์พุตที่แท้จริง

เพื่อให้การรับส่งข้อมูลระหว่างไอซี MC145480 กับไอซี MC145532 ในส่วนการเข้ารหัสนั้นถูกต้องไม่ผิดพลาดและเพื่อให้การทำงานของไอซี MC145532 ในการแปลงสัญญาณเอดีพีซีเอ็มเป็นสัญญาณพีซีเอ็มรวมทั้งเพื่อให้การทำงานของไอซี MC145480 ในการถอดรหัสสัญญาณพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับเป็นสัญญาณเสียงถูกต้อง จึงกำหนดให้สัญญาณ EOE, DOE และ FSR เป็นสัญญาณเดียวกันและสัญญาณ BCLKR และ DDC เป็นสัญญาณเดียวกัน เพื่อให้การทำงานของส่วนเข้ารหัสและส่วนของถอดรหัสทำงานสัมพันธ์กันนั้นจึงกำหนดให้ FST และ FSR ของไอซี MC145480 เป็นสัญญาณเดียวกันกับ EIE, EOE, DIE, DOE ของไอซี MC145532 ส่วน BCLKT และ BCLKR ของไอซี MC145480 เป็นสัญญาณเดียวกันกับ EDC และ DDC ของไอซี MC145532

3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

ในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม เป็นวงจรควบคุมการทำงานของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ โดยมีรายละเอียดการออกแบบ การสร้าง และการทำงานดังนี้

3.5.1 การออกแบบและการสร้าง

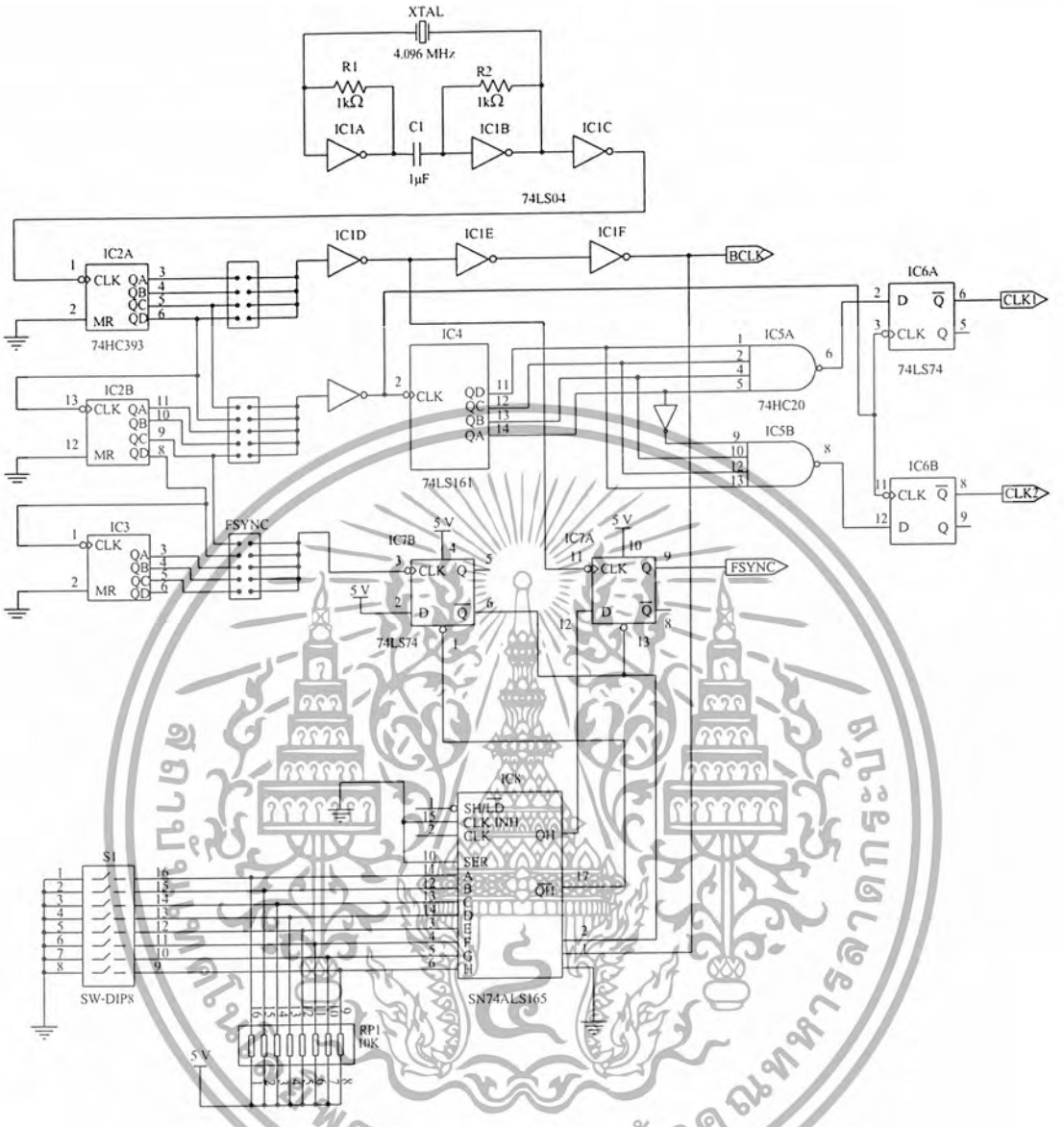
การใช้สัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์จะใช้สัญญาณ CLK1 เป็นสัญญาณในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณให้กับวงจร สัญญาณ CLK2 จะใช้ในการสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณค่าทำนายในวงจรการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง และสัญญาณ BCLK กับ FSYNC จะใช้ในชุดทดลองเอดีพีซีเอ็ม

3.5.2 การทำงาน

วงจรสร้างขึ้นโดยใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 2048 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งสร้างขึ้นจากการนำคริสตอลขนาด 4096 กิโลเฮิรตซ์ต่อเข้ากับเกตอินเวอร์เตอร์เพื่อขับสัญญาณนาฬิกา 4096 กิโลเฮิรตซ์มาต่อกับไอซี 74HC393 ซึ่งจะให้เอาต์พุตเป็นความถี่อินพุตหารด้วย 2^n โดย $n = 1, 2, 3, 4$ จะได้เอาต์พุตเป็น 2048, 1024, 512, 256 และ 128 กิโลเฮิรตซ์และนำความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์ มาต่อเข้ากับไอซี 74HC393 ซึ่งจะได้เอาต์พุตเป็น 128, 64, 32 และ 16 กิโลเฮิรตซ์และนำความถี่ 16 กิโลเฮิรตซ์ มาต่อเข้ากับไอซี 74HC393 อีกครั้ง

ความถี่ที่ได้จากไอซี 74HC393 คือขนาด 2048, 1024 และ 512 กิโลเฮิรตซ์จะนำไปใช้เป็นบิตคล็อก (BCLK) ซึ่งแล้วแต่ว่าจะใช้ความถี่ใดส่วนความถี่เอาต์พุต 2, 4, 8, 16 และ 32 กิโลเฮิรตซ์ จะนำมาใช้ในการสร้างเฟรมซิงโครไนเซชันพัลส์ (FSYNC) โดยเลือกป้อนเข้าขาคล็อกของไอซี 74LS74 ซึ่งเป็น ดี - ฟลิปฟลอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

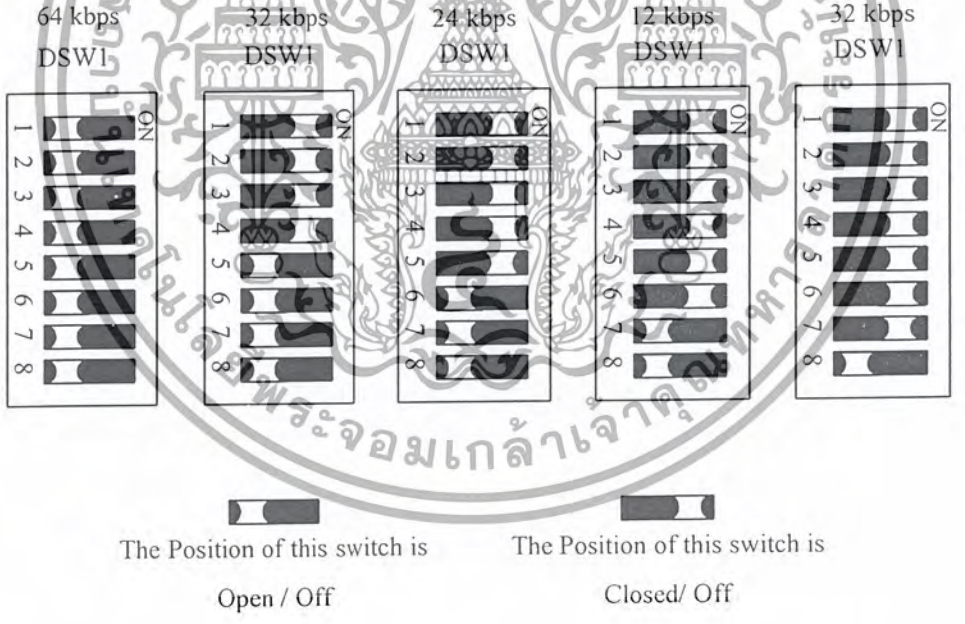
การทำงานของ ดี - ฟลิปฟลอบ จะอาศัยสัญญาณควบคุมมาจากขา QH ของไอซี 74LS165 ซึ่งมีอินพุตเป็นข้อมูลขนานจากดิปสวิตซ์ตามอัตราการเข้ารหัสและถอดรหัสตามต้องการ โดยใช้เอาต์พุตเป็นข้อมูลแบบอนุกรมที่ขา QH ข้อมูลที่ได้จากขา QH จะเป็นข้อมูลของอินพุตดี – ฟลิปฟลอบ ตัวที่ 2 เป็นสัญญาณเฟรมซิงโครไนเซชันพัลส์ โดยถูกสร้างขึ้นให้สามารถเลือกอัตราการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณเอดีพีซีเอ็มได้ตามที่กำหนดของดิปสวิตซ์ ให้เป็นอัตราการเข้ารหัสและถอดรหัสขนาด 32, 24, และ 16 กิโลบิตต่อวินาที และอัตราเข้ารหัสแบบช่วงสัญญาณนาฬิกาสั้นขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32 กิโลบิตต่อวินาที โดยอัตราการเข้ารหัสและถอดรหัสขนาดต่างๆ จะแตกต่างกันตามความกว้างพัลส์ของสัญญาณซึ่งจะมีสัญญาณนาฬิกาเกิดขึ้นเพียงลูกเดียวใน 125 ไมโครวินาที

ส่วนสัญญาณ CLK1 และ CLK2 จะใช้สัญญาณนาฬิกาจากไอซี 74HC393 โดยที่สัญญาณ CLK1 และ CLK2 จะมีลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งจะแตกต่างกันที่ CLK2 จะมาก่อนหน้าสัญญาณ CLK1 และสัญญาณนาฬิกาจากไอซี 74HC393 จะเข้าที่ขาคล็อกของไอซี 74LS161 จะเป็นวงจรหารซึ่งมีเอาต์พุตคือ QA, QB, QC และ QD จะนำสัญญาณที่ขา QA ไปทำการผ่านอินเวอร์เตอร์ไอซี 74LS04 สัญญาณจาก QA ถึง QD จะนำไปเข้าแนนเกตสัญญาณจะมีค่าเป็นหนึ่งจนกระทั่งมีการนับครบสิบห้าแล้วจะได้เอาต์พุตเป็นศูนย์จากนั้นผ่านไอซี 74LS74 แล้วนำเอาต์พุตที่ออกที่ขา $\overline{Q}$ นั่นคือจะสามารถสร้างสัญญาณนาฬิกา CLK2 ที่มีความถี่เท่ากับ CLK1 แต่สัญญาณนาฬิกา CLK2 จะนำหน้า CLK1

สำหรับอัตราการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม ที่กำหนดได้จากดิปสวิตซ์ให้มีขนาด 16, 24, 32 และ 64 กิโลบิตต่อวินาทีแบบช่วงสัญญาณนาฬิกายาวซึ่งจะกำหนดลักษณะของสวิตซ์ได้ตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การกำหนดค่าจากดิปสวิตซ์ที่ใช้ในการกำหนดค่าอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์

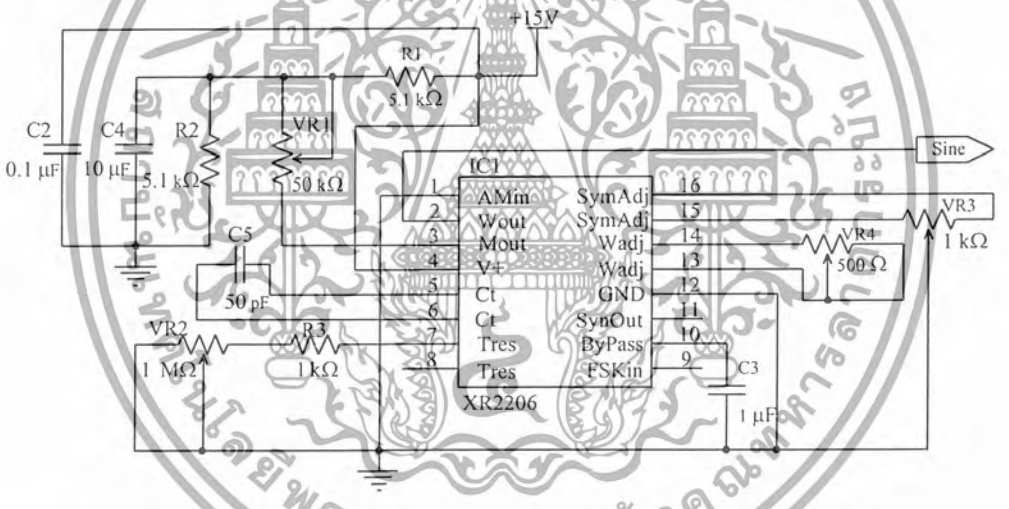
วงจรผลิตความถี่คลื่นไซน์ โดยใช้ไอซี XR2206 ซึ่งเป็นไอซีโมโนลิธิคฟังก์ชั่นเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งมีการออกแบบ การสร้างและการทำงานดังต่อไปนี้

3.6.1 การออกแบบและการสร้าง

จากรูปที่ 3.13 ในการหาค่าความถี่ f จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าตัวต้านทาน R1 โดยในที่นี้จะใช้ค่าที่คำนวณไว้และจะสังเกตได้ว่าขา 7 จะต่อ R3 และ VR2 สามารถหาค่าความต้านทาน เพื่อนำมาหาความถี่เอาต์พุตสูงสุดและความถี่เอาต์พุตต่ำสุดได้จาก fo เท่ากับ $1/RC$

ดังนั้นค่าความถี่เอาต์พุตต่ำสุดที่ได้คือ $fo = \dfrac{1}{(1M\Omega)(0.05\mu F)} = 20$ เฮิรตซ์

และค่าความถี่ที่เอาต์พุตสูงสุดที่ได้คือ $fo = \dfrac{1}{(1k\Omega)(0.05\mu F)} = 20$ กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 3.13 วงจรผลิตความถี่สัญญาณไซน์

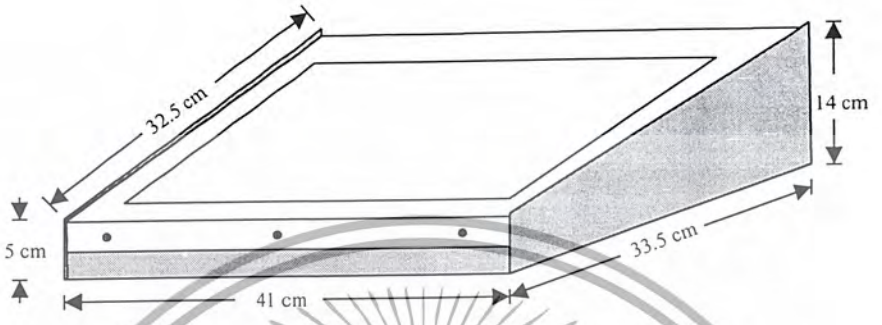
3.6.2 การทำงาน

จากวงจรในรูปที่ 3.13 ตัวต้านทาน VR2 ที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน R3 ที่ขา 7 จะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อปรับความถี่ของสัญญาณที่เอาต์พุตและ VR3 ที่ต่อกับขา 3 จะใช้เป็นตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ เพื่อปรับแอมปลิจูดรูปคลื่นของสัญญาณที่เอาต์พุตให้ตรงกับที่ต้องการมากที่สุด หากสัญญาณที่เอาต์พุตที่ขา 2 มีแอมปลิจูดไม่สมมาตรให้ปรับ VR3 จนกว่าจะได้รูปคลื่นที่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

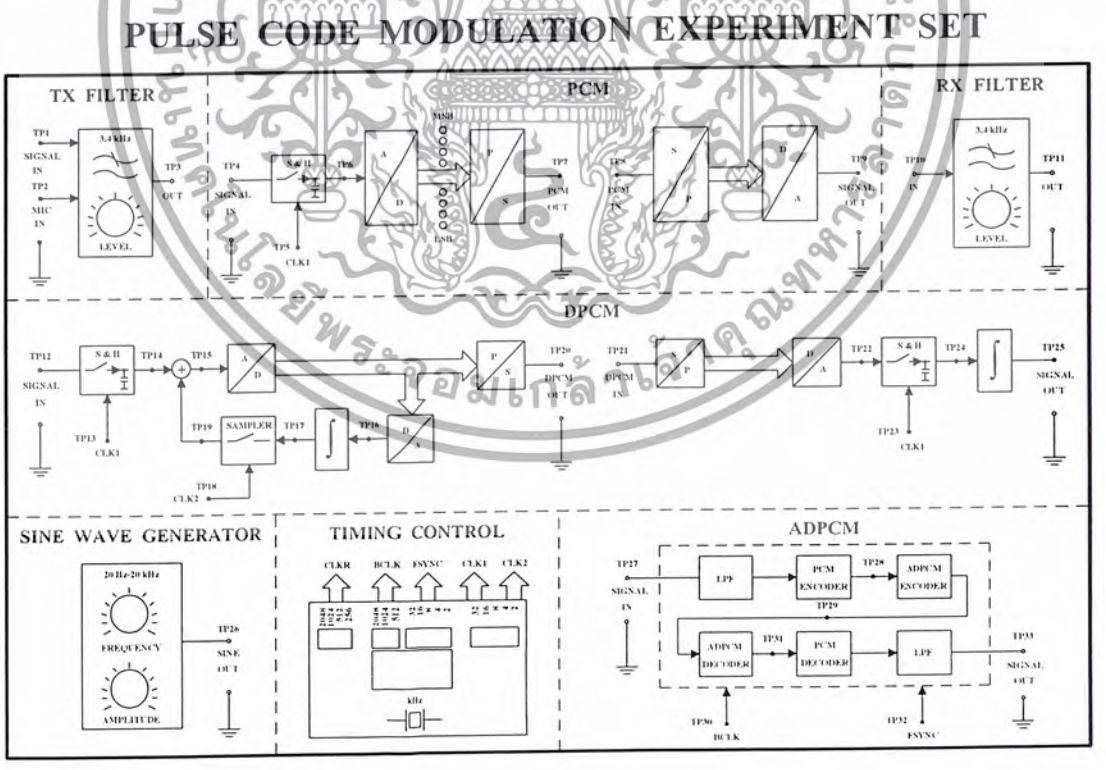
3.7 การออกแบบกล่องและการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ

3.7.1 กล่องชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์



รูปที่ 3.14 ขนาดกล่องชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

3.7.2 หน้าปัดชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์



รูปที่ 3.15 หน้าปัดชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ การทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ การทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง และการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า โดยมีการทดลองและผลการทดลองดังนี้

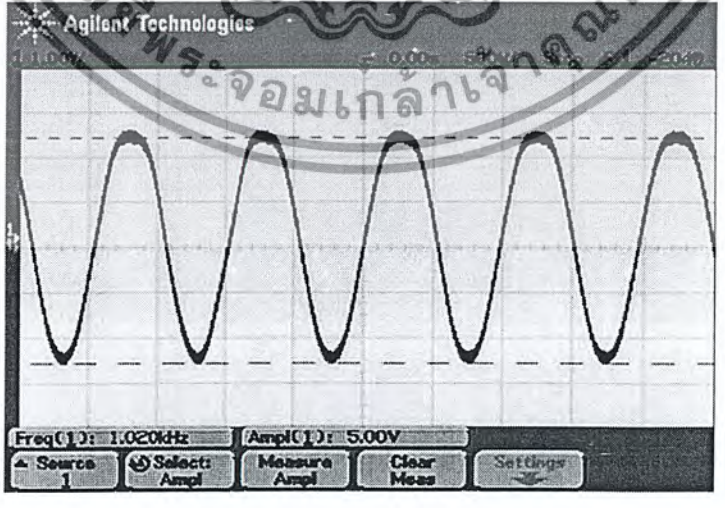
4.1 การทดลองและผลการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

4.1.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{pp} เข้าที่จุด TP4
2) เลือกสัญญาณนาฬิกา CLK1 ที่ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์เข้าที่จุด TP5
3) เลือกสัญญาณนาฬิกา CLKR ที่ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์
4) เชื่อมต่อที่จุด TP7 ไปยังที่จุด TP8 และที่จุด TP9 ไปยังที่จุด TP10
5) ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ และบันทึกผลการทดลอง

4.1.2 ผลการทดลอง

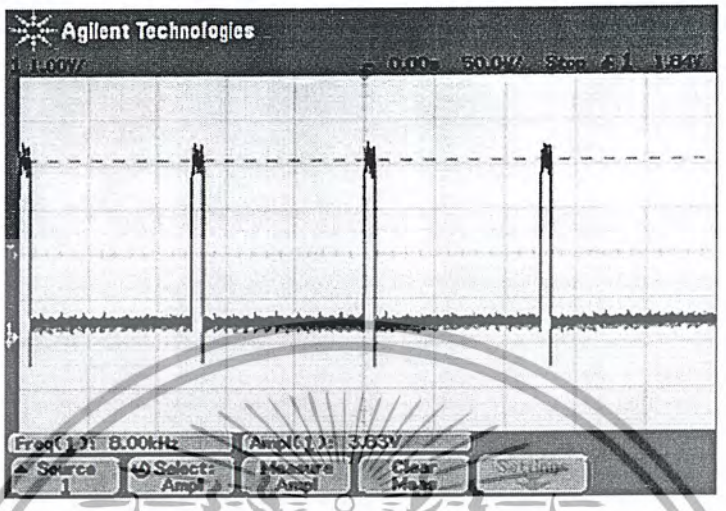
สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{pp} ซึ่งวัดได้ที่จุด TP4 แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ที่จุด TP4

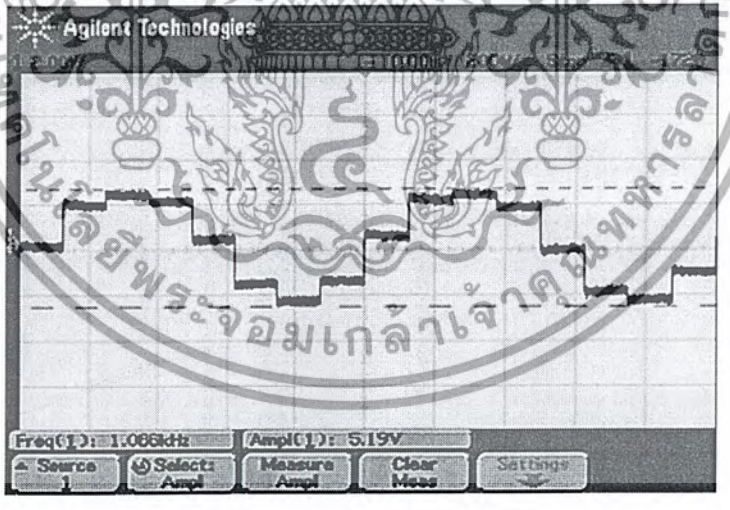
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณนาฬิกา CLK1 ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งวัดได้ที่จุด TP5 แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัญญาณนาฬิกา CLK1 ที่จุด TP5

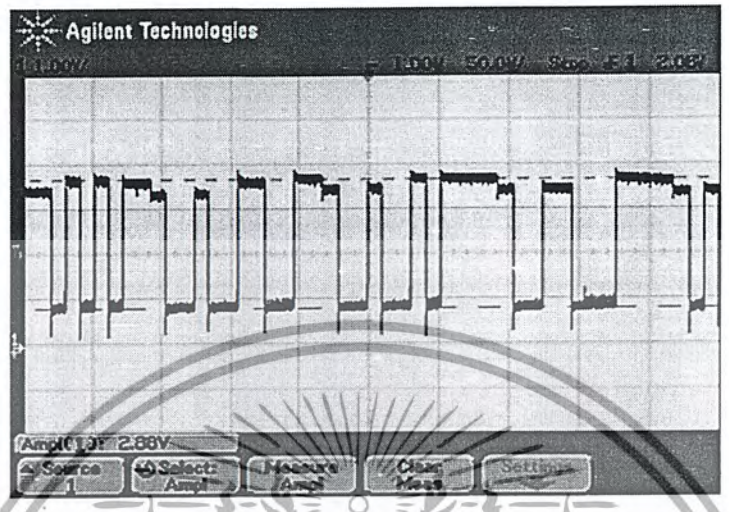
สัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งวัดได้ที่จุด TP6 แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP6

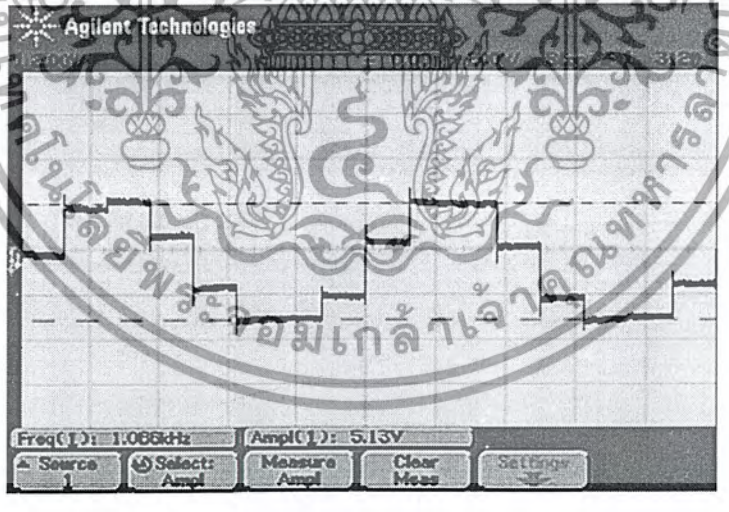
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ซึ่งวัดได้ที่จุด TP7 แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สัญญาณพีซีเอ็มที่จุด TP7

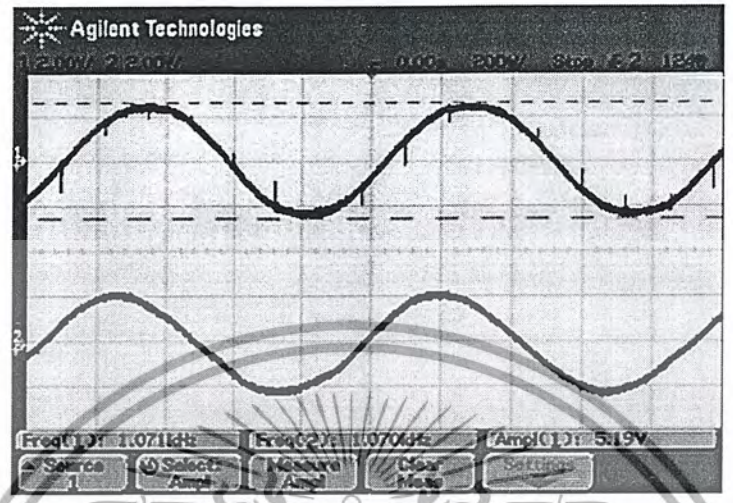
สัญญาณแอนะลอกที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิตอลซึ่งวัดได้ที่จุด TP9 แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สัญญาณแอนะลอกที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิตอลที่จุด TP9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งวัดได้ที่จุด TP4 และที่จุด TP11 แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP4 และที่จุด TP11

4.2 การทดลองและผลการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

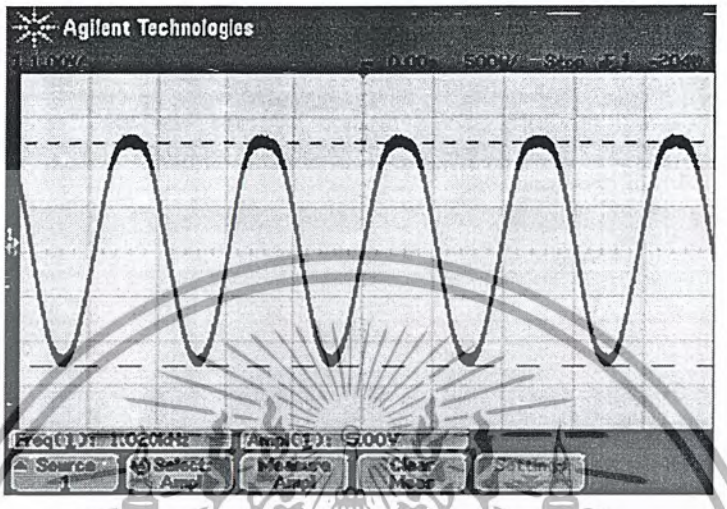
4.2.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} เข้าที่จุด TP12
2) เลือกสัญญาณนาฬิกา CLK1 และ CLK2 ที่ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์เข้าที่จุด TP13 TP18 และ TP23
3) เลือกสัญญาณนาฬิกา CLKR ที่ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์
4) เชื่อมต่อที่จุด TP20 ไปยังที่จุด TP21 และที่จุด TP25 ไปยังที่จุด TP10
5) ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ และบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

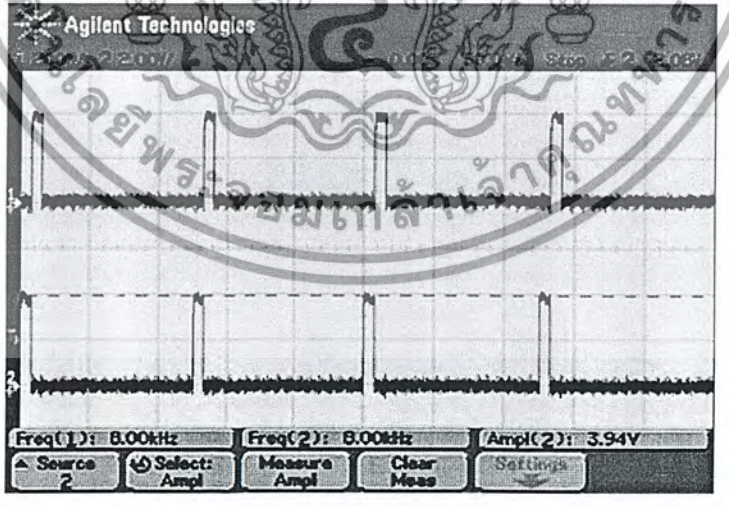
4.2.2 ผลการทดลอง

สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{pp} ซึ่งวัดได้ที่จุด TP12 แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สัญญาณอินพุตคลื่น ไซน์ที่จุด TP12

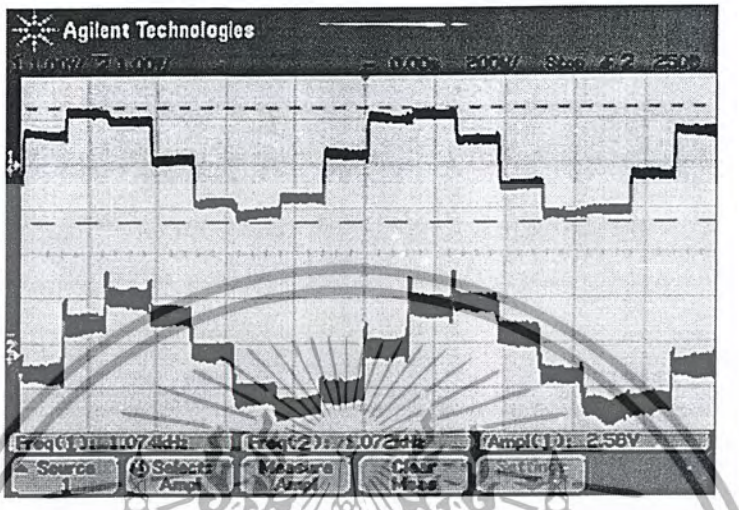
สัญญาณนาฬิกา CLK1 และ CLK2 ที่ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งวัดได้ที่จุด TP13 และที่จุด TP18 แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัญญาณนาฬิกา CLK1 และ CLK2 ที่จุด TP13 และที่จุด TP18

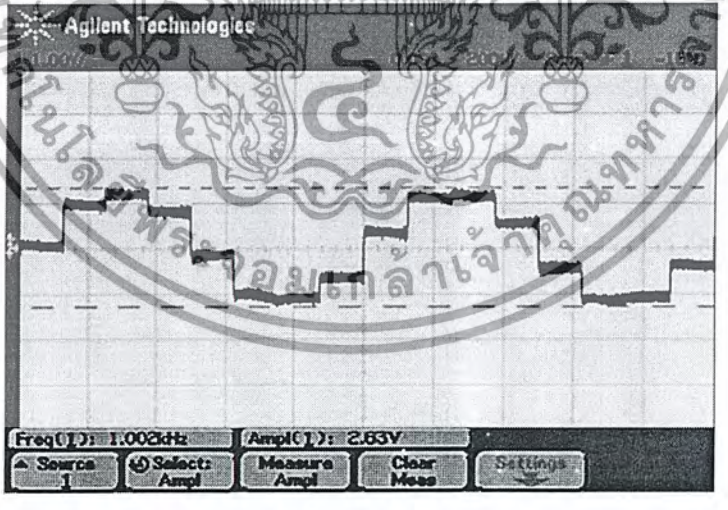
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณกับสัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่ม ซึ่งวัดได้ที่จุด TP14 และที่จุด TP19 แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณกับสัญญาณค่าทำนายที่จุด TP14 และที่จุด TP19

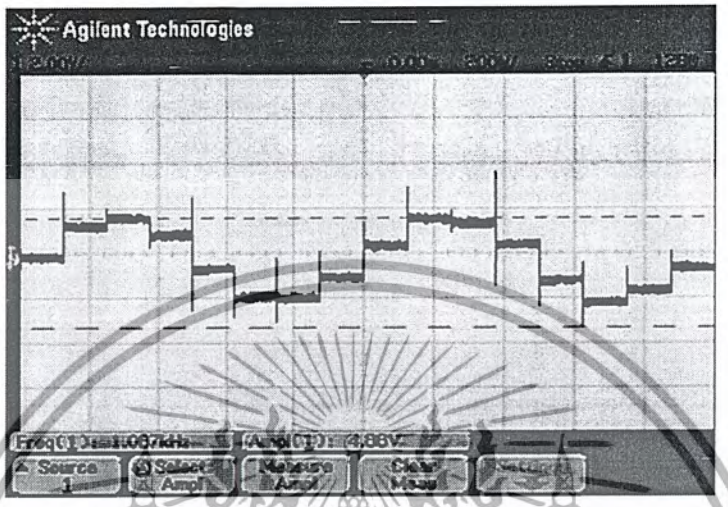
สัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มซึ่งวัดได้ที่จุด TP15 แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สัญญาณค่าผลต่างที่จุด TP15

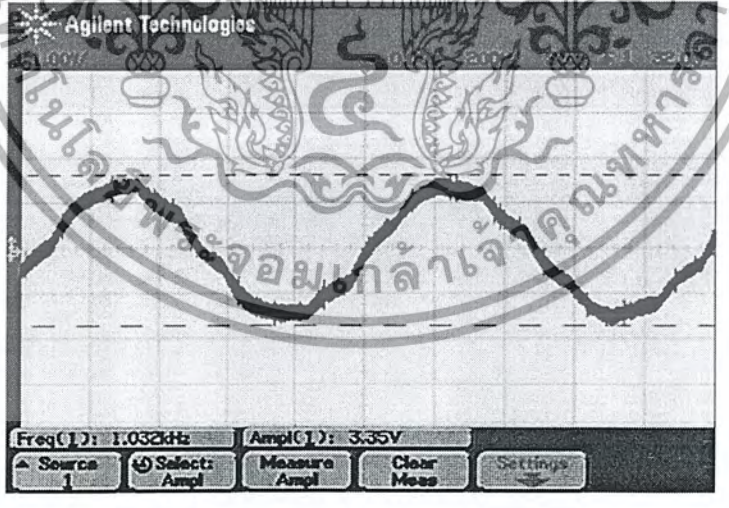
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการแปลงจากสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก ซึ่งวัดได้ที่จุด TP16 แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัญญาณค่าผลต่างที่แปลงจากสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP16

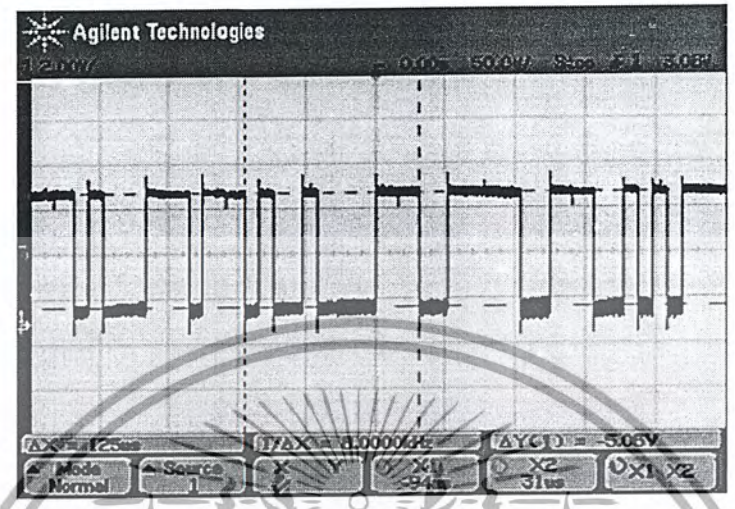
สัญญาณค่าทำนายภาคเข้ารหัสที่ผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ซึ่งวัดได้ที่จุด TP17 แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สัญญาณค่าทำนายภาคเข้ารหัสที่จุด TP17

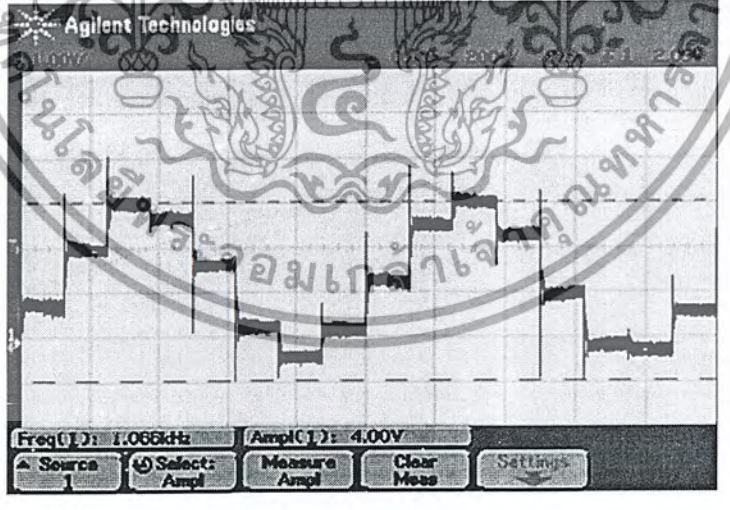
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาต์พุตดีพีซีเอ็มซึ่งวัดได้ที่จุด TP20 แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สัญญาณดีพีซีเอ็มที่จุด TP20

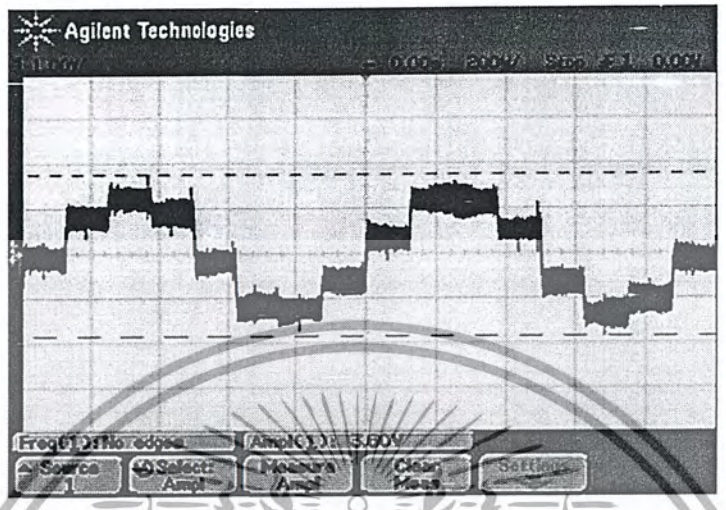
สัญญาณดีพีซีเอ็มที่แปลงเป็นสัญญาณแอนะลอก ซึ่งเป็นสัญญาณค่าผลต่างวัดได้ที่จุด TP22 แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 สัญญาณค่าผลต่างภาคถอดรหัสที่จุด TP22

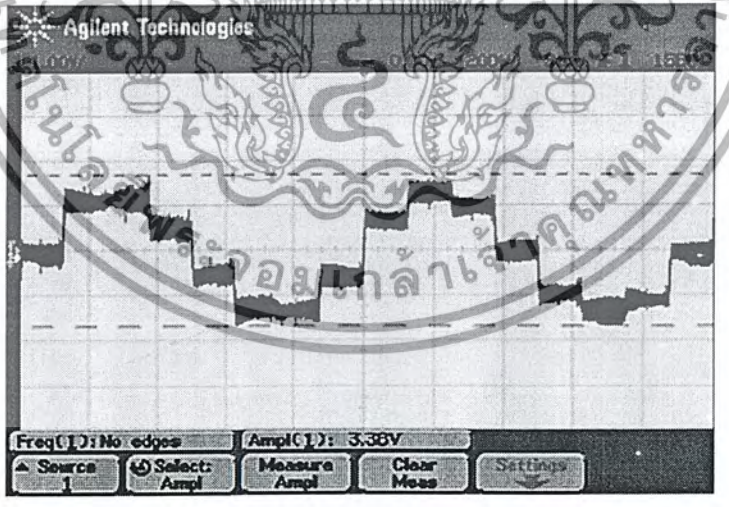
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแอนะลอกภาคถอดรหัสที่ผ่านการสุ่มสัญญาณ ซึ่งวัดได้ที่จุด TP24 แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 สัญญาณแอนะลอกภาคถอดรหัสที่ผ่านการสุ่มสัญญาณที่จุด TP24

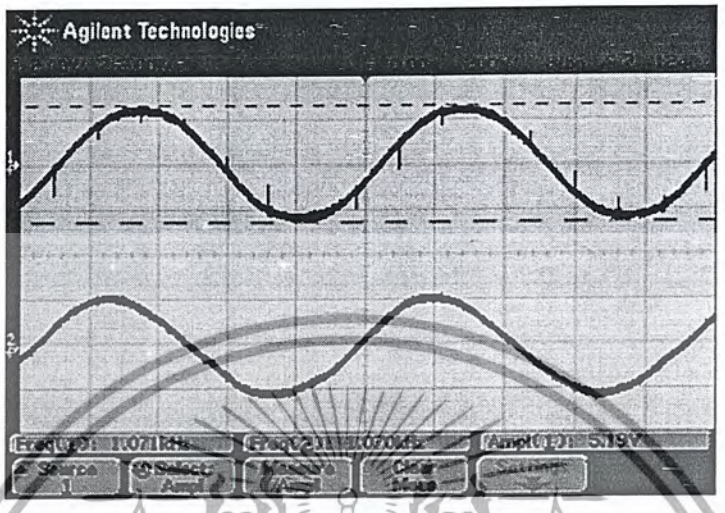
สัญญาณค่าทำนายภาคถอดรหัส เป็นการถอดรหัสสัญญาณเดิมกลับมาซึ่งเหมือนกับสัญญาณที่ภาคเข้ารหัส ซึ่งวัดได้ที่จุด TP25 แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 สัญญาณค่าทำนายภาคถอดรหัสที่จุด TP25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตซึ่งวัดได้ที่จุด TP12 และที่จุด TP11 แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 สัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP12 และที่จุด TP11

4.3 การทดลองและผลการทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

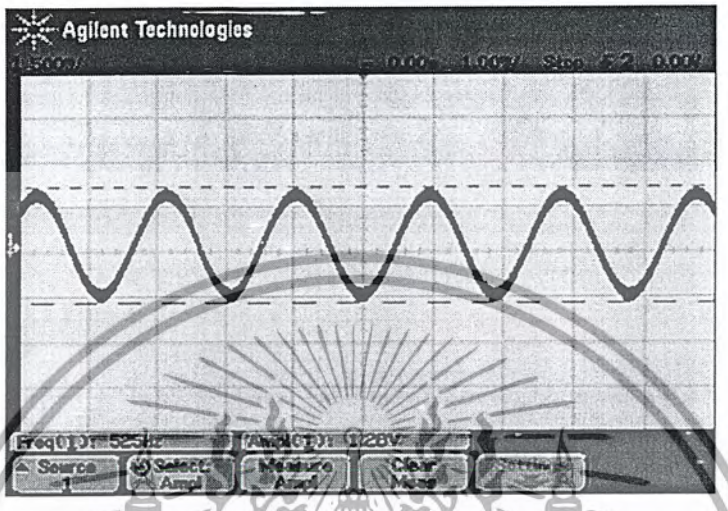
4.3.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 500 เฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} เข้าที่จุด TP27
2) เลือกความถี่ BCLK ที่ความถี่ 2048 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30
3) เลือกความถี่ FSYNC ที่ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32
4) ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ และบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

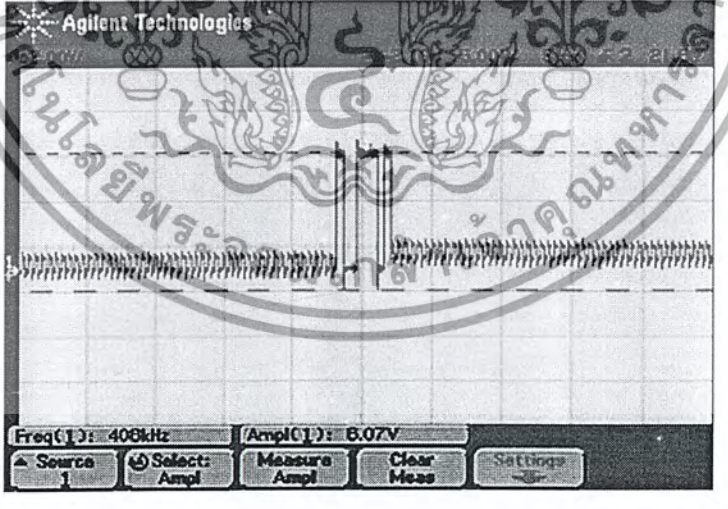
4.3.2 ผลการทดลอง

สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ความถี่ 500 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งวัดได้ที่จุด TP27 แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 สัญญาณอินพุตคลื่นไซน์ที่จุด TP27

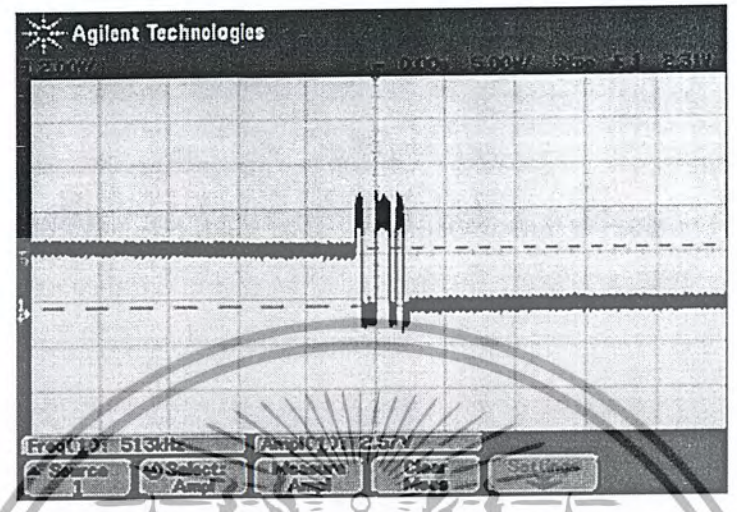
สัญญาณเอาต์พุตพีซีเอ็มภาคเข้ารหัสซึ่งวัดได้ที่จุด TP28 แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุตพีซีเอ็มภาคเข้ารหัสที่จุด TP28

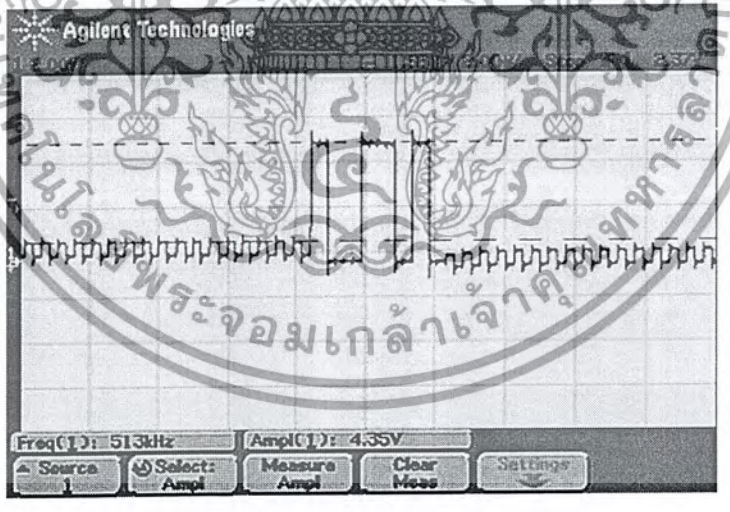
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาต์พุตเอดีพีซีเอ็มภาคเข้ารหัสซึ่งวัดได้ที่จุด TP29 แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 สัญญาณเอาต์พุตเอดีพีซีเอ็มภาคเข้ารหัสที่จุด TP29

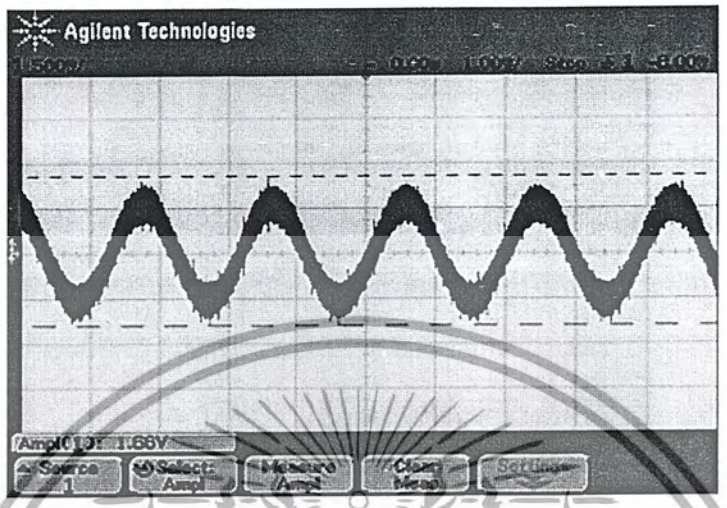
สัญญาณเอาต์พุตพีซีเอ็มของภาคถอดรหัสเอดีพีซีเอ็มซึ่งวัดได้ที่จุด TP31 แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 สัญญาณเอาต์พุตพีซีเอ็มของภาคถอดรหัสเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตของภาคภาคถอดรหัสซึ่งวัดได้ที่จุด TP33 แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุป

ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ประกอบด้วยชุดทดลอง 3 ส่วนคือ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ชุดทดลองนี้มีผังการทำงาน ใบงาน และคำถามที่สอดคล้องเหมาะสมเกี่ยวกับการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ทดลองสามารถเข้าใจและง่ายต่อการจดจำ

การหาคุณภาพของชุดทดลอง โดยการนำแบบแสดงความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิด้านเทคนิคการผลิตสื่อ มีความพึงพอใจต่อชุดทดลองอยู่ในระดับดีมากและแบบแสดงความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิด้านวิชาการที่มีต่อชุดทดลองและใบงานการทดลองมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

จากการดำเนินการสร้างและทดสอบโครงงานพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหลายประการ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. **ปัญหา** วงจรสุ่มตัวอย่างและคงค่าสัญญาณที่ใช้ไอซีโมโนสเตเบิล ออกแบบได้ยากและมีความไวในการทำงานต่ำ

แนวทางแก้ไข ใช้ไอซีแอนะลอกสวิตซ์แทนซึ่งมีการออกแบบที่ง่าย และมีความไวในการทำงานดีกว่าไอซีโมโนสเตเบิล

2. ปัญหา ในการแปลงข้อมูลขนานเป็นอนุกรมและอนุกรมเป็นขนานที่ใช้ไอซีตระกูลทีทีแอลจำนวนบิตข้อมูลที่ส่งไม่สมบูรณ์ จึงทำให้สัญญาณที่ได้เกิดการผิดเพี้ยนและการออกแบบวงจรต้องใช้ไอซีจำนวนมาก

แนวทางแก้ไข ใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ควบคุมการแปลงข้อมูลขนานเป็นอนุกรมและอนุกรมเป็นขนาน

3. ปัญหา ข้อมูลของอุปกรณ์เกี่ยวกับภาคการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณพีซีเอ็มหาได้ยากรวมทั้งอุปกรณ์ขาดตลาด

แนวทางแก้ไข ค้นหาแหล่งข้อมูลจากหลายสถานที่และศึกษาการทำงานของอุปกรณ์จนเข้าใจเพื่อที่จะนำอุปกรณ์ที่สามารถทำหน้าที่แทนมาใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปัญหา เนื่องจากวงจรที่ใช้งานจะต้องใช้งานกับความถี่ จึงทำให้การหาซื้ออุปกรณ์ที่มีคุณภาพได้ค่อนข้างยากและมีราคาแพง

แนวทางแก้ไข หาอุปกรณ์ที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ โดยที่เป็นอุปกรณ์ที่ราคาไม่แพงมาก ซึ่งสอบถามราคาจากหลายๆ ร้าน

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ชุดทดลองนี้สามารถที่จะพัฒนาเพิ่มเติมให้วัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจัดระดับสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการส่งสัญญาณได้ เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

2. ชุดทดลองนี้สามารถออกแบบเพิ่มเติม ให้ใช้ร่วมกับการมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลกับคลื่นพาห์แบบ ASK FSK และ PSK ได้

3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบีบอัดข้อมูลที่มีความซ้ำและจำนวนมากในระบบการสื่อสารต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ถวิล กิ่งทอง. **เทคโนโลยีการส่งสัญญาณดิจิตอล**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535

วิวัฒน์ กิรานนท์. **วิศวกรรมการสื่อสาร**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540

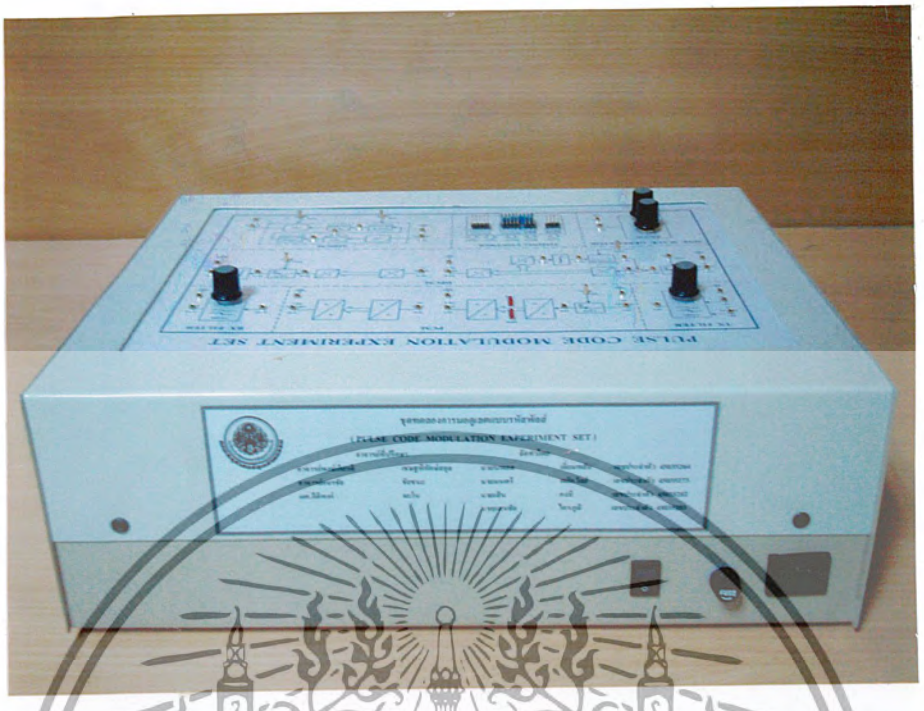
วิวัฒน์ กิรานนท์. **พื้นฐานการสื่อสาร**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
เครื่องต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 ภาพด้านบนของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

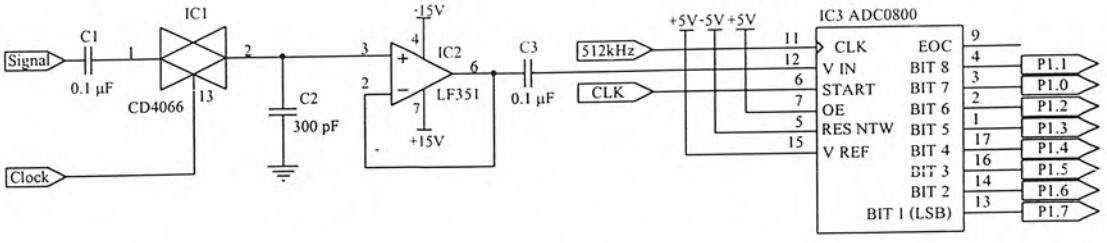
รูปที่ ก.2 ภาพด้านหน้าของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

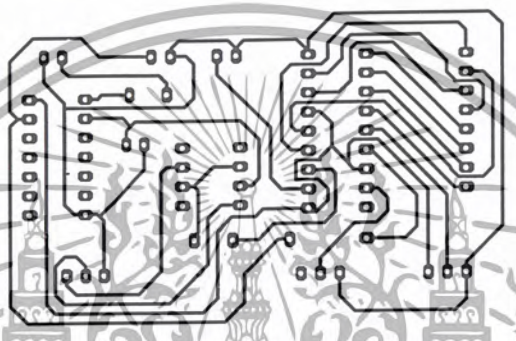
ภาคผนวก ข

วงจรและแผ่นวงจรพิมพ์

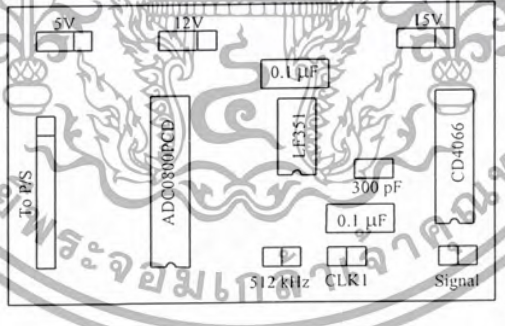
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคเข้ารหัส

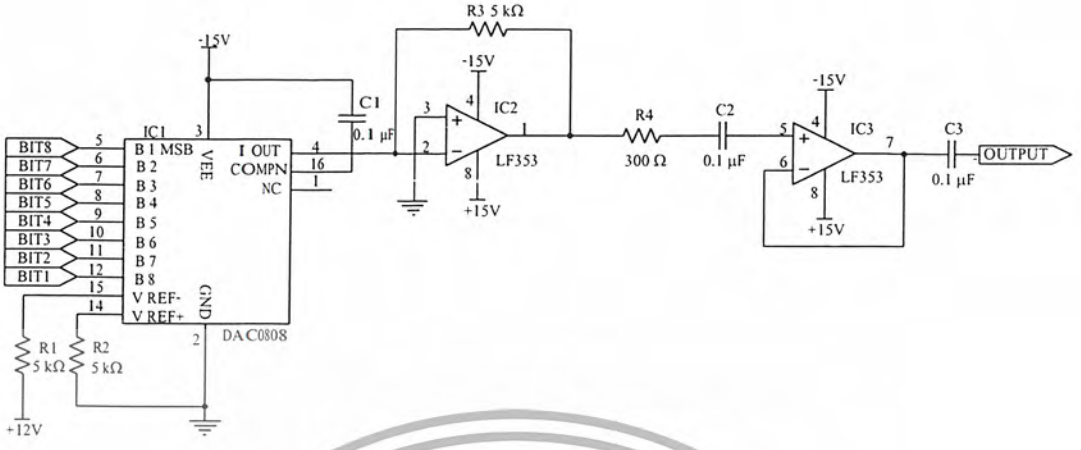


รูปที่ ข.2 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคเข้ารหัส

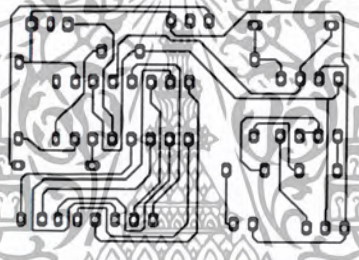


รูปที่ ข.3 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคเข้ารหัส

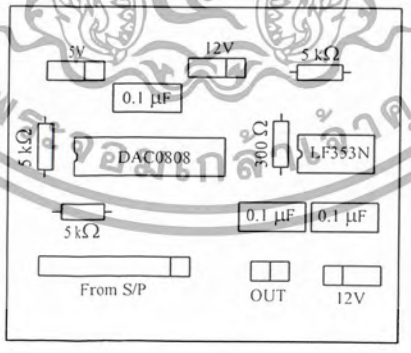
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคถอดรหัส

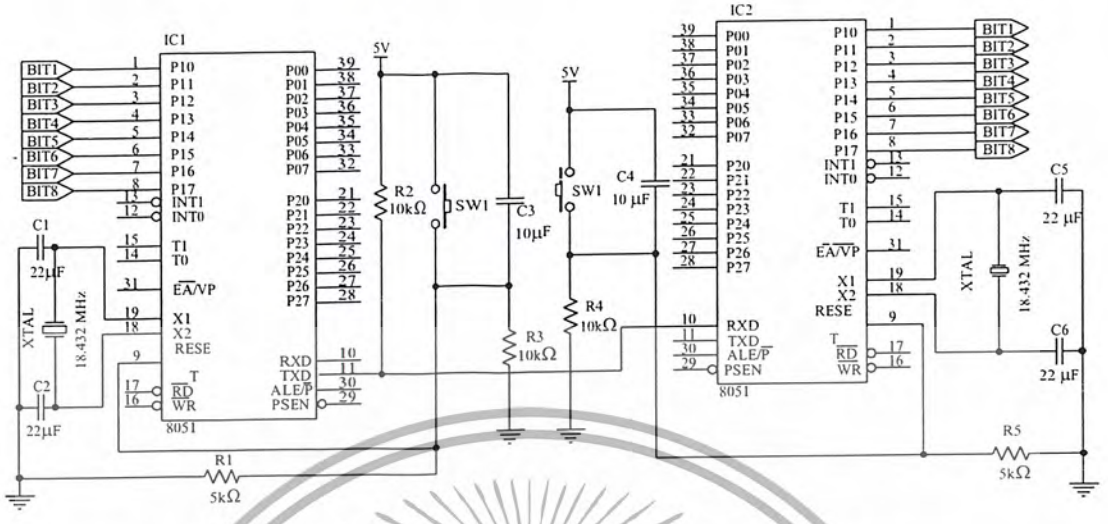


รูปที่ ข.5 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคถอดรหัส

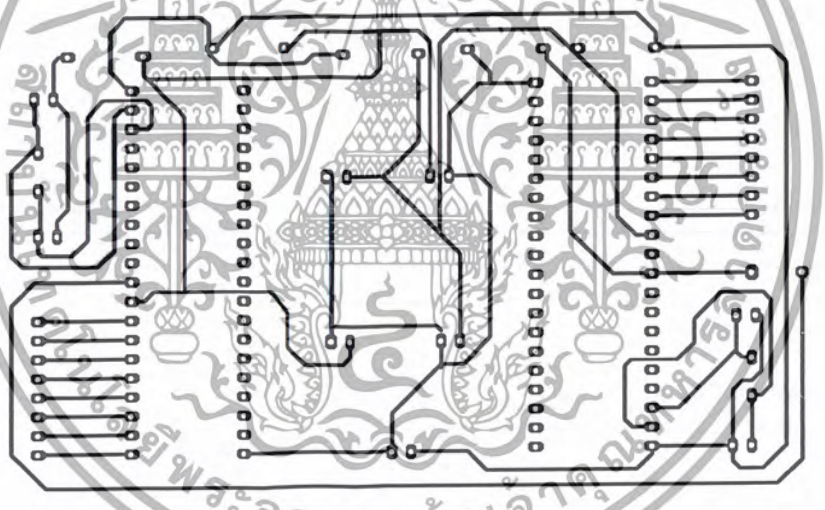


รูปที่ ข.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ภาคถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

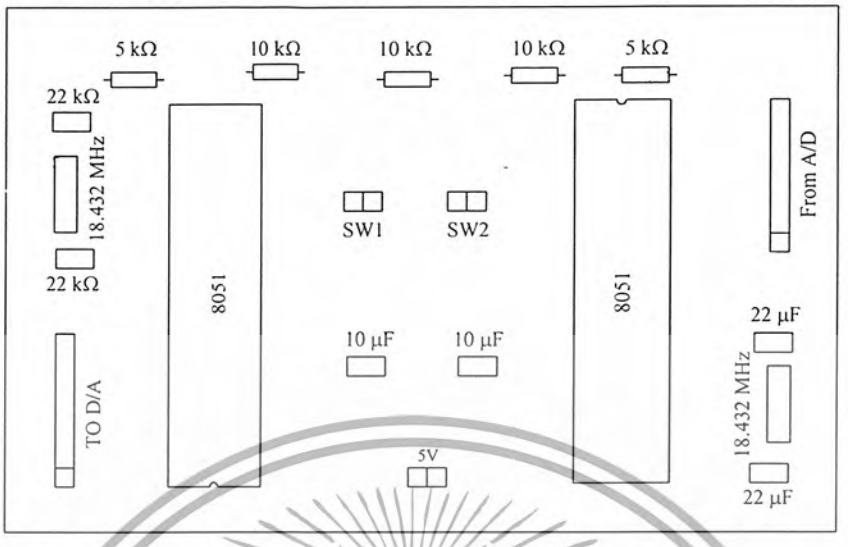


รูปที่ ข.7 วงจรซิงโครนัสด้านส่งและด้านรับ

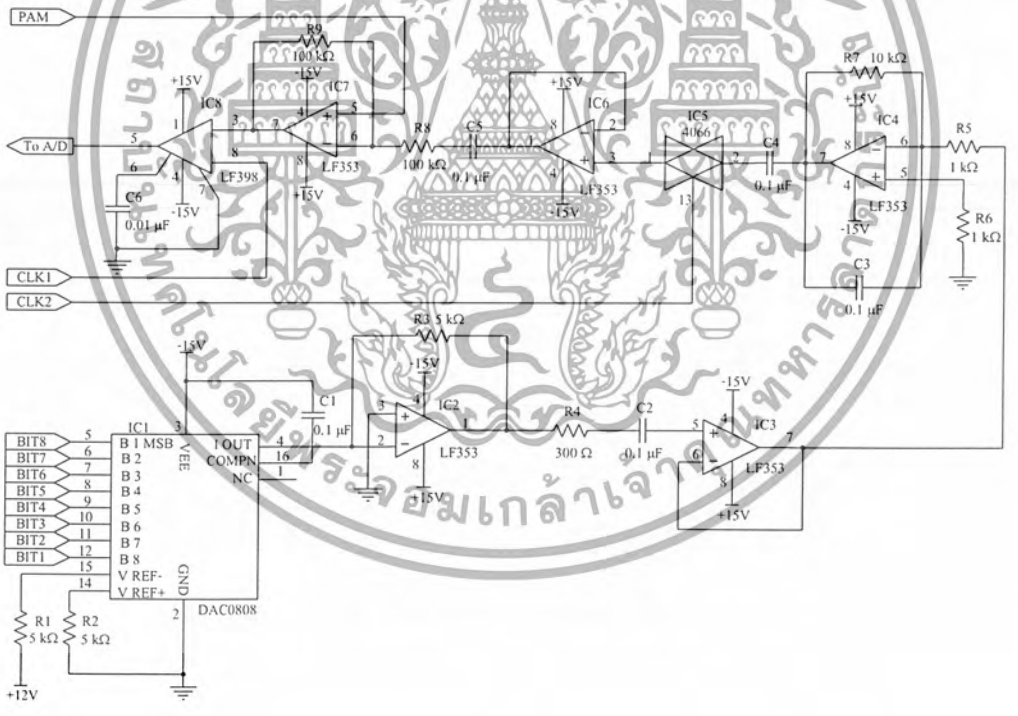


รูปที่ ข.8 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรซิงโครนัสด้านส่งและด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

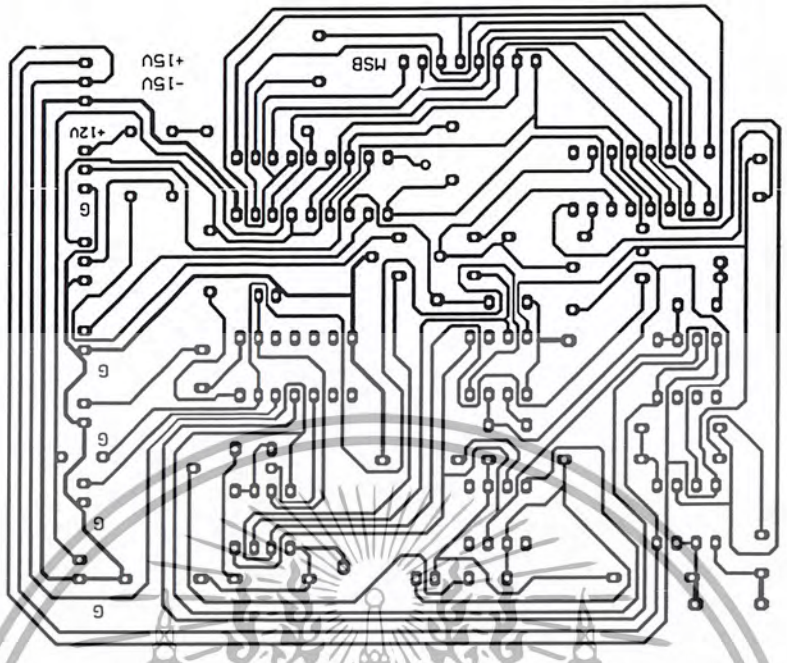


รูปที่ ข.9 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรชิงโครนัสด้านส่งและด้านรับ

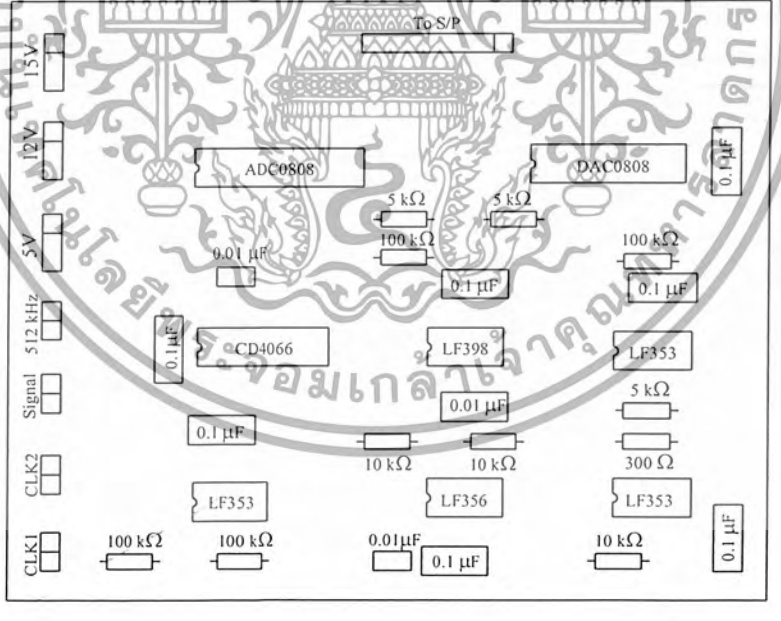


รูปที่ ข.10 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

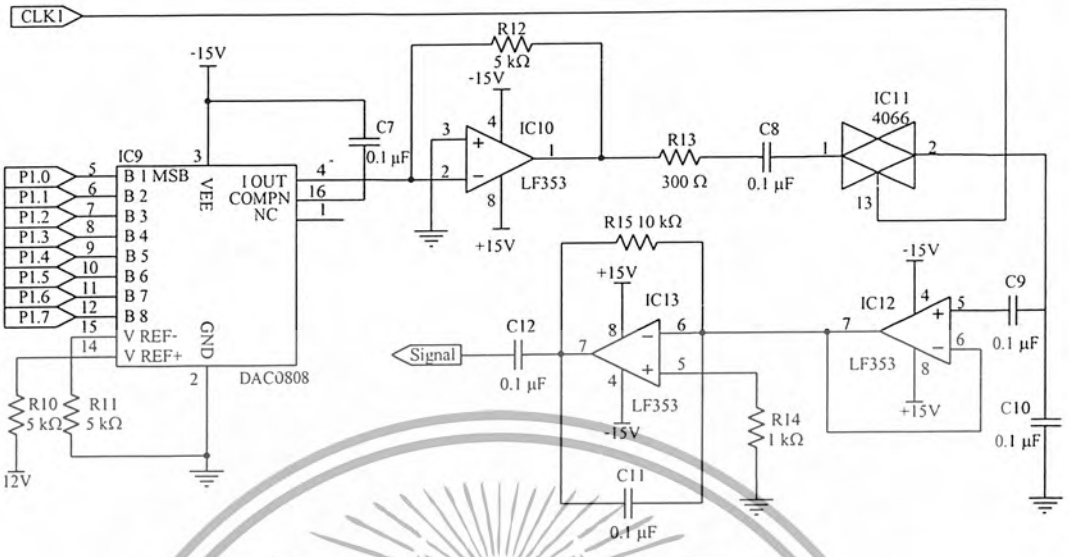


รูปที่ ข.11 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคเข้ารหัส

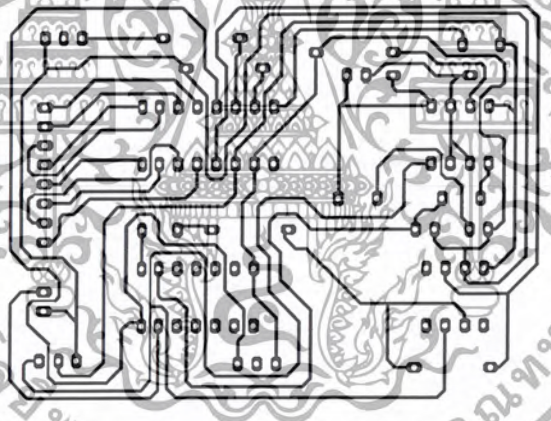


รูปที่ ข.12 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์
วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

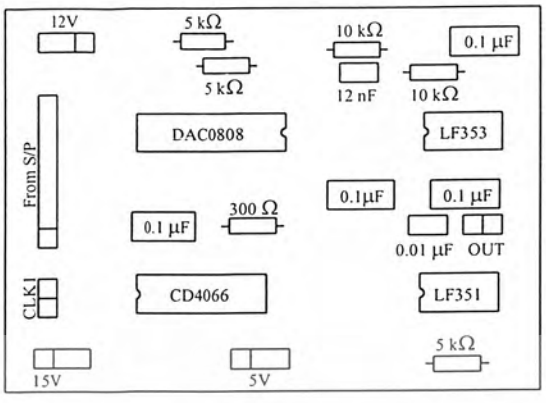


รูปที่ ข.13 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคถอดรหัส

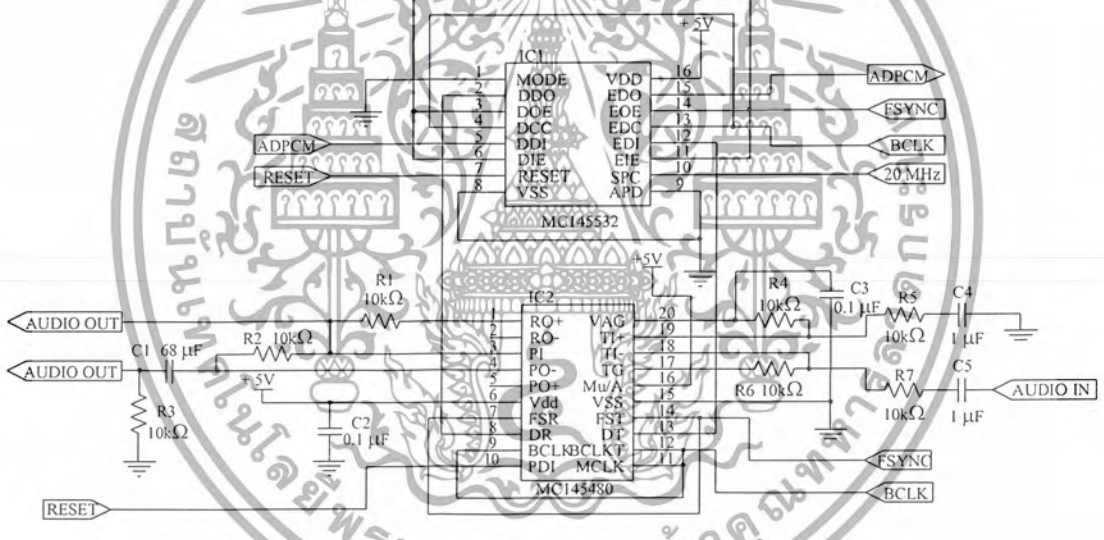


รูปที่ ข.14 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

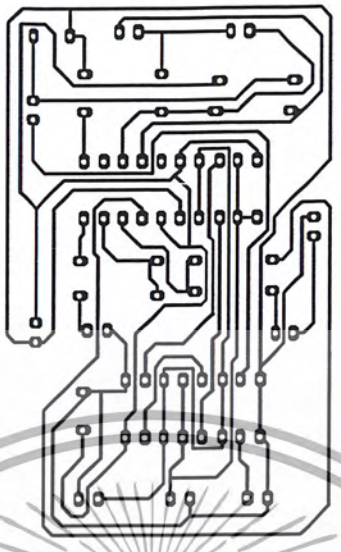


รูปที่ ข.15 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์
วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างภาคถอดรหัส

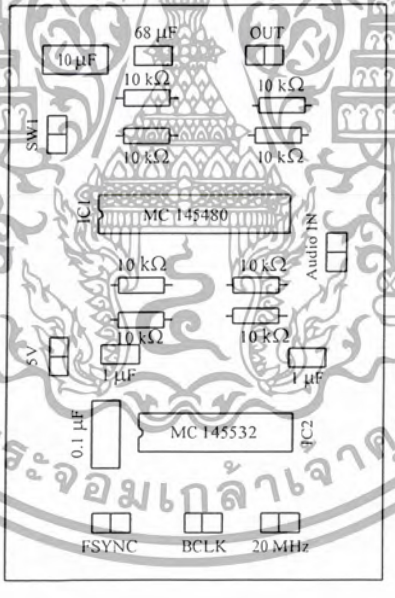


รูปที่ ข.16 วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

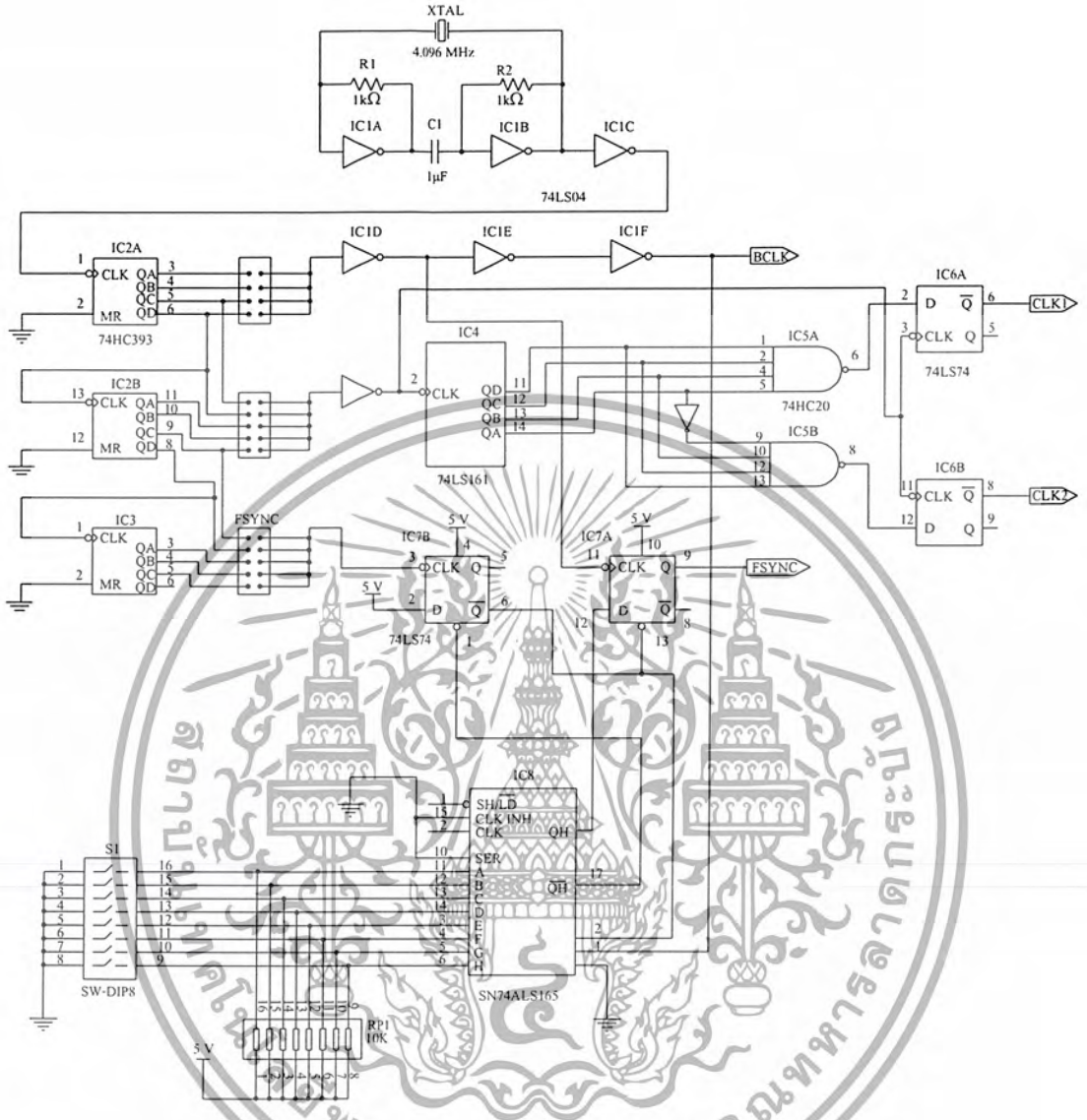


รูปที่ ข.17 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า



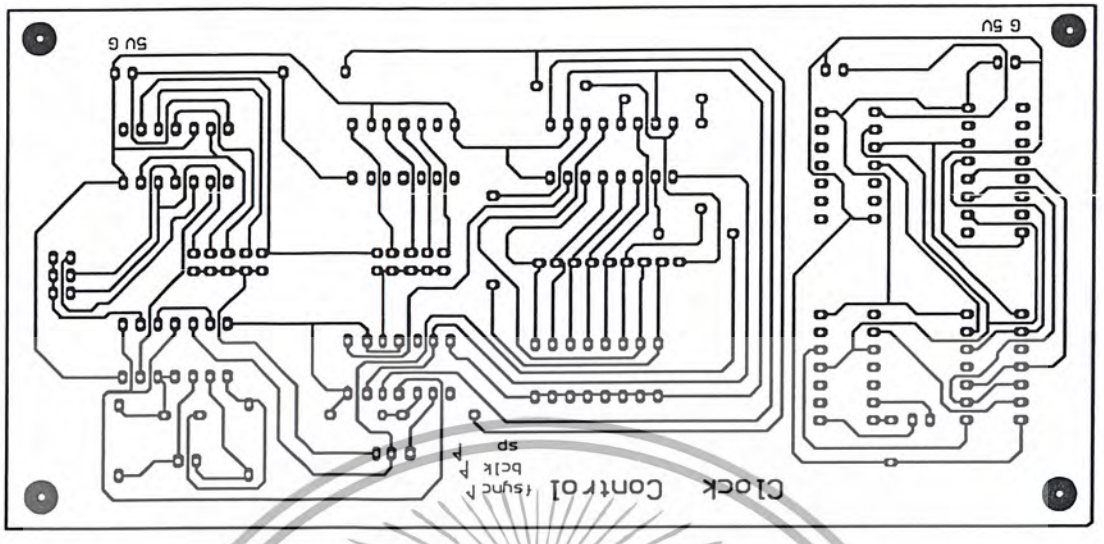
รูปที่ ข.18 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์
วงจรมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

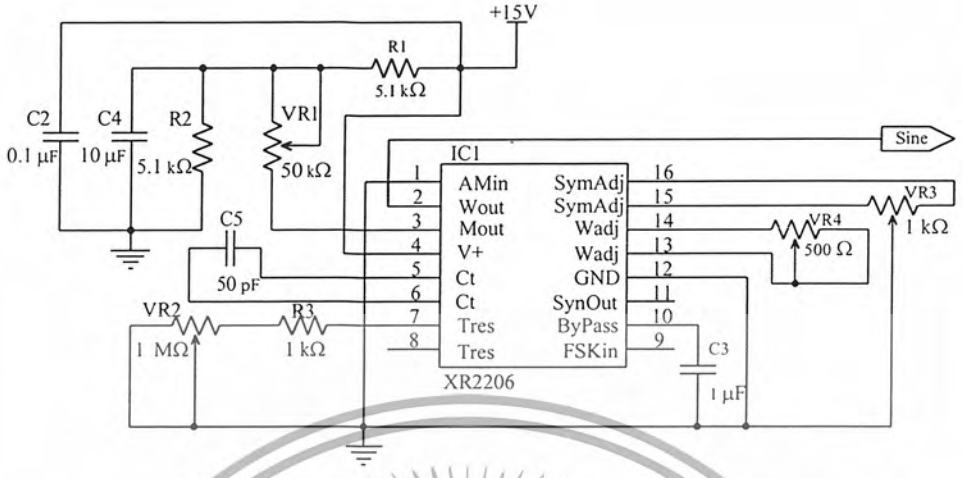
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



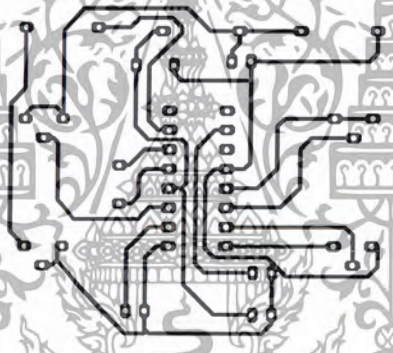
รูปที่ ข.20 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

รูปที่ ข.21 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

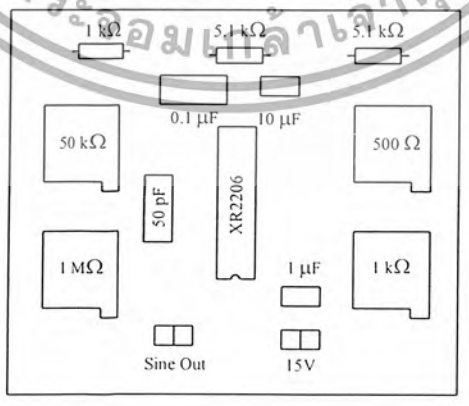
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.22 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์

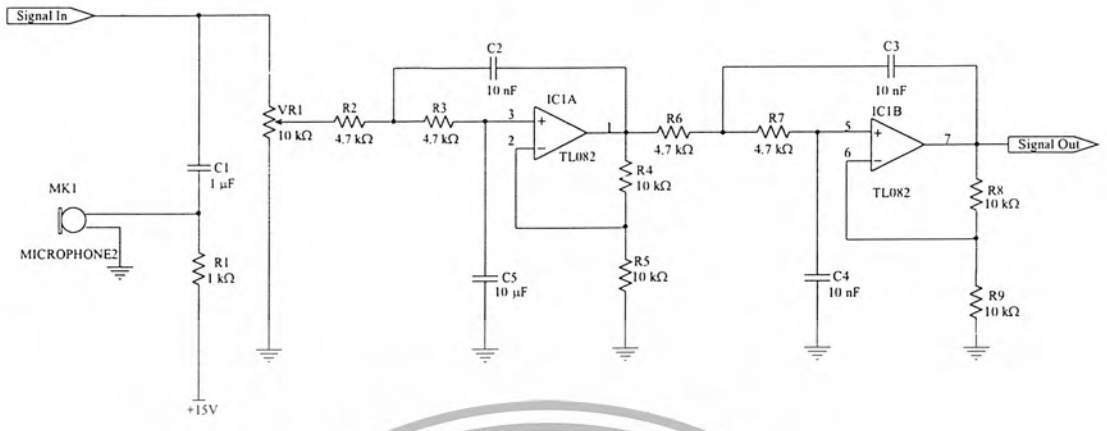


รูปที่ ข.23 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์

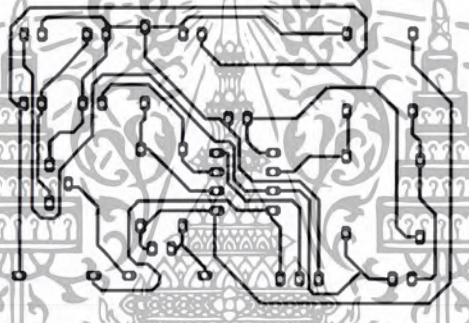


รูปที่ ข.24 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์

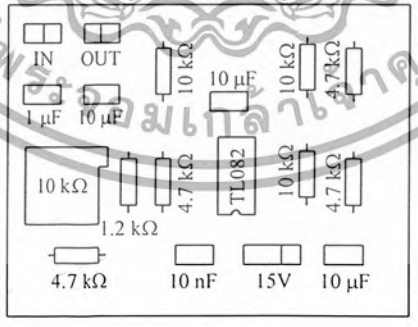
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.25 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง

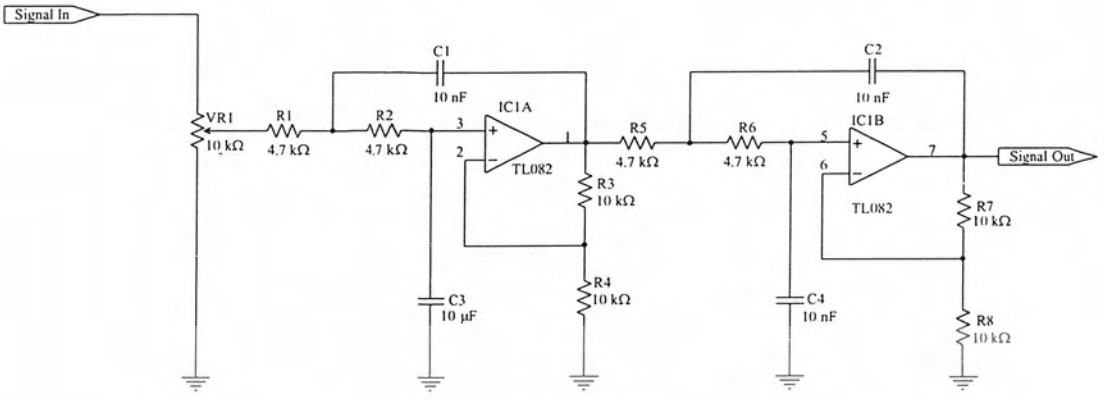


รูปที่ ข.26 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง

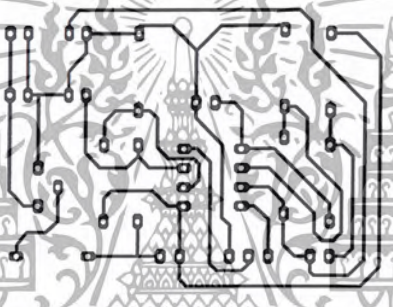


รูปที่ ข.27 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง

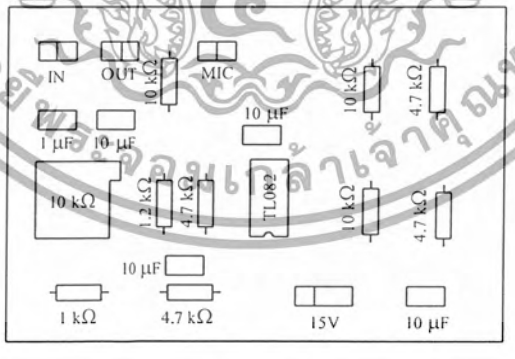
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.28 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ

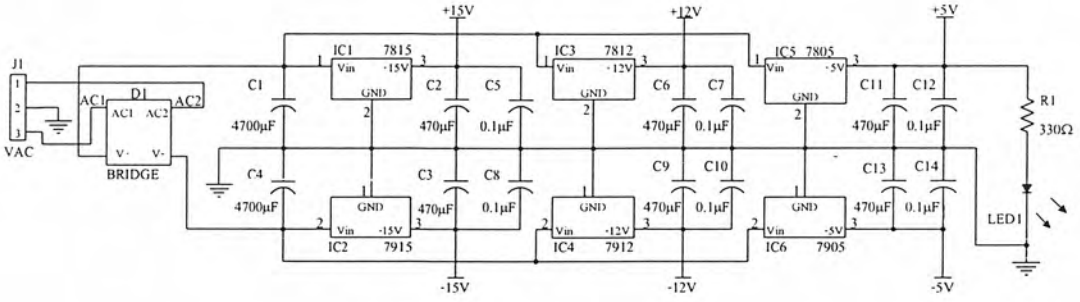


รูปที่ ข.29 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ

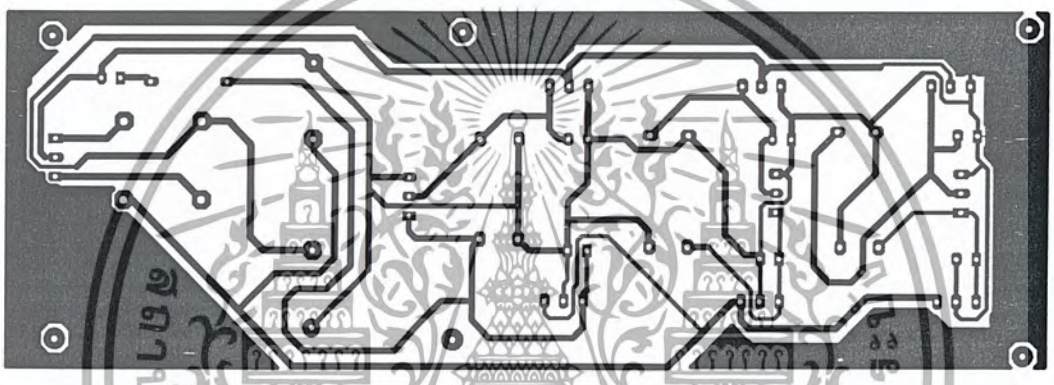


รูปที่ ข.30 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ

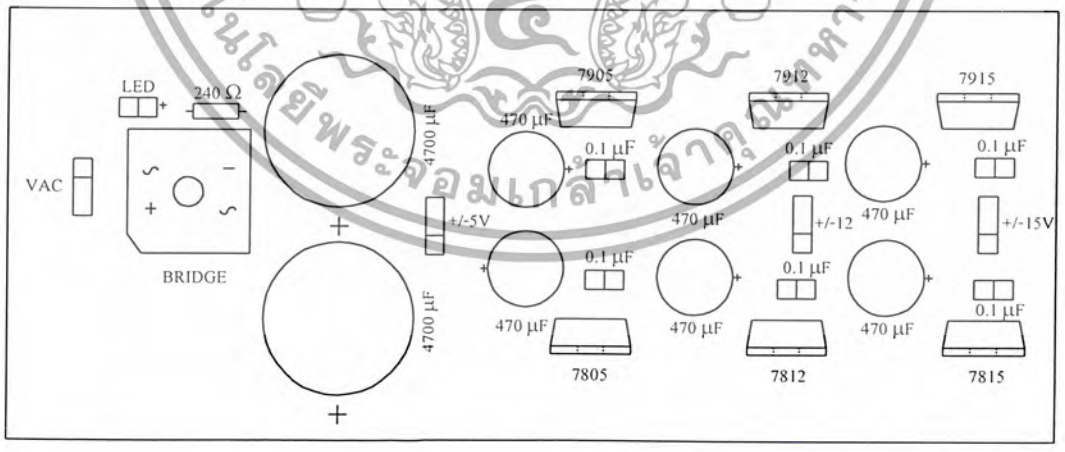
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.31 วงจรแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ ข.32 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ ข.33 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์แผ่นวงจรพิมพ์วงจรแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

รายการอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคเข้ารหัสพีซีเอ็ม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	CD4066	1 ตัว
IC2	LF353	1 ตัว
IC3	ADC0800	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1, C3	0.1 μF เซรามิค	2 ตัว
C2	300 pF เซรามิค	1 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1	Connecter 2 PIN	2 ตัว

ตารางที่ ค.2 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคถอดรหัสพีซีเอ็ม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	DAC0808	1 ตัว
IC2	LF353	
ตัวเก็บประจุ		
C1, C2, C3	0.1 μF เซรามิค	3 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1, R2, R3	5 kΩ 1/4W 1%	3 ตัว
R4	300 Ω	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 รายการอุปกรณ์ของวงจรซิงโครนัสด้านส่ง

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	8051	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1, C2	22 µF เซรามิค	2 ตัว
C3	10 µF เซรามิค	1 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1,	5 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R2, R3	10 kΩ 1/4W 1%	2 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
XTAL	18.432 MHz	1 ตัว
SW1	สวิตซ์แบบ Dip switch	1 ตัว
J1	Connector 2 PIN	1 ตัว

ตารางที่ ค.4 รายการอุปกรณ์ของวงจรซิงโครนัสด้านรับ

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC2	8051	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C4, C5, C6	22 µF เซรามิค	3 ตัว
ตัวต้านทาน		
R4	10 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R5	5 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
SW1	สวิตซ์แบบ Dip switch	1 ตัว
J1	Connector 2 PIN	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคเข้ารหัสดีพีซีเอ็ม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	DAC0808	1 ตัว
IC2, IC3, IC4, IC5, IC7	LF353	3 ตัว
IC5	CD4066	1 ตัว
IC8	LF398	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1, C2, C3, C4, C5	0.1 μF เซรามิค	5 ตัว
C6	0.01 μF เซรามิค	1 ตัว
ตัวความต้านทาน		
R1, R2, R3	5 kΩ 1/4W 1%	3 ตัว
R4	300 Ω 1/4W 5%	1 ตัว
R5, R6	1 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R7	10 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R8, R9	100 kΩ 1/4W 1%	2 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1	Connector 3 PIN	1 ตัว

ตารางที่ ค.6 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคการถอดรหัสดีพีซีเอ็ม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC9	DAC0808	1 ตัว
IC10, IC12, IC13	LF353	2 ตัว
IC11	CD4066	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C7, C8, C9, C10, C11, C12	0.1 μF เซรามิค	6 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคการถอดรหัสดีพีซีเอ็ม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
ตัวต้านทาน		
R10, R11, R12	5 kΩ 1/4W 1%	3 ตัว
R13	300 Ω 1/4W 5%	1 ตัว
R14	1 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R15	10 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1	Connector 2 PIN	1 ตัว

ตารางที่ ค.7 รายการอุปกรณ์ของวงจรเข้ารหัสและถอดรหัสเอดีพีซีเอ็ม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	MC145532	1 ตัว
IC2	MC145480	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1	68 μF เซรามิค	1 ตัว
C2, C3	0.1 μF เซรามิค	2 ตัว
C4, C5	1 μF เซรามิค	2 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7	10 kΩ 1/4W 1%	7 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1	Connector 2 PIN	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 รายการอุปกรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	74LS04	1 ตัว
IC2, IC3	74HC393	2 ตัว
IC4	74LS161	1 ตัว
IC5	74LS20	1 ตัว
IC6	74LS74	1 ตัว
IC7	74LS165	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1	1 μF เซรามิค	1 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1, R2	1 kΩ 1/4W 1%	2 ตัว
RP1	Resister Network 10 kΩ	1 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
CRYSTAL	4.096 MHz	1 ตัว
DIP SWICTH	16 PIN	1 ตัว
Connector	2 PIN	4 ตัว
Connector	Jumper 8 PIN	1 ตัว
Connector	Jumper 10 PIN	2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 รายการอุปกรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นไซน์

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	XR-2206	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1, C3	10 µF เซรามิค	2 ตัว
C2, C4	1 µF เซรามิค	2 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1, R2	5.1 kΩ 1/4W 1%	2 ตัว
R3	1 kΩ 1/4W 5%	1 ตัว
VR1	50 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
VR2	1 MΩ 1/4W 1%	1 ตัว
VR3	1 kΩ 1/4W 5%	1 ตัว
VR4	500 Ω 1/4W 5%	1 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1	Connector 2 PIN	1 ตัว

ตารางที่ ค.10 รายการอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	TL082	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1,	1 µF 25 V	1 ตัว
C2, C3, C4, C5	10 nF เซรามิค	4 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1	1 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R2, R3, R6, R7,	4.7 kΩ 1/4W 5%	4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 (ต่อ)รายการอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาคส่ง

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
ตัวต้านทาน		
R4, R5, R8, R9	10 kΩ 1/4W 1%	4 ตัว
VR1	10 kΩ	1 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1, J2, J3	Connector 2 PIN	3 ตัว

ตารางที่ ค.11 รายการอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านภาครับ

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
วงจรรวม		
IC1	TL082	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1, C2, C3, C4	10 nF เซรามิค	4 ตัว
ตัวต้านทาน		
R1	1 kΩ 1/4W 1%	1 ตัว
R2, R3, R6, R7,	4.7 kΩ 1/4W 5%	4 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
J1, J2	Connector 2 PIN	2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

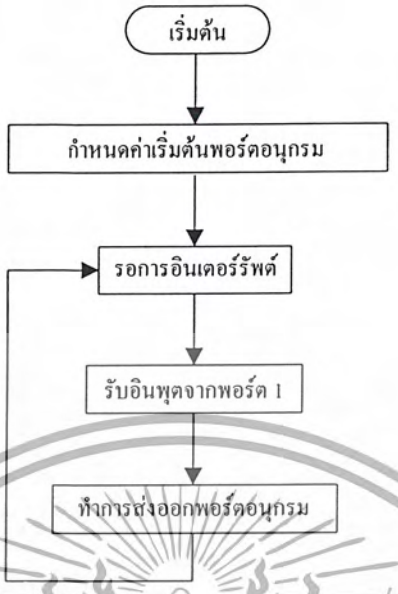
ตารางที่ ค.12 รายการอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายไฟ

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ		
Q1, Q3, Q5, Q7	78XX	4 ตัว
Q2, Q4, Q6, Q8	79XX	4 ตัว
D1 - D4	1N4001	4 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C1, C2	4700 µF 50V	2 ตัว
C3, C4, C7, C8, C11, C12, C15, C16,	470 µF 50V	8 ตัว
ตัวเก็บประจุ		
C5, C6, C9, C10, C13, C14, C17, C18	0.1 µF เซรามิค	8 ตัว
อุปกรณ์อื่นๆ		
T1	หม้อแปลง 220/12-0-12 1A	1 ตัว

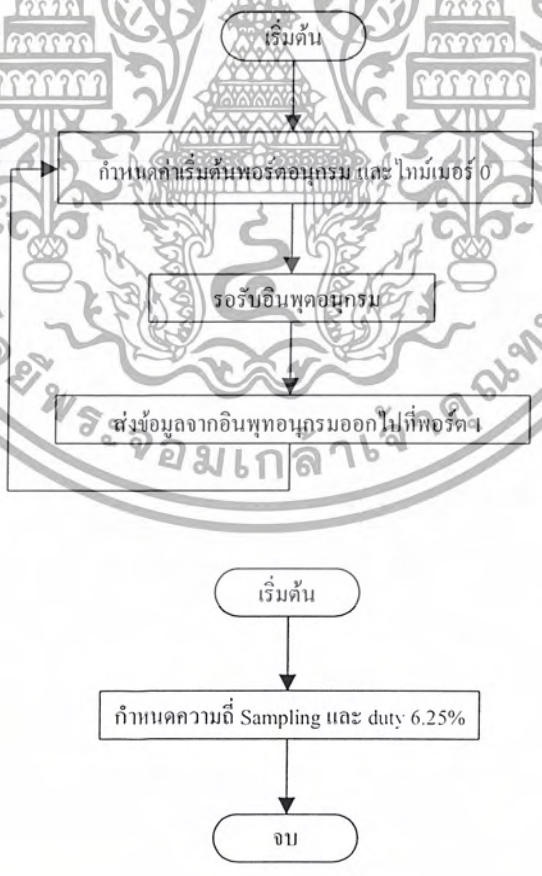
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
แผนผังการทำงานและรหัสต้นฉบับของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.1 ผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านส่ง



รูปที่ ง.2 ผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมควบคุมการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านส่ง

```
      ORG   0000H
      JMP   START

      ORG   0003H
SERVICE:
      MOV   A,P1
      CALL  SEND
      RETI
; INITIAL SERIAL PORT
SINIT:      MOV   TMOD,#21H
      MOV   SCON,#52H
      MOV   TH1,#0FFH
      ORL   PCON,#80H
      SETB  TR1
      RET
; SEND DATA TO SERIAL PORT
SEND: JNB   TI,$
      CLR   TI
      MOV   SBUF,A
      RET
START:      CALL  SINIT
      SETB  IT0
      SETB  EX0
      SETB  EA
      JMP   $
      END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมควบคุมการทำงานวงจรซิงโครนัสด้านรับ

```
      ORG   0000H
      JMP   START
      ORG   000BH
SERVICE:
      CLR   P3.7
      DJNZ  R3,S_OUT
      SETB  P3.7
      MOV   R3,#16H
S_OUT:      RETI
; INITIAL SERIAL PORT
SINIT:
      MOV   TMOD,#22H
      MOV   SCON,#52H
      MOV   TH1,#0FFH
      ORL   PCON,#80H
      SETB  TR1
      MOV   TH0,#244
      SETB  TR0
      RET
;RECEIVE DATA FROM SERIAL PORT
RECV:
      JNB   RI,$
      CLR   RI
      MOV   A,SBUF
      RET
START:
      CALL  SINIT
      MOV   R3,#16
      SETB  ET0
      SETB  EA
ST00:
      CALL  RECV
      MOV   P1,A
      JMP   ST00
      END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ใบงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 1
การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

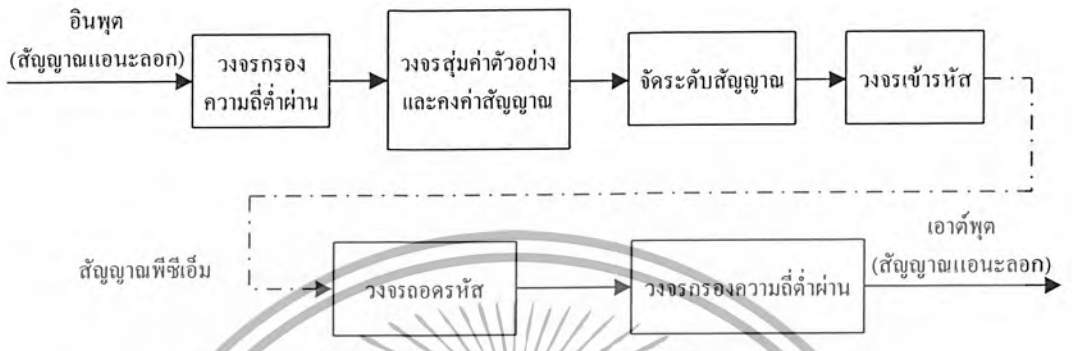
1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	1 ชุด
2. ออสซิลโลสโคป	1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์จะทำการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยกระบวนการสำคัญ 3 กระบวนการ คือ การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ การจัดระดับสัญญาณและการเข้ารหัสสัญญาณ ในลำดับแรกสัญญาณแอนะลอกที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะถูกสุ่มตัวอย่างตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างที่ช่วงเวลาห่างเท่าๆ กันและจะนำค่าตัวอย่างนั้นไปประมาณเข้ากับระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงที่สุดในระดับที่เตรียมไว้แล้ว n ระดับที่อยู่ห่างกันแบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องที่เรียกว่า ระดับของการจัดระดับสัญญาณ กระบวนการประมาณค่าจัดแบ่งระดับสัญญาณเช่นนี้เรียกว่า การจัดระดับสัญญาณ จากนั้นก็จะเป็นการเข้ารหัสให้กับสัญญาณที่ได้รับการจัดระดับสัญญาณมาแล้วให้เป็นรหัสดิจิตอล เพื่อใช้ส่งผ่านช่องสื่อสารต่อไป ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการแปลงสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณแอนะลอกก็ต้องเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องก่อนโดยผ่านวงจรถอดรหัส แล้วจึงทำการเปลี่ยนสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

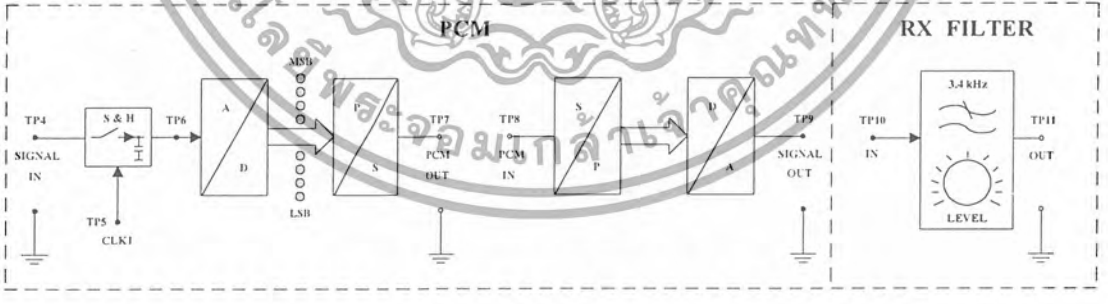
นั้นให้เป็นสัญญาณแอนะลอกโดยผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์โดยสังเขปดังแสดงในรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

ลำดับขั้นการทดลอง

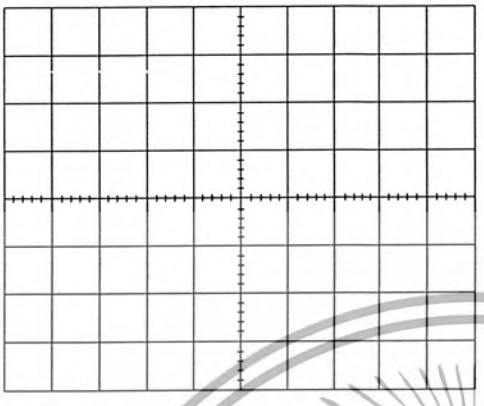
1. จากรูปที่ จ.2 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดกำเนิดสัญญาณที่จุด TP4 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล



รูปที่ จ.2 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.3

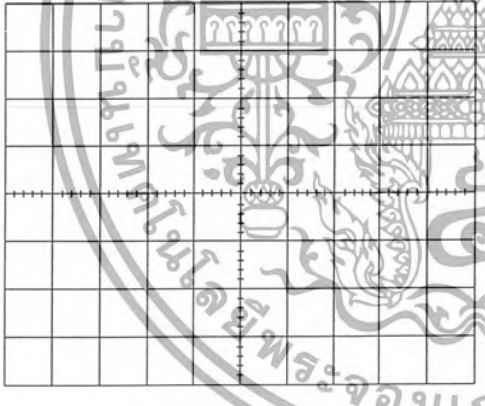


CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.3 สัญญาณที่จุด TP4

3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกาที่จุด TP5 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.4



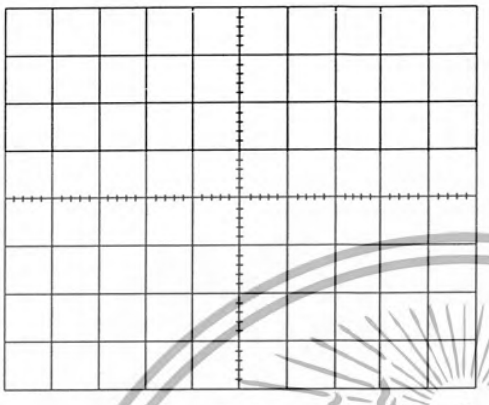
CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.4 สัญญาณที่จุด TP5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 และช่อง 2 วัดสัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP6 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.5



CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

CH2 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.5 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP6

5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่จุด TP7 และบันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.6

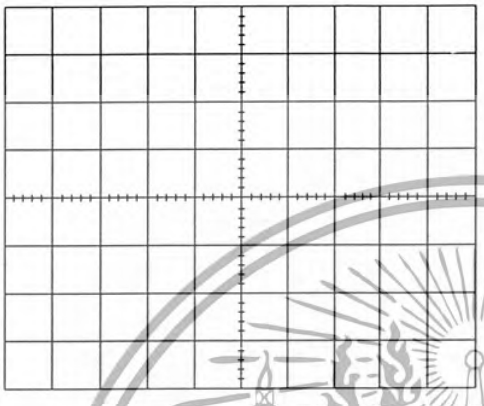
CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.6 สัญญาณที่จุด TP7

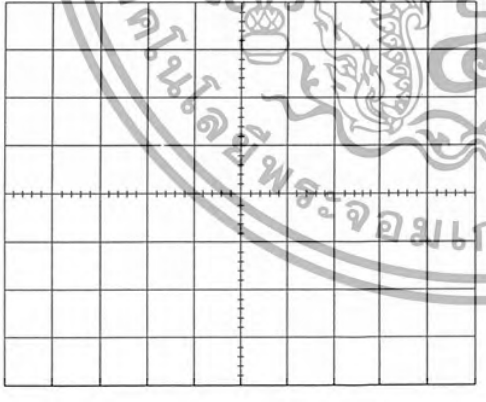
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เชื่อมต่อจากจุด TP7 ไปที่จุด TP8 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP6 และช่อง 2 วัดสัญญาณดิจิตอลแปลงเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP9 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.7



รูปที่ จ.7 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP9

7. เชื่อมต่อจากจุด TP9 ไปที่จุด TP10 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP11 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.8



รูปที่ จ.8 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 7 โดยใช้สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์ และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์
2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP4 และ TP6
3. จงอธิบายผลที่วัดได้ที่จุด TP6 เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 8 และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP5 และจะมีผลอย่างไรต่อเอาต์พุตที่จุด TP11
4. สัญญาณพีซีเอ็มที่ส่งออกที่จุด TP7 มีการส่งทั้งหมดกี่บิต ประกอบด้วยบิตอะไรบ้าง
5. จงเปรียบเทียบสัญญาณที่จุด TP4 และสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่เพราะอะไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 2
การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 1 ชุด
2. ออสซิสโลสโคป 1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

การสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องกันของสัญญาณเสียงพูด ดังเช่นการส่งด้วยระบบการมอดูเลตแบรหัสพัลส์ มีความคล้ายคลึงกันที่สังเกตเห็นได้ ตัวอย่างเช่น การสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่อยู่ติดกันมักมีแอมปลิจูดเท่ากัน เมื่อไปทำการการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ทำให้มีจำนวนข้อมูลที่ซ้ำกัน นอกจากนี้ในระหว่างสัญญาณเสียงที่แท้จริงมีช่วงหยุดและช่วงที่ไม่มีเสียงจำนวนมากทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณของระบบการมอดูเลตแบรหัสพัลส์

การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง (Differential Pulse Code Modulation : DPCM) อาศัยประโยชน์จากการซ้ำซ้อนของข้อมูลที่ปรากฏในการสุ่มสัญญาณเสียง โดยการกำจัดความซ้ำซ้อนที่สัญญาณผลต่าง (Differential Signal) มีช่วงแอมปลิจูดต่ำกว่าสัญญาณเสียงพูดสามารถสร้างขึ้นได้ จากนั้นได้สัญญาณผลต่างนี้จึงสามารถนำไปเข้ารหัสคำที่สั้นกว่า สำหรับสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างทำให้ได้รหัสที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากความซ้ำซ้อนของสัญญาณถูกกำจัดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างมีดังแสดงในรูปที่ จ.9 โดยเริ่มแรกสัญญาณอินพุตจะถูกกรองเอาความถี่ต่ำที่สูงเกินไปออกโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าความถี่จุดตัดไม่เกินครึ่งหนึ่งของความถี่ f_s ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อทำสัญญาณอินพุตให้มีช่วงความถี่อยู่ในแบนด์วิดธ์ที่จำกัดถูกต้องแน่นอน เพื่อป้องกันการเคลือบแฝงค่าพยากรณ์ของสัญญาณอินพุตจะถูกนำมาหักออกจากค่าสัญญาณอินพุต $m(t)$ และค่าผลต่างที่เกิดขึ้นจะถูกสุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปทำการจัดระดับสัญญาณและเข้ารหัสเพื่อส่งต่อไป ค่าพยากรณ์ของสัญญาณอินพุตในที่นี้หามาได้จากการอินทีเกรตสัญญาณซึ่งคือการรวมค่าผลต่างที่ได้จากการถอดรหัสสัญญาณเอาต์พุตตามรูปที่ จ.9

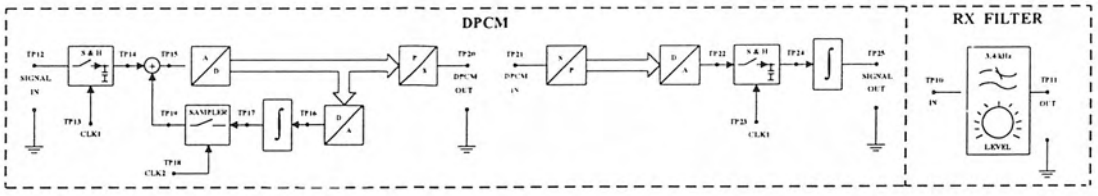
เครื่องรับจะมีวงจรถอดรหัสสัญญาณและวงจรอินทีเกรเตอร์สัญญาณเหมือนกับส่วนป้อนกลับที่ใช้พยากรณ์สัญญาณทางเครื่องส่งและจะมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้กรองความถี่สูงทิ้งเพื่อที่จะทำให้สัญญาณราบเรียบเป็นสัญญาณแอนะลอกเหมือนสัญญาณอินพุตที่ใช้ส่งให้กลับคืนมา

รูปที่ จ.9 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

ลำดับขั้นการทดลอง

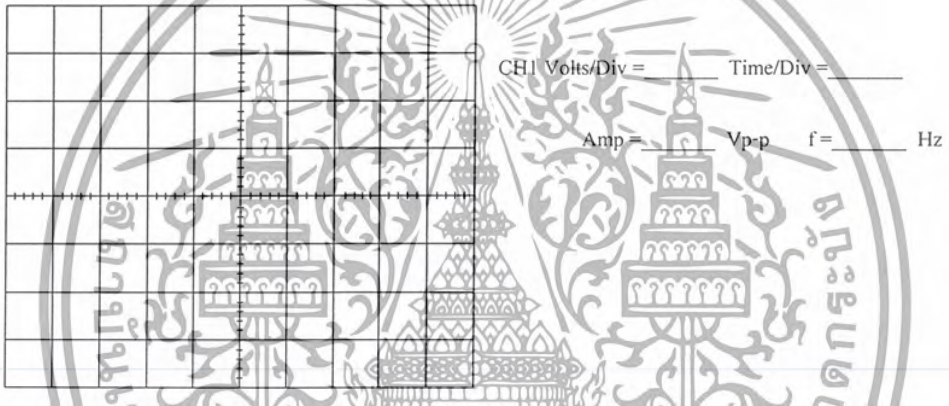
1. จากรูปที่ จ.10 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดผลิตความถี่ที่จุด TP12 และป้อนสัญญาณนาฬิกา (CLK1) ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP13 และ TP23 และสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.10 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

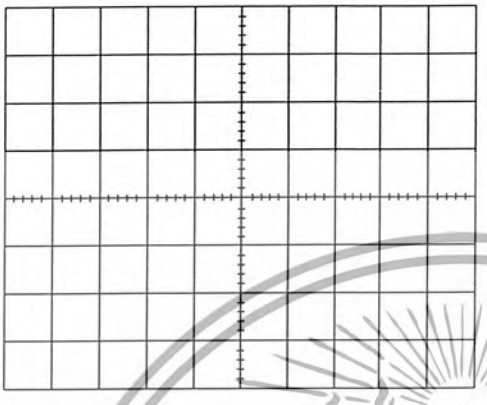
2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP12 บันทึกผลที่ได้ใน รูปที่ จ.11



รูปที่ จ.11 สัญญาณที่จุด TP12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกา (CLK1) ที่จุด TP13 และช่อง 2 วัดสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.12



CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

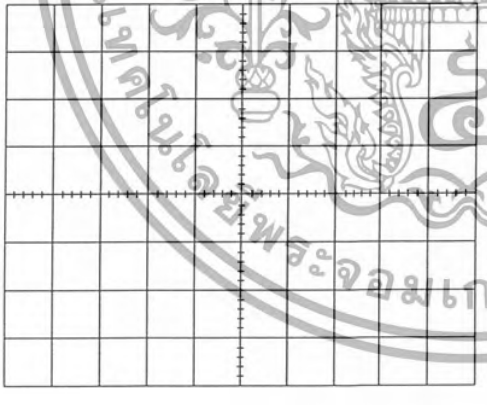
Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

CH2 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.12 สัญญาณที่จุด TP13 และ TP18

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะล็อกอินพุตที่จุด TP12 และช่อง 2 วัดสัญญาณที่ได้จากการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP14 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.13



CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

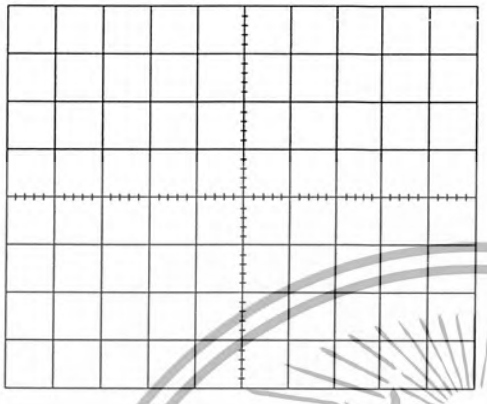
CH2 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.13 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP14

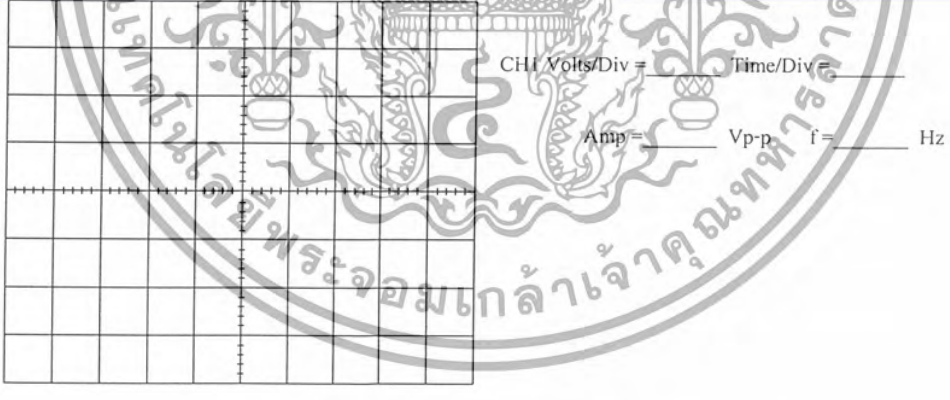
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณที่ได้จากการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP14 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP19 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.14



รูปที่ จ.14 สัญญาณที่จุด TP14 และ TP19

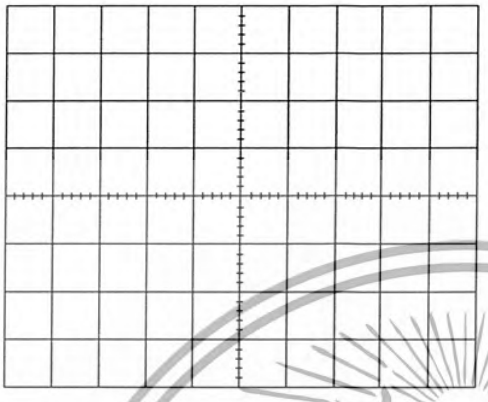
6. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP15 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.15



รูปที่ จ.15 สัญญาณที่จุด TP15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP16 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.16

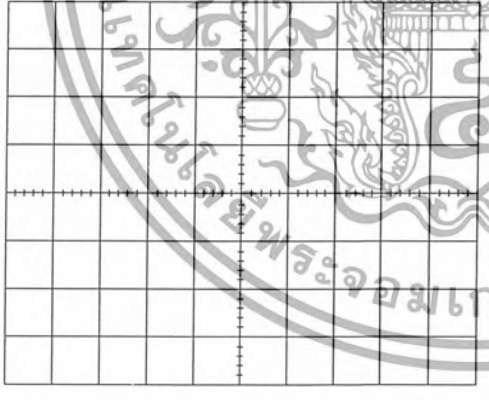


CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.16 สัญญาณที่จุด TP16

8. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP16 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าทำนายที่จุด TP17 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.17



CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

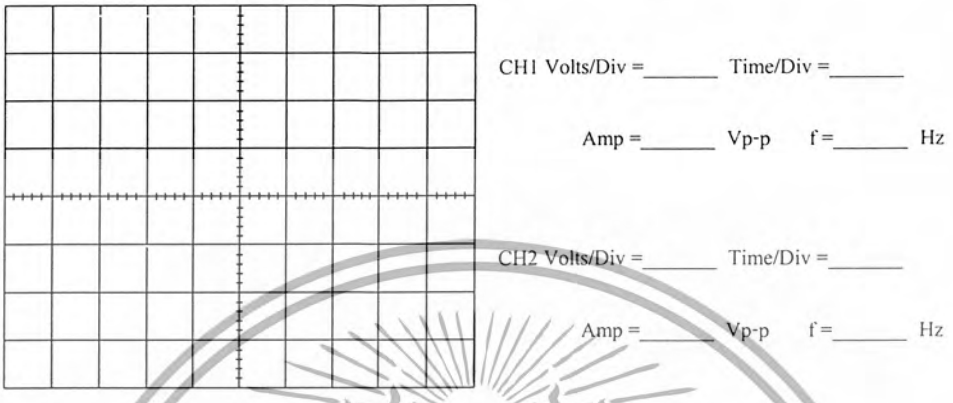
CH2 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.17 สัญญาณที่จุด TP16 และ TP17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าทำนายที่จุด TP17 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP19 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.18



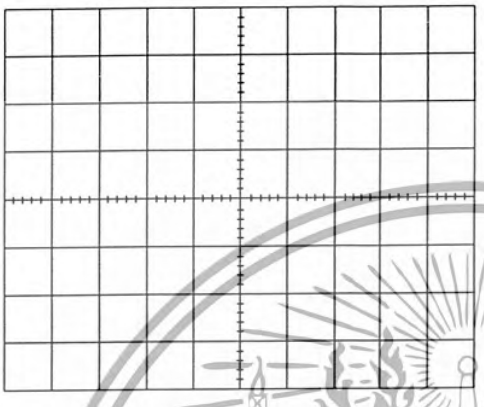
รูปที่ จ.18 สัญญาณที่จุด TP17 และ TP19

10. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณเอาต์พุตดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.19

รูปที่ จ.19 สัญญาณที่จุด TP20

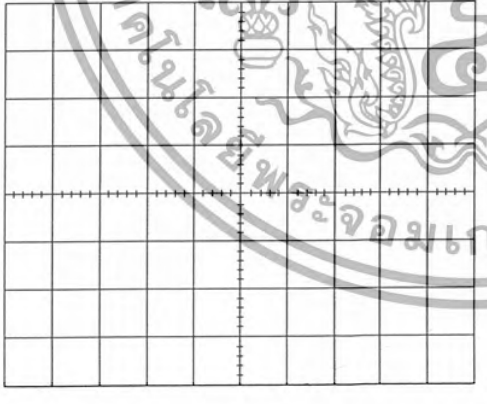
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ทำการเชื่อมต่อสัญญาณจากจุด TP20 ไปยังที่จุด TP21 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกของภาคถอดรหัสที่จุด TP22 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.20



รูปที่ จ.20 สัญญาณที่จุด TP22

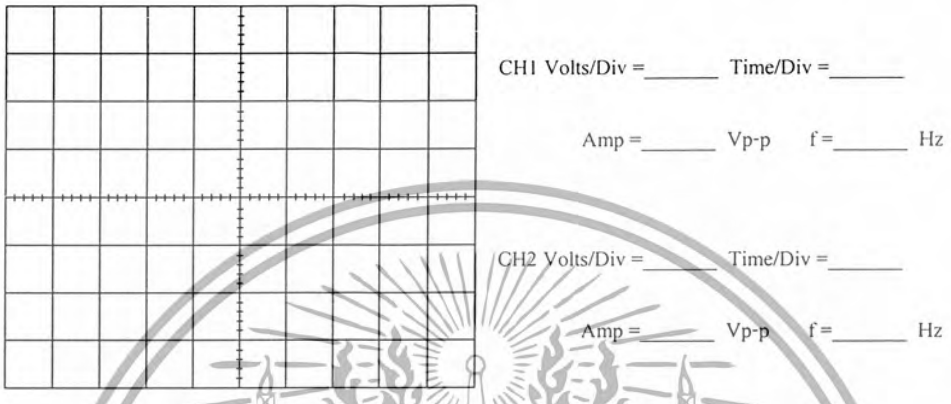
12. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าทำนายของภาคถอดรหัสที่จุด TP24 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.21



รูปที่ จ.21 สัญญาณที่จุด TP24

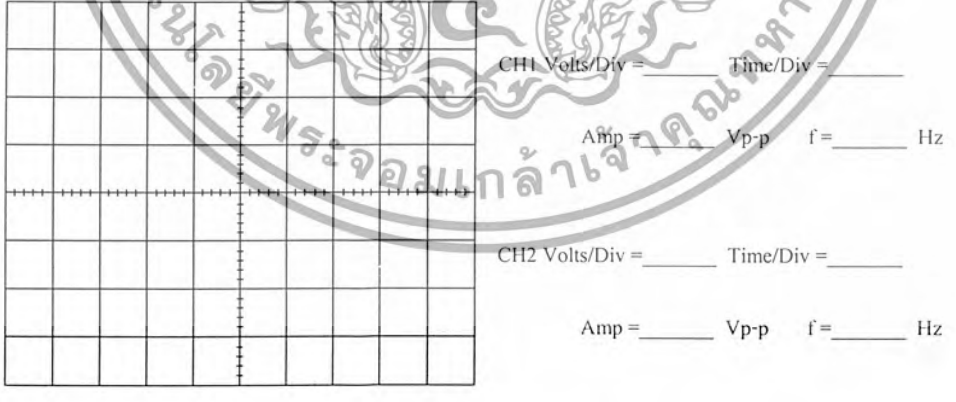
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างของภาคเข้ารหัสที่จุด TP15 และช่อง 2 วัดสัญญาณการสุ่มตัวอย่างของภาคการถอดรหัสที่จุด TP25 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.22



รูปที่ จ.22 สัญญาณที่จุด TP15 และ TP25

14. ทำการเชื่อมต่อสัญญาณจากจุด TP25 ไปยังที่จุด TP10 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะล็อกอินพุตที่จุด TP12 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตที่จุด TP11 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.23



รูปที่ จ.23 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 14 โดยใช้สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง (CLK1 และ CLK2) ความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP13 TP18 และ TP23 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง
2. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP14 และ TP19
3. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP17
4. สัญญาณดีพีซีเอ็มที่ส่งออกที่จุด TP20 มีการส่งทั้งหมดกี่บิต ประกอบด้วยบิตอะไรบ้าง
5. จงเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตที่จุด TP12 และสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่เพราะอะไร
6. จงบอกข้อดีของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 3
การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 1 ชุด
2. ออสซิลโลสโคป 1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

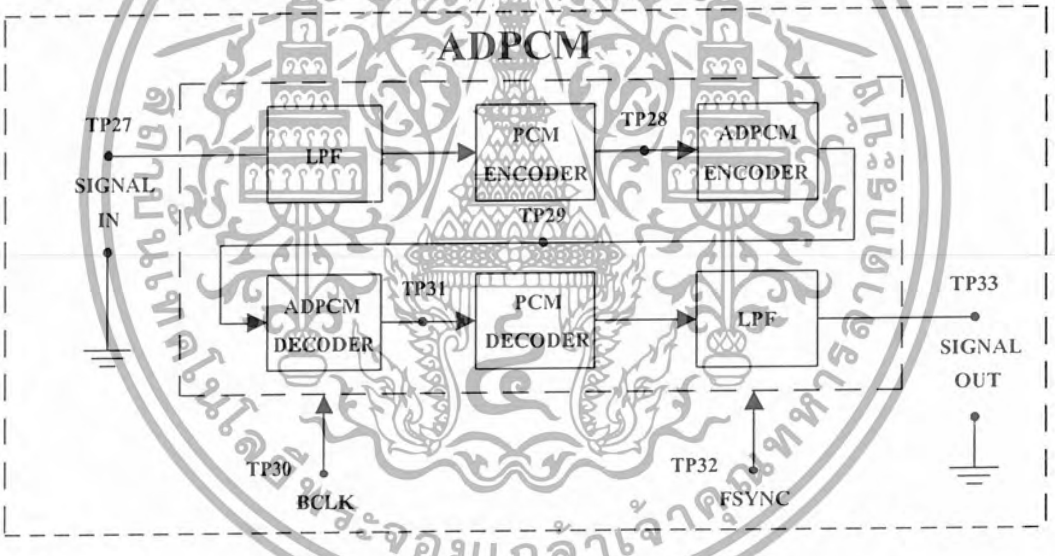
ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าใช้วงจรแปลงรหัส (Transcoder) ซึ่งทำการแปลงรหัสระหว่างการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมกับการมอดูเลตแบบปรับค่า ซึ่งระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าจะประกอบไปด้วยวงจรจัดระดับแบบปรับค่าได้และวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้ (Adaptive Quantizer and Adaptive Predictor) วงจรปรับระดับแบบปรับค่าได้นั้นจะประกอบด้วยการควบคุมความเร็วและการปรับขนาด (Speed Control and Scale Factor Adaptation) การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความแตกต่างนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วและการปรับขนาดนั้นทำเพื่อปรับสัญญาณความแตกต่างให้เหมาะสมกับระดับของการจัดระดับ เพื่อให้ได้ค่า S/N ที่มากที่สุดด้วยการควบคุมความเร็วทำให้ระบบสามารถทำได้ทั้งการปรับค่าอย่างรวดเร็วและการปรับค่าอย่างช้า ซึ่งทำให้สามารถใช้งานได้ทั้งสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณข้อมูล ในวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้นั้นการปรับค่าจะนำมาใช้ในการปรับปรุงการทำงานของวงจรทำนายค่าสำหรับสัญญาณที่ไม่คงที่ (เช่นเสียงพูด) การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่านั้นจะมีเครื่องรับอยู่ในเครื่องส่ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากสัญญาณป้อนกลับนั้นจะใช้ในการหาสัญญาณประมาณและสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้ว ซึ่งเหมือนกับการทำงานของวงจรถอดรหัส ดังนั้นการชดเชยค่าความผิดพลาดจากการจัดระดับสามารถทำได้ในสุ่มตัวอย่างผลต่างตามมา

ลำดับขั้นการทดลอง

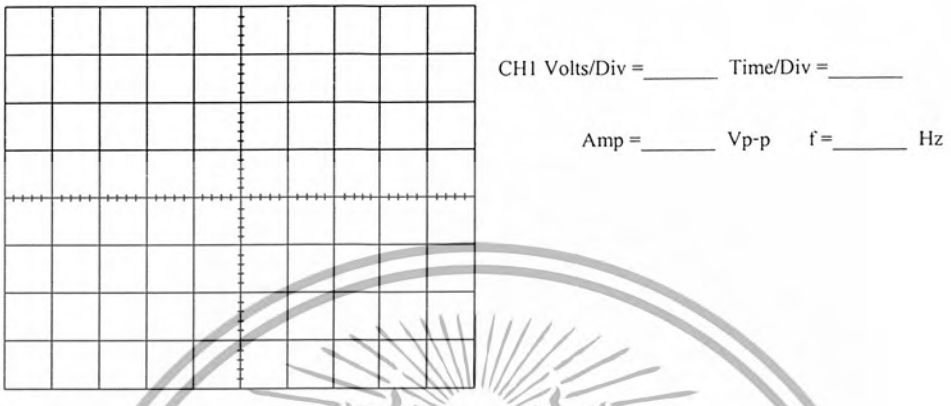
1. จากรูปที่ จ.24 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดผลิตความถี่ที่จุด TP27 และสัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 2048 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาที



รูปที่ จ.24 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP27 บันทึกผลที่ได้ใน รูปที่ จ.25



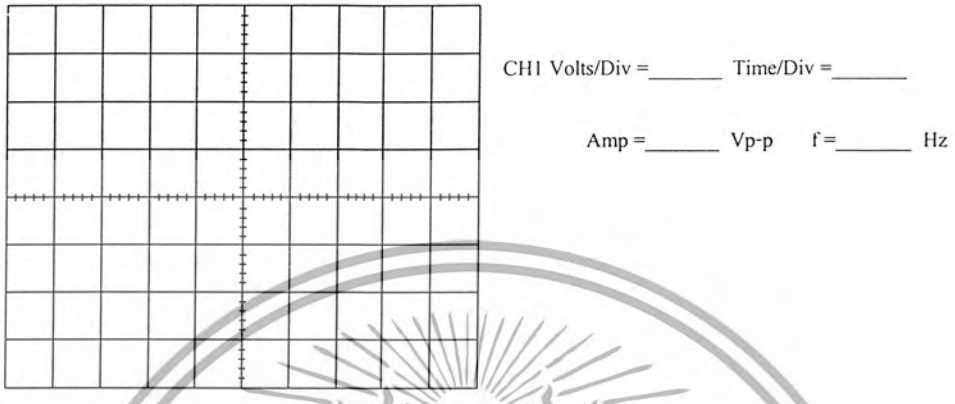
รูปที่ จ.25 สัญญาณที่จุด TP27

3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกา BCLK ที่จุด TP30 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.26

รูปที่ จ.26 สัญญาณที่จุด TP30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) ที่จุด TP32 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.27



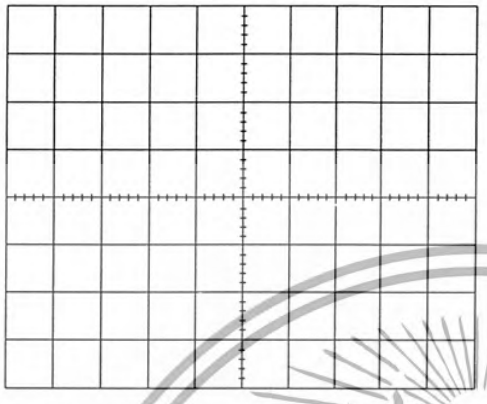
รูปที่ จ.27 สัญญาณที่จุด TP32

5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสที่จุด TP28 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.28

รูปที่ จ.28 สัญญาณที่จุด TP28

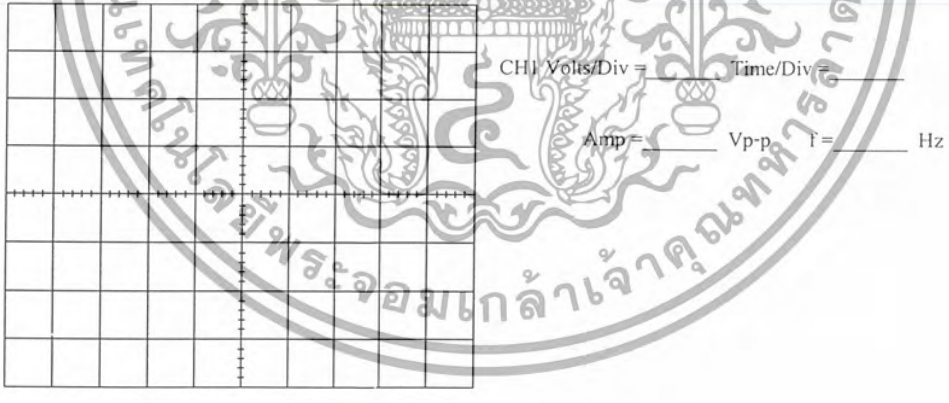
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสจากสัญญาณพีซีเอ็ม ที่จุด TP29 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.29



รูปที่ จ.29 สัญญาณที่จุด TP29

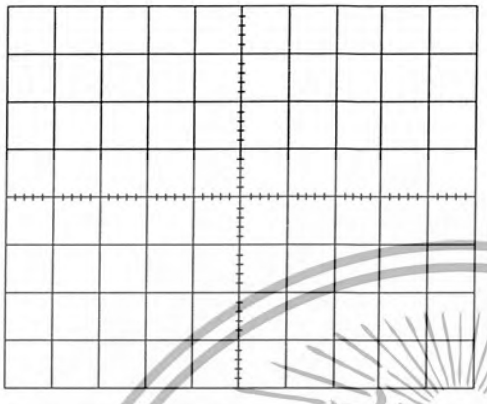
7. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสเป็นสัญญาณ พีซีเอ็มที่จุด TP31 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.30



รูปที่ จ.30 สัญญาณที่จุด TP31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP27 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP33 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.31



รูปที่ จ.31 สัญญาณที่จุด TP27 และ TP33

9. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 7 โดยใช้สัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์ และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 32 กิโลบิตต่อวินาที 24 กิโลบิตต่อวินาที และ 16 กิโลบิตต่อวินาที และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า
2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP28 และTP31
3. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP29
4. จงเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตที่จุด TP27 และสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP33 ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
5. จงบอกข้อดีของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 4

ความแตกต่างระหว่าง PCM DPCM และ ADPCM

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายความแตกต่างระหว่างการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง และการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 1 ชุด
2. ออสซิลโลสโคป 1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

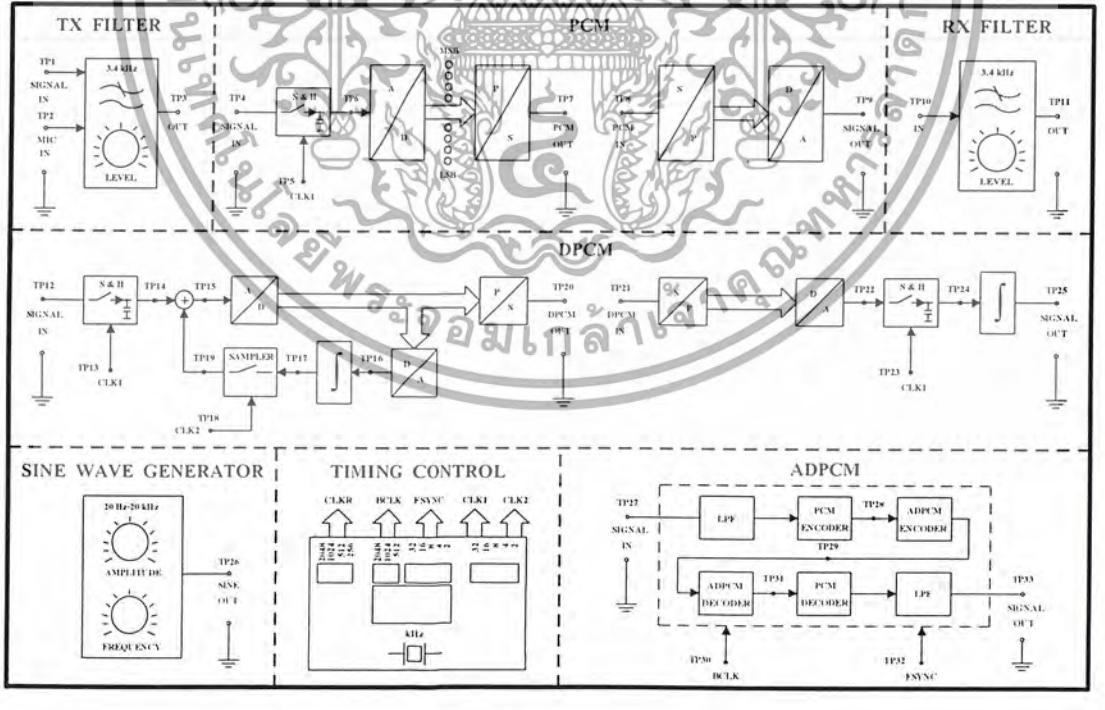
การเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ จะพบว่าสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างมีหลายสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีการจัดระดับสัญญาณให้มีรหัสเดียวกัน จึงทำให้เกิดการส่งสัญญาณพีซีเอ็มที่มีรหัสเดียวกันออกไปหลายๆ ครั้งในเวลาติดๆกัน ซึ่งจะสามารถลดความซ้ำซ้อนของรหัสเหล่านี้ได้โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง จะยอมให้มีการส่งรหัสที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่สุ่มได้ออกไปเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดความละเอียดของรหัสที่ใช้ในการจัดระดับสัญญาณลงได้อย่างมาก โดยมีการใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่ส่งสัญญาณออกไปกลับมาหักล้างกับสัญญาณอินพุตที่สุ่มได้ในครั้งต่อไป สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาใหม่นี้จะเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ซึ่งเกิดจากการรวมกับสัญญาณที่สร้างกับขึ้นมาในครั้งก่อนๆ โดยสังเกตได้จากการใช้ภาคอินทีเกรเตอร์ การถอดรหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง เพื่อสร้างสัญญาณแอนะลอกกลับขึ้นมานั้นจะมีกระบวนการที่เหมือนกับการสร้างสัญญาณแอนะลอกกลับขึ้นมาที่ภาคส่ง นอกจากนี้แล้วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสื่อสารจะมีการเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ที่แตกต่างจากนี้ไปเช่น การเข้ารหัสแบบปรับค่า ซึ่งจะทำให้การสร้างสัญญาณกลับขึ้นมาเป็นแบบปรับค่าและการจัดระดับสัญญาณก็เป็นแบบปรับค่าซึ่งจะมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยลดความซ้ำซ้อนของรหัสที่ได้ทำให้ความละเอียดของรหัสที่ได้มีจำนวนน้อยลงและทำให้อัตราข้อมูลลดลงตามไปด้วย

ลำดับขั้นการทดลอง

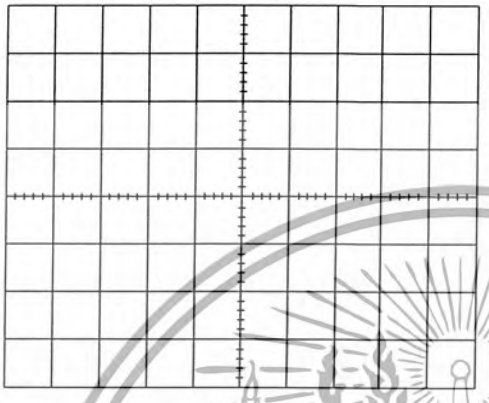
1. จากรูปที่ จ.32 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดผลิตความถี่ที่จุด TP4 TP12 และ TP27 และป้อนสัญญาณนาฬิกา (CLK1) ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 TP13 และ TP23 และสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและสัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 2048 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือก 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาที



รูปที่ จ.32 แผนผังการทำงานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

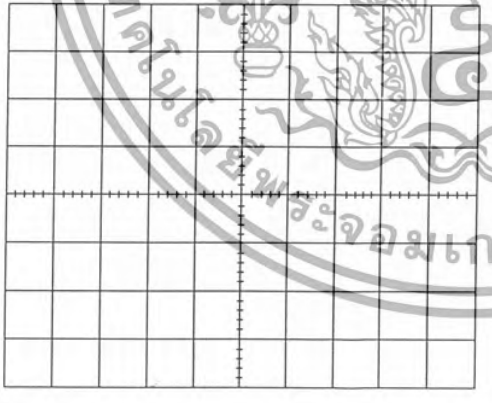
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณในระบบพีซีเอ็ม ที่จุด TP6 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP15 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.33



รูปที่ จ.33 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP15

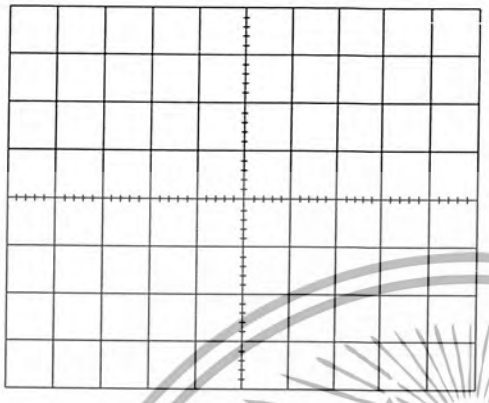
3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP7 และช่อง 2 วัดสัญญาณดีพีซีเอ็มในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.34



รูปที่ จ.34 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP20

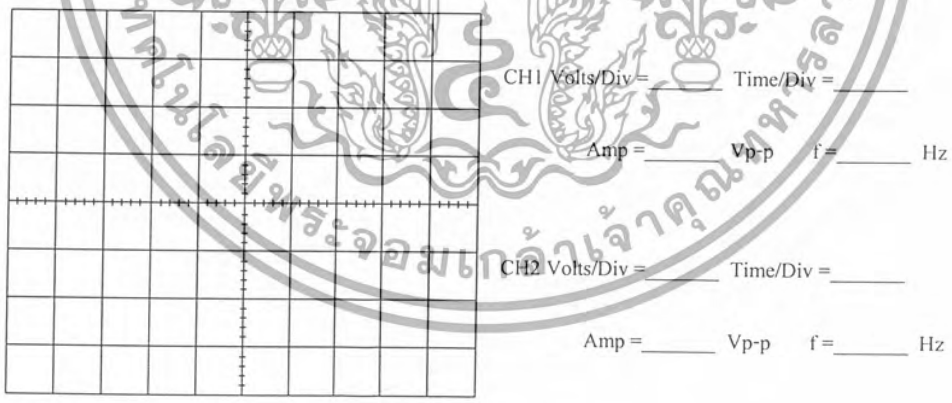
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP7 และช่อง 2 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP28 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.35



รูปที่ จ.35 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP28

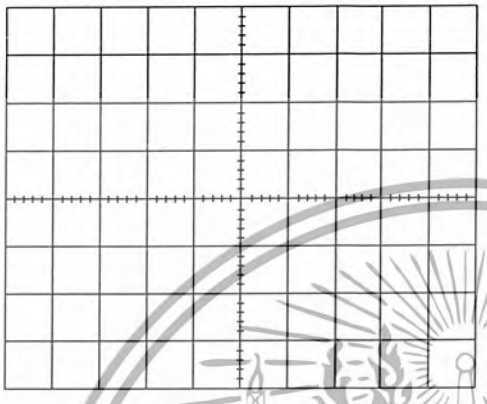
5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณดีพีซีเอ็มในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 และช่อง 2 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP28 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.36



รูปที่ จ.36 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP28

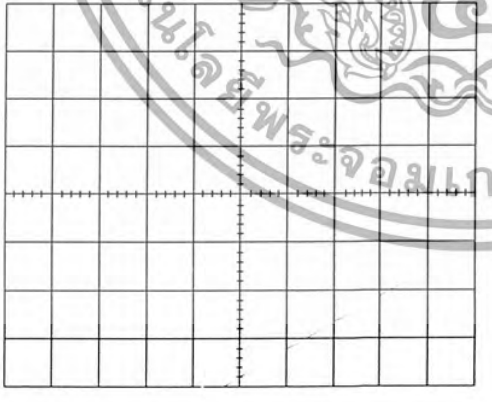
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มในระบบพีซีเอ็ม ที่จุด TP7 และช่อง 2 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสเป็นสัญญาณพีซีเอ็มในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.37



รูปที่ จ.37 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP31

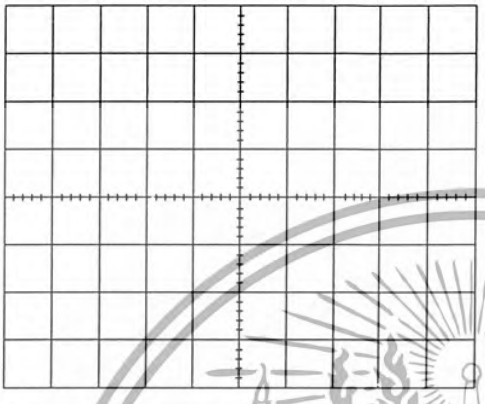
7. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณดีพีซีเอ็มในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 และช่อง 2 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสเป็นสัญญาณพีซีเอ็มในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.38



รูปที่ จ.38 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เชื่อมต่อจากจุด TP7 ไปที่จุด TP8 และเชื่อมต่อจากจุด TP20 ไปที่จุด TP21 ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP9 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP25 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.39



CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

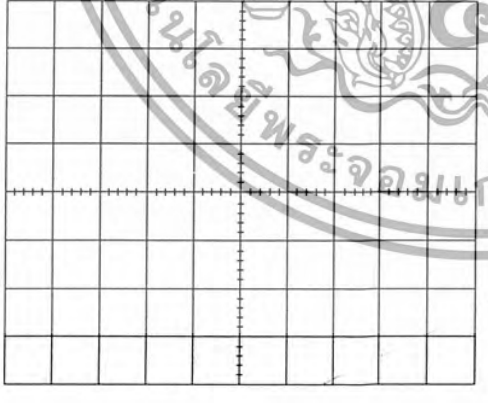
Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

CH2 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.39 สัญญาณที่จุด TP9 และ TP25

9. เชื่อมต่อจากจุด TP9 ไปที่จุด TP10 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP11 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.40



CH1 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

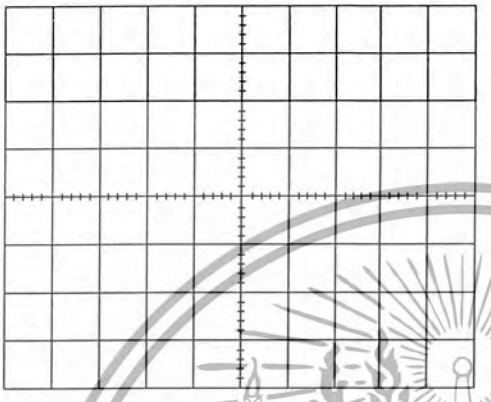
CH2 Volts/Div =_____ Time/Div =_____

Amp =_____ Vp-p f =_____ Hz

รูปที่ จ.40 สัญญาณที่จุด TP11 และ TP33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เชื่อมต่อจากจุด TP25 ไปที่จุด TP10 และ ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP11 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ จ.41



รูปที่ จ.41 สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP11
และสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33

11. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 10 โดยใช้สัญญาณนาฬิกา (CLK1) ความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์ และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 TP13 และ TP23 และสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและสัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 32 กิโลบิตต่อวินาที 24 กิโลบิตต่อวินาที และ 16 กิโลบิตต่อวินาที และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายความแตกต่างของการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ทั้ง 3 แบบ
2. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP7 TP20 และ TP29 ว่ามีความแตกต่างกันหรือเหมือนกันอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

เฉลยใบงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลยใบงานที่ 1
การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

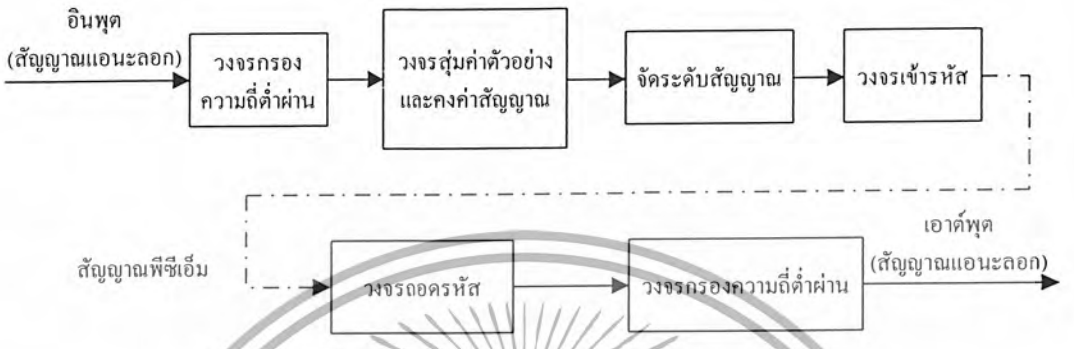
1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 1 ชุด
2. ออสซิลโลสโคป 1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์จะทำการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยกระบวนการสำคัญ 3 กระบวนการ คือ การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ การจัดระดับสัญญาณและการเข้ารหัสสัญญาณ ในลำดับแรกสัญญาณแอนะลอกที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะถูกสุ่มตัวอย่างตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างที่ช่วงเวลาห่างเท่าๆ กันและจะนำค่าตัวอย่างนั้นไปประมาณเข้ากับระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงที่สุดในระดับที่เตรียมไว้แล้ว n ระดับที่อยู่ห่างกันแบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องที่เรียกว่า ระดับของการจัดระดับสัญญาณ กระบวนการประมาณค่าจัดแบ่งระดับสัญญาณเช่นนี้เรียกว่า การจัดระดับสัญญาณ จากนั้นก็จะเป็นการเข้ารหัสให้กับสัญญาณที่ได้รับการจัดระดับสัญญาณมาแล้วให้เป็นรหัสดิจิตอลเพื่อใช้ส่งผ่านช่องสื่อสารต่อไป ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการแปลงสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณแอนะลอกก็ต้องเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องก่อนโดยผ่านวงจรถอดรหัส แล้วจึงทำการเปลี่ยนสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

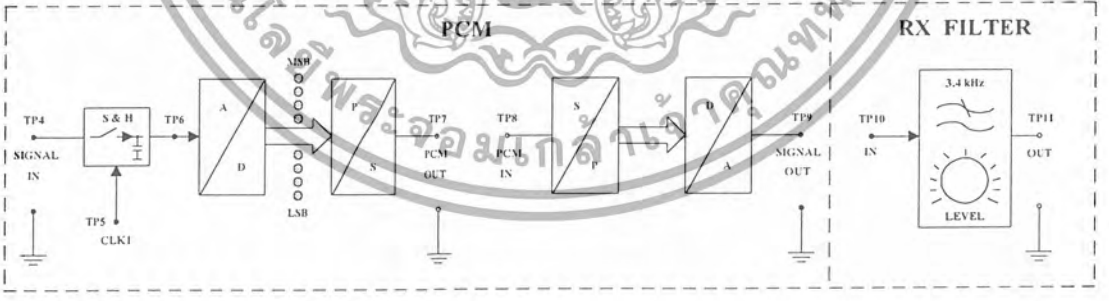
นั้นให้เป็นสัญญาณแอนะลอกโดยผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์โดยสังเขปดังแสดงในรูปที่ ฉ.1



รูปที่ ฉ.1 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

ลำดับขั้นการทดลอง

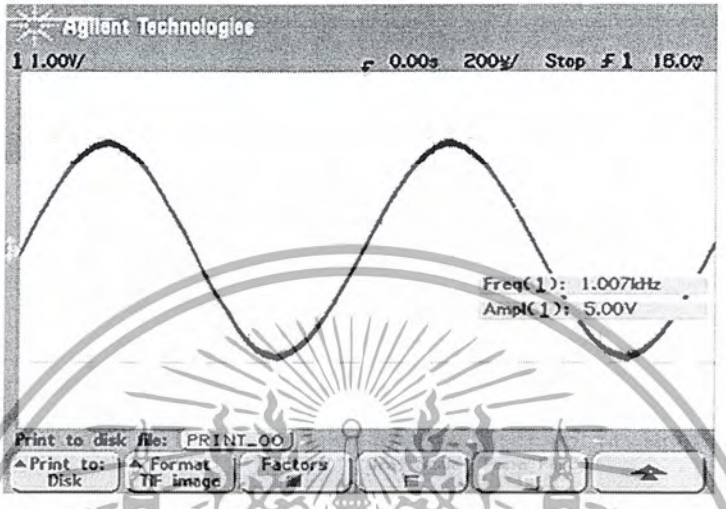
1. จากรูปที่ ฉ.2 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดกำเนิดสัญญาณที่จุด TP4 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล



รูปที่ ฉ.2 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.3



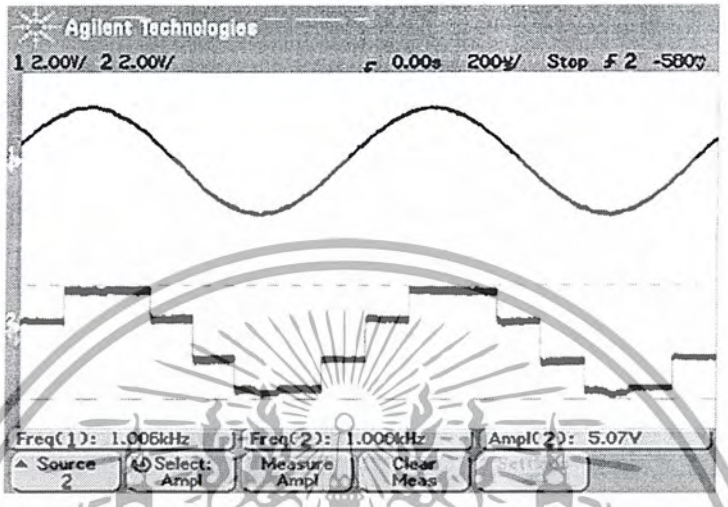
รูปที่ ฉ.3 สัญญาณที่จุด TP4

3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกาที่จุด TP5 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.4

รูปที่ ฉ.4 สัญญาณที่จุด TP5

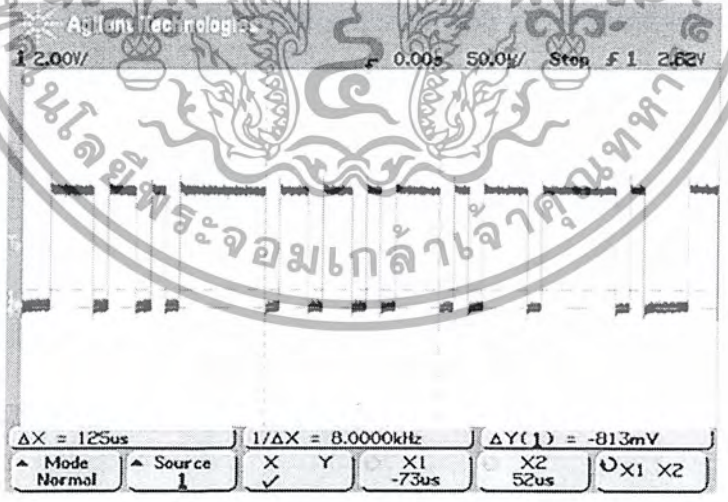
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 และช่อง 2 วัดสัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP6 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.5



รูปที่ ฉ.5 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP6

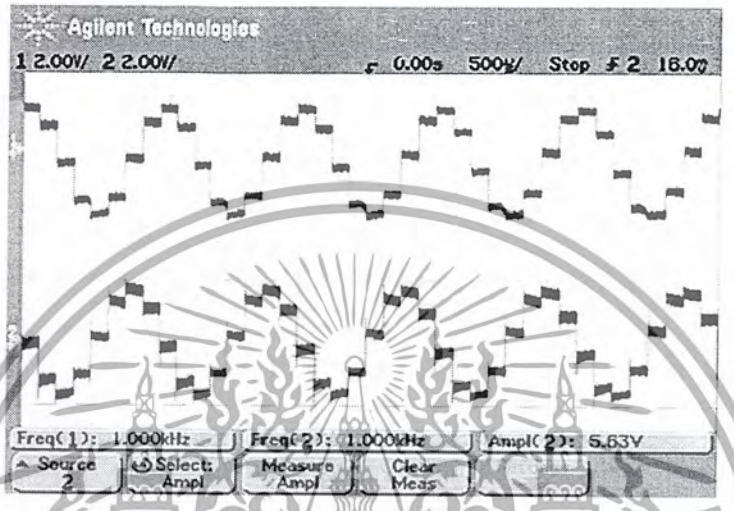
5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่จุด TP7 และบันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.6



รูปที่ ฉ.6 สัญญาณที่จุด TP7

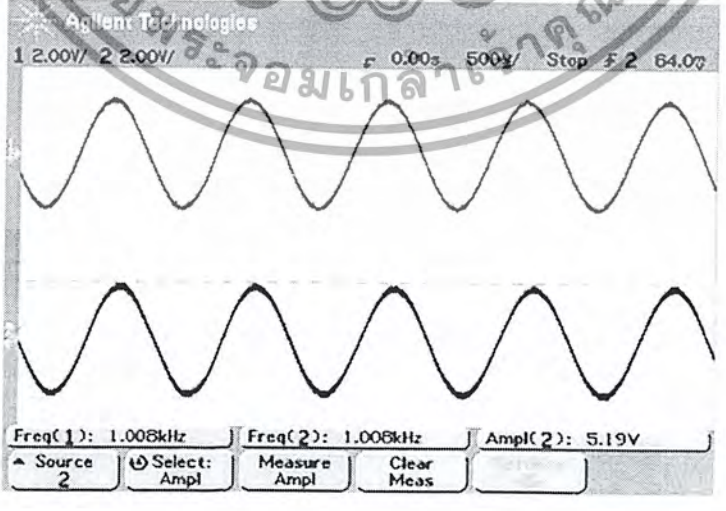
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เชื่อมต่อจากจุด TP7 ไปที่จุด TP8 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP6 และช่อง 2 วัดสัญญาณดิจิตอลแปลงเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP9 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.7



รูปที่ ฉ.7 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP9

7. เชื่อมต่อจากจุด TP9 ไปที่จุด TP10 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP11 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.8



รูปที่ ฉ.8 สัญญาณที่จุด TP4 และ TP11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 7 โดยใช้สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์ และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะสังเกตได้ว่าสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างที่ความถี่ 16 กิโลเฮิรตซ์ ที่จุด TP5 ทำให้ได้สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP11 ใกล้เคียงกับสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP4 มากที่สุด ส่วนสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง 4 กิโลเฮิรตซ์ สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP11 จะมีการผิดเพี้ยน ส่วนสัญญาณนาฬิกาความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ เป็นสัญญาณนาฬิกาที่มีอัตราการสุ่มตัวอย่างเป็น 2 เท่าของสัญญาณเสียง ซึ่งเพียงพอที่จะสามารถนำสัญญาณเดิมกลับคืนมาได้

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

ตอบ หลักการของการเข้ารหัสแบบพีซีเอ็มมีส่วนสำคัญคือ การสุ่มและคงค่าสัญญาณใช้ในการเก็บตัวอย่างค่าของสัญญาณแอนะลอกที่เข้ามา ซึ่งสัญญาณที่ได้ทำการสุ่มแล้วจะถูกส่งเข้าไปในส่วนของการแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลซึ่งสัญญาณที่ได้นี้คือสัญญาณพีซีเอ็ม

ส่วนหลักการทำงานของทางด้านการถอดรหัสนั้นจะทำการแปลงข้อมูลสัญญาณดิจิตอลกลับออกมาเป็นสัญญาณแอนะลอกและถูกนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้ได้รูปร่างสัญญาณที่ดีขึ้น

2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP4 และ TP6

ตอบ ที่จุด TP4 เป็นสัญญาณแอนะลอกอินพุตคลื่นไซน์ ส่วนที่จุด TP6 เป็นสัญญาณที่ได้จากการสุ่มและคงค่า จะพบว่าสัญญาณที่ได้จากการสุ่มและคงค่าจะมีลักษณะรูปร่างเป็นขั้นบันไดมีความกว้างของแต่ละขั้นเป็น 1/8 กิโลเฮิรตซ์ หรือ 125 ไมโครวินาที (กรณีใช้สัญญาณสุ่ม 8 กิโลเฮิรตซ์) ตามสัญญาณที่ใช้ในการสุ่มโดยมีขนาดและเฟสเหมือนกับสัญญาณแอนะลอกอินพุตคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จงอธิบายผลที่วัดได้ที่จุด TP6 เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 8 และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP5 และจะมีผลอย่างไรต่อเอาต์พุตที่จุด TP11

ตอบ ในกรณีที่ใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 16 กิโลเฮิรตซ์ จะต้องทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้ได้ค่าตัวอย่างสัญญาณที่จุด TP6 มีความละเอียดมากกว่าการสุ่มด้วยสัญญาณนาฬิกาความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 มีความถูกต้องของสัญญาณสูงกว่า แต่ในทางปฏิบัติใช้งานจริงแล้วจะใช้แค่ 8 กิโลเฮิรตซ์ก็เพียงพอในการรับข้อมูลข่าวสารแล้ว

4. สัญญาณพีซีเอ็มที่ส่งออกที่จุด TP7 มีการส่งทั้งหมดกี่บิต ประกอบด้วยบิตอะไรบ้าง

ตอบ สัญญาณพีซีเอ็มที่ส่งออกที่จุด TP7 มีจำนวน 12 บิต ประกอบด้วยบิตข้อมูล 8 บิต บิตเริ่มต้น 1 บิต และบิตหยุดจำนวน 3 บิต

5. จงเปรียบเทียบสัญญาณที่จุด TP4 และสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่เพราะอะไร

ตอบ สัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะมีรูปร่าง ขนาด และความถี่เหมือนกับสัญญาณอินพุตที่จุด TP4 เพราะสัญญาณนาฬิกาที่ใช้สุ่มมีค่าเป็น 2 เท่าหรือมากกว่าของสัญญาณอินพุตทำให้ได้สัญญาณอินพุตเดิมกลับคืนมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลยใบงานที่ 2
การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์	1 ชุด
2. ออสซิสโลสโคป	1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

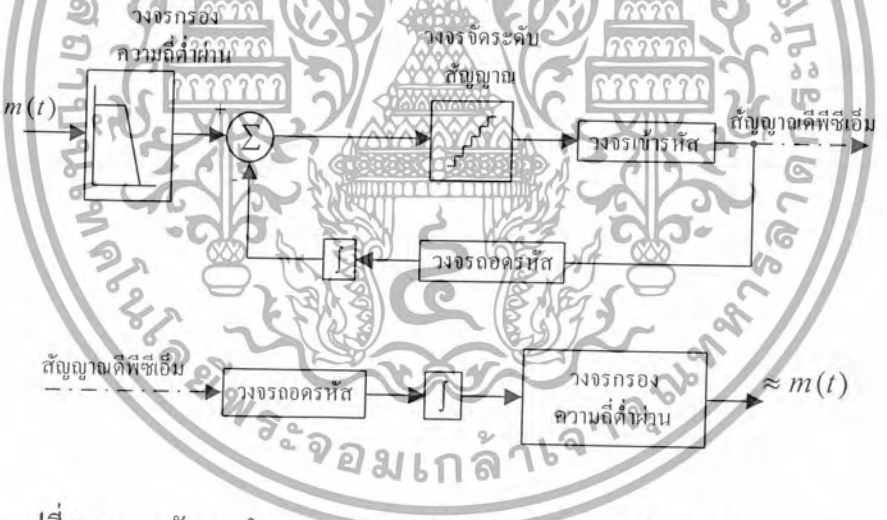
การสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องกันของสัญญาณเสียงพูด ดังเช่นการส่งด้วยระบบการมอดูเลตแบรหัสพัลส์ มีความคล้ายคลึงกันที่สังเกตเห็นได้ ตัวอย่างเช่น การสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่อยู่ติดกันมักมีแอมปลิจูดเท่ากัน เมื่อไปทำการการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ทำให้มีจำนวนข้อมูลที่ซ้ำกัน นอกจากนี้ในระหว่างสัญญาณเสียงที่แท้จริงมีช่วงหยุดและช่วงที่ไม่มีเสียงจำนวนมากทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณของระบบการมอดูเลตแบรหัสพัลส์

การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง (Differential Pulse Code Modulation: DPCM) อาศัยประโยชน์จากการซ้ำซ้อนของข้อมูลที่ปรากฏในการสุ่มสัญญาณเสียง โดยการกำจัดความซ้ำซ้อนที่สัญญาณผลต่าง (Differential Signal) มีช่วงแอมปลิจูดต่ำกว่าสัญญาณเสียงพูดสามารถสร้างขึ้นได้ จากนั้นได้สัญญาณผลต่างนี้จึงสามารถนำไปเข้ารหัสคำที่สั้นกว่า สำหรับสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างทำให้ได้รหัสที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากความซ้ำซ้อนของสัญญาณถูกกำจัดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างมีดังแสดงในรูปที่ ฉ.9 โดยเริ่มแรกสัญญาณอินพุตจะถูกกรองเอาความถี่ต่ำที่สูงเกินไปออกโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าความถี่จุดตัดไม่เกินครึ่งหนึ่งของความถี่ f_s ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อทำสัญญาณอินพุตให้มีช่วงความถี่อยู่ในแบนด์วิดธ์ที่จำกัดถูกต้องแน่นอน เพื่อป้องกันการเคลือบแฝงค่าพยากรณ์ของสัญญาณอินพุตจะถูกนำมาหักออกจากค่าสัญญาณอินพุต $m(t)$ และค่าผลต่างที่เกิดขึ้นจะถูกสุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปทำการจัดระดับสัญญาณและเข้ารหัสเพื่อส่งต่อไป ค่าพยากรณ์ของสัญญาณอินพุตในที่นี้หามาได้จากการอินทีเกรตสัญญาณซึ่งคือการรวมค่าผลต่างที่ได้จากการถอดรหัสสัญญาณเอาต์พุตตามรูปที่ ฉ.9

เครื่องรับจะมีวงจรถอดรหัสสัญญาณและวงจรอินทีเกรเตอร์สัญญาณเหมือนกับส่วนป้อนกลับที่ใช้พยากรณ์สัญญาณทางเครื่องส่งและจะมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้กรองความถี่สูงทิ้งเพื่อที่จะทำให้สัญญาณราบเรียบเป็นสัญญาณแอนะลอกเหมือนสัญญาณอินพุตที่ใช้ส่งให้กลับคืนมา

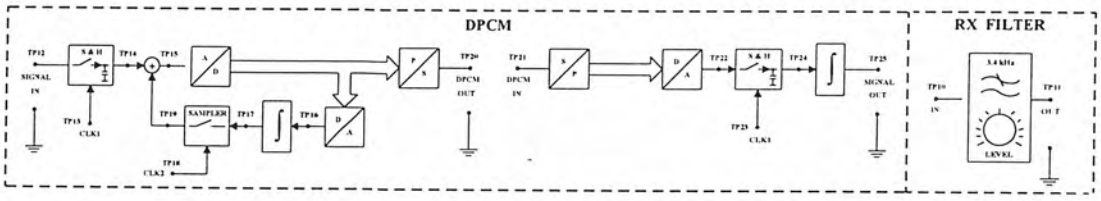


รูปที่ ฉ.9 แผนผังการทำงานของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

ลำดับขั้นการทดลอง

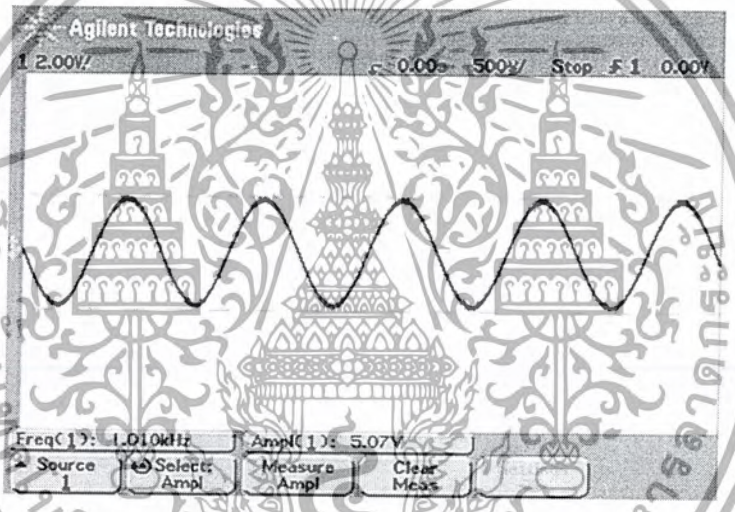
1. จากรูปที่ ฉ.10 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดผลิตความถี่ที่จุด TP12 และป้อนสัญญาณนาฬิกา (CLK1) ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP13 และ TP23 และสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.10 แผนผังชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

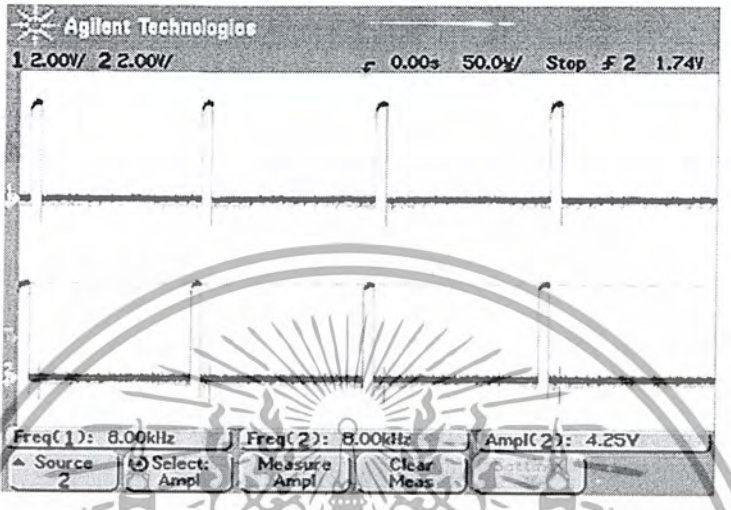
2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP12 บันทึกผลที่ได้ใน รูปที่ ฉ.11



รูปที่ ฉ.11 สัญญาณที่จุด TP12

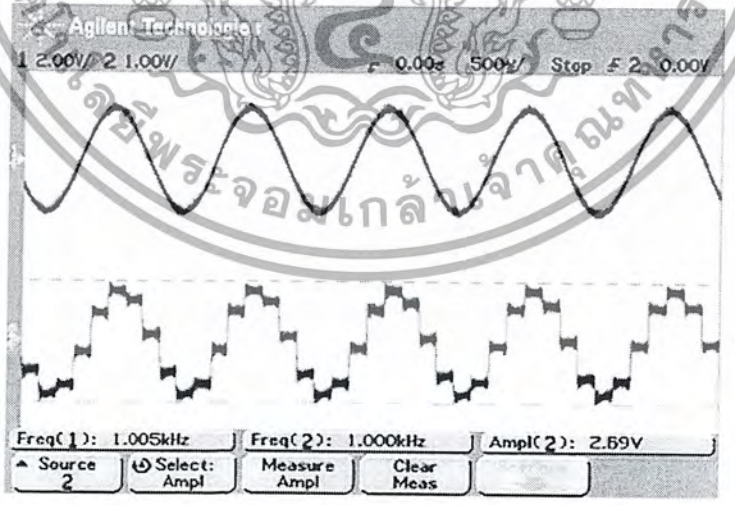
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกา (CLK1) ที่จุด TP13 และช่อง 2 วัดสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.12



รูปที่ ฉ.12 สัญญาณที่จุด TP13 และ TP18

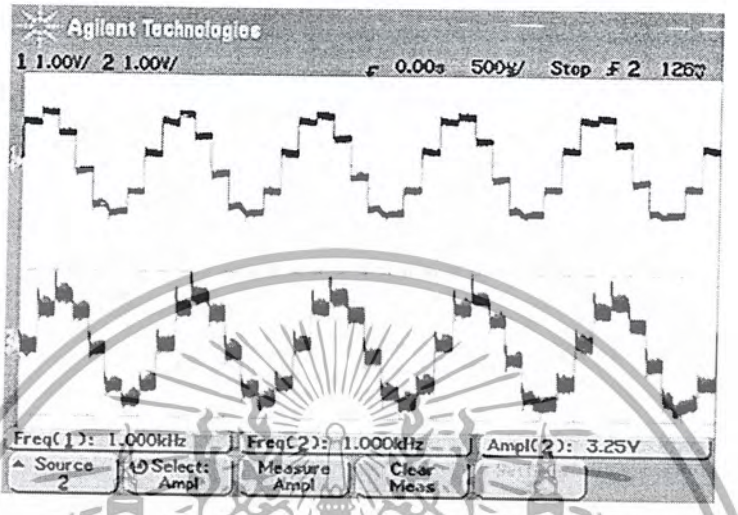
4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP12 และช่อง 2 วัดสัญญาณที่ได้จากการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP14 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.13



รูปที่ ฉ.13 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP14

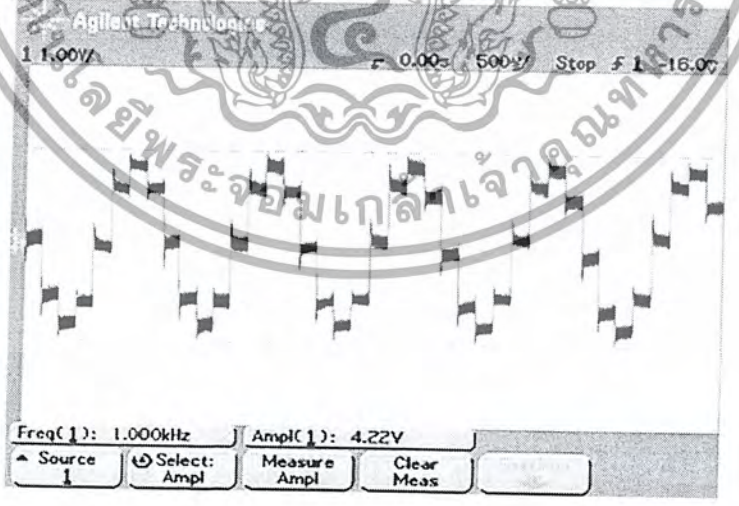
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณที่ได้จากการสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จุด TP14 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP19 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.14



รูปที่ ฉ.14 สัญญาณที่จุด TP14 และ TP19

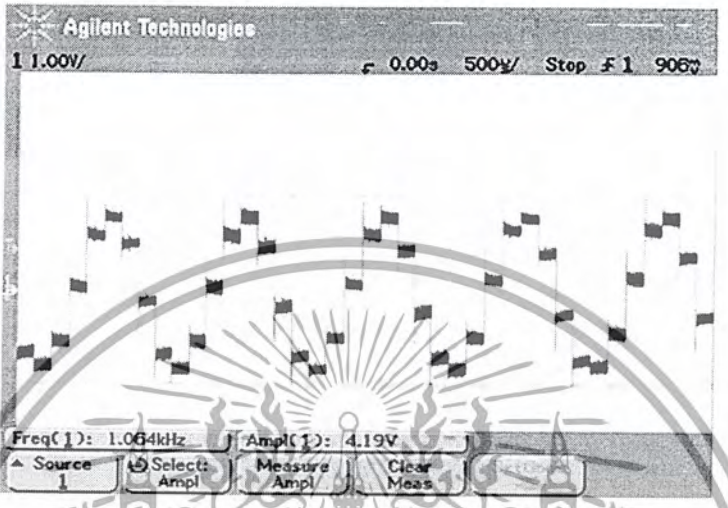
6. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP15 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.15



รูปที่ ฉ.15 สัญญาณที่จุด TP15

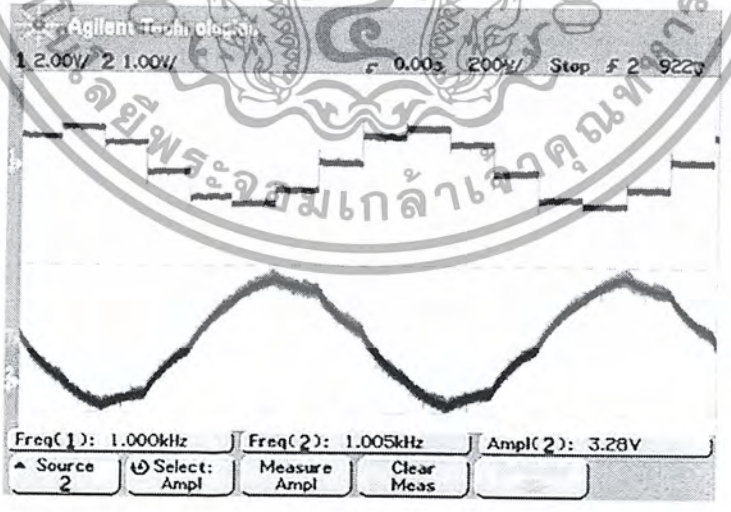
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP16 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.16



รูปที่ ฉ.16 สัญญาณที่จุด TP16

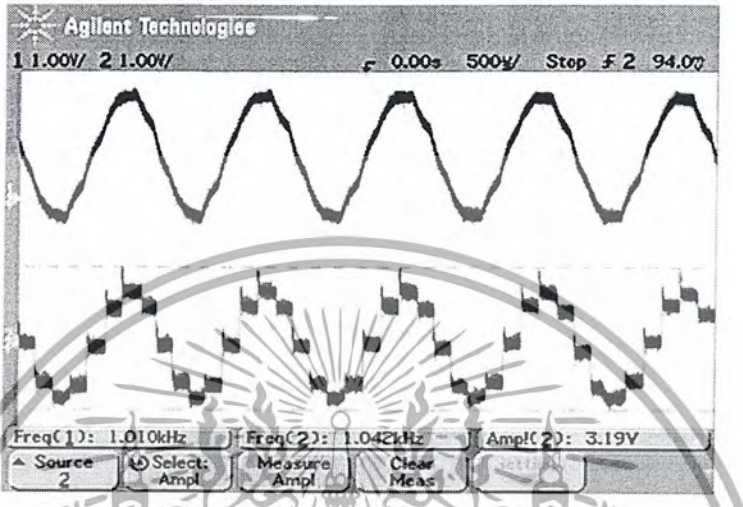
8. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่จุด TP16 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าทำนายที่จุด TP17 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.17



รูปที่ ฉ.17 สัญญาณที่จุด TP16 และ TP17

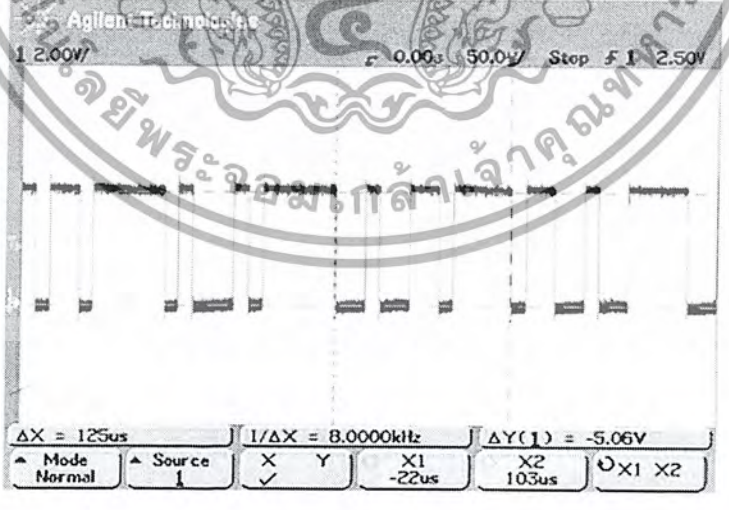
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าทำนายที่จุด TP17 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างที่จุด TP19 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.18



รูปที่ ฉ.18 สัญญาณที่จุด TP17 และ TP19

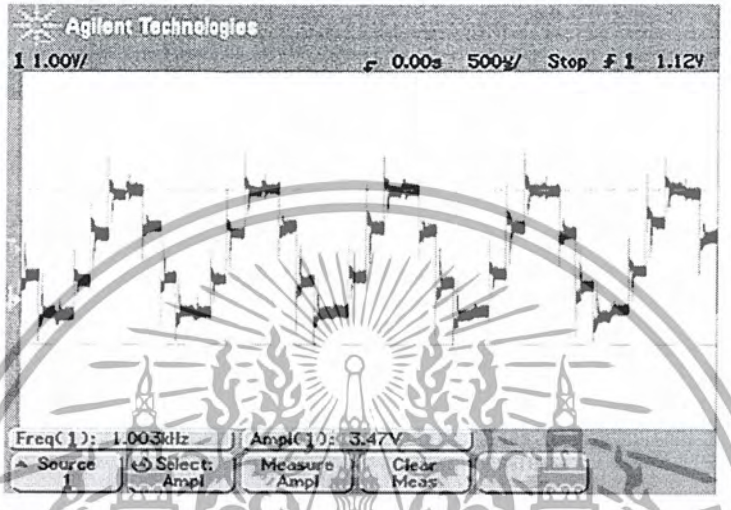
10. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณเอาต์พุตดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.19



รูปที่ ฉ.19 สัญญาณที่จุด TP20

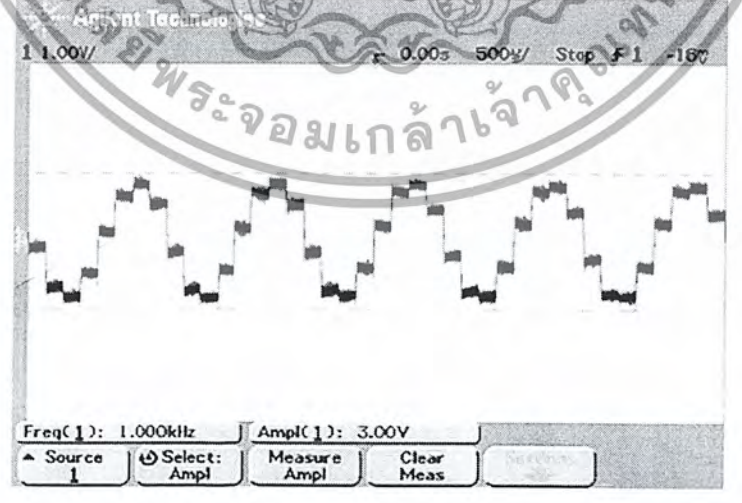
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ทำการเชื่อมต่อสัญญาณจากจุด TP20 ไปยังที่จุด TP21 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณะแอนะลอก ของภาคถอดรหัสที่จุด TP22 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.20



รูปที่ ฉ.20 สัญญาณที่จุด TP22

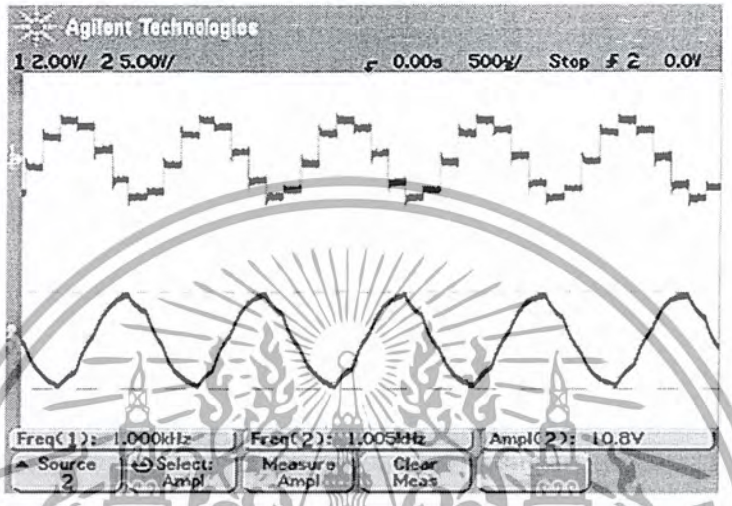
12. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าทำนายของภาคถอดรหัสที่จุด TP24 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.21



รูปที่ ฉ.21 สัญญาณที่จุด TP24

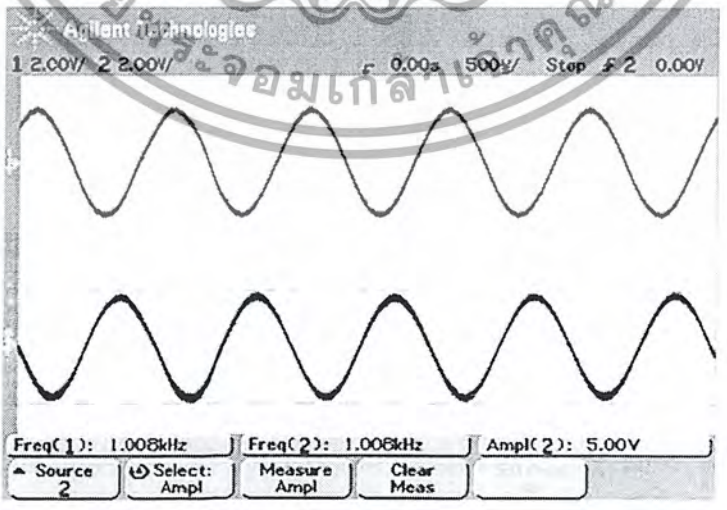
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างของภาคเข้ารหัสที่จุด TP15 และช่อง 2 วัดสัญญาณการสุ่มตัวอย่างของภาคการถอดรหัสที่จุด TP25 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.22



รูปที่ ฉ.22 สัญญาณที่จุด TP15 และ TP25

14. ทำการเชื่อมต่อสัญญาณจากจุด TP25 ไปยังที่จุด TP10 และใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP12 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP11 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.23



รูปที่ ฉ.23 สัญญาณที่จุด TP12 และ TP11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 14 โดยใช้สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง (CLK1 และ CLK2) ความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP13 TP18 และ TP23 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์ และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะสังเกตได้ว่าสัญญาณนาฬิกา CLK2 จะนำหน้า CLK1 เพื่อใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาไว้สุ่มค่าทำนายของภาคเข้ารหัส และจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่จุด TP19 จะล้าหลังสัญญาณที่จุด TP14 และใช้ในการหาสัญญาณค่าผลต่างกับอินพุตที่เข้ามาใหม่ที่จุด TP14 เพื่อให้ได้สัญญาณค่าผลต่างที่จุด TP15 ส่วนสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP12 และสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่จุด TP11 มีความถี่และแอมปลิจูดเท่ากัน

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

ตอบ หลักการเข้ารหัสของระบบดีพีซีเอ็มมีส่วนที่สำคัญคือ การสุ่มและคงค่าสัญญาณ ใช้ในการเก็บตัวอย่างค่าของสัญญาณแอนะลอกที่เข้ามา ซึ่งสัญญาณที่ได้ทำการสุ่มแล้วจะถูกส่งเข้าไปในส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและสัญญาณดิจิตอลที่ได้นี้จะถูกป้อนกลับเข้าไปในส่วนของการทำนายค่าสัญญาณ ซึ่งค่าทำนายที่ได้นี้จะถูกนำไปสุ่มและคงค่าสัญญาณเพื่อนำสัญญาณตัวเดิมกลับคืนมา ใช้ในการหาสัญญาณค่าผลต่างกับอินพุตที่เข้ามาใหม่ และสัญญาณค่าผลต่างที่ได้นี้จะนำมาแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้คือสัญญาณดีพีซีเอ็ม

หลักการทำงานของภาคถอดรหัสจะทำการแปลงข้อมูลสัญญาณดิจิตอลกลับออกมาเป็นสัญญาณแอนะลอก ซึ่งเป็นสัญญาณค่าผลต่างและจะนำสัญญาณค่าผลต่างนี้มาทำการทำนายค่าสัญญาณเพื่อให้เหมือนกับสัญญาณอินพุตทางด้านเข้ารหัส ซึ่งสัญญาณค่าทำนายนี้จะถูกนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้ได้รูปร่างสัญญาณที่ดีขึ้น

2. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP14 และ TP19

ตอบ ที่จุด TP14 แสดงสัญญาณอินพุตที่ผ่านการสุ่ม และที่จุด TP19 แสดงสัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่ม จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองจะมีลักษณะทั้งขนาดและรูปร่างที่เหมือนกันแต่จะต่างกันที่สัญญาณค่าทำนายที่ผ่านการสุ่มจะมีเฟสตามหลังสัญญาณอินพุตที่ผ่านการสุ่มอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

125 ไมโครวินาที (กรณีสุ่มด้วยสัญญาณนาฬิกาความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่เวลาเดียวกันค่าสัญญาณที่จุด TP19 จะเป็นสัญญาณก่อนหน้าจุด TP14

3. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP17

ตอบ ที่จุด TP17 แสดงสัญญาณค่าทำนายซึ่งเป็นสัญญาณที่เกิดจากการรวมสัญญาณค่าผลต่างที่ได้ และสัญญาณค่าทำนายนี้จะมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตเดิม ซึ่งจะนำสัญญาณค่าทำนายนี้ไปทำการสุ่มและคงค่าสัญญาณในขั้นต่อไป

4. สัญญาณดีพีซีเอ็มที่ส่งออกที่จุด TP20 มีการส่งทั้งหมดกี่บิต ประกอบด้วยบิตอะไรบ้าง

ตอบ สัญญาณดีพีซีเอ็มที่ส่งออกที่จุด TP20 มีจำนวน 12 บิต ประกอบด้วยบิตข้อมูล 8 บิต บิตเริ่มต้น 1 บิต และบิตหยุดจำนวน 3 บิต

5. จงเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตที่จุด TP12 และสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่เพราะอะไร

ตอบ สัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 ที่ได้จากตัวกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะมีรูปร่าง ขนาด และความถี่เหมือนกับสัญญาณอินพุตที่จุด TP12 เพียงแต่สัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP11 กลับเฟส 180 องศา แต่ไม่ได้เป็นอุปสรรคในการรับข้อมูลข่าวสารแต่อย่างใด

6. จงบอกข้อดีของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

ตอบ ข้อดีของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างนี้จะอยู่ที่การนำสัญญาณค่าผลต่างมาเข้ารหัสเนื่องจากว่าขนาดของสัญญาณค่าผลต่างนี้มีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต ดังนั้นการเข้ารหัสสัญญาณจะสามารถลดจำนวนบิตที่ใช้ในการเข้ารหัสได้หรือถ้าจำนวนบิตในการเข้ารหัสเท่ากันแล้วสัญญาณที่ได้จะมีความผิดพลาดน้อยลง จากข้อดีนี้ทำให้ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างมีประสิทธิภาพในการใช้งานดีกว่าระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลยใบงานที่ 3

การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสสัญญาณการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 1 ชุด
2. ออสซิสโลสโคป 1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

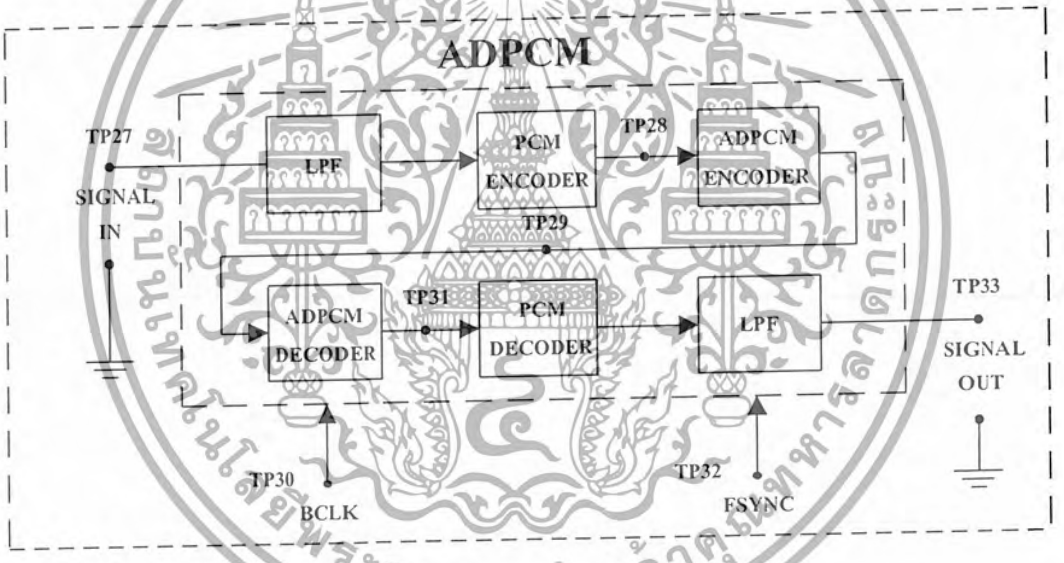
ระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าใช้วงจรแปลงรหัส (Transcoder) ซึ่งทำการแปลงรหัสระหว่างการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบลอการิทึมกับการมอดูเลตแบบปรับค่า ซึ่งระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าจะประกอบไปด้วยวงจรจัดระดับแบบปรับค่าได้และวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้ (Adaptive Quantizer and Adaptive Predictor) วงจรปรับระดับแบบปรับค่าได้นั้นจะประกอบด้วยการควบคุมความเร็วและการปรับขนาด (Speed Control and Scale Factor Adaptation) การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความแตกต่างนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วและการปรับขนาดนั้นทำเพื่อปรับสัญญาณความแตกต่างให้เหมาะสมกับระดับของการจัดระดับ เพื่อให้ได้ค่า S/N ที่มากที่สุดด้วยการควบคุมความเร็วทำให้ระบบสามารถทำได้ทั้งการปรับค่าอย่างรวดเร็วและการปรับค่าอย่างช้า ซึ่งทำให้สามารถใช้งานได้ทั้งสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณข้อมูล ในวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้นั้นการปรับค่าจะนำมาใช้ในการปรับปรุงการทำงานของวงจรทำนายค่าสำหรับสัญญาณที่ไม่คงที่ (เช่นเสียงพูด) การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่านั้นจะมีเครื่องรับอยู่ในเครื่องส่ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากสัญญาณป้อนกลับนั้นจะใช้ในการหาสัญญาณประมาณและสัญญาณความแตกต่างที่ผ่านการจัดระดับแล้ว ซึ่งเหมือนกับการทำงานของวงจรถอดรหัส ดังนั้นการชดเชยค่าความผิดพลาดจากการจัดระดับสามารถทำได้ในสุ่มตัวอย่างผลต่างตามมา

ลำดับขั้นการทดลอง

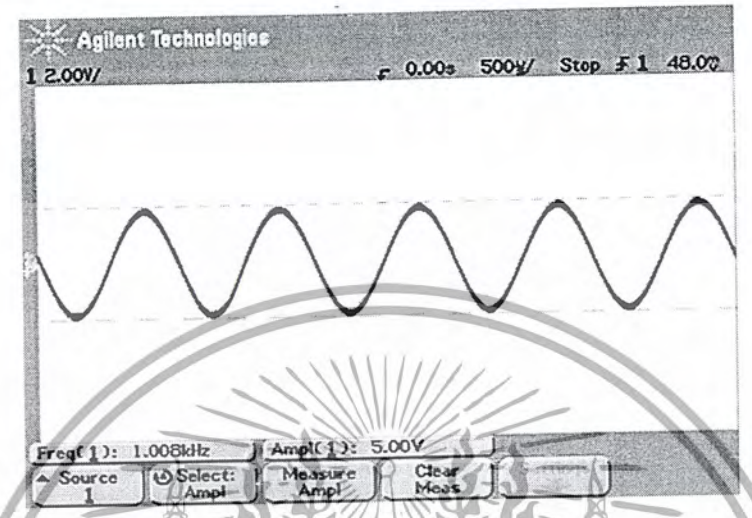
1. จากรูปที่ ฉ.24 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดผลิตความถี่ที่จุด TP27 และสัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 2048 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาที



รูปที่ ฉ.24 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP27 บันทึกผลที่ได้ใน รูปที่ ฉ.25



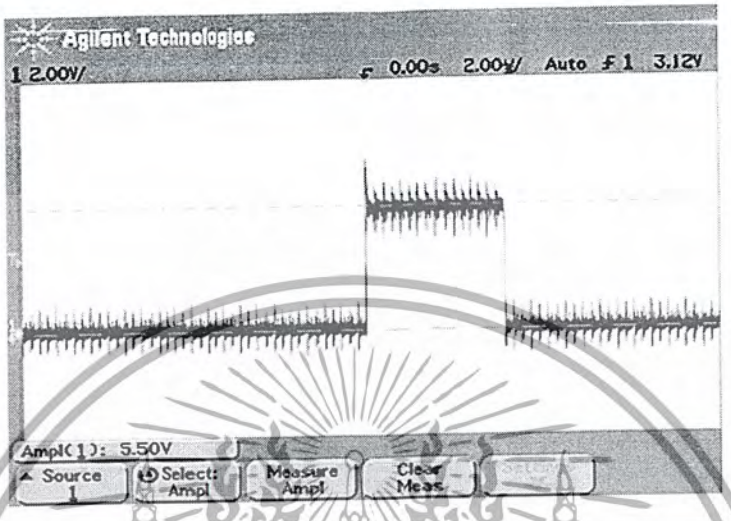
รูปที่ ฉ.25 สัญญาณที่จุด TP27

3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกา BCLK ที่จุด TP30 บันทึกผลที่ได้ใน รูปที่ ฉ.26

รูปที่ ฉ.26 สัญญาณที่จุด TP30

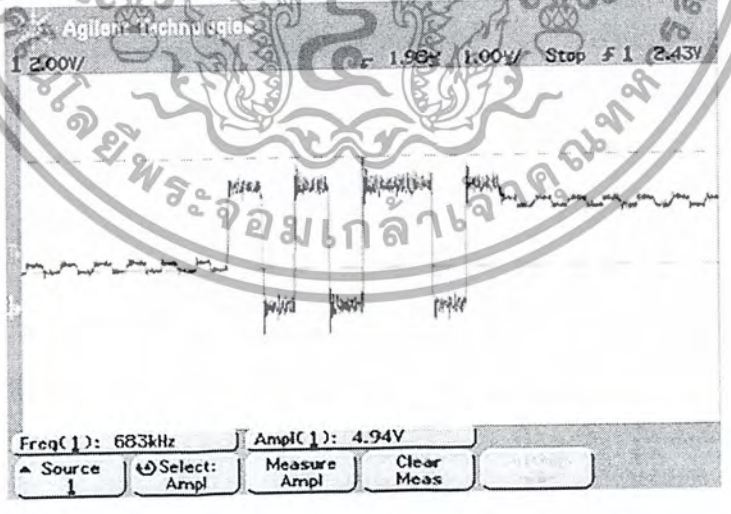
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) ที่จุด TP32 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.27



รูปที่ ฉ.27 สัญญาณที่จุด TP32

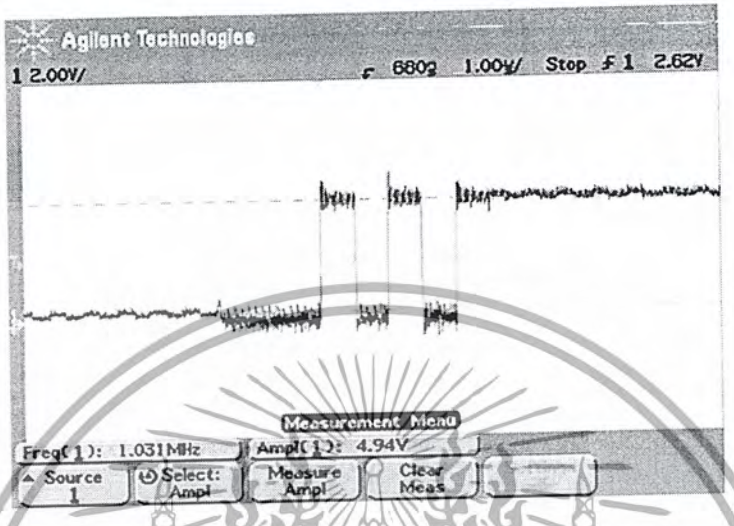
5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสที่จุด TP28 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.28



รูปที่ ฉ.28 สัญญาณที่จุด TP28

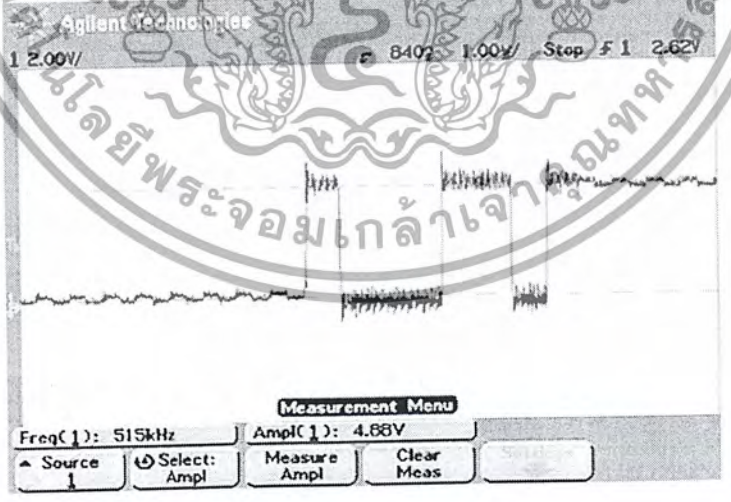
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสจากสัญญาณพีซีเอ็ม ที่จุด TP29 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.29



รูปที่ ฉ.29 สัญญาณที่จุด TP29

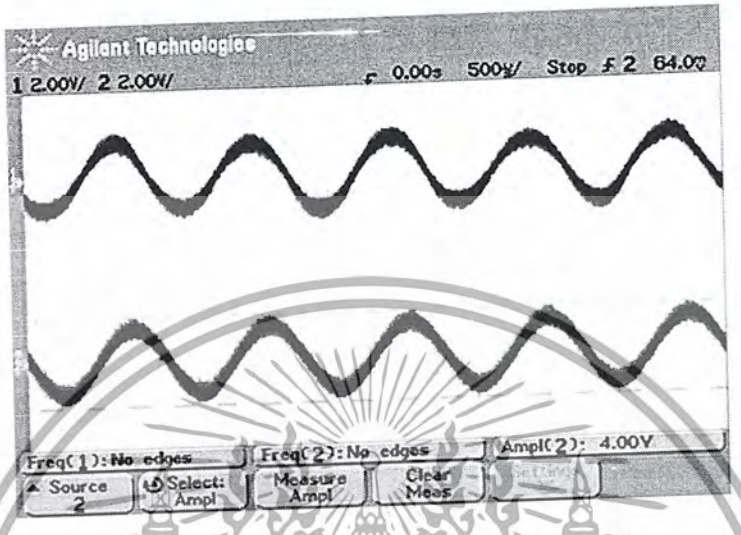
7. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสเป็นสัญญาณ พีซีเอ็มที่จุด TP31 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.30



รูปที่ ฉ.30 สัญญาณที่จุด TP31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP27 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP33 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.31



รูปที่ ฉ.31 สัญญาณที่จุด TP27 และ TP33

9. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 7 โดยใช้สัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์ และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 32, 24 และ 16 กิโลบิตต่อวินาที และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะสังเกตได้ว่าสัญญาณพีซีเอ็มที่จุด TP28 และสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสโดยสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31 มีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากัน ส่วนสัญญาณที่จุด TP29 จะมีจำนวนบิตข้อมูลครึ่งหนึ่งของจุด TP28 และที่จุด TP31 ส่วนสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตที่จุด TP33 จะมีแอมปลิจูดเท่ากันกับสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่จุด TP27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

ตอบ การเข้ารหัสไม่ได้เข้ารหัสด้วยวิธีการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มโดยตรง แต่เป็นการเข้ารหัสด้วยการเข้ารหัสสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณพีซีเอ็มก่อน แล้วจึงทำการแปลงสัญญาณพีซีเอ็มให้เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มตามที่ต้องการและในทำนองเดียวกันสำหรับการถอดรหัสจะทำการแปลงสัญญาณเอดีพีซีเอ็มให้เป็นสัญญาณพีซีเอ็มก่อนแล้วจากนั้นจึงทำการถอดรหัสสัญญาณพีซีเอ็มกลับมาเป็นสัญญาณเสียงดังเดิม

2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP28 และ TP31

ตอบ ที่จุด TP28 เป็นสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสมาแล้วเพื่อส่งออกไปเข้ารหัสเป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มต่อไป ส่วนสัญญาณที่จุด TP31 เป็นสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสมาจากสัญญาณเอดีพีซีเอ็มเพื่อส่งออกไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านให้ได้สัญญาณอินพุตเดิมกลับคืนมา สัญญาณทั้งสองจะเป็นสัญญาณเดียวกันที่ผ่านการบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสออกมาเป็นสัญญาณเดิม

3. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP29

ตอบ ที่จุด TP29 เป็นสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ได้จากการเข้ารหัสสัญญาณพีซีเอ็มเพื่อส่งออกไปไปยังภาคถอดรหัสสัญญาณเอดีพีซีเอ็มต่อไป

4. จงเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตที่จุด TP27 และสัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP33 ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

ตอบ สัญญาณเอาต์พุตที่จุด TP33 ที่ได้จากตัวกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะมีรูปร่าง ขนาด และความถี่เหมือนกับสัญญาณอินพุตที่จุด TP27

5. จงบอกข้อดีของระบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

ตอบ ข้อดีของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า คือสามารถปรับขนาดและควบคุมความเร็วของการเข้ารหัส สามารถชดเชยค่าผิดพลาดของสัญญาณทำให้สัญญาณที่ได้นั้นมีคุณภาพใกล้เคียงสัญญาณอินพุตที่เข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 4

ความแตกต่างระหว่าง PCM DPCM และ ADPCM

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายความแตกต่างระหว่างการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง และการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่าได้
2. ประกอบชุดทดลองสำหรับการทดลองได้
3. วัดค่าและรูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ในชุดทดลองได้
4. บันทึกค่าและรูปสัญญาณได้
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ 1 ชุด
2. ออสซิลโลสโคป 1 เครื่อง

ทฤษฎีเบื้องต้น

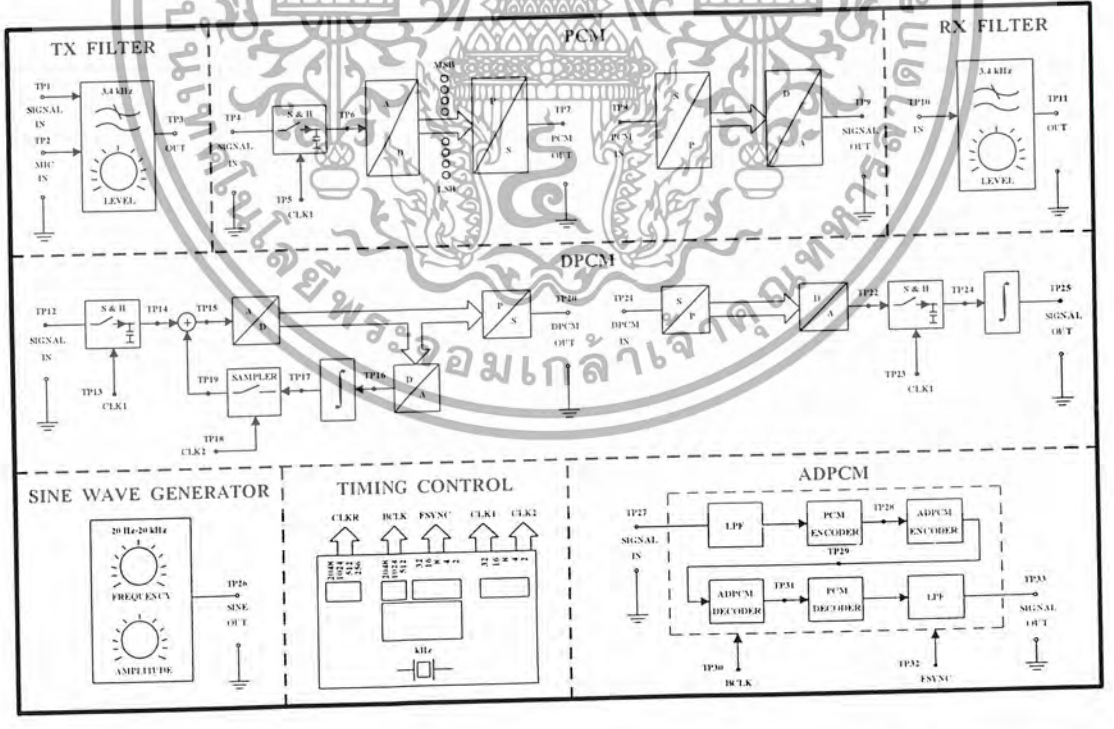
การเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ จะพบว่าสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างมีหลายสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีการจัดระดับสัญญาณให้มีรหัสเดียวกัน จึงทำให้เกิดการส่งสัญญาณพีซีเอ็มที่มีรหัสเดียวกันออกไปหลายๆ ครั้งในเวลาติดๆกัน ซึ่งจะสามารถลดความซ้ำซ้อนของรหัสเหล่านี้ได้โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง จะยอมให้มีการส่งรหัสที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่สุ่มได้ออกไปเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดความละเอียดของรหัสที่ใช้ในการจัดระดับสัญญาณลงได้อย่างมาก โดยมีการใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอกที่ส่งสัญญาณออกไปกลับมาหักล้างกับสัญญาณอินพุตที่สุ่มได้ในครั้งต่อไป สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาใหม่นี้จะเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ซึ่งเกิดจากการรวมกับสัญญาณที่สร้างกับขึ้นมาในครั้งก่อนๆ โดยสังเกตได้จากการใช้ภาคอินทีเกรเตอร์ การถอดรหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง เพื่อสร้างสัญญาณแอนะลอกกลับขึ้นมานั้นจะมีกระบวนการที่เหมือนกับการสร้างสัญญาณแอนะลอกกลับขึ้นมาที่ภาคส่ง นอกจากนี้แล้วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสื่อสารจะมีการเข้ารหัสแบบการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า ที่แตกต่างจากนี้ไปเช่น การเข้ารหัสแบบปรับค่า ซึ่งจะทำให้การสร้างสัญญาณกลับขึ้นมาเป็นแบบปรับค่าและการจัดระดับสัญญาณก็เป็นแบบปรับค่าซึ่งจะมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยลดความซ้ำซ้อนของรหัสที่ได้ทำให้ความละเอียดของรหัสที่ได้มีจำนวนน้อยลงและทำให้อัตราข้อมูลลดลงตามไปด้วย

ลำดับขั้นการทดลอง

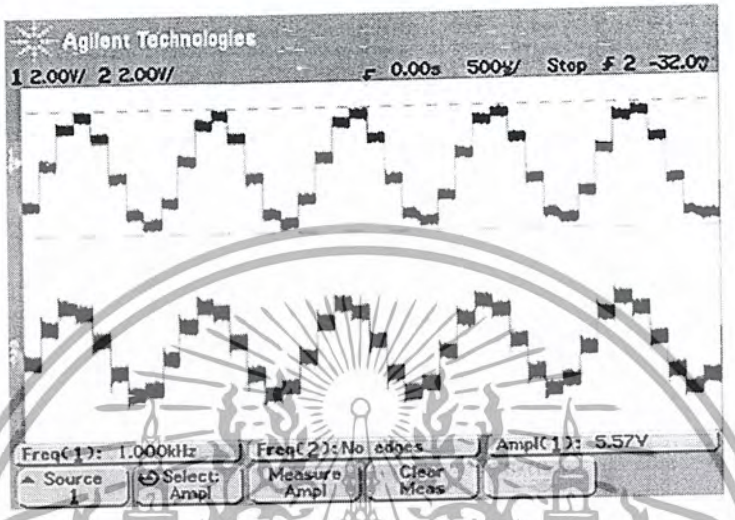
1. จากรูปที่ ฉ.32 ป้อนสัญญาณแอนะลอกความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ขนาด 5 V_{p-p} จากชุดผลิตความถี่ที่จุด TP4 TP12 และ TP27 และป้อนสัญญาณนาฬิกา (CLK1) ความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5 TP13 และ TP23 และสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล และสัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 2048 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 8 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาที



รูปที่ ฉ.32 แผนผังการทำงานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

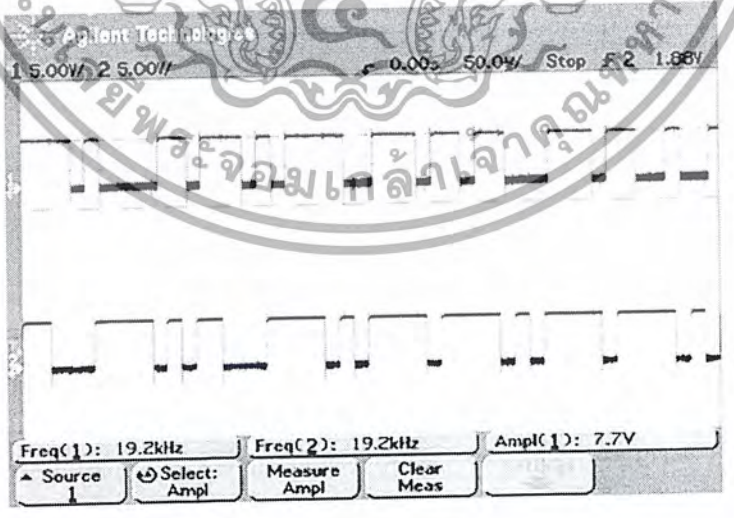
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณการสุ่มและคงค่าสัญญาณในระบบพีซีเอ็ม ที่จุด TP6 และช่อง 2 วัดสัญญาณค่าผลต่างที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP15 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.33



รูปที่ ฉ.33 สัญญาณที่จุด TP6 และ TP15

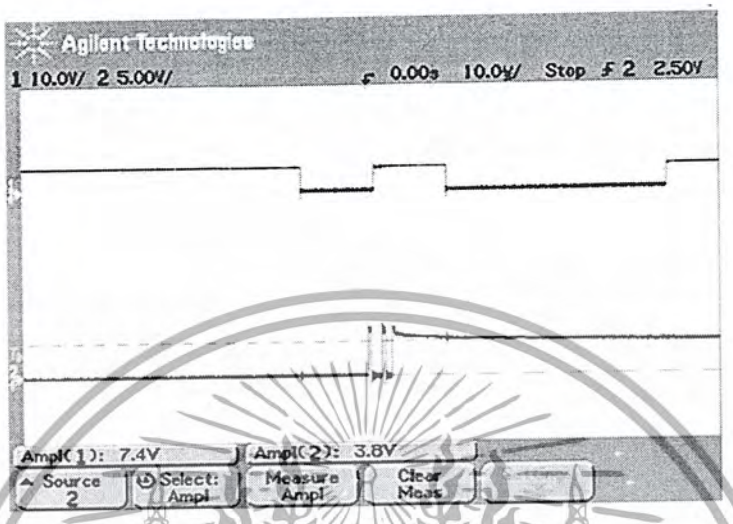
3. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP7 และช่อง 2 วัดสัญญาณดีพีซีเอ็มในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.34



รูปที่ ฉ.34 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP20

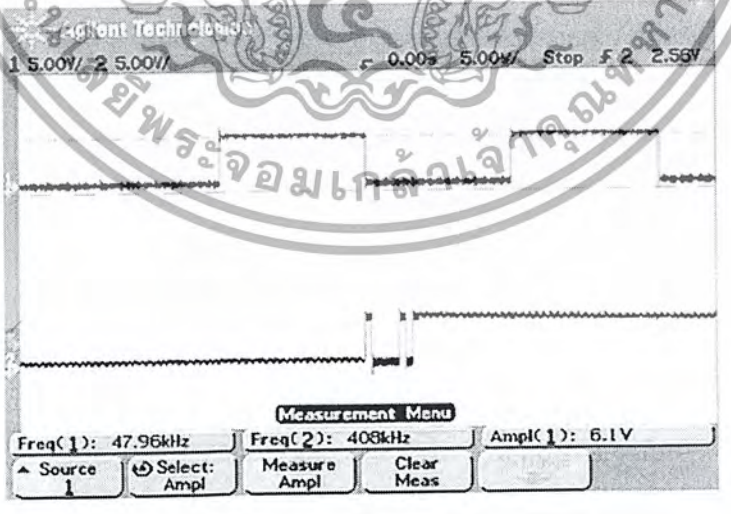
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP7 และช่อง 2 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP28 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.35



รูปที่ ฉ.35 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP28

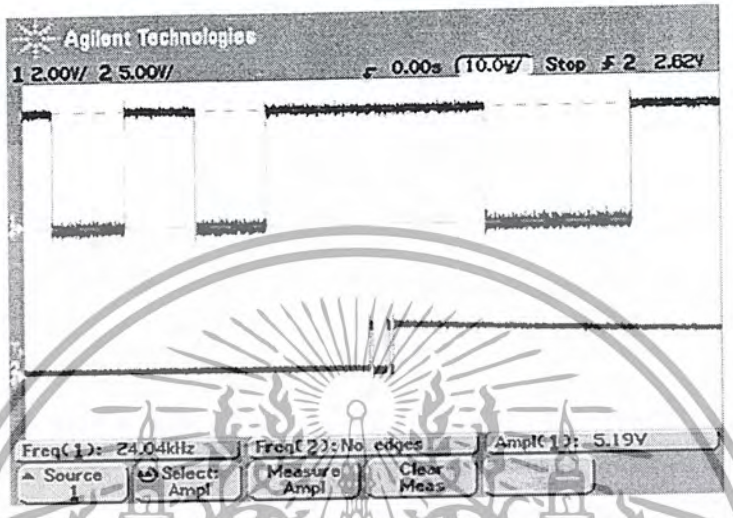
5. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณดีพีซีเอ็มในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 และช่อง 2 วัดสัญญาณพีซีเอ็มที่ผ่านการเข้ารหัสในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP28 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.36



รูปที่ ฉ.36 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP28

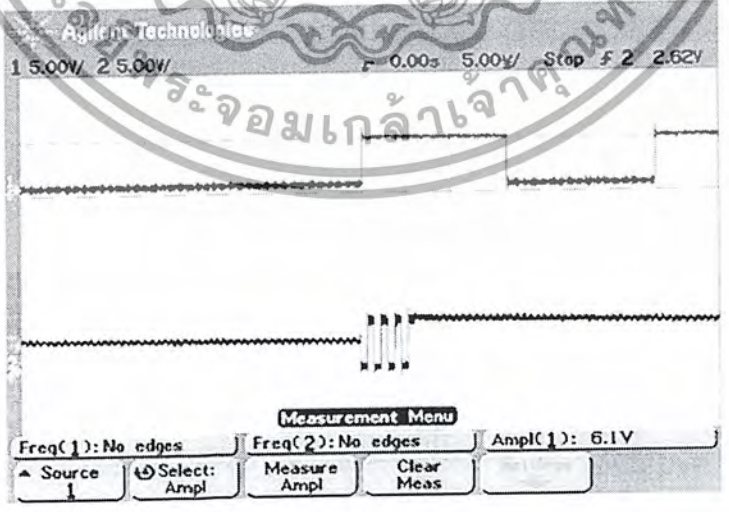
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณพีซีเอ็มในระบบพีซีเอ็ม ที่จุด TP7 และช่อง 2 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสเป็นสัญญาณพีซีเอ็มในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.37



รูปที่ ฉ.37 สัญญาณที่จุด TP7 และ TP31

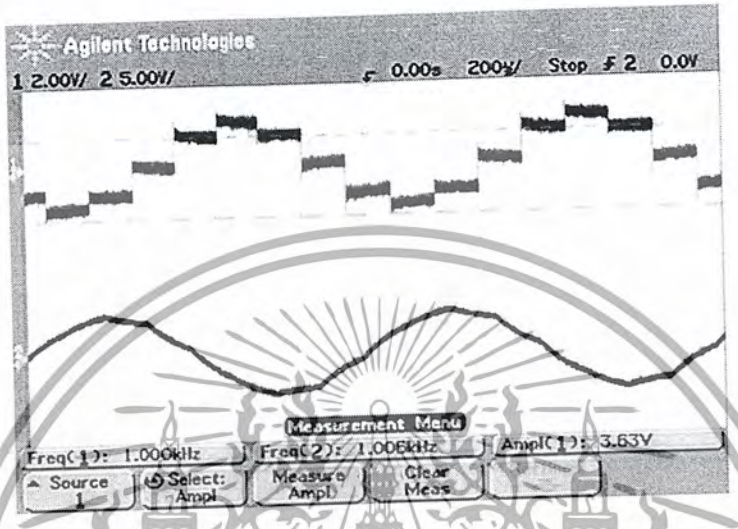
7. ใช้ออสซิลโลสโคปช่องที่ 1 วัดสัญญาณดีพีซีเอ็มในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP20 และช่อง 2 วัดสัญญาณเอดีพีซีเอ็มที่ผ่านการถอดรหัสเป็นสัญญาณพีซีเอ็มในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP31 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.38



รูปที่ ฉ.38 สัญญาณที่จุด TP20 และ TP31

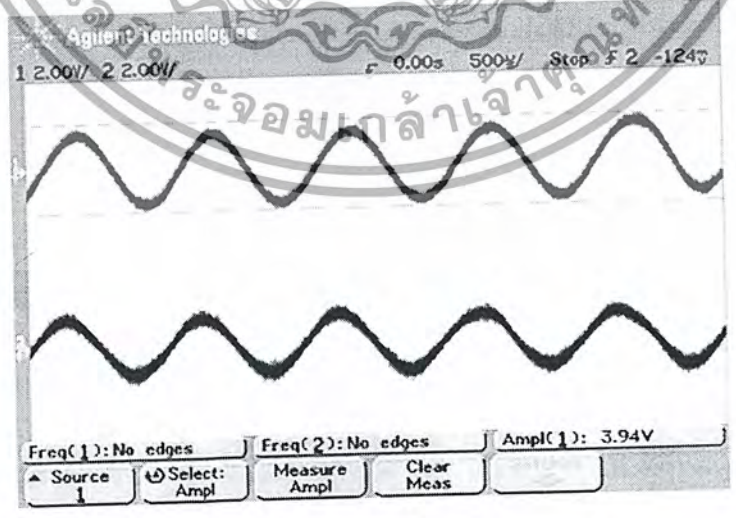
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เชื่อมต่อจากจุด TP7 ไปที่จุด TP8 และเชื่อมต่อจากจุด TP20 ไปที่จุด TP21 ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP9 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP25 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.39



รูปที่ ฉ.39 สัญญาณที่จุด TP9 และ TP25

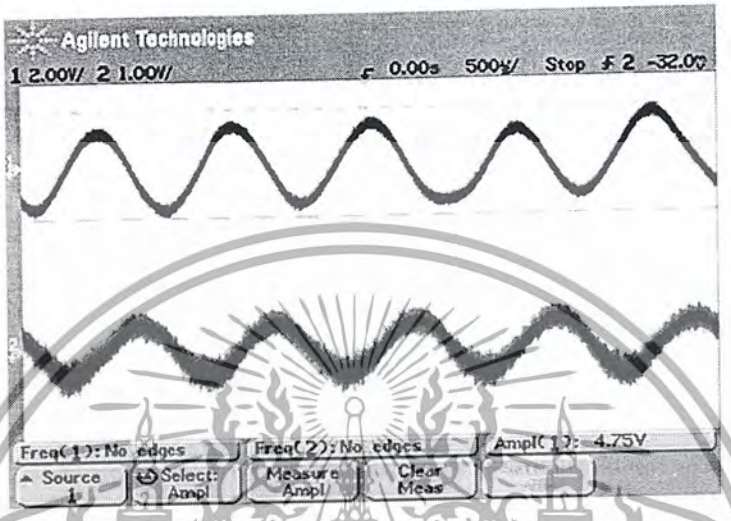
9. เชื่อมต่อจากจุด TP9 ไปที่จุด TP10 และ ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบพีซีเอ็มที่จุด TP11 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.40



รูปที่ ฉ.40 สัญญาณที่จุด TP11 และ TP33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เชื่อมต่อจากจุด TP25 ไปที่จุด TP10 และ ใช้ออสซิลโลสโคปช่อง 1 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP11 และช่อง 2 วัดสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33 บันทึกผลที่ได้ในรูปที่ ฉ.41



รูปที่ ฉ.41 สัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบดีพีซีเอ็มที่จุด TP11
และสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตในระบบเอดีพีซีเอ็มที่จุด TP33

11. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 10 โดยใช้สัญญาณนาฬิกา (CLK1) ความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์ และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP5, TP13 และ TP23 และสัญญาณนาฬิกา (CLK2) ที่จุด TP18 และป้อนสัญญาณนาฬิกา CLKR ความถี่ 256 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล และสัญญาณนาฬิกา BCLK เลือกความถี่ 512 กิโลเฮิรตซ์และ 1024 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP30 และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล (FSYNC) เลือกความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์และ 16 กิโลเฮิรตซ์ที่จุด TP32 และกำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลเป็น 32, 24 และ 16 กิโลบิตต่อวินาที และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลในระบบเอดีพีซีเอ็มจะลดอัตราการส่งข้อมูลที่แปลงเป็นพีซีเอ็ม ซึ่งยังคงรักษาคุณภาพของข้อมูลและความสามารถของสัญญาณพีซีเอ็ม เพราะสังเกตได้จากสัญญาณแอนะลอกเอาต์พุตว่ามีความใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตเดิม ซึ่งต่างจากการส่งในระบบพีซีเอ็มและระบบดีพีซีเอ็มที่ไม่มีการลดอัตราการส่งข้อมูล ซึ่งต้องการสัญญาณในการส่งที่มีขนาดแบนด์วิดธ์กว้าง ดังจะเห็นได้จากสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP7 วัดเทียบกับ TP31 หรือ TP20 วัดเทียบกับ TP31 ว่ามีความกว้างของแบนด์วิดธ์มากกว่า ดังนั้นการส่งข้อมูลในระบบเอดีพีซีเอ็มจึงนำไปใช้งานเกี่ยวกับความปลอดภัยของสัญญาณเสียงในการส่งไปในสายส่งบนช่องสัญญาณวิทยุซึ่งมีความจุต่ำ

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายความแตกต่างของการเข้ารหัสและถอดรหัสของการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ทั้ง 3 แบบ

ตอบ การมอดูเลตแบบพีซีเอ็มจะมีอัตราการส่งข้อมูลมาตรฐาน 64 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งช่องสัญญาณในการส่งมีขนาดแบนด์วิดธ์กว้าง จึงได้มีการพัฒนาการมอดูเลตอีก 2 แบบคือ

การมอดูเลตแบบดีพีซีเอ็มเป็นการมอดูเลตที่ลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล โดยการหาค่าผลต่างของสัญญาณแล้วนำมาเข้ารหัสทำให้สามารถเพิ่มความจุของข้อมูลในการส่งไปในช่องสัญญาณได้ดีกว่าการมอดูเลตแบบพีซีเอ็ม

การมอดูเลตแบบเอดีพีซีเอ็มมีความแตกต่างจากการมอดูเลตทั้ง 2 แบบกล่าวคือจะมีอัตราการส่งข้อมูล 32 กิโลบิตต่อวินาที เป็นการนำสัญญาณพีซีเอ็มมาเข้ารหัสด้วยวงจรปรับระดับแบบปรับค่าได้และวงจรทำนายค่าแบบปรับค่าได้ ซึ่งสามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณเป็น 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการมอดูเลตแบบพีซีเอ็มที่มีการส่งข้อมูลมาตรฐานที่ 64 กิโลบิตต่อวินาที

2. จงอธิบายสัญญาณที่วัดได้ที่จุด TP7, TP20 และ TP29 ว่ามีความแตกต่างกันหรือเหมือนกันอย่างไร

ตอบ ที่จุด TP7 เป็นสัญญาณดิจิตอลที่ได้จากระบบพีซีเอ็ม ที่จุด TP20 เป็นสัญญาณดิจิตอลที่ได้จากระบบดีพีซีเอ็ม และที่จุด TP29 เป็นสัญญาณดิจิตอลที่ได้จากระบบเอดีพีซีเอ็ม ซึ่งสัญญาณที่ได้จากระบบพีซีเอ็มและดีพีซีเอ็มจะมีอัตราการส่งข้อมูลและจำนวนบิตเท่ากัน ซึ่งต่างจากระบบเอดีพีซีเอ็มที่มีการลดอัตราการส่งข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช
คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งาน
ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

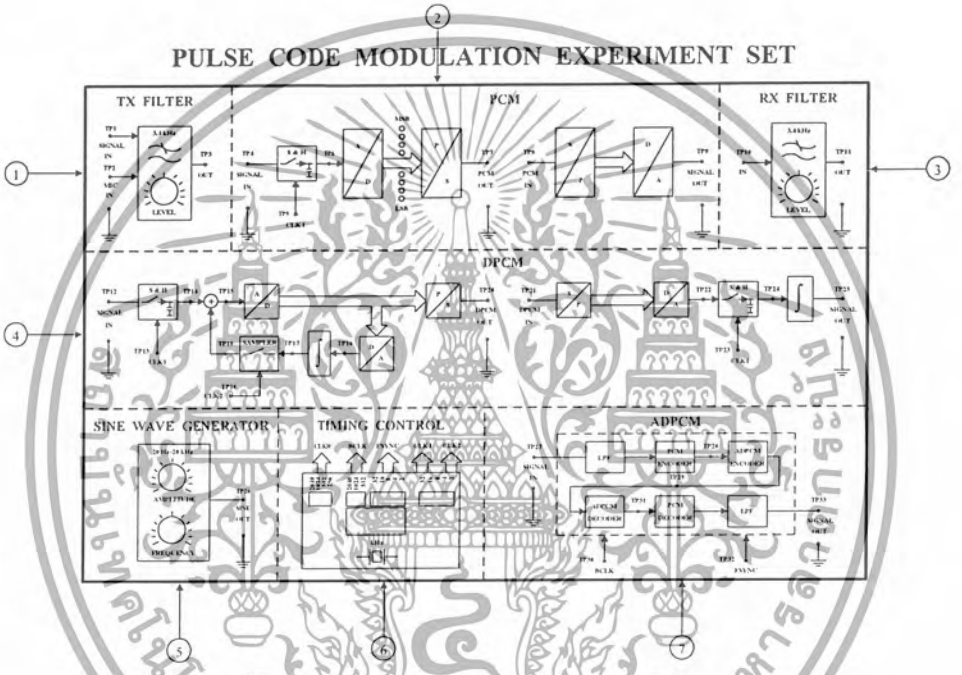
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.คำแนะนำเบื้องต้น

ก่อนที่จะลงมือใช้งานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ควรทำการศึกษาการใช้งานจากคู่มือให้เข้าใจเพื่อผลการวัดสัญญาณที่ถูกต้อง และเป็นการป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

2. ส่วนประกอบและชุดควบคุม



รูปที่ ช.1 ส่วนประกอบและชุดควบคุมของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

จากรูปที่ ช.1 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

① ชุดกรองความถี่ 3.4 กิโลเฮิรตซ์ภาคส่ง

② ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

③ ชุดกรองความถี่ 3.4 กิโลเฮิรตซ์ภาครับ

④ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

⑤ ชุดกำเนิดสัญญาณไซน์

⑥ ชุดสัญญาณนาฬิกาควบคุม

⑦ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การติดตั้งและใช้งาน

ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ประกอบไปด้วยชุดทดลอง 3 ส่วนด้วยกันคือ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

3.1 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

1) ป้อนสัญญาณย่านความถี่เสียงจากชุดกำเนิดสัญญาณไซน์ที่จุด TP26 และเชื่อมต่อเข้าที่จุด TP4

2) กำหนดสัญญาณนาฬิกาควบคุม CLK1 และ CLKR

3) เชื่อมต่อที่จุด TP7 เข้าที่จุด TP8 และที่จุด TP9 เข้าที่จุด TP10

4) ทำการวัดทดสอบสัญญาณที่จุดต่างๆ

3.2 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

1) ป้อนสัญญาณย่านความถี่เสียงจากชุดกำเนิดสัญญาณไซน์ที่จุด TP26 และเชื่อมต่อเข้าที่จุด TP12

2) ทำการกำหนดสัญญาณควบคุม CLK1 CLK2 และ CLKR

3) ทำการเชื่อมต่อที่จุด TP20 เข้าที่จุด TP21 และที่จุด TP25 เข้าที่จุด TP10

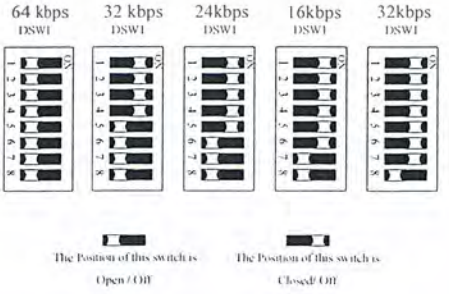
4) ทำการวัดทดสอบสัญญาณที่จุดต่างๆ

3.3 ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

1) ป้อนสัญญาณย่านความถี่เสียงจากชุดกำเนิดสัญญาณไซน์ที่จุด TP26 และเชื่อมต่อเข้าที่จุด TP27

2) กำหนดสัญญาณควบคุม BCLK และ FSYNC

3) การกำหนดค่าอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลในระบบเอดีพีซีเอ็ม ที่กำหนดได้จากดิปสวิตซ์ให้มีขนาด 16, 24, 32 และ 64 กิโลบิตต่อวินาทีทำได้ดังนี้



รูปที่ ช.2 การกำหนดค่าจากดิปสวิตซ์ที่ใช้ในการกำหนดค่าอัตราเร็วของสัญญาณเอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) วัดทดสอบสัญญาณที่จุดต่างๆ

4.การแก้ปัญหาเบื้องต้น

เมื่อท่านประสบปัญหาการใช้งานชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ ไม่สามารถทำการวัดสัญญาณได้ หรือสัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนให้ทำการตรวจสอบสัญญาณควบคุมว่าได้กำหนดค่าถูกต้องแล้วหรือไม่และทำการวัดทดสอบสัญญาณใหม่

5. การดูแลรักษาและข้อควรระวัง

5.1 การดูแลรักษา

1) ไม่ควรเก็บชุดทดลองในที่อุณหภูมิสูง หรือมีความชื้นสูง ควรวางไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิพอเหมาะ
2) เช็ดทำความสะอาดชุดทดลองด้วยผ้านุ่ม อย่าใช้สารใดๆ ที่เป็นตัวทำลายเพราะทำให้ชุดทดลองเป็นรอยเสียหายได้
3) ถอดสายเชื่อมต่อออกจากชุดทดลองทุกครั้งหลังใช้งาน

5.2 ข้อควรระวัง

1) ระวังความชื้นอันอาจจะทำให้วงจรภายในของชุดทดลองเกิดความเสียหายได้
2) สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้อินพุตของชุดทดลองเป็นย่านความถี่เสียงเท่านั้น
3) ขณะทำการทดลองไม่ควรอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

6. ข้อมูลจำเพาะ

ตารางที่ ช.1 ข้อมูลจำเพาะของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
แหล่งจ่ายพลังงาน	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 - 60 เฮิรตซ์
ระบบพีซีเอ็ม	การมอดูเลตสัญญาณแบบดิจิตอล
- สัญญาณอินพุต	สัญญาณความถี่คลื่นไซน์ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 0 - 20 กิโลเฮิรตซ์ ระดับแอมปลิจูดตั้งแต่ 0 - 5 โวลต์
- สัญญาณนาฬิกา CLK1	สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่จุด TP5 ความถี่ 2, 4, 8, 16 และ 32 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.1 (ต่อ) ข้อมูลจำเพาะของชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
- สัญญาณนาฬิกา CLKR	สัญญาณนาฬิกาที่ป้อนให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ความถี่ 256, 512, 1024, และ 2048 กิโลเฮิรตซ์
ระบบดีพีซีเอ็ม	พัฒนามาจากระบบพีซีเอ็มเพื่อลดความซ้ำซ้อนของสัญญาณ
- สัญญาณอินพุต	สัญญาณความถี่คลื่นไซน์ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 0 – 20 กิโลเฮิรตซ์ ระดับแอมปลิจูดตั้งแต่ 0 - 5 โวลต์
- สัญญาณนาฬิกา CLK1	สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่จุด TP13 และ TP23 ความถี่ 2, 4, 8, 16 และ 32 กิโลเฮิรตซ์
- สัญญาณนาฬิกา CLK2	สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่จุด TP18 ความถี่ 2, 4, 8, 16 และ 32 กิโลเฮิรตซ์
- สัญญาณนาฬิกา CLKR	สัญญาณนาฬิกาที่ป้อนให้กับตัวแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ความถี่ 256, 512, 1024, และ 2048 กิโลเฮิรตซ์
ระบบเอดีพีซีเอ็ม	พัฒนามาจากระบบพีซีเอ็มและดีพีซีเอ็มสามารถกำหนดค่าอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลได้
- สัญญาณอินพุต	สัญญาณความถี่คลื่นไซน์ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 0 - 20 กิโลเฮิรตซ์ระดับแอมปลิจูดตั้งแต่ 0 - 5 โวลต์
- สัญญาณนาฬิกา BCLK	ความถี่ 512, 1024, และ 2048 กิโลเฮิรตซ์
- สัญญาณนาฬิกา FSYNC	สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูล ความถี่ 2, 4, 8, 16 และ 32 กิโลเฮิรตซ์
- กำหนดค่าอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล	กำหนดเป็น 16, 24, 32 และ 64 กิโลบิตต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ

รายละเอียดและคุณสมบัติของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

February 1995

National Semiconductor

ADC0800 8-Bit A/D Converter

General Description

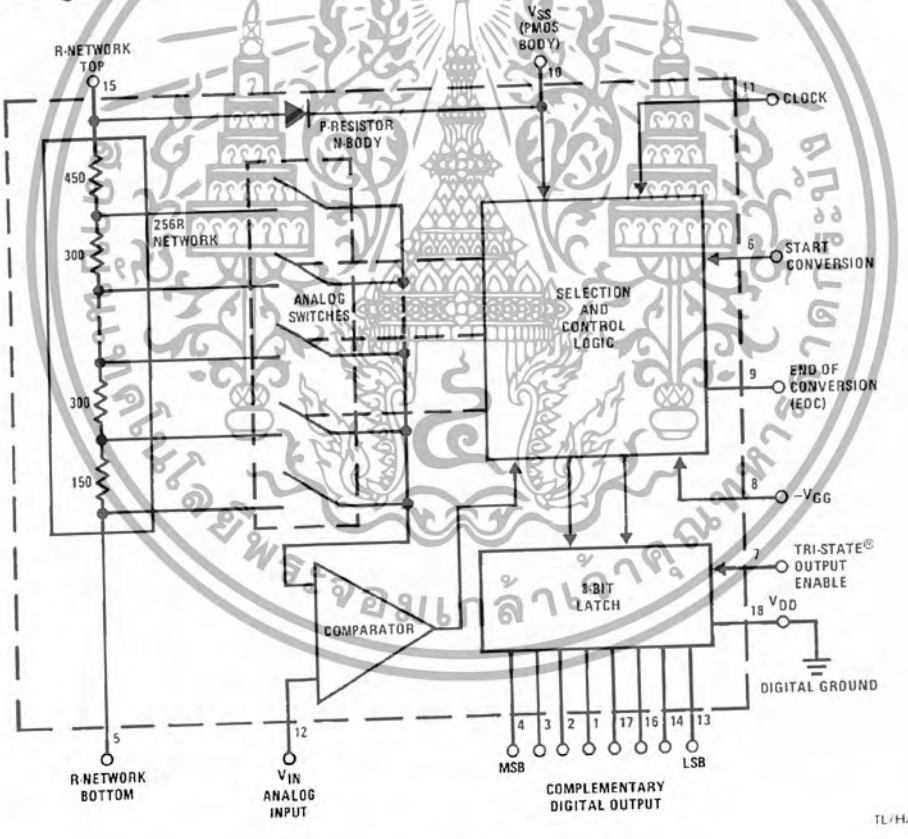
The ADC0800 is an 8-bit monolithic A/D converter using P-channel ion-implanted MOS technology. It contains a high input impedance comparator, 256 series resistors and analog switches, control logic and output latches. Conversion is performed using a successive approximation technique where the unknown analog voltage is compared to the resistor tie points using analog switches. When the appropriate tie point voltage matches the unknown voltage, conversion is complete and the digital outputs contain an 8-bit complementary binary word corresponding to the unknown. The binary output is TRI-STATE® to permit bussing on common data lines.

The ADC0800PD is specified over −55°C to +125°C and the ADC0800PCD is specified over 0°C to 70°C.

Features

- Low cost
- ±5V, 10V input ranges
- No missing codes
- Ratiometric conversion
- TRI-STATE outputs
- Fast — $T_C = 50\ \mu s$
- Contains output latches
- TTL compatible
- Supply voltages — 5 V_{DC} and −12 V_{DC}
- Resolution — 8 bits
- Linearity — ±1 LSB
- Conversion speed — 40 clock periods
- Clock range — 50 to 800 kHz

Block Diagram



(00000000 = −full-scale)

TRI-STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage (V_{DD})	$V_{SS}-22V$
Supply Voltage (V_{GG})	$V_{SS}-22V$
Voltage at Any Input	$V_{SS}+0.3V$ to $V_{SS}-22V$
Input Current at Any Pin (Note 2)	5 mA
Package Input Current (Note 2)	20 mA
Power Dissipation (Note 3)	875 mW
ESD Susceptibility (Note 4)	500V
Storage Temperature	150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	300°C

Operating Ratings (Note 1)

Temperature Range	$T_{MIN} \le T_A \le T_{MAX}$
ADC0800PD	$-55°C \le T_A \le +125°C$
ADC0800PCD	$0°C \le T_A \le +70°C$

Electrical Characteristics

These specifications apply for $V_{SS}=5.0\ V_{DC}$, $V_{GG}=-12.0\ V_{DC}$, $V_{DD}=0\ V_{DC}$, a reference voltage of 10.000 V_{DC} across the on-chip R-network ($V_{R\text{-NETWORK TOP}}=5.000\ V_{DC}$ and $V_{R\text{-NETWORK BOTTOM}}=-5.000\ V_{DC}$), and a clock frequency of 800 kHz. For all tests, a 475Ω resistor is used from pin 5 to $V_{R\text{-NETWORK BOTTOM}}=-5\ V_{DC}$. Unless otherwise noted, these specifications apply over an ambient temperature range of −55°C to +125°C for the ADC0800PD and 0°C to +70°C for the ADC0800PCD.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Non-Linearity	$T_A=25°C$, (Note 8)			±1	LSB
	Over Temperature, (Note 8)			±2	LSB
Differential Non-Linearity				±½	LSB
Zero Error				±2	LSB
Zero Error Temperature Coefficient	(Note 9)			0.01	%/°C
Full-Scale Error				±2	LSB
Full-Scale Error Temperature Coefficient	(Note 9)			0.01	%/°C
Input Leakage				1	μA
Logical "1" Input Voltage	All Inputs	$V_{SS}-1.0$		V_{SS}	V
Logical "0" Input Voltage	All Inputs	V_{GG}		$V_{SS}-4.2$	V
Logical Input Leakage	$T_A=25°C$, All Inputs, $V_{IL}=V_{SS}-10V$			1	μA
Logical "1" Output Voltage	All Outputs, $I_{OH}=-100\ \mu A$	2.4			V
Logical "0" Output Voltage	All Outputs, $I_{OL}=1.6\ mA$			0.4	V
Disabled Output Leakage	$T_A=25°C$, All Outputs, $V_{OL}=V_{SS}@10V$			2	μA
Clock Frequency	$0°C \le T_A \le +70°C$	50		800	kHz
	$-55°C \le T_A \le +125°C$	100		500	kHz
Clock Pulse Duty Cycle		40		60	%
TRI-STATE Enable/Disable Time				1	μs
Start Conversion Pulse	(Note 10)	1		3½	Clock Periods
Power Supply Current	$T_A=25°C$			20	mA

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

Note 2: When the input voltage (V_{IN}) at any pin exceeds the power supply rails ($V_{IN} < V^-$ or $V_{IN} > V^+$) the absolute value of current at that pin should be limited to 5 mA or less. The 20 mA package input current limits the number of pins that can exceed the power supply boundaries with a 5 mA current limit to four.

Note 3: The maximum power dissipation must be derated at elevated temperatures and is dictated by T_{JMAX}, θ_{JA}, and the ambient temperature, T_A. The maximum allowable power dissipation at any temperature is $P_D=(T_{JMAX}-T_A)/\theta_{JA}$ or the number given in the Absolute Maximum Ratings, whichever is lower. For this device, $T_{JMAX}=125°C$, and the typical junction-to-ambient thermal resistance of the ADC0800PD and ADC0800PCD when board mounted is 66°C/W.

Note 4: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor.

Note 5: Typicals are at 25°C and represent most likely parametric norm.

Note 6: Tested limits are guaranteed to National's AOQL (Average Outgoing Quality Level).

Note 7: Design limits are guaranteed but not 100% tested. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

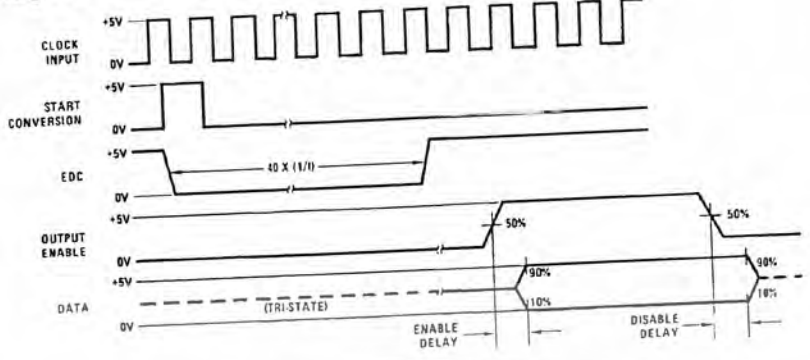
Note 8: Non-linearity specifications are based on best straight line.

Note 9: Guaranteed by design only.

Note 10: Start conversion pulse duration greater than 3½ clock periods will cause conversion errors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Timing Diagram



TL/H/5670–2

Data is complementary binary (full scale is all "0's" output).

Application Hints

OPERATION

The ADC0800 contains a network with 256-300Ω resistors in series. Analog switch taps are made at the junction of each resistor and at each end of the network. In operation, a reference (10.00V) is applied across this network of 256 resistors. An analog input (V_{IN}) is first compared to the center point of the ladder via the appropriate switch. If V_{IN} is larger than $V_{REF}/2$, the internal logic changes the switch points and now compares V_{IN} and $3/4\ V_{REF}$. This process, known as successive approximation, continues until the best match of V_{IN} and V_{REF}/N is made. N now defines a specific tap on the resistor network. When the conversion is complete, the logic loads a binary word corresponding to this tap into the output latch and an end of conversion (EOC) logic level appears. The output latches hold this data valid until a new conversion is completed and new data is loaded into the latches. The data transfer occurs in about 200 ns so that valid data is present virtually all the time in the latches. The data outputs are activated when the Output Enable is high, and in TRI-STATE when Output Enable is low. The Enable Delay time is approximately 200 ns. Each conversion requires 40 clock periods. The device may be operated in the free running mode by connecting the Start Conversion line to the End of Conversion line. However, to ensure start-up under all possible conditions, an external Start Conversion pulse is required during power up conditions.

REFERENCE

The reference applied across the 256 resistor network determines the analog input range. $V_{REF} = 10.00V$ with the top of the R-network connected to 5V and the bottom connected to −5V gives a ±5V range. The reference can be level shifted between V_{SS} and V_{GG}. However, the voltage, applied to the top of the R-network (pin 15), must not exceed V_{SS}, to prevent forward biasing the on-chip parasitic silicon diodes that exist between the P-diffused resistors (pin 15) and the N-type body (pin 10, V_{SS}). Use of a standard logic power supply for V_{SS} can cause problems, both due to initial voltage tolerance and changes over temperature. A solution is to power the V_{SS} line (15 mA max drain) from the output of the op amp that is used to bias the top of the R-network (pin 15). The analog input voltage and the voltage that is applied to the bottom of the R-network (pin 5) must be at least 7V above the $-V_{GG}$ supply voltage to ensure adequate voltage drive to the analog switches.

Other reference voltages may be used (such as 10.24V). If a 5V reference is used, the analog range will be 5V and accuracy will be reduced by a factor of 2. Thus, for maximum accuracy, it is desirable to operate with at least a 10V reference. For TTL logic levels, this requires 5V and −5V for the R-network. CMOS can operate at the 10 V_{DC} V_{SS} level and a single 10 V_{DC} reference can be used. All digital voltage levels for both inputs and outputs will be from ground to V_{SS}.

ANALOG INPUT AND SOURCE RESISTANCE CONSIDERATIONS

The lead to the analog input (pin 12) should be kept as short as possible. Both noise and digital clock coupling to this input can cause conversion errors. To minimize any input errors, the following source resistance considerations should be noted:

For $R_S < 5k$ — No analog input bypass capacitor required, although a 0.1 μF input bypass capacitor will prevent pickup due to unavoidable series lead inductance.

For $5k < R_S < 20k$ — A 0.1 μF capacitor from the input (pin 12) to ground should be used.

For $R_S > 20k$ — Input buffering is necessary.

If the overall converter system requires lowpass filtering of the analog input signal, use a 20 kΩ or less series resistor for a passive RC section or add an op amp RC active lowpass filter (with its inherent low output resistance) to ensure accurate conversions.

CLOCK COUPLING

The clock lead should be kept away from the analog input line to reduce coupling.

LOGIC INPUTS

The logical "1" input voltage swing for the Clock, Start Conversion and Output Enable should be ($V_{SS} - 1.0V$).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints (Continued)

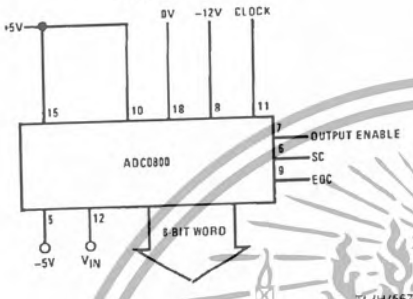
ZERO AND FULL-SCALE ADJUSTMENT

Zero Adjustment: This is the offset voltage required at the bottom of the R-network (pin 5) to make the 11111111 to 11111110 transition when the input voltage is ½ LSB (20 mV for a 10.24V scale). In most cases, this can be accomplished by having a 1 kΩ pot on pin 5. A resistor of 475Ω can be used as a non-adjustable best approximation from pin 5 to ground.

Full-Scale Adjustment: This is the offset voltage required at the top of the R-network (pin 15) to make the 00000001 to 00000000 transition when the input voltage is 1 ½ LSB from full-scale (60 mV less than full-scale for a 10.24V scale). This voltage is guaranteed to be within ±2 LSB for the ADC0800 without adjustment. In most cases, adjustment can be accomplished by having a 1 kΩ pot on pin 15.

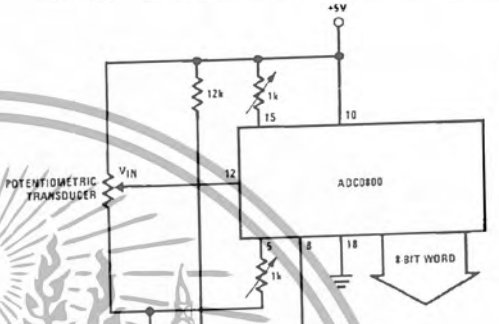
Typical Applications

General Connection



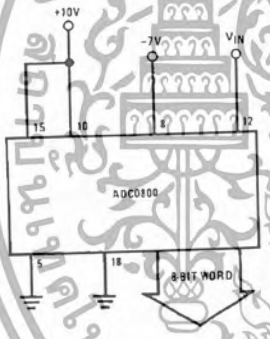
TL/H/5670–11

Ratiometric Input Signal with Tracking Reference



TL/H/5670–4

Hi-Voltage CMOS Output Levels



0V to 10V V_{IN} range
0V to 10V output levels

TL/H/5670–12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

TESTING THE A/D CONVERTER

There are many degrees of complexity associated with testing an A/D converter. One of the simplest tests is to apply a known analog input voltage to the converter and use LEDs to display the resulting digital output code as shown in *Figure 3*. Note that the LED drivers invert the digital output of the A/D converter to provide a binary display. A lab DVM can be used if a precision voltage source is not available. After adjusting the zero and full-scale, any number of points can be checked, as desired.

For ease of testing, a 10.24 V_{DC} reference is recommended for the A/D converter. This provides an LSB of 40 mV (10.240/256). To adjust the zero of the A/D, an analog input voltage of ½ LSB or 20 mV should be applied and the zero adjust potentiometer should be set to provide a flicker on the LSB LED readout with all the other display LEDs OFF.

To adjust the full-scale adjust potentiometer, an analog input that is 1½ LSB less than the reference (10.240−0.060 or 10.180 V_{DC}) should be applied to the analog input and the full-scale adjusted for a flicker on the LSB LED, but this time with all the other LEDs ON.

A complete circuit for a simple A/D tester is shown in *Figure 4*. Note that the clock input voltage swing and the digital output voltage swings are from 0V to 10.24V. The MM74C901 provides a voltage translation to 5V operation and also the logic inversion so the readout LEDs are in binary.

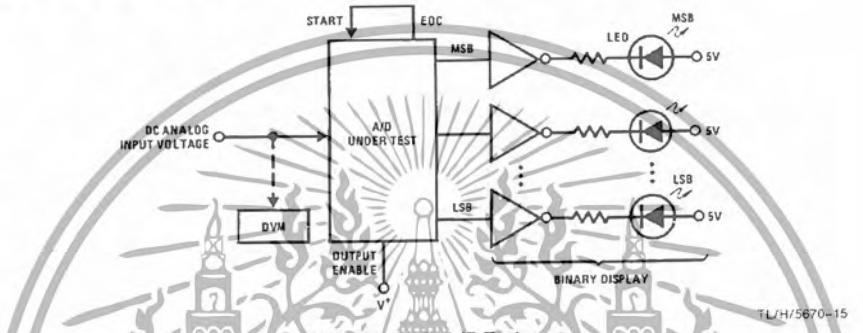


FIGURE 3. Basic A/D Tester

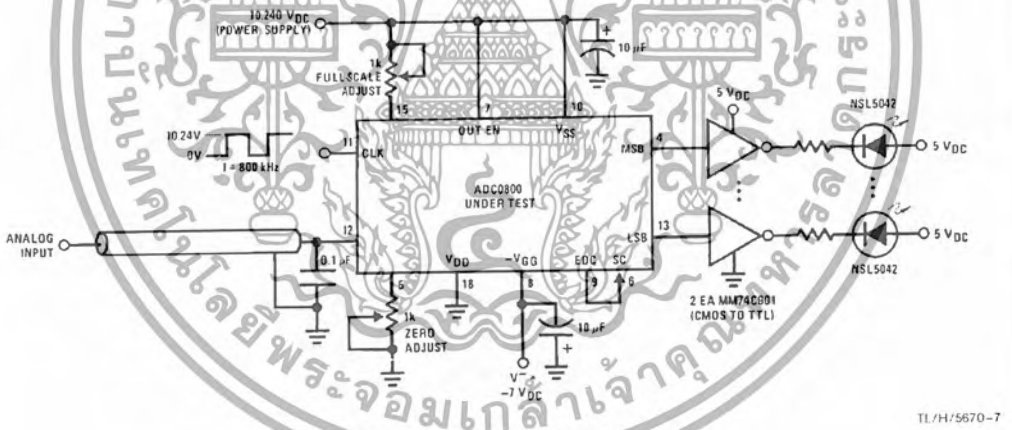
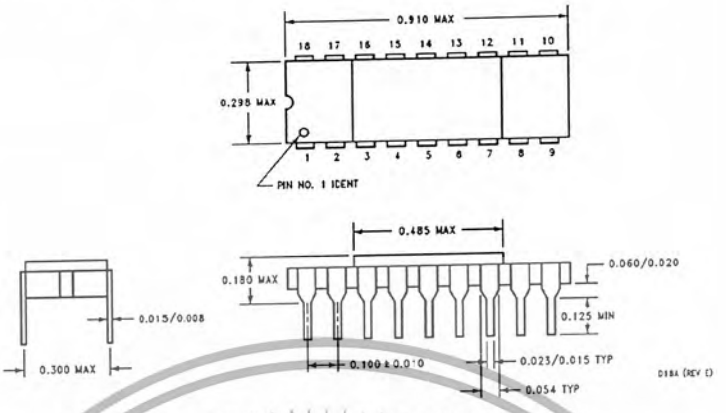


FIGURE 4. Complete Basic Tester Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters)



Hermetic Dual-In-Line Package (D)
Order Number ADC0800PD or ADC0800PCD
NS Package Number D18A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.

2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

National Semiconductor Corporation
1111 West Bardin Road
Arlington, TX 76017
Tel: 1(800) 272-9959
Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
Fax: (+49) 0-180-530 85 86
Email: cnjwge@tevm2.nsc.com
Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58
Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
13th Floor, Straight Block,
Ocean Centre, 5 Canton Rd.
Tsimshatsui, Kowloon
Hong Kong
Tel: (852) 2737-1600
Fax: (852) 2736-9960

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-043-299-2309
Fax: 81-043-299-2408

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

January 1995

DAC0808/DAC0807/DAC0806 8-Bit D/A Converters

General Description

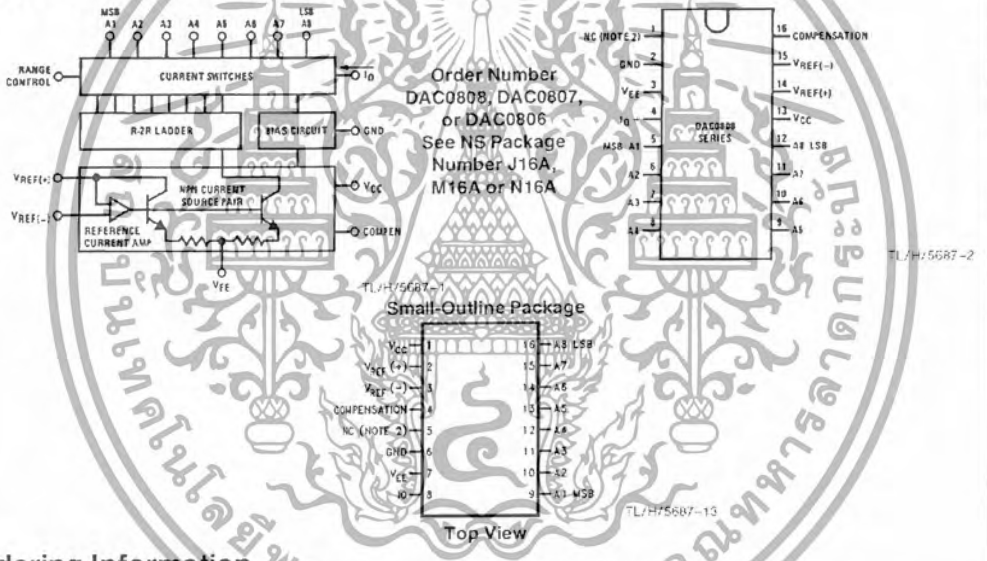
The DAC0808 series is an 8-bit monolithic digital-to-analog converter (DAC) featuring a full scale output current settling time of 150 ns while dissipating only 33 mW with ±5V supplies. No reference current (I_{REF}) trimming is required for most applications since the full scale output current is typically ±1 LSB of 255 I_{REF}/ 256. Relative accuracies of better than ±0.19% assure 8-bit monotonicity and linearity while zero level output current of less than 4 μA provides 8-bit zero accuracy for $I_{REF} \geq 2$ mA. The power supply currents of the DAC0808 series are independent of bit codes, and exhibits essentially constant device characteristics over the entire supply voltage range.

The DAC0808 will interface directly with popular TTL, DTL or CMOS logic levels, and is a direct replacement for the MC1508/MC1408. For higher speed applications, see DAC0800 data sheet.

Features

- Relative accuracy: ±0.19% error maximum (DAC0808)
- Full scale current match: ±1 LSB typ
- 7 and 6-bit accuracy available (DAC0807, DAC0806)
- Fast settling time: 150 ns typ
- Noninverting digital inputs are TTL and CMOS compatible
- High speed multiplying input slew rate: 8 mA/μs
- Power supply voltage range: ±4.5V to ±18V
- Low power consumption: 33 mW @ ±5V

Block and Connection Diagrams



Order Number DAC0808, DAC0807, or DAC0806
See NS Package Number J16A, M16A or N16A

Dual-In-Line Package

Small-Outline Package

Top View

Ordering Information

ACCURACY	OPERATING TEMPERATURE RANGE	ORDER NUMBERS				
		J PACKAGE (J16A)*		N PACKAGE (N16A)*		SO PACKAGE (M16A)
7-bit	$0°C \leq T_A \leq +75°C$	DAC0807LCJ	MC1408L7	DAC0808LCN DAC0807LCN	MC1408P8 MC1408P7	DAC0808LCM DAC0807LCM
6-bit	$0°C \leq T_A \leq +75°C$	DAC0806LCJ	MC1408L6	DAC0806LCN	MC1408P6	DAC0806LCM

*Note. Devices may be ordered by using either order number.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Power Supply Voltage	
V_{CC}	+ 18 V_{DC}
V_{EE}	− 18 V_{DC}
Digital Input Voltage, V5–V12	− 10 V_{DC} to + 18 V_{DC}
Applied Output Voltage, V_O	− 11 V_{DC} to + 18 V_{DC}
Reference Current, I_{14}	5 mA
Reference Amplifier Inputs, V14, V15	V_{CC}, V_{EE}
Power Dissipation (Note 3)	1000 mW
ESD Susceptibility (Note 4)	TBD
Storage Temperature Range	−65°C to + 150°C
Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)	
Dual-In-Line Package (Plastic)	260°C
Dual-In-Line Package (Ceramic)	300°C
Surface Mount Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

Operating Ratings

Temperature Range	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$
DAC0808LC Series	$0 \leq T_A \leq +75°C$

Electrical Characteristics

(V_{CC} = 5V, V_{EE} = −15 V_{DC}, $V_{REF}/R14$ = 2 mA, DAC0808: T_A = −55°C to + 125°C, DAC0808C, DAC0807C, DAC0806C, T_A = 0°C to + 75°C, and all digital inputs at high logic level unless otherwise noted.)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
E_r	Relative Accuracy (Error Relative to Full Scale I_O)	*(Figure 4)*				%
	DAC0808LC (LM1408-8)				**±0.19**	%
	DAC0807LC (LM1408-7), (Note 5)				±0.39	%
	DAC0806LC (LM1408-6), (Note 5)				±0.78	%
	Settling Time to Within ½ LSB (Includes t_{PLH})	T_A = 25°C (Note 6), *(Figure 5)*		150		ns
t_{PLH}, t_{PHL}	Propagation Delay Time	T_A = 25°C, *(Figure 5)*		30	100	ns
TCI_O	Output Full Scale Current Drift			±20		ppm/°C
MSB	Digital Input Logic Levels	*(Figure 3)*				
V_{IH}	High Level, Logic "1"		2			V_{DC}
V_{IL}	Low Level, Logic "0"				0.8	V_{DC}
MSB	Digital Input Current	*(Figure 3)*				
	High Level	V_{IH} = 5V		0	0.040	mA
	Low Level	V_{IL} = 0.8V		−0.003	−0.8	mA
I_{15}	Reference Input Bias Current	*(Figure 3)*		−1	−3	μA
	Output Current Range	*(Figure 3)*				
		V_{EE} = −5V	0	2.0	2.1	mA
		V_{EE} = −15V, T_A = 25°C	0	2.0	4.2	mA
I_O	Output Current	V_{REF} = 2.000V, R14 = 1000Ω, *(Figure 3)*	1.9	1.99	2.1	mA
	Output Current, All Bits Low	*(Figure 3)*		0	4	μA
	Output Voltage Compliance (Note 2)	$E_r \leq 0.19\%$, T_A = 25°C				
	V_{EE} = −5V, I_{REF} = 1 mA				−0.55, +0.4	V_{DC}
	V_{EE} Below −10V				−5.0, +0.4	V_{DC}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Continued)

(V_{CC} = 5V, V_{EE} = −15 V_{DC}, $V_{REF}/R14$ = 2 mA, DAC0808: T_A = −55°C to +125°C, DAC0808C, DAC0807C, DAC0806C, T_A = 0°C to +75°C, and all digital inputs at high logic level unless otherwise noted.)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
SRI_{REF}	Reference Current Slew Rate	*(Figure 6)*	4	8		mA/μs
	Output Current Power Supply Sensitivity	$-5V \leq V_{EE} \leq -16.5V$		0.05	2.7	μA/V
	Power Supply Current (All Bits Low)	*(Figure 3)*				
I_{CC}				2.3	22	mA
I_{EE}				−4.3	−13	mA
	Power Supply Voltage Range	T_A = 25°C, *(Figure 3)*				
V_{CC}			4.5	5.0	5.5	V_{DC}
V_{EE}			−4.5	−15	−16.5	V_{DC}
	Power Dissipation					
	All Bits Low	V_{CC} = 5V, V_{EE} = −5V		33	170	mW
		V_{CC} = 5V, V_{EE} = −15V		106	305	mW
	All Bits High	V_{CC} = 15V, V_{EE} = −5V		90		mW
		V_{CC} = 15V, V_{EE} = −15V		160		mW

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

Note 2: Range control is not required.

Note 3: The maximum power dissipation must be derated at elevated temperatures and is dictated by T_{JMAX}, θ_{JA}, and the ambient temperature, T_A. The maximum allowable power dissipation at any temperature is $P_D = (T_{JMAX} - T_A)/\theta_{JA}$ or the number given in the Absolute Maximum Ratings, whichever is lower. For this device, T_{JMAX} = 125°C, and the typical junction-to-ambient thermal resistance of the dual-in-line J package when the board mounted is 100°C/W. For the dual-in-line N package, this number increases to 175°C/W and for the small outline M package this number is 100°C/W.

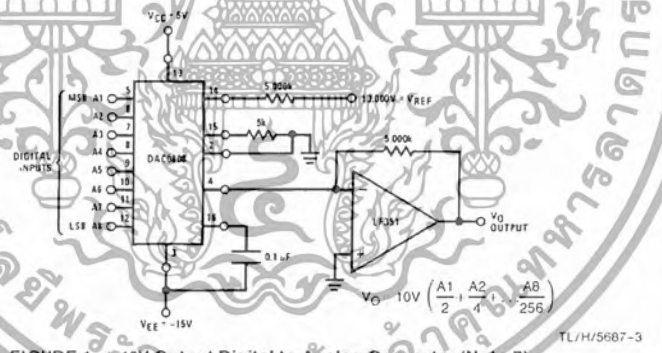
Note 4: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor.

Note 5: All current switches are tested to guarantee at least 50% of rated current.

Note 6: All bits switched.

Note 7: Pin-out numbers for the DAL080X represent the dual-in-line package. The small outline package pinout differs from the dual-in-line package.

Typical Application



TL/H/5687–3

FIGURE 1. +10V Output Digital to Analog Converter (Note 7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints (Continued)

A negative reference voltage may be used if R14 is grounded and the reference voltage is applied to R15 as shown in *Figure 8*. A high input impedance is the main advantage of this method. Compensation involves a capacitor to V_{EE} on pin 16, using the values of the previous paragraph. The negative reference voltage must be at least 4V above the V_{EE} supply. Bipolar input signals may be handled by connecting R14 to a positive reference voltage equal to the peak positive input level at pin 15.

When a DC reference voltage is used, capacitive bypass to ground is recommended. The 5V logic supply is not recommended as a reference voltage. If a well regulated 5V supply which drives logic is to be used as the reference, R14 should be decoupled by connecting it to 5V through another resistor and bypassing the junction of the 2 resistors with 0.1 μF to ground. For reference voltages greater than 5V, a clamp diode is recommended between pin 14 and ground.

If pin 14 is driven by a high impedance such as a transistor current source, none of the above compensation methods apply and the amplifier must be heavily compensated, decreasing the overall bandwidth.

OUTPUT VOLTAGE RANGE

The voltage on pin 4 is restricted to a range of −0.55 to 0.4V when $V_{EE} = -5V$ due to the current switching methods employed in the DAC0808.

The negative output voltage compliance of the DAC0808 is extended to −5V where the negative supply voltage is more negative than −10V. Using a full-scale current of 1.992 mA and load resistor of 2.5 kΩ between pin 4 and ground will yield a voltage output of 256 levels between 0 and −4.980V. Floating pin 1 does not affect the converter speed or power dissipation. However, the value of the load resistor determines the switching time due to increased voltage swing. Values of R_L up to 500Ω do not significantly affect performance, but a 2.5 kΩ load increases worst-case settling time to 1.2 μs (when all bits are switched ON). Refer to the subsequent text section on Settling Time for more details on output loading.

OUTPUT CURRENT RANGE

The output current maximum rating of 4.2 mA may be used only for negative supply voltages more negative than −8V, due to the increased voltage drop across the resistors in the reference current amplifier.

ACCURACY

Absolute accuracy is the measure of each output current level with respect to its intended value, and is dependent upon relative accuracy and full-scale current drift. Relative accuracy is the measure of each output current level as a fraction of the full-scale current. The relative accuracy of the DAC0808 is essentially constant with temperature due to the excellent temperature tracking of the monolithic resistor ladder. The reference current may drift with temperature, causing a change in the absolute accuracy of output current. However, the DAC0808 has a very low full-scale current drift with temperature.

The DAC0808 series is guaranteed accurate to within ±½ LSB at a full-scale output current of 1.992 mA. This corresponds to a reference amplifier output current drive to the ladder network of 2 mA, with the loss of 1 LSB (8 μA) which is the ladder remainder shunted to ground. The input current to pin 14 has a guaranteed value of between 1.9 and 2.1 mA, allowing some mismatch in the NPN current source pair. The accuracy test circuit is shown in *Figure 4*. The 12-bit converter is calibrated for a full-scale output current of 1.992 mA. This is an optional step since the DAC0808 accuracy is essentially the same between 1.5 and 2.5 mA. Then the DAC0808 circuits' full-scale current is trimmed to the same value with R14 so that a zero value appears at the error amplifier output. The counter is activated and the error band may be displayed on an oscilloscope, detected by comparators, or stored in a peak detector.

Two 8-bit D-to-A converters may not be used to construct a 16-bit accuracy D-to-A converter. 16-bit accuracy implies a total error of ±½ of one part in 65,536 or ±0.00076%, which is much more accurate than the ±0.019% specification provided by the DAC0808.

MULTIPLYING ACCURACY

The DAC0808 may be used in the multiplying mode with 8-bit accuracy when the reference current is varied over a range of 256:1. If the reference current in the multiplying mode ranges from 16 μA to 4 mA, the additional error contributions are less than 1.6 μA. This is well within 8-bit accuracy when referred to full-scale.

A monotonic converter is one which supplies an increase in current for each increment in the binary word. Typically, the DAC0808 is monotonic for all values of reference current above 0.5 mA. The recommended range for operation with a DC reference current is 0.5 to 4 mA.

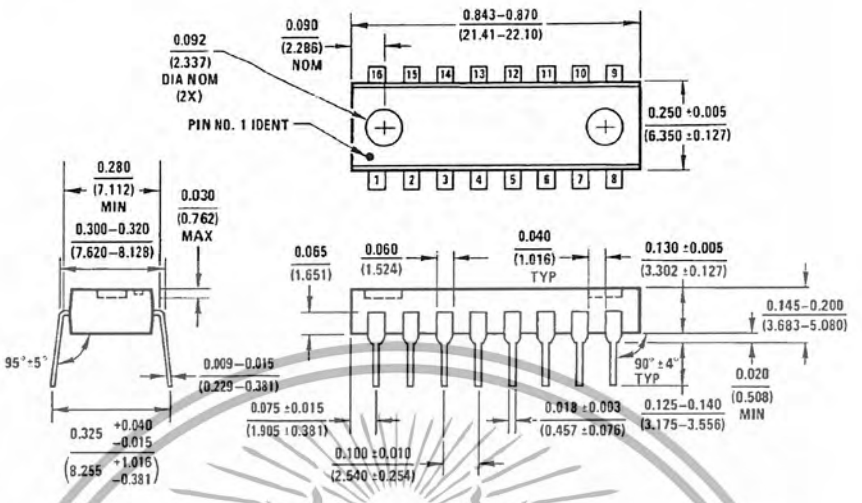
SETTLING TIME

The worst-case switching condition occurs when all bits are switched ON, which corresponds to a low-to-high transition for all bits. This time is typically 150 ns for settling to within ±½ LSB, for 8-bit accuracy, and 100 ns to ½ LSB for 7 and 6-bit accuracy. The turn OFF is typically under 100 ns. These times apply when $R_L = 500\Omega$ and $C_O = 25$ pF.

Extra care must be taken in board layout since this is usually the dominant factor in satisfactory test results when measuring settling time. Short leads, 100 μF supply bypassing for low frequencies, and minimum scope lead length are all mandatory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



Dual-In-Line Package
Order Number DAC0808, DAC0807 or DAC0806
NS Package Number N16A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

National Semiconductor Corporation
1111 West Bardin Road
Arlington, TX 76017
Tel: 1(800) 272-9959
Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
Fax: (+49) 0-180-530 85 86
Email: cnjwge@tevm2.nsc.com
Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58
Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
13th Floor, Straight Block,
Ocean Centre, 5 Canton Rd
Tsimshatsui, Kowloon
Hong Kong
Tel: (852) 2737-1600
Fax: (852) 2736-9960

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-043-299-2309
Fax: 81-043-299-2408

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by MC14LC5480/D

MC14LC5480

Advance Information

5 V PCM Codec-Filter

The MC14LC5480 is a general purpose per channel PCM Codec–Filter with pin selectable Mu–Law or A–Law companding, and is offered in 20–pin DIP, SOG, and SSOP packages. This device performs the voice digitization and reconstruction as well as the band limiting and smoothing required for PCM systems. This device is designed to operate in both synchronous and asynchronous applications and contains an on–chip precision reference voltage.

This device has an input operational amplifier whose output is the input to the encoder section. The encoder section immediately low–pass filters the analog signal with an active R–C filter to eliminate very high frequency noise from being modulated down to the passband by the switched capacitor filter. From the active R–C filter, the analog signal is converted to a differential signal. From this point, all analog signal processing is done differentially. This allows processing of an analog signal that is twice the amplitude allowed by a single–ended design, which reduces the significance of noise to both the inverted and non–inverted signal paths. Another advantage of this differential design is that noise injected via the power supplies is a common–mode signal that is cancelled when the inverted and non–inverted signals are recombined. This dramatically improves the power supply rejection ratio.

After the differential converter, a differential switched capacitor filter band–passes the analog signal from 200 Hz to 3400 Hz before the signal is digitized by the differential compressing A/D converter.

The decoder accepts PCM data and expands it using a differential D/A converter. The output of the D/A is low–pass filtered at 3400 Hz and sinX/X compensated by a differential switched capacitor filter. The signal is then filtered by an active R–C filter to eliminate the out–of–band energy of the switched capacitor filter.

The MC14LC5480 PCM Codec–Filter accepts a variety of clock formats, including Short Frame Sync, Long Frame Sync, IDL, and GCI timing environments. This device also maintains compatibility with Motorola's family of Telecommunication products, including the MC14LC5472 U–Interface Transceiver, MC145474/75 S/T–Interface Transceiver, MC145532 ADPCM Transcoder, MC145422/26 UDLT–1, MC145421/25 UDLT–2, and MC3419/MC33120 SLIC.

The MC14LC5480 PCM Codec–Filter utilizes CMOS due to its reliable low–power performance and proven capability for complex analog/digital VLSI functions.

- Pin for Pin Replacement for the MC145480
- Single 5 V Power Supply
- Typical Power Dissipation of 15 mW, Power–Down of 0.01 mW
- Fully–Differential Analog Circuit Design for Lowest Noise
- Transmit Band–Pass and Receive Low–Pass Filters On–Chip
- Active R–C Pre–Filtering and Post–Filtering
- Mu–Law and A–Law Companding by Pin Selection
- On–Chip Precision Reference Voltage (1.575 V)
- Push–Pull 300 Ω Power Drivers with External Gain Adjust
- MC145536EVK is the Evaluation Kit that Also Includes the MC145532 ADPCM Transcoder

P SUFFIX
PLASTIC DIP
CASE 738

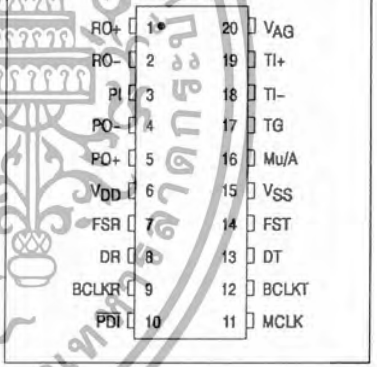
DW SUFFIX
SOG PACKAGE
CASE 751D

SD SUFFIX
SSOP
CASE 940C

ORDERING INFORMATION

MC14LC5480P	Plastic DIP
MC14LC5480DW	SOG Package
MC14LC5480SD	SSOP

PIN ASSIGNMENT



This document contains information on a new product. Specifications and information herein are subject to change without notice.

REV 0.1
5/96

© Motorola, Inc. 1995

MOTOROLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

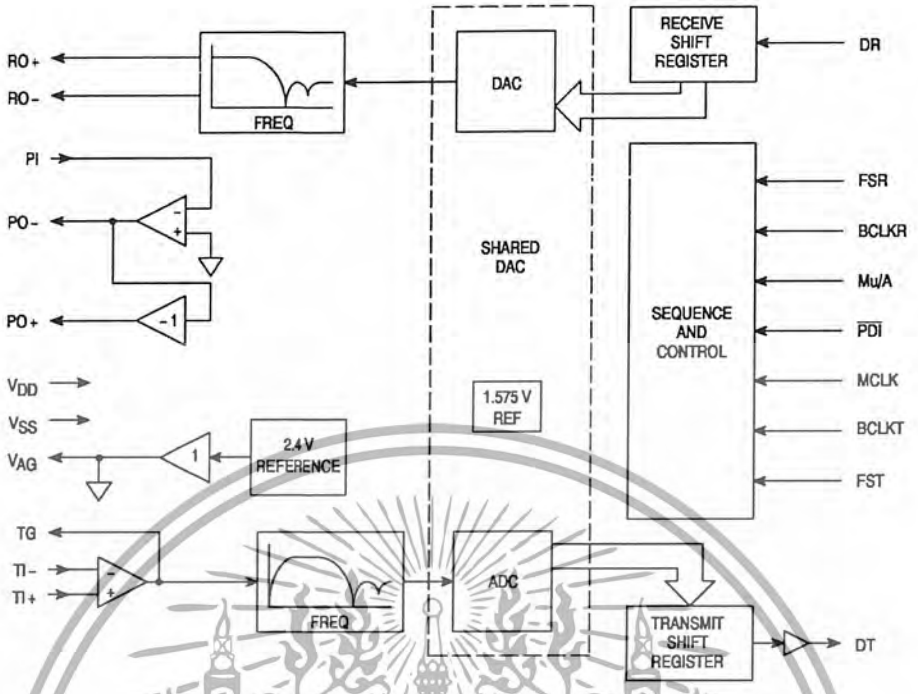


Figure 1. MC14LC5480 PCM Codec–Filter Block Diagram

DEVICE DESCRIPTION

A PCM Codec–Filter is used for digitizing and reconstructing the human voice. These devices are used primarily for the telephone network to facilitate voice switching and transmission. Once the voice is digitized, it may be switched by digital switching methods or transmitted long distance (T1, microwave, satellites, etc.) without degradation. The name codec is an acronym from "COder" for the analog–to–digital converter (ADC) used to digitize voice, and "DECoder" for the digital–to–analog converter (DAC) used for reconstructing voice. A codec is a single device that does both the ADC and DAC conversions.

To digitize intelligible voice requires a signal–to–distortion ratio of about 30 dB over a dynamic range of about 40 dB. This may be accomplished with a linear 13–bit ADC and DAC, but will far exceed the required signal–to–distortion ratio at larger amplitudes than 40 dB below the peak amplitude. This excess performance is at the expense of data per sample. Two methods of data reduction are implemented by compressing the 13–bit linear scheme to companded pseudo–logarithmic 8–bit schemes. The two companding schemes are: Mu–255 Law, primarily in North America and Japan; and A–Law, primarily used in Europe. These companding schemes are accepted world wide. These companding schemes follow a segmented or "piecewise–linear" curve formatted as sign bit, three chord bits, and four step bits. For a given chord, all sixteen of the steps have the same voltage weighting. As the voltage of the analog input increases, the four step bits increment and carry to the three chord bits which increment. When the chord bits increment, the step bits double their voltage weighting. This results in an effective resolution of six bits (sign + chord + four step bits) across a 42 dB dynamic range (seven chords above 0, by 6 dB per chord).

In a sampling environment, Nyquist theory says that to properly sample a continuous signal, it must be sampled at a frequency higher than twice the signal's highest frequency component. Voice contains spectral energy above 3 kHz, but its absence is not detrimental to intelligibility. To reduce the digital data rate, which is proportional to the sampling rate, a sample rate of 8 kHz was adopted, consistent with a bandwidth of 3 kHz. This sampling requires a low–pass filter to limit the high frequency energy above 3 kHz from distorting the in–band signal. The telephone line is also subject to 50/60 Hz power line coupling, which must be attenuated from the signal by a high–pass filter before the analog–to–digital converter.

The digital–to–analog conversion process reconstructs a staircase version of the desired in–band signal, which has spectral images of the in–band signal modulated about the sample frequency and its harmonics. These spectral images are called aliasing components, which need to be attenuated to obtain the desired signal. The low–pass filter used to attenuate these aliasing components is typically called a reconstruction or smoothing filter.

The MC14LC5480 PCM Codec–Filter has the codec, both presampling and reconstruction filters, a precision voltage reference on–chip, and requires no external components.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN DESCRIPTIONS

POWER SUPPLY

V_{DD}
Positive Power Supply (Pin 6)

This is the most positive power supply and is typically connected to + 5 V. This pin should be decoupled to V_{SS} with a 0.1 μF ceramic capacitor.

V_{SS}
Negative Power Supply (Pin 15)

This is the most negative power supply and is typically connected to 0 V.

V_{AG}
Analog Ground Output (Pin 20)

This output pin provides a mid–supply analog ground regulated to 2.4 V. This pin should be decoupled to V_{SS} with a 0.01 μF to 0.1 μF ceramic capacitor. All analog signal processing within this device is referenced to this pin. If the audio signals to be processed are referenced to V_{SS}, then special precautions must be utilized to avoid noise between V_{SS} and the V_{AG} pin. Refer to the applications information in this document for more information. The V_{AG} pin becomes high impedance when this device is in the powered down mode.

CONTROL

Mu/A
Mu/A Law Select (Pin 16)

This pin controls the compression for the encoder and the expansion for the decoder. Mu–Law companding is selected when this pin is connected to V_{DD} and A–Law companding is selected when this pin is connected to V_{SS}.

$\overline{PDI}$
Power–Down Input (Pin 10)

This pin puts the device into a low power dissipation mode when a logic 0 is applied. When this device is powered down, all of the clocks are gated off and all bias currents are turned off, which causes RO+, RO–, PO–, PO+, TG, V_{AG}, and DT to become high impedance. The device will operate normally when a logic 1 is applied to this pin. The device goes through a power–up sequence when this pin is taken to a logic 1 state, which prevents the DT PCM output from going low impedance for at least two FST cycles. The filters must settle out before the DT PCM output or the RO+ or RO– receive analog outputs will represent a valid analog signal.

ANALOG INTERFACE

TI+
Transmit Analog Input (Non–Inverting) (Pin 19)

This is the non–inverting input of the transmit input gain setting operational amplifier. This pin accommodates a differential to single–ended circuit for the input gain setting op amp. This allows input signals that are referenced to the V_{SS} pin to be level shifted to the V_{AG} pin with minimum noise. This pin may be connected to the V_{AG} pin for an inverting amplifier configuration if the input signal is already referenced to the V_{AG} pin. The common mode range of the TI+ and TI– pins is from 1.2 V, to V_{DD} minus 2 V. This is an FET gate input. Connecting the TI+ pin to V_{DD} will place this amplifier's output (TG) into a high–impedance state, thus allowing the TG pin to serve as a high–impedance input to the transmit filter.

TI–
Transmit Analog Input (Inverting) (Pin 18)

This is the inverting input of the transmit gain setting operational amplifier. Gain setting resistors are usually connected from this pin to TG and from this pin to the analog signal source. The common mode range of the TI+ and TI– pins is from 1.2 V to V_{DD} – 2 V. This is an FET gate input. Connecting the TI+ pin to V_{DD} will place this amplifier's output (TG) into a high–impedance state, thus allowing the TG pin to serve as a high–impedance input to the transmit filter.

TG
Transmit Gain (Pin 17)

This is the output of the transmit gain setting operational amplifier and the input to the transmit band–pass filter. This op amp is capable of driving a 2 kΩ load. Connecting the TI+ pin to V_{DD} will place this amplifier's output (TG) into a high–impedance state, thus allowing the TG pin to serve as a high–impedance input to the transmit filter. All signals at this pin are referenced to the V_{AG} pin. This pin is high impedance when the device is in the powered down mode.

RO+
Receive Analog Output (Non–Inverting) (Pin 1)

This is the non–inverting output of the receive smoothing filter from the digital–to–analog converter. This output is capable of driving a 2-kΩ load to 1.575 V peak referenced to the V_{AG} pin. This pin is high impedance when the device is in the powered down mode.

RO–
Receive Analog Output (Inverting) (Pin 2)

This is the inverting output of the receive smoothing filter from the digital–to–analog converter. This output is capable of driving a 2 kΩ load to 1.575 V peak referenced to the V_{AG} pin. This pin is high impedance when the device is in the powered down mode.

PI
Power Amplifier Input (Pin 3)

This is the inverting input to the PO– amplifier. The non–inverting input to the PO– amplifier is internally tied to the V_{AG} pin. The PI and PO– pins are used with external resistors in an inverting op amp gain circuit to set the gain of the PO+ and PO– push–pull power amplifier outputs. Connecting PI to V_{DD} will power down the power driver amplifiers and the PO+ and PO– outputs will be high impedance.

PO–
Power Amplifier Output (Inverting) (Pin 4)

This is the inverting power amplifier output, which is used to provide a feedback signal to the PI pin to set the gain of the push–pull power amplifier outputs. This pin is capable of driving a 300 Ω load to PO+. The PO+ and PO– outputs are differential (push–pull) and capable of driving a 300 Ω load to 3.15 V peak, which is 6.3 V peak–to–peak. The bias voltage and signal reference of this output is the V_{AG} pin. The V_{AG} pin cannot source or sink as much current as this pin, and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

therefore low impedance loads must be between PO+ and PO–. Connecting PI to V_{DD} will power down the power driver amplifiers and the PO+ and PO– outputs will be high impedance. This pin is also high impedance when the device is powered down by the $\overline{PDI}$ pin.

PO+
Power Amplifier Output (Non–inverting) (Pin 5)

This is the non–inverting power amplifier output, which is an inverted version of the signal at PO–. This pin is capable of driving a 300 Ω load to PO–. Connecting PI to V_{DD} will power down the power driver amplifiers and the PO+ and PO– outputs will be high impedance. This pin is also high impedance when the device is powered down by the $\overline{PDI}$ pin. See PI and PO– for more information.

DIGITAL INTERFACE

MCLK
Master Clock (Pin 11)

This is the master clock input pin. The clock signal applied to this pin is used to generate the internal 256 kHz clock and sequencing signals for the switched–capacitor filters, ADC, and DAC. The internal prescaler logic compares the clock on this pin to the clock at FST (8 kHz) and will automatically accept 256, 512, 1536, 1544, 2048, 2560, or 4096 kHz. For MCLK frequencies of 256 and 512 kHz, MCLK must be synchronous and approximately rising edge aligned to FST. For optimum performance at frequencies of 1.536 MHz and higher, MCLK should be synchronous and approximately rising edge aligned to the rising edge of FST. In many applications, MCLK may be tied to the BCLKT pin.

FST
Frame Sync, Transmit (Pin 14)

This pin accepts an 8 kHz clock that synchronizes the output of the serial PCM data at the DT pin. This input is compatible with various standards including IDL, Long Frame Sync, Short Frame Sync, and GCI formats. If both FST and FSR are held low for several 8 kHz frames, the device will power down.

BCLKT
Bit Clock, Transmit (Pin 12)

This pin controls the transfer rate of transmit PCM data. In the IDL and GCI modes it also controls the transfer rate of the receive PCM data. This pin can accept any bit clock frequency from 64 to 4096 kHz for Long Frame Sync and Short Frame Sync timing. This pin can accept clock frequencies from 256 kHz to 4.096 MHz in IDL mode, and from 512 kHz to 6.176 MHz for GCI timing mode.

DT
Data, Transmit (Pin 13)

This pin is controlled by FST and BCLKT and is high impedance except when outputting PCM data. When operating in the IDL or GCI mode, data is output in either the B1 or B2 channel as selected by FSR. This pin is high impedance when the device is in the powered down mode.

FSR
Frame Sync, Receive (Pin 7)

When used in the Long Frame Sync or Short Frame Sync mode, this pin accepts an 8 kHz clock, which synchronizes the input of the serial PCM data at the DR pin. FSR can be asynchronous to FST in the Long Frame Sync or Short Frame Sync modes. When an ISDN mode (IDL or GCI) has been selected with BCLKR, this pin selects either B1 (logic 0) or B2 (logic 1) as the active data channel.

BCLKR
Bit Clock, Receive (Pin 9)

When used in the Long Frame Sync or Short Frame Sync mode, this pin accepts any bit clock frequency from 64 to 4096 kHz. When this pin is held at a logic 1, FST, BCLKT, DT, and DR become IDL Interface compatible. When this pin is held at a logic 0, FST, BCLKT, DT, and DR become GCI Interface compatible.

DR
Data, Receive (Pin 8)

This pin is the PCM data input, and when in a Long Frame Sync or Short Frame Sync mode is controlled by FSR and BCLKR. When in the IDL or GCI mode, this data transfer is controlled by FST and BCLKT. FSR and BCLKR select the B channel and ISDN mode, respectively.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

ANALOG INTERFACE AND SIGNAL PATH

The transmit portion of this device includes a low–noise, three–terminal op amp capable of driving a 2 kΩ load. This op amp has inputs of TI+ (Pin 19) and TI– (Pin 18) and its output is TG (Pin 17). This op amp is intended to be configured in an inverting gain circuit. The analog signal may be applied directly to the TG pin if this transmit op amp is independently powered down by connecting the TI+ and TI– inputs to the V_{DD} power supply. The TG pin becomes high impedance when the transmit op amp is powered down. The TG pin is internally connected to a 3–pole anti–aliasing pre–filter. This pre–filter incorporates a 2–pole Butterworth active low–pass filter, followed by a single passive pole. This pre–filter is followed by a single–ended to differential converter that is clocked at 512 kHz. All subsequent analog processing utilizes fully–differential circuitry. The next section is a fully–differential, 5–pole switched–capacitor low–pass filter with a 3.4 kHz frequency cutoff. After this filter is a 3–pole switched–capacitor high–pass filter having a cutoff frequency of about 200 Hz. This high–pass stage has a transmission zero at dc that eliminates any dc coming from the analog input or from accumulated op amp offsets in the preceding filter stages. The last stage of the high–pass filter is an autozeroed sample and hold amplifier.

One bandgap voltage reference generator and digital–to–analog converter (DAC) are shared by the transmit and receive sections. The autozeroed, switched–capacitor bandgap reference generates precise positive and negative reference voltages that are virtually independent of temperature and power supply voltage. A binary–weighted capacitor array (CDAC) forms the chords of the companding structure, while a resistor string (RDAC) implements the linear steps within each chord. The encode process uses the DAC, the voltage reference, and a frame–by–frame autozeroed comparator to implement a successive–approximation con-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

version algorithm. All of the analog circuitry involved in the data conversion (the voltage reference, RDAC, CDAC, and comparator) are implemented with a differential architecture.

The receive section includes the DAC described above, a sample and hold amplifier, a 5–pole, 3400 Hz switched capacitor low–pass filter with sinX/X correction, and a 2–pole active smoothing filter to reduce the spectral components of the switched capacitor filter. The output of the smoothing filter is buffered by an amplifier, which is output at the RO+ and RO– pins. These outputs are capable of driving a 4 kΩ load differentially or a 2 kΩ load to the V_{AG} pin. The MC14LC5480 also has a pair of power amplifiers that are connected in a push–pull configuration. The PI pin is the inverting input to the PO– power amplifier. The non–inverting input is internally tied to the V_{AG} pin. This allows this amplifier to be used in an inverting gain circuit with two external resistors. The PO+ amplifier has a gain of minus one, and is internally connected to the PO– output. This complete power amplifier circuit is a differential (push–pull) amplifier with adjustable gain that is capable of driving a 300 Ω load to +12 dBm. The power amplifier may be powered down independently of the rest of the chip by connecting the PI pin to V_{DD}.

POWER–DOWN

There are two methods of putting this device into a low power consumption mode, which makes the device nonfunctional and consumes virtually no power. $\overline{PDI}$ is the power–down input pin which, when taken low, powers down the device. Another way to power the device down is to hold both the FST and FSR pins low. When the chip is powered down, the V_{AG}, TG, RO+, RO–, PO+, PO–, and DT outputs are high impedance. To return the chip to the power–up state, $\overline{PDI}$ must be high and the FST frame sync pulse must be present. The DT output will remain in a high–impedance state for at least two FST pulses after power–up.

MASTER CLOCK

Since this codec–filter design has a single DAC architecture, the MCLK pin is used as the master clock for all analog signal processing including analog–to–digital conversion, digital–to–analog conversion, and for transmit and receive filtering functions of this device. The clock frequency applied to the MCLK pin may be 256 kHz, 512 kHz, 1.536 MHz, 1.544 MHz, 2.048 MHz, 2.56 MHz, or 4.096 MHz. This device has a prescaler that automatically determines the proper divide ratio to use for the MCLK input, which achieves the required 256 kHz internal sequencing clock. The clocking requirements of the MCLK input are independent of the PCM data transfer mode (i.e., Long Frame Sync, Short Frame Sync, IDL mode, or GCI mode).

DIGITAL I/O

The MC14LC5480 is pin selectable for Mu–Law or A–Law. Table 1 shows the 8–bit data word format for positive and negative zero and full scale for both companding schemes (see Tables 3 and 4 at the end of this document for a complete PCM word conversion table). Table 2 shows the series of eight PCM words for both Mu–Law and A–Law that correspond to a digital milliwatt. The digital mW is the 1 kHz calibration signal reconstructed by the DAC that defines the absolute gain or 0 dBm0 Transmission Level Point (TLP) of the DAC. The 0 dBm0 level for Mu–Law is 3.17 dB below the maximum level for an unclipped tone signal. The 0 dBm0 level for A–Law is 3.14 dB below the maximum level for an unclipped tone signal. The timing for the PCM data transfer is independent of the companding scheme selected. Refer to Figure 2 for a summary and comparison of the four PCM data interface modes of this device.

Table 1. PCM Codes for Zero and Full Scale

Level	Mu–Law			A–Law		
	Sign Bit	Chord Bits	Step Bits	Sign Bit	Chord Bits	Step Bits
+ Full Scale	1	000	0000	1	010	1010
+ Zero	1	111	1111	1	101	0101
– Zero	0	111	1111	0	101	0101
– Full Scale	0	000	0000	0	010	1010

Table 2. PCM Codes for Digital mW

Phase	Mu–Law			A–Law		
	Sign Bit	Chord Bits	Step Bits	Sign Bit	Chord Bits	Step Bits
π/8	0	001	1110	0	011	0100
3π/8	0	000	1011	0	010	0001
5π/8	0	000	1011	0	010	0001
7π/8	0	001	1110	0	011	0100
9π/8	1	001	1110	1	011	0100
11π/8	1	000	1011	1	010	0001
13π/8	1	000	1011	1	010	0001
15π/8	1	001	1110	1	011	0100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

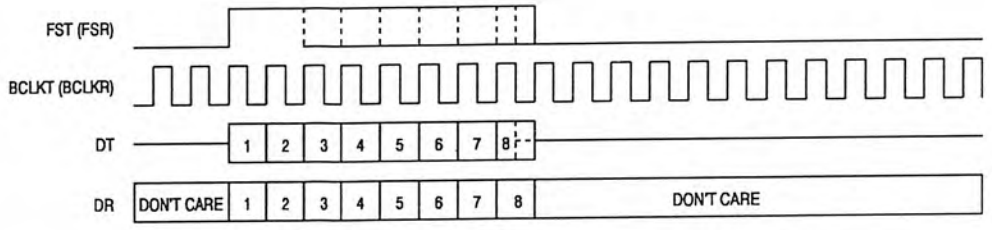


Figure 2a. Long Frame Sync (Transmit and Receive Have Individual Clocking)

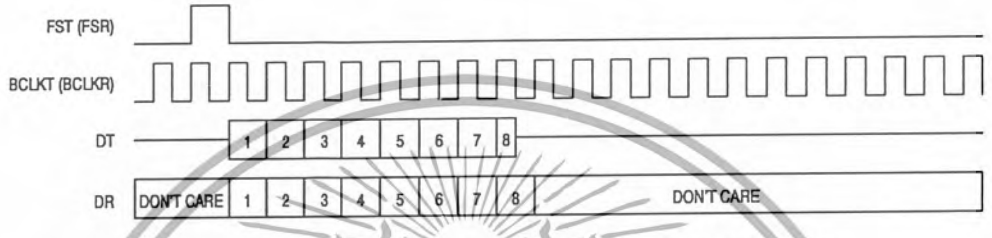


Figure 2b. Short Frame Sync (Transmit and Receive Have Individual Clocking)

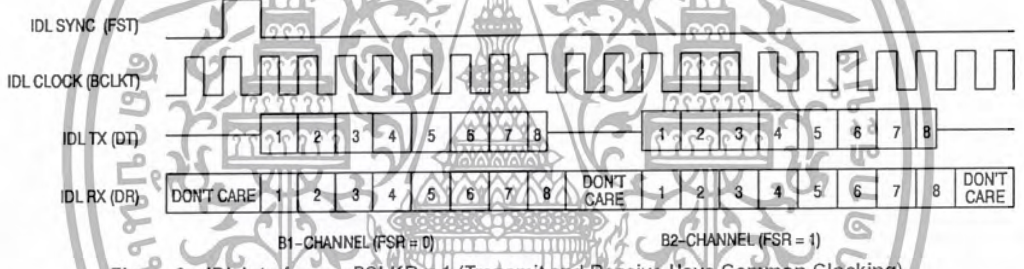


Figure 2c. IDL Interface — BCLKR = 1 (Transmit and Receive Have Common Clocking)

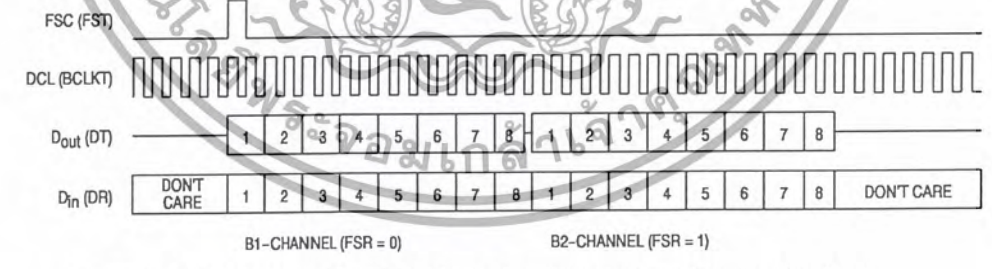


Figure 2d. GCI Interface — BCLKR = 0 (Transmit and Receive Have Common Clocking)

Figure 2. Digital Timing Modes for the PCM Data Interface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

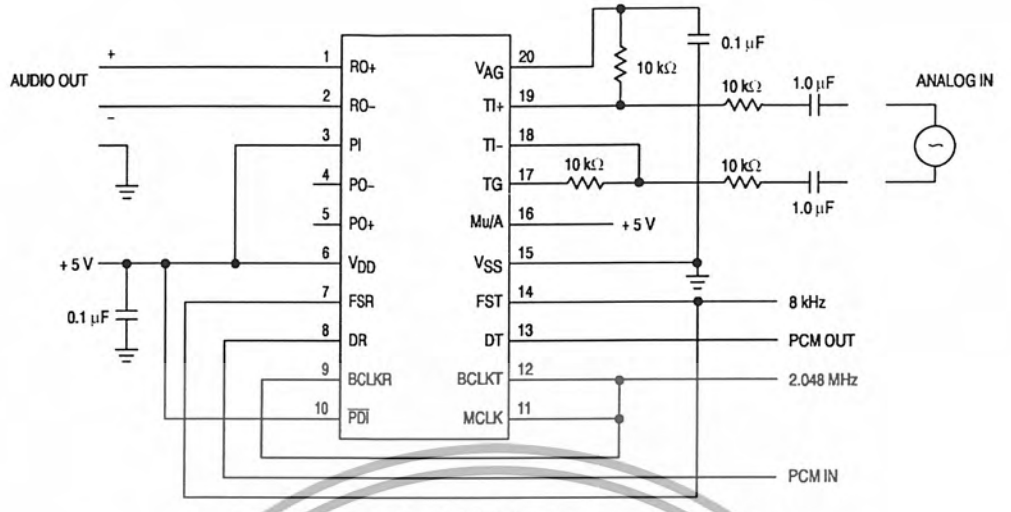


Figure 7. MC14LC5480 Test Circuit with Differential Input and Output

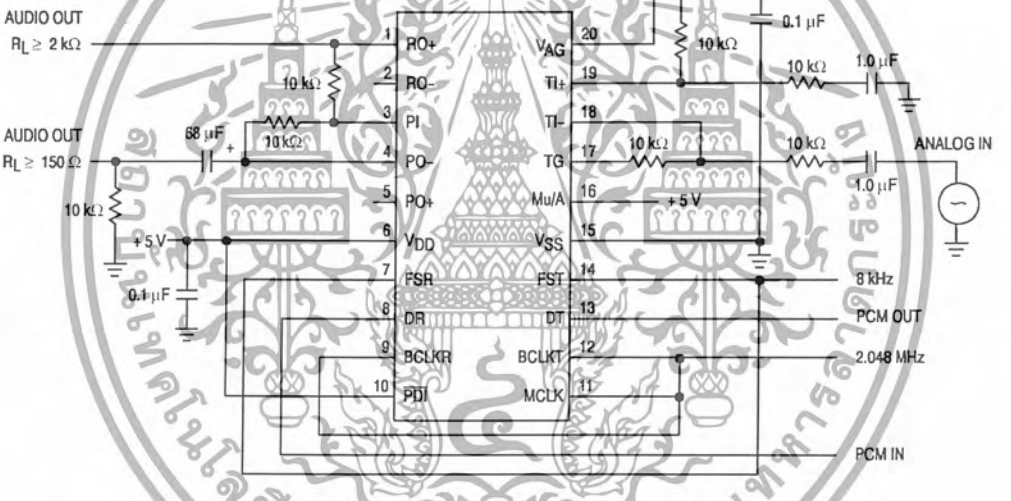
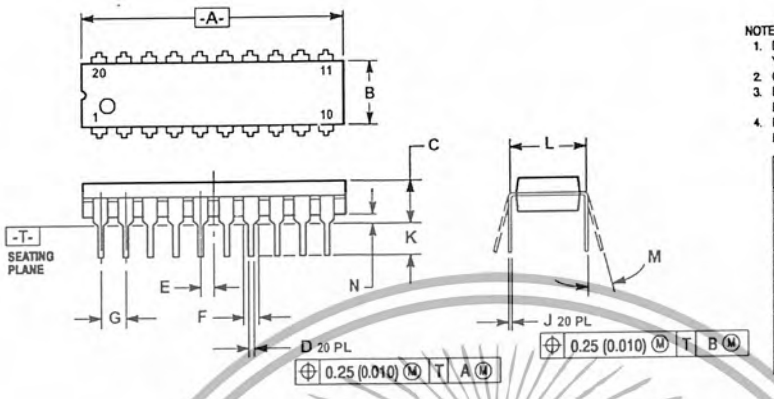


Figure 8. MC14LC5480 Test Circuit with Input and Output Referenced to V_{SS}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

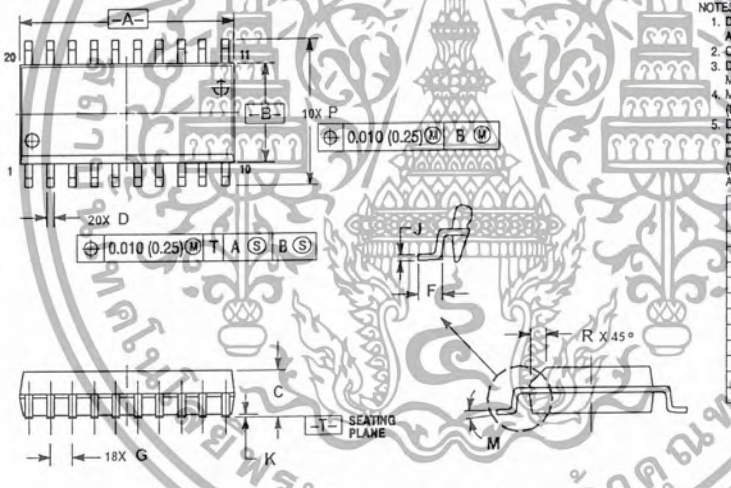
P SUFFIX
PLASTIC DIP
CASE 738–03



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.010	1.070	25.66	27.17
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.150	0.180	3.81	4.57
D	0.015	0.022	0.39	0.55
E	0.050 BSC		1.27 BSC	
F	0.050	0.070	1.27	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.140	2.80	3.55
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	15°	0°	15°
N	0.020	0.040	0.51	1.01

DW SUFFIX
SOG PACKAGE
CASE 751D–04



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.150 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.13 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	12.65	12.95	0.499	0.510
B	7.40	7.60	0.292	0.299
C	2.35	2.65	0.093	0.104
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.50	0.90	0.020	0.035
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.25	0.32	0.010	0.012
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	10.05	10.55	0.395	0.415
R	0.25	0.75	0.010	0.029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by MC145532/D

MC145532

ADPCM Transcoder

Conforms to G.721–1988 and T1.301–1987

The MC145532 Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM) Transcoder provides a low–cost, full–duplex, single–channel transcoder to (from) a 64 kbps PCM channel from (to) either a 16 kbps, 24 kbps, 32 kbps, or 64 kbps channel.

- Complies with CCITT Recommendation G.721–1988
- Complies with the American National Standard (T1.301–1987)
- Full–Duplex, Single–Channel Operation
- Mu–Law or A–Law Coding is Pin Selectable
- Synchronous or Asynchronous Operation
- Easily Interfaces with Any Member of Motorola's PCM Codec–Filter Mono–Circuit Family or Other Industry Standard Codec
- Serial PCM and ADPCM Data Transfer Rate from 64 kbps to 5.12 Mbps
- Power–Down Capability for Low Current Consumption
- The Reset State, an Option Specified in the Standards, is Automatically Initiated When the RESET Pin is Released
- Simple Time Slot Assignment Timing for Transcoder Applications
- Single 5 V Power Supply
- 16–Pin Package
- The MC145536EVK is the Evaluation Platform for the MC145532 and Also Includes the MC145480 5 V PCM Codec–Filter

DW SUFFIX
SOG PACKAGE
CASE 751G

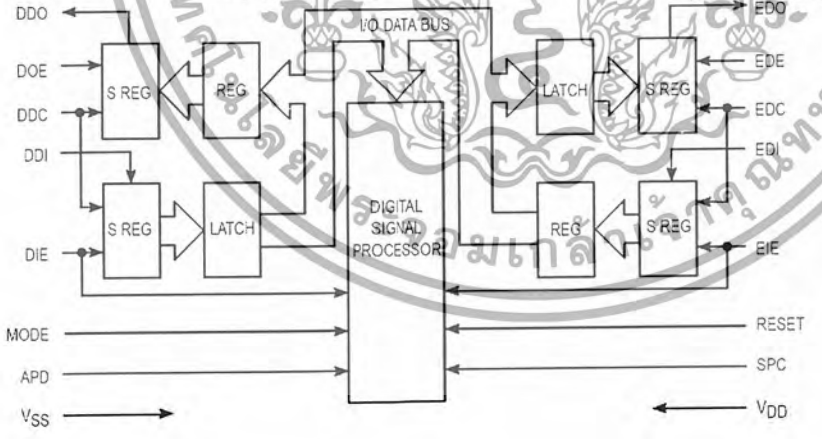
L SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 620

ORDERING INFORMATION

MC145532DW	SOG Package
MC145532L	Ceramic Package

PIN ASSIGNMENT

BLOCK DIAGRAM



REV 1
9/95 (Replaces NP470)

© Motorola, Inc. 1995

MOTOROLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVICE DESCRIPTION

An Adaptive Differential PCM (ADPCM) transcoder is used to reduce the data rate required to transmit a PCM encoded voice signal while maintaining the voice fidelity and intelligibility of the PCM signal.

The transcoder is used on 64 kbps data streams which represent either voice or voice band data signals that have been digitized by a codec (e.g., MC145557). The transcoder uses a filter to attempt to predict the next PCM input value based on previous PCM input values. The error between the predicted and the true PCM input value is the information that is sent to the other end of the line. Hence the word differential, since the ADPCM data stream is the difference between the true PCM input value and the predicted value. The term "adaptive" applies to the filter that is performing the prediction. It is adaptive in that its transfer function changes based on the PCM input data. That is, it adapts to the statistics of the signals presented to it.

PIN DESCRIPTIONS

ENCODER INPUT

EDI
Encoder Data Input (Pin 12)

PCM data to be encoded are applied to this input pin which operates synchronously with EDC and EIE to enter the data in a serial format.

EDC
Encoder Data Clock (Pin 13)

Data applied to EDI are latched into the transcoder on a falling edge of EDC and data are output from EDO on a rising edge of this input pin. The frequency of EDC may be as low as 64 kHz or as high as 5.12 MHz.

EIE
Encoder Input Enable (Pin 11)

The beginning of a new PCM word is indicated to the transcoder by a rising edge applied to this input. The frequency of EIE may not exceed 8 kHz.

ENCODER OUTPUT

EDO
Encoder Data Output (Pin 15)

ADPCM data are available in a serial format from this output, which operates synchronously with EDC and EOE. EDO is a three–state output which remains in a high–impedance state, except when presenting data.

EOE
Encoder Output Enable (Pin 14)

Each ADPCM word is requested by a rising edge on this input, which causes the EDO pin to provide the data when clocked by EDC. One EOE must occur for each EIE.

DECODER INPUT

DDI
Decoder Data Input (Pin 5)

ADPCM data to be decoded are applied to this input pin, which operates in conjunction with DDC and DIE to enter the data in a serial format.

DDC
Decoder Data Clock (Pin 4)

Data applied to DDI are latched into the transcoder on the falling edge of DDC and data are output from DDO on the rising edge of DDC. The frequency of DDC may be as low as 64 kHz or as high as 5.12 MHz.

DIE
Decoder Input Enable (Pin 6)

The beginning of a new ADPCM word is indicated by a rising edge applied to this input. Data are serially clocked into DDI on the subsequent falling edges of DDC following the DIE rising edge. The frequency of DIE may not exceed 8 kHz.

DECODER OUTPUT

DDO
Decoder Data Output (Pin 2)

PCM data are available in a serial format from this output, which operates in conjunction with DDC and DOE. DDO is a three–state output that remains at a high–impedance state except when presenting data.

DOE
Decoder Output Enable (Pin 3)

Each ADPCM word is requested by a rising edge on this input which causes the DDO pin to provide the data when clocked by DDC. One DOE must occur for each DIE.

CONTEXT

MODE
Mode Select (Pin 1)

A logic 0 applied to this input makes the transcoder compatible with Mu–255 companding and D3 data format. A logic 1 applied to this pin makes the transcoder compatible with A–Law companding with even bit inversion data format.

SPC
Signal Processor Clock (Pin 10)

This input is typically clocked with a 20.48 MHz clock signal which is used as the digital signal processor master clock. This pin has a CMOS compatible input.

RESET
Reset (Pin 7)

A logic 0 applied to this input forces the transcoder into a low power dissipation mode. A rising edge on this pin causes power to be restored and the optional transcoder RESET state (specified in the standards) to be forced. Valid data is available at the output pins four input enables after a rising edge on this pin. This pin has a CMOS compatible input.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APD
Absolute Power Down (Pin 9)

A logic 1 applied to this input forces the transcoder into a power saving mode. This pin has a CMOS compatible input.

POWER SUPPLY

V_{DD}
Positive Power Supply (Pin 16)

The most positive power supply pin, normally 5 V.

V_{SS}
Negative Power Supply (Pin 8)

The most negative power supply pin, normally 0 V.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

ENCODING/DECODING RATES

The MC145532 allows for the encoding and decoding of data at one of four rates on a sample–by–sample basis. Each data sample that is provided to the part is accompanied by an indication of the rate at which it is to be encoded or decoded. The width of the enable pulse determines the encoding/decoding rate chosen for each sample.

The 64 kbps rate allows for PCM data to be passed directly through the part. The 32 kbps rate is either the G.721–1988 or the T1.301–1987 standard, depending on the state of the mode pin. The 24 kbps encoding rate is compliant with CCITT G.723–1988 and G.726. The 16 kbps rate is a modified quantizer from the 32 kbps technique and is not a standard.

TIMING

Figures 1 through 8 show the timing of the input and output pins. The MC145532 determines the mode of the timing signals, either short or long frame, for each enable, independent of the mode of any previous enables. A transition from short frame to long frame mode or vice versa will cause at least one frame of data to be destroyed. Each of the four sets of I/O pins determines its mode independent of the other sets. Thus the encoder input could be operating with long frame timing and the output could be operating with short frame timing. Note that the short frame timing on the input enables can only be used with the 32 kbps transcoding rate. The number of data clock falling edges enclosed by the input enable line (EIE or DIE) determines both the short frame or long frame mode and the transcoding rate. The mode of the input or output is determined each frame. In all modes, the data is captured by the MC145532 on the falling edge of either EDC or DDC.

ENCODER INPUT — SHORT FRAME

Figure 1 shows the timing of the encoder data clock (EDC), the encoder input enable (EIE), and the encoder data input (EDI) pins in short frame operation.

The determination of short frame mode is made by the MC145532 based on one falling EDC edge while EIE is high. Note that only a 32 kbps encoding rate can be specified when using short frame mode on the encoder input.

ENCODER INPUT — LONG FRAME

Figure 2 shows the clock, enable, and data signals for the encoder input in long frame mode. In this mode, the data is captured by the MC145532 on the falling edge of EDC.

The determination of the encoding rate is made based on the number of falling EDC edges seen by the MC145532 while EIE is high. Four edges implies a 32 kbps encoding rate, three edges implies a 24 kbps encoding rate, two edges implies a 16 kbps rate, and from five to eight inclusive imply a 64 kbps rate. The encoding rate may be changed on a frame–by–frame basis. The encoded word is available at EDO (via EOE and EDC) from 250 µs to 375 µs after it is requested.

ENCODER OUTPUT — SHORT FRAME

Figure 3 shows the timing of the encoder output in short frame mode. The length of the LSB is always one half of an EDC cycle.

The EDO will provide the correct number of bits for the encoding rate that was selected for this frame of data on the encoder input pins. The data is loaded into the MC145532 during one frame, encoded on the next frame, and read during the third frame.

ENCODER OUTPUT — LONG FRAME

Figure 4 shows the timing of the encoder output in long frame mode. The enable must be wider than two falling edges of the EDC to be in long frame mode. If the enable falls before the correct number of bits have been presented to the output (EDO), the transcoder will complete the presentation of the bits to the output with the LSB being one half of an EDC period wide. If the enable falls after the one half EDC period of the LSB, then the LSB will be extended up to the full EDC clock period and the subsequent data will be a recirculation of the previous data, which repeats until the enable pin falls. This is shown on the second enable for the 16 kbps encoding rate example in Figure 4.

DECODER INPUT — SHORT FRAME

Figure 5 shows the timing of the decoder data clock, the decoder input enable, and the decoder data input pins in short frame operation. Note that in this mode only a 32 kbps decoding rate can be selected.

DECODER INPUT — LONG FRAME

Figure 6 shows the clock, enable, and data signals for the decoder input in long frame mode.

The determination of the decoding rate is made based on the number of falling DDC edges seen by the MC145532 while DIE is high. Four edges implies a 32 kbps decoding rate, three edges implies a 24 kbps decoding rate, two edges implies a 16 kbps rate, and from five to eight edges inclusive imply a 64 kbps rate. The decoding rate may be changed on a frame–by–frame basis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DECODER OUTPUT — SHORT FRAME

Figure 7 shows the timing of the decoder output in short frame mode.

The DDO will provide the 8–bit PCM word for the decoding rate that was selected for this frame of data on the decoder input pins. The data is loaded into the MC145532 during one frame, decoded on the next frame, and read during the third frame.

DECODER OUTPUT — LONG FRAME

Figure 8 shows the timing of the decoder output in long frame mode. Note that at least eight bits are presented to the output, provided that at least two falling edges of DDC are seen while DOE is high. The enable can be used to extend the LSB to a full DDC period and/or cause the eight bits of data to be recirculated to the output pin until the enable falls.

STANDARDS INFORMATION

The following standards apply to the MC145532:

T1.301–1987 — 32 kbps ADPCM
T1.303–1988 — 24 kbps ADPCM
CCITT G.721–1988, G.723–1988, and G.726 — 32 kbps and 24 kbps

CCITT, ITU–T, TIA, and EIA documents may be obtained by contacting Global Engineering Documents in the USA at (800) 854–7179, or internationally at (303) 397–7956.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Voltages Referenced to V_{SS})

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V_{DD}	− 0.5 to + 7.0	V
Voltage, Any Pin to V_{SS}	V	− 0.5 to V_{DD} + 0.5	V
DC Current, Any Pin	I_{in}	± 10	mA
Operating Temperature	T_A	− 40 to + 85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	− 85 to + 150	°C

This device contains circuitry to protect against damage due to high static voltages or electric fields; however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For proper operation it is recommended that V_{in} and V_{out} be constrained to the range $V_{SS} \le (V_{in}$ or $V_{out}) \le V_{DD}$.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V_{SS} or V_{DD}).

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS (T_A = − 40 to + 85°C)

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
DC Supply Voltage	V_{DD}	4.50	5.50	V
Power Dissipation	P_D	—	0.28	W

DIGITAL CHARACTERISTICS (V_{DD} = 5.0 V, T_A = − 40 to + 85°C)

Parameter		Symbol	Min	Max	Unit
High Level Input Voltage	Mode, DOE, DDC, DDI, DIE, EIE, EDI, EDC, EOE	V_{IH}	2.0	—	V
Low Level Input Voltage	Mode, DOE, DDC, DDI, DIE, EIE, EDI, EDC, EOE	V_{IL}	—	0.8	V
High Level Input Voltage	RESET, APD, SPC	V_{IH}	0.7 V_{DD}	—	V
Low Level Input Voltage	RESET, APD, SPC	V_{IL}	—	0.3 V_{DD}	V
Input Current		I_{in}	—	± 1.0	µA
Input Capacitance		C_{in}	—	10	pF
High Level Output Voltage (I_{OH} = − 2.0 mA)	DDO, EDO	V_{OH}	4.6	—	V
Low Level Output Voltage (I_{OL} = 2.0 MA)	DDO, EDO	V_{OL}	—	0.4	V
Output Leakage Current (V_{DD} = 5.5 V)	DDO, EDO	I_{lkg}	—	± 5.0	µA

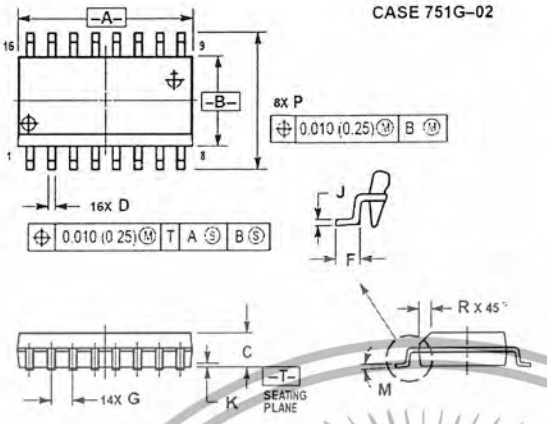
SWITCHING CHARACTERISTICS (V_{DD} = 5.0 V, T_A = − 40 to + 85°C)

Parameter	Min	Max	Unit
SPC Frequency	19.990	23	MHz
SPC Duty Cycle	45	55	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

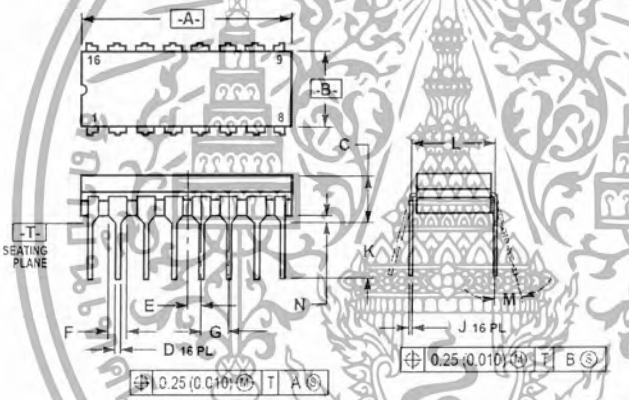
DW SUFFIX
SOG PACKAGE
CASE 751G–02



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.13 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	10.15	10.45	0.400	0.411
B	7.40	7.60	0.292	0.299
C	2.35	2.65	0.093	0.104
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.50	0.90	0.020	0.035
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.25	0.32	0.010	0.012
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	10.05	10.55	0.395	0.415
R	0.25	0.75	0.010	0.029

L SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 620–09



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION F MAY NARROW TO 0.76 (0.030) WHERE THE LEAD ENTERS THE CERAMIC BODY.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.750	0.770	19.05	19.55
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	—	0.165	—	4.19
D	0.015	0.021	0.39	0.53
E	0.050 BSC		1.27 BSC	
F	0.055	0.070	1.40	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.008	0.011	0.20	0.27
K	—	0.200	—	5.08
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	15°	0°	15°
N	0.015	0.035	0.39	0.88

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters can and do vary in different applications. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and M are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:
USA/EUROPE: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1–800–441–2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi–SPD–JLDC, Toshikatsu Otsuki,
6F Seibu–Butsuryu–Center, 3–14–2 Tatsumi Koto–Ku, Tokyo 135, Japan. 03–3521–8315

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE (602) 244–6609
INTERNET: http://Design–NET.com

HONG KONG: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852–26629298

MOTOROLA

MC145532/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฌ

แบบประเมินคุณภาพชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดฝึกทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับชุดทดลอง

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ.....

(.....)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ดึงดูดความสนใจในการทดลองใช้ชุดทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	รูปแบบของชุดทดลองกระตุ้นและจูงใจผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	มีความเหมาะสมกับระดับความรู้ของผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.	ชุดทดลองสามารถทำให้ผู้ทดลองบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	สามารถนำความรู้เดิมที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้งานกับชุดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ชุดทดลองที่สร้างขึ้นมานี้สามารถพัฒนาการเรียนรู้ได้เป็นอย่างดี.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ชุดทดลองสร้างเสริมประสบการณ์ในการฝึกทักษะความรู้ใหม่ๆ.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	ชุดทดลองใช้งานได้สะดวกและเป็นไปตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	ชุดทดลองมีลำดับขั้นการทดลองสัมพันธ์กับคู่มือการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความสะดวกในการเตรียมอุปกรณ์.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
11.	มีความปลอดภัยในขณะทำการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
12.	รูปร่างและขนาดของชุดทดลองมีความเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
13.	สะดวกในการต่อสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ข้างเคียง.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	การบำรุงรักษาทำได้ง่าย.....	.....	.....	.....	.....	.....
15.	ผู้ทดลองสามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้.....	.....	.....	.....	.....	.....

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานการทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็นการประเมินออกเป็น 4 ใบงาน ในแต่ละใบงานจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน

<u>ตอนที่ 1</u> ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับใบงานการทดลองที่สร้างขึ้น

<u>ตอนที่ 2</u> ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

<u>ตอนที่ 1</u> กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

<u>ตอนที่ 2</u> โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ.....

(.....)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 1 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 1

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	.....	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	.....	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จากการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
15	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 2 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 2

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	.....	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	.....	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จากการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
15.	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 3 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 3

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	.....	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	.....	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จาก					
15.	การทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 4 เรื่องความแตกต่างระหว่าง PCM DPCM และ ADPCM

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 4

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	.....	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	.....	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จาก					
15.	การทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิด้านสื่อที่มีต่อชุดฝึกทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับชุดทดลอง

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ.....

(.....)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	การวางรูปแบบของหน้าปัดทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	ความเหมาะสมของขนาดตัวอักษรของชุดทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	ความเหมาะสมของสีตัวอักษร.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.	ความเหมาะสมของสีพื้นหลัง.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ความเหมาะสมของสีกล่อง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ความเหมาะสมของภาพในการสื่อความหมายงานกับชุดทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	รูปร่างและขนาดของชุดทดลองมีความเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	มีความปลอดภัยในขณะทำการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	สะดวกในการต่อสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ข้างเคียง.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	การบำรุงรักษาทำได้ง่าย.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับชุดทดลอง

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ .....

(ผศ.พีระณี สุขมณีนนท์)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ดึงดูดความสนใจในการทดลองใช้ชุดทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
2.	รูปแบบของชุดทดลองกระตุ้นและจูงใจผู้ทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
3.	มีความเหมาะสมกับระดับความรู้ของผู้ทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
4.	ชุดทดลองสามารถทำให้ผู้ทดลองบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้.....	.....	.....	✓	.....	.....
5.	สามารถนำความรู้เดิมที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้งานกับชุดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
6.	ชุดทดลองที่สร้างขึ้นมานี้สามารถพัฒนาการเรียนรู้ได้เป็นอย่างดี.....	.....	.....	✓	.....	.....
7.	ชุดทดลองสร้างเสริมประสบการณ์ในการฝึกทักษะความรู้ใหม่ๆ.....	.....	✓	.....	.....	.....
8.	ชุดทดลองใช้งานได้สะดวกและเป็นไปตามขั้นตอน.....	.....	.....	✓	.....	.....
9.	ชุดทดลองมีลำดับขั้นการทดลองสัมพันธ์กับคู่มือการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
10.	มีความสะดวกในการเตรียมอุปกรณ์.....	✓	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
11.	มีความปลอดภัยในขณะทำการทดลอง.....	✓				
12.	รูปร่างและขนาดของชุดทดลองมีความเหมาะสม.....	✓				
13.	สะดวกในการต่อสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ข้างเคียง.....	✓				
14.	การบำรุงรักษาทำได้ง่าย.....		✓			
15.	ผู้ทดลองสามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้.....			✓		

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานการทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็นการประเมินออกเป็น 4 ใบงานในแต่ละใบงานจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับใบงานการทดลองที่สร้างขึ้น

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ .....

(นพ.พีระกุล สุวรรณจินดา)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 1 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 1

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	.....	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	.....	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	✓	.....	.....	.....
14	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จากการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
15	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 2 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 2

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	✓	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	✓	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	✓	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	.....	✓	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	✓	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	✓	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	✓	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	✓	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	.....	✓	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	✓	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จากการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
15.	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 3 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 3

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	✓	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	✓	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	✓	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	✓	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	✓	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	✓	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	✓	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	✓	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จาก					
15.	การทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 4 เรื่องความแตกต่างระหว่าง PCM DPCM และ ADPCM

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 4

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	.....	.....	.....	✓	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	✓	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	✓	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	✓	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	✓	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	✓	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	✓	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จาก					
15.	การทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับชุดทดลอง

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ .....

(นายปิยะ .....)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ดึงดูดความสนใจในการทดลองใช้ชุดทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.	รูปแบบของชุดทดลองกระตุ้นและจูงใจผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.	มีความเหมาะสมกับระดับความรู้ของผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.	ชุดทดลองสามารถทำให้ผู้ทดลองบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	สามารถนำความรู้เดิมที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้งานกับชุดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
6.	ชุดทดลองที่สร้างขึ้นมานี้สามารถพัฒนาการเรียนรู้ได้เป็นอย่างดี.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.	ชุดทดลองสร้างเสริมประสบการณ์ในการฝึกทักษะความรู้ใหม่ๆ.....	.....	.....	.....	.....	.....
8.	ชุดทดลองใช้งานได้สะดวกและเป็นไปตามขั้นตอน.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	ชุดทดลองมีลำดับขั้นการทดลองสัมพันธ์กับคู่มือการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.	มีความสะดวกในการเตรียมอุปกรณ์.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
11.	มีความปลอดภัยในขณะทำการทดลอง.....	/				
12.	รูปร่างและขนาดของชุดทดลองมีความเหมาะสม.....	/				
13.	สะดวกในการต่อสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ข้างเคียง.....	/				
14.	การบำรุงรักษาทำได้ง่าย.....	/				
15.	ผู้ทดลองสามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้.....		/			

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานการทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็นการประเมินออกเป็น 4 ใบงานในแต่ละใบงานจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับใบงานการทดลองที่สร้างขึ้น

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ .....

(นายปฏิภาณ ปานทอง) .....

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 1 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 1

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	/	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	.....	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	.....	/	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	.....	/	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	/	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	/	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	/	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	.....	/	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	/	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จากการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
15	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 2 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่าง

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 2

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	✓	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	✓	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	✓	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	✓	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	✓	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	✓	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	✓	.....	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	✓	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	.....	✓	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จากการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
15.	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 3 เรื่องการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์แบบผลต่างแบบปรับค่า

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 3

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	/	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	/	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	/	.....	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	.....	/	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	.....	/	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	.....	/	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	/	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	/	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	/	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จาก					
15.	การทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 4 เรื่องความแตกต่างระหว่าง PCM DPCM และ ADPCM

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 4

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	ใบงานมีความน่าสนใจ.....	/	.....	.....	.....	.....
2.	การทดลองในใบงานดึงดูดความสนใจในการทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
3.	บอกวัตถุประสงค์ของการทดลองในใบงาน..	/	.....	.....	.....	.....
4.	สามารถนำความรู้ที่มีอยู่เดิมกลับมาใช้ได้ใหม่.....	.....	/	.....	.....	.....
5.	ใบงานการทดลองมีการนำความรู้ใหม่เข้ามาใช้ในการทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
6.	ใบงานมีการทดลองเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก.....	/	.....	.....	.....	.....
7.	ใบงานมีลำดับการทดลองที่เหมาะสม.....	/	.....	.....	.....	.....
8.	มีความเหมาะสมกับผู้ทดลอง.....	.....	/	.....	.....	.....
9.	การทดลองในใบงานมีการทดลองให้ผู้ทดลองได้ทดลองตามขั้นตอน.....	/	.....	.....	.....	.....
10.	มีความชัดเจนในการอธิบายลำดับขั้นการทดลองในแต่ละขั้นตอน.....	.....	/	.....	.....	.....
11.	คำอธิบายลำดับขั้นตอนสามารถเข้าใจได้ง่าย.	/	.....	.....	.....	.....
12.	รูปผังการทำงานมีความถูกต้องเหมาะสม.....	/	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
13.	การทดลองง่ายต่อการจดจำ.....	.....	.....	.....	.....	.....
14.	ผู้ทดลองสามารถทบทวนความรู้ที่ได้จาก					
15.	การทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....
	ใบงานมีคำถามที่เหมาะสมกับการทดลอง.....	.....	.....	.....	.....	.....

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบประเมินคุณภาพของผู้ทรงคุณวุฒิด้านสื่อที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ถามความพึงพอใจเกี่ยวกับชุดทดลอง

ตอนที่ 2 ถามความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

การประเมิน

ตอนที่ 1 กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องระดับการประเมินเพียงช่องเดียว โดยระดับคะแนนจะแสดงความหมายดังนี้

5	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมากที่สุด
4	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยมาก
3	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยปานกลาง
2	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อย
1	มีค่าเท่ากับ	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ตอนที่ 2 โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงต่อไป

ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว

ลงนามชื่อ .....

(.....)

ผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตอนที่ 1</u> ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

คำชี้แจง :- กรุณาใส่เครื่องหมาย √ ลงในช่องว่างที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน

ข้อที่	ข้อความ	ระดับความพึงพอใจ				
		5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
1.	การวางรูปแบบของหน้าปัดทดลอง	✓				
2.	ความเหมาะสมของขนาดตัวอักษรของชุดทดลอง	✓				
3.	ความเหมาะสมของสีตัวอักษร	✓				
4.	ความเหมาะสมของสีพื้นหลัง	✓				
5.	ความเหมาะสมของสีกล่อง	✓				
6.	ความเหมาะสมของภาพในการสื่อความหมายงานกับชุดทดลอง	✓				
7.	รูปร่างและขนาดของชุดทดลองมีความเหมาะสม	✓				
8.	มีความปลอดภัยในขณะทำการทดลอง		✓			
9.	สะดวกในการต่อสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ข้างเคียง	✓				
10.	การบำรุงรักษาทำได้ง่าย		✓			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตอนที่ 2</u> ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

โปรดเขียนแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ

1. ความคิดเห็นอื่นๆ และข้อเสนอแนะทั่วไป

ชุดทดลองมีการออกแบบ เหมาะสมกับผู้เรียน และการใช้งานในระดับดีมาก
เหมาะกับการเรียนการสอน แต่มีการเพิ่มเติมในส่วน
ลีดยาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ญ

หนังสือขอเชิญเป็นผู้ทรงคุณวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม โทร. 2702-3

ที่ ศธ 0524.04(5)/ ๑๑๑ **วันที่** 23 มีนาคม 2547

เรื่อง ขอเชิญเป็นอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ ด้านเทคนิคการผลิตสื่อ

เรียน ดร.ฉันทนา โหมดมณี

ด้วยภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล. พิจารณาแล้วเห็นว่าท่านเป็นผู้มีความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์ ที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำโครงงานการสร้างอุปกรณ์เพื่อการสอนของนักศึกษาเป็นอย่างยิ่ง จึงมีความประสงค์เรียนเชิญเป็นอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ ด้านเทคนิคการผลิตสื่อในวิชาโครงงานการสร้างอุปกรณ์เพื่อการสอน เรื่อง "ชุดทดลองการมอดูเลตแบบรหัสพัลส์" ของนักศึกษาชั้นปีที่ 2 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม โดยมีนักศึกษาดำเนินการจัดทำดังนี้

1. นายนพดล เอี่ยมพลับ
2. นายมนตรี พยัควัลย์
3. นายแสนชัย ไตรภูมิ
4. นายเสิน กงมี

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความร่วมมือจากท่าน และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธ์ ราตรี)
หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฎ

การวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง

ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อชุดทดลอง		
ข้อที่	ค่าเฉลี่ย $\overline{X}$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน *SD*
1	4.00	0.00
2	4.00	0.00
3	4.00	0.00
4	4.00	1.00
5	4.00	0.00
6	4.00	1.00
7	4.50	0.50
8	4.00	1.00
9	4.50	0.50
10	4.50	0.50
11	5.00	0.00
12	5.00	0.00
13	5.00	0.00
14	4.50	0.50
15	3.50	0.50
ผลรวม	4.30	0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.2 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 1

ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 1		
ข้อที่	ค่าเฉลี่ย $\overline{X}$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน *SD*
1	4.50	0.50
2	4.00	0.00
3	5.00	0.00
4	4.50	0.50
5	4.50	0.50
6	4.00	0.00
7	4.50	0.50
8	4.50	0.50
9	5.00	0.00
10	5.00	0.00
11	4.50	0.50
12	4.50	0.50
13	4.00	0.00
14	4.50	0.50
15	4.00	0.00
ผลรวม	4.46	0.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.3 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 2

ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 2		
ข้อที่	ค่าเฉลี่ย $\overline{X}$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน *SD*
1	4.00	1.00
2	4.00	0.00
3	5.00	0.00
4	4.50	0.50
5	4.00	0.00
6	4.50	0.50
7	4.50	0.50
8	4.00	0.00
9	5.00	0.00
10	5.00	0.00
11	5.00	0.00
12	3.50	0.50
13	4.00	1.00
14	4.00	0.00
15	4.50	0.50
ผลรวม	4.36	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.4 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 3

ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 3		
ข้อที่	ค่าเฉลี่ย $\overline{X}$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน *SD*
1	4.50	0.50
2	4.00	0.00
3	5.00	0.00
4	4.50	0.50
5	4.00	0.00
6	4.00	0.00
7	4.50	0.50
8	4.50	0.50
9	4.50	0.50
10	4.50	0.50
11	5.00	0.00
12	4.50	0.50
13	4.50	0.50
14	4.00	0.00
15	4.50	0.50
ผลรวม	4.43	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.5 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 4

ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อใบงานที่ 4		
ข้อที่	ค่าเฉลี่ย $\overline{X}$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน *SD*
1	3.50	0.50
2	4.00	0.00
3	5.00	0.00
4	4.00	0.50
5	4.50	0.00
6	4.50	0.00
7	4.50	0.50
8	4.00	0.50
9	5.00	0.50
10	4.50	0.50
11	5.00	0.00
12	4.50	0.50
13	4.50	0.50
14	4.00	0.00
15	4.00	0.50
ผลรวม	4.36	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.6 การวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อสื่อการสอน

ความพึงพอใจของผู้ทรงคุณวุฒิที่มีต่อสื่อการสอน	
ข้อที่	คะแนน
1	5.00
2	5.00
3	5.00
4	5.00
5	5.00
6	5.00
7	5.00
8	4.00
9	5.00
10	4.00
คิดเป็นร้อยละ	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ-สกุล	นายนพดล เอี่ยมพลับ
วัน เดือน ปีเกิด	9 มีนาคม พ.ศ. 2524
ภูมิลำเนา	33/19 หมู่ 3 ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค
	จังหวัดกาญจนบุรี 71150 โทรศัพท์ 0-1384-3655

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา	โรงเรียนไทรโยคใหญ่ จังหวัดกาญจนบุรี
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนไทรโยคน้อยวิทยา จังหวัดกาญจนบุรี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคกาญจนบุรี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคกาญจนบุรี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
	ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
คติพจน์	เราไม่รอ เราไม่หวัง แต่เราทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ-สกุล	นายมนตรี พยัควัลย์
วัน เดือน ปีเกิด	3 ตุลาคม พ.ศ. 2525
ภูมิลำเนา	175 หมู่ 3 ตำบลคลองขุด อำเภอเมือง
	จังหวัดสตูล 91000 โทรศัพท์ 0-6553-8499

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา	โรงเรียนเทศบาล 4 (บ้านศาลากันตัง) จังหวัดสตูล
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนพิมานพิทยาสรรค์ จังหวัดสตูล
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคสตูล
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคสตูล
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
	ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
คติพจน์	อย่านอนตื่นสาย อย่าอายทำกิน อย่าหมิ่นเงินน้อย
	อย่าคอยวาสนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ-สกุล	นายเสิน คงมี
วัน เดือน ปีเกิด	8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520
ภูมิลำเนา	65 หมู่ 7 ตำบลกอโค อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000 โทรศัพท์ 0-4026-4842

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านลำชีวุฒิวงศ์ราชสงเคราะห์ จังหวัดสุรินทร์
มัธยมศึกษาตอนต้น	การศึกษานอกโรงเรียน จังหวัดสุรินทร์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

คติพจน์ จงซื่อสัตย์กับตนเองก่อนที่จะซื่อสัตย์กับผู้อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ-สกุล	นายแสนชัย ไตรภูมิ
วัน เดือน ปีเกิด	23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524
ภูมิลำเนา	66 หมู่ 6 ตำบลจันทนิมิต อำเภอเมือง
	จังหวัดจันทบุรี 22000 โทรศัพท์ 0-9541-8998
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดไผ่ล้อม (อินทก์อุทัย) จังหวัดจันทบุรี
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
	ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
คติพจน์	คนจะดีได้เพราะครอบครัวที่ดีเป็นพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้