สำนักหอสมุดกลาง_พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การส่งสัญญาณผ่านสายไฟในอาคาร

SIGNAL TRANSMISSION THROUGH AC POWER LINE

โดย

นาย นพรัตน์ สามิตร

นาย นันทศักดิ์ ศรีทา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....45739
วัน, เดือน, ปี.....13 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การส่งสัญญาณผ่านสายไฟในอาคาร
SIGNAL TRANSMISSION THROUGH AC POWER LINE

ผู้จัดทำ

1. นาย นพรัตน์ สามิตร รหัส 42015266
2. นาย นันทศักดิ์ ศรีทา รหัส 42015267

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. วันชัย ริ้วรุจา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งสัญญาณผ่านสายไฟในอาคาร

นายนพรัตน์ สามิตร 42015266
นายนันทศักดิ์ ศรีทา 42015267
อาจารย์ รศ.ดร.วันชัย ริ้วรุจา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบ และสร้างชุดรับส่ง สัญญาณเสียง , คลื่นความถี่ในรูปแบบต่าง ๆ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ไปในสายไฟตามอาคาร ชนิดสวนทางกันได้ในเวลาเดียวกัน จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ประกอบด้วยชุดรับส่ง 2 ส่วนหลัก ๆ ด้วยกันคือ ภาคส่งสำหรับส่งสัญญาณ และภาครับสำหรับรับสัญญาณ โดยใช้หลักการของการรับส่งสัญญาณแบบเอฟเอ็ม หรือการมอดูเลตทางความถี่ มีวงจรเฟสล็อกลูป ทำหน้าที่ มอดูเลตความถี่ในเครื่องส่ง และเฟสล็อกลูปจะทำหน้าที่ดีมอดูเลตในเครื่องรับ ในส่วนของการส่งและรับแรงดันกระแสตรงจะใช้วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ในภาคส่ง และมีวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันในภาครับ โดยความถี่ของคลื่นพาหะที่ใช้รับส่งใน 2 ชุดนี้ จะใช้ความถี่ที่แตกต่างกันที่ 110 กิโลเฮิรตซ์ และ 280 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อไม่ให้รบกวนกันในการส่งเวลาเดียวกัน

ABSTRACT

This thesis described the design of full duplex transmitter/receiver for audio signal , frequency and DC voltage that send into ac power line by using principle of FM or frequency modulation. There are two parts of this project (1) transmitter for sending signal (2) receiver for receive signal. There are phase lock loop (PLL) circuits to modulate and demodulate the frequency of transmitter and receiver. In transmitter/receiver , a voltage signal is converted to frequency by using voltage to frequency converter circuits (V/F) for transmitter and the received frequency is converted to voltage by using frequency to voltage converter circuits (F/V). The carrier signal frequency of transmitter/receiver are 110 KHz and 280 KHz .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 รูปคลื่นชนิดต่างๆ	3
2.2 ลักษณะของสัญญาณ	7
2.3 การตัดสินใจเลือกการมอดูเลต	8
2.4 การมอดูเลต	8
2.5 ไซด์แบนด์ FM	10
2.6 การดีมอดชนิด PLL	13
2.7 ลิมิตเตอร์	14
2.8 การจับสัญญาณที่แรงกว่า	15
2.9 พรีเอ็มฟาสิสและดีเอ็มฟาสิส	15
2.10 โอเปอร์เรชั่นแนล แอมปลิไฟร์เออร์ หรือ ออปแอมป์ (Operational Amplifier or Op-Amp)	18
2.11 คลื่นเสียงและความถี่ออดิโอ	20
2.12 สัญญาณออดิโอ	24
บทที่ 3 การสร้างและวงจรใช้งาน	27
3.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM	27
3.2 วงจรส่งสัญญาณ	30
3.3 ส่วนประกอบหลักของวงจรรับสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM	34
3.4 วงจรรับสัญญาณ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
3.5 การแปลงแรงดันเป็นความถี่	39
3.6 การแปลงความถี่เป็นแรงดัน	42
บทที่ 4 การทดลองและสรุปผล	47
4.1 การทดลองวงจรส่งสัญญาณร่วมกับวงจรรับ สัญญาณที่ 110 KHz และ 280KHz	47
4.2 เมื่อทดลองร่วมกับวงจร V to F และ F to V	56
4.3 สรุปคุณสมบัติโดยรวมของชุดรับส่งสัญญาณ	58
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	รูปคลื่นชนิดต่าง ๆ	3
2.2	แสดงการวิเคราะห์คลื่นรูปซายน์ในเชิงความถี่ ด้วยเครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์	4
2.3	คลื่นที่ประกอบกันเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	4
2.4	วิเคราะห์คลื่นรูปสี่เหลี่ยมในเชิงความถี่	5
2.5	คลื่นที่ประกอบกันเป็นคลื่นฟันเลื่อย	6
2.6	สเปกตรัมความถี่(ภาพแสดงการวิเคราะห์ใน เชิงความถี่) ของคลื่นฟันเลื่อย	6
2.7	สัญญาณ AM / FM	7
2.8	การมอดูเลตทางความถี่	9
2.9	อัตราการเบี่ยงเบนในคลื่น FM	10
2.10	กราฟแสดงแอมปลิจูดของพาหะและไซด์แบนด์ ในระบบ FM	10
2.11	รูปคลื่น FM ในเชิงความถี่ ที่ค่าดัชนีการมอดูเลต เท่ากับ 0 , 0.5 , 1 , 1.5 , 2.0 , 3.0 ตามลำดับ	12
2.12	แผนผังของวงจรดีมอดชนิดเฟสล็อกลูป	13
2.13	เฟสล็อกลูปใช้ IC	14
2.14	วงจรลิมิเตอร์จะขจัดนอยส์และการเปลี่ยนแปลง ทางแอมพลิจูดของสัญญาณ FM	15
2.15	เปรียบเทียบแอมปลิจูดของสัญญาณที่เข้ามา มอดูเลตกับนอยส์	16
2.16	แสดงขบวนการพรีเอ็มฟาสิสที่เครื่องส่ง และ ดีเอ็มฟาสิสที่เครื่องรับ	17
2.17	แสดงกราฟมาตราฐานพรีเอ็มฟาสิส	17
2.18	ผังแสดงวงจรภายในไอซีออปแอมป์	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.19	Glass flat packed ไอซีเบอร์ LM107 ออปแอมป์แสดงตำแหน่งขาฟังก์ชั่นของไอซี ขนาดของตัวถังประมาณ 0.275 ตร.นิ้ว	18
2.20	คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนของช่อมเสียง	20
2.21	สเปคตรัมของความถี่เสียงที่หูของมนุษย์สามารถ ตอบสนองได้ อยู่ในย่านความถี่ 16 ถึง 16,000 เฮิรตซ์	23
2.22	สัญญาณเสียงถูกแปรสภาพไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วย ไมโครโฟนแล้วส่งผ่านวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าหลังจาก นั้นจะถูกป้อนผ่าน ลำโพงซึ่งทำหน้าที่ เปลี่ยนสัญญาณไฟ ฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณตามเดิม	24
2.23	เปรียบเทียบสัญญาณออดิโอ(สัญญาณไฟฟ้า) กับสัญญาณเสียง	25
3.1	บล็อกไดอะแกรมวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM	27
3.2	วงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM 280 KHz	28
3.3	วงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM 110 KHz	29
3.4	วงจรเครื่องรับสัญญาณ FM ย่านความถี่ 110 KHz	32
3.5	วงจรเครื่องรับสัญญาณ FM ย่านความถี่ 280 KHz	33
3.6	วงจรกรองความถี่ 110 KHz	35
3.7	วงจรกรองความถี่ 280 KHz	36
3.8	วงจรภาคขยายสัญญาณ IF ความถี่ 280 KHz และ110 KHz	36
3.9	วงจร Demodulation สัญญาณ FM	37
3.10	วงจรดีเอ็มฟาสิส	38
3.11	วงจรขยายสัญญาณออดิโอ	39
3.12	บล็อกไดอะแกรมของไอซีเบอร์ MC14046B	40
3.13	แสดงขาของไอซีเบอร์ MC14046B	40
3.14	วงจรวีซีโอโดยใช้ไอซีเบอร์ MC14046B	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.15 กราฟแสดงการเลือกค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุ	41
3.16 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่	41
3.17 วงจรภายในของไอซีเบอร์ LM2907	43
3.18 รูปลักษณะวงจรที่นำมาใช้	45
3.19 รูปวงจรที่นำไปใช้งานจริงในภาค F to V	45
4.1 สัญญาณคลื่นพาหะ 280 KHz จากคอลเล็คเตอร์ Q_2	47
4.2 สัญญาณคลื่นพาหะ 280 KHz จากเอาท์พุท J_2	48
4.3 สัญญาณคลื่นพาหะ 110 KHz จากเอาท์พุท J_2	48
4.4 สัญญาณที่ขา 4 และขา 5 ของชุดรับสัญญาณ 110 KHz	49
4.5 สัญญาณที่ขา 4 และขา 5 ของชุดรับสัญญาณ 280 KHz	49
4.6 สัญญาณที่ขาคอลเล็คเตอร์ Q_2	50
4.7 สัญญาณเอาท์พุทของวงจรรับสัญญาณที่ 280 KHz	51
4.8 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม)	51
4.9 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม)	52
4.10 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 10 Hz)	52
4.11 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 20 KHz)	53
4.12 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz	53
4.13 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม)	54
4.14 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม)	54
4.15 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 10 Hz)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
4.16	สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 5 KHz)	55
4.17	ชุดรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 110 KHz	59
4.18	ชุดรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 280 KHz	59
4.19	ภายในเครื่องชุดส่งสัญญาณ	60
4.20	ภายในเครื่องชุดรับสัญญาณ	60
4.21	ชุดรับส่งสัญญาณทั้ง 2 ย่านความถี่	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบสัญญาณ FM และ AM	8
2.2	แสดงการกระจายคลื่นพาหะ และไซด์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตค่าต่างๆ	11
4.1	แสดงผลการทดลองของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่	56
4.2	แสดงผลการทดลองของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	57
4.3	ผลการทดลองส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ได้เคยมีผู้จัดทำเครื่องส่งสัญญาณ ตามสายไฟในอาคาร(Signal AC Power Line) และลงในนิตยาสาร เซมิคอนดัคเตอร์ เล่มที่ 108 ซึ่งได้เสนอ (ตอนที่ 1) การสร้างเครื่องส่งกำลังสูง ในระบบAM / FM และในเล่มที่ 109 ได้นำเสนอ (ตอนที่ 2) การสร้างเครื่องรับแยกอิสระ ทั้งระบบ AM และระบบ FM ซึ่งในทั้งเครื่องรับ และเครื่องส่งนี้ ไม่สามารถรับส่งสัญญาณในเวลาเดียวกัน (Full Duplex) ได้ เราจึงใช้แนวทางของโครงงานนี้ มาปรับปรุง และพัฒนาการทำงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

ในการส่งสัญญาณออดิโอ หรือสัญญาณควบคุมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ถ้าไม่สามารถจะเดินสายลำโพง หรือสายสัญญาณได้ เราจำเป็นจะต้องใช้สื่อกลางอย่างอื่น ในการส่งสัญญาณไปยังจุดที่ต้องการ เช่น ใช้คลื่นวิทยุ(Radio Frequency : RF) ใช้แสงอินฟาเรด หรืออื่นๆ แต่ในโครงงานนี้จะใช้สายไฟบ้าน(AC Power Line) หรือเอซีไลน์ เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

1.3 ขอบเขต

สร้างเครื่องรับส่งสัญญาณผ่านระบบเอซีไลน์ ให้สามารถรับส่งสัญญาณในเวลาเดียวกัน จากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งได้

1.4 วิธีการและประโยชน์

การส่งระบบนี้จะใช้สัญญาณที่ต้องการส่งไป มอดูเลตเข้ากับคลื่นพาหะความถี่ 100-500 KHz ซึ่งการมอดูเลตนี้จะใช้แบบ AM หรือ FM ก็ได้ แล้วนำสัญญาณที่ได้ ส่งไปกับเอซีไลน์ เพื่ออาศัยเป็นตัวกลาง วิธีการนี้จะใช้กันมากตามตึกใหญ่ ๆ ใช้กับระบบลำโพงไร้สายที่สามารถแยกไปฟังที่ไหนก็ได้ อินเตอร์คอมไร้สาย ระบบส่งกระจายเสียงหลาย ๆ จุด หรือใช้ในด้านงานควบคุม เช่น การส่งสัญญานของตัวตรวจจับ(Sensor) เป็นต้น ทำให้สะดวกในการใช้งาน รับฟัง หรือควบคุม เพียงแต่นำตัวรับไปเสียบกับปลั๊กเอซีไลน์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ก็รับสัญญาณออดิโอ หรือสัญญาณควบคุมได้ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

การที่จะทำการส่งสัญญาณ ออดิโอ ข้อมูล หรือควบคุม โดยใช้เอซีไลน์เป็นตัวกลางของการส่งนั้น จะทำได้โดยการใช้คลื่นพาหะ RF ในย่านความถี่ 100-500 KHz ซึ่งสามารถถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณที่ต้องการส่งไป ทำให้สามารถส่งได้ระยะทางไกลมากขึ้น ในขบวนการมอดูเลต จะใช้คลื่นรูปซายน์ที่มีความถี่สูงเป็นพาหะ แล้วเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างของพาหะด้วยสัญญาณข่าวสาร หรือข้อมูล การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคลื่นพาหะนี้เราเรียกว่า การมอดูเลต

คลื่นรูปซายน์ที่เราเป็นพาหะนั้น เราสามารถเขียนสมาการทางคณิตศาสตร์แทนได้ดังนี้

$$e = A \sin (\omega t + \phi)$$

ในที่นี้ e คือ ค่าแรงดัน(หรือกระแส) ของคลื่นพาหะใด ๆ

A คือ แอมปลิจูด(หรือขนาด) สูงสุดของคลื่นพาหะ

ω คือ ความถี่เชิงมุม = $2\pi f$

t คือ เวลา

ϕ คือ เฟส หรือมุมทางไฟฟ้า

f คือ ความถี่

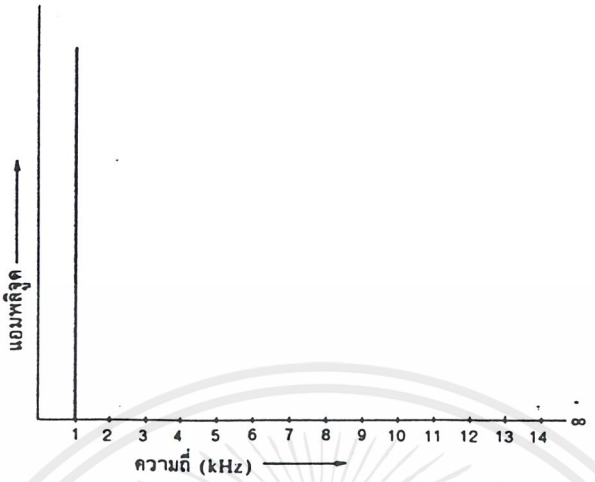
จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า คุณสมบัติประจำตัวของคลื่น(รูปซายน์) ที่สำคัญจะมีอยู่ 3 ประการ ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนแปลง หรือมอดูเลตได้ คือ แอมปลิจูด(A) ความถี่เชิงมุม(ω) หรือความถี่(f) และเฟส(ϕ)

การมอดูเลตให้กับคลื่นพาหะแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. มอดูเลตทางแอมปลิจูด(Amplitude Modulation เรียกชื่อย่อว่า AM)
2. มอดูเลตทางความถี่(Frequency Modulation เรียกย่อว่า FM)
3. มอดูเลตทางเฟส(Phase Modulation เรียกย่อว่า PM หรือ ϕM)

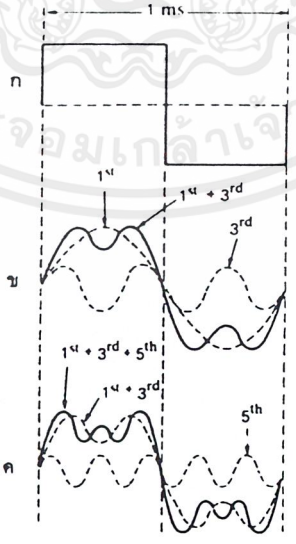
ในทางปฏิบัติสัญญาณ FM กับสัญญาณ PM จะคล้ายคลึงกันมาก บางทีเราเรียกรวมๆ ทั้ง FM และ PM ว่า การมอดูเลตเชิงมุม(Angle Modulation) กล่าวโดยสรุป การมอดูเลตแบ่งออกเป็นจริงๆ 2 แบบใหญ่ๆ คือ AM กับ FM (หรือ PM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



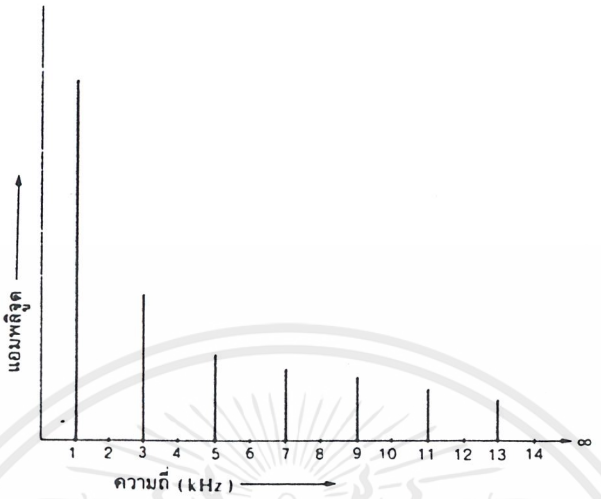
รูปที่ 2.2 แสดงการวิเคราะห์คลื่นรูปซายน์ในเชิงความถี่ด้วยเครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์

2.1.2 คลื่นรูปสี่เหลี่ยม(Square Wave) รูปที่ 2.3 แสดงรูปคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ความถี่ 1 KHz (แสดงไว้ 1 ไซเกิลเพราะไซเกิลอื่นๆ ก็มีรูปร่างซ้ำกัน) คลื่นรูปสี่เหลี่ยมนี้ประกอบด้วยคลื่นรูปซายน์จำนวนมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า คลื่นรูปสี่เหลี่ยมประกอบด้วยคลื่นรูปซายน์ที่เป็นคลื่นความถี่ฟันดาเมนตัล(Fundamental) จำนวน 1 คลื่น และคลื่นรูปซายน์ที่มีความถี่เท่ากับฮาร์มอนิคคี่(odd) ซึ่งมีความถี่เป็น 1 เท่า , 3 เท่า , 5 เท่า ... จนถึงจำนวนนับอนันต์



รูปที่ 2.3 คลื่นที่ประกอบกันเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

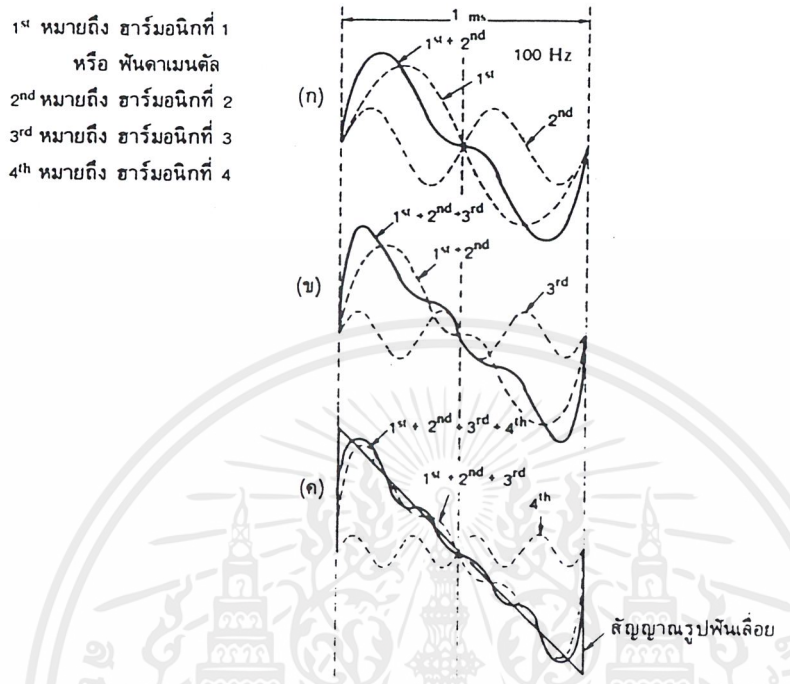


รูปที่ 2.4 วิเคราะห์คลื่นรูปสี่เหลี่ยมในเชิงความถี่

ผลของการรวมคลื่นฟันดาเมนตัล(คลื่นฮาร์มอนิคที่ 1) และคลื่นฮาร์มอนิคที่ 3 แสดงรูปที่ 2.3 (ข) และผลรวมของฮาร์มอนิคที่ 1, 3 และ 5 จะเป็นดังรูปที่ 2.3 (ค) สังเกตว่ารูปคลื่นซายน์ที่รวมกันเริ่มมีรูปร่างใกล้เคียงกับคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ถ้าหากจำนวนคลื่นฮาร์มอนิคที่เป็นเลขคี่มารวมกันมากขึ้นๆ รูปคลื่นก็จะกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์เหมือนรูปที่ 2.3 (ก) ฉะนั้นถ้าพิจารณาในเชิงความถี่ คลื่นสี่เหลี่ยม 1 KHz จะปรากฏเป็นแท่งของคลื่นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ฮาร์มอนิคที่ 1 (ฟันดาเมนตัล) 1 KHz ฮาร์มอนิคที่ 3, 5, 7, 9, 11,13 KHz(แสดงไว้ถึง 13 KHz) ความจริงยังมีฮาร์มอนิคคี่จนไปถึงความถี่อนันต์ สังเกตว่าแอมปลิจูดของฮาร์มอนิคจะน้อยลงๆ เมื่อความถี่สูงขึ้น และน้อยมากๆ จนไม่ต้องนำมาพิจารณา

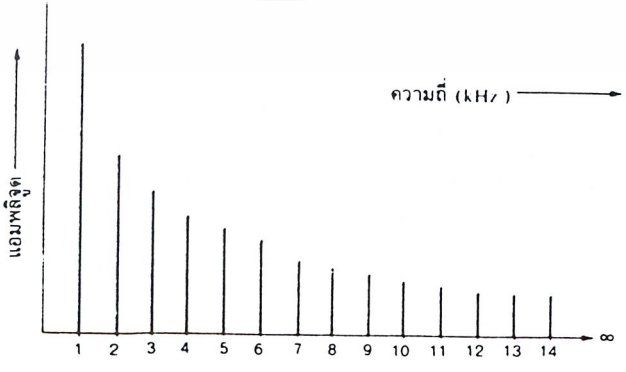
2.1.3 คลื่นรูปฟันเลื่อย(sawtooth wave) รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นฟันเลื่อยซึ่งประกอบด้วยฮาร์มอนิคลำดับคู่(even) และลำดับคี่ในรูปที่ 2.5 (ค) แสดงถึงการรวมคลื่นรูปซายน์ ฟันดาเมนตัลกับฮาร์มอนิคที่ 2, 3 และ4 สังเกตว่ารูปคลื่นเริ่มใกล้เคียงกับรูปฟันเลื่อย เมื่อรวมจำนวนฮาร์มอนิคมากขึ้นๆ สำหรับภาพวิเคราะห์รูปฟันเลื่อย ในเชิงความถี่จะปรากฏดังรูปที่ 2.6 สังเกตว่ามีฮาร์มอนิคคู่ และคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 คลื่นที่ประกอบกันเป็นคลื่นฟันเลื่อย

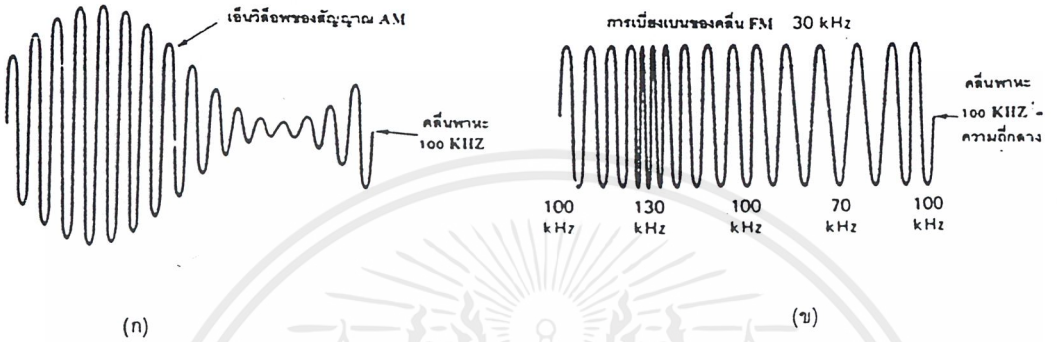
จากตัวอย่างรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและฟันเลื่อย สรุปได้ว่าเราสามารถนำคลื่นรูปซายน์ต่างๆ มาผสมกันเป็นคลื่นรูปร่างซับซ้อนกันได้จำนวนนับไม่ถ้วน และในทางกลับกันคลื่นรูปร่างใดๆ ก็ตามเราสามารถแยกออกเป็นคลื่นรูปซายน์ต่างๆ ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมความถี่(ภาพแสดงการวิเคราะห์ในเชิงความถี่) ของคลื่นฟันเลื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ลักษณะของสัญญาณ



รูปที่ 2.7 (ก) สัญญาณ AM

(ข) สัญญาณ FM

ความถี่กลาง

คือ ความถี่ของคลื่นพาหะ RF ที่ถูกส่งกระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการมอดูเลต หรือเมื่อสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต มีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.7 (ข) ความถี่กลางเท่ากับ 100 KHz

การเบี่ยงเบนของความถี่

คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปจากค่าความถี่กลาง จากรูปที่ 2.7 (ข) ค่าการเบี่ยงเบน ของความถี่เท่ากับ 30 KHz ซึ่งปริมาณการเบี่ยงเบนความถี่นี้ ขึ้นอยู่กับแอมปลิจูดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต ค่ายอดแอมปลิจูดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตส่งผลให้เกิดค่าสูงสุดของการเบี่ยงเบนของความถี่

การแกว่งของความถี่

คือ ค่าการเบี่ยงเบนสุทธิของความถี่เหนือ และใต้ความถี่กลาง จากรูปที่ 2.7 (ข) การแกว่งของความถี่ มีค่าเท่ากับ $\pm$ 30 KHz หรือค่าสุทธิเท่ากับ 60 KHz

สัญญาณเบสแบนด์

คือ สัญญาณความถี่ต่ำ ที่ถูกมอดูเลตเข้ากับคลื่นพาหะ RF ความถี่ในสัญญาณเบสแบนด์จะต้องต่ำกว่าความถี่ของคลื่นพาหะ RF ที่จะนำไปมอดูเลตเสมอ ซึ่งเหตุผลก็คือ ในชั่วขณะใดขณะหนึ่งของสัญญาณเบสแบนด์ ช่วงเวลาของรูปคลื่นจะต้องกว้างเพียงพอสำหรับคลื่นพาหะหลายๆ ไซเคิล มิฉะนั้นแล้วไซเคิลค่าต่างๆ ของสัญญาณพาหะที่เป็นอิสระต่อกัน จะเกิดการผิดเพี้ยนไปได้ ทำให้เกิดการบิดเบือนของสัญญาณขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การตัดสินใจเลือกการมอดูเลต

FM	AM
- แอมปลิจูดของคลื่นพาหะมีค่าคงที่ - ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงตามการมอดูเลต - แอมปลิจูดของสัญญาณฯ มอดูเลต เป็นตัวกำหนดความถี่ของคลื่นพาหะ RF - ความถี่ของการมอดูเลต คือ อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ในคลื่นพาหะ RF	- แอมปลิจูดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงตามการมอดูเลต - ความถี่ของคลื่นพาหะมีค่าคงที่ - แอมปลิจูดของสัญญาณฯ มอดูเลต เป็นตัวกำหนดแอมปลิจูดของคลื่นพาหะ RF - ความถี่ของการมอดูเลต คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมปลิจูดของคลื่นพาหะ RF

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสัญญาณ FM และ AM

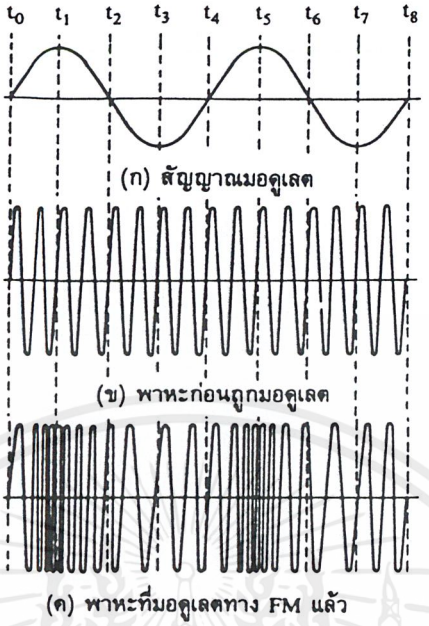
ได้เลือกใช้ระบบ FM ในการมอดูเลตสัญญาณ เนื่องจากในระบบ FM ช่วยให้การส่งกระจายคลื่นปราศจากสัญญาณรบกวน(Noise) ได้ดีกว่า ระบบ AM สัญญาณรบกวนทุกชนิด ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ ตัวอย่างเช่น สัญญาณรบกวนจากการเกิดประกายไฟในอุปกรณ์ไฟฟ้าและแรนด้อมน้อยส์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งปรากฏการณ์ที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในลักษณะต่างๆ กันนี้ จะทำให้เกิดการแปรผัน แอมปลิจูดของแรงดันฯ และกระแสฯ ขึ้นได้

ดังนั้น สัญญาณรบกวนจึงสามารถที่จะทำให้ขนาดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงได้ง่ายกว่า การทำให้ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลง

2.4 การมอดูเลต

ในการมอดูเลชั่นแบบ FM นั้นเป็นการฝากข้อมูลไปกับความถี่ของคลื่นพาหะ เป็นขบวนการที่ทำให้ความถี่(Frequency) ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามความแรงของสัญญาณข้อมูล โดยยังคงรักษาขนาดของคลื่นพาหะไว้ให้มีค่าคงที่อยู่เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การมอดูเลตทางความถี่

รูปคลื่นของสัญญาณ FM เกิดจากสัญญาณมอดูเลต ดังรูปที่ 2.8 (ก) เช่น สัญญาณเสียงซึ่งเป็นข่าวสารเข้าไปมอดูเลตลงบนสัญญาณพาหะดังรูปที่ 2.8 (ข) สัญญาณพาหะหลังจากมอดูเลตแล้วในรูปที่ 2.8 (ค) เป็นสัญญาณ FM จะเห็นว่าที่เวลา t_0 สัญญาณ FM อยู่ที่ความถี่กลาง เมื่อสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตมีค่าทางบวกสูงสุด ความถี่ของพาหะจะเพิ่มขึ้นสูงสุด นั่นคือสัญญาณมอดูเลตถึงจุดยอดสุด(สัญญาณมอดูเลตมีขนาดสูงสุดนั่นเอง) ที่เวลา t_1

ที่เวลา t_2 สัญญาณมอดูเลตลดลงเป็นศูนย์ ความถี่ของพาหะก็จะลดลงมาที่ความถี่กลางดังเดิมหลังจากนั้นสัญญาณมอดูเลตมีค่าตกลงต่ำกว่าศูนย์กลายเป็นลบ พาหะจะมีความถี่ลดลงต่ำกว่าความถี่กลางและเมื่อเวลาสัญญาณมอดูเลตกลับเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่ง ความถี่ของพาหะก็จะกลับมาเป็นความถี่กลางดังเดิมเช่นกัน ในช่วงเวลา t_4 ถึง t_8 ก็จะซ้ำแบบเดิมเรื่อยๆ ไป สรุปแล้วความถี่ของพาหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมปลิจูดของสัญญาณมอดูเลต และพาหะยังคงอยู่ที่ความถี่กลางเมื่อสัญญาณมอดูเลตเป็นศูนย์

ตัวอย่าง ความถี่เบี่ยงเบน(Frequency Deviation) หรือดีวิเอชั่น เช่น พาหะมีความถี่ 100 MHz ลดลงต่ำสุดเป็น 99.9 MHz และเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 100.1 MHz สลับไปมาเช่นนี้ หมายความว่าช่วงความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ $\pm$ 0.1 MHz หรือ $\pm$ 100 KHz

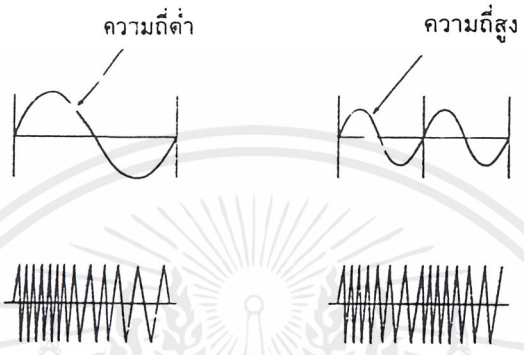
อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ FM ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต

ตัวอย่าง ถ้าสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตเป็นโทน(สัญญาณเสียง) ความถี่ 1KHz อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ FM จะเท่ากับ 1,000 ครั้งต่อวินาที ถ้าสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เป็น 10 KHz โดยคงค่าแอมปลิจูดเท่าเดิม ช่วงความถี่เบี่ยงเบนก็ยังคงเท่าเดิม คือ เท่ากับ ± 100 KHz แต่อัตราการเบี่ยงเบนจะเพิ่มเป็น 10,000 ครั้งต่อวินาที

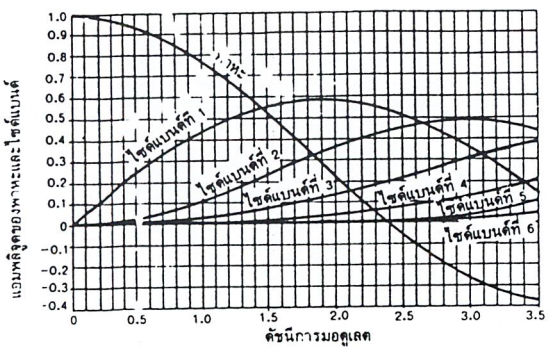
นั่นคือ ความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตเป็นตัวกำหนดอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ และแอมปลิจูดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตจะเป็นตัวกำหนดช่วงความถี่เบี่ยงเบน



รูปที่ 2.9 อัตราการเบี่ยงเบนในคลื่น FM

2.5 ไซด์แบนด์ FM

เมื่อมองให้ลึกลงไปจะทราบว่าสัญญาณต่างๆประกอบขึ้นจากสัญญาณรูปซายน์จำนวนมาก ดังนั้นในระบบ FM ถ้ามอดูเลตด้วยสัญญาณรูปซายน์จะเกิดไซด์แบนด์จำนวนนับอนันต์ เนื่องจากการเบี่ยงเบนความถี่ของพาหะทำให้เกิดความถี่เพิ่มขึ้นอีกมากมาย โดยไซด์แบนด์คู่ที่ 1 มีความถี่เท่ากับ $f_c \pm f_m$ ไซด์แบนด์คู่ที่ 2 มีความถี่เท่ากับ $f_c \pm 2f_m$ ไซด์แบนด์คู่ที่ 3 มีความถี่เท่ากับ $f_c \pm 3f_m$ ... เป็นต้น ไซด์แบนด์ที่มีความสำคัญจะอยู่ในคู่ลำดับที่ใกล้ๆ กับความถี่กลางของพาหะ สัญญาณไซด์แบนด์ที่อยู่ห่างจากความถี่กลางมากๆ จะมีขนาดแรงและกำลังเล็กมากจนไม่ต้องคำนึงถึง ไซด์แบนด์ของสัญญาณ FM ก็คือ ความถี่ผลบวก และผลลบของความถี่พาหะกับความถี่ฮาร์มอนิกเลขคู่ และฮาร์มอนิกเลขคี่ของคลื่นเสียงข้อมูลที่เข้ามาผสมนั่นเอง



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงแอมปลิจูดของพาหะ และไซด์แบนด์ในระบบ FM

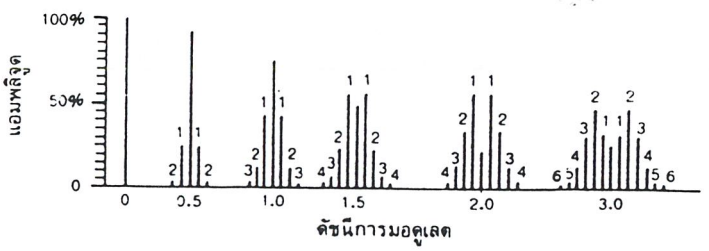
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 กราฟแสดงแอมปลิจูดของพาหะ และไซด์แบนด์ในระบบ FMในรูปที่ 2.10 แสดงกราฟแอมปลิจูดของคลื่นพาหะกับไซด์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตค่าต่างๆ จะเห็นว่าเมื่อดัชนีการมอดูเลตเป็นศูนย์ จะมีแต่คลื่นพาหะอย่างเดียว(เท่ากับ 1 หน่วย) คลื่นไซด์แบนด์เป็นศูนย์ กำลังทั้งหมดจะอยู่ที่คลื่นพาหะ เมื่อดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้นจำนวนไซด์แบนด์จะเพิ่มขึ้น แอมปลิจูดของไซด์แบนด์ก็จะใหญ่ขึ้น แต่แอมปลิจูดของพาหะกลับเล็กลงจนกระทั่งดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 2.4 คลื่นพาหะจะเป็นศูนย์ ตอนนี้กำลังของคลื่นพาหะจะกระจายเข้าไปอยู่ในไซด์แบนด์รอบๆ เมื่อดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้นอีก คลื่นพาหะก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นในทางลบ(เฟสตรงกันข้ามกับตอนแรก) ที่ดัชนีการมอดูเลตเป็น 3.1 แอมปลิจูดของคลื่นพาหะจะเท่ากับ -0.3 หน่วย ดังนั้น จุดที่คลื่นพาหะเป็นศูนย์มีอยู่หลายจุด

ดัชนีการมอดูเลต	พาหะ	ไซด์แบนด์คู่ที่															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.00	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	0.98	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	0.94	0.24	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
6.0	0.15	0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—
7.0	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	—	—	—	—	—
9.0	-0.09	0.24	0.14	-0.18	-0.27	-0.06	0.20	0.33	0.30	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—	—
10.0	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.31	0.29	0.20	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—
12.0	-0.05	-0.22	-0.08	0.20	0.18	-0.07	-0.24	-0.17	0.05	0.23	0.30	0.27	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01
15.0	-0.01	0.21	0.04	0.19	-0.12	0.13	0.21	0.03	-0.17	-0.22	-0.09	0.10	0.24	0.28	0.25	0.18	0.12

ตารางที่ 2.2 แสดงการกระจายคลื่นพาหะ และไซด์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 รูปคลื่น FM ในเชิงความถี่ที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0 , 0.5 , 1 , 1.5 , 2.0 , 3.0 ตามลำดับ

ในกราฟรูปที่ 2.10 เขียนได้เป็นตาราง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ในที่นี้ตัดไซด์แบนด์ที่มีแอมปลิจูดน้อยกว่า 1% ของพาหะเดิม(ก่อนมอดูเลต) ออกไปโดยไม่คำนึงถึง เช่น เมื่อดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.5 แอมปลิจูดของพาหะจะเท่ากับ 0.94 หน่วย ไซด์แบนด์คู่แรกมีแอมปลิจูดเท่ากับ 0.24 หน่วย ไซด์แบนด์คู่ที่สองถัดไปมีแอมปลิจูดเท่ากับ 0.03 หน่วย ไซด์แบนด์อื่นนอกจากนี้มีแอมปลิจูดน้อยจนสามารถตัดทิ้งไปได้ เมื่อดัชนีการมอดูเลตสูงขึ้นการกระจายคลื่นไซด์แบนด์จะเป็นดังรูปที่ 2.11

ความถี่ของไซด์แบนด์มีค่าสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต($f_c \pm f_m$...) จากที่กล่าวมาแล้ว ฉะนั้นแบนด์วิดท์ของคลื่น FM ต้องครอบคลุมจำนวนไซด์แบนด์ที่สำคัญทุกตัว เพื่อคุณภาพของสัญญาณที่ดี นั่นคือ แบนด์วิดท์ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลต และความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต

ที่ $m = f_d / f_m$

m = ดัชนีการมอดูเลต

f_d = ความถี่เบี่ยงเบน

f_m = ความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลต

$$BW = f_m \times \text{จำนวนไซด์แบนด์} \times 2$$

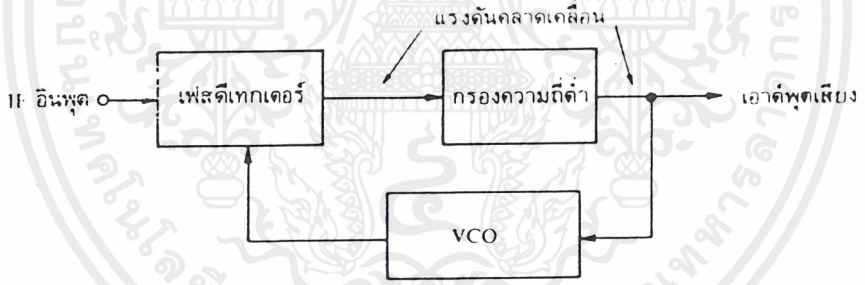
แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้สูตรคำนวณแบนด์วิดท์แบบประมาณจากค่า $f_{d(max)}$ และ $f_{m(max)}$ เลย โดยไม่ต้องเสียเวลานับจำนวนไซด์แบนด์

$$BW = 2(m+1) f_{m(max)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การดีมอดชนิด PLL

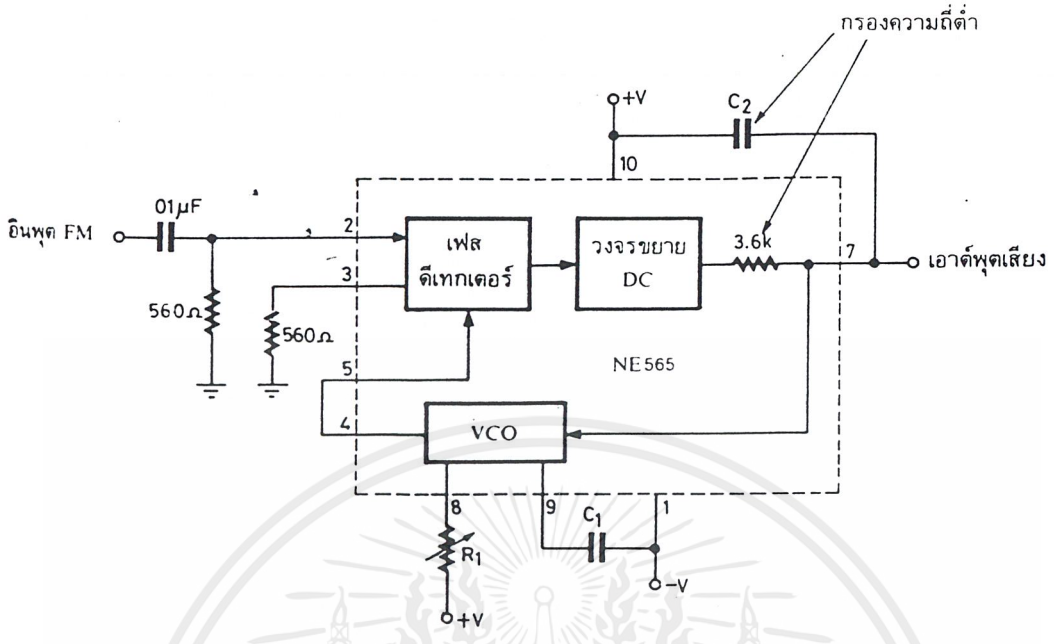
เราสามารถใช้วงจรเฟสล็อกลูป(Phase Locked Loop หรือ PLL) ในการดีมอดสัญญาณ FM ได้ดังรูป 2.12 วงจร PLL นี้มักเป็นไอซีซึ่งใช้งานสะดวก วงจร PLL ประกอบด้วยเฟสดีเทกเตอร์ ฟิลเตอร์ ชนิด โลพาส (ความถี่ต่ำผ่าน) และออสซิลเลเตอร์ ที่ควบคุม ความถี่ด้วยแรงดั(voltage controlled oscillator หรือ VCO) วงจร VCO นี้จะออสซิลเลตที่ความถี่นพุต IF วงจรเฟสดีเทกเตอร์จะทำหน้าที่เปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณจาก VCO ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแรงดันที่ความถี่ของ VCO คลาดเคลื่อนไปจากความถี่อินพุตเรียกว่า แรงดันคลาดเคลื่อน(error voltage) แรงดันนี้มีค่าเป็นสัดส่วนกับผลต่างของความถี่อินพุตกับ VCO แรงดันนี้จะนำไปกรองโดย ฟิลเตอร์ชิดโลพาสฟิลเตอร์ เพื่อกำจัดสัญญาณความถี่สูง ๆ ที่ปะปนทิ้งไป ฟิลเตอร์ดังกล่าวนิยมเรียกเรียกว่า ลูปฟิลเตอร์ จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของวงจร PLL เช่นช่วงความถี่ที่ลูปจะล็อก รวมทั้งช่วงเวลาที่ลูปใช้ในการล็อกคงามถี่กับอินพุต



รูปที่ 2.12 แผนผังของวงจรดีมอดชนิดเฟสล็อกลูป

แรงดันคลาดเคลื่อนหลังจากกรองความถี่ด้วยโลพาสฟิลเตอร์แล้ว จะนำไปควบคุมความถี่ของ VCO ตัวอย่างเช่น เมื่อความถี่ของอินพุตเปลี่ยนไปทางบวก (สูงขึ้น) แรงดันคลาดเคลื่อนจะเกิดในเอาต์พุตของเฟสดีเทกเตอร์ แรงดันนี้จะถูกกรองและนำไปบังคับ VCO ให้ออสซิลเลตที่ความถี่สูงเพิ่มตมความถี่อินพุต เพื่อล็อกความถี่กับอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุตที่ป้อนมาเป็นสัญญาณ FM VCO จะพยายามเปลี่ยนความถี่ตามการเบี่ยงเบนไปจากวมถี่กลางของสัญญาณ FM ฉะนั้นแรงดันคลาดเคลื่อนก็จะเป็นสัญญาณที่มอดูเลต(หลังจากเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุตกับ VCO แล้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เฟสล็อกลูปใช้ IC

รูปที่ 2.13 เฟสล็อกลูปใช้ IC

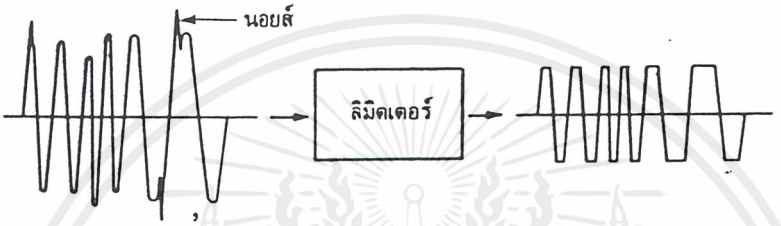
ตัวอย่างของไอซีซิกเนติกส์ เบอร์ NE 565 ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็น PLL จะเห็นว่า Ri Ci เป็นตัวกำหนดช่วงความถี่ทำงานของ VCO C2 และตัวต้านทานภายใน 3.6 กิโลโอห์ม จะต่อกันเป็นฟิลเตอร์ชนิดโลพาส ข้อแตกต่างของวงจรนี้กับแผนผังที่แสดงในรูปที่ 2.12 ก็คือ ในไอซีจะมีวงจรขยาย DC เพื่อขยายสัญญาณคลาดเคลื่อน(error signal) ให้มากขึ้นก่อนที่จะป้อนไปให้ฟิลเตอร์ ข้อดีของวงจร PLL ก็คือคุณภาพดี ราคาประหยัด ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อย นอกจากนี้ไม่ต้องใช้หม้อแปลงและคอยล์ จึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงแต่อย่างใด

2.7 ลิมิตเตอร์

สัญญาณ FM (มีความถี่เท่ากับ IF) อาจจะมีนอยส์ปะปนมาด้วย วงจรลิมิตเตอร์จะทำหน้าที่ขลิบสัญญาณทั้งด้านบวกและลบ รวมทั้งนอยส์ก็จะถูกกำจัดทิ้งไปด้วย (ดูรูปที่ 2.14) สังเกตว่าความถี่ของสัญญาณ FM ก่อนและหลังลิมิตเตอร์ ไม่เปลี่ยนแปลง หลักการของวงจรลิมิเตอร์นี้ก็คือ ป้อนสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเกินช่วงทำงานของวงจร (overdrive) จนกระทั้งวงจรขยายอิ่มตัวหรือคุตออฟ ถ้าสัญญาณ IF ที่ป้อนมามีแอมพลิจูดน้อย เอาต์พุตจากลิมิเตอร์จะมีนอยส์ปนออกมาทางออดิโอเอาต์พุต ถ้าป้อนแอมพลิจูดมาแรงๆ นอยส์จะเงียบไป ปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์กับค่า "quieting" (การทำให้นอยส์เบาลงหรือเงียบลง) ของภาคออดิโอเอาต์พุต ความดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงและค่าความไวของเครื่องรับ FM ด้วย เช่น สเปกระบุสัญญาณที่ไม่ได้มอดูเลต มีแต่พาหะอย่างเดียว ป้อนเข้าอินพุตของเครื่องรับ ทำให้นอยส์จากวงจรขยายเสียงลดลงไป 20 เดซิเบล การที่จะลดนอยส์ให้ได้ก็คือขยายสัญญาณอินพุท(IF) ให้มากๆ พอที่จะขับให้วงจรลิมิตเตอร์ขลิบสัญญาณเพื่อกำจัดนอยส์ที่ขี่มาบนสัญญาณ FM ตามหลักการของวงจรลิมิเตอร์



รูปที่ 2.14 วงจรลิมิเตอร์จะขจัดนอยส์และการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดของสัญญาณ FM

2.8 การจับสัญญาณที่แรงกว่า

ระบบ FM มีคุณสมบัติประจำตัวก็คือ สามารถกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการหรือนอยส์ที่ขี่บนสัญญาณ FM สมมติว่า ใช้เครื่องรับ FM ในพื้นที่ซึ่งมีสถานีส่งออกอากาศพร้อม ๆ กันที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกัน เช่น ในกรณีที่เครื่องรับวิทยุติดรถยนต์รับสัญญาณ FM ของสถานีหนึ่ง เมื่อขับรถผ่านมาอีกพื้นที่หนึ่ง มีอีกสถานีส่งคลื่นที่มีความถี่เดียวกัน(หรือใกล้เคียง) สัญญาณที่รับได้จะกลายเป็นสัญญาณ FM ของสถานีใหม่ และบางทีสัญญาณ FM ที่รับได้จะสลับไปสลับมาระหว่าง 2 สถานี ในกรณีเช่นนี้เครื่องรับ FM จะรับสัญญาณที่แรงกว่า ปรากฏการนี้เราเรียกว่า(capture effect) ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่อ่อนกว่าจะถูกกำจัดออกไปทำนองเดียวกับการกำจัดนอยส์ในระบบ FM ในบางกรณีที่สัญญาณทั้งคู่มีขนาดใกล้เคียงกัน เครื่องรับอาจรับสัญญาณจากทั้ง 2 สถานีสลับไปสลับมา

2.9 พรีเอ็มฟาสิสและดีเอ็ฟาสิส

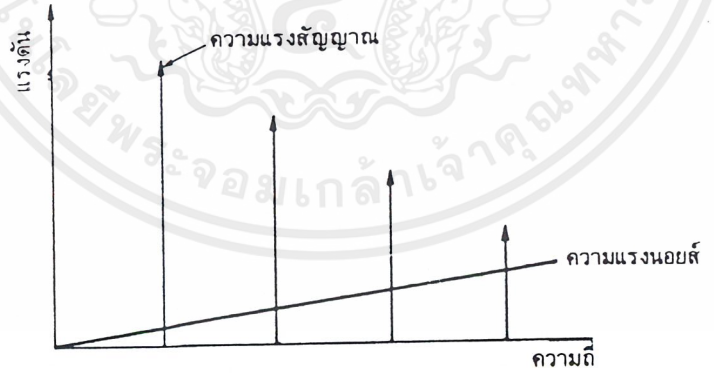
รูปคลื่นส่วนใหญ่จะประกอบด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิคมากมาย และทางด้านความถี่สูงมักจะมีแอมปลิจูดต่ำ ๆ ตัวอย่างเช่น เสียงพูดซึ่งอยู่ในย่านความถี่ประมาณ 20-20,000 เฮิรตซ์ แต่เสียงพูดทั่วไปมักจะอยู่ในช่วง 500 เฮิรตซ์ สำหรับผู้ชาย และ 800 เฮิรตซ์ สำหรับผู้หญิง เป็นต้น แต่นอยส์ในระบบ FM จะเป็นตรงข้าม คือ นอยส์ FM จะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นเป็นสัดส่วนกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ ดังนั้นเราเขียนรูปเทียบกันดังรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าที่ด้านความถี่สูงจะมีนอยส์รบกวนมากกว่าด้านความถี่ต่ำ วิธีแก้ไขให้คุณภาพสัญญาณทางด้านความถี่สูงดีขึ้นก็โดยการใช้วิธียกระดับหรือเน้น (emphasis) สัญญาณให้มีแอมปลิจูดสูงขึ้นในย่านความถี่ด้านสูง กรรมวิธีนี้เรียกว่า พรีเอ็มฟาสิส (pre-emphasis)

ในรูปที่ 2.16 สัญญาณมอดูเลตจะผ่านขบวนการพรีเอ็มฟาสิสที่เครื่องส่งเพื่อให้สัญญาณความถี่สูงเน้นแรงขึ้น แล้วจึงมอดูเลตที่เครื่องส่งออกอากาศต่อไป ทำให้สัญญาณความถี่สูงมีความแรงขึ้นจนนอยส์รบกวนได้ยาก เมื่อคลื่นมาถึงเครื่องรับและหลังจากการดีมอดแล้ว เราจะต้องคืนสัญญาณที่เน้นความถี่สูงให้เหมือนเดิม ดังนั้นเราจึงตองมีวงจรกดความถี่สูงซึ่งจะลดทอนความแรงทางด้านความถี่สูงลง กรรมวิธีนี้เรียกว่า ดีเอ็มฟาสิส (de-emphasis)

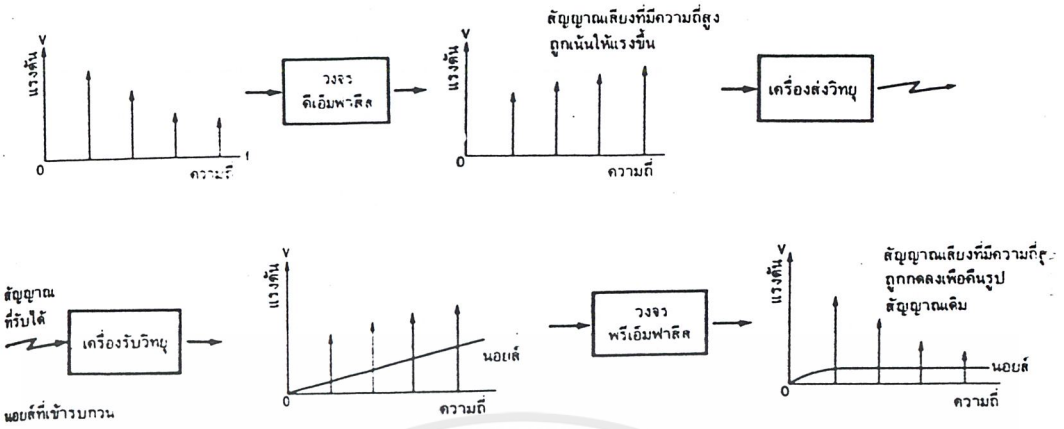
วงจรที่ใช้ในกรรมวิธีพรีเอ็มฟาสิสและดีเอ็มฟาสิส ก็คือวงจรฟิลเตอร์นั้นเอง คุณสมบัติของฟิลเตอร์ในตอนพรีเอ็มฟาสิสกับดีเอ็มฟาสิสจะต้องตรงข้ามกัน ในระบบกระจายเสียง FM โดยมากเรากำหนดคุณสมบัติของฟิลเตอร์ (ทั้งพรีเอ็มฟาสิสและดีเอ็มฟาสิส) เป็นค่าคงตัวเวลา(time constant) เท่ากับ 75 ไมโครวินาที ซึ่งแอมปลิจูดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น(พรีเอ็มฟาสิส) หรือลดลง(ดีเอ็มฟาสิส) ตั้งแต่ความถี่ 2122 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป ดังรูปที่ 2.17



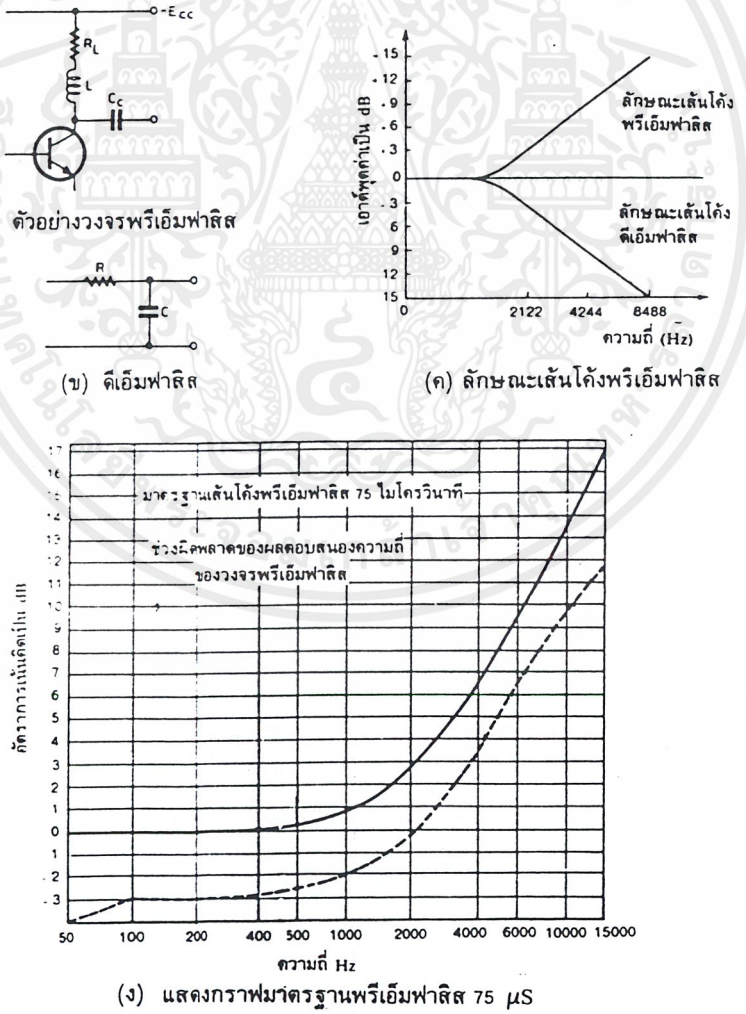
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบแอมปลิจูดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตกับนอยส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.16 แสดงขบวนการพรีเอ็มฟาสิสที่เครื่องส่ง และดีเอ็มฟาสิสที่เครื่องรับ

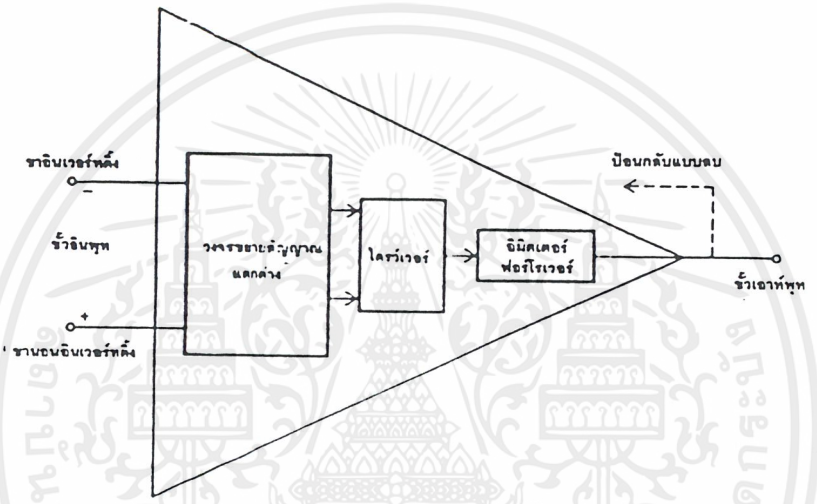


รูปที่ 2.17 แสดงกราฟมาตราฐานพรีเอ็มฟาสิส

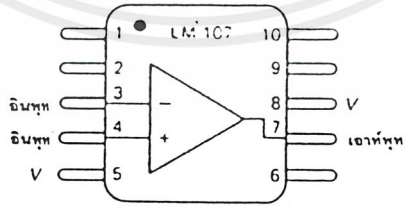
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
45739

2.10 โอเปอร์เรชั่นแนล แอมปลิไฟร์เออร์ หรือ ออปแอมป์(Operationnal Amplifier or OpAmp)

ออปแอมป์ คืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการของคู่ดิฟเฟอเรนเชียล หรืออาจจะถือได้ว่าคือ รูปแบบหลักการของการประยุกต์ใช้งานคู่ดิฟเฟอเรนเชียลเลยก็ว่าได้อุปกรณ์ชนิดนี้ผลิตขึ้นในรูปแบบของไอซี ดังรูป 2.19 และมีโครงสร้างภายในซึ่งแทนได้ด้วยผังภาพ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผังแสดงวงจรภายในไอซีออปแอมป์



รูปที่ 2.19 Glass flat packed ไอซีเบอร์ LM107 ออปแอมป์แสดงตำแหน่งขาฟังก์ชั่นของไอซี ขนาดของตัวถังประมาณ 0.275 ตร.นิ้ว(National Semiconductor Corporation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อักษร LM หมายถึงชนิดของไอซี L หมายถึง ลีเนยร์ M หมายถึง โมโนลิธิค ซึ่งลักษณะของการปฏิบัติงานแบบลิเนียร์นั้นจะสอดคล้องกับการปฏิบัติงานของวงจรอนาล็อก ซึ่งรวมถึงการปฏิบัติงานใด ๆ ที่นอกเหนือจากลักษณะการปฏิบัติงานแบบพัลส์ดิจิตอล ส่วนโครงสร้างแบบโมโนลิธิค จะหมายถึง หน่วยวงจรรวมทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้นบนซิลิกอน ชิฟอันเดียว นั่นเอง

ส่วนชื่อ โอเปอร์เรชั่นแนล แอมปลิไฟร์เออร์ นั้นตั้งขึ้นตามลักษณะของการปฏิบัติงานของไอซีที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ซึ่งโดยพื้นฐานจะปฏิบัติงานเกี่ยวกับคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น การบวกลบ , การอินทรีเกรท และการดิฟเฟอเรนซิเอท เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการปฏิบัติงานของออปแอมป์มีขอบเขตที่กว้างมาก เช่น สามารถประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับสัญญาณออดิโอ , วงจรขยายสัญญาณ RF , วงจรแต่งรูปคลื่น , วงจรเร็กกรูเรเตอร์ , วงจรผลรวม หรือผลต่าง และเป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ใช้งานในเครื่องรับโทรทัศน์ เป็นต้น

โครงสร้างของออปแอมป์ประกอบขึ้นด้วยวงจรขยายสัญญาณหลายๆ ภาคด้วยกัน ดังรูป 2.18 สัญญาณจะถูกป้อนเข้าที่ขาอินพุท ของคู่ดิฟเฟอเรนเชียล สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะถูกคัปปลิ้งเข้าไปยังวงจรขับซึ่งวงจรในส่วนนี้ จะเป็นแบบซิงเกิลเอนด์เอาพุทไปขับวงจรอิมิตเตอร์ฟอร์โลว์เวอร์ต่อไป แล้วสัญญาณจะถูกจ่ายออกไปยังขาเอาท์พุทของไอซี ขั้วลบ (-) ที่ขาอินพุท เรียกว่าขาอินเวอร์ทติ้ง (Inverting) เนื่องจากสัญญาณที่ป้อนที่ขานี้จะมีมุมเฟสของสัญญาณที่แตกต่างจากสัญญาณที่เอาท์พุท 180 องศา ส่วนขั้วบวก (+) ที่ขาอินพุท เรียกว่า ขานอนอินเวอร์ทติ้ง (Non-inverting) เนื่องจากสัญญาณที่อินพุท และเอาท์พุทจะมีเฟสเดียวกัน

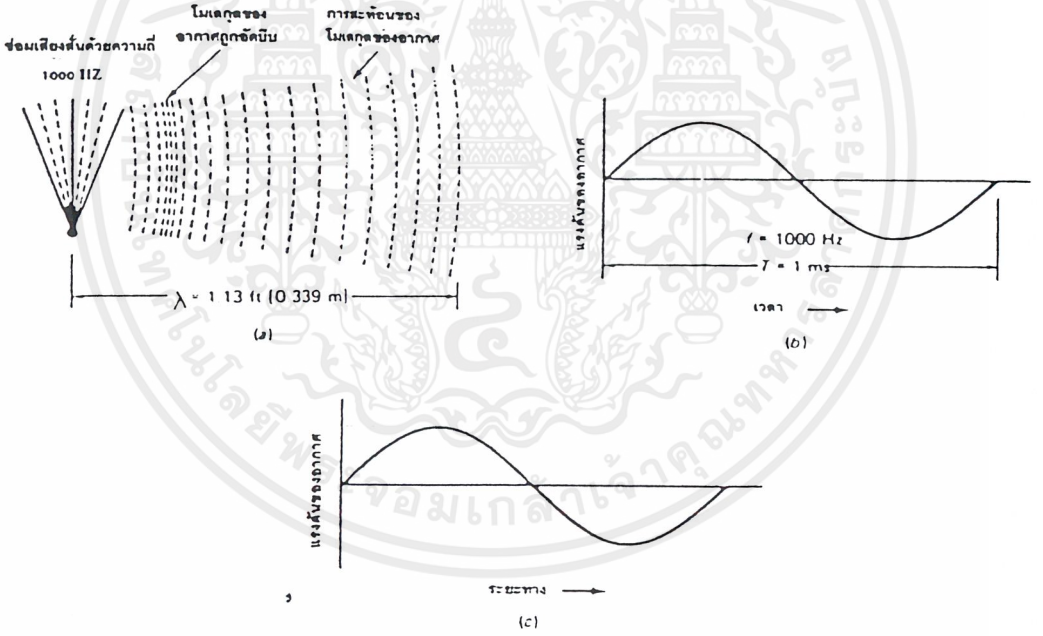
จะสังเกตเห็นว่าออปแอมป์จะมีสองอินพุทเทอร์มินอล แต่มีเพียงเอาท์พุทเดียว(อินพุทอิมพีแดนซ์ของคู่ดิฟเฟอเรนเชียลจะมีค่าสูง) ซึ่งในทางปฏิบัติการป้อนสัญญาณเข้าที่ขาอินพุท โดยปกติจะป้อนเข้าที่ขาบวก หรือลบ อย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะของ ซิงเกิลเอนด์ ส่วนขาอินพุทที่ไม่มีสัญญาณป้อนก็ถูกต่อลงแบบแชสซีสกราวนด์ ส่วนทางด้านเอาท์พุทจะมีค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำเพราะเป็นวงจรอิมิตเตอร์ของวงจรอิมิตเตอร์ฟอร์โลว์เวอร์

ในการต่อใช้งานออปแอมป์มักจะต่อเป็นวงจรป้อนกลับแบบลบ(Negative feedback loop) คือดึงสัญญาณที่เอาท์พุทไปเข้าที่ขาลบ หรือขานอนินเวอร์ทติ้ง การป้อนกลับแบบลบหมายถึง สัญญาณที่ถูกดึงมาป้อนกลับจะมีเฟสของสัญญาณต่างจากสัญญาณที่ป้อนเข้าที่จุดป้อนกลับ 180 องศา อัตราขยายสัญญาณจะลดลงเนื่องจากการป้อนกลับแบบลบจะไปหักล้างบางส่วนของสัญญาณอินพุท แต่ในกรณีนี้การบิดเบือนของสัญญาณ มีเสถียรภาพดีขึ้น และป้องกันการเกิดออสซิลเลต (Oscillate) ได้อีกด้วย และยังช่วยกันส่งผลให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น นอกจากนี้การป้อนกลับแบบลบจะทำให้สามารถควบคุม และกำหนดอัตราขยายสัญญาณของวงจร และกำหนดช่วงการตอบสนองต่อสัญญาณของออปแอมป์ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 คลื่นเสียงและความถี่ออดิโอ

เสียงคือการเดินทางของคลื่นที่แปรเปลี่ยนตามแรงกดดันในตัวกลางต่าง ๆ เช่นในของแข็ง , ของเหลว หรือในอากาศ การเปลี่ยนแปลงของแรงกดดันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนทางกลของตัวกลางที่เป็นต้นกำเนิดเสียงนั้น ตัวอย่างง่าย ๆ เช่น การสั่นสะเทือนของซ่อมเสียง เมื่อถูกกระทบด้วยของแข็ง ดังรูปที่ 2.20 การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการแปรเปลี่ยนของแรงกดดัน ขึ้นในอากาศรอบๆ ต้นกำเนิดเสียงนั้นๆ บริเวณที่เกิดแรงกดดันสูงสุดเรียกว่า บริเวณคลื่นอัดแน่น(Compression) ส่วนบริเวณที่แรงกดดันต่ำสุด เรียกว่า บริเวณคลื่นเบาบาง(rarefaction) เนื่องจากอากาศเป็นตัวกลางที่สามารถถูกบีบอัดด้วยแรงดันได้ดังนั้นบริเวณคลื่นอัดแน่น และบริเวณคลื่นเบาบางจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดทุกทิศทางเมื่อเกิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.20 คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนของซ่อมเสียง

(A) บริเวณอัดแน่นและเบาบางของโมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่กระจายไปในทุกทิศทาง

(B) ช่วงคาบเวลาที่เปลี่ยนแปลงของความดันอากาศ ณ จุด ๆ หนึ่งในอากาศ ตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง

(C) ช่วงคาบเวลาที่เปลี่ยนแปลงของความดันอากาศเทียบกับระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.1 ความถี่ของคลื่นเสียง

จากรูปที่ 2.20 ซ่อมเสียงสั่นสะเทือนด้วยความถี่ 1000 รอบ/วินาที (Hz) ซึ่งความถี่ของการสั่นสะเทือน ก็คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่เดินทางออกมาสู่อากาสรอบๆ ตัวนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 b รูปคลื่นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของอากาศรอบๆ ซ่อมเสียง ณ จุด ๆ หนึ่งใน 1 รอบของบริเวณอัดแน่นและบริเวณเบาบางของโมเลกุลของอากาศใช้เวลา 1 mS (1 มิลลิวินาที) เท่ากับ 1 คาบ (period) และความถี่มีค่าเท่ากับ 1/T หรือ 1/1 mS เท่ากับ 1000 Hz

2.11.2 ความยาวคลื่นของคลื่นเสียง

จาก รูปที่ 2.20 c การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ณ จุดใด ๆ จากแหล่งกำเนิดเสียง แสดงให้เห็นว่า ณ เวลาใดๆ แรงดันของอากาศจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอดังนั้นความยาวคลื่น จึงหมายถึงระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปได้เมื่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันครบ 1 รอบ ความยาวคลื่นของคลื่นเสียงใดๆ นั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความเร็วของการเดินทางของคลื่นเสียง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

ความยาวคลื่น $(\lambda) = 1130/f$

เมื่อ

λ = ความยาวคลื่น (ฟุต)

f = ความถี่ของคลื่นเสียง

2.11.3 ความดังของเสียง

ความดังของเสียงแสดงถึงสภาวะที่หูสามารถรับรู้ถึงแอมปลิจูดของคลื่นเสียงได้คลื่นที่มีแอมปลิจูดสูงจะหมายถึง เสียงดังมาก ในสภาพของคลื่นเสียงยิ่งมีแอมปลิจูดสูง จะหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในอากาศมาก ซึ่งสามารถเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ว่า สัญญาณเสียงที่เป็นไฟฟ้ามีแอมปลิจูดสูงย่อมหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสหรือแรงดันที่มากขึ้นนั่นเอง เสียงที่ดังที่สุดจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของแอมปลิจูดของระดับเสียงที่หูสามารถได้ยิน

2.11.4 ออคเท็ฟว์ (octave)

ออคเทฟว์ เป็นหน่วยที่ใช้สำหรับแทนการขยายขนาดช่วงความถี่ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ตัวอย่างเช่น 1 ออคเทฟว์เหนือความถี่ 500 เฮิรตซ์คือ 1000 เฮิรตซ์ และ 1 ออคเทฟว์เหนือความถี่ 1000 เฮิรตซ์ คือความถี่ 2000 เฮิรตซ์นั่นเอง สำหรับเหตุผลที่ใช้ชื่อนี้คือ ตารางช่องเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดนตรีจะมีระดับเสียงที่ต่อเนื่องกันถึง 8 เสียงด้วยกันและแต่ล่ะเสียงจะมีช่วงความถี่ต่างกันในอัตราส่วน 2:1 เสมอนั่นเอง

2.11.5 ความถี่ฮาร์มอนิค

ถ้าเรามาพิจารณาเส้นลวดที่สั่นสะเทือนและแปล่งเสียงออกมาได้ จะสังเกตเห็นว่า ตลอดทั้งเส้นลวดสั่นสะเทือนด้วยความถี่เดียวกัน ซึ่งเรียกความถี่นี้ว่า "ความถี่พื้นฐาน" (fundamental frequency) โดยเป็นค่าความถี่ที่ต่ำสุดที่เส้นลวดเส้นนี้จะสามารถสั่นสะเทือน และผลิตความถี่เสริมซึ่งมีค่าสูงกว่าความถี่พื้นฐานออกมา(เส้นลวดยิ่งสั้นความถี่ของการสั่นสะเทือนจะยิ่งสูง) ความถี่นี้เรียกว่า ฮาร์มอนิค (Harmonics)

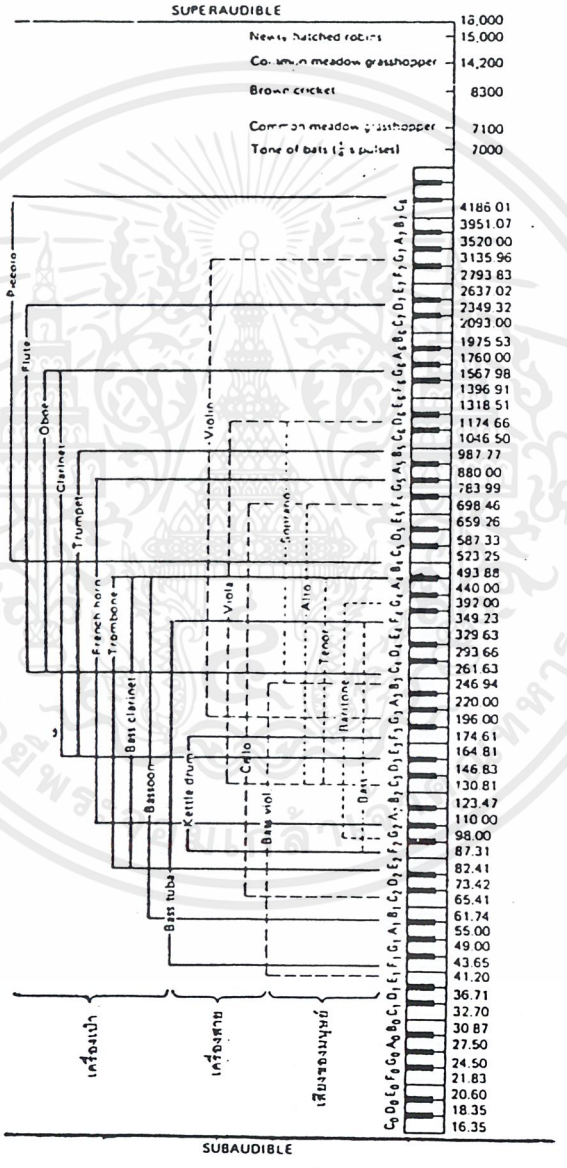
คุณสมบัติของความถี่ฮาร์มอนิคก็คือ จะมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน ถ้าเส้นลวดยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวเดิมมันจะสั่นสะเทือนด้วยความถี่ที่สูงเป็นสองเท่าของความถี่พื้นฐานซึ่งเรียกว่า ฮาร์มอนิคที่สอง (Second Harmonics) และถ้าความยาวของเส้นลวดลดลงไปหนึ่งในสามของ ๆ เดิม การสั่นสะเทือนก็จะทำให้เกิด ฮาร์มอนิคที่สาม (Third Harmonics) ขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเส้นลวดที่มีความยาวใดๆ สามารถสั่นสะเทือนให้เกิดคลื่นที่มีฮาร์มอนิคต่างๆ กันออกมาได้ไม่มีที่สิ้นสุด อย่างไรก็ตามในทางตรงข้ามแอมปลิจูดขอแต่ล่ะฮาร์มอนิคจะเป็นสัดส่วนผกผันกับ จำนวนฮาร์มอนิคที่เกิดขึ้น 2.11.6 โทนเสียงและระดับเสียง

คุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้อธิบายถึงผลของความแตกต่างของความถี่ ช่วงความถี่ของเสียงที่หูของมนุษย์สามารถรับรู้ได้มีค่าประมาณ 16 เฮิรตซ์ ถึง 16 กิโลเฮิรตซ์ ย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 16 เฮิรตซ์ มนุษย์สามารถรับรู้ได้ในลักษณะความรู้สึกมากว่าที่จะเป็นการได้ยินเสียง ส่วนย่านความถี่ที่สูงกว่า 16 กิโลเฮิรตซ์ หูมนุษย์จะไม่สามารถตอบสนองได้ ความถี่ของเสียงดนตรีบางเสียงจะสูงมาก เราเรียกว่า เสียงทรีเบิล (treble tone) ในทางตรงกันข้ามเสียงจะต่ำมาก เราเรียกว่า เสียงเบส (bass tone) ในอุปกรณ์เครื่องเล่นแผ่นเสียง หรือวิทยุ จะมีส่วนที่สามารถปรับแต่งระดับเสียงสูง ต่ำได้ ซึ่งเราเรียกวงจรส่วนนี้ว่า โทนคอลโทรล (tone control) และอีควาไลเซอร์ (equalizer)

ในรูปที่ 2.21 แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆ ของคลื่นเสียง ในคุณสมบัติของดรตรีบางชนิด เช่น เปียโน 88 คีย์ สามารถให้กำเนิดเสียงในย่านต่างๆ ได้มากมายตั้งแต่ ความถี่ 30-4100 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประมาณระดับเสียงสูงอาจจะมีความถี่สูงถึง 4600 เฮิรตซ์ ส่วนในระดับเสียงต่ำจะอยู่ในช่วง 42 ถึง 330 เฮิรตซ์



รูปที่ 2.21 สเปคตรัมของความถี่เสียงที่หูของมนุษย์สามารถตอบสนองได้ อยู่ในย่านความถี่ 16 ถึง 16,000 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

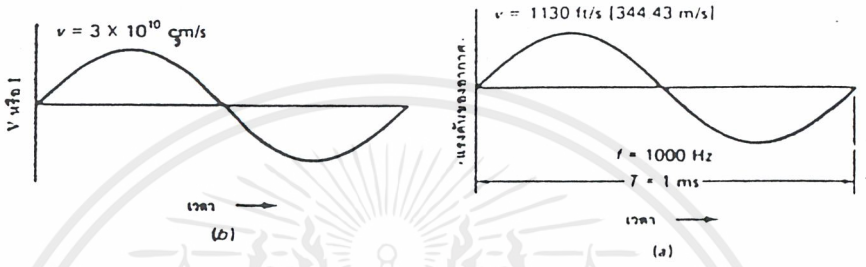
2.12 สัญญาณออดิโอ

รูปที่ 2.22 สัญญาณเสียงถูกแปรสภาพไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยไมโครโฟน แล้วส่งผ่านวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าหลังจากนั้นจะถูกป้อนผ่านลำโพงซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณตามเดิม

จากรูปแสดงถึงการทำงานของไมโครโฟน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการแปลงคลื่นเสียงไปอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดสอดคล้องกันได้ ซึ่งจุดประสงค์ก็เพื่อนำเอาสัญญาณไฟฟ้านี้ไปขยายขนาดโดยผ่านวงจรขยายสัญญาณ (audio amplifier) ความถี่ของสัญญาณออดิโอจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณเสียง รวมกับองค์ประกอบฮาร์มอนิค วงจรขยายประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ที่ต่อรวมกันอยู่ซึ่งให้อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า และอัตราขยายกระแสได้ถึงประมาณ 100,1000 หรืออาจจะสูงถึง 1,000,000 เท่าก็เป็นได้ หลังจากที่สัญญาณถูกขยายให้มีขนาดได้ตามต้องการแล้วจึงคัปปลิ้ง สัญญาณออดิโอเข้าสู่ลำโพงแล้วถูกแปลงจากสัญญาณไฟฟ้ากลับไปเป็นสัญญาณเสียงดังเดิม แต่มีระดับเสียงดังขึ้นกว่าสัญญาณเสียงที่ป้อนเข้าทางอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.1 เปรียบเทียบสัญญาณออดิโอกับสัญญาณเสียง



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบสัญญาณออดิโอ (สัญญาณไฟฟ้า) กับสัญญาณเสียง

(a) การเปลี่ยนแปลงของเสียงเนื่องจากแรงดันในอากาศ
V คือความเร็วเสียงเดินทางในอากาศ

(b) การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออดิโอเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า
V คือความเร็วที่กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านเส้นลวดตัวนำ ซึ่งมีค่าเท่ากับความเร็วแสง

ในรูปที่ 2.23 (a) แสดงถึงรูปร่างของสัญญาณเสียง ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอากาศด้วยความเร็วการกระจายคลื่นเสียงในอากาศมีค่าเท่ากับ 1130 ฟุต/วินาที จาก รูปที่ 2.23 (b) สัญญาณออดิโอความถี่ 1000 เฮิรตซ์ ที่สอดคล้องกับรูปที่ 2.23 (a) แสดงการแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดตัวนำ ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ในสภาพทั่วๆ ไปเราจะตีความหมายของสัญญาณออดิโอว่าเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามการแปรเปลี่ยนของ V และ I ในช่วงความถี่ที่หูมนุษย์เราตอบสนองได้ส่วนเสียงเรียกว่าสัญญาณโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 **ทรานดิวส์เซอร์** (Electromechanical transducer)

ตัวอย่างของทรานดิวเซอร์ที่พบเห็นกันทั่วไป ได้แก่ ไมโครโฟน และลำโพงเป็นต้นซึ่งทั้ง 2 ชนิดเป็นอิเลคโตรเม็คคานิคอล ทรานดิวเซอร์ (electromechanical transducer) ทรานดิวเซอร์มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งได้ เช่น เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียงเป็นต้น ลำโพงมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าซึ่งอยู่ในลักษณะของกระแสไฟฟ้าของสัญญาณออดิโอ ให้เป็นพลังงานกล ซึ่งก็คือ คลื่นเสียงนั่นเอง ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของลำโพงที่คุณสมบัติดังกล่าวคือวอยซ์คอยล์(voice coil) ที่ติดอยู่กับ ไวเบรติ้งโคน (vibrating cone) สำหรับไมโครโฟนมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสียงไปเป็นสัญญาณออดิโอ (สัญญาณไฟฟ้า) ซึ่งจะเห็นว่ามีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับลำโพงนั่นเอง

2.12.3 **ช่วงความถี่ของสัญญาณออดิโอ**

สัญญาณออดิโอ เรียกสั้น ๆ ได้ว่าสัญญาณ AF (Audio Frequency) ในส่วนที่จะกล่าวถึงต่อไป เราจะใช้ทับศัพท์เพื่อสะดวก อุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ AF นั้นส่วนใหญ่แล้วไม่สามารถที่จะตอบสนองต่อช่วงความถี่ตลอดช่วง (16 ถึง 16,000 เฮิรตซ์) ได้โดยสมบูรณ์ ซึ่งก็เนื่องมาจากว่าการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ ที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ต่ำมาก ๆ หรือสูงมาก ๆ นั้น กระทำได้ยากมาก นอกจากนี้อุปกรณ์ทรานดิวเซอร์ต่าง ๆ ก็ยากที่จะออกแบบให้มีคุณสมบัติครบถ้วนได้ และการใช้งานก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้งานตลอดช่วงความถี่เป็นต้น

อุปกรณ์ที่เราใช้เป็นประจำ เช่น โทรศัพท์โดยทั่วไปใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 250 ถึง 2750 เฮิรตซ์ ซึ่งคุณภาพของเสียงก็เป็นที่ยอมรับกันว่ามีคุณภาพดีพอสมควร และในกรณีของเสียงดนตรี และการสนทนาก็ใช้ความถี่เพียงในย่าน 250 ถึง 8000 เฮิรตซ์ เท่านั้น ก็นับได้ว่ามีคุณภาพเสียงที่ดีแล้วนอกจากนี้อุปกรณ์อื่นๆ เช่นเครื่องบันทึกแผ่นเสียง และเครื่องโฟโนกราฟเร็คคอร์ด ก็ตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ต่ำกว่า 15 กิโลเฮิรตซ์ เท่านั้น โดยทั่วๆ ไปแล้วช่วงความถี่ของสัญญาณตั้งแต่ 50 ถึง 15000 เฮิรตซ์ ถือว่าเต็มช่วงความถี่แล้วอุปกรณ์ AF จะสามารถตอบสนองได้ ซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวนี้ ก็ได้ถูกยึดถือเอาไปใช้เป็นช่วงความถี่อุปกรณ์ AF จะสามารถตอบสนองได้ ซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวนี้ ก็ได้ถูกยึดถือเอาไปใช้เป็นช่วงความถี่ของการกระจายเสียงวิทยุเชิงพาณิชย์ ระบบ เอฟเอ็ม (FM) ไฮไฟสเตอริโอเป็นต้น เราจะสังเกตเห็นได้ว่าในการใช้งานทางปฏิบัติแล้วไม่มีความจำเป็นที่จะต้องขยายความถี่ออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การสร้างและวงจรใช้งาน

3.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM มีดังนี้

3.1.1 Input Amplifier (Q_1)

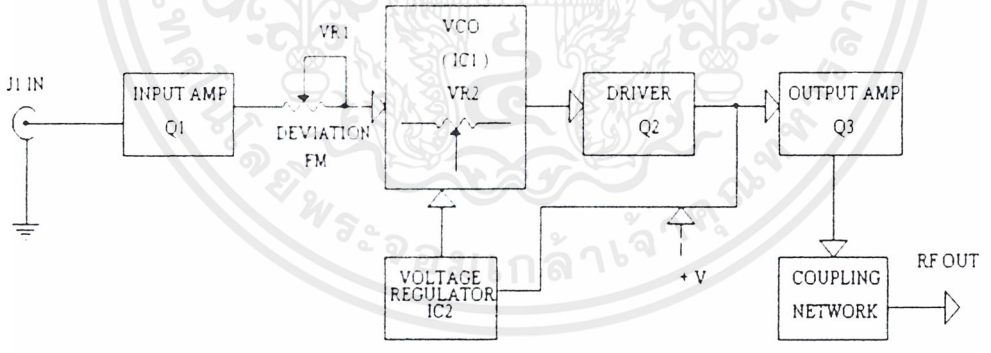
3.1.2 VCO (IC_1)

3.1.3 Driver (Q_2)

3.1.4 Output Amplifier (Q_3)

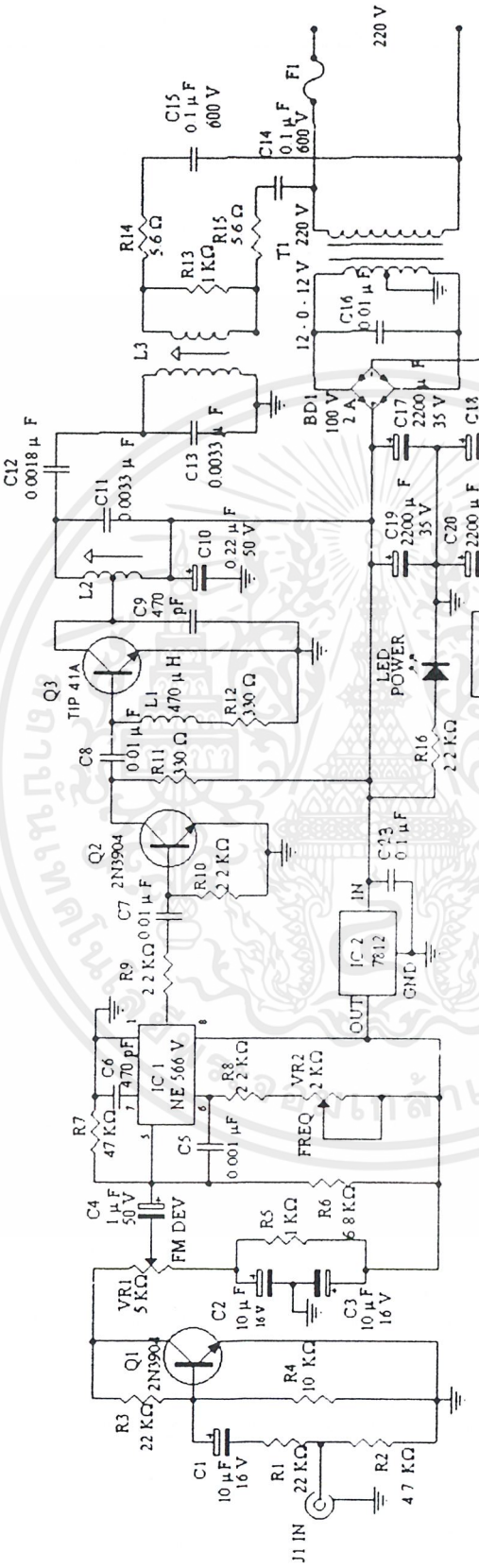
3.1.5 Coupling Network

แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ตามรูป



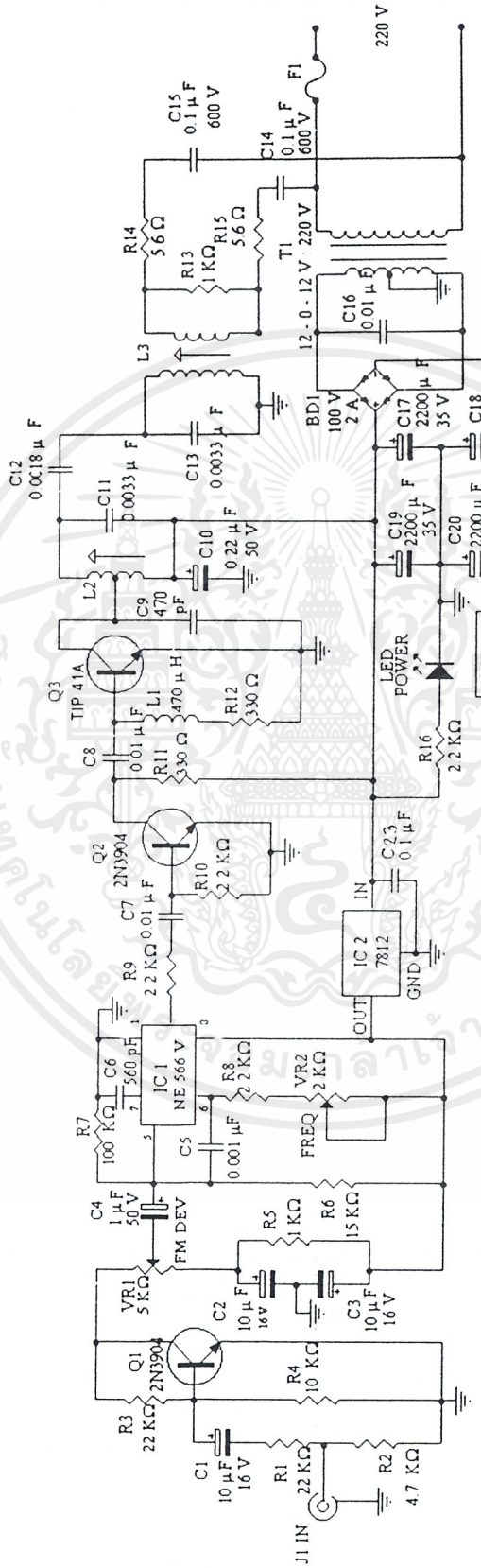
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์ระบบ FM 280 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรส่งสัญญาณผ่านดิจิตอลระบบ FM 110 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

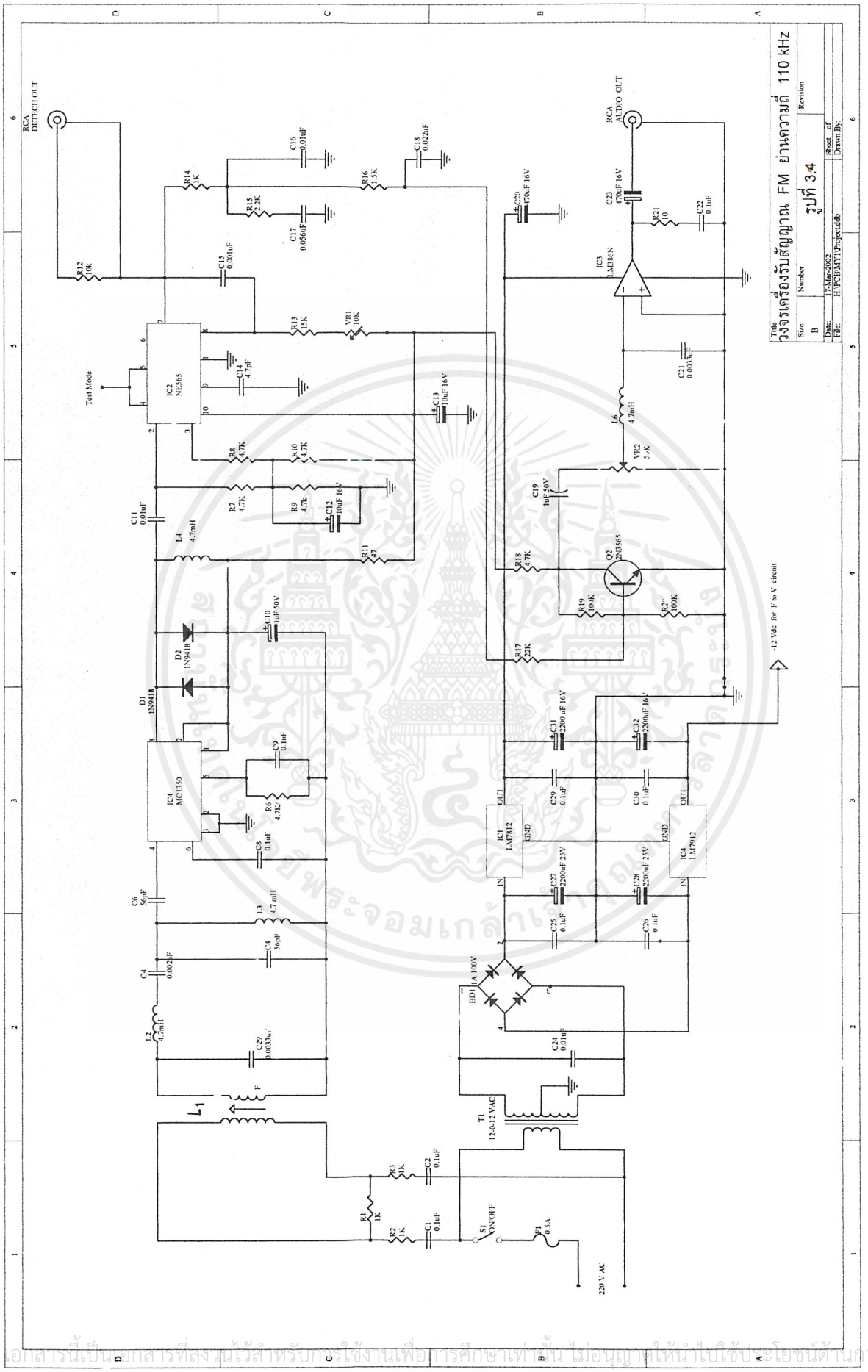
3.2 วงจรส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 3.2 เมื่อป้อนสัญญาณออดิโอ ข้อมูล 0.5 V_{P-P} สัญญาณจะปรากฏคร่อม R_2 ที่มีค่า 4.7 KΩ หลังจากนั้นสัญญาณก็จะถูกส่งผ่าน R_1 และ C_1 เข้าไปยังเบสของแอมปลิฟายเออร์ Q_1 ซึ่งเป็นเบอร์ 2N3904 R_3 และ R_4 ให้ไบอัส Q_1 และอัตราส่วนของ R_3 และ R_4 เป็นตัวกำหนดเกณฑ์ขยายของภาค Q_1 เอาท์พุทจาก Q_1 สามารถปรับระดับได้โดย VR_1 จากนั้นสัญญาณจะส่งเข้าขา 5 ของ IC_1 ที่ขา 5 นี้จะมีแรงดันประมาณ 0.5 V_{P-P} โดย IC_1 นี้เป็นวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน หรือ VCO(Voltage Control Oscillator) และสามารถปรับความถี่เบี่ยงเบนได้ถึง ±60 KHz เพื่อทำหน้าที่มอดูเลตแบบ FM และกำเนิดคลื่นพาหะความถี่ประมาณ 200–350 KHz ขึ้นอยู่กับการตั้ง VR_2 แล้วส่งออก ขา 3 ผ่าน R_9 และ C_7 ไปให้เบสของภาคไดรเวอร์ Q_2 โดย R_{10} ให้ไบอัสที่เบสแก่ Q_2 ได้รูปคลื่นที่ขาคอลเล็คเตอร์ของ Q_2 C_8 ส่งผ่านรูปคลื่นนี้ไปยังเบสของ Q_3 L_1 และ R_{12} (Pre-Emphasis) ให้รูปคลื่น และ DC ไบอัสสำหรับวงจรเบสของเพาเวอร์แอมปลิฟายเออร์ Q_3 IC_2 , IC_3 ให้แรงดันเร็กกูเลต 12 V และ -12 V โดยมี C_3 , C_{23} , C_{21} , C_{22} เป็นบายพาสคาพาซิลเตอร์ เพื่อให้ IC_2 , IC_3 ทำงานมีเสถียรภาพ Q_3 เป็นตัวขยายกำลังของสัญญาณ 280 KHz จาก Q_2 C_9 ทำหน้าที่ระบายฮาร์มอนิคที่คอลเล็คเตอร์ของ Q_3 และช่วยคุ้มกัน Q_3 ไม่ให้พังเพราะถูกกระแสกระชากหรือจากการออสซิลเลต แรงดันไฟเลี้ยง +15 V ถูกต่อผ่านแท็ป L_2 เลี้ยง Q_3 โดยมี C_{10} บายพาสสัญญาณ RF และส่งผ่าน R_{11} เลี้ยง Q_2 L_2 , C_{11} , C_{12}, C_{13} และ L_3 รวมกันเป็น Band Pass Filter (วงจรกรองความถี่ให้แถบความถี่หนึ่งผ่าน) สำหรับย่านความถี่ 200–350 KHz และแมทช์อิมพีแดนซ์ของเอาท์พุทเข้ากับอิมพีแดนซ์ของสาย AC ขดลวด L_2 , L_3 ใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาเบอร์ 32 SWG พันบนแกนสลักจูนขนาด 8 มิลลิเมตร L_2 พัน 93 รอบ แท็ปรอบที่ 31 L_3 พัน 93 รอบ แล้วพันเพิ่มอีก 13 รอบ ไว้ชั้นนอกสุด C_{14} , C_{15} ต่อเข้ากับสายเมนเอซี หลังฟิวส์ F_1 ซึ่งมีอัตรา 1.5 หรือ 2.0 A R_{13} เป็นตัวจำกัดแรงดัน AC ที่เกิดจากการคัพปลิ้งโดย C ไปให้สายเมน AC ให้เหลือประมาณ 10 V_{P-P} R_{14} , R_{15} เป็นรีซิสเตอร์ 5.6 Ω 1 W เป็นตัวให้อิมพีแดนซ์ที่วงจรส่งต้องพบมีเสถียรภาพ และยังเป็นตัวจำกัดกระแสของสายเมน AC ให้มีค่าเหมาะสมในกรณีที่ C_{14} ,C_{15} เกิดการลัดวงจร และ F_1 จะขาดทันที C_{14} , C_{15} เป็นคัพปลิ้งคาพาซิเตอร์ค่า 0.1 μF และมีค่ารีแอคแตนซ์ประมาณ 6 Ω ที่ความถี่ของวงจรส่ง เพื่อให้แมทช์กับสายเมน AC ที่มีอิมพีแดนซ์เพียงไม่กี่โอหม์ ในส่วนของภาคจ่ายไฟใช้หม้อแปลง T_1 (220 V : 12 V – 0 – 12 V , 1.5 หรือ 2.0 A) แปลงแรงดันไฟฟ้า 220 VAC เป็น12 VAC ส่งผ่านเร็คติฟายเออร์ไดโอดบริดจ์ BD_1 โดยมี C_{16} ทำหน้าที่กดการเกิดนอยส์จากเร็คติฟายเออร์ จากนั้นทำให้เรียบขึ้นโดยฟิลเตอร์คาพาซิสเตอร์ C_{17} ,C_{18} , C_{19} และ C_{20} แล้วส่งไปเลี้ยงวงจร ส่วนในรูปที่ 3.3 เป็นวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ที่คลื่นพาหะ 110 KHz การทำงานจะ

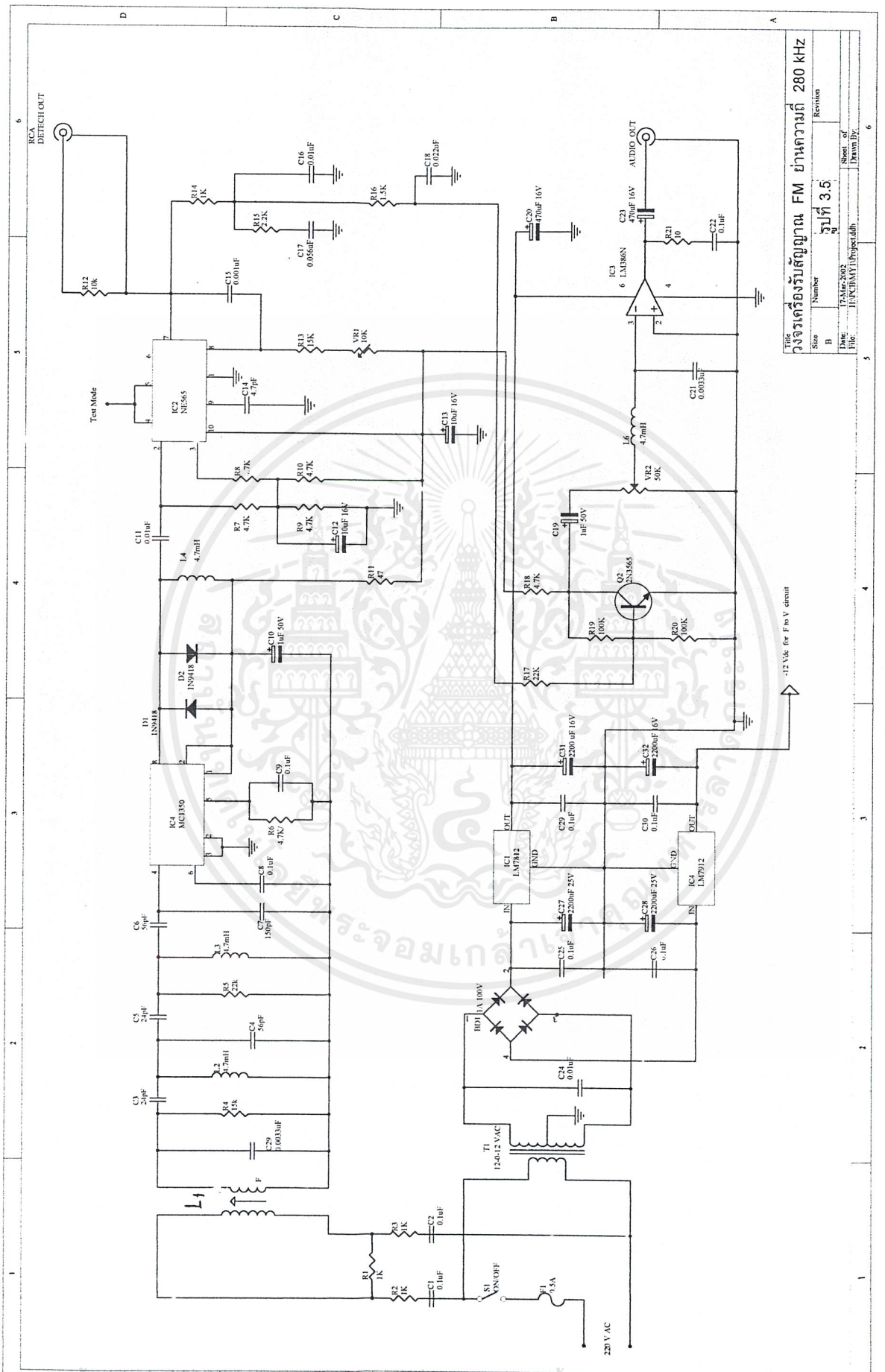
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกับวงจรในรูปที่ 3.2 แต่ต่างกันตรงที่ IC_1 ถูกกำหนดจุดทำงานใหม่ โดย R_6 , R_7 และ C_6 , VR_2 เซตความถี่ที่ VCO เพื่อตั้งคลื่นพาหะให้ได้ 110 KHz และ L_2 , L_3 ถูกกำหนดใหม่ เพื่อให้สัญญาณ RF ในช่วงความถี่ 50-170 KHz ผ่าน Band Pass Filter ได้ เนื่องจาก IC_1 สามารถปรับความถี่เบี่ยงเบนได้ถึง ±60 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ส่วนประกอบหลักของวงจรรับสัญญาณผ่านระบบเอซีไลน์ ระบบ FM มีดังนี้

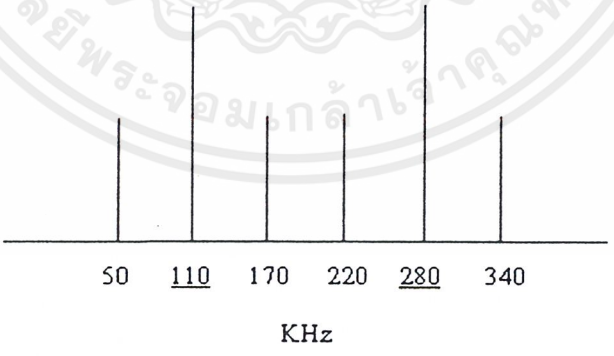
โครงงานนี้ ประกอบด้วยเครื่องส่ง และเครื่องรับ ซึ่งเลือกใช้การส่งและการรับด้วย FREQUENCY MODULATION (FM) ที่ใช้ความถี่ 2 ความถี่ด้วยกัน คือ 280 KHz และ 110 KHz เพื่อที่จะ สามารถรับและส่งได้ในเวลาเดียวกัน (FULL DUPLEX) โดยเครื่องรับจะทำหน้าที่รับสัญญาณจากสายไฟตามอาคาร(AC LINE) แล้วนำมาแยกสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่งนำออกมาใช้งาน

เครื่องรับนี้จะประกอบด้วย

1. ภาค Band Pass Filter
2. ภาคขยายสัญญาณ IF
3. ภาค Demod สัญญาณ
4. ภาคดีเอ็มฟาซิส
5. ภาคขยายสัญญาณออดิโอ

ทั้งหมดนี้จะประกอบด้วย 2 ชุดคือ รับที่ความถี่ 110 KHz และ 280KHz

การเลือกความถี่



ในการส่ง และรับความถี่ จะมีความถี่เบี่ยงเบนจากคลื่นพาหะที่ ± 60 KHz และในการส่ง ละรับแบบ FULL DUPLEX หรือการส่งสัญญาณในเวลาเดียวกัน เราจะไม่สามารถส่งในคลื่นเดียวกันได้ เพราะจะทำให้ความถี่ ทับกัน จึงเลือกใช้คนล่ะความถี่ แล้วต้องเว้นช่องว่างระหว่างความถี่ เบี่ยงเบนสูงสุดของ 110 KHz กับความถี่เบี่ยงเบนต่ำสุดของ 340 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

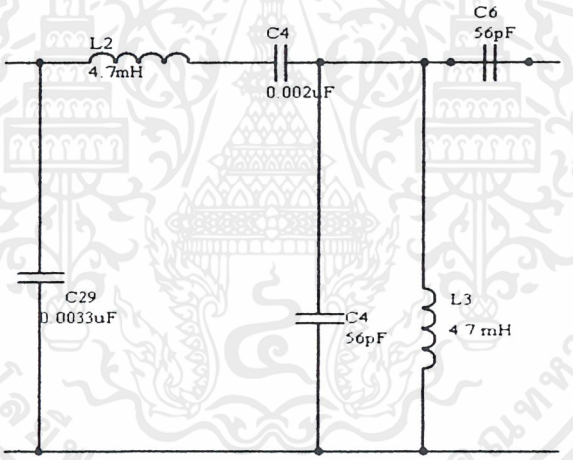
3.4 วงจรรับสัญญาณ

อธิบายแบ่งเป็นภาค ๆ จากวงจรทั้งหมดได้ดังนี้

3.4.1ภาค Band Pass Filter

ได้ใช้แบบ Passive Filter โดยใช้ R , L และ C ซึ่งรับสัญญาณจากสายไฟ AC แล้วนำมากรองความถี่ที่เราต้องนำมาใช้ โดยในเครื่องรับทั้ง 2 ชุดจะมีภาค Band Pass Filter แตกต่างกันเพราะว่าจะใช้รับความถี่ต่างกัน ประกอบด้วย

-วงจรกรองความถี่ 110 KHz

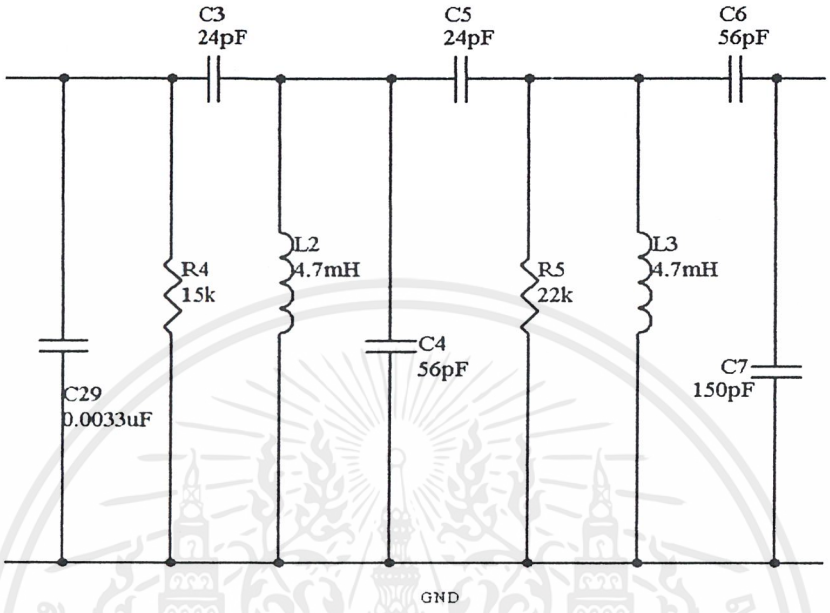


รูปที่ 3.6 วงจรกรองความถี่ 110 kHz

จะใช้กรองความถี่ช่วง 50-170 KHz ที่ส่งออกมาจากเครื่องรับออกจากสัญญาณอื่น ๆ ใน เอซีไลน์ ซึ่งจะนำความถี่ในช่วง 50-170 KHz มาทำการขยายในภาค IF Amplifier ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

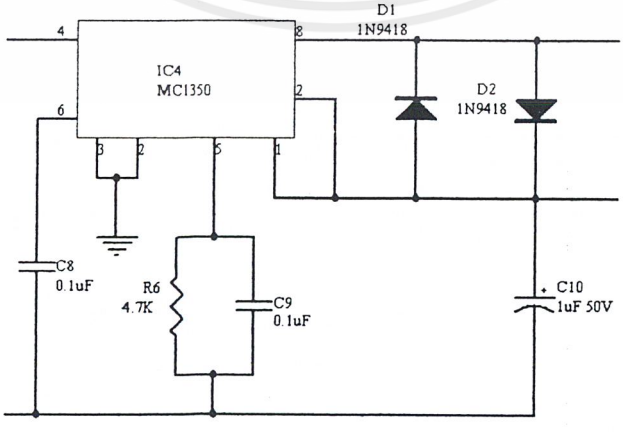
-วงจรกรองความถี่ 280 KHz



รูปที่ 3.7 วงจรกรองความถี่ 280 kHz

จะใช้กรองความถี่ช่วง 220 – 340 KHz ที่ส่งออกมาจากเครื่องรับออกจากสัญญาณอื่นๆ ในเอซีไลน์ ซึ่งจะนำความถี่ในช่วง 220–340 KHz มาทำการขยายในภาค IF Amplifier ต่อไป

3.4.2 ภาคขยายสัญญาณ IF



รูปที่ 3.8 วงจรภาคขยายสัญญาณ IF ความถี่ 280 kHz และ 110 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรภาคขยายสัญญาณ IF ซึ่งรับสัญญาณมาจากภาค Band Pass Filter ของเครื่องรับ FM มีไว้เพื่อขยายสัญญาณ IF ความถี่ 280 KHz และ 110 KHz ให้มีขนาดแอมปลิจูดของสัญญาณสูงขึ้นอย่างเพียงพอ และความเหมาะสมกับการดีเทกให้ได้สัญญาณความถี่ประมาณ 10 – 20 KHz

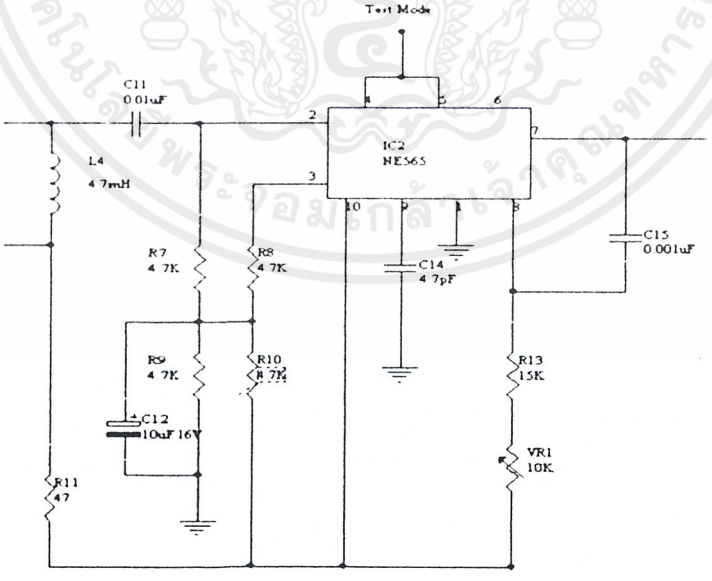
ดังนั้นความถี่ IF 280 kHz และ 110 KHz จึงเบี่ยงเบนความถี่เสียง หรือสัญญาณควบคุมในการรับประมาณ ± 60 kHz

ดังนั้นแบนด์วิดท์ ของการส่งแต่ละช่วงความถี่ละ 120 KHz เมื่อเรานำสัญญาณจากเครื่องรับส่งสัญญาณ IF 280 KHz ที่ได้จะต้องเบี่ยงเบนจากความถี่กลาง 280 KHz และ 110 KHz ไป ± 60 kHz ดังนั้นภาคขยายสัญญาณ IF จึงต้องมีแบนด์วิดท์กว้างถึง 120 KHz

ในโครงงานนี้จึงเลือกใช้ IC ขยายสัญญาณ IF เบอร์ MC 1350 ซึ่ง MC1350 สามารถใช้ขยายสัญญาณในระบบ FM หรือ AM ก็ได้

ในวงจรจะมี D1 และ D2 ทำหน้าที่ ลิมิตเตอร์ เพื่อกำจัดนอยส์ที่ปนเข้ามาในสัญญาณที่ได้จากการขยายของ MC1350 แล้วส่งต่อไปยังภาคดีมอดูเลตชั่น

3.4.3 ภาค Demodulation สัญญาณ FM



รูปที่ 3.9 วงจร Demodulation สัญญาณ FM

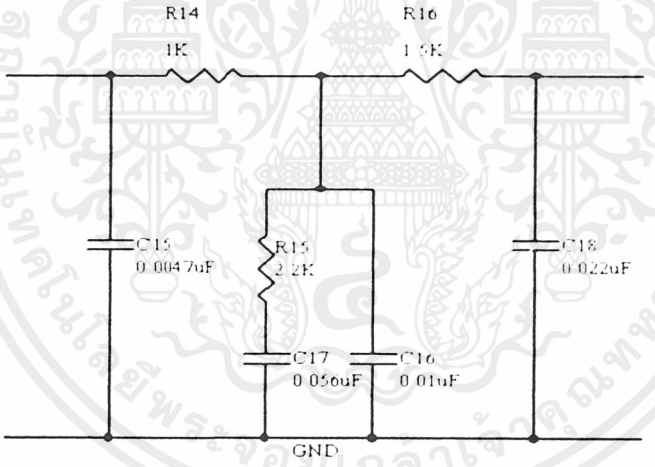
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาค Demodulation สัญญาณ FM นี้จะรับสัญญาณจากภาคขยายสัญญาณ IF มาแล้ว ใช้ไอซี NE565 ทำการ Demod สัญญาณโดยใช้หลักการของ Phase-lock loop ซึ่งในไอซี NE565 จะมีวงจร Voltage – Controlled Oscillator (VCO) เป็นตัวกำหนดความถี่ มีสูตรการคำนวณดังนี้

$f_0 \cong 1.2 / 4 (R13+VR1) C14$

ในชุดวงจรรับสัญญาณทั้ง 2 ชุดจะใช้ R13 และ C14 แตกต่างกันเพราะ มีค่า f_0 ต่างกันคือ 110 kHz และ 280 kHz

3.4.4 ภาคดีเอ็มฟาซิส

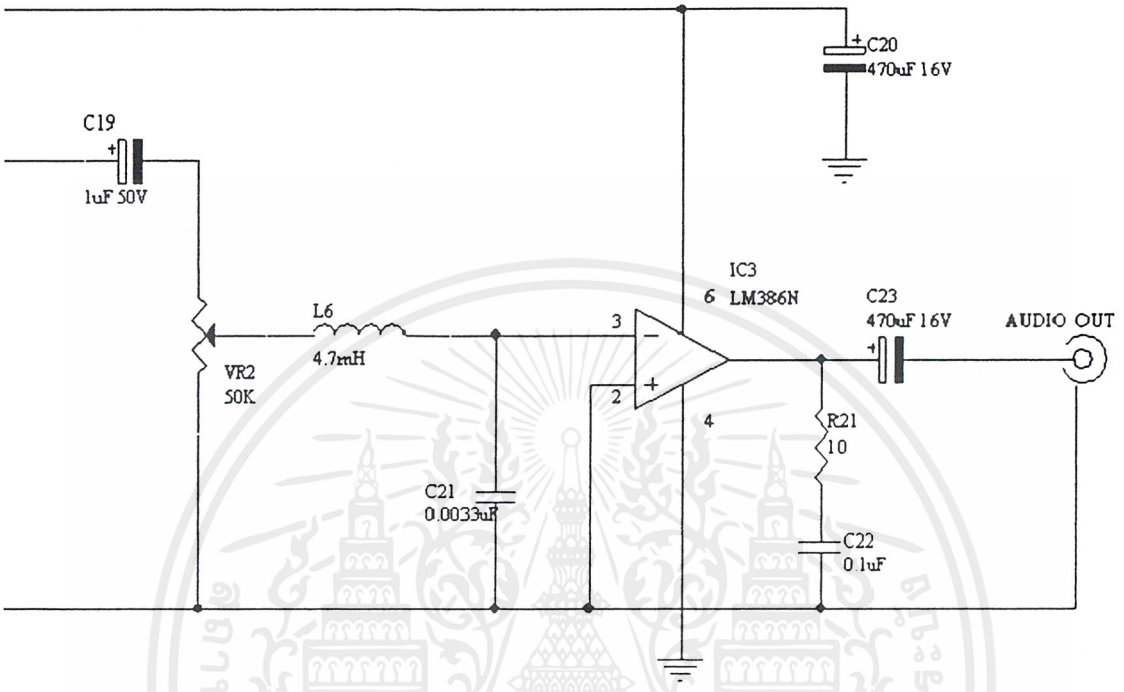


รูปที่ 3.10 วงจรดีเอ็มฟาสิส

วงจรดีเอ็มฟาสิสนี้จะทำหน้าที่ลดทอนความแรงทางด้านความถี่สูงลงมา จากการกระทำในภาคพรีเอ็มฟาสิสของชุดส่งสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ส่งมามากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ภาคขยายสัญญาณออดิโอ



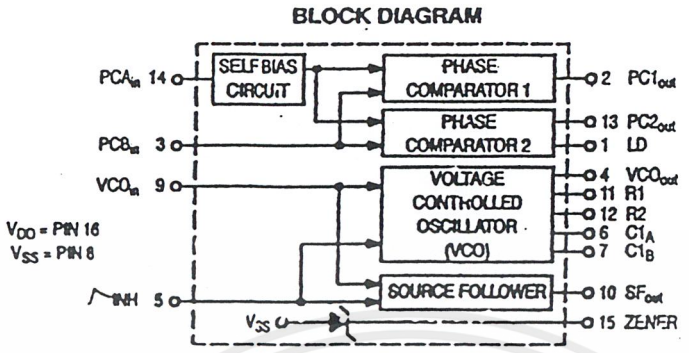
รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณออดิโอ

ในภาคขยายสัญญาณออดิโอ จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณออดิโอที่รับมาจากภาคดีเอ็มฟาสิสมี VR2 ป็นตัวปรับอัตราการขยายของสัญญาณ และมี L6 , C21 จะเป็นตัวกรองความถี่อีกคลื่นพาหะทิ้งไปอีกชั้นหนึ่ง แล้วใช้ไอซี LM386 เป็นตัวขยายสัญญาณอีกที แล้วนำสัญญาณนั้นไปใช้งานได้เลย หรือนำไปใช้ใน ภาคแปลงความถี่เป็นแรงดัน (V/F) เพื่อแปลงความถี่เป็นแรงดัน ในการส่งแบบแรงดันกระแสตรง

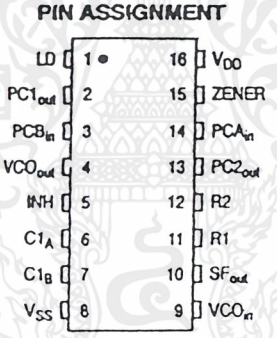
3.5 การแปลงแรงดันเป็นความถี่

เป็นการแปลงแรงดันให้เป็นความถี่ที่ต้องการ(Voltage to Frequency : V to F) จากบล็อกไดอะแกรมของ IC-CMOS Phase Locked Loop (MC14046B) ในรูปที่ 3.12 สามารถนำส่วนของ Voltage Controlled Oscillator(VCO) หรือวีซีโอ ภายในไอซีมาใช้งานได้ ซึ่งการทำงานของวงจรวีซีโอ คือ แรงดันอินพุทจะควบคุมการออสซิลเลตความถี่ที่ส่งออกเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

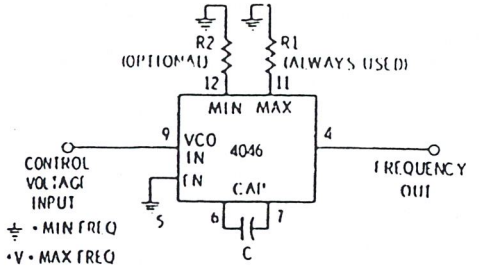


รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของไอซีเบอร์ MC14046B



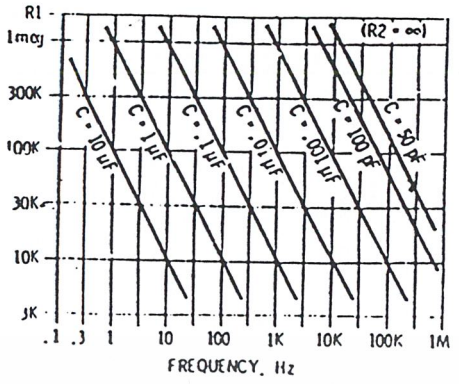
รูปที่ 3.13 แสดงขาของไอซีเบอร์ MC14046B

แสดงการต่อไอซีเบอร์ MC14046B ใช้งานเป็นวงจรวีซีโอ



รูปที่ 3.14 วงจรวีซีโอโดยใช้ไอซีเบอร์ MC14046B

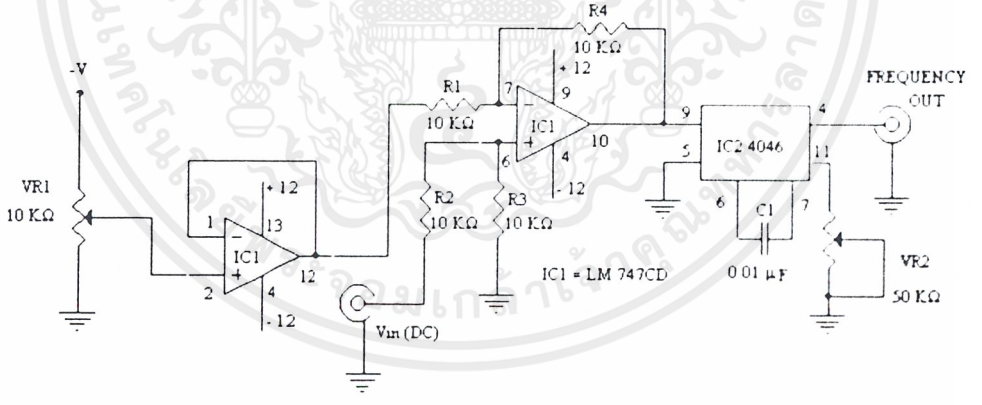
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(B) Component values (input voltage = V/2).

รูปที่ 3.15 กราฟแสดงการเลือกค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุ

จากกราฟรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าจุดการใช้งานของวงจรวีซีโอที่ย่านความถี่ที่ต้องการ สามารถกำหนดได้จากค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุ ในรูปที่ 3.16 แสดงวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ (V to F)



รูปที่ 3.16 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่

โดยที่ VR_1 ทำหน้าที่ปรับแรงดันอ้างอิงให้กับ IC_1 (LM747CD) เพื่อที่จะให้ IC_1 จัดแรงดันอินพุท (Vin) ให้กับวงจรวีซีโอ (IC_2) ซึ่ง IC_1 ถูกจัดเป็นวงจรลบแรงดัน Gain = 1 วงจรนี้เป็นการรวมวงจรอินเวอร์ติ้งแอมป์ และนันอินเวอร์ติ้งแอมป์เข้าด้วยกัน ผลคือ เกิดการหักล้างกันที่เอาท์พุทขึ้น (เนื่องจากเฟสของวงจรแต่ละชนิดจะตรงกันข้าม) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = V_2 - V_1$$

ข้อเสียของวงจรนี้อยู่ที่อินพุทอิมพิแดนซ์ค่อนข้างต่ำ ในบางครั้งจำเป็นต้องใช้วงจรตามแรงดันเป็นบัฟเฟอร์ก่อนเข้าวงจรลบแรงดัน เมื่อได้แรงดันอินพุทจาก IC_1 แล้ว จากนั้นจะส่งไปให้ IC_2 ควบคุมการออสซิลเลตความถี่ออกมา โดยมี VR_2 และ C_1 กำหนดย่านความถี่ที่ต้องการให้วงจรวีซีโอ

3.6 การแปลงความถี่เป็นแรงดัน

ในภาคนี้จะเสริมเข้ามาเพื่อทำหน้าที่รับและส่งแรงดันกระแสตรง วงจรนี้จะทำหน้าที่แปลงความถี่จากภาคขยายออดิโอเป็นแรงดันกระแสตรง(DC Voltage) ในโครงงานนี้เราได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM2907N-8

ข้อได้เปรียบของกลุ่ม LM2907

1. ค่าเอาท์พุทสามารถมีการเปลี่ยนแปลงได้ถึงศูนย์ สำหรับที่ความถี่อินพุทที่เข้ามาเป็นศูนย์
2. ใช้งานง่าย โดยค่าเอาท์พุท หาได้จากสมการ ; Vout = Fin * Vcc * R1 * C1
3. สำหรับไอซีเบอร์ LM2907 ภายในชิพจะมีซีเนอร์ไดโอด ซึ่งเป็นตัวทำให้การแปลงความถี่เป็นแรงดัน หรือกระแสเป็นไปอย่างถูกต้องแน่นอน และมีเสถียรภาพ

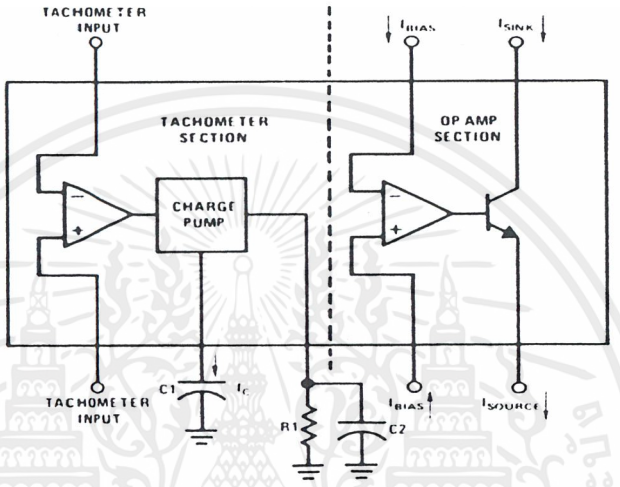
นอกจากกลุ่มไอซีเบอร์ LM2907 จะใช้งานในการเปลี่ยนจากความถี่เป็นแรงดันแล้ว ไอซีกลุ่มนี้ยังใช้งานด้านอื่นได้อีกเช่น

- Over / Under Speed Sensing
- Speedomrter
- Breaker point dwell meter
- Speed govermors
- Hand-held tachometer
- Cruise control
- Automative door lock control
- Clutch control
- Horn Control
- Touch or sounf switches

เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทั่วไปของกลุ่มไอซีเบอร์ LM2907 นั้นจะออกแบบมาให้ใช้กับอุปกรณ์ภายนอกให้น้อยที่สุดแต่จะให้เกิดการใช้งานที่มีประสิทธิภาพและความแน่นอนที่น่าพอใจ ซึ่งเป็นลักษณะที่ได้เปรียบของกลุ่มนี้ ไอซีกลุ่มนี้จะมีส่วนประกอบของวงจรภายในซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ดัง รูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรภายในของไอซีเบอร์ LM2907

ส่วนที่ 1 คือ ส่วนอินพุทสเตท มีขาอินพุท 2 ขา ทำหน้าที่รับสัญญาณความถี่จากภายนอกเข้ามา โดยปกติจะมีอินพุทที่เป็นกราวอยู่ภายในอันหนึ่ง ดังนั้นสัญญาณอินพุทที่เข้ามาอีกขาหนึ่งนั้น จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงสูงกว่า หรือต่ำกว่ากราวน์ และจะต้องเกินค่าอินพุทซัพพลายที่จะให้เกิดเอาท์พุทออกมาซึ่งช่วงนี้เราถือว่าเป็นช่วงอินพุทสเตท ไอซี ทั้ง 2 เบอร์นี้สามารถที่จะเลือกตั้งค่าระดับอินพุทสวิตชิ่งตามต้องการ โดยยังคงทำให้มีฮิสเตอรีสิส(Hyteresis) สำรับในการกำจัดสัญญาณรบกวน ในการทำงานที่แตกต่างกัน สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คืออินพุทกรณีที่มีค่าต่ำกว่ากราวน์จะต้องมีตัวต้านทานที่จะมาลิมิตกระแสที่จะไหลกลับเข้าไปในอีพิซับสเตทไดโอด (epi-substrate diode)

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนชาร์จปั๊ม(Charge Pump) อยู่หลังจากช่วงอินพุทที่ออกจากช่วงอินพุทสเตทจะมาเข้าที่ชาร์จปั๊ม ซึ่งเป็นที่ทีความถี่เข้ามาจะถูกเปล่ยนเป็นดีซีโวลท์เตจในช่วงนี้จะต้องมีการต่อกับอุปกรณ์ภายนอก อันได้แก่ไทม์มิ่งคาปาซิสเตอร์(timig capacitor , C1) , โหลดรีซิสเตอร์(load resistor , R1) และฟิลเตอร์คาปาซิสเตอร์(filter capacitor , C2) เมื่อค่าอินพุทสเตทเปลี่ยนระดับไทม์มิ่งคาปาซิเตอร์จะทำหน้าที่ ชดเชยผลของชาร์จปั๊มโดยจะทำการชาร์และดิสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างคงที่ระหว่างค่าระดับโวลท์เตจที่เปลี่ยนแปลง ค่าความแตกต่างของมันคือค่า Vcc/2 เมื่อเราใช้ครึ่งไซเคิลของความถี่อินพุทที่เข้ามา หรือเป็นเวลาเท่ากับ 1 / (2Fin) ประจุที่เข้าไปในไทม์มิ่งคาปาซิสเตอร์ เท่ากับ (Vcc/2)*C1 ดังนั้นเราได้ค่าเฉลี่ยของกระแสจากการชาร์จปั๊มที่จะเข้า หรือออกจาก C1 หรือ Ic คือ

$$\blacktriangle Q/T = Ic = C1 * (Vcc/2) * (2Fin) = Vcc * Fin * C1$$

ค่ากระแสที่ออกมาจะค่อนข้างคงที่ และจะไหลไปที่โหลดรีซิสเตอร์ (ซึ่งต่อลงกราวน์) เกิดโวลท์เตจตกคร่อมขึ้น ซึ่งนำออกมาใช้เป็นเอาท์พุทหรือ Vo = Ic * R1 ดังนั้นสมการที่แสดงการเปลี่ยนความถี่เป็นโวลท์เตจคือ

$$Vo = Vcc * Fin * C1 * R1 * K$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ของอัตราขยายโดยทั่วไปจะใช้เท่ากับ 1

สำหรับฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์นั้น ขนาดจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าแรงดันริปเปิล(ripple voltage) ที่เราจะยอมให้เกิดขึ้นในช่วงเวลาการตอบสนอง

ส่วนที่ 3 คือส่วนขยายสัญญาณ จะดึงสัญญาณออกจากชาร์จปั๊มมาขยายสูงขึ้น

การเลือกค่า R1 และ C1

มีข้อจำกัดในการเลือกค่า R1 และ C1 ซึ่งต้องพิจารณาลักษณะที่เหมาะสมโดยตัว C1 (timing capacitor) จะเป็นตัวชดเชยภายในชาร์จปั๊ม ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่า 100 pF เพื่อความเที่ยงตรงในการทำงาน และค่า R1 ไม่ควรจะใหญ่เกินไป เพราะถ้าค่ามากเกินไปแล้วจะทำให้โวลท์เตจที่เกิดถูกดรอปไป ทำให้ค่าเป็นเชิงเส้นลดลง

สำหรับขนาดแรงดันริปเปิลจะต้องมีการพิจารณาซึ่งค่าแรงดันริปเปิลจะหาได้จากสูตร

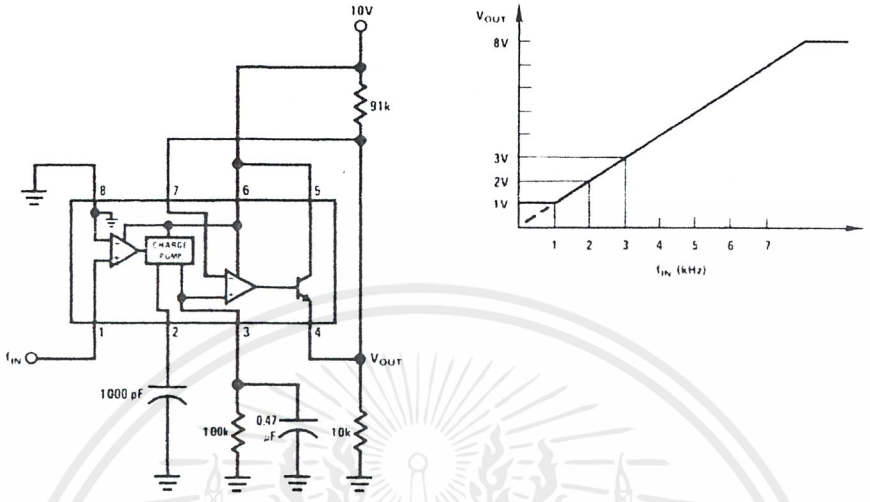
$$Vripple = Vcc/2 * C1/C2 * (1 - (Vcc * Fin * C1/Ic)) \quad peak\text{-}peak$$

ข้อสุดท้ายที่เราจะต้องพิจารณาถึง ก็คือ ค่าความถี่อินพุทสูงสุดที่รับเข้ามาจะพิจารณาได้จาก

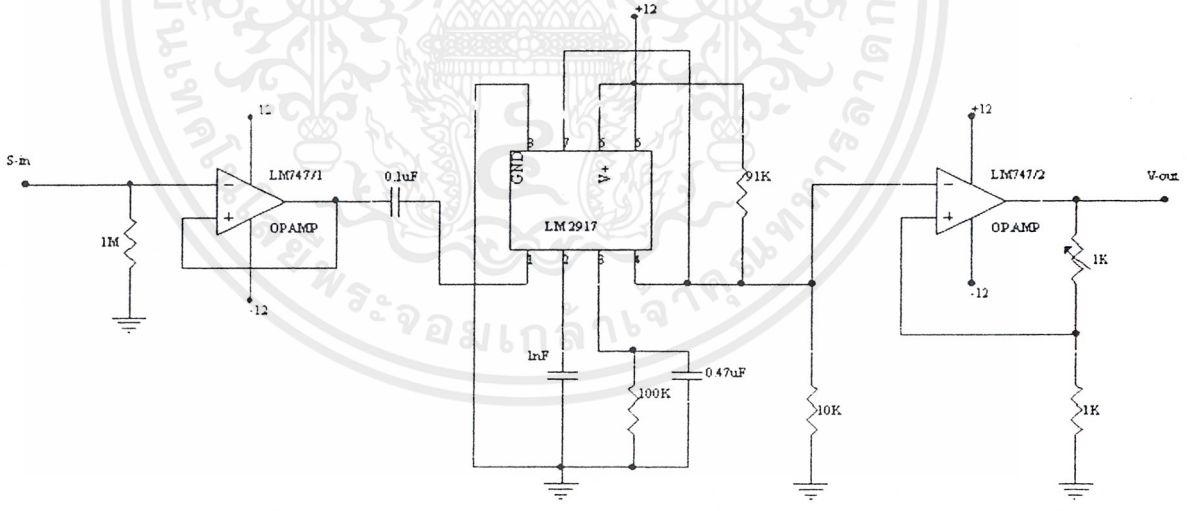
$$Fmax = Ic / (C1 * Vcc)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่นำมาใช้งานจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 รูปลักษณะวงจรที่นำมาใช้



รูปที่ 3.19 รูปวงจรที่นำไปใช้งานจริงในภาค F to V

เมื่อได้รับสัญญาณจากเอาท์พุทภาคขยายสัญญาณออดิโอแล้ว หลังจากนั้นก่อนที่ความถี่ถูกออสซิลเลตจะต่อเข้ากับไอซี LM2907 จะต้องมีวงจรที่เป็นบัฟเฟอร์ (LM747/1) มาช่วยทำให้ระดับสัญญาณคงที่ก่อนที่จะเข้าไอซี LM2907 และเนื่องจากแรงดันที่ออกจาก LM2907 จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

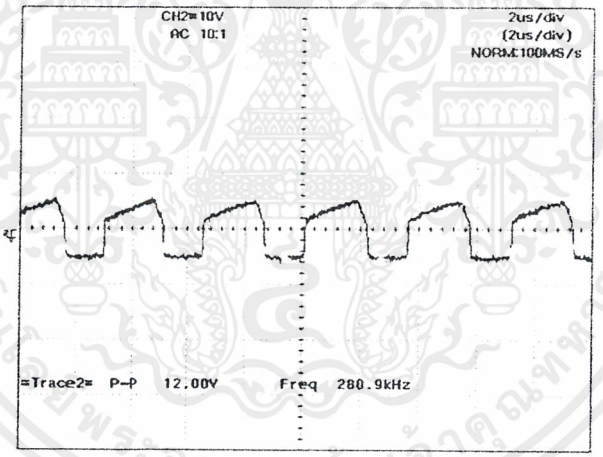
ระดับแรงดันในระดับที่ต่ำจึงต้องมีการขยายสัญญาณโดยการต่อเข้ากับออปแอมป์ (LM747/2) แบบนอนอินเวอร์ติ้ง(non-inverting) เพื่อขยายสัญญาณเพิ่มตามการปรับอัตราขยาย ดังนั้น สามารถเขียนรูปการต่อวงจรรวมที่ทำการลิ้งกันได้ ดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและสรุปผล

4.1 การทดลองวงจรส่งสัญญาณร่วมกับวงจรรับสัญญาณที่ 110 KHz และ 280 KHz

- จากรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 เมื่อยังไม่ป้อนสัญญาณที่อินพุท IC_1 ถูกกำหนดจุดทำงานโดย R_6, R_7 และ C_6 , VR_2 เซตความถี่ที่ VCO ปรับ VR_2 ตั้งความถี่คลื่นพาหะที่ 280 KHz และ110 KHz ตามลำดับ สัญญาณถูกส่งเข้าไปยัง Q_2 (2N3904) ซึ่งเป็นวงจรขยายคอมมอนอิมิตเตอร์ โดย R_{10} สร้างแรงดันไบอัสเบส ที่ V_{CC} = +15 V ส่งสัญญาณออกที่คอลเล็คเตอร์ Q_2 ในรูปที่ 4.1 แสดงผลสัญญาณที่วัดได้ของวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ ระบบ FM 280KHz

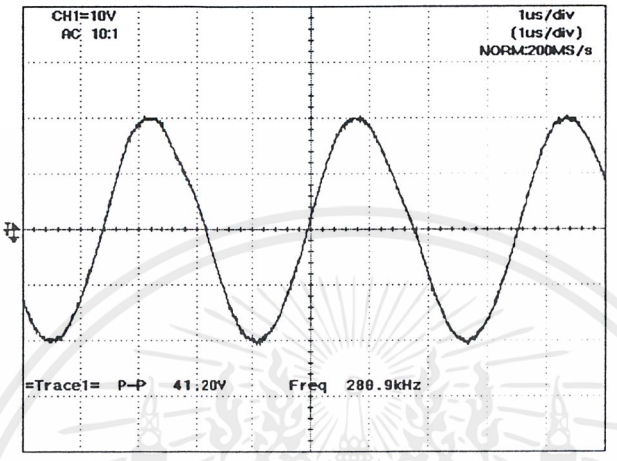


รูปที่ 4.1 สัญญาณคลื่นพาหะ 280 KHz จากคอลเล็คเตอร์ Q_2

จากนั้นจะถูกส่งไปขยายเพื่อขับออกเอาท์พุทโดย Q_3 ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายคอมมอนอิมิตเตอร์ที่ V_{CC}=+15 V โดยมี L_1, R_{12} (Pre-Emphasis) ยกระดับสัญญาณโดยให้สัญญาณที่ 1 kHz ขึ้นไปเข้าไปถูกขยายสัญญาณความถี่ต่ำบายพาสลงกราวน์และสร้างแรงดันไบอัสเบส จากนั้นส่งออกเอาท์พุทที่คอลเล็คเตอร์ ประมาณ 20-35 V_{P-P} ทรานซิสเตอร์ให้ RF เพาเวอร์ประมาณ 5 W (ไม่ค่อยเหมาะเพราะให้มากเกินไป) โดยปกติให้ RF ประมาณ 1 W ก็พอ แต่ทรานซิสเตอร์ตัวนี้จะทนต่อการไม่แมทช์กันของโหลดได้ดี

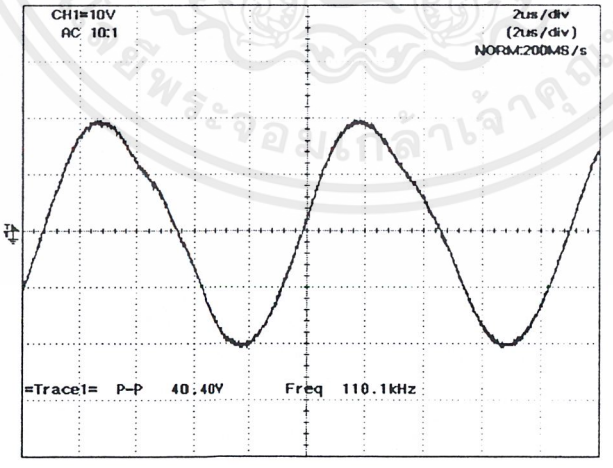
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับ L_2 , L_3 ที่เอาท์พุท (MAX) = 45 V_{P-P} , (MIN) = 10 V_{P-P} ที่เอาท์พุทสูงจะทำให้การส่งสัญญาณ RF ไปได้ไกล



รูปที่ 4.2 สัญญาณคลื่นพาหะ 280 KHz จากเอาท์พุท J_2

- ในรูปที่ 4.3 แสดงรูปสัญญาณของคลื่นพาหะที่ 110 KHz ของวงจรส่งสัญญาณผ่านเอซีไลน์ระบบ FM 110KHz (รูปที่ 3.3)

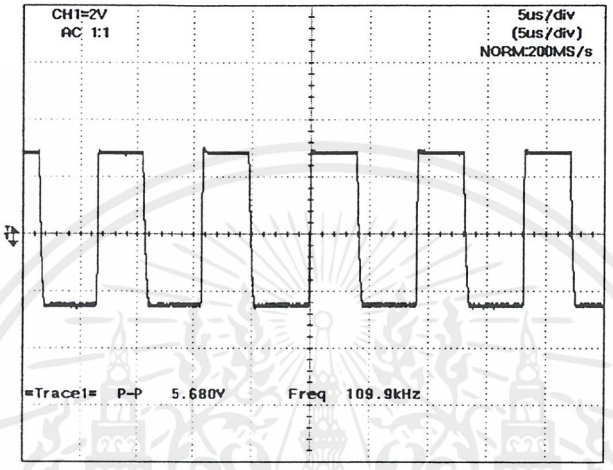


รูปที่ 4.3 สัญญาณคลื่นพาหะ 110 KHz จากเอาท์พุท J_2

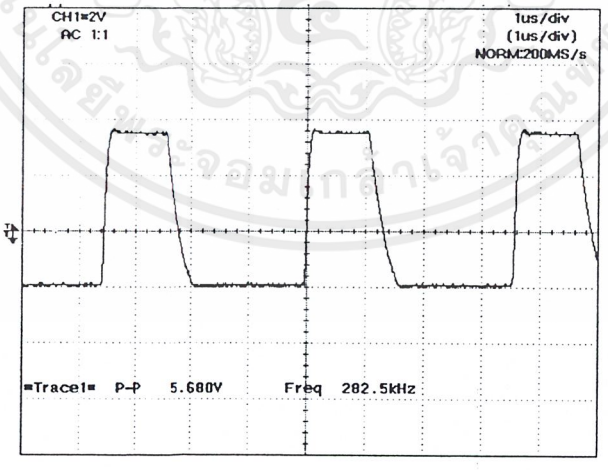
- จากภาครับสัญญาณ เมื่อจ่ายไฟให้กับวงจรแล้ววงจร Voltage Controlled Oscillator (VCO) ไอซี NE565 จะทำการผลิตสัญญาณพัลส์ออกมาที่ ขา 4 และ ขา5 ของ ไอซี NE565 เพื่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้รับเข้ามาจากภาคขยายสัญญาณ IF และจะได้ผลต่างเพื่อนำไปใช้งาน



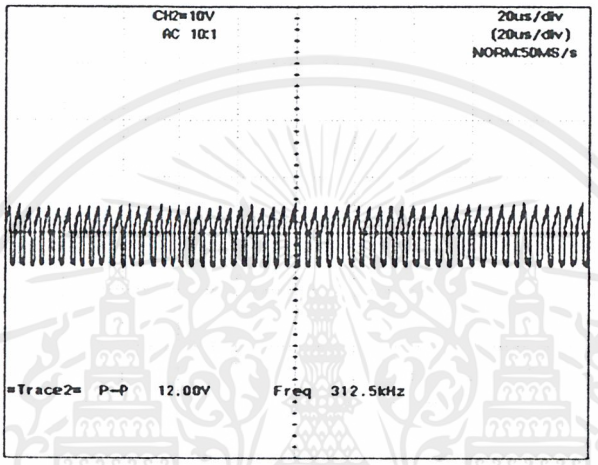
รูปที่ 4.4 สัญญาณที่ขา 4 และขา 5 ของชุดรับสัญญาณ 110 KHz



รูปที่ 4.5 สัญญาณที่ขา 4 และขา 5 ของชุดรับสัญญาณ 280 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

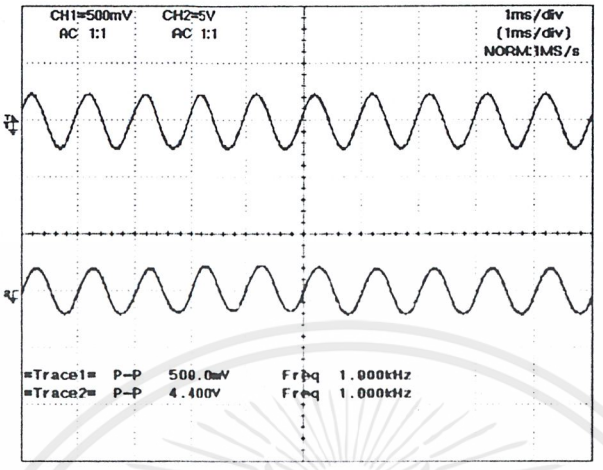
- เมื่อป้อนสัญญาณรูปซายน์ 0.5 V_{P-P} ความถี่ 1 kHz ที่ J_1 ปรับ VR_1 (ดีวิเอชั่น) ให้เท่ากับสัญญาณอินพุท ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นคลื่นพาหะที่มอดูเลตกับสัญญาณอินพุทแล้ว (สัญญาณ RF)



รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ขาคอลเล็คเตอร์ Q_2

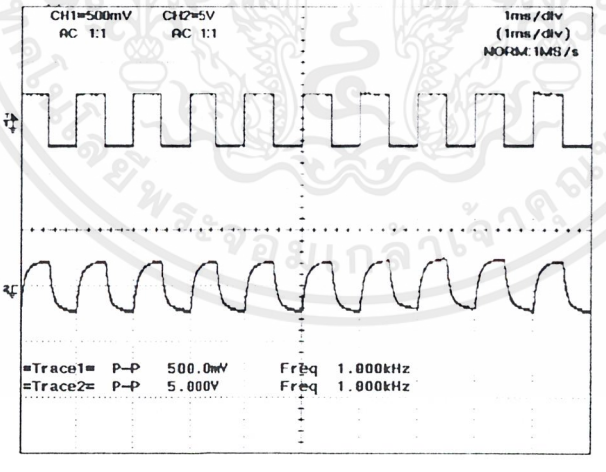
- ที่การเบี่ยงเบนทางความถี่ ความถี่สูงสุดที่วัดได้ 312.5 KHz และความถี่ต่ำสุด 256 KHz จะได้ค่าการเบี่ยงเบนความถี่ประมาณ $\pm$ 30 KHz (จากคลื่นพาหะ 280 KHz) ถ้าป้อนสัญญาณรูปซายน์ 1 V_{P-P} ที่ J_1 วัดค่าการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดได้ 340.2 KHz และความถี่ต่ำสุด 221.3 KHz จะได้ค่าการเบี่ยงเบนความถี่ประมาณ $\pm$ 60 KHz และเมื่อเพิ่มความถี่ของสัญญาณอินพุทมากขึ้น ค่าความถี่สูงสุด และต่ำสุดที่ได้จากสัญญาณ RF เร็วขึ้น แต่มีค่าการเบี่ยงเบนเท่าเดิม ซึ่งจะเห็นว่า ค่าการเบี่ยงเบนนั้นคงที่แต่อัตราในการเบี่ยงเบนความถี่ของคลื่นพาหะมีค่ามากขึ้น นั่นคือ ค่าการเบี่ยงเบนความถี่ของคลื่นพาหะขึ้นอยู่กับแอมปลิจูด และอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของคลื่นพาหะขึ้นอยู่กับความถี่(ของสัญญาณอินพุทที่เข้ามามอดูเลต) สัญญาณที่ผ่านขบวนการดีมอดูเลต และ ถูกขยายแล้ว แสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาท์พุทของวงจรรับสัญญาณที่ 280 KHz

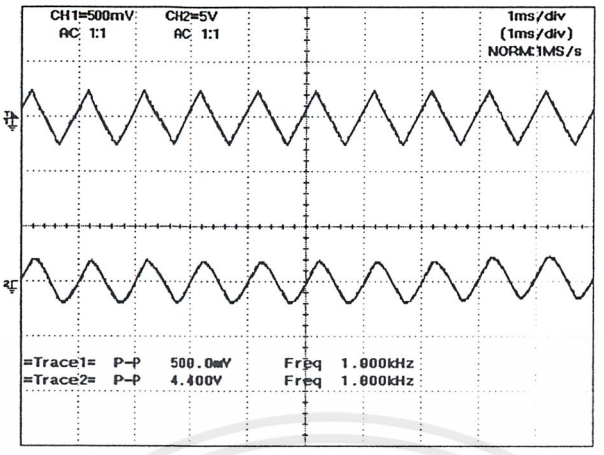
- เมื่อสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามา(J,) เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม 0.5 V_{p-p} ความถี่ 1 KHz และวัดสัญญาณเอาท์พุทของวงจรรับสัญญาณที่ 280 KHz จะได้ผลดังรูป



รูปที่ 4.8 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม)

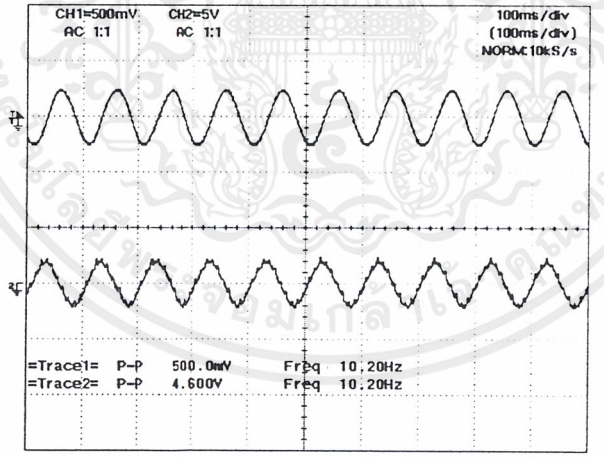
และเมื่ออินพุทเปลี่ยนเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม จะแสดงผลสัญญาณได้ในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



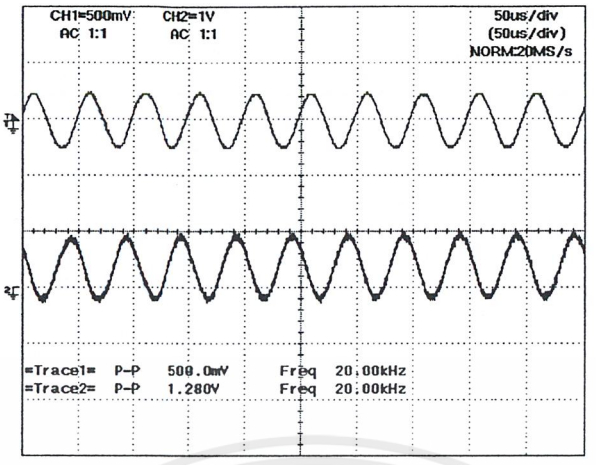
รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม)

- เมื่อสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามา (J_1) เป็นคลื่นรูปซายน์ 0.5 V_{P-P} ความถี่ 10 Hz และ20 KHz สามารถวัดสัญญาณเอาท์พุท ได้ผลดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ



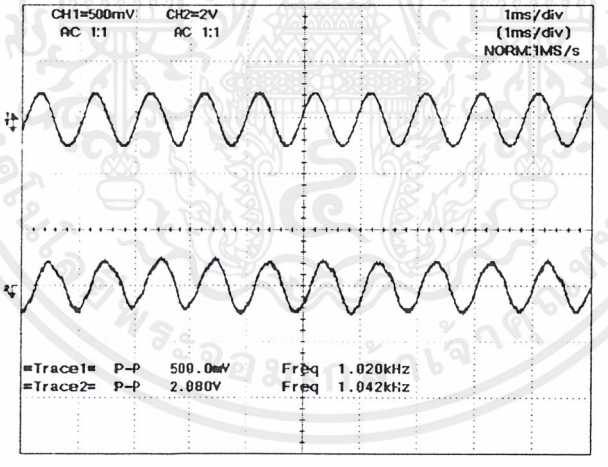
รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 10 Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 280 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 20 KHz)

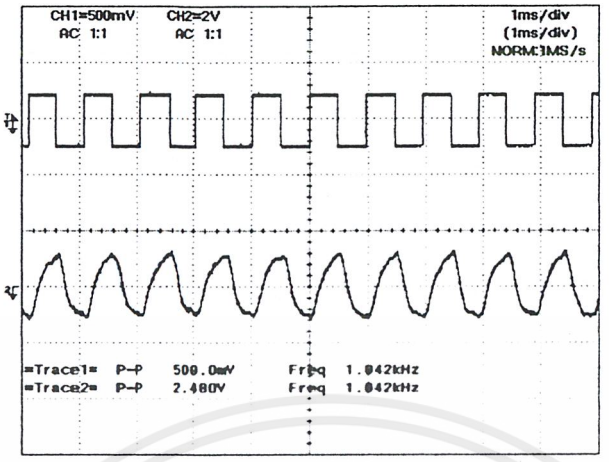
- เมื่อป้อนสัญญาณรูปซายน์ 0.5 V_{P-P} ความถี่ 1 kHz ที่ J_1 (วงจรส่งสัญญาณ 110 KHz) และสัญญาณที่ผ่านขบวนการดีมอดูเลต และ ถูกขยายแล้ว แสดงในรูปที่ 4.12



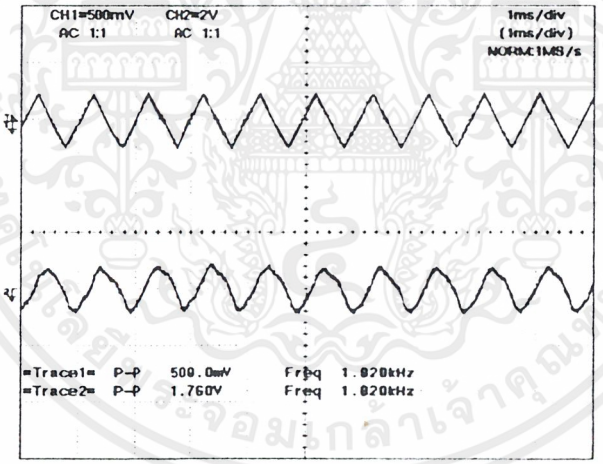
รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz

- เมื่อสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามา(J_1) เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และคลื่นรูปสามเหลี่ยม 0.5 V_{P-P} ความถี่ 1 KHz สามารถวัดสัญญาณเอาท์พุท ได้ผลดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



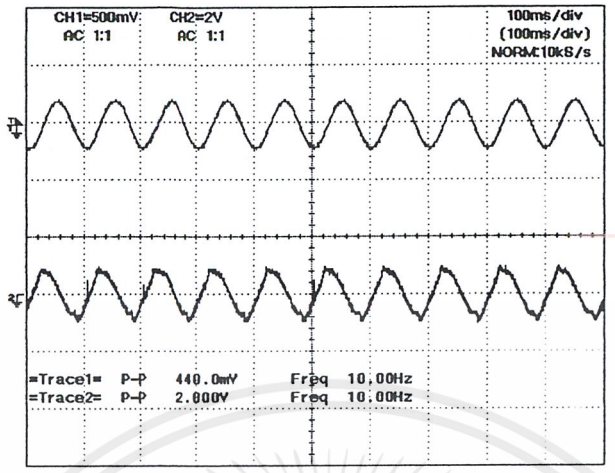
รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม)



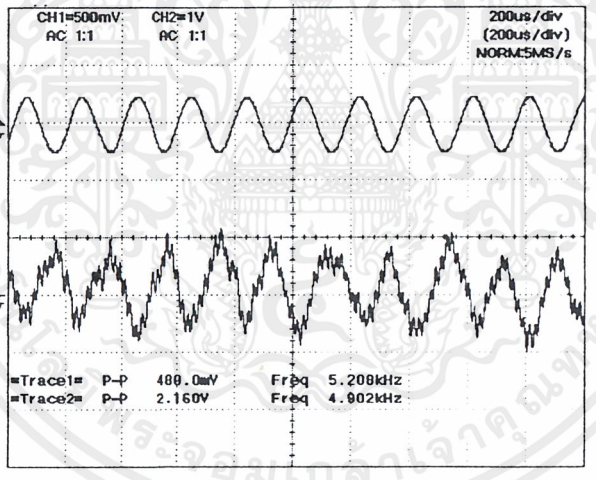
รูปที่ 4.14 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (อินพุทเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม)

- เมื่อสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามา(J_1) เป็นคลื่นรูปซายน์ 0.5 V_{P-P} ความถี่ 10 Hz และ 5 KHz จะสามารถวัดสัญญาณเอาท์พุท ได้ผลดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 10 Hz)



รูปที่ 4.16 สัญญาณเอาท์พุทที่วงจรรับสัญญาณ 110 KHz (ความถี่อินพุทเท่ากับ 5 KHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เมื่อทดลองร่วมกับวงจร V to F และ F to V

- จากรูปที่ 3.16 เมื่อปรับ VR_1 ให้ได้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ –1 V และกำหนด VR_2 , C_1 ให้ได้ย่านความถี่ที่ต้องการแล้ว จะได้ผลดังนี้

Voltage (V)	Frequency (KHz)
0	0
1	0.985
2	2.016
3	3.086
4	4.032
5	5.004
6	5.952
7	6.8
8	7.576
9	8.333
10	8.929

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากรูปที่ 3.19 ป้อนความถี่จากฟังก์ชั่นเจนเข้าไปที่ อินพุทของวงจร F to V แล้วใช้มิเตอร์ดิจิตอลวัดค่าที่เอาท์พุทของวงจร

Frequency (KHz)	Voltage (V)
0	0.95
1	1.02
2	2.05
3	3.03
4	4.06
5	5.04
6	6.08
7	7.23
8	8.025
9	8.025
10	8.025

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการทดลองส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

อินพุทเครื่องส่ง (Voltage)	เอาท์พุทเครื่องรับ (Voltage)
1	1.05
2	2.10
3	3.12
4	4.30
5	5.15

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

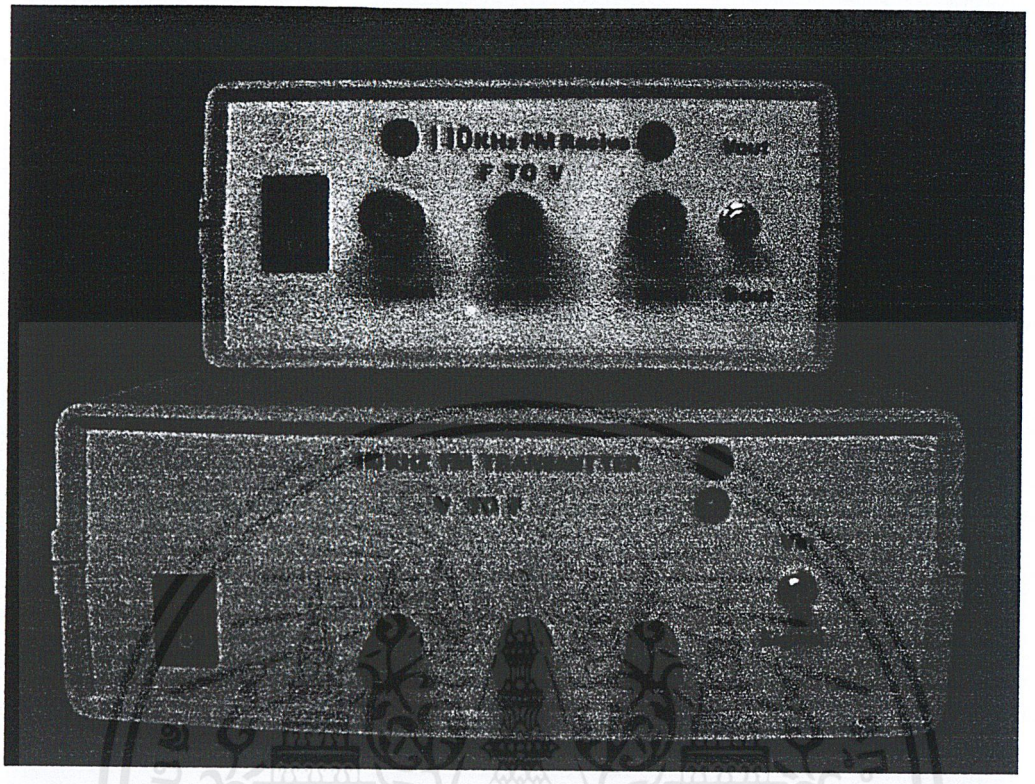
4.3 สรุปคุณสมบัติโดยรวมของชุดรับส่งสัญญาณ

เครื่องรับส่งสัญญาณตามสายไฟในอาคารนี้ สามารถรับส่งสัญญาณเสียงได้ชัดเจนไม่มีสัญญาณรบกวนในอาคาร 2 ชั้นได้

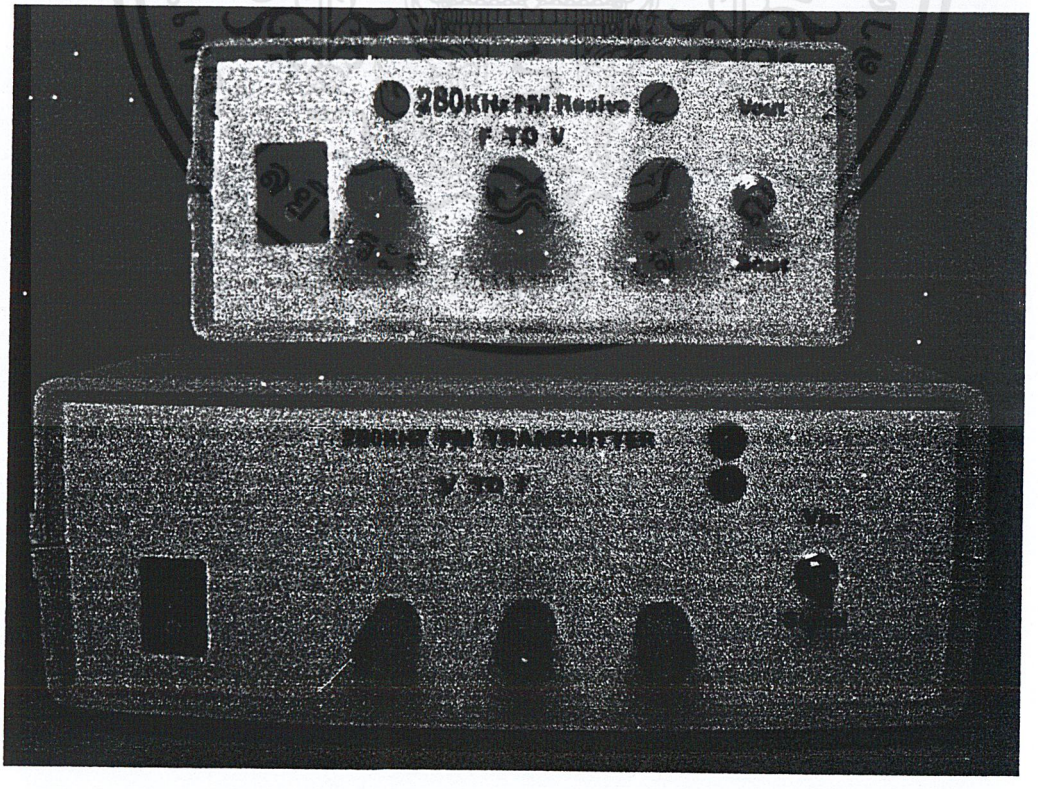
ส่วนการรับส่งสัญญาณความถี่ทั้งสองชุดรับส่ง (1) ชุดรับส่งสัญญาณที่ 110 KHz สามารถรับส่งสัญญาณได้ชัดเจนพอสมควร และมีแบนด์วิดในการรับส่งสัญญาณ ตั้งแต่ 10 HZ ถึง 5 KHZ (2) ชุดรับส่งสัญญาณที่ 280 KHz สามรถรับส่งสัญญาณได้ชัดเจนมาก และมีแบนด์วิดในการรับส่งสัญญาณ ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 20 KHz

และในการรับส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถรับส่งแรงดันได้ที่ 1 ถึง 5 โวลท์เตจ มีความผิดพลาดบ้างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

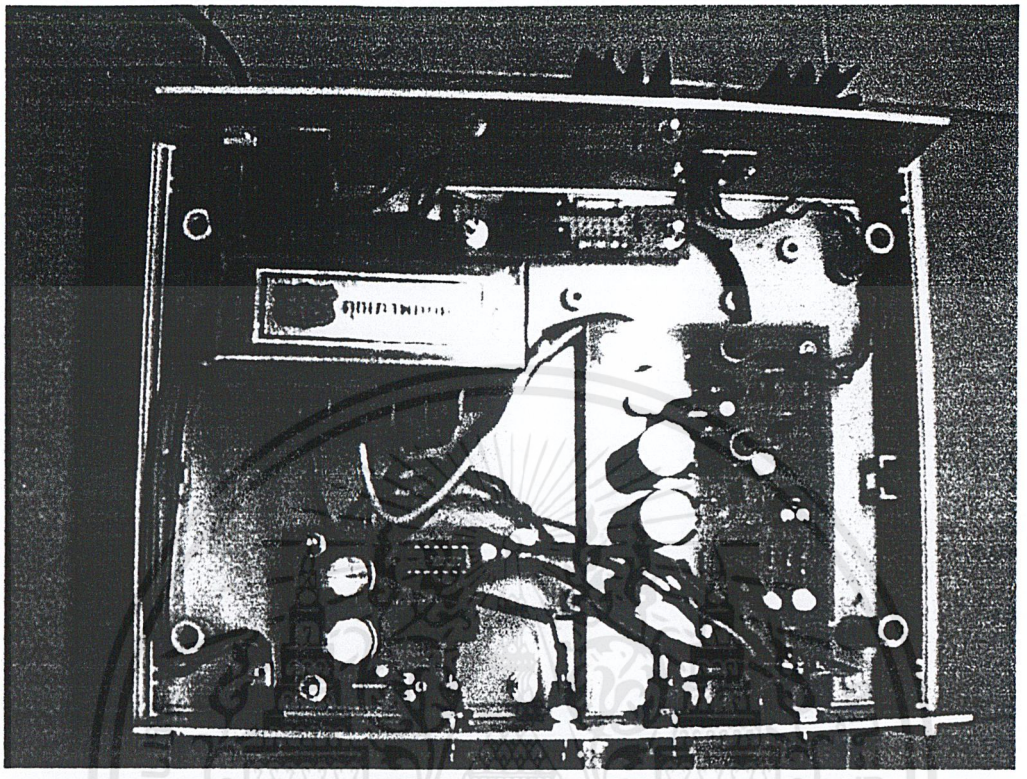


รูปที่ 4.17 ชุดรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 110 KHz

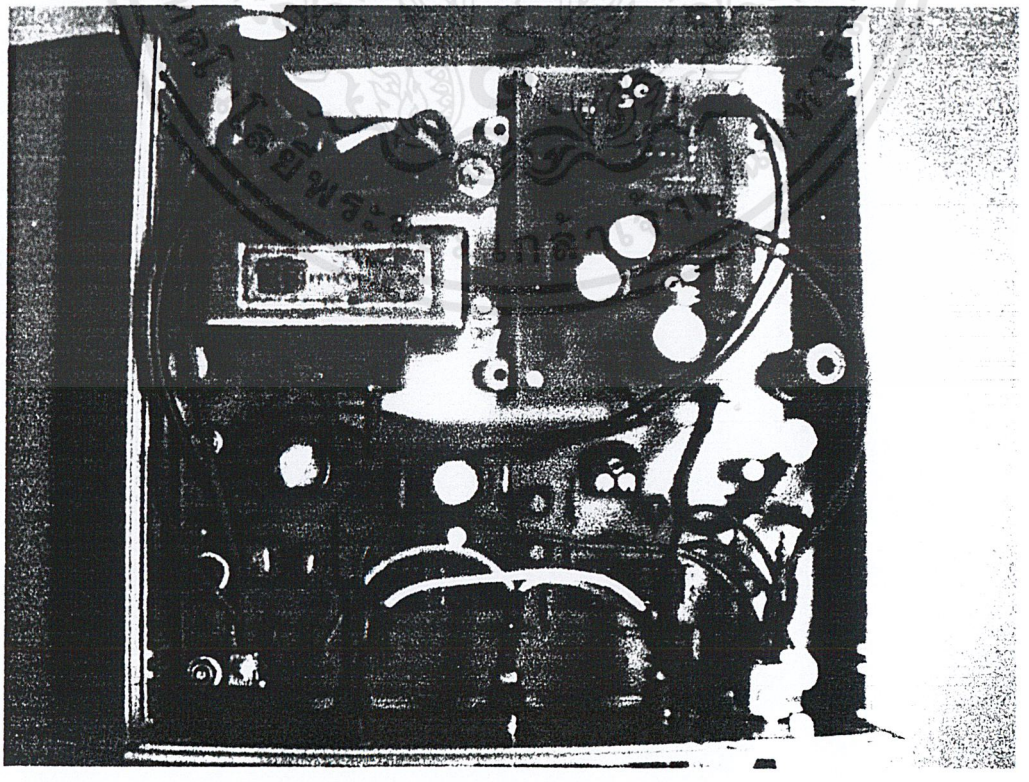


รูปที่ 4.18 ชุดรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 280 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

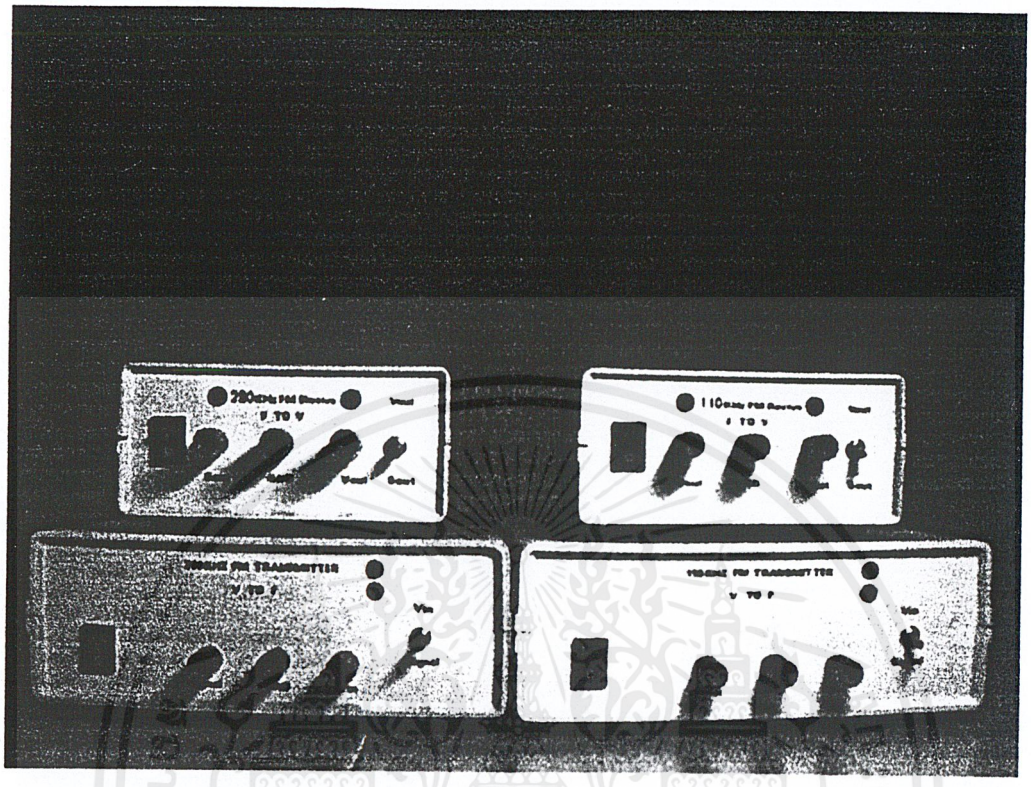


รูปที่ 4.19 ภายในเครื่องชุดส่งสัญญาณ



รูปที่ 4.20 ภายในเครื่องชุดรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ชุดรับส่งสัญญาณทั้ง 2 ย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

November 1994

LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

General Description

The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of −5V, −8V, −12V, and −15V. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a resistor divider. The low quiescent current drain of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

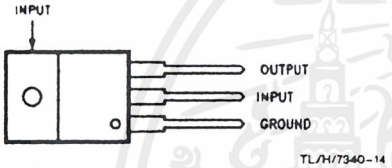
For applications requiring other voltages, see LM137 data sheet.

Features

- Thermal, short circuit and safe area protection
- High ripple rejection
- 1.5A output current
- 4% tolerance on preset output voltage

Connection Diagrams

TO-220 Package



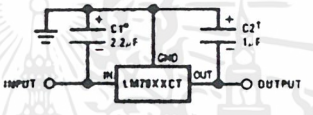
TL/H/7340–14

Front View

Order Number LM7905CT, LM7912CT or LM7915CT
See NS Package Number TO3B

Typical Applications

Fixed Regulator



TL/H/7340–3

*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25 μF aluminum electrolytic may be substituted.

†Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25 μF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100 μF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

©1995 National Semiconductor Corporation

RRD-B30M115/Printed in U. S. A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

February 2000

LM340/LM78MXX Series 3-Terminal Positive Regulators

General Description

The LM140/LM340A/LM340/LM7800C monolithic 3-terminal positive voltage regulators employ internal current-limiting, thermal shutdown and safe-area compensation, making them essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1.0A output current. They are intended as fixed voltage regulators in a wide range of applications including local (on-card) regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. In addition to use as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents.

Considerable effort was expended to make the entire series of regulators easy to use and minimize the number of external components. It is not necessary to bypass the output, although this does improve transient response. Input bypassing is needed only if the regulator is located far from the filter capacitor of the power supply.

The 5V, 12V, and 15V regulator options are available in the steel TO-3 power package. The LM340A/LM340/LM7800C series is available in the TO-220 plastic power package, and the LM340-5.0 is available in the SOT-223 package, as well as the LM340-5.0 and LM340-12 in the surface-mount TO-263 package.

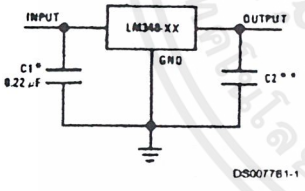
Features

- Complete specifications at 1A load
- Output voltage tolerances of ±2% at T_j = 25˚C and ±4% over the temperature range (LM340A)
- Line regulation of 0.01% of V_{OUT}/V of ΔV_{IN} at 1A load (LM340A)
- Load regulation of 0.3% of V_{OUT}/A (LM340A)
- Internal thermal overload protection
- Internal short-circuit current limit
- Output transistor safe area protection
- P+ Product Enhancement tested

Device	Output Voltages	Packages
LM140	5, 12, 15	TO-3 (K)
LM340A/LM340	5, 12, 15	TO-3 (K), TO-220 (T), SOT-223 (MP), TO-263 (S) (5V and 12V only)
LM7800C	5, 8, 12, 15	TO-220 (T)

Typical Applications

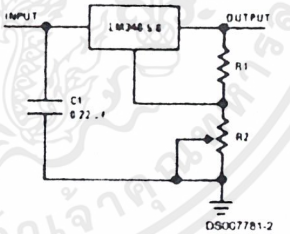
Fixed Output Regulator



*Required if the regulator is located far from the power supply filter.

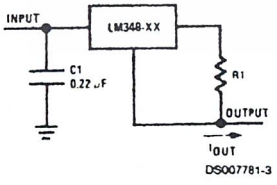
**Although no output capacitor is needed for stability, it does help transient response. (If needed, use 0.1 µF, ceramic disc).

Adjustable Output Regulator



V_{OUT} = 5V + (5V/R1 + I_Q) R2 5V/R1 > 3 I_Q.
load regulation (L_r) ≈ [(R1 + R2)/R1] (L_r of LM340-5).

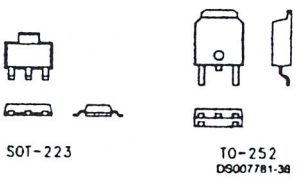
Current Regulator



$$I_{OUT} = \frac{V2\text{-}3}{R1} + I_Q$$

ΔI_Q = 1.3 mA over line and load changes.

Comparison between SOT-223 and D-Pak (TO-252) Packages



Scale 1:1

© 2000 National Semiconductor Corporation DS007781

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

November 1994

LM747
Dual Operational Amplifier

General Description

The LM747 is a general purpose dual operational amplifier. The two amplifiers share a common bias network and power supply leads. Otherwise, their operation is completely independent.

Additional features of the LM747 are: no latch-up when input common mode range is exceeded, freedom from oscillations, and package flexibility.

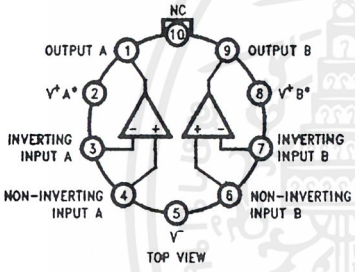
The LM747C/LM747E is identical to the LM747/LM747A except that the LM747C/LM747E has its specifications guaranteed over the temperature range from 0°C to +70°C instead of −55°C to +125°C.

Features

- No frequency compensation required
- Short-circuit protection
- Wide common-mode and differential voltage ranges
- Low power consumption
- No latch-up
- Balanced offset null

Connection Diagrams

Metal Can Package

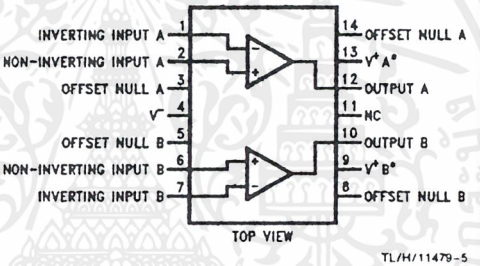


TL/H/11479–4

Order Number LM747H
See NS Package Number H10C

*V+A and V+B are internally connected.

Dual-In-Line Package



TL/H/11479–5

Order Number LM747CN or LM747EN
See NS Package Number N14A

©1995 National Semiconductor Corporation

RRD-B30M115/Printed in U. S. A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

August 2000

LM386
Low Voltage Audio Power Amplifier

General Description

The LM386 is a power amplifier designed for use in low voltage consumer applications. The gain is internally set to 20 to keep external part count low, but the addition of an external resistor and capacitor between pins 1 and 8 will increase the gain to any value from 20 to 200.

The inputs are ground referenced while the output automatically biases to one-half the supply voltage. The quiescent power drain is only 24 milliwatts when operating from a 6 volt supply, making the LM386 ideal for battery operation.

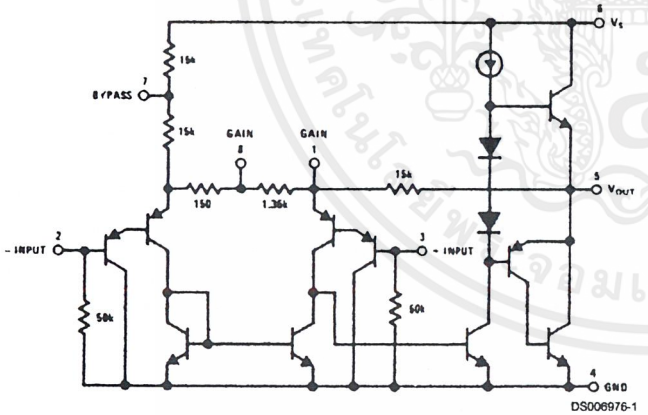
Features

- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range: 4V–12V or 5V–18V
- Low quiescent current drain: 4mA
- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion: 0.2% (A_V = 20, V_S = 6V, R_L = 8Ω, P_O = 125mW, f = 1kHz)
- Available in 8 pin MSOP package

Applications

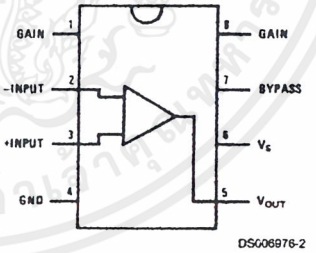
- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

Equivalent Schematic and Connection Diagrams



DS006976-1

Small Outline, Molded Mini Small Outline, and Dual-In-Line Packages



DS006976-2

Top View
Order Number LM386M-1, LM386MM-1, LM386N-1, LM386N-3 or LM386N-4
See NS Package Number M08A, MUA08A or N08E

© 2000 National Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

June 2000

LM2907/LM2917
Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CE} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$
- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

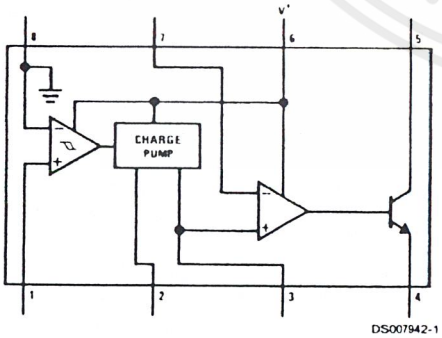
Features

- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs
- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- ±0.3% linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

Applications

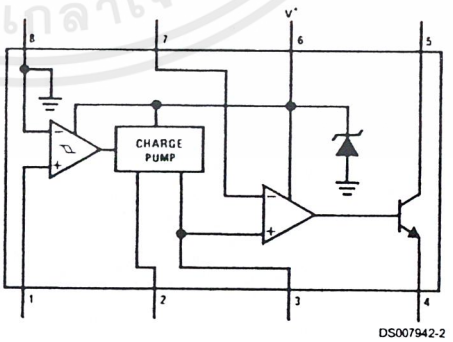
- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

Block and Connection Diagrams Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views



DS007942-1

Order Number LM2907M-8 or LM2907N-8
See NS Package Number M08A or N08E



DS007942-2

Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8
See NS Package Number M08A or N08E

© 2001 National Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

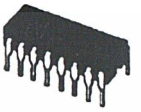
SGS-THOMSON MICROELECTRONICS

HCC/HCF4046B

MICROPOWER PHASE-LOCKED LOOP

- QUIESCENT CURRENT SPECIFIED TO 20V FOR HCC DEVICE
- VERY LOW POWER CONSUMPTION : 100μW (TYP.) AT VCO f_o = 10kHz, V_{DD} = 5V
- OPERATING FREQUENCY RANGE : UP TO 1.4MHz (TYP.) AT V_{DD} = 10V
- LOW FREQUENCY DRIFT : 0.06%/°C (typ.) AT V_{DD} = 10V
- CHOICE OF TWO PHASE COMPARATORS : 1) EXCLUSIVE - OR NETWORK 2) EDGE-CONTROLLED MEMORY NETWORK WITH PHASE-PULSE OUTPUT FOR LOCK IN-DICATION
- HIGH VCO LINEARITY : 1% (TYP.)
- VCO INHIBIT CONTROL FOR ON-OFF KE-YING AND ULTRA-LOW STANDBY POWER CONSUMPTION
- SOURCE-FOLLOWER OUTPUT OF VCO CONTROL INPUT (demod. output)
- ZENER DIODE TO ASSIST SUPPLY REGULA-TION
- 5V, 10V AND 15V PARAMETRIC RATING
- INPUT CURRENT OF 100nA AT 18V AND 25°C FOR HCC DEVICE
- 100% TESTED FOR QUIESCENT CURRENT
- MEETS ALL REQUIREMENTS OF JEDEC TEN-TATIVE STANDARD N°. 13A, "STANDARD SPECIFICATIONS FOR DESCRIPTION OF "B" SERIES CMOS DEVICES"

EY
(Plastic Package)



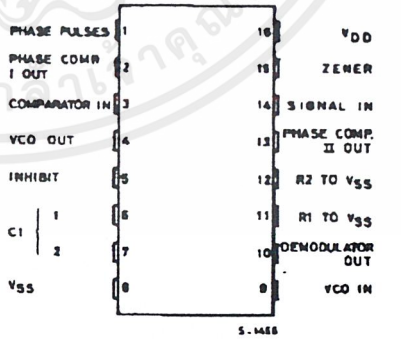
F
(Ceramic Package)

C1
(Chip Carrier)

ORDER CODES :

HCC4046BF HCF4046BEY
HCF4043BC1

PIN CONNECTIONS



DESCRIPTION

The **HCC4046B** (extended temperature range) and **HCF4046B** (intermediate temperature range) are monolithic integrated circuits, available in 16-lead dual in-line plastic or ceramic package. The **HCC/HCF4046B** COS/MOS Micropower Phase-Locked Loop (PLL) consists of a low-power, linear voltage-controlled oscillator (VCO) and two different phase comparators having a common signal-input amplifier and a common comparator input. A 5.2V zener diode is provided for supply regulation if necessary.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

May 1999

LM565/LM565C Phase Locked Loop

General Description

The LM565 and LM565C are general purpose phase locked loops containing a stable, highly linear voltage controlled oscillator for low distortion FM demodulation, and a double balanced phase detector with good carrier suppression. The VCO frequency is set with an external resistor and capacitor, and a tuning range of 10:1 can be obtained with the same capacitor. The characteristics of the closed loop system — bandwidth, response speed, capture and pull in range — may be adjusted over a wide range with an external resistor and capacitor. The loop may be broken between the VCO and the phase detector for insertion of a digital frequency divider to obtain frequency multiplication.

The LM565H is specified for operation over the −55°C to +125°C military temperature range. The LM565CN is specified for operation over the 0°C to +70°C temperature range.

Features

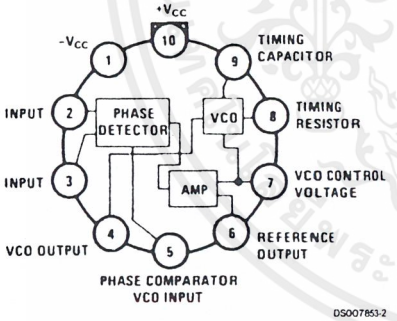
- 200 ppm/°C frequency stability of the VCO
- Power supply range of ±5 to ±12 volts with 100 ppm/% typical
- 0.2% linearity of demodulated output
- Linear triangle wave with in phase zero crossings available
- TTL and DTL compatible phase detector input and square wave output
- Adjustable hold in range from ±1% to > ±60%

Applications

- Data and tape synchronization
- Modems
- FSK demodulation
- FM demodulation
- Frequency synthesizer
- Tone decoding
- Frequency multiplication and division
- SCA demodulators
- Telemetry receivers
- Signal regeneration
- Coherent demodulators

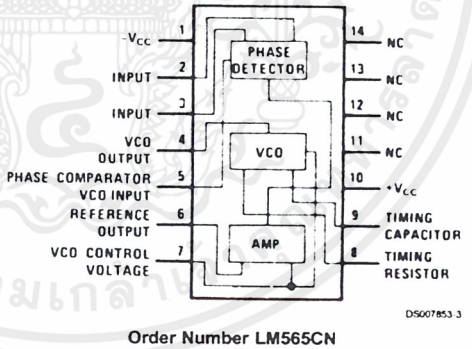
Connection Diagrams

Metal Can Package



Order Number LM565H
See NS Package Number H10C

Dual-in-Line Package



Order Number LM565CN
See NS Package Number N14A

© 1999 National Semiconductor Corporation

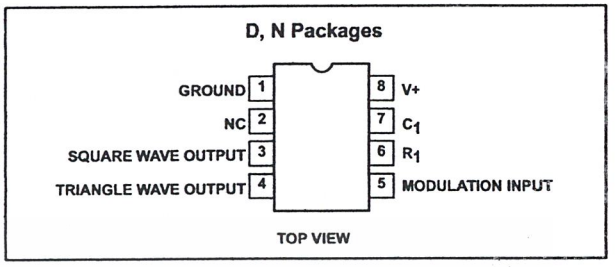
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Function generator — NE/SE566

DESCRIPTION

The NE/SE566 Function Generator is a voltage-controlled oscillator of exceptional linearity with buffered square wave and triangle wave outputs. The frequency of oscillation is determined by an external resistor and capacitor and the voltage applied to the control terminal. The oscillator can be programmed over a ten-to-one frequency range by proper selection of an external resistance and modulated over a ten-to-one range by the control voltage, with exceptional linearity.

PIN CONFIGURATIONS



FEATURES

- Wide range of operating voltage (up to 24V; single or dual)
- High linearity of modulation
- Highly stable center frequency (200ppm/°C typical)
- Highly linear triangle wave output
- Frequency programming by means of a resistor or capacitor, voltage or current
- Frequency adjustable over 10-to-1 range with same capacitor

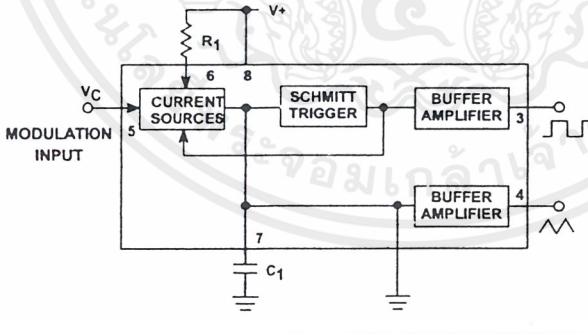
APPLICATIONS

- Tone generators
- Frequency shift keying
- FM modulators
- Clock generators
- Signal generators
- Function generators

ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0 to +70°C	NE566D	0174C
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to +70°C	NE566F	0581B
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to +70°C	NE566N	0404B
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE566N	0404B

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Order this document by MC1350/D

MOTOROLA

MC1350

Monolithic IF Amplifier

The MC1350 is an integrated circuit featuring wide range AGC for use as an IF amplifier in radio and TV over an operating temperature range of 0° to +75°C.

- Power Gain: 50 dB Typ at 45 MHZ
  50 dB Typ at 58 MHZ
- AGC Range: 60 dB Min, DC to 45 MHz
- Nearly Constant Input & Output Admittance over the Entire AGC Range
- Y_{21} Constant (–3.0 dB) to 90 MHz
- Low Reverse Transfer Admittance: < < 1.0 µmho Typ
- 12 V Operation, Single–Polarity Power Supply

IF AMPLIFIER

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626

D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO–8)

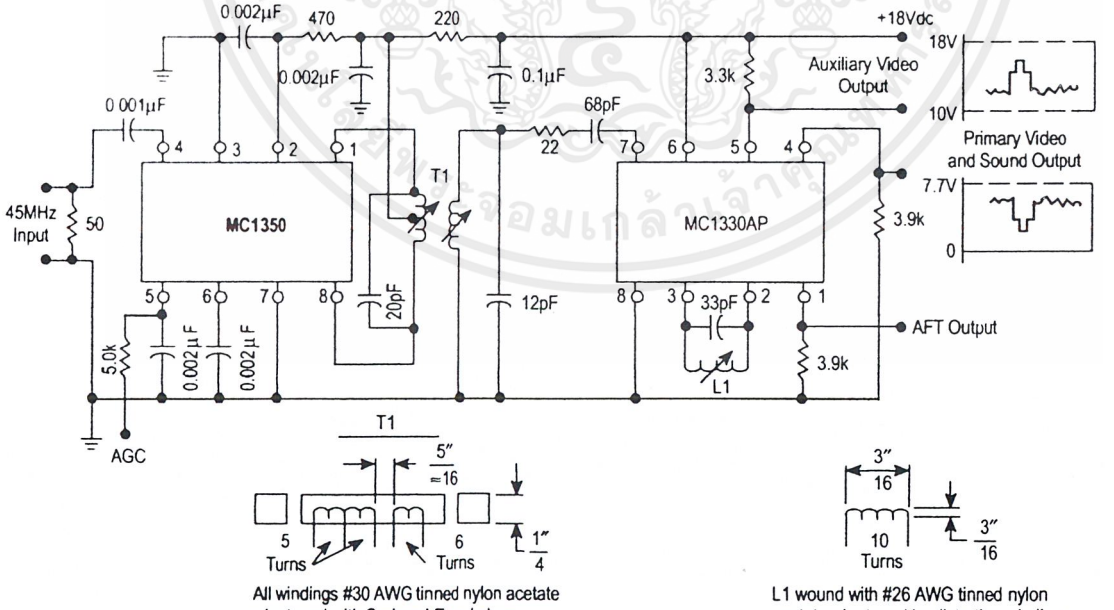
MAXIMUM RATINGS (T_A = +25°C, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V^+	+18	Vdc
Output Supply Voltage	V_1, V_8	+18	Vdc
AGC Supply Voltage	V_{AGC}	V^+	Vdc
Differential Input Voltage	V_{in}	5.0	Vdc
Power Dissipation (Package Limitation) Plastic Package Derate above 25°C	P_D	 625 5.0	 mW mW/°C
Operating Temperature Range	T_A	0 to +75	°C

ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
MC1350P	T_A = 0° to +75°C	Plastic DIP
MC1350D		SO–8

Figure 1. Typical MC1350 Video IF Amplifier and MC1330 Low–Level Video Detector Circuit



All windings #30 AWG tinned nylon acetate wire tuned with Carbonyl E or J slugs.

L1 wound with #26 AWG tinned nylon acetate wire tuned by distorting winding.

© Motorola, Inc. 1996

Rev 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือจากอาจารย์และบุคคลหลายท่าน

ขอขอบคุณอาจารย์ รศ.ดร. วันชัย ริ้วรุจา อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์ และอาจารย์ ถาวร เบญจนราสุทธิ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนวทางในการทำงานและแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อย่างทุ่มเท ตลอดจนสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงาน และปริญญานิพนธ์และความเอาใจใส่อย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ สำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำงานและตลอดเวลาในการเรียน 3 ปีที่ลาดกระบัง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับประสบการณ์ชีวิต ความรู้ และทุกสิ่งทุกอย่างที่ไม่สามารถหาจากรั้วมหาวิทยาลัยอื่นได้ตลอดระยะเวลา 3 ปีเต็ม

ขอขอบคุณสำหรับบุญคุณอันยิ่งใหญ่ที่สุดคือ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว อันแสนที่จะอบอุ่น ที่คอยห่วงใย และให้กำลังใจเราทั้งสองคน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง แก่พวกเราเป็นอย่างดีเสมอมาไม่เคยเปลี่ยนแปลง

นพรัตน์ สามิตร

นันทศักดิ์ ศรีทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ก. เอกสารอ้างอิงที่เป็นวารสาร

1. ชวลิต สวรรค์ดำรง, " ส่งเสียงตามสาย(เอซี) ระบบ AM/FM ตอนที่ 1 สร้างเครื่องส่งกำลังสูง", วารสารเซมิคอนดัคเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 108, 2534, หน้า 42-49.
2. ไพรัช มูลนานเที่ยง, " ส่งเสียงตามสาย(เอซี) ระบบ AM/FM ตอนที่ 2 สร้างเครื่องรับแยกอิสระทั้งระบบ AM และ ระบบ FM", วารสารเซมิคอนดัคเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 109, 2534, หน้า 34-40.
3. ไกรวุฒิ โรจน์ประเสริฐ, " หูฟังไร้สายสเตอริโอ ระบบอินฟราเรด", วารสารเซมิคอนดัคเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 137, 2537, หน้า 32-38.

ข. เอกสารอ้างอิงที่เป็นหนังสือ

1. ชูชัย ธนสารตั้งเจริญ, " ระบบสื่อสารวิทยุ", ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2536.
2. ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์, "พื้นฐานการสื่อสาร", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533.
3. ร.ต.อ. สุชาติ กังวารจิตต์, "เครื่องรับส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร", ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2538.
4. ดร. โคทม อารียา, "วงจรอิเล็กทรอนิคส์", ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2529.
5. Louis E. Frenzel, "Communication Electronics", McGraw-Hill, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้